

**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



Ernani Vassoler Rodrigues

## **Atividades para o aprendizado de Acústica**

Vitória, ES

2016

Universidade Federal do Espírito Santo  
Centro de Ciências Exatas  
Programa de Pós-graduação em Ensino de Física

Ernani Vassoler Rodrigues

## **Atividades para o aprendizado de Acústica**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Giuseppe Gava Camiletti

Vitória, ES

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

R696a Rodrigues, Ernani Vassoler, 1980-  
Atividades para o aprendizado de acústica / Ernani Vassoler  
Rodrigues. – 2016.  
179 f. : il.

Orientador: Giuseppi Gava Camiletti.  
Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências  
Exatas.

1. Física - Estudo e ensino. 2. Acústica. 3. Ecologia  
conceitual. I. Camiletti, Giuseppi Gava, 1976-. II. Universidade  
Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Exatas. III. Título.

CDU: 53

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA  
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

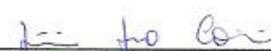
**"Atividades para o Aprendizado de Acústica"**

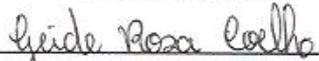
**Ernani Vassoler Rodrigues**

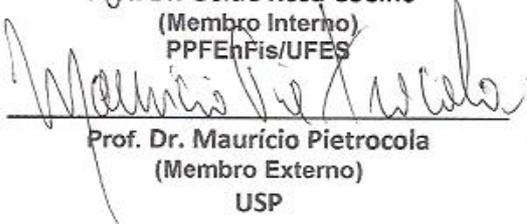
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física - Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Sociedade Brasileira de Física em parceria com a Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em 03 de Junho de 2016.

**Comissão Examinadora**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Giuseppe Gava Camiletti  
(Orientador)  
PPFEnFis/UFES

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Geide Rosa Coelho  
(Membro Interno)  
PPFEnFis/UFES

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mauricio Pietrocola  
(Membro Externo)  
USP

# Agradecimentos

Expresso minha gratidão a tantos que contribuíram de uma forma ou de outra para conclusão dessa dissertação.

À minha família: Carol, por ser meu ponto de partida e de chegada, meu porto seguro e minha referência acadêmica, meu pai, Ilso e minha mãe, Jodithe, pelo infinito zelo, minhas irmãs, Elisângela e Elaine, meus vínculos mais fortes, meu cunhado, Omar, o irmão que a vida me presenteou, meus sobrinhos, de sangue, Henrique e Maria Vitória, e do coração, Helena(s) e Mariana, que vocês sejam as novas mentes inquietas num mundo sedento de intelectualidade, meu sogro, João e minha sogra, Domingas, por tamanho carinho e a tantos outros familiares não citados nominalmente que sempre me apoiam e por mim torcem.

Aos meus amigos: Fábio (*in memoriam*) e todos do clã ETFES, Wilson, parceiro de sala de aula, de estrada e de laboratório, a todos os meus amigos de turma do PPGEnFis, por esses anos inesquecíveis, Hillary Swamson por todas as discussões e pela oportunidade de vivenciar uma realidade escolar tão diferente e interessante, Andinho, desde sempre junto na correria, Borginho, que desde muito cedo, viu em mim um professor.

Aos meus tutores acadêmicos: Prof. Giuseppe Camiletti pela orientação, dedicação e pela abertura para que eu trilhasse meus próprios passos, Prof. Laércio Ferracioli, por sempre me empurrar pra frente, por seu incessável ânimo, Prof. Andrea DiSessa por me receber de braços abertos e por tudo que aprendi e à Deirdre Araújo, por me abrir as portas do *Exploratorium* e me mostrar onde a Ciência e a Arte comungam a alegria.

Aos alunos que, carinhosamente, se dispuseram a ser sujeitos de pesquisa.

Às instituições que permitiram a existência deste trabalho: à Sociedade Brasileira de Física (SBF), ao Programa de Pós Graduação em Ensino de Física da UFES (PPGEnFís-UFES) e ao UP - Centro Educacional por me ceder o tempo e o espaço necessários.

*“Amadurecemos de maneira muito lenta e não nos aproximamos de nada assemelhado à competência adulta por muitos e muitos anos. É óbvio que temos de obter alguma grande vantagem com esse investimento direto, não só custoso, como também arriscado, e conseguimos: ela se chama cultura.”*

*(Ramachandran, V.S.)*

# Resumo

Neste trabalho, relatamos a elaboração, aplicação e avaliação de um produto educacional para um grupo de alunos (N=28) da 3ª série do ensino médio de uma escola da rede privada de ensino, na cidade de Vitória, Espírito Santo, bem como a avaliação do ganho dos alunos na aprendizagem dos conceitos propostos e da viabilidade do produto educacional. As atividades do produto contemplam conceitos básicos em Acústica e propõem a utilização de *smartphones*, placa controladora Arduino e a construção de instrumentos musicais e transdutores rudimentares. O trabalho é orientado na perspectiva de DiSessa e colaboradores para a teoria da Mudança Conceitual. DiSessa sugere que conceitos mudam por uma constante revisão, adequação ou rejeição de elementos no todo do sistema do conhecimento. A coordenação desses fragmentos permite a construção de uma rede de inferências que é utilizada para prever ou explicar fenômenos físicos. Os processos de avaliação utilizados foram: análise das habilidades – via modelo de Rasch – e do senso de autoeficácia em testes objetivos; mapas mentais; atividades com redes de associações; entrevista grupo focal. Os resultados indicam ocorrência de uma evolução (no sentido de mudança) dos conceitos pelo ganho de habilidade dos estudantes no teste objetivo, pelo aumento no índice de autoeficácia dos alunos ao responder as demandas desses testes, pela apropriação de termos inerentes à linguagem científica e pela mudança na topologia e nas frequências das conexões cientificamente aceitas nas redes de associações. Os relatos dos alunos indicaram que as atividades propostas se mostraram um produto educacional viável, com destaque para os aspectos de curiosidade e interesse das atividades, mesmo diante de algumas dificuldades apresentadas.

**Palavras-chaves:** Ecologia Conceitual. Ensino de Física. Modelos de Rasch. Mudança Conceitual. Redes.

# Abstract

In this work we report on the design, application and evaluation of an educational product to a senior high school students group (N=28) from a private institution at Vitória city, Espírito Santo state, Brazil. We also report on the students' gain in learning the proposed concepts and the evaluation of the educational product's viability. The activities include basic concepts on acoustics and usage of smartphones, Arduino as well as rudimentary musical instrument and audio speaker crafting. This work is under DiSessa's and colleagues' ideas for Conceptual Change theory. DiSessa argues that concepts change by the revision, adequacy or refutation of knowledge fragments in the conceptual system. The coordination of these fragments drives to an inferential network construct that allows one to predict or explain physical phenomena. The evaluation tools were: student's ability change – via Rasch analysis – and self-efficacy sense in multiple choice tests; mind map; word network association; and focal group interviewing. The results showed traces of concept evolution (in a sense of change), students' ability gain, increase of self-efficacy sense, acquisition of scientific language terms and change in the topology and edge's frequency based on scientific reasoning for the word network. The students' statements pointed out to activities as a viable educational tool, highlighting aspects such as curiosity and interest within the activities despite some difficulty reported.

**Keywords:** Conceptual Change. Conceptual Ecology. Network. Physics Education. Rasch Model.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de grafo com 10 vértices 16 arestas . . . . .	30
Figura 2 – Registro da realização de algumas das atividades. Leitura da frequência de vocalização (A), escolha dos canos para montagem do <i>chinelofone</i> (B), afinador de violão estroboscópico com Arduino (C), transdutor de papel (C, F) e medição dos comprimentos modais dos harmônicos na corda do violão . . . . .	38
Figura 3 – Emoticons posicionados após o enunciado e antes das alternativas de cada item dos testes pré/pós . . . . .	39
Figura 4 – Nuvem de palavras com todos os termos representados pelos alunos em Mapas Mentais pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir). . . . .	48
Figura 5 – Teste de taxa de verosimilhança de Andersen para adequação ( <i>infit</i> ) dos itens dos testes pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir) ao modelo Rasch . . . . .	48
Figura 6 – Histograma dos parâmetros $\theta$ , de habilidade na parte superior e na parte inferior a posição do parâmetro $\beta$ de dificuldade de cada item, pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir). Em destaque (“*”) aqueles que assinalaram corretamente todos os itens . . . . .	49
Figura 7 – Acima, as barras divergentes das frequências dos três emoticons, por item do teste objetivo, pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir). Abaixo, distribuição das frequências por item pré/pós, conectados pela linha pontilhada . . . . .	50
Figura 8 – Grafo do aluno A17, com as conexões feitas entre termos relacionados a Acústica, pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir) . . . . .	51
Figura 9 – Grafo com todas as conexões pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir). O diâmetro de cada vértice representa o grau desse vértice (número de arestas incidentes) e a espessura de cada aresta representa o peso da mesma . . . . .	53
Figura 10 – Porcentagem de conexões cientificamente aceitas (válidas) e conexões baseadas em concepções alternativas (equivocos) . . . . .	54
Figura 11 – Na parte superior, o teste Scree para determinação do número de fatores a extrair e na parte inferior a Análise de Componente Principal a partir dos instrumentos de coleta de dados, feitos com os dados pré/instrução, pós-instrução e ganho (diferença pós/pré) . . . . .	54

# Lista de Tabelas

Tabela 1	–	Detalhamento das estratégias utilizadas ao longo do MI, por capítulo . . .	34
Tabela 2	–	Resultados do teste de Wilcoxon não pareado para verificação do aumento no senso de autoeficácia dos alunos, pela observação de cada emoticon propostos . . . . .	50
Tabela 3	–	Resultados do teste de Wilcoxon pareado para todas as categorias registradas dos grafos, para verificação de ocorrência ou não de aumento com significância estatística na categoria . . . . .	51
Tabela 4	–	Propriedades dos grafos de associações construídos pelos alunos . . . .	52
Tabela 5	–	Termos propostos e números utilizados para codificá-los, presentes na atividade de construção de redes de associação . . . . .	53
Tabela 6	–	Resumo da distribuição dos pesos das frequências das arestas (conexões) nos grafos concatenados pré/pós . . . . .	54

# Lista de abreviaturas e siglas

ENEM	Exame Nacional do Ensino Médio
LED	Diodo Emissor de Luz
MI	Material Instrucional
MNPEF	Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Apresentação	13
1.2	Estado da arte	14
1.3	Motivação da proposta	17
1.4	Objetivos da pesquisa	19
1.4.1	Objetivo geral	19
1.4.2	Objetivos específicos	19
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>21</b>
2.1	Mudança Conceitual	21
2.1.1	Coerência vs fragmentos	22
2.1.2	Os constructos <i>P-prim</i> e Classes de Coordenação	26
2.2	Mudança Conceitual e o Ensino da Física	28
2.3	Sobre redes	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>32</b>
3.1	Sujeitos de estudo e contexto escolar	32
3.2	Sobre o produto desenvolvido	33
3.3	Coleta de dados	38
3.4	Técnicas de Análise dos dados	40
3.4.1	Nuvem de palavras dos Mapas Mentais	40
3.4.2	Análise Rasch das avaliações objetivas	41
3.4.3	Indício de senso de autoeficácia	44
3.4.4	Propriedades das redes	44
3.4.5	Análise de Componente Principal	45
3.4.6	Análise da Entrevista	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>62</b>
6.1	Quanto aos objetivos propostos	62
6.2	Relato pessoal	63
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>67</b>

<b>APÊNDICES</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE A – PRODUTO DESENVOLVIDO . . . . .</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE B – ATIVIDADE COM REDES DE ASSOCIAÇÃO . .</b>	<b>155</b>
<b>APÊNDICE C – TESTE OBJETIVO . . . . .</b>	<b>156</b>
<b>APÊNDICE D – SCRIPT DO R, UTILIZADO PARA ANÁLISE DO TESTE OBJETIVO . . . . .</b>	<b>163</b>
<b>APÊNDICE E – SCRIPT DO R, UTILIZADO PARA SENSO DE AUTOEFICÁCIA . . . . .</b>	<b>164</b>
<b>APÊNDICE F – SCRIPT DO R, PARA ANÁLISE DOS GRAFOS .</b>	<b>166</b>
<b>APÊNDICE G – SCRIPT DO R, UTILIZADO PARA TESTE SCREE E COMPONENTE PRINCIPAL . . . . .</b>	<b>170</b>
<b>APÊNDICE H – TERMO DE CONSENTIMENTO . . . . .</b>	<b>171</b>
<b>APÊNDICE I – GRAFOS CONSTRUÍDOS PELOS ALUNOS PRÉ INSTRUÇÃO E PÓS INSTRUÇÃO . . . . .</b>	<b>172</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Apresentação

O aprendizado da Física é um importante processo para que um indivíduo possa olhar e compreender a natureza que o cerca, tirando conclusões, fazendo inferências e extraindo suas próprias previsões. O conhecimento das Ciências Físicas permite também o entendimento de muitas tecnologias que nos cercam. Mais ainda, conhecer Física de maneira ampla, articulando vários domínios dessa Ciência, contribui para uma forma de pensar mais sistematizada e crítica, permitindo a percepção da natureza não como um cenário estático onde objetos apenas estão, mas sim como um complexo de elementos dinâmicos, cada qual desempenhando seu papel e, ao mesmo tempo, conectados uns aos outros, estruturando um sistema dentro do qual o indivíduo se insere, não apenas como espectador, mas também como ator e influenciador.

Neste trabalho, o tópico Acústica é utilizado como objeto de conhecimento em torno do qual foram propostas atividades que viabilizassem experiências do estudante lidando diretamente com a percepção de fenômenos naturais do som, a construção de aparelhos sonoros rudimentares, momentos de discussão e socialização de ideias e atividades individuais de lápis e papel.

Ao longo do texto, escrevo em primeira pessoa do singular sempre que me refiro a reflexões ou decisões pessoais sobre o trabalho, escrevo em primeira pessoa do plural quando me refiro a decisões tomadas em parceria com meu orientador e busco ser impessoal quando tento direcionar o foco do leitor à observação mais pura e técnica dos dados ou das situações.

Esta dissertação é fracionada em cinco capítulos, incluindo uma apresentação do estado da arte do ensino da Física no Brasil (Capítulo 1) onde situo o problema do distanciamento das pesquisas na área em relação à prática da sala de aula e pontuo algumas implementações de propostas didáticas no domínio da Acústica. Em seguida, no

Capítulo 2, trago à baila a teoria da Mudança Conceitual e especialmente a vertente dessa teoria dentro da qual as atividades foram pensadas. Então, no Capítulo 3, descrevo a realidade escolar onde o trabalho foi desenvolvido e apresento quais foram as atividades escolhidas para a construção do Material Instrucional (MI), bem como as motivações que me levaram a escolhê-las para versar sobre as coletas de dados que foram feitas e as técnicas de análises utilizada para que o leitor possa, no Capítulo 4, acessar os resultados obtidos e, no Capítulo 5, as implicações desses resultados no aprendizado dos conceitos propostos em ressonância com a fundamentação teórica utilizada. Concluo no Capítulo 6 retomando os objetivos do trabalho e relatando aquilo que extraí do processo e que orientam minhas perspectivas futuras como professor de Física e como pesquisador no ensino de Ciências.

## 1.2 Estado da arte

O ensino de Física, no Brasil, tem um marco histórico em 1837, com a fundação do Colégio Pedro II, no Rio de Janeiro e pode-se dizer que é nesse momento que efetivamente o ensino básico passa a ter Física como objeto de estudo (ROSA; ROSA, 2005). Àquela época, a Física era ensinada de maneira a preparar o aluno para exames (provas) que permitiriam ou não a continuidade dos estudos. Passados mais de 150 anos desde esses primórdios, nos deparamos com a necessidade do aprendizado de uma Física inserida num cotidiano tecnológico, imbuída de significado e voltada para a formação do indivíduo. E para esse aprendizado, é necessário um ensino da Física que não se baseie apenas na preparação para exames e que não se apoie em dogmas da prática docente. Tais dogmas, tão arraigados no ensino, já despertavam há mais de três décadas uma insatisfação, como visto na pertinente crítica à ideia de transmissão direta de conteúdo e de que o aluno seria uma tábula rasa sobre a qual deveria-se gravar o conhecimento que ele deveria ter (VILLANI, 1984). Nas palavras de Villani (1984):

*[...] aprender não é “gravar” numa tábua. Toda estrutura conceitual é dinâmica e as experiências quotidianas são um contínuo bombardeio que modifica essa estrutura com maior ou menor facilidade, dependendo dos impactos que a pessoa sofre. Algumas informações passam por nossa mente sem deixar vestígios relevantes: outras nos excitam momentaneamente, outras permanecem de forma periférica e outras modificam a*

*nossa estrutura profundamente. (VILLANI, 1984, p. 83)*

Diante do ensino dogmático, que desconsiderava a importância do conhecimento prévio do aluno, assumindo-o como uma folha em branco e diante de um ensino preparatório para avaliações, apenas, via-se a necessidade de mudanças profundas no ensino brasileiro e, num país de dimensões continentais como o Brasil, mudanças desse tipo passam por políticas públicas amplas que possam reestruturar a educação e que venham contribuir para a qualificação profissional do docente e ainda ofereçam orientações para nortear a elaboração do currículo escolar. Tais políticas e orientações são regidas pela Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB) (BRASIL, 1996) e regulamentadas nos Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 1999; BRASIL, 2002), que oferecem normativas para o currículo escolar, não com uma lista de conteúdos diretos, mas com sugestões de temas estruturadores articulando diferentes saberes, somadas à Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2016), ainda em desenvolvimento.

Alinhado à crítica de Villani e também às recomendações dos PCNs (BRASIL, 1999), Moreira (2000) sugere uma aproximação entre os saberes científicos aos elementos práticos, vivências do aluno “[...] reconhecendo-se a necessidade de que o abstrato seja construído ‘concretamente’, a partir de situações reais.” (MOREIRA, 2000, p. 98). Indo além, sobre o que poderia ser melhorado no ensino da Física, Moreira propõe:

*[...] uma mudança radical: Física não dogmática, construtivista, para a cidadania, ênfase em modelos, situações reais, elementos próximos, práticos e vivenciais do aluno, do concreto para o abstrato, atualização de conteúdos. (MOREIRA, 2000, p. 98)*

No entanto, mesmo diante das diretrizes previstas em lei, muitos desafios ainda precisam ser superados para a implementação de amplas melhorias no ensino de Física. Por exemplo, o trabalho de Rezende, Lopes e Egg (2004) mostra que o professor tem dificuldade de interpretar os documentos legais citados. Isso indica que a existência desse tipo de legislação não se reflete prontamente em melhoras do ensino.

Os avanços na pesquisa em ensino de Física são um importante arsenal à disposição do docente para sua prática, mas a implementação desses avanços em sala de aula não

vem ocorrendo como seria de se esperar. A disparidade entre o crescimento notável da pesquisa em ensino de Física e o crescimento bem mais tímido das implementações em sala de aula é relatada por [Pena \(2004\)](#). Também, [Rezende, Lopes e Egg \(2004\)](#) mostram que professores atribuem a falta de conhecimentos prévio dos alunos como causa dos problemas de ensino, embora esses mesmos professores não incluam em suas atividades, considerações sobre as concepções alternativas de seus alunos. [Rezende e Ostermann \(2005\)](#) relatam um desencontro quase total entre pesquisa em ensino de Física e prática do ensino de Física e neste trabalho, as autoras apresentam a contextualização do conteúdo como a exceção à regra. Porém, mais que apenas contextualizar conteúdos, vemos como fundamental conceber o aprendizado da Física como um processo mental articulado, complexo e fortemente influenciado pela sociedade e pela cultura na qual se insere o indivíduo. Pode-se então buscar o aprendizado da Física como uma construção mental do aluno, mas sem ignorá-lo como um ator social e assim sendo consideramos, além de processos puramente cognitivos, também a influência do grupo no indivíduo e do indivíduo no grupo, o que nos faz ver como frutífera a inclusão de atividades que permitam o compartilhamento e socialização de ideias e concepções.

Frente às dificuldades relatadas acima, trabalhos que visam o desenvolvimento no ensino de Física sob novas perspectivas, podem ser encontrados na literatura recente. No domínio de Acústica, destacamos algumas propostas de ensino, como trabalhos com os aspectos de ressonância típicos dos corpos de instrumentos musicais ([KANDUS; GUTMANN; CASTILHO, 2006](#); [DONOSO et al., 2008](#)); a montagem de um aparato que [Piubelli et al. \(2010\)](#) propõem para simulação de propagação de ondas mecânicas; [Cavalcante, Monteiro e Pontes \(2013\)](#) utilizam o Arduíno e um microfone para detectar nodos e antinodos das ondas estacionárias em tubos; [Wang e Agogino \(2013\)](#) e [Wang \(2013\)](#) propõem a construção de um alto-falante de papel, juntando fenômenos acústicos com aparatos tecnológicos de baixo custo presentes no nosso dia-a-dia; propostas de estudos dos modos normais de vibração das cordas de um violão ou de uma guitarra ([SANTOS; MOLINA; TUFALÉ, 2013](#); [CATELLI; MUSSATO, 2014a](#); [CATELLI; MUSSATO, 2014b](#)); [Vieira, Amaral e Lara \(2014\)](#) também propõem estudos de ondas estacionárias em tubos, mas com ondas

sintetizadas em aplicativos; [Rodrigues \(2014\)](#) sugere também a utilização de um programa de gravação para sintetizar ondas e discutir fenômenos acústicos e [Errobidart et al. \(2014\)](#) criam um modelo mecânico de funcionamento do ouvido humano.

Esses trabalhos apontam para o ensino da Física do som, rumos diferentes dos dogmas apresentados e mostram possibilidades de implementações viáveis em sala de aula, com montagens simples e acessíveis. Os aspectos fenomenológicos e as montagens experimentais relatadas por esses autores guiaram as atividades experimentais propostas no produto desenvolvido.

### 1.3 Motivação da proposta

A presente dissertação é resultado de um esforço para produzir, utilizar, avaliar e oferecer um conjunto de atividades educacionais que estejam muito mais próximas das novas perspectivas relatadas do que do velho (mas ainda vigente) dogma do ensino puramente expositivo. A escolha do tema emerge da minha relação pessoal com o mesmo. Sou nascido em família de músicos e desde muito novo, vivo a música de diversas formas. Meu interesse pela Física começa na adolescência, quando descobri a necessidade de se conhecer essa Ciência para se entender mais a respeito de som e de áudio.

Mesmo já lecionando Física, não deixei de ser músico e ainda atuo como tal. Talvez por isso, a dicotomia Física/Música direciona meu olhar cada vez mais para uma interface Ciência/Arte onde o tema Acústica se tornou um interessante mote para aproximar a cultura científica da cultura artística e não colocamos a criatividade e a percepção inerentes à Arte e o rigor inerente à Física em conflito. [Zanetic \(2006\)](#) levanta essa possibilidade, desde que respeitadas as características de cada domínio:

*[...] para termos uma experiência educacional explorando determinado tópico – ou um tema gerador, como diria o educador Paulo Freire – que envolve diferentes áreas do conhecimento, é fundamental que se respeitem as características de cada uma delas. Ou seja, no caso de Ciência e Arte, não podemos simplesmente identificar a imaginação poética com a racionalidade científica. (ZANETIC, 2006, p. 51)*

Buscamos uma aproximação do rigor científico com a percepção de fenômenos da

vida cotidiana dos alunos. Pela porta de entrada de informações nos seres humanos, a percepção – via nossos sentidos – dispara processos neurológicos e cognitivos complexos, ainda não totalmente elucidados. Na percepção humana encontra-se uma região híbrida aliando um saber científico, quando orientamos nossa percepção para alguma ligação com conhecimentos estruturados dentro de uma racionalidade científica, a um saber que poderíamos chamar de *perceptivo* ou sensorial, quando somos estimulados de alguma forma por algum acontecimento no mundo externo a nós e absorvemos na subjetividade os *qualia* desse estímulo.

O que guardamos em nós desses dois lados que Zanetic sugere serem respeitados, pode construir não um conflito, mas um apoio para o entendimento da natureza. [Pietrocola \(2004\)](#) sugere que os domínios Arte e Ciência encontram uma aproximação na imaginação, algo fundamental aos dois terrenos. Tanto na criação e expressão artísticas, quanto na produção e organização de ideias científicas, tem-se na imaginação – para Pietrocola, mais até do que na racionalidade – a essência humana que não só nos difere de outras espécies, mas também nos permite criar e organizar ideias para representação do mundo físico. Na interface Arte/Ciência, imaginação e curiosidade podem ser processadas no decorrer da aprendizagem que “[...] nesse caso é atividade prazerosa, pois engaja-se não somente a razão, mas também as emoções. Lidar com a imaginação acarreta emoções que permanecem vivas em nossa mente.” ([PIETROCOLA, 2004](#), p. 131).

Nossa percepção, bem como os sentimentos desencadeados, ocorrem sobre a ponte que liga o mundo físico ao mundo interior de cada um. Por isso, é fundamental que no ensino da Física, imaginação, sensações e discussões sejam o grande veículo de construção de um senso de mecanismo dos fenômenos naturais. Caso contrário, corre-se o risco de se reduzir o conhecimento da Física a um conjunto de frases de efeito ou relações matemáticas, transferindo o problema das dificuldades de aprendizado para as dificuldades de compreensão das relações matemáticas, algo já criticado por [Pietrocola \(2002\)](#), subvertendo o papel da Matemática e da Física no processo.

Por exemplo, buscaremos uma discussão sobre harmônicos em cordas que não se dê pelo bombardeio de equações específicas, sacramentadas por cientistas que viveram

intensamente a percepção desses fenômenos. Como esperar que tais relações matemáticas sejam recebidas da mesma forma por um aluno que não tenha tido a mesma vivência que o cientista teve ou, muito pior, que nunca tenha sequer ouvido a diferença que há entre o som da mesma corda um violão vibrando em harmônicos de ordens diferentes?

É sob esse olhar que buscamos desenvolver atividades que estimulassem o tanto quanto possível os sentidos dos alunos no domínio da Acústica, que permitissem a expressão e, implicitamente, a imaginação desses alunos durante o processo de ensino e que oferecessem ao aluno a observação crítica dos fenômenos pela percepção do som emitidos por diferentes fontes, desde instrumentos musicais até seus aparelhos de uso cotidiano desses alunos.

## 1.4 Objetivos da pesquisa

### 1.4.1 Objetivo geral

Tendo apresentado o problema e as potencialidades que as iniciativas relatadas oferecem, este trabalho tem por objetivo geral:

Desenvolver um produto educacional em forma de livreto contendo uma série de atividades para o aprendizado de conceitos em Acústica e avaliar a viabilidade da utilização desse produto como Material Instrucional (MI) direcionado a alunos do ensino médio.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar as atividades propostas no MI, contemplando o uso de aplicativos de *smartphones*, o manuseio de instrumentos musicais e a construção de equipamentos de baixo custo, com um grupo de alunos do Ensino Médio;
- Avaliar a apropriação de termos cientificamente aceitos, no domínio da Acústica;
- Verificar a ocorrência de mudanças nos traços latentes de habilidades dos alunos;
- Avaliar a utilização de atividades com redes de associação como forma alternativa de acesso a parte do sistema conceitual do aluno em Acústica;

- Relacionar as diferentes técnicas de avaliação utilizadas pré/pós;
- Obter *feedback* dos alunos, após a realização do conjunto de atividades, para validação e refinamento do MI.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Mudança Conceitual

O quadro teórico dentro do qual esta dissertação foi estruturada e que guiou a elaboração e aplicação das atividades do produto é chamado de Mudança Conceitual. Por ser um arcabouço teórico e campo de pesquisa amplos, é necessário que inicialmente lancemos um olhar genérico sobre algumas das formas de se pensar essa teoria, algo que faço inicialmente nesta sessão, para então discorrer com um pouco mais de detalhes sobre a linha de pensamento dessa teoria que foi utilizada por nós.

Em sua oportuna revisão, DiSessa (2006) sugere que olhemos o nome dado a essa teoria, Mudança Conceitual, e suas implicações etimológicas: o primeiro termo, *mudança*, indica que estudante não é pensado como uma mente em branco, uma tábula rasa onde o conhecimento será escrito, mas sim como alguém que traz um conjunto de conhecimentos prévios que devem ser considerados no processo educacional que promoverá a mudança em alguma entidade pré-existente; depois, o termo *conceitual* – a entidade de mudança – que, de maneira menos literal, é encontrado sob muitas visões que variam a definição da unidade conceito e, dependendo da perspectiva teórica, remete a diferentes atributos tais como crença, ontologia, teoria, estrutura, esquema, dentre outros. Mais à frente, iremos mais fundo ao descrever para qual entidade de mudança estamos olhando.

Pode-se dizer que a história da Mudança Conceitual tem início com as obras de Jean Piaget. Contrariamente às ideias comportamentalistas estabelecidas à época, baseadas em estímulo/resposta, em associações diretas, Piaget (1964) sugere que a relação fundamental do aprendizado seria uma assimilação de novos conceitos à estrutura existente em indivíduos num estágio adequado de desenvolvimento. Na definição dada por Piaget, tem-se:

*[...] assimilação como a integração de qualquer tipo de realidade à estrutura e é essa assimilação que me parece ser fundamental no aprendizado,*

*bem como me parece ser a relação fundamental do ponto de vista pedagógico ou das aplicações didáticas. (PIAGET, 1964, p 184, tradução nossa)*

Ferracioli (1999) sintetiza que para Piaget, o processo de construção de estruturas e esquemas mentais ocorre pela experiência do indivíduo com o mundo:

*[...] a criança procura coordenar e integrar as informações que recebe pelos sentidos e, restringindo-se ao real, elabora o conjunto de subestruturas cognitivas ou esquemas de assimilação, que servirão de base para a construção das futuras estruturas decorrentes do desenvolvimento ulterior. (FERRACIOLI, 1999, p. 184)*

Para Munari (2010), a noção de que novos conhecimentos devem ser construídos sobre conhecimentos prévios (construtivismo), guia diferentes concepções construtivistas:

*[...] cabe reconhecer duas tendências principais: uma que entende a cultura como um tipo de edifício que se constrói progressivamente, segundo um procedimento bem programado; e outra que a considera antes como uma espécie de rede, dotada de certa plasticidade e de uma capacidade de auto-organização e, por conseguinte, o processo de construção ou de reconstrução pode ser provocado ou facilitado. (MUNARI, 2010, p. 24)*

Podemos reconhecer muito da essência do construtivismo na Mudança Conceitual. Porém, sendo um vasto campo de entendimento, é possível encontrar a teoria da Mudança Conceitual concebida sob diferentes correntes filosóficas e epistemológicas, às vezes conflitantes.

### 2.1.1 Coerência vs fragmentos

Duas linhas principais direcionam a forma de se conceber uma Mudança Conceitual (DISESSA, 2006). Numa delas, muito influenciada pelo trabalho “A estrutura das revoluções científicas” de Kuhn (1962), uma mudança de conceito funciona para o indivíduo como uma ruptura de paradigma. Esse paradigma seria uma matriz de entendimentos coerente e bem estruturada, com seus próprios termos e significados, tal que um novo paradigma seria incomensurável com um antigo e eles não poderiam sequer serem discutidos sob os mesmos termos.

Sob a corrente epistemológica de Kuhn, num análogo às rupturas de paradigmas, surgem importantes trabalhos de pesquisa acerca da Mudança Conceitual. Se o processo de mudança assume uma entidade preexistente a ser modificada, não é de se estranhar o surgimento de trabalhos visando levantar quais seriam esses conhecimentos previamente estruturados na mente dos alunos para assim identificar essa entidade. Tais conhecimentos prévios podem receber muitos rótulos como *concepção alternativa*, *concepção cotidiana*, *pré-concepção*, *teoria naïve*, *equivoco*<sup>1</sup>, dentre outros, variando entre autores. Dos trabalhos com levantamentos desse tipo, podemos destacar *equivocos* com relação a força e a segunda lei de Newton (CLEMENT, 1982), sobre inércia e movimento (MCCLOSKEY, 1983) e em áreas da biologia e da matemática (CONFREY, 1990). O sentido dado ao termo *equivoco* ao longo dessa dissertação, é o mesmo dado nesses trabalhos.

De fato, levantamentos sobre conhecimentos prévios são um importante ponto de partida. Porém, a partir daí, as implicações instrucionais demandam entendimentos sobre como promover a mudança. Assumindo uma estrutura coerente de conceitos prévios (paradigma), Carey (1999) se apropria da ideia de incomensurabilidade para propor que:

[...] a mudança ocorre num contínuo entre dois tipos: do enriquecimento do conceito, mantendo seu núcleo, para uma evolução de um grupo de conceitos em outro, que é incomensurável com o original. (CAREY, 1999, p. 288, tradução nossa).

Carey apresenta aqui um um claro exemplo da influência kuhniana nas pesquisas em Mudança Conceitual.

Chi (1992), por exemplo, propõe que as mudanças não são dos conceitos, mas de algo em um nível acima: das ontologias desses conceitos, aquilo que seria “do” conceito, inerente a ele. Vosniadou e Brewer (1992), por outro lado, argumentam que as mudanças ocorreriam nos modelos mentais associados ao conceito e nos quadros teóricos relativos ao domínio do conceito. Para Vosniadou, os modelos mentais podem ser modificados de maneira relativamente fácil, mas conservando os quadros teóricos dentro dos quais esses modelos estão inseridos. No entanto as mudanças nesses quadros teóricos demandariam

<sup>1</sup> no sentido do termo em língua inglesa *misconception* e não puramente como erro

muito mais tempo. [Wiser \(1995\)](#) sugere a utilização da história da Ciência no processo instrucional para remediação de equívocos dos estudantes. Essas propostas colocam a Mudança Conceitual como um análogo do desenvolvimento das teorias científicas na história e configuraram um período marcante nas décadas de 80 e 90, abundante em trabalhos com levantamentos de concepções alternativas e formas de substituir conceitos baseados nessas concepções por conceitos cientificamente aceitos, especialmente pelo conflito cognitivo.

De um outro lado, o filósofo e epistemólogo [Toulmin \(1967\)](#) propõe que, por um processo semelhante à evolução de um sistema orgânico, ecológico e diferentemente de uma ruptura kuhniana, a Ciência se desenvolve:

*[...] como resultado de um processo duplo: a cada estágio, um conjunto de variantes intelectuais competindo entre si está em circulação e, a cada geração, um processo de seleção está ocorrendo e por esse processo algumas dessas variantes são aceitas e incorporadas às considerações da Ciência. (TOULMIN, 1967, p 465, tradução nossa)*

[DiSessa \(2006\)](#) pontua uma vertente da Mudança Conceitual sob perspectiva epistemológica de Toulmin, para quem o entendimento humano “[...] começa com uma grande revisão e rejeição de assunções” ([DISESSA, 2006](#), p. 5, tradução nossa), e com isso, a mudança não seria nem um processo revolucionário numa ruptura, nem um processo puramente agregador mas sim uma evolução<sup>2</sup> da ecologia conceitual do indivíduo. Sobre essa perspectiva epistemológica, [Ariza e Harres \(2002\)](#) escrevem que Toulmin:

*[...] concebe a mudança conceitual através de uma perspectiva gradualista. Contra o uniformismo e o agregacionismo dos absolutistas (os conceitos não mudam: agregam-se) e frente ao radicalismo das posturas revolucionárias (mudanças totais à margem do juízo racional), ele propõe um tipo de graduação com um sentido em que qualquer transformação, seja lenta ou rápida, sempre é parcial e está submetida à seleção crítica da comunidade intelectual. (ARIZA; HARRES, 2002, p. 77)*

A mudança, então, ocorreria por uma constante revisão e pela sobrevivência dos conceitos mais adaptados, mais aceitos, de maneira que conceitos menos adaptados não seriam viáveis no sistema. Para o ensino, à medida em que o estudante vivencia e repensa o mundo a seu redor, sua ecologia conceitual favorece modelos que melhor representam

<sup>2</sup> não no sentido de melhora, mas no sentido darwinista, como mudança e adaptação

mundo físico, sendo então essa ecologia o sistema sujeito à mudança. Ariza e Harres (2002) vão além, ao discorrerem sobre o que seriam conceitos e o que seria uma Mudança Conceitual na perspectiva evolucionista toulminana:

[...] Estes [conceitos] não seriam, segundo Toulmin, termos de cálculos formais ou nome de classes empíricas de objetos, mas sim representações explicativas cujo conteúdo intelectual se mediria por seu âmbito, seu alcance e pela exatidão dos seus modelos e técnicas. A Mudança Conceitual, portanto, presta atenção aos fatos empíricos não com a intenção de generalização, mas sim com a meta de construir uma representação melhor, nomenclaturas melhores e procedimentos explicativos melhores para dar conta dos aspectos importantes da natureza e da explicação do mundo tal como o encontramos. (ARIZA; HARRES, 2002, p. 78)

Dentre os trabalhos sobre Mudança Conceitual, influenciados pela epistemologia de Toulmin, destacam-se Minstrell (1982) e Hunt e Minstrell (1994) que olham para o conceito prévio sem assumir uma coerência, mas identificando fragmentos de conhecimento chamados por eles de *facetras*. Essas *facetras* seriam “[...] uma unidade conveniente de pensamento, um entendimento ou raciocínio, um pedaço de conhecimento do conteúdo ou uma estratégia aparentemente utilizada para que uma situação particular faça sentido” (HUNT; MINSTRELL, 1994, p. 52, tradução nossa). Outro autor que compartilha dessa visão é DiSessa. Assim como Hunt e Minstrell, DiSessa (2006) não enxerga os *equivocos* dos alunos como um obstáculo epistemológico para o processo educacional. Ao contrário, esses *equivocos* indicam a existência de importantes fragmentos de conhecimentos, necessários à aprendizagem. Mas, assumindo que esses *equivocos* são fragmentos de algum conceito, assume-se que conceitos às vezes alocam *equivocos* adaptados ao sistema, o que leva o indivíduo a fazer previsões *naïve*, muitas vezes com explicações *ad hoc* e sem uma coerência estrutural. A essa estrutura conceitual fragmentada, DiSessa chama Conhecimento em Pedacos (do inglês *knowledge in pieces*). Numa rota semelhante, Strike e Posner (1992) argumentam que muitos *equivocos* dos alunos não são bem articulados e muitas vezes, concepções cientificamente aceitas e esses *equivocos* coexistem nas representações dos estudantes, contrapondo a visão kuhniana de uma coerência dos conceitos. Sob essa perspectiva, então, conceitos não seriam os objetos que sofrem a ação da ecologia conceitual do estudante, mas seriam a ecologia conceitual em si, incluindo seus elementos (fragmentos)

e a forma de organização (nem sempre coerente) desses fragmentos, e por isso, considerada como entidade de mudança.

### 2.1.2 Os constructos *P-prim* e Classes de Coordenação

Foram apresentadas acima duas correntes de pensamento dentro da teoria da Mudança Conceitual, cada uma com suas especificidades epistemológicas. Para a presente dissertação, lançamos mão da visão de uma estrutura conceitual fragmentada e não coerente, tal que uma Mudança Conceitual significa uma mudança no sistema. Assumimos aqui que os conhecimentos prévios dos alunos são compostos de fragmentos não necessariamente coerentes e na busca pela resposta da origem desses fragmentos, olhamos para a interface indivíduo/mundo.

À medida que interagimos com o mundo, gradualmente começamos a adquirir e elaborar um senso de mecanismo (DISESSA, 1993). Senso de mecanismo é a noção de como as coisas funcionam, de que tipo de evento é provável, possível ou impossível. DiSessa (1993) argumenta que nosso senso de mecanismo é o conhecimento que nos permite verificar semelhanças entre acontecimentos, fazer previsões e fornecer explicações causais sobre a natureza. Portanto, lidando com o mundo a nossa volta, não adquirimos uma estrutura de pensamento completa e amplamente articulada ou coerente, mas sim adquirimos pedaços de conhecimentos, elementos oriundos da nossa interação com o fenômeno. A esses elementos DiSessa chama de Primitivas Fenomenológicas (ou *p-prim*, do inglês *phenomenological primitives*). Para DiSessa, as *p-prims* são *primitivas* pois representariam um elemento de pensamento acerca de um fenômeno, logo *fenomenológicas*. Mas seriam “[...] também fenomenológicas no sentido de que, uma vez estabelecidas, *p-prims* constituem um vocabulário rico pelo qual as pessoas recordam e interpretam suas experiências” (DISESSA, 1993, p. 112, tradução nossa).

Os elementos *p-prims* de DiSessa fazem parte de um nível intermediário da mente, não pertencendo nem a níveis unitários de memória, como sinapses guiadas pelos sentidos, nem ao nível mais articulado da memória, como ideias e categorias. Elas desempenhariam uma função de ativação de outros elementos:

[...] o aprendizado deve permitir que *p-prims* sejam ativadas nas circunstâncias adequadas e que, com isso, ajudem a ativar outros elementos de acordo com o contexto que eles especificam” (DISESSA, 1993, p. 112, tradução nossa).

Para DiSessa, essas ativações sucessivas seguem uma ordem de prioridade numa topologia em rede, tal que elementos mais fortemente relacionados nessa rede seriam ativados em sequência com menor esforço que elementos mais fracamente relacionados, indicando grupos (*clusters*) de *p-prims* sistematicamente ativados nessa ordem de prioridade. Desse modo a rede teria como nós os elementos dos conceitos que estariam conectados por algum tipo de relação entre eles, estabelecida pela prioridade de *cueing*<sup>3</sup>. Os *p-prims* ativariam uns aos outros com deixas dependendo da demanda, estruturando um *cluster* de vértices na rede.

Com tudo isso, o que mudaria na Mudança Conceitual? A possível resposta óbvia para essa pergunta seria: conceitos! Porém, conforme apresentado anteriormente, a definição de um conceito não é simples e também não há um consenso na literatura que possa dirimir divergências epistemológicas. Precisamos então de uma proposta para as entidades e para o processo de mudança. Num outro trabalho, DiSessa e Sherin (1998) trazem uma proposta para o processo de Mudança Conceitual pelo constructo *Classes de Coordenação*. Nessa proposta, conceitos não seriam propriamente os elementos (vértices) de uma rede nem tampouco suas relações (conexões). DiSessa e Sherin (1998) sugerem que *Classe de Coordenação* é um sistema de conhecimento baseado em duas premissas: (1) - Estratégias que uma pessoa utiliza para extrair informação do mundo físico. Isso significa, em variados contextos, como o olhar do indivíduo é sistematicamente direcionado, o que levar em conta, o que julgar indiferente. E é aí que os autores propõem o termo coordenação; (2) - Como os elementos se coordenam para formar uma rede de inferências ou seja uma rede causal que seja capaz de articular pequenos fragmentos numa sequência de ativações por ordem de prioridade e com isso prever ou descrever acontecimentos naturais pelas relações de causa e efeito que emanam dessa rede. Temos aí nossa entidade de mudança: o sistema; o complexo; a rede inferencial.

<sup>3</sup> termo típico das artes cênicas; a deixa de uma ator indicando o momento de outro ator entrar em cena

## 2.2 Mudança Conceitual e o Ensino da Física

Da influência kuhniana surgiram propostas educacionais buscando o ensino para uma Mudança Conceitual que se valesse de um conflito cognitivo, oferecendo ao estudante situações nas quais as previsões baseadas em concepções alternativas falhariam, como forma de remediar o conhecimento do senso comum, levando o aluno a um conhecimento cientificamente aceito. Como essas propostas focavam no conflito, acabavam por não dar conta fatores como a persistência do conhecimento do senso comum, mesmo após a ocorrência do conflito cognitivo, ou questões sociais e culturais do aprendizado. Por isso, o ensino para uma Mudança Conceitual pelo conflito cognitivo, apenas, é passível de críticas, conforme a trazida por Mortimer:

*[...] essas perspectivas parecem desconhecer que aprender Ciências envolve a iniciação dos estudantes em uma nova maneira de pensar e explicar o mundo natural, que é fundamentalmente diferente daquelas disponíveis no senso-comum. Aprender Ciências envolve um processo de socialização das práticas da comunidade científica e de suas formas particulares de pensar e de ver o mundo, em última análise, um processo de "enculturação". Sem as representações simbólicas próprias da cultura científica, o estudante muitas vezes se mostra incapaz de perceber, nos fenômenos, aquilo que o professor deseja que ele perceba. (MORTIMER, 1996, p. 24)*

Entretanto, de um outro grupo surgem outras propostas sob a influência toulmiana, buscando um ensino para uma Mudança Conceitual não como resultado de conflito cognitivo, mas como resultado de um processo humano mais articulado e paulatino. O trabalho de [Pugh et al. \(2010\)](#), por exemplo, observa a Mudança Conceitual comparando dois grupos, um focado em conflito cognitivo e outro focado no processo dialético, envolvendo experiências transformadoras para professor e alunos. As evidências mostradas nesse trabalho, indicam que a diversificação de abordagens de ensino visando a vivência do aluno se mostra mais frutífera para uma Mudança Conceitual do que um processo educacional focado no conflito cognitivo.

O trabalho de [Nardi e Gatti \(2004\)](#) destaca a importância de “[...] fazer com que professores em capacitação participem ativamente da construção de atividades que visem a mudança conceitual em suas salas de aula” ([NARDI; GATTI, 2004](#), p. 37). Vemos que

uma das vantagens do ensino de Ciências para uma Mudança Conceitual é o cuidado do educador ao conhecimento prévio do aluno mas não partimos do princípio de que os conflitos entre esses conhecimentos prévios e os conhecimentos cientificamente aceitos encerrem as questões educacionais. Entretanto, podemos nos valer do entendimento sobre como os conceitos se estruturam e se modificam na mente para favorecer a incorporação do conhecimento cientificamente aceito à realidade dos alunos.

Por isso, enxergamos viabilidade numa proposta de ensino da Física para uma Mudança Conceitual não como um roteiro de procedimentos didáticos oferecendo conflitos que visem a substituição de conceitos cientificamente equivocados por conceitos cientificamente aceitos. Olhamos para essa teoria, atentos às implicações instrucionais de [DiSessa \(1993\)](#), considerando o conhecimento prévio do aluno e mantendo uma constante referência a fenômenos cotidianos que os alunos venham a vivenciar (no caso deste trabalho, com atividades de construção de aparatos e momentos de discussões), tal que esse aluno tenha a oportunidade de coordenar seus diversos elementos de conhecimento para elaborar seu senso de mecanismo, incorporando elementos (ideias e vocabulário) que lhe sejam viáveis para representação ou previsão de fenômenos naturais e diminuindo a prioridade dos fragmentos elementos menos adaptados ao seu complexo do conhecimento, numa evolução do sistema.

## 2.3 Sobre redes

A teoria de redes representa um paradigma aplicável em um número crescente de áreas, sendo tipicamente utilizada quando se quer analisar a estrutura de sistemas complexos e.g. redes metabólicas ([RAVASZ et al., 2002](#)), redes sociais ([BORGATTI et al., 2009](#)) até redes de colaborações científicas ([CAREGNATO, 2008](#); [SINATRA et al., 2015](#)). Analistas de sistemas de processamento de dados, de controle de processos e de inteligência artificial se valem das redes para observar o comportamento do sistema como um todo, direcionando a atenção para a estrutura de conexões entre os elementos do sistema e nas mudanças dessa estrutura (dinâmica da rede) ao invés de focar em um único elemento do sistema.

No domínio das Ciências Cognitivas, a topologia em rede, com elementos conectados a outros pelo significado atribuído a eles, já foi proposta por [Jonassen \(1990\)](#). Jonassen utiliza redes para identificar palavras de maior importância que se conectam a outras semanticamente mais próximas como forma de estruturação de um hipertexto. [Munari \(2010\)](#) sugere que a auto-regulação piagetiana se deve à plasticidade do sistema de organização de conceitos numa rede. Também para Pozo e Gómez Crespo, a estruturação da compreensão ocorre numa rede semântica: “[...] Compreender um dado requer utilizar conceitos, ou seja, relacioná-los dentro de uma rede de significados que explique por que ocorreram e que consequências eles tem.” ([POZO; GÓMEZ CRESPO, 2009](#), p 78). Numa outra corrente, um grupo de trabalhos usa redes de associação pelo significado, numa versão hierarquizada, são chamadas Mapas Conceituais ([NOVAK, 1990; FERRACIOLI, 2007; SELLMANN; LIEFLÄNDER; BOGNER, 2015](#)) ou Redes Proposicionais ([CICUTO; CORREIA, 2012](#)).

Em uma rede, os nós são chamados de vértices e são conectados por segmentos chamados de arestas. Dois vértices são ditos adjacentes quando conectados por uma aresta, ou pode-se dizer que uma aresta é incidente a dois vértices quando os conecta ([MALTA, 2008](#)). Por exemplo, na Figura 1, tem-se uma rede (grafo) com 10 vértices e 16 arestas. O vértice 4 está desconectado da rede e o vértice 10 é um ponto de articulação, pois se o excluirmos, a rede será fracionada. O número de vezes que um vértice é conectado é chamado de grau do vértice, e na Figura 1 o vértice 9, por exemplo, possui grau 03.

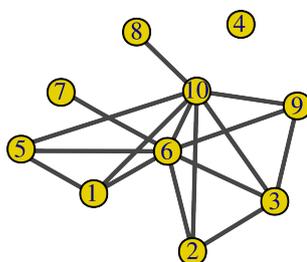


Figura 1 – Exemplo de grafo com 10 vértices 16 arestas

Esse tipo de topologia é chamada de grafo como um neologismo derivado da palavra *graph* em língua inglesa, cunhado pelo matemático inglês James Joseph Sylvester (1814 –

1897) ([FEOFILOFF; KOHAYAKAWA; WAKABAYASHI, 2011](#)). Ao longo do texto, o termo grafo será utilizado em referência à topologia em rede.

Pelas ideias de um sistema de conceitos numa rede de inferências ([DISESSA; SHERIN, 1998](#)) onde se conectam os fragmentos de conhecimento ([MINSTRELL, 1982; DISESSA, 1993](#)), uma Mudança Conceitual não seria então de um único vértice ou de uma única aresta do grafo, mas sim da estrutura da rede à qual constantemente se incorporam fragmentos mais adaptados e se rejeitam, pela redução de prioridade, fragmentos menos inviáveis.

## 3 Metodologia

### 3.1 Sujeitos de estudo e contexto escolar

As atividades foram realizadas com um grupo de vinte e oito alunos ( $N=28$ ) sendo 21 do sexo masculino e 07 do sexo feminino. A idade mínima dos alunos era 16 anos e a idade máxima era 19 anos, todos alunos da terceira série do ensino médio. Todos os alunos foram avisados previamente que as atividades fariam parte do desenvolvimento de um MI e os registros obtidos das aulas dariam sustentação a uma dissertação de mestrado, conforme termo de consentimento livre e esclarecido mostrado no Apêndice H. Além disso, todos os alunos eram avisados que nenhuma atividade seria utilizada como avaliação de desempenho escolar e que nenhum deles era obrigado a participar, podendo iniciar as atividades e abandonar o processo no instante que quisesse. O tamanho da amostra supracitada representa apenas aqueles que frequentaram todas as aulas de desenvolvimento das atividades.

A instituição onde as atividades foram desenvolvidas é uma escola da rede escola privada da grande Vitória, onde leciono regularmente como professor de Física. Nessa escola, as decisões e autorizações são deliberadas por um conselho diretor que se reúne quinzenalmente. O processo de pesquisa com o grupo de alunos mencionado só se iniciou após autorização formal do conselho diretor. Foi autorizada a utilização do ambiente escolar e o desenvolvimento das atividades do MI em contra-turno. O conselho diretor optou por fazer dessa forma pois embora a escola possua 04 unidades espalhadas pela grande Vitória, e eu leciono em todas elas, não sou professor de todas as turmas. Com isso, para não interferir no andamento das atividades programadas no início do ano para a escola como um todo, trabalhamos às tardes na aplicação do MI.

As atividades foram desenvolvidas em quatro tardes, com encontros semanais, iniciando em 18 de setembro de 2015 e se encerrando em 14 de outubro do mesmo ano. Duas unidades escolares (A e B) eram palco da aplicação do material, mas não podemos

dividir o grupo de sujeitos em dois, pois muitos alunos que não podiam comparecer em uma tarde na unidade A, iam na tarde do dia seguinte na unidade B. Por fim, isso representou uma vantagem, permitindo uma melhor adequação da disponibilidade dos alunos e ainda um indicativo de que o interesse por participar do processo se mantinha neles. Utilizávamos o tempo das 14:00h às 16:30h para desenvolver dois capítulos do MI em cada encontro.

## 3.2 Sobre o produto desenvolvido

A gênese desta proposta se dá nos idos de 2007 quando, por ocasião, tinha em minhas mãos um violão e estava começando a trabalhar com ondas estacionárias numa turma de alunos de 2º ano do ensino médio. Me ocorreu de discutir os modos normais de vibração das cordas mostrando no violão como isso acontecia. Encontrei naquele momento um ambiente leve e divertido em sala de aula e daquele instante em diante, nos anos que se seguiram, eu aguardava com ansiedade a época planejada para estudo de ondulatória chegar, para que eu pudesse reviver aquela experiência. Com o passar dos anos pude incorporar à minha prática esse momento onde meu lado músico e meu lado professor de Física se completavam e o retorno positivo que recebia dos alunos naquelas aulas mostrava como a música e a Física podiam se apoiar uma em outra para que o aluno compreendesse aqueles fenômenos.

Por essência, o Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) é uma proposta de formação continuada, intelectual e profissional, para professores de Física em atuação e isso demanda do mestrando o desenvolvimento de técnicas e produtos educacionais, algo que permitiu de maneira estruturada e fundamentada, materializar num pequeno compêndio algumas das atividades que eu já desenvolvia, agora refinadas e agregadas a outras que encontrei na literatura. Foi então elaborado, como produto do mestrado, um Material Instrucional (MI) no formato de um livreto intitulado *Atividades para o aprendizado de conceitos básicos em Acústica*, presente em sua totalidade no Apêndice A, contendo 8 capítulos.

Ao longo do MI, buscamos uma sistematização da utilização estratégias didáticas,

tais que permitissem ao aluno um conjunto de vivências diretamente com os fenômenos abordados. A constante referência aos fenômenos visava possibilitar uma aquisição de novas primitivas *p-prims* ou o estabelecimento de uma nova relação entre primitivas que o aluno já possuía. Como buscamos a aprendizagem do aluno pelo enriquecimento da ecologia conceitual, partíamos dos fenômenos ou de perguntas acerca dos fenômenos e utilizávamos sistematicamente uma linguagem cotidiana, a princípio. Assumindo que a aquisição da linguagem científica e a construção de um repertório para representações de fenômenos naturais ocorrem gradualmente, à medida em que o aluno coordena, na mente, suas classes de elementos, variávamos as atividades propostas sem variar os pressupostos de uma abordagem fenomenológica e dos momentos de discussões para compartilhamento da linguagem, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 – Detalhamento das estratégias utilizadas ao longo do MI, por capítulo

	Capítulo							
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
Aplicativo		×	×				×	
Arduino				×				
Construção de aparato						×	×	
Construção de Mapa Mental	×							×
Construção de Redes	×	×	×					×
Explicitação dos Objetivos	×	×	×	×	×	×	×	×
Perguntas abertas		×	×	×	×	×	×	
Relações matemáticas				×	×	×	×	
Teste Objetivo	×							×
Vídeo		×				×		
Violão				×	×			
Voz		×	×					

De um levantamento procedido anteriormente com um outro grupo de alunos da mesma realidade escolar (RODRIGUES; CAMILETTI, 2015) observamos uma forte associação entre o aluno gostar da Física, ser curioso por assuntos da Física e entender o que os professores de Física dizem. Isso reforçou a necessidade de sistematizarmos os momentos de discussão com os alunos e entre os alunos, a fim de se estabelecer um compartilhamento de significados da linguagem cientificamente aceita, característica da

Física, para que tivéssemos um solo de inteligibilidade sobre o qual o aluno pudesse desenvolver sua curiosidade e seu gosto pela Física.

Para cada uma das atividades, propusemos perguntas, por vezes de maneira semi-estruturadas por vezes abertas para promoção de um debate inicial, ou problematização inicial, sobre as ideias que cercassem a atividade que estava por vir. Ao propormos essas perguntas, nos aproximamos das *questões abertas* ou *problemas abertos* de Azevedo (2004). Fazíamos um ciclo de hipóteses, os alunos discutiam entre si e ao final testávamos nos aparatos a confirmação ou não das mesmas, fazendo um novo ciclo de discussões. Essas perguntas provocativas foram sistematizadas ao longo de todo o material instrucional com o título “Pense e Responda”. Buscávamos com isso a criação de uma cultura de debate ao longo do MI.

No primeiro capítulo do MI (Apêndice A, p. 1), propusemos atividades para eliciar as ideias dos estudantes sobre o domínio Acústica. Começamos com a construção de um Mapa Mental, aberto, para que os alunos pudessem expressar suas ideias sobre o som. Um Mapa Mental é construção heurística na qual palavras ou pequenas sentenças são escritas em papel e são conectadas a outras associadas a elas. É uma interessante forma de se externar ideias sobre um determinado domínio, utilizando termos que sejam convenientes ao indivíduo. Num Mapa Mental, o aluno pode lançar mão da linguagem que ele domina para expressar o entendimento dele com relação à Física do som. Nessa atividade inicial, sem impor restrições, não me preocupava que termos associados a vivência não escolar dos alunos surgissem em seus mapas. A intenção era a criação de um estado mental em torno de conceitos que os alunos já possuíam sobre o som permitindo que o aluno recuperasse e coordenasse seus fragmentos de conhecimento do domínio proposto. Isso permitiu que observássemos a apropriação da linguagem científica pelas representações livres dos estudantes.

Ainda nesse capítulo, apresentamos a primeira versão de uma atividade com redes. Termos referentes a Acústica eram dados dentro de boxes para que os alunos os conectassem como achassem mais viável. Estávamos interessados em observar as associações feitas em função de uma proximidade semântica dada pelos alunos aos termos dos boxes como

indicativos de conexão entre várias *p-prims* (DISESSA, 1993) numa rede de inferências (DISESSA; SHERIN, 1998) (Apêndice B). Cada termo ou frases sucinta eram vértices do grafo que deveriam ser conectados uns aos outros por arestas mediante à interpretação dada pelos alunos às relações entre esses vértices.

Também aplicamos nesse momento inicial um pré-teste diagnóstico com quinze questões objetivas sobre conceitos em Acústica, presente no Apêndice C afim de obtermos informações sobre as habilidades dos alunos numa dimensão latente e também indicativos do senso de autoeficácia desses alunos quanto aos itens do teste.

No segundo capítulo do MI (Apêndice A, p. 6), nosso objetivo era confrontar as diferentes sensações auditivas produzidas por sons graves e agudos com a leitura do valor da frequência desses sons emitidos num medidor de frequência em um *smartphone* (Figura 2; A), algo que eu já havia feito em anos anteriores com programas de computador (RODRIGUES, 2014) e que para o MI produzido foi refinado, migrando para uma plataforma móvel. Ainda, buscamos via discussão, um compartilhamento dos significados atribuídos aos termos *alto* e *baixo* no contexto de Acústica.

O terceiro capítulo do MI trata de timbre (Apêndice A, p. 16). Não raramente, a definição de timbre aparece com uma ou duas frases de efeito em livros didáticos e dizer que timbre é a qualidade do som parece encerrar a questão. Não vemos como problema pensar no timbre como uma identidade do som. Mas por traz dessa identidade, um conjunto de mecanismos de reconhecimentos nos faz perceber diferentes timbres, diferenciando-os por alguns aspectos, muitas vezes traduzidos em adjetivos do som. Assim como a percepção de cor, a percepção do timbre do som ocorre em instâncias subjetivas e, por isso, houve um especial interesse em se propor esse capítulo como uma forma de compartilhamento dessas instâncias subjetivas associadas a diferentes sons. Além de tocar sons gravados com diferentes instrumento musicais, propus uma análise espectrográfica desses sons para visualização dos sobretons tão importantes no reconhecimento do timbre.

Nos capítulos 04 (Apêndice A, p. 25) e 05 (Apêndice A, p. 41) do MI discutimos sobre violão, cavaquinho e piano. Eu partia da utilização de instrumentos musicais para buscar as relações de causa e efeito para a frequência de vibração das cordas desses

instrumentos. Primeiramente, discutimos sobre as características físicas das cordas (tensão, calibre e comprimento). Depois, os alunos experimentavam girar as tarraxas do violão para um lado e para outro, ouvindo diferentes sons, e medindo a frequência com aplicativo já utilizado no segundo capítulo do MI, muito inspirado pelo trabalho de [Catelli e Mussato \(2014a\)](#), [Catelli e Mussato \(2014b\)](#). Posteriormente, propus construirmos um afinador estroboscópico no Arduíno (Figura 2; C). Por fim, dediquei um tempo para que os alunos pudessem aprender a produzir modos normais de ordem superior nas cordas do violão que levei para a sala e perceber o efeito sonoro provocado para então calcularmos a frequência e comprimento de onda desses modos (Figura 2; E).

No capítulo 06 do MI (Apêndice A, p. 52), construimos um instrumento de tubos com canos de PVC cortados. Os alunos tinham o desafio de determinar o comprimento de cada tubo para que conseguissem tocar uma pequena canção batendo com chinelos nesses canos. Batizamos o instrumento de *chinelofone*, numa alusão ao Xilofone (Figura 2; B). Escolhi essa oportunidade para introduzir o conceito de intervalo musical e como as frequências de duas notas musicais adjacentes possuem uma relação matemática definida, na escala musical temperada, que é a escala típica utilizada nos instrumentos musicais mais comuns. Os alunos precisavam de uma relação entre o comprimento do cano (como causa) e a nota musical emitida com uma chinelada (como efeito). Os cálculos dos modos normais em tubos deram a dose de Ciência enquanto a música dava a dose do componente artístico para o embalo dessa atividade. O trabalho de [Roederer \(2002\)](#) serviu de base principal para essa atividade.

O capítulo 07 do MI (Apêndice A, p. 63) era um conjunto de atividades para que discutíssemos intensidade e nível de intensidade sonoras. A parte matemática do desenvolvimento foi levada em conta, buscando-se rigor com os conceitos, mas o foco desse capítulo estava em identificar como as interações eletromagnéticas são as grandes responsáveis pelo funcionamento de um alto-falante ou de um microfone. Semelhante a [Wang \(2013\)](#), o ponto alto desse capítulo era a construção de um transdutor de papel rudimentar que funcionasse de fato (Figura 2; D e F) e que os alunos pudessem levar para casa.



Figura 2 – Registro da realização de algumas das atividades. Leitura da frequência de vocalização (A), escolha dos canos para montagem do *chinelofoone* (B), afinador de violão estroboscópico com Arduino (C), transdutor de papel (C, F) e medição dos comprimentos modais dos harmônicos na corda do violão

O último capítulo do MI (Apêndice A, p. 73) era a reaplicação das avaliações do primeiro capítulo. Devido ao intervalo de tempo entre a aplicação da primeira e da última avaliações (aproximadamente um mês) do MI e ainda que os alunos não tiveram acesso aos gabaritos dos itens aplicados no primeiro capítulo, consideramos como viável a reaplicação dos mesmos itens e que essa replicação não determinaria o padrão de respostas dada pelos alunos. O interesse era promover ao aluno a oportunidade revisitar as atividades iniciais, inclusive, confrontando suas próprias visões, podendo coordenar e articular ideias de maneira diferente da feita no pré-teste, e ainda coletarmos valiosos dados dessa mudança.

### 3.3 Coleta de dados

A coleta de dados para este trabalho foi feita com uma série de atividades pré/pós instrução, num delineamento de pesquisa chamado por [Campbell e Stanley \(1963\)](#) de *design pré-experimental de pesquisa com um grupo pré/pós teste* mais uma entrevista em grupo pós-instrução, configurando um estudo quali-quantitativo, da seguinte forma:

- Mapas Mentais
  - Construção de um Mapa Mental, pré-instrução;
  - Construção de um Mapa Mental, pós-instrução;

Após um ciclo de construção de Mapa Mental ([BUDD, 2004](#)) como aprendizado da ferramenta, cada aluno construiu um Mapa Mental, livre sobre o som e sobre a Física do som, de maneira a se obter um conjunto de termos que livremente emanassem das ideias dos alunos, a fim de se observar nesses grupo, a apropriação de termos cientificamente aceitos sobre Acústica.

- Avaliação de conceitos em Acústica
  - Avaliação com 15 questões objetivas, pré-instrução;
  - Avaliação com 15 questões objetivas, pós-instrução;

As avaliações pré/pós foram constituídas de 15 itens objetivos, com questões de enfoque conceitual e com algumas relações matemáticas acerca dos conceito trabalhados. Todas as questões foram adaptadas dos Capítulos 20 e 21 da obra “*Física Conceitual*” ([HEWITT; RICCI; GRAVINA, 2002](#)). Partimos de exercícios existentes nesses capítulos do livro, mas tomamos a liberdade de adaptá-los tal que se aproximassem ao máximo da realidade dos alunos e das atividades propostas no MI e desenvolvidas pelos alunos.

Em cada item proposto nas avaliações pré/pós, havia a demanda do aluno informar quão confiante estaria para responder àquele item. O aluno era encorajado a marcar um

dos emoticons<sup>1</sup> após a leitura do enunciado mas previamente à solução do item, indicando o quão confiante estaria para responder ao item (Figura 3). Olhamos para esse índice como um fator associado ao senso (ou crença) de autoeficácia do aluno (MEDEIROS et al., 2000) para responder corretamente o item.

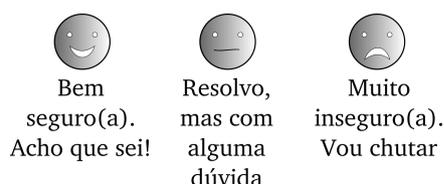


Figura 3 – Emoticons posicionados após o enunciado e antes das alternativas de cada item dos testes pré/pós

- Redes de associação
  - Grafos de associação entre termos, pré-instrução;
  - Grafos de associação entre termos, pós-instrução;

Cada aluno construiu um grafo pré e um pós instrução. Um total de 34 termos (ou sentenças curtas) cientificamente aceitos no domínio de Acústica eram espalhados em boxes e os alunos conectariam esses termos da forma que julgassem mais conveniente. Determinando previamente esses termos, permitimos que os alunos os conectassem pela relação semântica (ou causal) entre eles. Estávamos com isso, interessados em observar a topologia de conexão desses grafos a partir da interpretação dada e com isso avaliar propriedades dessa estrutura, como tamanho, densidade, *clusters* e pontos de articulação dos elementos no grafo, bem como a proximidade dessas conexões com aquelas que tipicamente são utilizadas no contexto científico para, por fim, explorarmos as mudanças nessa estrutura como indícios ou não de um enriquecimento da ecologia conceitual do estudante.

- Entrevista em grupo, pós-instrução.

<sup>1</sup> imagem de um rosto que representa algum tipo de expressão emocional

No último encontro, após a realização de todas as atividades do material instrucional, foi feita uma entrevista aberta com foco no grupo, de maneira não estruturada, mantendo uma conversa informal sobre as atividades, a fim de se obter um *feedback* do processo.

## 3.4 Técnicas de Análise dos dados

Os dados coletados foram analisados em plataformas gratuitas e livres de maneira a permitir a replicação dos resultados e processos produzidos no presente trabalho, mantendo-se a acessibilidade das ferramentas, independente de disponibilidade de recursos financeiros para tal. A principal plataforma de trabalho foi o ambiente estatístico livre e de código aberto R, V 3.2.2 (R - Core Team, 2008), utilizando-se pacotes específicos para cada uma das análises feitas. Quando se fez necessário, utilizou-se também ferramentas adicionais, disponíveis gratuitamente online.

### 3.4.1 Nuvem de palavras dos Mapas Mentais

Os Mapas Mentais foram transcritos, tomando-se notas todos os substantivos e adjetivos propostos pelos alunos, fossem eles cientificamente aceitos ou não. Concatenou-se o conjunto de termos dos Mapas Mentais pré-instrução e também pós-instrução. Gerou-se com isso uma nuvem de palavras pré e outra pós instrução utilizando-se o ambiente *wordclouds* (ZIGOMATIC, 2015). Nesse tipo de plotagem, cada termo tem seu tamanho proporcional à frequência com a qual ele é citado, conforme feito por Cicuto e Correia (2012). Como o enunciado da atividade pedia que se fizesse um Mapa Mental sobre o som e sobre a Física do som, as palavras “som” e “Física” foram excluídas por já terem sido apresentadas, servindo na maioria dos mapas como ponto de partida.

### 3.4.2 Análise Rasch das avaliações objetivas

Escore puro (pontuação numa prova, por exemplo) é, muitas vezes, a informação considerada para julgar a performance de um indivíduo num teste. Ou mais ainda, é muitas vezes a informação na qual se sustenta a afirmação de que um aluno aprendeu ou

não aprendeu um determinado tópico. Inferir a aprendizagem baseando-se apenas numa pontuação acaba por confundir o processo de quantificação com o processo de medida.

Para exemplificar a diferença entre quantificação e medida, imaginemos um aluno A que obtém 06 acertos de 10 questões numa prova e um aluno B que obteve 03 acertos. Para reduzirmos a uma análise bem simples, podemos dizer que o aluno A sabe o dobro daquilo que o aluno B sabe? Essa afirmação só seria possível se pudéssemos de alguma forma garantir que todas os itens (questões) da prova tivessem exatamente o mesmo grau de dificuldade e ainda que fossem interpretados exatamente da mesma forma pelos dois alunos e aí, o número de acertos seria função apenas da habilidade do aluno em responder corretamente aqueles itens.

Consideremos um outro exemplo. Numa prova de Biologia, aplicada a um conjunto de alunos, a questão 04 teve 80% dos alunos marcando corretamente. Já a questão 05 teve 40% dos alunos acertando. Podemos dizer que a questão 04 e a questão 05 são igualmente difíceis? É certo que não. Mas podemos dizer que a questão 05 é duas vezes mais difícil que a questão 04? Essa afirmação só seria possível se pudéssemos de alguma forma garantir que todos os alunos tivessem exatamente a mesma habilidade em Biologia e aí, o número de acertos seria função apenas da dificuldade dos itens.

Refletindo sobre esses dois exemplos, podemos então pontuar o seguinte: *(i)* é impossível garantirmos que um instrumento de avaliação tenha itens com exatamente o mesmo grau de dificuldade, o que torna inviável a medida da habilidade do aluno pela quantificação dos escores; *(ii)* é impossível garantirmos que num grupo de alunos, todos tenham exatamente a mesma habilidade, o que torna inviável a medida da dificuldade dos itens por quantificação dos escores. *(iii)* mesmo que se tentemos normalizar as pontuações, levando a maior pontuação a 100% e fazendo uma proporção direta dos outros escores, nada garante que o intervalo entre os escores será constante, o que torna inviável a medida ou da habilidade do aluno ou da dificuldade do item por não conseguirmos determinar uma escala com linearidade de intervalos.

A solução para esse tipo de análise surge com os modelos de [Rasch \(1960\)](#). Rasch propõe uma forma de se observar a habilidade de um aluno (neste trabalho representada

pelo parâmetro  $\theta$ ) ante um conjunto de itens num instrumento de avaliação em função da dificuldade de cada item (neste trabalho representada pelo parâmetro  $\beta$ ) pela observação de uma dimensão não manifesta (latente) que possui intervalos iguais na medida de  $\theta$  e  $\beta$  a partir da distribuição de erros e acertos no instrumento. Como as medidas da habilidade do aluno  $i$  ( $\theta_i$ ) e da dificuldade do item  $j$  ( $\beta_j$ ) são valores posicionados numa dimensão latente, não podem ser observadas diretamente, mas podem ser comparadas entre si. O modelo proposto por Rasch para se observar a habilidade de um aluno em função das dificuldades dos itens é chamado Modelo Logístico Simples ou modelo de Rasch com um parâmetro logístico (01PL) para dados dicotômicos. Nesse modelo, verifica-se qual é a probabilidade de determinado aluno  $i$  com parâmetro de habilidade  $\theta_i$  responder corretamente a um item  $j$ , que tem parâmetro de dificuldade  $\beta_j$ , pela função logística de probabilidade (GOLINO; GOMES, 2015, p. 212):

$$P(X_{ij} = 1) = \frac{e^{(\theta_i - \beta_j)}}{1 + e^{(\theta_i - \beta_j)}}$$

Assim, os parâmetros  $\theta$  e  $\beta$  são traços de uma dimensão latente obtida a partir dos dados de erros e acertos dos itens do instrumento.

A análise Rasch (01PL) permite determinar a posição da dificuldade  $\beta$  de cada item do instrumento numa escala logística, bem como a posição da habilidade  $\theta$  de cada aluno nessa mesma escala. Escalas logísticas possuem intervalos medidos em unidades de *logit*, permitindo linearidade de intervalos ao longo da dimensão latente. Assim, *medimos* a habilidade do aluno e garantimos que a diferença entre  $-3$  *logit* e  $-2$  *logit* seja a mesma diferença entre  $1$  *logit* e  $2$  *logit*. Na régua *logit*, itens relativamente mais difíceis, tem o parâmetro  $\beta$  localizado na parte positiva da escala em *logit*, enquanto itens mais fáceis na parte negativa. O mesmo raciocínio pode ser aplicado ao parâmetro de habilidade  $\theta$  do aluno. Alunos de maiores habilidades (proficiências) tem o parâmetro  $\theta$  de habilidade posicionados na parte positiva da escala *logit*, enquanto alunos de proficiência mais baixa, na parte negativa (LUDLOW; HALEY, 1995). Análise Rasch é também o processo que norteia a correção do ENEM (KARINO; ANDRADE, 2011), embora o façam com três parâmetros logísticos (03PL), incluindo o parâmetro de discriminação de cada item e um

parâmetro associado a acertos ao acaso em cada item.

Para geração da matriz de dados dos testes aplicados, os gabaritos foram corrigidos e os testes pré e pós instrução tiveram suas informações transformadas em dados dicotômicos, com o valor 1 para acerto no item e o valor 0 para erro. Daí, com o pacote `eRm` (MAIR; HATZINGER; MAIER, 2015) do R procedeu-se então a análise Rasch.

Na modelagem Rasch, é possível que se tenha itens não adequados à análise. Então, se faz necessário testar a adequação (*infit*) dos itens propostos ao modelo estatístico. Uma das técnicas possíveis para verificação de adequação dos itens ao modelo é o método de separação de médias para razão de verossimilhança de Andersen (GOLINO; GOMES, 2015). Utilizou-se essa técnica para obtenção da solução gráfica com a função `LRtest` do pacote `eRm`. Plotou-se então o resultado da razão de Andersen com intervalo de confiança de 95% representados graficamente por elipses, com a função `plotGOF`. Determinados quais os itens eram adequados ao modelo, utilizou-se a função `RM` para cálculo dos parâmetros  $\theta$ , como posição da habilidade dos alunos no traço latente e dos parâmetros  $\beta$  como posição da dificuldade dos itens nesse traço. Plotou-se então o mapa das variáveis  $\theta$  e  $\beta$  para os testes pré e pós instrução.

Então, afim de se verificar o aumento ou não das habilidades  $\theta$  para o grupo de alunos, na modelagem Rasch, procedeu-se um teste de Wilcoxon (WILCOXON, 1945) pareado, tendo como hipótese nula  $H_0$  “o valor médio das habilidades  $\theta$  não sofreu alteração estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ )”. Para isso, utilizou-se a função `wilcox.test` do R, impondo como hipótese alternativa, no caso de rejeição da hipótese nula, “o valor médio das habilidades  $\theta$  aumentou”.

### 3.4.3 Indício de senso de autoeficácia

Utilizou-se a função `likert` do pacote `HH` (HEIBERGER, 2015) para plotagem de barras divergentes de tendências, com a frequência de cada emoticon. Procedeu-se um teste de Wilcoxon não pareado para a frequência relativa ( $\frac{N_{obs}}{28}$ ) de cada emoticon, pós vs pré, tendo como hipótese nula  $H_0$  “a frequência relativa do emoticon não sofreu alteração estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ )”, e impondo como hipótese alternativa “a

frequência dos emoticons associados à segurança aumentou” e “a frequência dos emoticons associados à insegurança diminuiu”

#### 3.4.4 Propriedades das redes

Das atividades com redes (Apêndice B), possuía-se 34 vértices ( $N_v = 34$ ) previamente fornecidos. Com o intuito de se levantar propriedades típicas dos grafos, utilizou-se o pacote `igraph` do R (CSARDI; NEPUSZ, 2006). Construiu-se para cada grafo uma matriz de adjacência com todos os vértices que estiveram conectados. Procedeu-se então, por aluno:

- cálculo do tamanho da rede, que representa o número de arestas existentes, por aluno pré e pós, com a função `gsize`;
- cálculo da densidade do grafo, que é a relação entre o número de arestas presentes (tamanho) e o número total de possíveis arestas (diâmetro), por aluno pré e pós, com a função `edge_density`;
- a detecção de comunidades de vértices (*clusters*) pelo método do menor caminho aleatório, por aluno pré e pós, com a função `cluster_walktrap`;
- cálculo da relação entre o número de arestas cientificamente aceitas (conexões válidas) e o número total de arestas presentes em cada grafo (tamanho).

Para cada uma dessas propriedades, verificou-se a ocorrência ou não de aumento pós vs pré instrução pelo teste de Wilcoxon pareado com a hipótese nula  $H_0 =$  “a média dos valores obtidos na propriedade não sofreu alteração estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ )” impondo como hipótese alternativa “a média dos valores de cada categoria pós-instrução teve aumento em relação aos valores pré-instrução”.

Por fim, procedeu-se a concatenação dos dados para se gerar dois grafos, um pré e um pós, representando o grupo de alunos como uma rede coletiva antes e depois do processo instrucional desenvolvido. Para visualização, plotou-se os grafos concatenados (pré e pós) com o diâmetro de cada vértice proporcional a seu grau (número de arestas incidentes) e a

espessura da aresta proporcional a seu peso (número de vezes em que a aresta ocorre). Os pesos das arestas foram divididos em quartis, para que fossem observadas as conexões menos frequentes, abaixo do 1º quartil como indício de ideias peculiares ou representações individuais e as arestas com peso acima do 3º quartil como indício de ideias coletivas ou de representações compartilhadas socialmente. Calculou-se, para esses dois grupos, a porcentagem de arestas válidas e de equívocos para avaliarmos mudanças na frequências de conexões cientificamente aceitas tanto naquelas que seriam peculiares de uns poucos indivíduos (representações individuais) e também naquelas que seriam compartilhadas socialmente (representações coletivas).

### 3.4.5 Análise de Componente Principal

A fim de se observar como as diversas características dos grafos se relacionam com as habilidades desenvolvidas pelos alunos no processo instrucional, buscou-se reduzir a dimensionalidade dos dados obtidos dos instrumentos avaliativos relatados acima. Primeiramente procedeu-se o teste de Scree (CATTELL, 1966) com o pacote `nfactors` (RAICHE; MAGIS, 2010) do R para a determinação do número de fatores a extraír. Então, procedeu-se a Análise de Componente Principal (WOLD; ESBENSEN; GELADI, 1987) com o pacote `FactoMineR` (LÊ et al., 2008) do R.

### 3.4.6 Análise da Entrevista

Entrevistas grupo focal (ou focada no grupo) são uma abordagem qualitativa de coleta de dados, utilizadas como forma de avaliação em processos e de coleta de opiniões (BASCH, 1987; RABIEE, 2004) e, não raramente, são utilizadas em pesquisas em educação. Nesse tipo de entrevista, o moderador tem um papel de conduzir os tópicos e fomentar a discussão, muitas vezes, rephraseando as respostas e sugerindo que o sujeito vá além, embora, ao mesmo tempo, deva evitar cortes abruptos nas linhas de pensamento dos respondentes. Numa entrevista com foco no grupo permite-se que o *status* de cada participante seja o mesmo (WELLER, 2006) e todos tem o igual direito de emitir uma opinião – que será assumida como válida – ou de não fazê-lo.

Nas entrevistas, feitas em dois grupos (A e B) de 14 alunos cada, era pedido que falassem sobre alguma dúvida que tivessem tido acerca de alguma atividade ou da razão pela qual uma ou outra atividade fora proposta e ainda sobre aquilo que havia sido de melhor e de pior no processo todo. A entrevista foi registrada em vídeo e transcrita. Foi contabilizado o número de alunos que optaram por fazer uso da palavra e as falas foram separadas em 04 categorias:

- Categoria “P”: Pergunta de esclarecimento ou de curiosidade sobre as atividades;
- Categoria “C”: Crítica ou comentário sobre algo que o aluno não gostou ou não se sentiu à vontade de executar durante o processo ou ainda algum comentário de conotação negativa em relação às aulas;
- Categoria “T”: Comentários transversais, que não se referiam diretamente às aulas ou às atividades;
- Categoria “E”: Elogios ou comentários de conotação positiva sobre as atividades ou sobre as aulas.

Os trechos em destaque, transcritos verbatim, foram codificados por instante na *timeline* do vídeo, grupo da entrevista, sujeito que faz uso da palavra, sendo M para mediador, no caso o professor:

[mm:ss, Grupo] Sujeito: *Fala transcrita*

A título de exemplo, um trecho de uma fala do aluno A15, aos 08 minutos e 40 segundos da entrevista feita com o grupo A é transcrito da seguinte forma:

[08:40, A] A15: *O que teria cinquenta minutos de aula . . .*

## 4 Resultados

Dos termos presentes nos Mapas Mentais pré e pós obteve-se a nuvem de palavras presente na Figura 4, excluindo-se os termos “som” e “Física” por já estarem presentes no enunciado da atividade. O tamanho de cada palavra plotada é proporcional à frequência de ocorrência da palavra nos Mapas Mentais dos estudantes.



Figura 4 – Nuvem de palavras com todos os termos representados pelos alunos em Mapas Mentais pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir).

Para a análise Rasch, o teste de Andersen para adequação ao modelo, com elipses de 95% de intervalo de confiança, mostrou todas as questões do teste pré-instrução como *infit* e apresentou para o teste pós-instrução as questões 01, 02, 03, 11 e 13 foram rejeitadas por não apresentarem ajuste ao modelo.

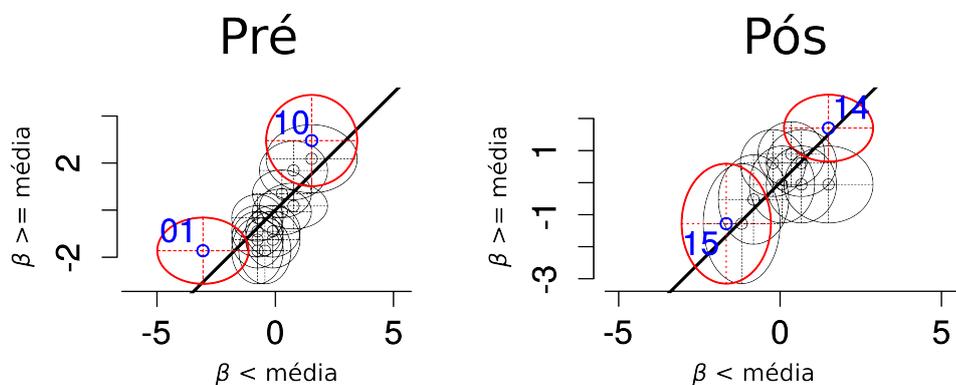


Figura 5 – Teste de taxa de verossimilhança de Andersen para adequação (*infit*) dos itens dos testes pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir) ao modelo Rasch

Na Figura 5, o resultado gráfico do teste, com destaque para os itens extremos com círculos azuis representando a posição da dificuldade dos itens e as elipses vermelhas representam o intervalo de confiança de 95% para ajuste ao modelo. Por isso, o modelo de Rasch 01PL para o teste pós-instrução cruza apenas 10 dos 15 itens.

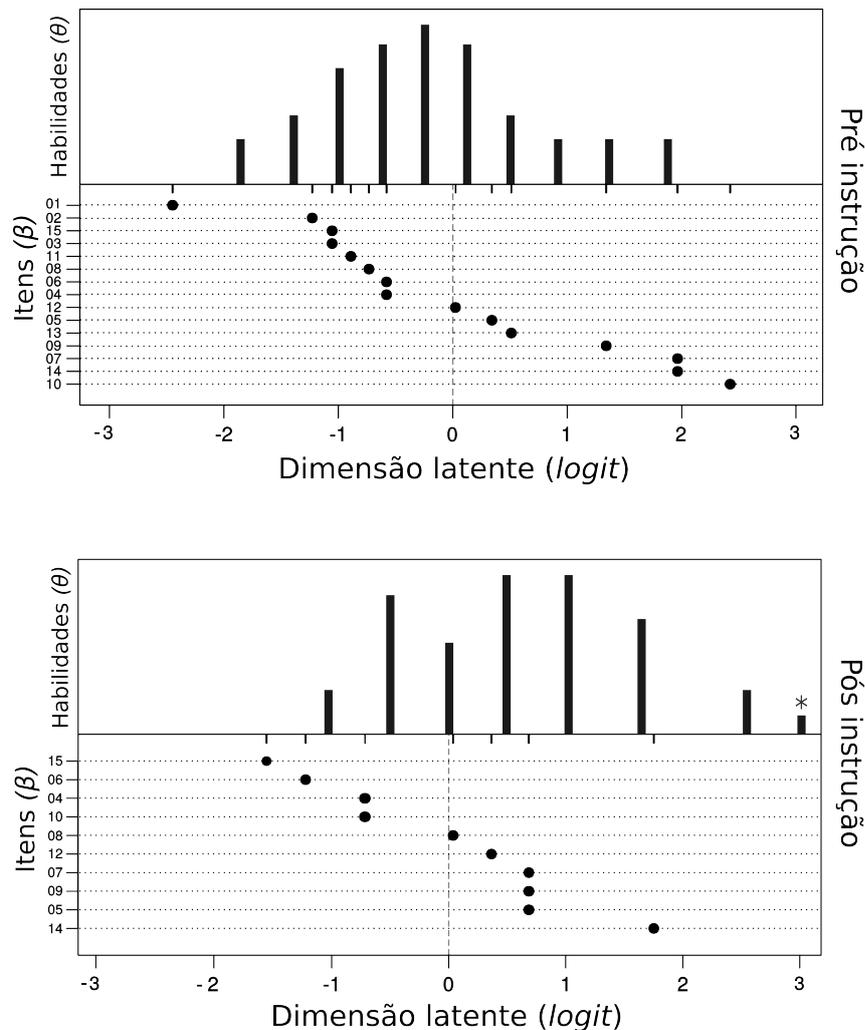


Figura 6 – Histograma dos parâmetros  $\theta$ , de habilidade na parte superior e na parte inferior a posição do parâmetro  $\beta$  de dificuldade de cada item, pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir). Em destaque (“\*”) aqueles que assinalaram corretamente todos os itens

Então, o modelo mostrou a localização dos dos parâmetros  $\beta$  dos itens e  $\theta$  das habilidades numa dimensão latente, conforme mostrado na Figura 6, adiante. Os alunos A10 e A27 assinalaram todas as questões do teste pós-instrução corretamente e por isso, não tiveram seus valores do parâmetro  $\theta$  computados no modelo. A título de representação, os parâmetros  $\theta$  desses alunos foram incluídos com os maiores valores da amostra ( $\theta = +3$

logit), e estão destacados com “\*” na Figura 6 (dir).

Do teste Wilcoxon pareado para os valores de habilidades, rejeitou-se a hipótese nula  $H_0$ : “a média dos parâmetros de habilidade  $\theta$  não sofreu alteração no pós-teste, em relação ao pré-teste”, aceitando-se a hipótese alternativa de aumento ( $V = 603, p < 0,001$ ), o que indicou ganho no parâmetro  $\theta$  das habilidades dos alunos com significância estatística.

As frequências dos emoticons de indícios do senso de autoeficácia dos alunos indicam tendência de redução nas frequências de “inseguro” e aumento nas frequências de “seguro”, conforme Figura 7 o que se verifica pelos resultados do teste de Wilcoxon não pareado para cada emoticon, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do teste de Wilcoxon não pareado para verificação do aumento no senso de autoeficácia dos alunos, pela observação de cada emoticon propostos

Emoticon	Valor $W$ do teste	$p_{valor}$ do teste	Rejeição de $H_0$	Hip. alternativa
“Bem seguro(a). Acho que sei.”	$W = 185$	$p = 0,0014$	sim	aumento
“Resolvo, mas com alguma dúvida.”	$W = 65$	$p = 0,0252$	sim	redução
“Muito inseguro(a). Vou chutar.”	$W = 57$	$p = 0,0099$	sim	redução

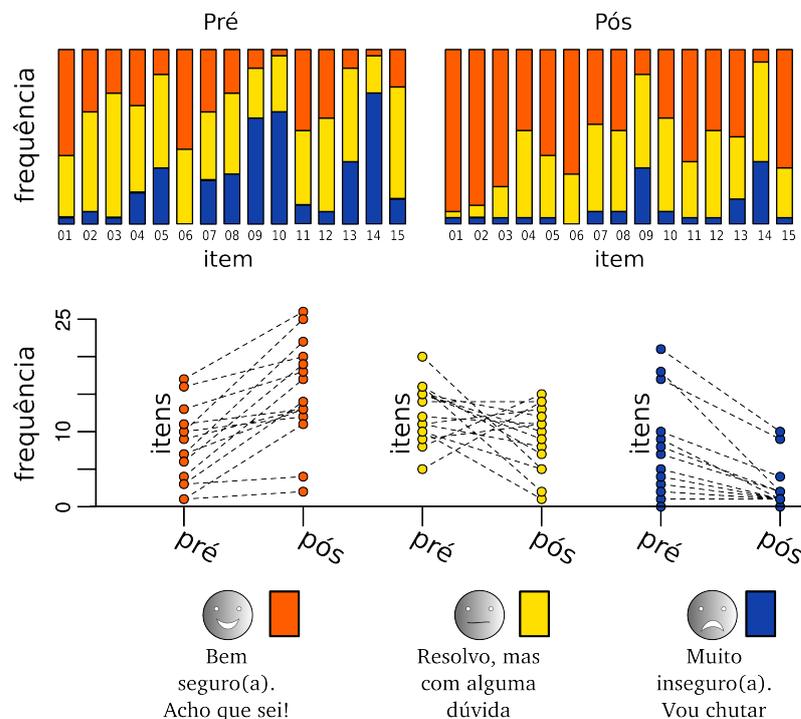


Figura 7 – Acima, as barras divergentes das frequências dos três emoticons, por item do teste objetivo, pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir). Abaixo, distribuição das frequências por item pré/pós, conectados pela linha pontilhada

De cada rede de associação pré e pós, obteve-se o conjunto de propriedades mostrado na Tabela 4. A verificação da hipótese nula  $H_0 =$  “o valor médio obtido na categoria não sofreu alteração estatisticamente significativa” rejeitando essa hipótese em caso de  $p < 0,05$ ”. Os resultados encontrados com teste de Wilcoxon são mostrados na Tabela 3. A fim de se exemplificar a topologia dessas estruturas, apresentam-se, na Figura 8, os grafos pré e pós instrução do aluno A17, com os *clusters* identificados. Cada vértice representa um termo ou sentença. Os vértices estão numerados para que a informação visual seja facilitada. Os termos utilizados como vértices dos grafos encontram-se listados na Tabela 5 e os números de codificação foram definidos a posteriori, servindo apenas como referentes aos termos, não exercendo nenhum tipo de prioridade. Para a lista da totalidade dos grafos obtidos, ver Apêndice I.

Tabela 3 – Resultados do teste de Wilcoxon pareado para todas as categorias registradas dos grafos, para verificação de ocorrência ou não de aumento com significância estatística na categoria

Aumento na categoria:	Valor $V$ do teste	$p_{valor}$ do teste	Rejeição de $H_0$	Hip. alternativa
Número de arestas	$V = 314$	$p = 0,00013$	sim	aumento
Densidade do grafo	$V = 313$	$p = 0,00150$	sim	aumento
Número de pto de articulação	$V = 248$	$p = 0,01093$	sim	aumento
Número de <i>clusters</i>	$V = 193$	$p = 0,04458$	sim	aumento
Conexões válidas / total de conexões	$V = 374$	$p = 1,0260 \times 10^{-5}$	sim	aumento

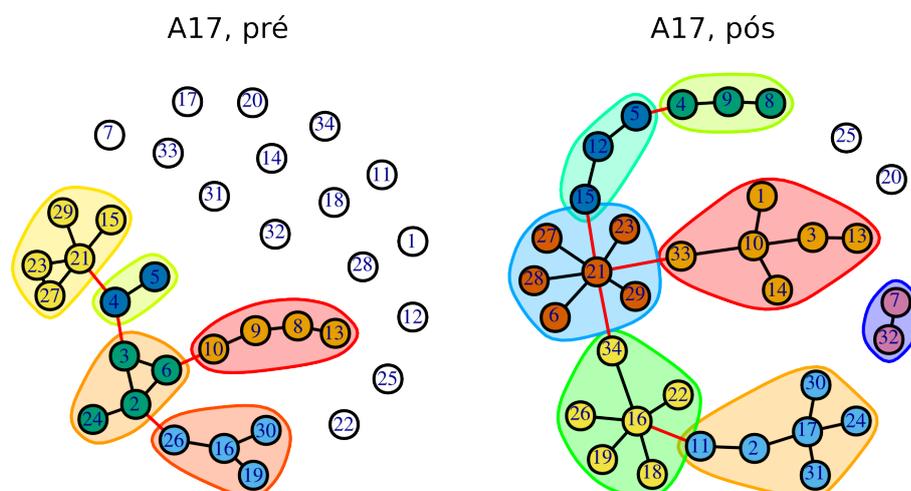


Figura 8 – Grafo do aluno A17, com as conexões feitas entre termos relacionados a Acústica, pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir)

Tabela 4 – Propriedades dos grafos de associações construídos pelos alunos

Aluno	N° de arestas		Densidade ( $\times 10^{-2}$ )		Pontos de Articulação		Clusters ( $> 2_{vert}$ )		Conexões válidas/tamanho (%)	
	pré	pós	pré	pós	pré	pós	pré	pós	pré	pós
A01	19	25	3,39	4,46	4	10	2	6	21,05	60,00
A02	13	21	2,32	3,74	2	10	2	6	76,92	71,43
A03	10	24	1,78	4,28	3	13	2	6	40,00	83,33
A04	17	27	3,03	4,81	2	11	2	6	82,35	88,89
A05	6	14	1,07	2,50	0	3	0	3	50,00	28,57
A06	20	24	3,57	4,28	9	10	3	4	55,00	87,50
A07	14	13	2,50	2,32	5	5	2	3	42,86	69,23
A08	12	16	2,14	2,85	7	9	1	3	50,00	56,25
A09	21	26	3,74	4,63	6	5	4	3	76,19	84,62
A10	22	21	3,92	3,74	4	6	3	4	59,09	71,43
A11	25	23	4,46	4,10	7	8	5	3	52,00	65,22
A12	13	11	2,32	1,96	4	2	3	2	53,85	81,82
A13	22	27	3,92	4,81	10	18	5	5	68,18	55,56
A14	36	29	6,41	5,17	16	20	7	5	33,33	51,72
A15	26	33	4,63	5,88	15	7	5	5	30,77	66,67
A16	27	24	4,81	4,28	23	19	7	5	33,33	29,17
A17	20	30	3,57	5,35	10	14	4	6	65,00	66,67
A18	24	14	4,28	2,50	18	6	5	4	45,83	92,86
A19	7	13	1,25	2,32	3	7	2	2	42,86	76,92
A20	18	15	3,21	2,67	11	9	4	4	22,22	33,33
A21	19	24	3,39	4,28	8	11	4	3	36,84	58,33
A22	11	15	1,96	2,67	5	5	2	4	45,45	80,00
A23	17	27	3,03	4,81	6	11	3	3	76,47	88,89
A24	13	19	2,31	3,39	8	9	3	4	76,92	94,74
A25	10	14	1,78	2,50	2	5	2	4	10,00	71,43
A26	18	21	3,21	3,74	15	15	5	4	50,00	80,95
A27	16	27	2,85	4,81	5	8	3	5	81,25	96,30
A28	11	11	1,96	1,96	5	8	3	3	54,55	63,64

Calculando-se o grau dos vértices e os pesos das arestas, verificou-se para o grafo concatenado pré-instrução, as arestas de peso  $w \leq 0,26$  representando o interquartil inferior – conexões individuais – e as arestas de peso  $w \geq 0,80$  configuravam o interquartil superior – conexões coletivas. Para o grafo concatenado pós-instrução, arestas de peso  $w \leq 0,26$  para o interquartil inferior – conexões individuais – e as arestas de peso  $w \geq 0,78$  formaram o interquartil superior – conexões coletivas –, conforme Tabela 6. Comparando a análise pós instrução com a análise pré instrução, as conexões menos frequentes, ou individuais, migram de 35,71% para 34,62% de arestas válidas (cientificamente aceitas). Já nas conexões mais frequentes, ou coletivas, observa-se uma migração de 27,27% para 39,62% de arestas válidas, conforme mostrado na Figura 10, onde são indicados, por interquartil, a variação da porcentagem de conexões válidas e dos *equivocos*.

Tabela 5 – Termos propostos e números utilizados para codificá-los, presentes na atividade de construção de redes de associação

Nº	Termo	Nº	Termo
01	Associado à presença de sobretons da onda principal	18	Maior potência concentrada numa área menor
02	Mais ondas por segundo	19	Ondas transmitidas com maior velocidade
03	Nível de intensidade sonora	20	Compressão e rarefação do ar
04	Voz mais grossa	21	Som mais grave
05	Menos ondas por segundo	22	Poucos sobretons
06	Maior intensidade sonora	23	Instrumentos tipicamente maiores
07	Passagem de corrente elétrica	24	Som alto
08	Frequência menor	25	Identidade Sonora
09	Ondas transmitidas com menor velocidade	26	Tubos mais curto
10	Timbre	27	Tubos mais longos
11	Frequência maior	28	Muitos sobretons
12	Menor potência concentrada numa área maior	29	Som baixo
13	Quantas vezes a intensidade do som ouvido é, em relação ao mínimo estímulo capaz de sensibilizar a audição	30	Cordas mais curtas, mais leves e mais tensionadas
14	Som aveludado	31	Menor intensidade sonora
15	cordas mais longas, mais pesadas e mais frouxas	32	Indução magnética na bobina de um alto falante
16	Som agudo	33	Som áspero
17	Instrumentos tipicamente menores	34	Onda longitudinal como o som

Concatenando-se todas as redes, obteve-se o grafo mostrando o pré-instrução e o pós-instrução para o grupo (Figura 9).

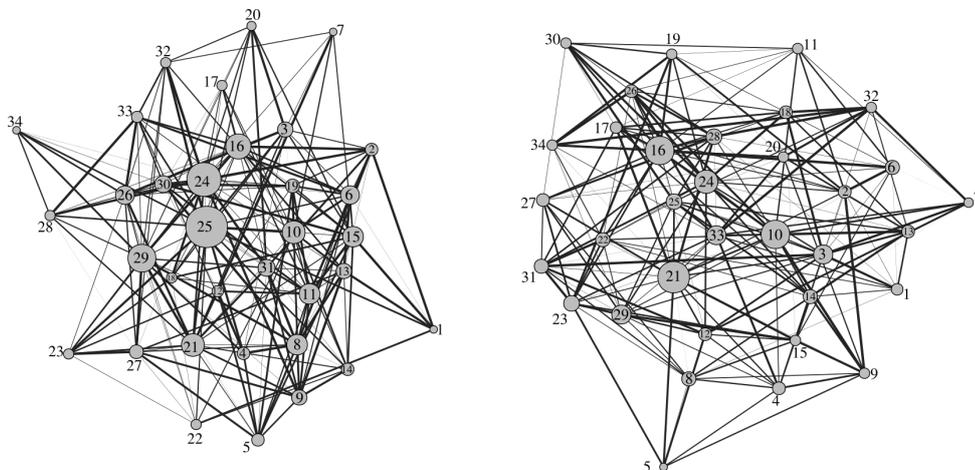


Figura 9 – Grafo com todas as conexões pré-instrução (esq) e pós-instrução (dir). O diâmetro de cada vértice representa o grau desse vértice (número de arestas incidentes) e a espessura de cada aresta representa o peso da mesma

O tamanho de cada vértice é proporcional ao número de vezes que o vértice é conectado (grau do vértice) e a espessura de cada aresta é proporcional ao número de vezes que ela ocorre (peso da aresta).

Tabela 6 – Resumo da distribuição dos pesos das frequências das arestas (conexões) nos grafos concatenados pré/pós

	Mín	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máx
pré	0,01	0,26	0,53	0,52	0,80	1,00
pós	0,00	0,26	0,53	0,52	0,78	1,00

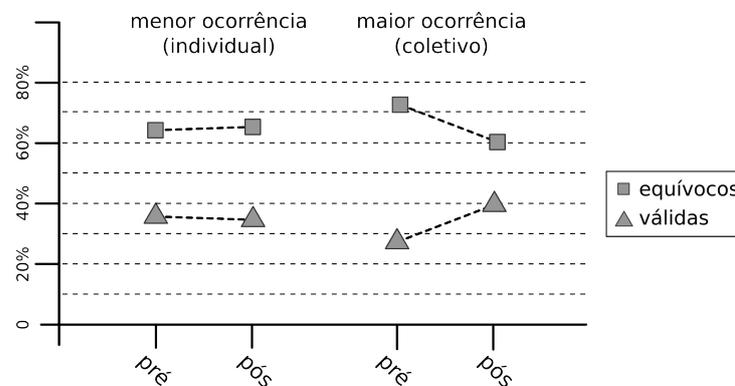


Figura 10 – Porcentagem de conexões cientificamente aceitas (válidas) e conexões baseadas em concepções alternativas (equivocos)

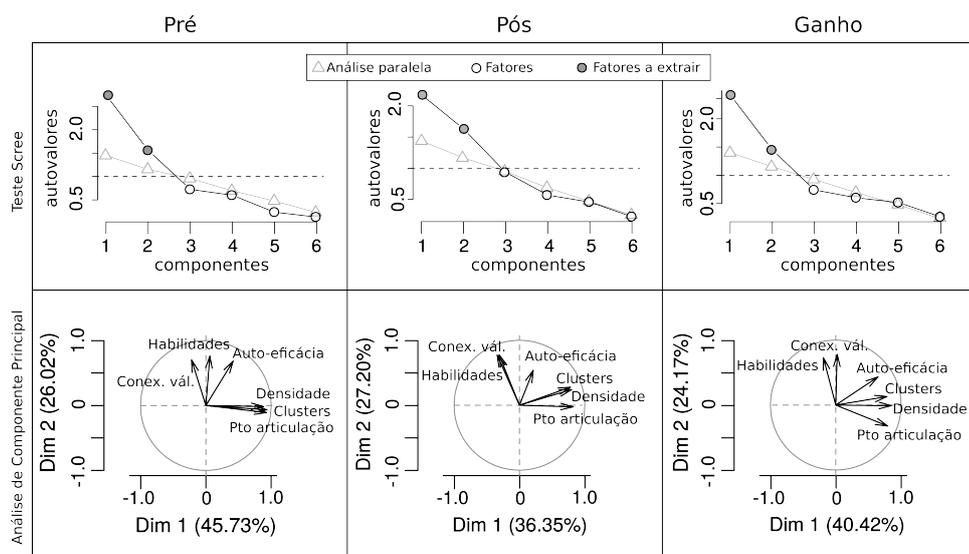


Figura 11 – Na parte superior, o teste Scree para determinação do número de fatores a extrair e na parte inferior a Análise de Componente Principal a partir dos instrumentos de coleta de dados, feitos com os dados pré/instrução, pós-instrução e ganho (diferença pós/pré)

Para a Análise de Componente Principal, o teste Scree mostrou que nos três casos, pré-instrução, pós-instrução e ganho pós/pré, a hipótese de duas dimensões principais responsáveis pela maior parte da variância dos dados foi suficiente. Retendo-se então dois componentes, plotou-se a primeira dimensão como abscissa e a segunda dimensão como ordenada, conforme mostrado na Figura 11.

Das entrevistas grupo focal houve, 85,71% de alunos do grupo A que optaram por fazer uso da palavra e 50,00% do grupo B o fizeram. No total, 79,17% optaram por perguntar algo a respeito das atividades ou emitir opiniões e críticas sobre a aplicação do produto. Foram totalizadas 67 falas dos alunos, dessas 05 eram perguntas (categoria “P”) de esclarecimento, 12 eram críticas (categoria “C”) ou relatos de dificuldades no processo, 13 eram comentários transversais (categoria “T”), sem conotação direta às atividades e 37 eram elogios (categoria “E”) ou comentários de satisfação em relação às atividades.

Da categoria P, o esclarecimento sobre as atividades de construção de rede e de mapa mental foi a mais frequente (80,00%). Da categoria C, o fato de o aluno ter que passar pelos testes pré e pós instrução foi a mais frequente (75,00%), seguida da queixa de que as atividades de redes eram difíceis ou cansativas, bem como as atividades de resolução de problemas com cálculos (25,00%), conforme pontuado pelo aluno A14, por exemplo:

[07:08, A] A14: *Tem aluno que até tem capacidade de aprender mas olha pro quadro (haviam contas de logaritmos do cálculo de decibel no quadro) e vai falar "isso não dá"*

[07:11, A] M: *Entendi, isso de certa forma afasta o aluno*

[07:14, A] A14: *Exatamente. Dá uma impulsão pra tentar aprender, mas quem quer aprender vai encarar aquilo dali (apontando o quadro), aí vem a dificuldade. Mas acontece isso e isso, cê mostra pra ele aí cê mostra: acontece isso, por causa disso (valorizando a construção de relações causa-efeito no entendimento dos conceitos), aí que o cara vai entender aquilo*

Na categoria (E), o mais frequente foi a oportunidade que a atividade ofereceu de se conectar teoria e prática (51,35%) favorecendo a compreensão dos conceitos trabalhados, conforme alguns trechos transcritos a seguir:

[07:30, B] A02: *Você conseguir fazer, tipo, aquele exercício ser de uma coisa que você está vendo*

*e não uma coisa que você está imaginando*

[07:53, B] A13: *Tem várias coisas que você consegue ver, mas o som você não consegue, entendeu, aí você precisa mostrar. Achei super interessante*

[08:52, A] A07: *Acho que assim, a prática atiza a curiosidade, por exemplo assim, a parada do Arduino por exemplo, com o LED, eu fui pesquisar sabe, porque, sei lá, você fica curioso pra saber mais sobre aquilo e acho que a prática é isso, porque na teoria, sei lá, você vê essas paradas e não tem nada assim, é aquilo e você, sabe*

[08:56, B] A02: *A gente vê o que aconteceu, então faz sentido. Não é só uma frase, uma fórmula*

[09:15, B] A27: *O ENEM tem muito de tecnologia, então, esse negócio de fazer o alto falante é bem diferente de você, sei lá, colocar um esquema dele, entendeu? [...] Ver ele funcionando*

[17:08, B] A03: *Tipo, muita gente não tem essa noção. Na prática fica, assim, melhor de visualizar entendeu, essa noção de que a Física está em todas as coisas, a todo momento, em nossa vida*

Notam-se, também na categoria *E*, comentários sobre vantagens de se ter a oportunidade de refazer os testes feitos no início do processo:

[15:28, B] A06: *Tipo assim, algo que eu achei muito legal é que no primeiro encontro você deu as três tarefas e aí no último encontro a gente teve que fazer isso também. Isso cria na nossa mente um contraste. Eu me senti muito mais satisfeito por ter aprendido. Porque eu soube todas aquelas questões de tubos, do teste, que eu não sabia direito, ah, tubo longo faz o que? Agora, hoje, suponho, é o contraste entre você não saber alguma coisa e você saber. Aí, você consegue entender que pô, eu aprendi, é muito mais massa. Aí, foi isso.*

Bem como o reconhecimento da relevância da apropriação de termos próprios da Ciência:

[03:23, A] A06: *Eu tava conversando com o (colega) sobre a lógica da linguagem, aí ele chegou, ele tava falando que a linguagem não tem lógica, porque é algo muito arbitrário e eu tava falando que tem lógica. Aí a gente chegou na seguinte conclusão: todo código, ele tem que ser arbitrário. Ele tem que tentar uniformizar ao máximo pra que todos que entrem em contato com ele entendam claramente cada um de seus aspectos. [...] É. Por isso que eu acho que linguagem da Física ou qualquer linguagem técnica ela tem sim que manter um padrão, entendeu?*

## 5 Discussão

Na nuvem de palavras pré-instrução (Figura 4, esq.), as ocorrências mais frequentes eram de termos associados a eventos e objetos do som, presentes no dia a dia do aluno, como “música”, “instrumentos” enquanto na nuvem pós, a emergência de termos associados a conceitos cientificamente aceitos de acústica, como “frequência”, “grave”, “agudo” e “timbre” emergem. Na nuvem de palavras, tem-se um conjunto de termos que emanam do coletivo. Somando-se a isso a redução dos equívocos e o aumento das conexões válidas no interquartil superior dos grafos concatenados (Figura 10), temos indícios de uma apropriação coletiva de fragmentos de conceitos e da linguagem cientificamente aceitas. A coexistência entre essas representações cientificamente aceitas e as concepções alternativas no grupo corroboram o observado por [Strike e Posner \(1992\)](#) para representações dos estudantes e também as sugestões de um caráter híbrido da linguagem, de [Mortimer \(1996\)](#), muito mais próximas de uma Mudança Conceitual paulatina do que como uma ruptura. Por outro lado, vê-se o ganho nessas duas categorias como indícios da Mudança Conceitual ocorrida com os indivíduos, mas detectada em aspectos do coletivo, reforçando a vantagem de se incluir no MI não apenas conflitos cognitivos, mas também momentos de compartilhamento de ideias afim de se aproximar a ecologia conceitual dos indivíduo e uma cultura compartilhada por eles à linguagem e às leis que regem os fenômenos acústicos.

Na análise via modelo de Rasch (Figura 6), o ganho de habilidades, com significância estatística, é um indício de aumento da proficiência dos alunos no domínio da Acústica. Observou-se o deslocamento de muitas habilidades para valores acima de 0 *logit* e o crescimento do mínimo valor do parâmetro *theta*, o que mostra, mesmo para o grupo com menor proficiência, um ganho de habilidade. O parâmetro  $\beta$  de dificuldade dos itens posiciona o item 10 como um dos mais difíceis no teste pré, ( $\beta > +2 \text{ logit}$ ). Este item se desloca para uma dificuldade média (entre  $\pm 1 \text{ logit}$ ). O item 10 versava sobre comprimento de onda em relação ao comprimento de uma corda vibrando no modo fundamental e observamos essa mudança como forte indicativo de que o manuseio do instrumento musical,

medindo-se e observando-se os harmônicos de modos normais diretamente, proporciona uma melhor articulação das relações causais para o som emitido pela corda, um dos aspectos necessários às Classes de Coordenação (DISESSA; SHERIN, 1998).

Nos chama a atenção o item 14, que nos dois momentos permanece com alto parâmetro de dificuldade  $\beta$ . Observando cuidadosamente o tipo de demanda (cálculo de uma relação logarítmica para o nível de intensidade sonora) e a fala do aluno A14 [07:08, A], na entrevista, vemos que itens semelhantes ao 14 foram tidos como aspecto negativo no MI. As atividades do MI focaram no aprendizado de conceitos em Acústica, via relações de causa-efeito e possivelmente demandaríamos um melhor uso relações logarítmicas como estruturante das relações de nível de intensidade sonora para permitir maior proficiência dos alunos em demandas como essa. Por outro lado, não detectamos a mesma queixa dos alunos quando demandados a calcular uma relação entre nível de intensidade sonora e a distância de uma fonte, caso do item 07 ou o comprimento de onda, com o desenho de uma corda de violão, caso do item 10. Nota-se uma redução do parâmetro de dificuldade nos dois itens. Vê-se aqui, um indício de que a dificuldade em relação ao item 14 pode não decorrer do fato de ser um item de cálculo, mas sim do fato de que as relações matemáticas, como a logarítmica em questão, são mais que uma ferramenta a serviço do conceito de nível de intensidade sonora, configurando uma habilidade a ser desenvolvida com o desenvolvimento do entendimento do conceito físico, algo que corrobora o que nos diz Pietrocola (2002).

Também é interessante notar o desagrado por parte dos alunos em relação aos itens de alto parâmetro  $\beta$  de dificuldade. Isso corrobora resultados de Rodrigues e Camiletti (2015), que apontavam uma forte relação entre o aluno gostar da Física e entender o que os professores de Física dizem. Inferimos que o aumento nos parâmetros  $\theta$  de habilidade, para o grupo, está associados tanto a uma maior compreensão dos conceitos trabalhados como também a um aumento em aspectos como curiosidade por assuntos da Física (evidente na fala do aluno A07, [08:52, A]) e ainda associados ao gosto em estudá-la, o que pode ser confirmado na fala dos alunos A13 [07:53, B] e A02, [08:56, B], indícios não só da maior proficiência mas também da capacidade de imaginar e criar, mentalmente, modelos de representação dos fenômenos estudados. Esse componente de curiosidade associado

ao prazer pelo aprendizado remete à descrição de [Pietrocola \(2004\)](#) e novamente aos resultados de [Rodrigues e Camiletti \(2015\)](#).

O aumento de proficiência detectado para o grupo em ressonância com o *feedback* positivo dado nas falas dos alunos também reforçam a utilização dos modelos de Rasch como interessante técnica de acesso ao ganho de habilidades dos alunos no processo educacional, corroborando os trabalhos de [Pugh et al. \(2010\)](#), [Coelho e Amantes \(2014\)](#) e [Golino e Gomes \(2015\)](#). Acrescenta-se a isso o aumento revelado para o senso de autoeficácia dos alunos que confirma a relação entre a crença de sucesso numa atividade e a melhora de desempenho escolar ([RODRIGUES; BARRERA, 2007](#); [MEDEIROS et al., 2000](#)).

O aumento em todas as categorias medidas dos grafos construídos (Tabela 3), bem como os indícios de apropriação de aspectos da linguagem científica e o ganho de performance nos testes propostos e as falas dos alunos se apresentam como ganhos influenciados pelas atividades do MI, desenvolvidas com os alunos. Mesmo diante do ganho constatado, não observou-se ganho absoluto, e isso mostra que ao fim da aplicação do MI, ainda ocorrem concepções alternativas ou *equivocos* em coexistência com aspectos do conhecimento científico. Essa coexistência se alinha às ideias uma Mudança Conceitual não como uma ruptura kuhniana, mas sim como um processo toulmiano de evolução do sistema da ecologia conceitual, ocorrendo pela constante revisão das partes integrantes do sistema ([MINSTRELL, 1982](#); [DISESSA, 1993](#)), rejeitando-se as ideias menos adaptadas ao todo e dando espaço às mais adaptadas, numa Mudança Conceitual dinâmica mas não abrupta.

O trabalho de [DiSessa \(2002\)](#) já propunha evolução conceitual por mudanças topológicas no sistema complexo de conhecimento. Para DiSessa, o estado *naïve* possui muitos elementos de tipos diferentes que podem ser combinados de forma complexa, em diferentes níveis e com subsistemas que quando juntos constituem a configuração final de um conceito experto. A esse tipo de configuração que DiSessa nomeia sistema complexo de conhecimento ou de ecologia conceitual. A diferença em nossas redes de associações é que utilizamos a linguagem e a semântica por traz de cada termo proposto para inferirmos a ocorrência de mudanças no sistema de conhecimento dos alunos. Uma

vez que é impossível acessarmos esse sistema, vemos as características de cada grafo se modificando pela ressignificação dos termos inerentes a conceitos de Acústica rumo a uma maior organização e robustez, num novo nível de complexidade que nos parece refletir ao menos parte da ecologia conceitual do estudante incorporando novos elementos ou modificando a relação entre elementos pré existentes.

Notamos também, para alguns alunos, a diminuição das características topológicas das redes de associações (e.g. A07, A10, A11, A12, A14, A16, A18 e A20, Tabela 3). Mas é interessante notar para esses alunos – exceto A16 – um aumento sensível na porcentagem de conexões cientificamente aceitas. Entendemos que um sistema como uma ecologia conceitual é, essencialmente, robusto e complexo. Também outras relações complexas como as redes sociais, ecologia (propriamente dita) ou redes neurais são dotadas de robustez e complexidade (CARLSON; DOYLE, 2002). O crescimento da complexidade do sistema pode implicar numa redução de sua robustez. Isso pode ser exemplificado numa analogia às relações sociais em um grupo. Grupos sociais podem ter vínculos extremamente fortes, num sistema muito robusto, mas isso tipicamente ocorre às custas de uma pequena complexidade, a exemplo de relações familiares ou dos grupos de melhores amigos. Numa outra ponta, pode-se ter um grupo de altíssima complexidade, como a totalidade de alunos de uma Universidade Federal, com indivíduos das mais diversas etnias, crenças, correntes de pensamento, orientação política, etc., mas é muito pouco provável que esse grupo mais complexo forme um sistema robusto, muito vinculado, como uma relação familiar.

Não longe disso, a ecologia conceitual pode ter uma reorganização ao sofrer uma perturbação intensa como numa instrução, rejeitando um ou mais fragmentos que poderiam representar pontos de articulação do sistema inicial. A extração de um ponto de articulação num grafo tem como efeito a segmentação da rede e duas ou mais outras, o que poderia significar uma redução da complexidade do sistema porém com ganho de robustez.

Nos alunos que diminuem os escores das características mas que aumentam a porcentagem de conexões válidas, vemos uma espécie de tomada de consciência na escolha das conexões, com grafos menos complexos porém mais robustos, possivelmente conservando as classes mais coordenadas que diSessa sugere, num recorte da rede para apenas

aquelas primitivas de maior prioridade e importância no domínio de Acústica, segundo o entendimento desses alunos.

Nas conexões das redes, observamos que a grande força da atividade proposta, a interpretação dos termos dentro dos boxes, também pode ser a grande fraqueza. Ao invés de nos lançarmos afoitos às inferências, observamos com atenção as conexões ditas “válidas”. Essa validade passa pela interpretação que o aluno dá à proximidade dos termos e também pela interpretação dada por nós aos mesmos. Essa hermenêutica, inerente às arestas das redes, nos exige cautela. Entretanto, um aspecto interessante e animador emerge dos resultados. Na Análise de Componente Principal (Figura 11), ocorre um agrupamento das habilidades dos alunos obtidas pela modelagem Rasch e das porcentagem de conexões válidas nos grafos. Isso é um indício marcante de que no processo de aprendizagem, a reorganização da ecologia conceitual – logo, a Mudança Conceitual como a entendemos – deixa rastros que são detectados tanto por uma propriedade psicométrica (traço latente na modelagem Rasch) quanto por uma atividade de interpretação (conexões dos grafos).

Também nessa análise, vemos que as características topológicas das redes se agrupam próximas ao primeiro componente, quase ortogonal à dimensão das habilidades, indicando interdependência entre tamanho, densidade, *clusters* e pontos de articulação, mas independência desses em relação às habilidades e às conexões válidas. Por último, quando olhamos para a dimensionalidade do senso de autoeficácia, vemos uma projeção nas duas dimensões, mostrando traços de que à medida em que o aluno aumenta seu senso de autoeficácia, também acaba por conectar grafos mais complexos bem como mais rico em conexões válidas no domínio estudado da Acústica.

## 6 Conclusões

### 6.1 Quanto aos objetivos propostos

O objetivo geral deste trabalho era desenvolver um produto educacional em forma de livreto contendo uma série de atividades para o aprendizado de conceitos em Acústica e avaliar a viabilidade da utilização desse produto como Material Instrucional (MI) direcionado a alunos do ensino médio. A considerar esses objetivos, vê-se que a realização das atividades foi produtiva no enriquecimento e na melhor articulação dos conceitos de Acústica, por parte dos alunos.

Utilizamos largamente a ideia de que o enriquecimento de conceitos se dá pela adequação de fragmentos de conhecimento numa estrutura complexa (rede). Essa estrutura representa constructos, algo intangível, na mente humana. Uma vez que essas estruturas são impossíveis de se observar diretamente, nos valem dos resultados apresentados tomando os ganhos registrado dos indivíduos do grupo estudado, nas diversas atividades, como indícios de evolução conceitual dos estudantes.

A título de sintetização, observamos ao final da aplicação do MI, traços de uma Mudança Conceitual por evolução da ecologia conceitual dos alunos pelos seguintes ganhos:

- Aquisição de termos da linguagem cientificamente aceita no domínio de Acústica (Figura 4) pela representação espontânea dos alunos
- Aumento do parâmetro de habilidade dos aluno em teste objetivo, comparando pós instrução vs pré instrução (Figura 6)
- Indício de aumento do senso de autoeficácia dos alunos quanto às questões propostas no teste objetivo (Figura 7, Tabela 2)
- Aumento das medidas topológicas dos grafos de associações, conectados pelos alunos (Tabela 3, Tabela 4, Apêndice I)

- Aumento das conexões cientificamente aceitas e diminuição das conexões baseadas em concepções alternativas nas representações coletivas dos alunos (Figura 10)
- Agrupamento das conexões cientificamente aceitas e das habilidades dos alunos numa mesma dimensão (Figura 11)

Cientes de que o aprendizado de conceitos em qualquer área científica demanda tempo e que somente um estudo longitudinal, numa escala maior de tempo e menor de análise, poderia elucidar aspectos mais sutis do processo, vemos, globalmente, indícios de que o MI elaborado somado à atitude de promover discussões e promover a expressão dos alunos tanto nas falas quanto na construção dos aparatos, oferecem com êxito um conjunto de atividades viáveis para o aprendizado de conceitos em Acústica. Vemos também a possibilidade de extensão das atividades para outras realidades escolares com potencialidades de adaptação. Por exemplo, no caso da não habilidade por parte do professor em se programar um Arduino, fica a possibilidade de se construir um *chinelofone* com canos cortados, conforme proposto, ou qualquer outra adaptação que se ajuste à realidade local. Ainda ressaltamos a análise Rasch como um interessante método de medida para avaliações e vemos como muito promissora a utilização do paradigma das redes para a investigação de traços do sistema do conhecimento dos alunos.

## 6.2 Relato pessoal

Pude verificar, de uma maneira geral, um ganho dos alunos pelos métodos de avaliação utilizados, conforme descrevi, mas olho de maneira cuidadosa para esse ganho, pois não buscava com as atividades do MI uma cura de equívocos ou a remediação do conhecimento cotidiano. Quanto mais reflito sobre isso, mais me questiono se isso sequer é possível e me questiono também sobre a própria definição de equívoco. Vejo cada vez mais o entendimento humano uma construção na mente mas também na cultura de um grupo e, por isso, ao longo do desenvolvimento das atividades, busquei uma aproximação do conhecimento cotidiano dos alunos e do conhecimento estabelecido pela comunidade científica. Nesse novo significado que processo educacional mostra para mim, para além

do “dar aulas”, a relação professor/aluno passa a ter nesses conhecimentos cotidianos e também nos equívocos, o principal mote para as discussões de conceitos científicos e vejo nessas discussões, uma construção cultural da ciência ocorrendo no ambiente da sala de aula.

Dos momentos de discussão propostos nas atividades, tivemos uma grande oportunidade de compartilhamento de pensamentos entre o grupo e mim. Estabelecemos uma relação de convívio menos hierarquizada e acumulei aprendizados que certamente podem ser transpostos para outras turmas, independente do tópico em discussão. Durante as aulas de realização das atividades, essa nova atitude, tanto minha quanto dos alunos, se consolidou e à medida em que as defesas naturais que temos diante do inédito iam baixando, as discussões tomavam um tom de divertimento, forçando o relógio a girar muito rápido, vaporizando o tempo de aula.

Ao longo desta dissertação, eu lanço mão de uma teoria com fundamentação cognitiva (Mudança Conceitual) para a propor e avaliar as atividades do MI e por vezes descrevo ocorrências marcantes da aprendizagem emanando das discussões no grupo e das interações entre e com os alunos, invocando um viés da perspectiva social do aprendizado. Essa junção pode parecer ousada, mas penso que um dos maiores ganhos que tive, como educador, foi incorporar esse novo jeito de olhar para as relações humanas do processo ensino/aprendizagem. Isso resulta numa reinvenção do eu, professor, e da relação professor/aluno, passando a considerar o aprendizado como um fenômeno mental sim, mas profundamente dependente da interface entre o eu e o mundo, exatamente onde a cultura emana e onde formas de expressões e representações, como a Linguagem e Arte, por exemplo, brotam.

Das maiores dificuldades que pude notar ao longo da realização das atividades, dou destaque a conseguir trazer à discussão aqueles alunos mais comedidos. A esses, à medida em que suas sugestões de respostas às questões propostas para discussão ganhavam validade da minha parte, o receio de errar parecia diminuir e as discussões se acaloravam. Também aos mais empolgados, o cuidado era de sempre fomentar o debate, validando novas ideias, evitando minhas interrupções constantes, mesmo que parecessem ideias muito

distantes do pensamento científico, para estabelecermos um solo comum de entendimento.

Uma reclamação frequente recaiu sobre as atividades do cálculo de nível de intensidade sonora. Como pontuei em minha discussão, não pareceu se tratar de uma rejeição a cálculos, apenas, pois em outras situações, por exemplo a do *chinelofone*, era necessário calcular o comprimento de cada tubo, e isso não gerou queixa. Possivelmente a necessidade de se trabalhar com uma escala logarítmica originou a queixa e tomo nota desse fato para que nas próximas oportunidades eu possa propor uma construção do entendimento desse domínio matemático em paralelo com o domínio da Física, quiçá propondo a um colega professor de matemática que desenvolvamos esse capítulo em parceria.

Dos momentos mais positivos, marcaram as atividades de caráter divertido. A atividade na qual os alunos vocalizam frente ao *smartphone* para medir as frequências da voz relaxada e da voz mais aguda possível, gerou um ruidoso clima de descontração e alegria entre os alunos, especialmente quando percebiam como fazer o valor da frequência aumentar no medidor. Também foi intensa a discussão da diferença entre música e ruído, algo esperado para uma pergunta que não tem resposta óbvia. A noção do timbre como um fenômeno da percepção humana tornou o debate muito rico, sinalizando a importância de se discutir em Ciências, fenômenos que possam ter uma interpretação diferente para cada aluno da sala. Na construção do alto-falante de papel, percebi um grande empenho e um conjunto soluções criativas para o *design* do aparelho. Muitos refaziam o a bobina, alterando o diâmetro, variando o cone de papel para verificar se conseguiam tornar o transdutor mais eficiente, numa prazerosa investigação do funcionamento de um transdutor.

Não se passa por um processo intenso de elaboração e realização de atividades de um tópico específico sem sofrer mudanças na própria forma de lidar com o tópico. Absorvi muito das afirmações da epistemologia na qual me baseei para o desenvolvimento do MI e a realização das atividades, focando no aluno e em suas demandas, validando suas dificuldades e partindo delas para um enriquecimento do conhecimento nosso, meu e deles.

A imersão em um conjunto de trabalhos com análise de redes, em diferentes áreas do conhecimento, me coloca num estado de reconhecimento dessa topologia em muitos domínios de maneira que mesmo a semântica da expressão rede ou grafo ganha um sentido

novo e poderoso para mim. Redes são menos hierárquicas, se baseiam em conexões e apresentam uma possibilidade de se entender um todo baseado em como as partes se juntam e se organizam.

Minhas perspectivas futuras apontam para um aprofundamento no entendimento de como as estruturas conceituais se formam e se organizam para o aluno, adicionando a elas a observação cuidadosa dos constructos sociais inerentes às interações professor/estudante e estudante/estudante, bem como incluindo aspectos não-científicos, culturais e artísticos como influenciadores positivos no processo de aprendizagem da Ciência.

# Referências

- ARIZA, R. P.; HARRES, J. B. S. A epistemologia evolucionista de Stephen Toulmin e o ensino de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, p. 70–83, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- AZEVEDO, M. C. P. S. Ensino de ciências - unindo a pesquisa e a prática. In: \_\_\_\_\_. São Paulo: Thompson Learning, 2004. cap. Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula, p. 19–33. Citado na página 35.
- BASCH, C. E. Focus group interview: an underutilized research technique for improving theory and practice in health education. *Health Education & Behavior*, v. 14, n. 4, p. 411–448, 1987. Citado na página 46.
- BORGATTI, S. P. et al. Network analysis in the social sciences. *Science*, v. 323, n. 5916, p. 892–895, 2009. Citado na página 29.
- BRASIL. *Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996: Lei de diretrizes e bases da Educação Nacional*. [S.l.]: MEC - Governo Federal Brasileiro, 1996. Citado na página 15.
- BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais*. [S.l.]: MEC - Governo Federal Brasileiro, 1999. Citado na página 15.
- BRASIL. *PCN+ Ensino Médio. Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais*. [S.l.]: MEC - Governo Federal Brasileiro, 2002. Citado na página 15.
- BRASIL. *Base nacional comum curricular*. [S.l.]: MEC - Governo Federal Brasileiro, 2016. Citado na página 15.
- BUDD, J. W. Mind maps as classroom exercises. *The Journal of Economic Education*, v. 35, n. 1, p. 35–46, 2004. Citado na página 38.
- CAMPBELL, D. T.; STANLEY, J. C. *Experimental and quasi-experimental designs for research on teaching*. [S.l.]: Houghton Mifflin Company, 1963. Citado na página 38.
- CAREGNATO, S. E. Co-autoria como indicador de redes de colaboração científica. *Perspectivas em Ciência da Informação*, v. 13, n. 2, p. 18–31, 2008. Citado na página 29.
- CAREY, S. Knowledge acquisition: Enrichment or conceptual change. In: \_\_\_\_\_. Cambridge, MA: MIT Press, 1999. p. 459–487. Citado na página 23.
- CARLSON, J. M.; DOYLE, J. Complexity and robustness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 99, n. suppl 1, p. 2538–2545, 2002. Citado na página 60.
- CATELLI, F.; MUSSATO, G. A. As frequências naturais de uma corda de instrumento musical a partir de seus parâmetros geométricos e físicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 2, p. 2304, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 37.
- CATELLI, F.; MUSSATO, G. A. Tensão, frequência e calibre das cordas de instrumentos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, p. 1–6, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 37.

- CATTELL, R. B. The scree test for the number of factors. *Multivariate behavioral research*, Taylor & Francis, v. 1, n. 2, p. 245–276, 1966. Citado na página 45.
- CAVALCANTE, M. A.; MONTEIRO, C. E. R.; PONTES, L. A. Novas tecnologias no estudo de ondas sonoras. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 30, n. 3, p. 579–613, 2013. Citado na página 16.
- CHI, M. Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. 1992. Citado na página 23.
- CICUTO, C. A. T.; CORREIA, P. R. M. Análise de vizinhança: uma nova abordagem para avaliar a rede proposicional de mapas conceituais. *Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo*, v. 34, n. 1, p. 1401–1, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 41.
- CLEMENT, J. Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of physics*, v. 50, n. 1, p. 66–71, 1982. Citado na página 23.
- COELHO, G. R.; AMANTES, A. A influência do engajamento sobre a evolução do entendimento dos estudantes em eletricidade. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 13, n. 1, p. 48–72, 2014. Citado na página 59.
- CONFREY, J. A review of the research on student conceptions in mathematics, science, and programming. *Review of research in education*, p. 3–56, 1990. Citado na página 23.
- CSARDI, G.; NEPUSZ, T. The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems*, p. 1695, 2006. Citado na página 44.
- DISESSA, A. A. Toward an epistemology of physics. *Cognition and instruction*, v. 10, n. 2-3, p. 105–225, 1993. Citado 6 vezes nas páginas 26, 27, 29, 31, 36 e 59.
- DISESSA, A. A. Why “conceptual ecolog” is a good idea. In: *Reconsidering conceptual change: Issues in theory and practice*. [S.l.]: Springer, 2002. p. 28–60. Citado na página 59.
- DISESSA, A. A. A history of conceptual change research: Threads and fault lines. In: \_\_\_\_\_. *The Cambridge handbook of: The learning sciences*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006. p. 265–281. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 24 e 25.
- DISESSA, A. A.; SHERIN, B. L. What changes in conceptual change? *International journal of science education*, v. 20, n. 10, p. 1155–1191, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 27, 31, 36 e 58.
- DONOSO, J. P. et al. A Física do violino. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 2, p. 2305–1, 2008. Citado na página 16.
- ERROBIDART, H. A. et al. Ouvido mecânico: um dispositivo experimental para o estudo da propagação e transmissão de uma onda sonora. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, p. 1507, 2014. Citado na página 17.
- FEOFIOLOFF, P.; KOHAYAKAWA, Y.; WAKABAYASHI, Y. *Uma introdução sucinta à teoria dos grafos*. 2011. Disponível em: <[www.ime.usp.br/~pf/teoriadosgrafos/](http://www.ime.usp.br/~pf/teoriadosgrafos/)>. Citado na página 31.
- FERRACIOLI, L. Aspectos da construção do conhecimento e da aprendizagem na obra de Piaget. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 16, n. 2, p. 180–194, 1999. Citado na página 22.

- FERRACIOLI, L. Mapas conceituais como instrumento de eliciação de conhecimento. *Revista Didática Sistemica*, v. 5, 2007. Citado na página 30.
- GOLINO, H.; GOMES, C. Modelo logístico simples de Rasch para dados dicotômicos. In: \_\_\_\_\_. *Psicometria Contemporânea: Compreendendo os modelos Rasch*. São Paulo: [s.n.], 2015. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 59.
- HEIBERGER, R. M. *HH: Statistical Analysis and Data Display 3.1-21*. 2015. Disponível em: <[URLhttp://CRAN.R-project.org/package=HH](http://CRAN.R-project.org/package=HH)>. Citado na página 44.
- HEWITT, P. G.; RICCI, T. F.; GRAVINA, M. H. *Física conceitual*. [S.l.]: Bookman, 2002. v. 9. Citado na página 39.
- HUNT, E.; MINSTRELL, J. *A cognitive approach to the teaching of physics*. Cambridge, MA: MIT Press, Bradford books, 1994. 51-74 p. Citado na página 25.
- JONASSEN, D. H. *Semantic network elicitation: tools for structuring hypertext*. [S.l.]: Oxford, UK: Intellect, 1990. Citado na página 30.
- KANDUS, A.; GUTMANN, F. W.; CASTILHO, C. M. C. A Física das oscilações mecânicas em instrumentos musicais: o exemplo do berimbau. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 4, p. 427–433, 2006. Citado na página 16.
- KARINO, C. A.; ANDRADE, D. F. *Entenda a Teoria de Respostas ao Item (TRI), utilizada no Enem*. Brasília: [s.n.], 2011. Disponível em: <[http://download.inep.gov.br/educacao\\_basica/enem/nota\\_tecnica/2011/nota\\_tecnica\\_tri.pdf](http://download.inep.gov.br/educacao_basica/enem/nota_tecnica/2011/nota_tecnica_tri.pdf)>. Citado na página 43.
- KUHN, T. S. *The Structure of Scientific Revolutions Vol.* [S.l.: s.n.], 1962. Citado na página 22.
- LÊ, S. et al. Factominer: an r package for multivariate analysis 1.3.2. *Journal of statistical software*, v. 25, n. 1, p. 1–18, 2008. Citado na página 45.
- LUDLOW, L. H.; HALEY, S. M. Rasch model logits: Interpretation, use, and transformation. *Educational and Psychological Measurement*, v. 55, n. 6, p. 967–975, 1995. Citado na página 43.
- MAIR, P.; HATZINGER, R.; MAIER, M. J. *eRm: Extended Rasch Modeling 0.15-5*. 2015. Disponível em: <<http://erm.r-forge.r-project.org/>>. Citado na página 43.
- MALTA, G. H. S. *Grafos no Ensino Médio: uma inserção possível*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2008. Citado na página 30.
- MCCLOSKEY, M. Naive theories of motion. *Mental models*, p. 299–324, 1983. Citado na página 23.
- MEDEIROS, P. C. et al. A auto-eficácia e os aspectos comportamentais de crianças com dificuldade de aprendizagem. *Psicologia: Reflexão e Crítica*, v. 13, n. 3, p. 327–336, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 59.
- MINSTRELL, J. Explaining the “at rest” condition of an object. *The physics teacher*, v. 20, n. 1, p. 10–14, 1982. Citado 3 vezes nas páginas 25, 31 e 59.

- MOREIRA, M. A. Ensino de Física no Brasil: retrospectiva e perspectivas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 22, n. 1, p. 94–99, 2000. Citado na página 15.
- MORTIMER, E. F. Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos. *Investigações em ensino de ciências*, v. 1, n. 1, p. 20–39, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 57.
- MUNARI, A. *Jean Piaget*. 3. ed. Recife, PE: Editora Massangana, 2010. Tradução e organização: Daniele Saheb. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 30.
- NARDI, R.; GATTI, S. T. Concepções espontâneas, mudança conceitual e ensino de ciências: uma revisão sobre as investigações construtivistas nas últimas três décadas. *Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas*, v. 1, n. 1, 2004. Citado na página 28.
- NOVAK, J. D. Concept mapping: A useful tool for science education. *Journal of research in science teaching*, v. 27, n. 10, p. 937–949, 1990. Citado na página 30.
- PENA, F. L. A. Por que, apesar do grande avanço da pesquisa acadêmica sobre ensino de Física no Brasil, ainda há pouca aplicação dos resultados em sala de aula? *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 4, p. 293–295, 2004. Citado na página 16.
- PIAGET, J. Part I: Cognitive development in children: Piaget development and learning. *Journal of research in science teaching*, v. 2, n. 3, p. 176–186, 1964. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- PIETROCOLA, M. A matemática como estruturante do conhecimento físico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. 1, p. 93–114, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 58.
- PIETROCOLA, M. Ensino de ciências - unindo a pesquisa e a prática. In: \_\_\_\_\_. São Paulo: Thompson Learning, 2004. cap. Curiosidade e imaginação: os caminhos do conhecimento nas ciências, nas artes e no ensino, p. 119 – 134. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 59.
- PIUBELLI, S. L. et al. Simulador de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos para o ensino da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 32, n. 1, p. 1501, 2010. Citado na página 16.
- POZO, J. I.; GÓMEZ CRESPO, M. Á. *A aprendizagem e o ensino de ciências: do conhecimento cotidiano ao conhecimento científico*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. Citado na página 30.
- PUGH, K. J. et al. Teaching for transformative experiences and conceptual change: A case study and evaluation of a high school biology teacher's experience. *Cognition and Instruction*, v. 28, n. 3, p. 273–316, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 59.
- R - Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2008. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Citado na página 40.
- RABIEE, F. Focus-group interview and data analysis. *Proceedings of the nutrition society*, v. 63, n. 04, p. 655–660, 2004. Citado na página 46.

- RAICHE, G.; MAGIS, D. *nfactors: Parallel Analysis and Non Graphical Solutions to the Cattell Scree Test 2.3.3*. 2010. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/nFactors/index.html>>. Citado na página 45.
- RASCH, G. *Studies in mathematical psychology: Probabilistic models for some intelligence and attainment tests*. 1960. Citado na página 42.
- RAVASZ, E. et al. Hierarchical organization of modularity in metabolic networks. *Science*, v. 297, n. 5586, p. 1551–1555, 2002. Citado na página 29.
- REZENDE, F.; LOPES, A. M. A.; EGG, J. M. Identificação de problemas do currículo, do ensino e da aprendizagem de Física e de matemática a partir do discurso de professores. *Ciência & Educação*, v. 10, n. 2, p. 185–196, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- REZENDE, F.; OSTERMANN, F. A prática do professor e a pesquisa em ensino de física: novos elementos para repensar essa relação. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 22, n. 3, p. 316–337, 2005. Citado na página 16.
- RODRIGUES, E. V. Utilização de um programa de gravação e edição de áudio para discussão das características do som. In: *Memórias del Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación*. Buenos Aires: [s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 36.
- RODRIGUES, E. V.; CAMILETTI, G. G. Levantamento de concepções e atitudes dos alunos em Acústica. In: *Anais do X ENPEC*. Águas de Lindóia: [s.n.], 2015. Citado 3 vezes nas páginas 34, 58 e 59.
- RODRIGUES, L. C.; BARRERA, S. D. Auto-eficácia e desempenho escolar em alunos do ensino fundamental. *Psicologia em Pesquisa*, Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Psicologia, v. 1, n. 2, p. 41–53, 2007. Citado na página 59.
- ROEDERER, J. G. *Introdução à Física e psicofísica da música*. 1. ed. São Paulo: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2002. ISBN 85-314-0457-6. Citado na página 37.
- ROSA, C. T. W.; ROSA, A. B. Ensino de Física: objetivos e imposições no ensino médio. *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*, v. 4, n. 1, p. 2, 2005. Citado na página 14.
- SANTOS, E. M.; MOLINA, C.; TUFAILE, A. P. B. Violão e guitarra como ferramentas para o ensino de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 2, p. 2507, 2013. Citado na página 16.
- SELLMANN, D.; LIEFLÄNDER, A. K.; BOGNER, F. X. Concept maps in the classroom: A new approach to reveal students' conceptual change. *The Journal of Educational Research*, n. ahead-of-print, p. 1–8, 2015. Citado na página 30.
- SINATRA, R. et al. A century of physics. *Nature Physics*, v. 11, n. 10, p. 791–796, 2015. Citado na página 29.
- STRIKE, K. A.; POSNER, G. J. A revisionist theory of conceptual change. *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice*, v. 176, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 57.

- TOULMIN, S. E. The evolutionary development of natural science. *American Scientist*, v. 55, n. 4, p. 456–471, 1967. Citado na página 24.
- VIEIRA, L. P.; AMARAL, D. F.; LARA, V. O. M. Ondas sonoras estacionárias em um tubo: análise de problemas e sugestões. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, p. 1504, 2014. Citado na página 16.
- VILLANI, A. Reflexões sobre o ensino de física no Brasil: práticas, conteúdos e pressupostos. *Revista de Ensino de Física*, v. 6, n. 2, p. 76–95, 1984. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- VOSNIADOU, S.; BREWER, W. F. Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive psychology*, v. 24, n. 4, p. 535–585, 1992. Citado na página 23.
- WANG, J. Ingenuity lab: making and engineering through design challenges at a science center. In: *Proceedings from the 120th American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 37.
- WANG, J.; AGOGINO, A. M. Cross-community design and implementation of engineering tinkering activities at a science center. *Proc. FabLearn*, p. 1–4, 2013. Citado na página 16.
- WELLER, W. Grupos de discussão na pesquisa com adolescentes. *Educação e Pesquisa*, v. 32, n. 2, p. 241–260, 2006. Citado na página 46.
- WILCOXON, F. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics bulletin*, v. 1, n. 6, p. 80–83, 1945. Citado na página 43.
- WISER, M. Use of history of science to understand and remedy students' misconceptions about heat and temperature. *Software goes to school: Teaching for understanding with new technologies*, Oxford University Press New York, NY, p. 23–38, 1995. Citado na página 24.
- WOLD, S.; ESBENSEN, K.; GELADI, P. Principal component analysis. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, Elsevier, v. 2, n. 1-3, p. 37–52, 1987. Citado na página 45.
- ZANETIC, J. Física e arte: uma ponte entre duas culturas. *Proposições, Campinas*, v. 17, n. 1, p. 39–58, 2006. Citado na página 17.
- ZIGOMATIC. *Wordcloud: Free online Wordcloud generator*. 2015. Disponível em: <<http://www.wordclouds.com/>>. Citado na página 41.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Produto desenvolvido

Atividades para o aprendizado de conceitos  
básicos em Acústica

por

Ernani Vassoler Rodrigues  
ernanivr@gmail.com

sob a orientação de  
Prof. Giuseppe Camiletti Gava  
giuseppi.ufes@gmail.com

# Sumário

<b>1</b>	<b>Começando com o que você já sabe!</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	2
1.2	Mapas Mentais . . . . .	2
1.3	Construindo um Mapa Mental (MM) . . . . .	3
1.3.1	Atividade - Aprendendo a ferramenta MM . . . . .	3
1.3.2	Atividade - Mapa Mental dos conhecimentos sobre o som . . . . .	4
1.3.3	Atividade - Rede de associações . . . . .	4
1.4	Avaliação de conceitos em Acústica . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Som grosso e som fino</b>	<b>6</b>
2.1	Objetivos . . . . .	7
2.2	Introdução . . . . .	7
2.3	O que faremos? . . . . .	8
2.4	Conhecendo a voz dos colegas . . . . .	8
2.5	Medindo a frequência com um <i>app</i> . . . . .	9
2.5.1	Baixando e instalando . . . . .	9
2.6	Qual é a frequência da sua voz, relaxada? . . . . .	10
2.7	Pense e responda . . . . .	11
2.8	Altura do som: o que a Física diz . . . . .	12
2.9	Tonalidade dos sons . . . . .	13
2.10	Atividade . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Timbre: a impressão Digital da voz</b>	<b>16</b>
3.1	Objetivos . . . . .	17
3.2	Pense e responda . . . . .	17
3.3	Reconheço o Timbre? . . . . .	18
3.3.1	O Timbre da voz . . . . .	18
3.3.2	O Timbre dos instrumentos musicais . . . . .	18

3.4	Falando sobre o Timbre do som . . . . .	19
3.5	Timbre: o que a Física diz . . . . .	20
3.6	Analisando o Timbre com um <i>app</i> . . . . .	21
3.6.1	Baixando e instalando . . . . .	21
3.7	O espectrograma do Timbre . . . . .	22
3.7.1	O quê observar? . . . . .	22
3.7.2	Discussão da análise . . . . .	22
3.8	Atividade . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Instrumentos de cordas vibrantes</b>	<b>25</b>
4.1	Objetivos . . . . .	26
4.2	Introdução . . . . .	26
4.3	Instrumentos de cordas . . . . .	27
4.4	O violão . . . . .	27
4.5	Pense e responda . . . . .	28
4.6	Velocidade das ondas em cordas tensionadas . . . . .	28
4.6.1	Buscando padrões - influência da Tração . . . . .	31
4.6.2	Buscando padrões - influência da Densidade Linear . . . . .	32
4.7	Afinando um violão . . . . .	34
4.8	Pense e responda . . . . .	35
4.9	A equação fundamental da Ondulatória: o que a Física diz . . . . .	35
4.10	Afinando um violão com o Arduino . . . . .	37
4.11	Atividades . . . . .	39
4.11.1	O que causa a afinação, a final? . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Modos normais em cordas</b>	<b>41</b>
5.1	Objetivos . . . . .	42
5.2	Modo normal fundamental . . . . .	42
5.3	Pense e responda . . . . .	44
5.4	O comprimento de onda $\lambda$ em modos normais . . . . .	44
5.4.1	Atividade . . . . .	45
5.5	Modos normais de ordem superior . . . . .	46
5.5.1	Atividade . . . . .	48
5.6	Pense e responda . . . . .	48
5.7	Atividade . . . . .	49

<b>6</b>	<b>Modos normais em tubos</b>	<b>52</b>
6.1	Objetivos . . . . .	53
6.2	Chinelo no cano . . . . .	53
6.3	O que a Física diz . . . . .	54
6.3.1	Modo normal fundamental em um tubo aberto dos dois lados . . . . .	54
6.3.2	Harmônicos de ordem superior . . . . .	55
6.4	Pense e responda . . . . .	56
6.5	Tubo de Kundt . . . . .	56
6.6	Atividade: Construindo um instrumento musical . . . . .	57
6.6.1	Material Necessário . . . . .	58
6.6.2	Escala Musical (temperada) . . . . .	58
6.6.3	A brincadeira . . . . .	60
6.7	Tubos fechados em um dos lados . . . . .	61
6.8	Pense e responda . . . . .	62
<b>7</b>	<b>Transdutor sonoro</b>	<b>63</b>
7.1	Objetivos . . . . .	64
7.2	Introdução . . . . .	64
7.3	Pense e responda . . . . .	65
7.4	A intensidade do som: o que a Física diz . . . . .	65
7.4.1	Modelo matemático da intensidade sonora $I$ . . . . .	65
7.5	Sistemas de som <i>line array</i> . . . . .	67
7.6	Pense e responda . . . . .	68
7.7	Nível da intensidade sonora: O que a Física diz . . . . .	69
7.7.1	Audição humana . . . . .	69
7.7.2	Calculando decibéis . . . . .	71
7.8	Utilizando um <i>app</i> de decibelímetro . . . . .	71
7.9	Atividade - Construindo alto falantes alternativos . . . . .	71
7.9.1	Material Necessário . . . . .	71
7.10	Pense e responda . . . . .	72
<b>8</b>	<b>Atividades Finais</b>	<b>73</b>
8.1	Objetivos . . . . .	74
8.2	Atividade - Teste objetivo . . . . .	74
8.3	Atividade - Construindo um Mapa Mental . . . . .	74
8.4	Atividade - Rede de associações . . . . .	74
8.5	Agradecimento . . . . .	75

## **Apresentação**

Você já percebeu que o som está a nossa volta, nos rodeando o tempo todo? Que a gente utiliza o som como forma de comunicação, de expressão e de entendimento do mundo? Tente assistir um filme qualquer com o volume da televisão zerado. Você perceberá o quanto a emoção pode ser transmitida pelo som que ouvimos. Divida? Então tente lembrar de um parente te chamando quando você era criança e tinha feito algo que o desagradasse. A voz da sua mãe, do seu pai ou de um irmão mais velho, já indica que você pode estar em apuros! Sabemos se uma pessoa está alegre, triste ou empolgada apenas pelo som. Pelo som, podemos perceber a chuva, o perigo, uma festa, etc.

Por outro lado, uma música suave pode nos acalmar, quando queremos relaxar ou meditar e uma música agitada pode influenciar nossa atitude, quando queremos dançar ou praticar algum esporte.

Há um ramo da Física que estuda a natureza desses fenômenos, chamado Acústica. Em Acústica, estudamos os fenômenos sonoros e como são os instrumentos que emitem som e ainda que características desses instrumentos fazem o som de um ser tão diferente do outro.

O presente material didático é uma proposta de atividades para a compreensão de fenômenos acústicos e da Física por trás deles. Em oito capítulos vamos passar pela utilização de aplicativos de celular, manuseio de instrumentos musicais e até tentaremos construir alguns emissores de som, de modo a colocar frente a frente a Física que aparece nos nossos livros e a Física que nos ronda no cotidiano. Para isso, muito esforço e dedicação serão necessários, mas isso não significa que não possamos nos divertir com essa ciência que está tão perto da Arte e que é tão fascinante.

Então, mãos à obra!

# Capítulo 1

Começando com o que você já sabe!

## 1.1 Objetivos

Caro aluno, esta é nossa primeira atividade. Seja bem vindo! Nosso principal objetivo aqui é desenvolver alguns procedimentos que permitam expressar as ideias sobre o som que já estão em sua mente, para que possamos marcar um ponto de partida em nossos estudos.

## 1.2 Mapas Mentais

Uma técnica utilizada em ciências da cognição para desempacotar ideias que estão em nossa mente é a construção de um diagrama contendo palavras-chave de um assunto dentro de caixas e ligadas por setas que indicam uma conexão entre essas palavras-chave. Essa estrutura é chamada “Mapa Mental”.

Não estamos inventando a roda. Essa técnica de Mapa Mental é muito utilizada em empresas multinacionais quando se quer elaborar uma ideia ou lançar um produto novo no mercado. Para que as pessoas não se esqueçam, ou para que compartilhem com outras, é comum em processos chamados *brainstorming* a construção de Mapas Mentais, ou de alguma variação deles.

A seguir um exemplo de um Mapa Mental. Suponhamos que eu pretenda fazer pizza começando do zero, para convidar algumas pessoas para ir à minha casa, o que devo levar em conta? Coloquei essas ideias no papel, e ficou desse jeito:

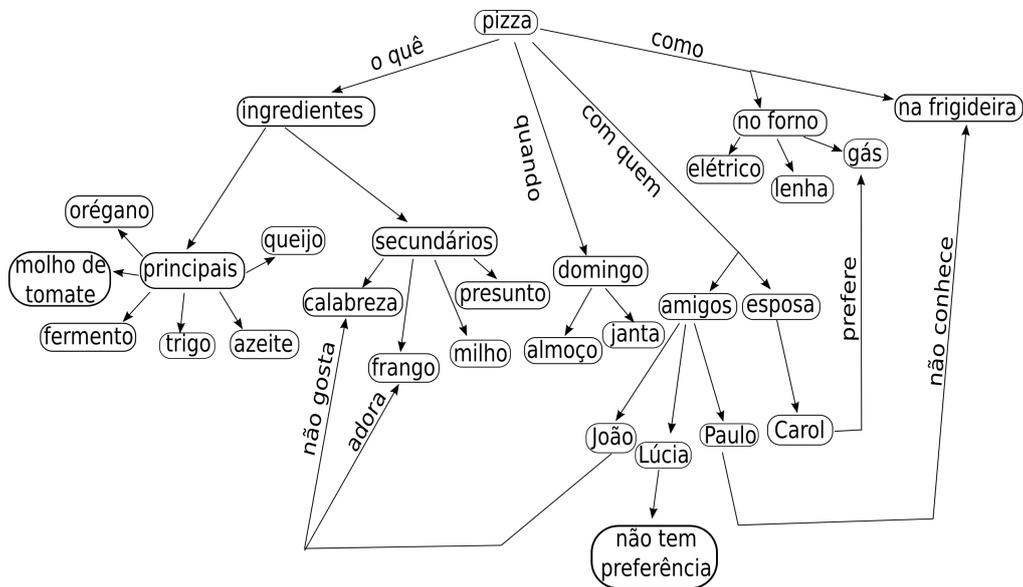


Figura 1.1: Mapa Mental para preparar uma pizza

## 1.3 Construindo um Mapa Mental (MM)

### 1.3.1 Atividade - Aprendendo a ferramenta MM

Suponhamos que você vá fazer uma viagem para o exterior. Precisamente, para Nova York. Mas suponha que você nunca tenha saído nem da Grande Vitória. Construa numa folha em branco, um Mapa Mental colocando em caixas tudo que você acha que é importante para essa viagem, e escrevendo nas ligações entre as caixas como elas se relacionam, semelhante ao mapa feito para a pizza.

### **1.3.2 Atividade - Mapa Mental dos conhecimentos sobre o som**

Agora, na folha extra dada, escreva seu nome e construa um Mapa Mental sobre o que você sabe a respeito de Som e da física do som, chamada de Acústica. Não se preocupe em “acertar” ou “errar”. Não existe Mapa Mental correto ou incorreto. Apenas vá colocando no papel, de maneira semelhante ao caso da pizza, o que lhe vem à cabeça sobre Som.

### **1.3.3 Atividade - Rede de associações**

Nesta segunda atividade, você receberá uma folha separada com vários boxes contendo termos ou pequenas sentenças sobre algumas das características do som e as variáveis que podem influenciar nessas características. A ideia dessa atividade é que você ligue as caixas da forma que achar conveniente, considerando quais são as variáveis e as consequências mais relacionadas, ou quais são os boxes que mais se relacionam.



Figura 1.2: A ser utilizada na atividade

## 1.4 Avaliação de conceitos em Acústica

Como parte das atividades de levantamento dos seus conhecimentos prévios, você receberá uma avaliação objetiva, contendo 15 questões relativas a conceitos em Acústica. Marque em cada questão seu senso de segurança, indicado pelas carinhas (você verá na avaliação). A sugestão é que você leia o enunciado de cada questão, indique o quão seguro você está para responder à questão e então assinale o item que você julga correto.

## Capítulo 2

### Som grosso e som fino

## 2.1 Objetivos

Ao final desta atividade, espera-se que você esteja apto a:

- Identificar sonoramente a diferença entre um som mais agudo e um som mais grave;
- Elaborar uma relação de causa e efeito a respeito dos fatores que influenciam a altura do som;
- Construir um pequeno modelo de representação das variáveis associadas à altura do som.

## 2.2 Introdução

O som é uma poderosa forma de sensibilizar nossa percepção e nos fornecer informações sobre o mundo além de permitir que emitamos informações ao mundo, pela fala ou pela música, por exemplo. Utilizamos o som como mecanismo de comunicação, para expressar ideias ou sentimentos e até para diferenciar a intenção de uma pessoa pela forma como ela emite som (fala).

Nesse capítulo, estamos interessados em sintonizar nossos ouvidos para percebermos uma característica marcante do som, que muitas vezes é confundida com o “Volume” do som. Estamos falando da Altura do som. Mas qual é então a diferença? Vamos por partes. Primeiro vamos aprender sobre a Altura.

## 2.3 O que faremos?

Nesta atividade utilizaremos um aplicativo para *smartphone* para discutirmos alguns aspectos inerente ao som emitido por nossa voz.

A turma será dividida em grupos de três alunos, e utilizaremos apenas um *smartphone* por grupo. O aplicativo utilizado será um afinador de guitarra, que utiliza o microfone do próprio aparelho e indica qual é a nota musical que está sendo tocada. Mais do que isso, o aplicativo sugerido executa a medida da frequência da nota musical tocada, e com isso, poderemos identificar qual é a frequência de um som, seja da voz de algum aluno, seja da corda de um violão ou um cavaquinho, ou uma guitarra.

## 2.4 Conhecendo a voz dos colegas

Se vocês estão em um grupo com três componentes, não é difícil perceber que cada componente do grupo possui uma tonalidade natural diferente de voz. Agora, um de cada vez, cada integrante do grupo vai falar a letra “a”, durante aproximadamente dois segundos, separadamente. A princípio, podemos ficar tímidos pois não estamos tão acostumados a vocalizarmos uma única vogal em público, durante tanto tempo. Não se intimide, é tudo bem da ciência! Vamos lá, de maneira bem relaxada e sem gritar, diga:

“[...] aaaaaaaaaaaaa [...]”

Qual integrante do grupo possui a voz mais grossa? (anote)

---

Qual integrante do grupo possui a voz mais fina? (anote)

---

Em nosso dia a dia, o uso de adjetivos como *fino* ou *grosso* é muito comum, pois estamos tentando atribuir características ao som. É uma tarefa linguística interessante, tentar expressar em palavras aquilo que percebemos ouvindo. É por isso que na Física utilizamos termos próprios para essas características do som.

Ao se propagar no ar, o som perturba as moléculas do meio, transmitindo energia de uma pra outra. Essa perturbação se propagando é definida pela Física como uma Onda Mecânica. Sim, o som é uma onda mecânica, e como tal, tem características de ondas, como Velocidade, Comprimento de Onda, Frequência e Amplitude, dentre outras. Veremos a seguir que voz grossa e voz fina são características intimamente ligadas a uma dessas características da onda sonora.

## 2.5 Medindo a frequência com um *app*

Em nosso próximo passo, vamos recorrer a uma ferramenta de alta tecnologia, para medirmos a frequência da nossa voz.

### 2.5.1 Baixando e instalando

Para começarmos, o primeiro passo é a instalação do aplicativo sugerido que é gratuito e está disponível tanto para sistemas Android<sup>®</sup>, IOS<sup>®</sup> e também para Windowsphone<sup>®</sup>. Vá ao buscador do aparelho e procure pelo

app “Pitchlab”. Faça a instalação do mesmo e abra o aplicativo. Ao abri-lo você perceberá que este aplicativo possui várias telas possíveis. Estamos interessados no modo medidor de frequência. Então, troque o modo de utilização para o modo sugerido na Figura 1.



Figura 2.1: Tela do *Pitchlab* com frequencímetro

## 2.6 Qual é a frequência da sua voz, relaxada?

Como você pode perceber o medidor de frequência (frequencímetro) fica o tempo todo mudando de valor. Isso ocorre porquê em cada ambiente existem sons vindo de tantas fontes diferentes o tempo todo, que é praticamente impossível o medidor de frequência registrar um único valor. Por isso, ao medirmos a frequência de um som da nossa própria voz relaxada, devemos nos aproximar do aparelho, e vocalizar novamente, durante aproximadamente dois segundos e vamos agora preencher a Tabela 1 abaixo, contendo quem é o aluno e qual a frequência da voz relaxada, durante a fala da vogal *a*:

---

	Nome do Aluno	Frequência medida
Voz mais grossa		
Voz intermediária		
Voz mais fina		

---

## 2.7 Pense e responda

1. O que você pode perceber com relação à tonalidade (altura) da voz quando comparada com o valor da frequência medida?

---

---

2. Ao falarmos, nós conseguimos controlar a tonalidade de nossa voz. É por isso que conseguimos cantar notas musicais diferentes, expressar espanto (geralmente com a voz mais fina), expressar seriedade (geralmente com a voz mais grossa).

- (a) Será que o aluno do grupo que tem a voz mais grossa, conseguiria falar com voz mais fina?

---

- (b) Caso sim, faça o teste, vocalize com a voz mais fina e anote abaixo o nome do aluno e o novo valor da frequência:

---

---

## 2.8 Altura do som: o que a Física diz

O som que a gente ouve, ocorre devido à vibração das moléculas de ar que estão no ambiente. No caso da voz, o som é produzido no ar da laringe pela vibração das cordas vocais, e emana pela boca e pelo ar do ambiente. A Figura 2 representa esquematicamente a posição e funcionamento das cordas vocais.



Figura 2.2: Aparelho vocal. Disponível em <http://espaber.uspnet.usp.br/>.

Podemos assistir um vídeo curtinho, disponível em



Figura 2.3: Link para o vídeo

<https://www.youtube.com/watch?v=b89RSYCaUBo>,

que mostra uma animação de como ocorre essa vibração das cordas vocais, e como a passagem do ar pela laringe produz a voz.

## 2.9 Tonalidade dos sons

Em Física, é comum utilizarmos os termos “agudo” quando falamos de uma voz mais fina e “grave” quando falamos de uma voz mais grossa. Então, a partir de agora vamos nos referir à tonalidade (também chamada de altura do som) como “som mais agudo” e “som mais grave”. Uma pessoa de voz mais aguda, possui suas cordas vocais vibrando mais vezes a cada segundo, enquanto uma pessoa de voz mais grave, possui as cordas vocais vibrando menos vezes por segundo. O número de vezes que um emissor de som vibra a cada unidade de tempo é chamado na física de Frequência. Ou seja, a frequência pode ser dada pela equação:

$$f = \frac{N_{ciclos}}{\Delta t}$$

Ou no caso de ondas sonoras periódicas:

$$f = \frac{N_{ondas}}{\Delta t}$$

Quando a unidade de tempo utilizada é o segundo ( $s$ ), a frequência é dada em Hertz ( $Hz$ ), conforme mostrado no aplicativo *pitchlab*. Isso significa que um som de frequência 400 Hz, faz chegar ao nosso ouvido 400 vibrações sonoras a cada segundo. E um som de frequência 7KHz significa que 7000

vibrações sonoras (ondas sonoras) chegam a nosso ouvido, por segundo.



Figura 2.4: A cantora de Jazz norte americana Ella Fitzgerald. Em <http://www-tc.pbs.org/>

O ato de cantar afinado, significa controlar o aparelho vocal de maneira que as pregas vocais emitam o tom (frequência) de voz desejada. O processo neurológico que controla tal vibração é complexo, mas podemos controlar a frequência da fala, falando mais grosso (grave) ou mais fino (agudo). Por isso, chamaremos o som mais agudo, de maior frequência, de som “mais alto” devido à frequência alta. E o som mais grave, de menor frequência, de som “mais baixo”, por ter frequência mais baixa.

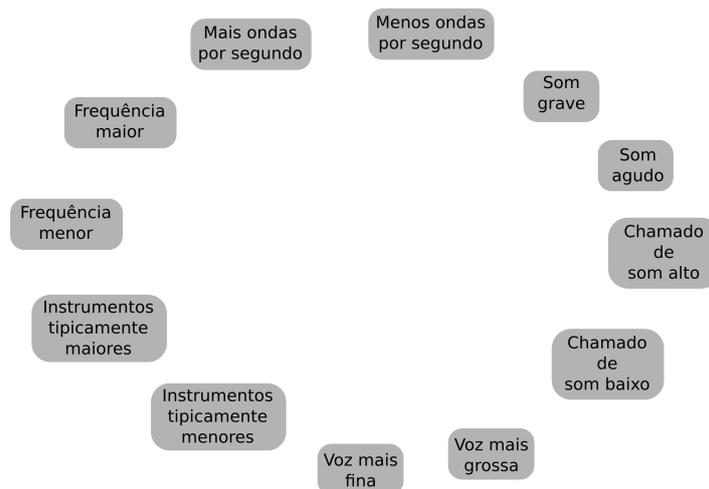
O saxofone, por exemplo, quando é chamado de sax alto, tem o som mais agudo (e é bem menor) que o sax baixo. Veja na fotografia abaixo, o sax baixo (A) e o sax alto (C). Por ser maior, com o tubo mais longo, o sax baixo emite som mais baixo.



Figura 2.5: O quarteto Darling Saxophone Four

## 2.10 Atividade

Agora, vamos montar uma rede de conceitos com as caixas do desenho abaixo. A ideia dessa atividade é você ligar cada caixa às outras que você acha que tem mais afinidade com a primeira.



## Capítulo 3

# Timbre: a impressão Digital da VOZ

### 3.1 Objetivos

Ao final desta atividade, espera-se que você esteja apto a:

- Identificar sonoramente diferenças timbrais entre diferentes sons;
- Compreender as características acústicas que determinam diferentes timbres;
- Reconhecer padrões que permitam que dois sons de mesma altura soem com timbres diferentes.

### 3.2 Pense e responda

Qual é a diferença entre música e ruído?

---

---

---

Podemos reconhecer a voz de um parente ou de um amigo mesmo de olhos fechados?

---

---

---

Se eu ouvirmos o hino nacional tocado por uma guitarra elétrica ou tocado por uma flauta, perceberemos a diferença?

---

### 3.3 Reconheço o Timbre?

Nessa sessão, faremos uma pequena brincadeira simples, mas muito eficaz, para demonstrar como nosso cérebro reconhece diferentes timbres do som emitido por diferentes instrumentos.

#### 3.3.1 O Timbre da voz

Primeiramente, assumimos que todos nessa sala de aula se conhecem. Então, com todos os alunos de olhos fechados, o professor toca o ombro de um aluno, que deverá dizer “oi turma!”. Vamos ver se conseguimos reconhecer o aluno que fala, pela identidade vocal dele. Faremos isso três vezes, e em cada uma delas, vamos anotar de que aluno veio a voz do “oi turma!”...

---

Aluno	Nome
-------	------

Aluno 1	
---------	--

Aluno 2	
---------	--

Aluno 3	
---------	--

---

#### 3.3.2 O Timbre dos instrumentos musicais

Vamos agora, repetir a brincadeira, mas com alguns instrumentos musicais. O professor vai disparar no aparelho de som, um pequeno trecho com a mesma nota musical, executada em quatro instrumentos diferentes. Caso você não seja familiarizado com instrumentos musicais, tente anotar na coluna ao lado, o nome do instrumento que, para você, tenha o som mais parecido com o que você está ouvindo.

---

Som	Instrumento
Trecho 1	
Trecho 2	
Trecho 3	
Trecho 4	

---

### 3.4 Falando sobre o Timbre do som

Como você já pode perceber, não temos cálculos (pelo menos no ensino médio) associados a Timbre do som. Ou seja, estamos discutindo aspectos qualitativos do som. Por isso, quando vamos nos referir ao timbre de um som específico, recorreremos a termos ou adjetivos que nos forneçam atributos do timbre. Para alguns profissionais do áudio, por exemplo, o timbre é chamado de “coloração” do som. Outros preferem se referir ao timbre relacionando o som com a sensação. Por isso, nessa atividade, ouviremos vários trechos de sons. Não queremos agora, reconhecer o instrumento musical que emite esse som, mas sim que palavra melhor representa a sensação que você tem ao ouvi-lo.

---

Som	Atributo (ou adjetivo)
Violão de nylon	
Flauta peruana	
Guitarra com distorção	
Violino	

---

### 3.5 Timbre: o que a Física diz

Essas perguntas nos levam a pensar que existe alguma característica do som que identifica o instrumento emissor. Nosso cérebro cria um registro dessa característica do som para que, quando ouvirmos novamente o mesmo som, saibamos de “quem” ele foi emitido. Por isso, a mesma música, tocada com a mesma intensidade, com as mesmas notas musicais (frequência) soa diferente, quando executada em diferentes instrumentos.

A essa identidade sonora, damos o nome de Timbre. Mas as variáveis que nos levam a reconhecer o timbre são muitas, e as identificamos neurologicamente pela percepção do som. Por isso, nessa aula, estamos interessados em perceber o timbre, numa espécie de jogo de sensações associadas a aspectos físicos do som, para que em nosso cérebro, mais do que a percepção sonora dessas diferenças, possamos descobrir quais características das ondas sonoras levam a elas.

Um mesmo instrumento pode, tocando as mesmas notas musicais, com o mesmo volume, soar de maneira diferente, dependendo de como ele é tocado. Por exemplo, um violinista pode tocar as cordas com o arco ou com os dedos, ou com as unhas, e em cada um desses casos o mesmo violino, soando à mesma frequência, emite sons com qualidades diferentes, ou seja, identidades diferentes. Essa diferença gerada pela variação do ataque e da duração do som é chamada de Envelope do som. O Envelope do som também influencia na percepção do Timbre.

## 3.6 Analisando o Timbre com um *app*

Novamente vamos agora recorrer a outra ferramenta de alta tecnologia, para analisarmos o timbre de diferentes sons.

### 3.6.1 Baixando e instalando

Para esta atividade, sugerimos o aplicativo gratuito “Sound Analyzer” desenvolvido pela *TiniaSoft* e disponível gratuitamente para Android<sup>®</sup>. Nesse aplicativo, temos a possibilidade analisar a frequência principal do som que chega ao microfone do aparelho e ainda as frequências não principais, presentes no som, e que também afetam a percepção do Timbre, chamados de Sobretons.

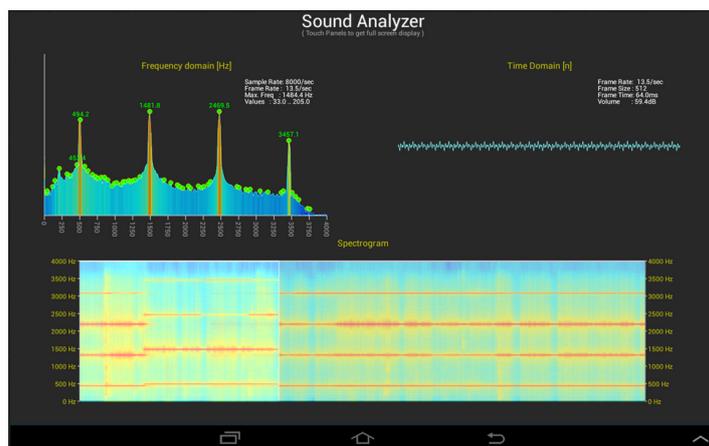


Figura 3.1: Tela do analisador de espectrograma a ser utilizado

No espectrograma, a cor vermelha representa maior intensidade do som numa específica frequência e a cor azul representa menor intensidade. À medida que o tempo passa, o espectrograma registra a duração de cada frequência do espectro. O pico representa a frequência principal (a nota

musical, ou chamada no capítulo anterior de Altura do som), mas picos extras representam possíveis consonâncias timbrais do instrumento, que dão a identidade sonora da qual falamos.

## 3.7 O espectrograma do Timbre

### 3.7.1 O quê observar?

*Pensar como um cientista é buscar padrões!*

Você perceberá que a cada som analisado, um espectrograma diferente será formado. Por isso, estamos interessados em cruzar duas informações: (1) quais são os adjetivos atribuídos ao som, que utilizamos para nos referirmos a uma específica qualidade sonora e (2) o que o espectrograma nos mostra no caso de cada atributo do Timbre.

### 3.7.2 Discussão da análise

1. O espectrograma de um som mais suave, macio, apresenta mais ou apresenta menos regiões em vermelho além da frequência principal, se compararmos a um som mais estridente, agressivo?

---

---

---

2. Comparando o espectrograma do som de uma flauta doce e de uma guitarra distorcida, qual deles apresenta um padrão mais regular e qual deles apresenta um padrão mais caótico?

---

---

---

3. Fazendo uma rápida análise espectrográfica da sua voz (repita o “aaaa-aaa” com voz relaxada, da aula 2), ela possui mais ou menos sobretons – regiões em vermelho, em outras frequências – comparada ao som da flauta? E comparando com o som da guitarra com distorção?

---

---

---

### 3.8 Atividade

Agora, se maneira semelhante à feita na aula 2, vamos construir uma rede de conexões entre os principais conceitos vistos até agora. Simplesmente ligue os quadros, quantas vezes achar necessário, mas sempre um com outro que você perceba relação mais próxima, do tipo: se “isso” então “aquilo”:



Figura 3.2: Rede de causas e efeitos com os atributos de Frequência e Timbre

## Capítulo 4

# Instrumentos de cordas vibrantes

## 4.1 Objetivos

Ao final desta atividade, espera-se que você esteja apto a:

- Identificar as variáveis que influenciam na Frequência dos sons emitidos por instrumentos musicais de cordas;
- Relacionar as causas e os efeitos nas mudanças de Frequências do som emitido;

## 4.2 Introdução

Falamos um pouco sobre algumas das características do som. Mas quando queremos controlar o som emitido, por exemplo para executarmos uma música, tocando um instrumento, conseguimos manipular algumas variáveis do instrumento para então fazermos com que o instrumento soe da forma como desejamos, emitindo a nota musical que queremos ou uma sequência de notas musicais, conhecida como Melodia, ou um bloco de notas, tocadas juntas, conhecido como Harmonia.

Instrumentos tipicamente melódicos (que tocam apenas uma nota musical por vez) ou tipicamente harmônicos (que tocam várias notas musicais juntas, de uma vez) emitem sons, principalmente de duas formas: por cordas vibrantes ou por tubos sonoros. Por isso, nessa aula vamos manusear alguns instrumentos musicais, e vamos observar alguns aspectos físicos desses instrumentos e como esses aspectos influenciam nas características do som emitido.

### 4.3 Instrumentos de cordas

Você já deve ter ouvido ou visto alguém tocar um violão, ou um cavaquinho. Você já prestou atenção ao fato de que nesses instrumentos, as cordas ficam esticadas? Qual é a necessidade de se tensionar as cordas desses instrumentos? E ainda, você já percebeu que as cordas de um violão são diferentes? Porquê?

Tentaremos chegar a resposta para algumas dessas questões, com as atividades a seguir, especialmente manuseando instrumentos musicais, analisando o som emitido e também modelando a emissão de sons desses instrumentos.

### 4.4 O violão

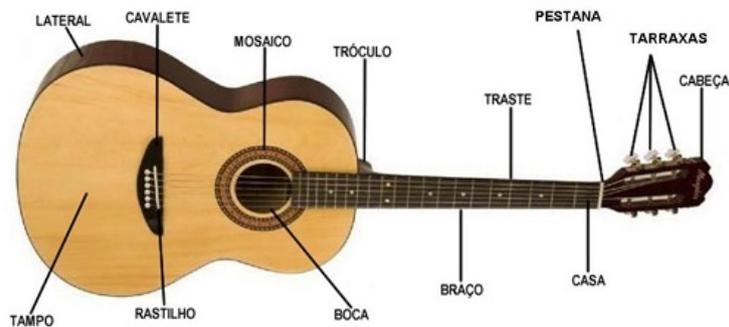


Figura 4.1: Elementos de um violão comum

Presente em quase todos os estilos de música popular no Brasil, o violão é parte da nossa cultura. A construção do violão e o ato de tocá-lo, envolvem mais Física do que pode parecer. Cada elemento do violão serve, na verdade, para manipular as características físicas das vibrações de suas cordas.

## 4.5 Pense e responda

1. Qual é a função das tarraxas do violão?

---

---

2. Porquê as cordas do violão devem ser maiores que as cordas do cavaquinho?

---

---

3. Quando apertamos uma corda numa determinada casa, o som emitido por essa corda muda. Que variável estamos modificando, ao apertarmos a corda em casas diferentes?

---

---

## 4.6 Velocidade das ondas em cordas tensionadas

Existem cordas mais “leves” e cordas mais “pesadas”, em um violão. Essa definição pode ser estendida para qualquer tipo de corda: existem algumas cordas mais pesadas que outras. No entanto, esses termos podem não ser adequados. Pense na seguinte situação:

O que é mais pesado? (a) 20cm de uma corda de prender navio ou (b) 50km de uma linha de costura?

É difícil responder a essa pergunta. Logo, precisamos determinar não só a massa em *kg* de uma corda, mas também a que comprimento dessa corda estamos nos referindo. Portanto seria mais viável, pensarmos em dois comprimentos iguais, tipo:

Considere dois pedaços de cordas, ambos de 1m de comprimento. O primeiro é de uma corda de prender navio e o segundo é de uma linha de costura. Neste caso, qual dos dois pedaços é mais pesado?

Agora não é mais tão difícil responder, certo? Por isso, quando nos referimos a cordas, o que utilizamos é uma grandeza física chamada Densidade Linear, representada aqui pela letra grega  $\rho$ . A densidade linear é a relação que existe entre a massa, em *kg* de uma corda e o comprimento da mesma:

$$\rho = \frac{M}{l}$$

No Sistema Internacional de unidades (S.I.), a densidade linear é dada em quilogramas por metro  $\left[\frac{kg}{m}\right]$ .

A tabela a seguir mostra alguns valores de comprimentos e massas para pedaços de cordas. Preencha a última coluna, calculando, no S.I. a densidade linear de cada um deles.

---

comprimento ( $l$ )	massa ( $M$ )	Densidade Linear ( $\rho$ ) $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}}\right]$
0,50 m	4 kg	
0,10 m	0,2 kg	
0,26 m	0,13 kg	
25,00 m	5 kg	

---

Agora, para estabelecermos um modelo matemático da velocidade de propagação de ondas em cordas, vamos analisar além da densidade linear da corda, também a força de tração ( $T$ ) a qual a corda está submetida, pois a velocidade de propagação das ondas em cordas tensionadas, depende também dessa força.

Quanto mais esticada a corda estiver, a velocidade de propagação das ondas nessa corda será maior ou menor?

Lembrem-se que as equações da Física surgem da detecção de padrões matemáticos em fenômenos naturais, ou seja, em Física Experimental, realizamos medições de parâmetros pré determinados, e tentamos encontrar alguma relação de proporção direta ou indireta do valor de uma grandeza com o valor (ou com o quadrado, ou cubo, ou raiz, etc ...) de outra. Assim, mostraremos duas tabelas. Na primeira (a seguir), a mesma corda tensionada com vários valores de força de tração e com várias velocidades de propagação das ondas correspondentes; depois, na próxima várias cordas tensionadas com a mesma força de tração, porém com diferentes densidades lineares, e ainda os valores de velocidades de propagação das ondas nessas respectivas cordas. Lembrando que, na prática, valores coletados diretamente das cordas não são precisos, como os da tabela. Eles possuem incertezas que devem

ser consideradas, mas que serão ignoradas aqui, para focarmos no padrão matemático dessas grandezas.

Densidade linear ( $\rho$ )	Força de Tração ( $T$ )	Velocidade das ondas ( $v$ )
0,25 kg/m	1 N	2 m/s
0,25 kg/m	4 N	4 m/s
0,25 kg/m	9 N	6 m/s
0,25 kg/m	16 N	8 m/s

#### 4.6.1 Buscando padrões - influência da Tração

1. Ao aumentarmos a força de Tração, a Velocidade de propagação aumentou ou diminuiu?

---

2. A força de Tração na segunda linha da tabela é quatro vezes maior que na primeira. A Velocidade de propagação também ficou quatro vezes maior ou quatro vezes menor?

---

3. Dos modelos abaixo, qual o que mais se encaixa na distribuição dos dados?
  - a) A velocidade é diretamente proporcional à força de Tração  $v \sim T$
  - b) A velocidade é diretamente proporcional ao quadrado da força de Tração  $v \sim T^2$

- c) A velocidade é diretamente proporcional à raiz quadrada da força de Tração  $v \sim \sqrt{T}$
- d) A velocidade é diretamente proporcional ao cubo da força de Tração  $v \sim T^3$
- e) A velocidade é diretamente proporcional à raiz cúbica da força de Tração  $v \sim \sqrt[3]{T}$

De maneira semelhante, vamos buscar um padrão para a influência da Densidade Linear na velocidade de propagação. Observe os dados da tabela a seguir:

Força de Tração ( $T$ )	Densidade Linear ( $\rho$ )	Velocidade das ondas ( $v$ )
36 N	1 kg/m	36 m/s
36 N	4 kg/m	18 m/s
36 N	9 kg/m	12 m/s
36 N	16 kg/m	9 m/s

#### 4.6.2 Buscando padrões - influência da Densidade Linear

1. Ao aumentarmos a Densidade Linear da corda, a Velocidade de propagação aumentou ou diminuiu?
- 
2. A Densidade Linear na segunda linha da tabela é quatro vezes maior que na primeira. A Velocidade de propagação também ficou quatro vezes maior ou quatro vezes menor?

3. Dessa vez, qual é a relação que mais se ajusta à distribuição dos dados da tabela?
- a) A velocidade é inversamente proporcional à Densidade Linear  $v \sim \frac{1}{\rho}$
  - b) A velocidade é inversamente proporcional ao quadrado da Densidade Linear  $v \sim \frac{1}{\rho^2}$
  - c) A velocidade é inversamente proporcional à raiz quadrada da Densidade Linear  $v \sim \frac{1}{\sqrt{\rho}}$
  - d) A velocidade é inversamente proporcional ao cubo da Densidade Linear  $v \sim \frac{1}{\rho^3}$
  - e) A velocidade é inversamente proporcional à raiz cúbica da Densidade Linear  $v \sim \frac{1}{\sqrt[3]{\rho}}$

Como resultado das análises podemos começar a delinear uma relação matemática entre a velocidade  $v$  de propagação das ondas em cordas tensionadas, como a do violão, e as variáveis que as influenciam. Podemos então juntar as duas conclusões observadas, para dizermos que a velocidade  $v$  de propagação se relaciona com a força de tração  $T$  e a densidade linear da corda  $\rho$  da seguinte forma:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

Não estamos interessados num jogo de decorar esta equação, mas sim, de percebermos qual é a função das tarraxas do violão, do cavaquinho e de

quaisquer outros instrumentos de cordas. Sabemos agora que as cordas do violão são de diferentes Densidades Lineares e controlamos a Tração dessas cordas apertando ou afrouxando as tarraxas.

## 4.7 Afinando um violão

As cordas de um violão devem vibrar cada uma, numa determinada frequência. Existem várias formas de se definir que frequências são essas. Na música popular, a afinação mais comum de um violão, corresponde às notas musicais Mi, Lá, Ré, Sol, Si e Mi, da corda mais espessa (de maior Densidade Linear) para a corda mais fina (de menor Densidade Linear).

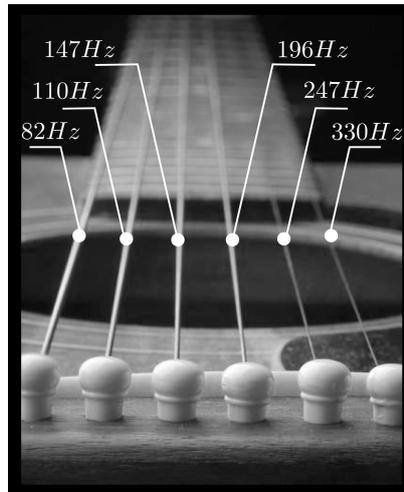


Figura 4.2: Valores das frequências, em um tipo de afinação do violão

Agora, vamos utilizar o aplicativo *Pitchlab*, o mesmo da primeira aula, para afinarmos as cordas do violão. O processo consiste em tocar uma corda de cada vez e ajustar a tarraxa até que o ponteiro do *Pitchlab* fique na vertical.

Você verá que as Frequências de vibração de cada corda, quando afinadas, serão aproximadamente os valores mostrados na Fig. 4.2.

## 4.8 Pense e responda

Se o giro da tarraxa influencia na força de Tração, que por sua vez influencia na Velocidade de propagação das ondas na corda, porquê a Frequência de vibração é quem muda?

---

---

## 4.9 A equação fundamental da Ondulatória: o que a Física diz

Há uma relação entre a Velocidade de propagação de uma onda e sua Frequência. Para discutirmos essa relação, precisamos antes entender o que é o Comprimento de Onda. Ondas periódicas, que se repetem da mesma forma, em intervalos de tempo iguais, possuem sempre a mesma medida de um ponto de uma perturbação até o ponto idêntico na perturbação adjacente. A essa distância, chamaremos Comprimento de Onda, representado pela letra grega  $\lambda$ , em nossas análises ( $\lambda$ ).

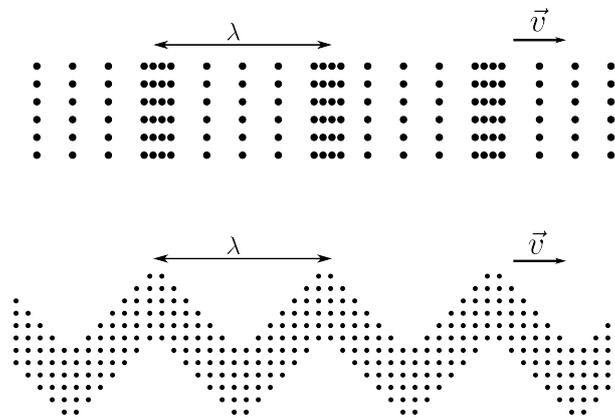


Figura 4.3: Comprimento de onda medido em uma onda periódica longitudinal (acima) e transversal (abaixo)

Além disso, devemos também pensar em outra grandeza física chamada Período. O Período é o intervalo de tempo que dura a passagem de uma onda inteira por um determinado ponto. Representaremos o Período por  $(T)$ .

$$T = \frac{\Delta t}{N_{ondas}}$$

Notemos que da mesma forma que a Frequência é o número de ondas a cada unidade de tempo, o Período é o intervalo de tempo para cada onda. Por isso, Período e Frequência são grandezas físicas inversas.

$$T = \frac{1}{f}$$

Logo, se tentarmos medir a Velocidade de uma série de ondas passando por um ponto, como uma pessoa observando de uma ponte, várias ondas na superfície da água, podemos utilizar a relação entre o deslocamento escalar e o intervalo de tempo ( $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ ) para medirmos a velocidade dessas ondas.

Agora, se tomarmos a mesma equação, observando atentamente uma única onda, teremos  $\Delta s$  igual ao Comprimento da onda  $\lambda$  e teremos também o intervalo de tempo  $\Delta t$  igual ao Período dessa onda. Então, podemos dizer que:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$$

Mas lembrando que o inverso do Período é a Frequência, teremos então:

$$v_{onda} = \lambda f$$

Esta relação entre a Velocidade de propagação da onda, o Comprimento da onda e sua Frequência é chamada de Equação Fundamental da Ondulatória.

## 4.10 Afinando um violão com o Arduino

O Arduino é uma plataforma de protótipos que pode ser conectada a um computador e executar processos previamente determinados.

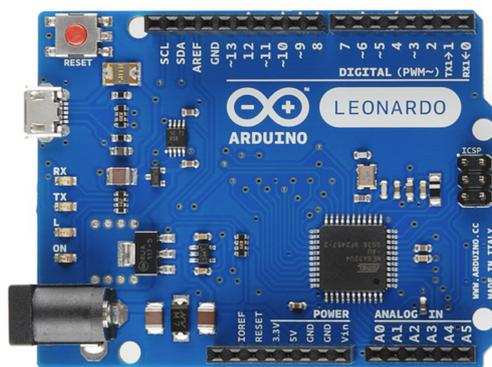


Figura 4.4: Placa Arduino utilizada para a atividade

Para esta atividade, vamos construir um dos circuitos mais básicos com o Arduino que é um LED estroboscópico. Chamamos de lâmpada estroboscópica qualquer fonte de luz que se ascende e se apaga com intervalos de tempo iguais. Existem afinadores desse tipo no mercado, mas a diferença é que poderemos determinar a frequência com a qual os LEDs vão piscar, pelo computador.

Primeiro, utilizaremos uma plataforma Arduino, modelo Leonardo. Os LEDs serão conectados às portas analógicas 11 e 12. A figura abaixo mostra o esquema de conexões proposto:

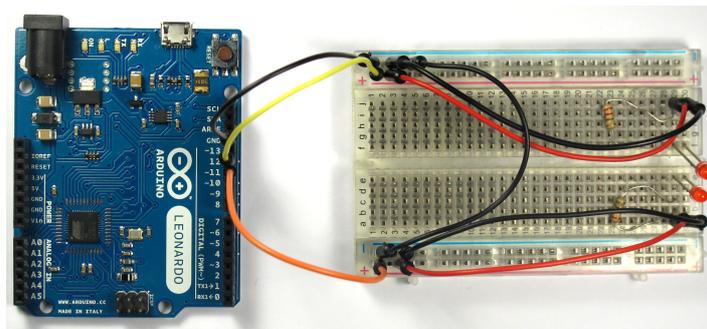


Figura 4.5: Os fios condutores pretos representam o *ground* do circuito. O condutor laranja liga a porta 11 a um dos LEDs e o amarelo liga a porta 12 ao outro LED. Os resistores são necessários para limitar a corrente que passa pelo LED e evitar que ele se queime

Utilizamos o código disponível como exemplo em

<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink>

para fazer os LEDs piscarem. No código disponível, o comando “delay” é o intervalo de tempo que os LEDs vão ficar acesos ou apagados. Programamos o delay para os LEDs acesos igual a 0.1 milésimo de segundo e o delay para os LEDs apagado igual a 4 milésimos de segundo. Ou seja, os LEDs piscam e esperam 0,004 s.

Agora, afrouxando bem uma das cordas do violão, posicione os LEDs sobre ela e ligue o Arduino.

1. Se os LEDs piscam uma única vez a cada 0,004 s, quantas vezes os LEDs piscam, por segundo?

---

---

2. Em algum momento a corda do violão pareceu parar de vibrar?

---

---

3. A que você atribuiria esse efeito?

---

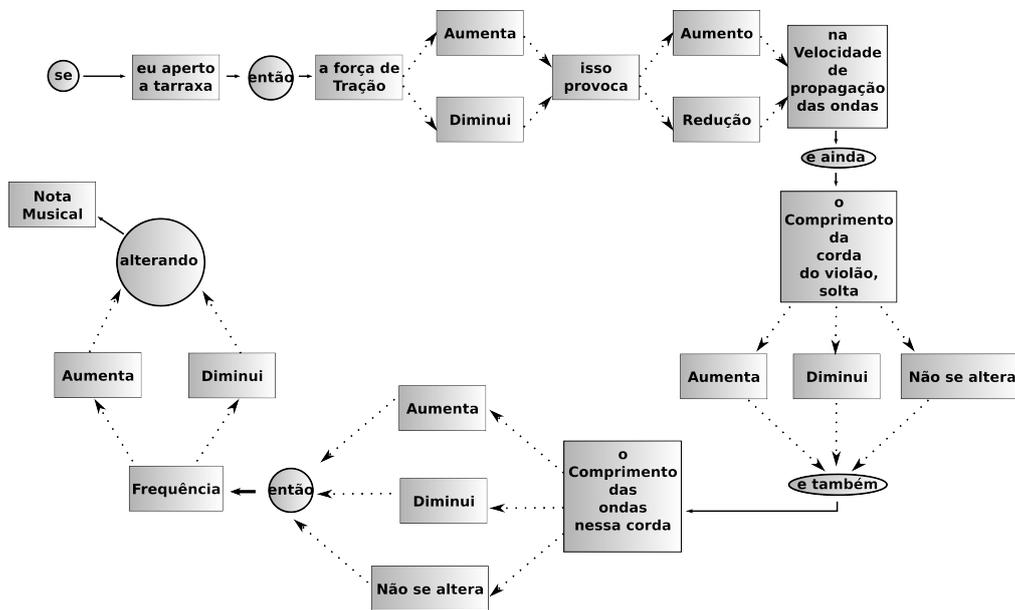
---

## 4.11 Atividades

### 4.11.1 O que causa a afinação, a final?

Voltando à questão das tarraxas do violão. Girar a tarraxa para um lado e para o outro, varia a força de tração nas cordas. Como essa variação da tração faz modificar a nota musical (Frequência) emitida pela vibração da corda? Para juntarmos todas os pedaços necessários e respondermos a essa

pergunta, lançando mão de conceitos físicos, preencha corretamente as setas pontilhadas da figura a seguir, procurando um caminho que explique de que forma o giro das tarraxas altera a nota musical do violão. Podemos apertar ou afrouxar as tarraxas, para afinar o violão. Mas para simplificarmos o processo, considere o efeito causado pelo aperto de uma das tarraxas:



# Capítulo 5

## Modos normais em cordas

## 5.1 Objetivos

Ao final desta atividade, espera-se que você esteja apto a:

- Identificar e diferenciar diferentes modos normais nas cordas de um violão;
- Determinar a frequência de vibração e o comprimento de onda dos harmônicos possíveis nas cordas de um violão;

## 5.2 Modo normal fundamental

Quando uma corda tensionada vibra, é possível que ao invés de termos uma série de ondas transversais passando pela corda, tenhamos uma configuração conhecida como onda estacionária. Especialmente a corda do violão quando provocamos uma vibração, estamos na verdade gerando na corda, que está fixa entre o rastilho e o capotraste, uma onda estacionária. Os modos de vibração de uma onda estacionária, chamados de modos normais, possuem características marcantes, como pontos onde a corda praticamente não se move, chamados de Nós, ou Nodos e pontos onde a corda tem vibração máxima, chamados de Ventres ou Anti-nodos. No caso de um violão, a forma mais simples de se promover um Modo Normal de vibração na corda, é simplesmente fazer a corda vibrar, por uma perturbação inicial, e depois não mais tocá-la. Você perceberá, na corda, uma parte central, vibrando, e dois pontos fixos nas extremidades.

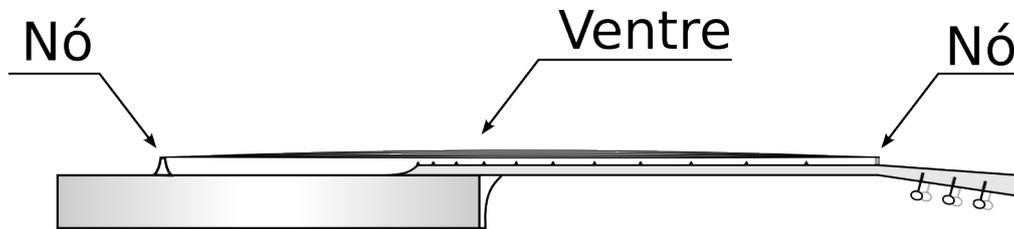


Figura 5.1: Modo normal fundamental numa corda de violão

Mesmo quando seguramos a corda com os dedos, em alguma casa do violão, ainda assim, estamos provocando um modo normal fundamental na corda, ou seja, apenas um ventre entre dois nós.

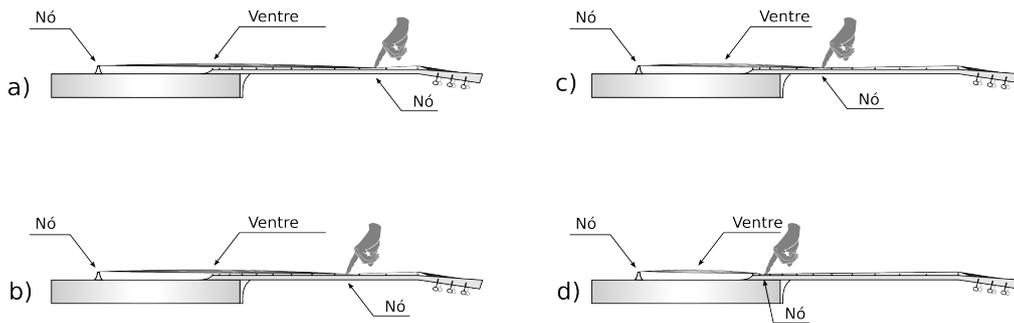


Figura 5.2: Quatro casos com corda vibrando, mas apoiada em casas diferentes no braço do violão

Em todos esses casos mostrados acima, estamos tratando de vibração em modo normal fundamental. Experimente repetir, no violão, o modo normal fundamental de vibração, modificando a casa onde a corda é pressionada, conforme mostrado.

### 5.3 Pense e responda

Lembrando da forma como a Física nomeia as características do som, quais dessas características se modificam em cada caso mostrado na Figura 4.5?

- a) Timbre do som e Altura do som, já que o Comprimento de Onda não se altera.
- b) Comprimento de onda do som e Densidade Linear da corda, já que a Frequência não se altera.
- c) Comprimento de onda do som e Frequência do som, já que a Velocidade de propagação não se altera.
- d) Densidade Linear e Velocidade de propagação, já que o comprimento de onda não se altera.

### 5.4 O comprimento de onda $\lambda$ em modos normais

Para a fabricação de instrumentos, é necessário que se conheça a Frequência de vibração das cordas e para isso, devemos conhecer a velocidade de propagação das ondas nessas cordas e também o comprimento das ondas  $\lambda$ . Como visto anteriormente, o comprimento de onda é a distância entre dois pontos idênticos e consecutivos numa série de ondas periódicas e progressivas. Mas no caso das ondas estacionárias, isso ocorre de maneira diferente.

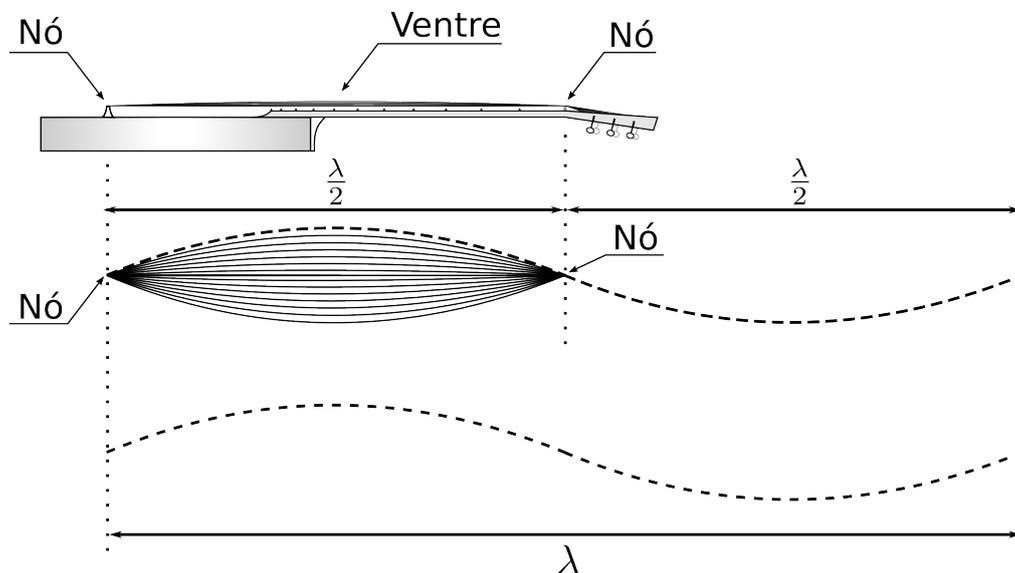
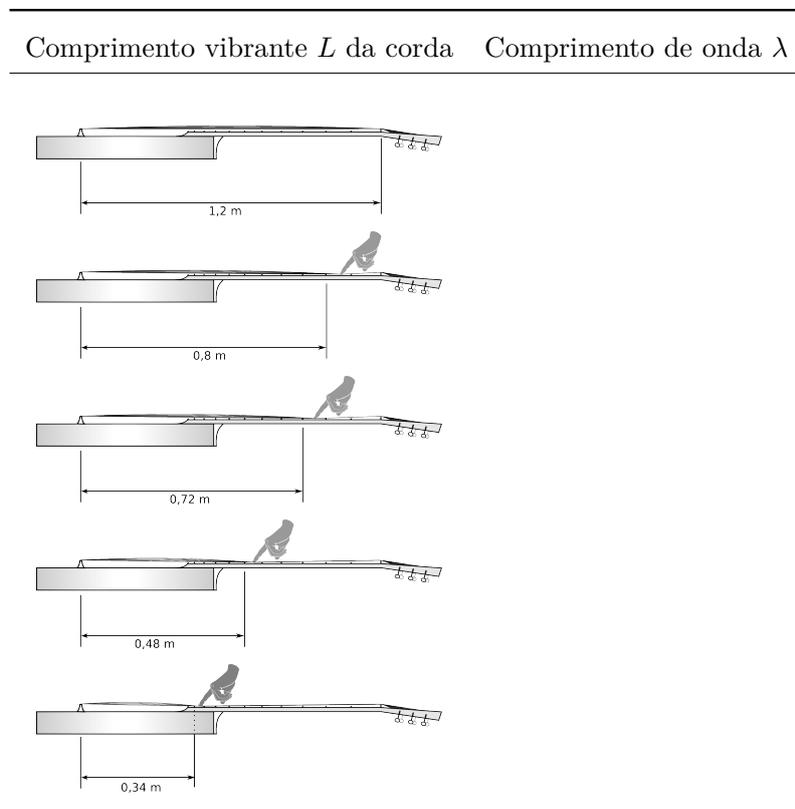


Figura 5.3: A distância entre dois nós consecutivos corresponde à metade do comprimento de onda, para qualquer configuração de modos normais

### 5.4.1 Atividade

Na tabela abaixo, em cada caso, temos a corda do violão vibrando no modo fundamental. À medida em que a posição do dedo da pessoa muda, o valor do comprimento de onda  $\lambda$  também muda. Determine, para cada caso, o valor do comprimento de onda:



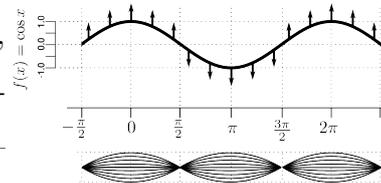
## 5.5 Modos normais de ordem superior

Quando tocamos um instrumento musical de cordas, o som que tipicamente é utilizado é aquele gerado pelo modo fundamental de vibração da corda. Porém, a mesma corda do violão pode vibrar em configurações diferentes do modo fundamental. Isso significa fazer com que a mesma corda, com a mesma força de tração e sem aletrar o comprimento, vibre em Frequências diferentes. A essas configurações chamamos Modos Normais de segunda, terceira, ou  $n$ -ésima ordem, ou podemos chamar de segundo harmônico, terceiro harmônico,  $n$ -ésimo harmônico. Mas como provocar modos normais

superiores, ou harmônicos superiores numa corda? Podemos dizer que isso pode ser provocado de três formas:

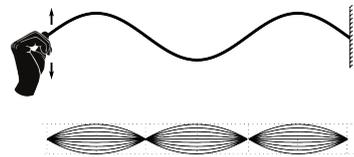
i O jeito dos matemáticos:

Deformando a corda de maneira que se configure uma função de Seno ou de Cosseno, inicialmente, e depois abandonando-a, teremos um harmônico de ordem superior – terceira ordem, no caso da figura ao lado.



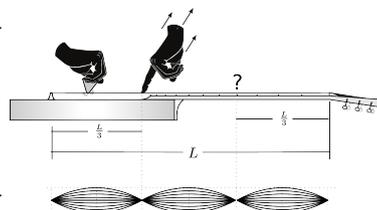
ii O jeito dos físicos:

Excitando uma corda tensionada e fazendo-a vibrar um determinado número de vezes por segundo, ou seja, a uma Frequência definida, os modos normais vão se configurando naturalmente na corda, por um fenômeno conhecido com Ressonância.



iii O jeito dos músicos:

Tocando a corda do instrumento e apenas apoiando o dedo em um ponto que corresponda a uma fração do comprimento da corda ( $\frac{1}{2}L, \frac{1}{3}L, \frac{1}{4}L \dots$ ), e soltando a corda imediatamente após vibrá-la, um modo normal surge configurado na corda.



### 5.5.1 Atividade

Agora, vamos novamente ao violão e com o *Pitchlab* vamos coletar dados sobre os modos normais de vibração das cordas. Primeiro, vamos medir o comprimento da corda do violão:  $L = \text{-----}$ . E então, vamos preencher a tabela abaixo.

Corda	Harmônico	Frequência	Comprimento de onda
6 <sup>a</sup>	fundamental	$f_1 =$	$\lambda_1 =$
6 <sup>a</sup>	2 <sup>o</sup>	$f_2 =$	$\lambda_2 =$
6 <sup>a</sup>	3 <sup>o</sup>	$f_3 =$	$\lambda_3 =$
6 <sup>a</sup>	4 <sup>o</sup>	$f_4 =$	$\lambda_4 =$
2 <sup>a</sup>	fundamental	$f_1 =$	$\lambda_1 =$
2 <sup>a</sup>	2 <sup>o</sup>	$f_2 =$	$\lambda_2 =$
2 <sup>a</sup>	3 <sup>o</sup>	$f_3 =$	$\lambda_3 =$
2 <sup>a</sup>	4 <sup>o</sup>	$f_4 =$	$\lambda_4 =$

## 5.6 Pense e responda

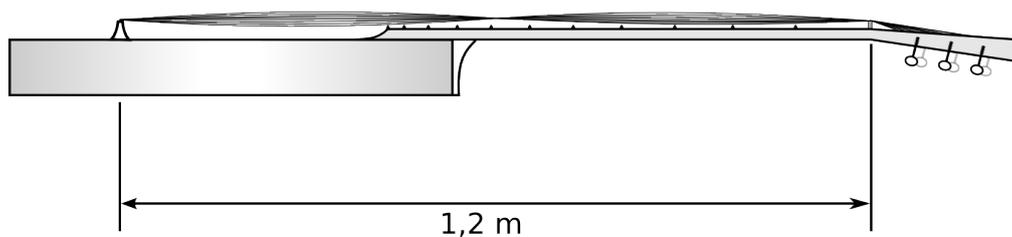
O que acontece com a Frequência quando aumentamos a ordem do harmônico numa mesma corda?

## 5.7 Atividade

Vamos agora, determinar o valor de algumas das grandezas físicas em vários modos normais, numa corda de violão – lembre-se da equação fundamental da ondulatória  $v = \lambda f$ .

1. A corda do violão está vibrando no segundo harmônico, emitindo um som de frequência  $f = 250\text{Hz}$

$$f=250\text{Hz}$$



- (a) Qual é o valor do comprimento de onda nesse modo?

---

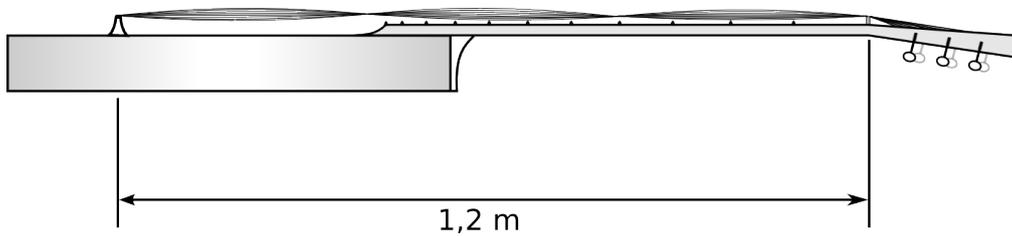
---

- (b) Qual é o valor da velocidade de propagação das ondas nessa corda?

---

---

2. Agora, a mesma corda, nas mesmas condições, vibra em seu terceiro harmônico



(a) Qual é o valor do comprimento de onda nesse modo?

---

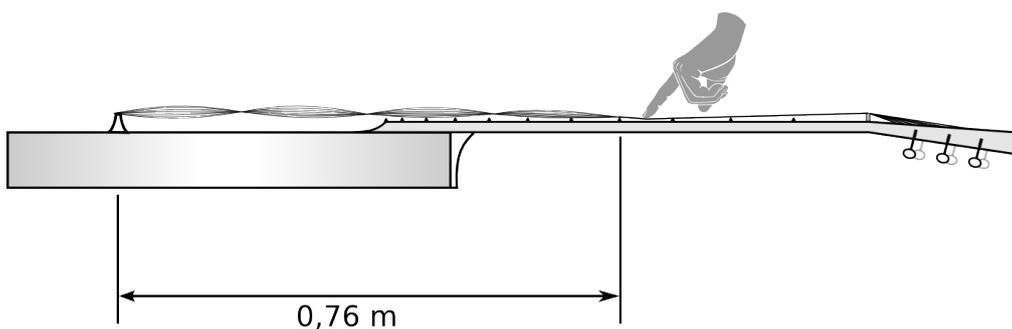
---

(b) Qual é o valor da frequência do som emitido?

3. Novamente, a mesma corda nas mesmas condições, vibra em seu quarto harmônico no comprimento do dedo da pessoa, mostrado na figura, até o cavalete do violão.

---

---



(a) Qual é o valor do comprimento de onda nesse modo?

---

---

(b) Qual é o valor da frequência do som emitido?

---

---

## Capítulo 6

### Modos normais em tubos

## 6.1 Objetivos

Ao final desta atividade, espera-se que você esteja apto a:

- Identificar e diferenciar diferentes modos normais nos instrumentos de coluna de ar;
- Determinar a frequência de vibração e o comprimento de onda dos harmônicos possíveis nos instrumentos de coluna de ar;
- Construir uma flauta, com notas musicais previamente calculadas.

## 6.2 Chinelo no cano

Para começar essa aula, vamos assistir um pequeno vídeo. Em 2000, o percussionista brasileiro Cyro Baptista gravou um show com um renomado pianista de jazz norte americano, chamado Herbie Hancock. Na abertura do show, o percussionista utiliza um instrumento musical não muito convencional, composto por canos de PVC, onde ele bate com chinelos, conseguindo um efeito musical muito interessante. Vamos assistir os 1:30 min iniciais do vídeo, disponível em



Figura 6.1: Esquema dos tubos do instrumento utilizado



Figura 6.2: Link para o vídeo

<https://www.youtube.com/watch?v=pzsj2RioIq4>.

Cada cano emite som com uma Frequência diferente, e isso ocorre devido a seu comprimento. De maneira parecida, uma flauta peruana, chamada de Flauta Pan, também é composta de tubos, cada um de um comprimento diferente.

Mas dentro dos tubos, há apenas ar. Como que os sons são emitidos, então?



## 6.3 O que a Física diz

### 6.3.1 Modo normal fundamental em um tubo aberto dos dois lados

Os modos normais em tubos ocorrem de maneira um pouco diferente, se compararmos com as cordas, mas ainda assim, continuamos tendo configura-

ções com nós e ventres. Mas agora, quem vibra dentro do tubo é o ar, então, chamaremos de ventre a região onde as moléculas de ar possuem a maior movimentação, e de nó a região onde o ar tem baixíssima movimentação. Em um Modo Normal Fundamental, para um tubo aberto dos dois lados, temos um nó na região central.

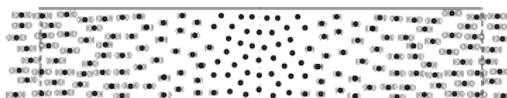


Figura 6.3: Moléculas de ar mais excitadas nas bocas do tubo

E para isso, utilizaremos a representação:

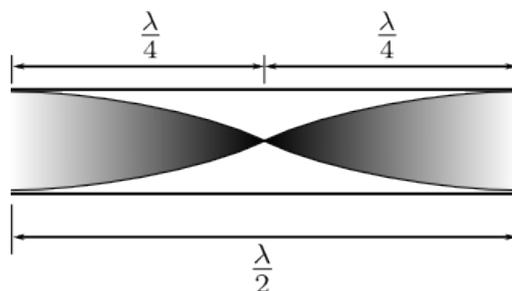


Figura 6.4: Tubo aberto dos dois lados, num modo normal fundamental

### 6.3.2 Harmônicos de ordem superior

Num mesmo tubo, dependendo da excitação do ar ou de ressonâncias, é possível estabelecer um modo normal de segunda ordem ou de terceira, ou ordens superiores. Nesses casos, teremos mais de uma região com nó de pressão dentro do tubo. Um músico consegue, com muita perícia, fazer com que o ar dentro de uma flauta peruana, ou de um saxofone vibre no segundo harmônico ou no terceiro harmônico.

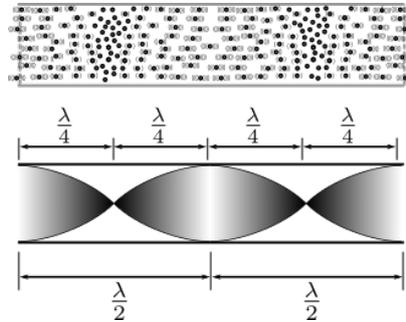
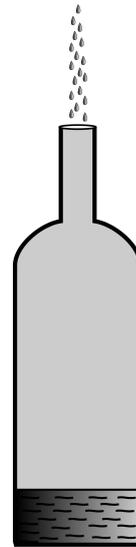


Figura 6.5: Tubo aberto dos dois lados, num modo normal de segundo harmônico

## 6.4 Pense e responda

Quando enchemos uma garrafa, inicialmente vazia, percebemos uma mudança no som emitido pela queda do líquido dentro da garrafa. O que melhor explica essa mudança no som?

- O fato de terem mais moléculas de água para vibrar, na garrafa.
- O fato da coluna de ar ser de menor comprimento.
- O fato da velocidade do som no ar ter aumentado.
- O fato da velocidade do som na água ter diminuído.



## 6.5 Tubo de Kundt

Uma das formas de se demonstrar a existência de ventres e nós foi proposta pelo físico August Kundt. O chamado tubo de Kundt consiste num tubo

repleto de algum tipo de poeira bem leve, como de cortiça ou de isopor. Na boca do tubo, uma fonte sonora emite um som de frequência constante. Se a frequência do som coincidir com a frequência de um dos harmônicos do tubo, uma onda estacionária dentro do tubo entrará em ressonância com o som emitido, varrendo a poeira onde há muita movimentação do ar (ventre) e acumulando a poeira onde o ar está praticamente em repouso (nó). Vamos assistir a um curto vídeo, mostrando o tubo de Kundt.



Figura 6.6: Link para o vídeo

[https://www.youtube.com/watch?v=qUiB\\_zd9M0k](https://www.youtube.com/watch?v=qUiB_zd9M0k)

## 6.6 Atividade: Construindo um instrumento musical

Utilizaremos os conceitos discutidos acima para construirmos uma flauta pan ou uma percussão de chinelo, conforme vimos no início. Para isso, devemos determinar qual deve ser o comprimento de cada tubo, que fará a flauta.

A velocidade do som depende da temperatura do ar. Abaixo, segue

uma pequena tabela com valores de temperatura do ar e de velocidade correspondente do som, em  $m/s$ .

$\theta$ (em $^{\circ}\text{C}$ )	$V_{som}$ em $m/s$
-5	328,5
0	331,5
+5	334,5
+10	337,5
+15	340,5
+20	343,4
+25	346,3
+25	349,2

### 6.6.1 Material Necessário

- Pedacos de cano de pvc, cortados em tamanhos diferentes
- Régua
- *Smartphone* com medidor de frequência do som

### 6.6.2 Escala Musical (temperada)

Falamos em notas musicais, como dó, si, lá, etc. Mas na prática, o que significa uma nota musical? Cada nota musical corresponde a uma frequência de vibração da onda que chega a nossos ouvidos. Essas notas musicais são divididas em intervalos, tal que após doze intervalos, temos o dobro da frequência de vibração. A nota lá, por exemplo, pode ter frequências  $110\text{ Hz}$ ,  $220\text{ Hz}$ ,  $440\text{ Hz}$ , ... Um diapasão de forquilha é fabricado para vibrar na

frequência da nota musical lá 4  $f_{A4} = 440 \text{ Hz}$  e ele é utilizado para se afinar um piano, começando da tecla central. Mas também a frequência  $880 \text{ Hz}$  corresponde à nota lá, porém ao lá 5, ou chamado em música de “uma oitava acima do lá 4” ou a frequência de  $220 \text{ Hz}$  também é lá, mas o lá 3. Note que nas teclas de piano, as notas musicais se repetem.

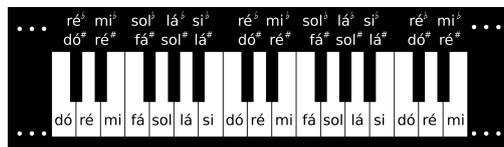


Figura 6.7: Posição das notas musicais nas teclas do piano

Uma oitava (de dó até dó, por exemplo) é dividida em 12 intervalos. Matematicamente, existe uma constante de multiplicação que nos fornece o intervalo seguinte. A expressão matemática para essa constante é:

$$i \times i \times \dots \times i = 2$$

$$i^{12} = 2$$

$$i = \sqrt[12]{2}$$

$$i \approx 1.05946$$

Logo, se a frequência da nota musical lá 4 é  $440 \text{ Hz}$ , o intervalo acima dela que é o lá sustenido ( $\sharp$ ) ou também chamado de si bemol ( $\flat$ ), conforme mostrado no teclado do piano será:

$$f_{A\sharp 4} = 1.05946 \times f_{A4}$$

$$f_{A\sharp 4} = 1.05946 \times 440$$

$$f_{A\sharp 4} = 466,16 \text{ Hz}$$

conforme a figura a seguir:

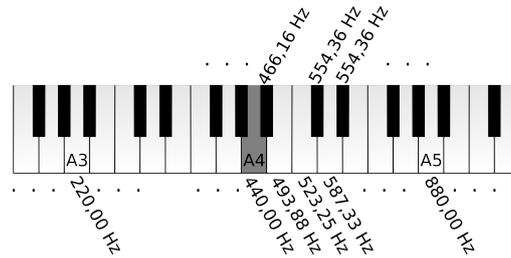


Figura 6.8: Frequência das notas da escala musical

### 6.6.3 A brincadeira

*A Física também é a ciência das previsões!*

O processo consiste em montar uma flauta pan que nos permita tocar a famosa música infantil *Dó, ré, mi, fá*. Esta pequena canção utiliza cinco notas musicais : Dó, ré, mi, fá e sol. Para que consigamos montar o instrumento musical, vamos dividir a turma em cinco grupos e cada grupo deve determinar matematicamente qual deve ser o comprimento do tubo, aberto dos dois lados, para uma das notas da música. Para evitarmos tubos longos demais ou tubos muito curtos, sugere-se começar com o dó 4.

Vale lembrar que ao soprarmos o tubo, ou bater com um chinelo na boca dele, conforme o vídeo exibido no início da aula, o som mais prominente será o som do modo normal fundamental (primeiro harmônico do tubo). Então, nosso trabalho matemático consiste em:

1. Verificar a temperatura do ambiente e determinar o valor aproximado da velocidade do som no ar para essa temperatura;
2. Calcular a frequência de cada uma das cinco notas musicais utilizada na música;
3. Calcular o comprimento de onda ( $\lambda$ ) do modo fundamental e determinar o comprimento do tubo, para cada uma das 5 notas musicais.
4. Verificar a frequência fundamental no *pitchlab*

## 6.7 Tubos fechados em um dos lados

Se você colocar sua mão em forma de tubo em seu ouvido, você perceberá um ruído. Não, esse ruído não é o barulho do mar, como você já pode ter ouvido dizer. Esse ruído é a soma de vários modos normais possíveis de vibração do ar, dentro do tubo formado por sua mão.

Agora, se você tapar o final do tubo com sua outra mão, você perceberá uma mudança nesse ruído.

Porquê o ruído dos modos normais de vibração do ar dentro da mão muda?

---

---

Com a mão tapada, você impede que as moléculas na boca do tubo vibrem, e com isso, você provoca um nó de pressão onde sua mão tapou o tubo. Isso provoca uma forma diferente de vibração do ar, tal que o modo normal fundamental, também chamado de primeiro harmônico tem na boca

do tubo um ventre e na parte tapada do tubo, um nó. Veja os primeiros modos normais possíveis em um tubo fechado, na figura a seguir.

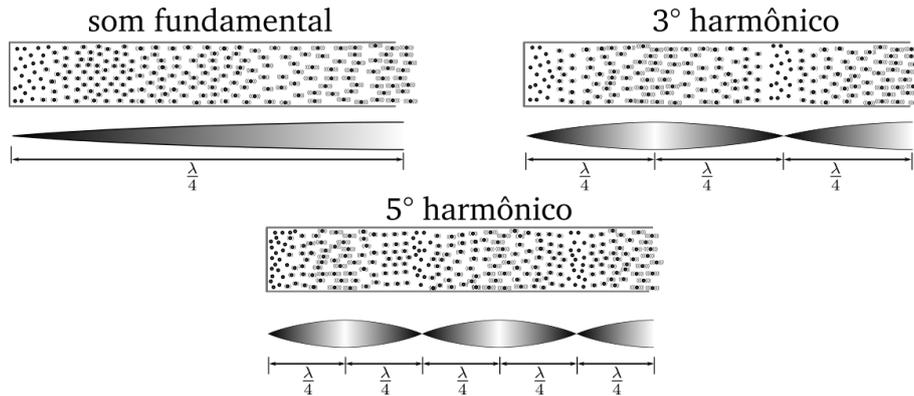


Figura 6.9: Modos normais ímpares num tubo fechado em um dos lados

Note que não existem 2º, 4º, 6º, ... harmônicos num tubo fechado em um dos lados. Note também que a frequência do modo normal fundamental num tubo fechado em um dos lados é diferente da frequência do modo normal fundamental de um tubo aberto.

## 6.8 Pense e responda

Uma flauta transversa é, essencialmente um tubo sonoro fechado em um dos lados. Já uma flauta pan, como vimos, é um tubo sonoro aberto. Se soprarmos uma flauta transversa e uma flauta pan, ambas de mesmo comprimento, emitindo um som fundamental, qual das duas emitirá uma nota musical mais aguda?

---



---

# Capítulo 7

## Transdutor sonoro

## 7.1 Objetivos

Ao final desta atividade, espera-se que você esteja apto a:

- Reconhecer as características associadas à energia e à intensidade do som;
- Compreender a quantidade *Decibel*;
- Relacionar as características eletromagnéticas de um transdutor sonoro;
- Construir um alto falante de papel funcional.

## 7.2 Introdução

Texto:

[...] O Grupo de Pesquisa em Zumbido do HC [SP] constata que quase 35% dos casos de problemas auditivos diagnosticados na unidade relacionam-se a ruído por exposição prolongada a sons potencialmente lesivos. A incidência aumenta gradativamente em crianças e jovens.

“Os mais novos não acreditam que a falta de cuidados com os ouvidos leva a problemas futuros, por isso precisam de muita orientação para mudar a conduta”, salienta a médica. No caso dos adultos, ela diz que aceitam a orientação e previnem-se. Insônia e ansiedade – Os médicos consideram os fones de ouvido prejudiciais à saúde auditiva porque descarregam sons de até 120 decibéis (dB) diretamente no tímpano. Os brinquedos eletrônicos vendidos no comércio chegam a emitir ruídos de 82 dB a 130 dB – intensidades maiores do que as preconizadas para um trabalhador (de 80 dB a 85 dB).

“O uso do fone de ouvido não resulta na perda total da audição, mas a lesão adquirida dificilmente será recuperada”, adverte a médica.

[...]

Trecho extraído da publicação *Pessoas que usam excessivamente fones de ouvido podem sofrer danos auditivos*, disponível em <http://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/lenoticia.php?id=91236>.

## 7.3 Pense e responda

Porquê os fones de ouvidos podem ser prejudiciais à audição, se o som que vem deles mal pode ser ouvido quando os afastamos alguns centímetros do ouvido?

---

---

## 7.4 A intensidade do som: o que a Física diz

### 7.4.1 Modelo matemático da intensidade sonora $I$

A intensidade de uma onda sonora depende do quão concentrada está a energia do som. Define-se por intensidade sonora  $I$  a relação entre a potência de uma onda sonora, em  $W$  e a área que a frente dessa onda sonora atravessa  $A$ . Então, temos:

$$I = \frac{Pot}{A} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Caso a fonte sonora seja muito pequena, chamada de puntiforme, o som é emitido de um ponto e se espalha em todas as direções, enchendo o espaço

numa forma esférica. Nesse caso, a área atravessada pelas frentes de onda é uma área esférica. Lembre-se que a área de uma superfície esférica é dada por  $A_{esf} = 4\pi r^2$ .

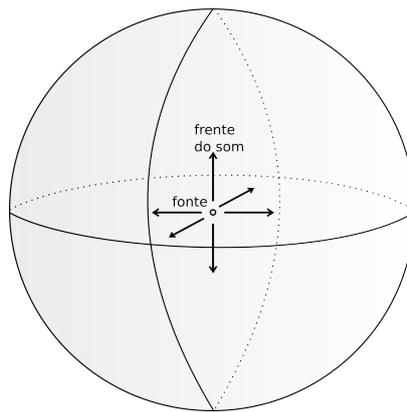


Figura 7.1: Propagação radial de uma onda sonora tridimensional no ar

Com isso, a intensidade do som será dada por

$$I = \frac{Pot}{4\pi r^2} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

E isso nos mostra que a intensidade sonora decresce com o quadrado do raio da esfera

$$I \sim \frac{1}{r^2}$$

Então, quando uma onda sonora parte de um ponto e se espalha esfericamente pelo espaço, quanto mais longe da fonte sonora estivermos, menor será a intensidade  $I$  do som que chega ao nosso ouvido. Vejamos um exemplo na tabela de variação da intensidade sonora em função da distância  $r$

Distância da fonte (r)	Intensidade sonora $I$	O que acontece?
1 m	$360 \frac{W}{m^2}$	$I_0$
2 m	$90 \frac{W}{m^2}$	4 vezes menor que $I_0$
3 m	$40 \frac{W}{m^2}$	9 vezes menor que $I_0$
4 m	$22,5 \frac{W}{m^2}$	16 vezes menor que $I_0$
5 m	$14,4 \frac{W}{m^2}$	25 vezes menor que $I_0$
⋮	⋮	

## 7.5 Sistemas de som *line array*

Uma grande mudança tecnológica ocorreu nos últimos anos, nos sistemas de sonorização. Diferentes das antigas caixas de som empilhadas, hoje em dia em grandes shows ao ar livre, os sistemas de som são compostos por várias caixas de som, relativamente pequenas, formando uma coluna vertical. Esse tipo de sistema é chamado de Arranjo em Linha (*linearray*).



Figura 7.2: Sistema de som em linha pendurado em evento musical

Uma das vantagens dos sistemas *linearray* é que a coluna de caixas se comporta como uma fonte sonora linear, e a onda sonora que emana do sistema, se espalha com forma cilíndrica.

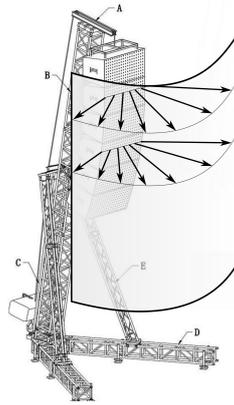


Figura 7.3: Frentes de onda com forma cilíndrica

Mas a área de uma superfície lateral cilíndrica é dada por  $A_{cil} = 2\pi rh$ , e nesse caso a intensidade varia com o inverso de  $r$  e não com o inverso de  $r^2$ . Isso permite que mesmo ao longe, o público em um grande show possa ouvir o som com uma intensidade maior do que um em um outro sistema de fonte puntiforme.

## 7.6 Pense e responda

O que você entende por *Decibel*?

---

---

---

## 7.7 Nível da intensidade sonora: O que a Física diz

### 7.7.1 Audição humana

Possuímos um ouvido muito sensível e podemos perceber sons, mesmo que sejam de baixíssima intensidade. A menor intensidade sonora que é capaz de estimular nosso sistema auditivo é aproximadamente  $I_0 = 10^{-12}W/m^2$ . Mas também suportamos sons bem mais intensos que isso. Nosso ouvido suporta, por exemplo, uma intensidade sonora cem milhões de vezes mais intensos que  $I_0$ . Ou sons dez bilhões de vezes mais intensos que  $I_0$ . A faixa dinâmica do nosso ouvido é vasta. Claro que para intensidade altíssimas, sentimos dor no ouvido, e sons assim pode ser muito prejudiciais à saúde. No entanto, para lidarmos com essas intensidades sonoras, utilizamos um conceito chamado Nível de Intensidade Sonora (NIS), representado aqui por  $\beta$ .

A ideia do nível de intensidade sonora é que a seguinte:

- Som dez vezes mais intenso que  $I_0$  tem nível 1:  $\beta = 1$
- Som cem vezes mais intenso que  $I_0$  tem nível 2:  $\beta = 2$
- Som mil vezes mais intenso que  $I_0$  tem nível 3:  $\beta = 3$
- Som dez mil vezes mais intenso que  $I_0$  tem nível 4:  $\beta = 4$

Mas qual é o operador matemático que transforma 1000 em 3? Ou que transforma 100 em 2? Ou que transforma 10000 em 4? Eis aqui uma utilização excelente para os logaritmos, pois

$$\log 10 = 1$$

$$\log 100 = 2$$

$$\log 1000 = 3$$

$$\log 10000 = 4$$

Por isso, utilizamos uma função logarítmica para o cálculo do nível de intensidade sonora. A unidade da intensidade sonora é Bell, em homenagem a Alex Graham Bell.

$$\beta = \log \left( \frac{I}{I_0} \right) [Bell]$$

Então, um som de intensidade  $10^{-8} W/m^2$  é dez mil vezes mais intenso que  $I_0$ , logo tem nível  $\beta = 4 Bell$ . Ou podemos falar em décimos de Bell ( $dB$ ). No caso teríamos um som de nível  $\beta = 40 dB$ . Então, se quisermos descobrir o nível em  $dB$ , devemos proceder

$$\beta = 10 \times \log \left( \frac{I}{I_0} \right) [dB]$$

É claro que a medida do nível de intensidade sonora está associada à energia do som, mas ela não é, em si, uma grandeza física. É apenas uma relação entre o estímulo recebido pelo ouvido e o mínimo estímulo perceptível.

### 7.7.2 Calculando decibéis

Voltando ao texto inicial, fala-se que o nível sonoro de  $130\text{ dB}$  é prejudicial à saúde. Qual é a intensidade sonora de um som desse nível?

## 7.8 Utilizando um *app* de decibelímetro

Existem muitos aplicativos para *smartphones* que medem a intensidade sonora de uma onda que chega ao microfone do celular. Num momento de descontração, vamos baixar e instalar um decibelímetro em alguns aparelhos para medirmos (anote) o nível de intensidade sonora, nos seguintes casos:

a) O nível do ruído do aparelho de ar condicionado (a  $1\text{ m}$  dele).

---

b) O nível da voz humana, conversando normalmente (a  $1\text{ m}$  da boca).

---

c) O nível de ruído da sala com todos em silêncio (medido no centro da sala).

---

## 7.9 Atividade - Construindo alto falantes alternativos

### 7.9.1 Material Necessário

- folha de pale, cartolina ou qualquer membrana maleável

- fio eslamtado
- ímã
- plug tipo P2
- cola

Nessa atividade vamos construir um alto falante alternativo, enrolando uma bobina de fio esmaltado, fixando as extremidades do fio ao plug e colando a bobina na superfície maleável do papel ou outra.

## 7.10 Pense e responda

1. Se retirarmos o ímã, o alto falante continua funcionando?

---

2. Qual é a relação entre a corrente elétrica no fio, a presença do ímã e o movimento do papel?

---

# Capítulo 8

## Atividades Finais

## 8.1 Objetivos

Esta é atividade final. Espera-se que você esteja apto a:

- Responder corretamente a grande parte das questões de um teste objetivo, contemplando todos os tópicos estudados;
- Construir um Mapa Mental sobre o Som que inclua conceitos aprendidos nos capítulos estudados;
- Relacionar as causas e efeitos, articulando os conceitos aprendidos nos capítulos.

## 8.2 Atividade - Teste objetivo

A ser feito e recolhido.

## 8.3 Atividade - Construindo um Mapa Mental

Elaborar um Mapa Mental sobre o Som, a ser feito em folha separada.

## 8.4 Atividade - Rede de associações

De maneira semelhante à utilizada no primeiro capítulo, conecte as caixas da maneira que achar mais conveniente, construindo assim uma rede de associações entre os significados dos termos escritos no boxes.

## 8.5 Agradecimento

Caro aluno, este trabalho é parte do desenvolvimento de uma dissertação de Mestrado Profissional em Ensino de Física. Agradeço por seu envolvimento, por seu empenho e pelo tempo dedicado às atividades. Agradeço também à direção da escola que autorizou a aplicação deste material instrucional. Certos de que um mundo melhor e mais justo é feito de mentes e de sociedades mais desenvolvidas intelectualmente e humanamente, sigamos com o compromisso de desvendarmos a natureza, enriquecendo nossa cultura e estudando ciências sempre refletindo sobre como essa ciência pode tornar o amanhã melhor para o mundo e para todos que nele habitam.

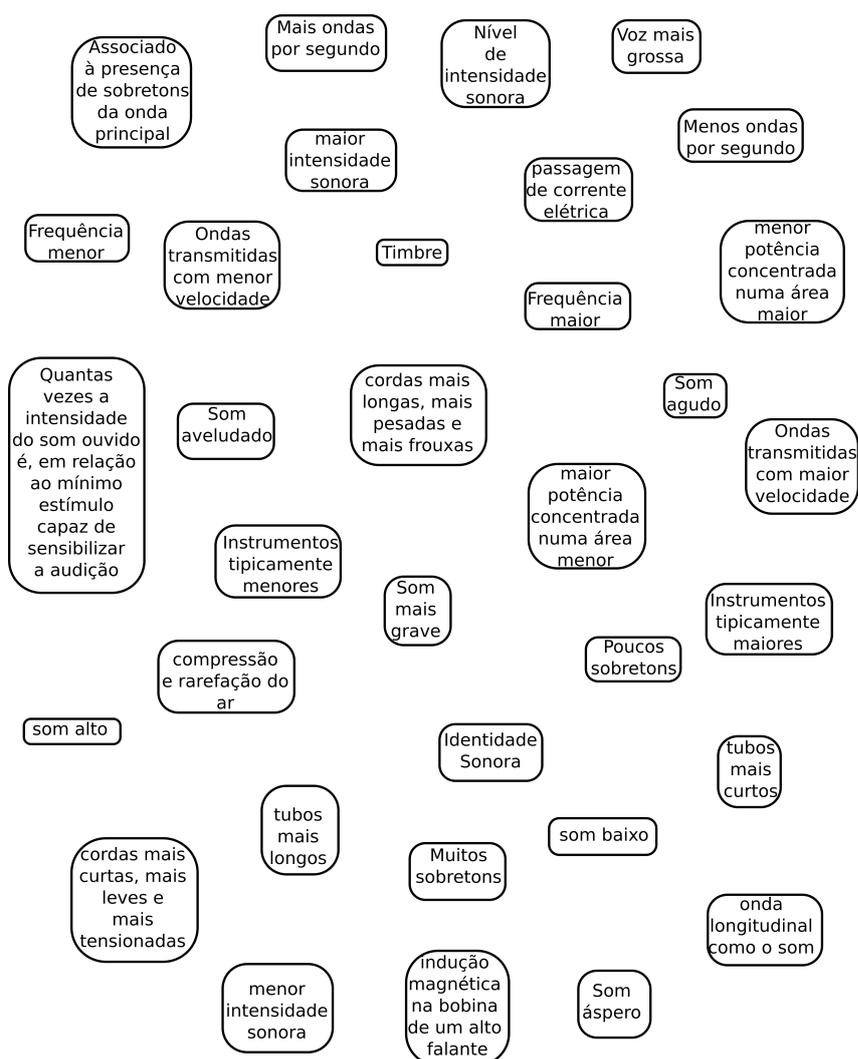
*Ernani Vassoler Rodrigues*

# APÊNDICE B – Atividade com redes de associação

## Acústica - Rede de associações

Nome: \_\_\_\_\_ Série: \_\_\_\_\_ Turma: \_\_\_\_\_

Na figura abaixo, ligue as caixas da forma que achar conveniente, conectando as caixas mais relacionadas. A ideia dessa atividade é que você conecte as caixas da forma que achar conveniente, considerando quais são as variáveis e as consequências mais relacionadas, ou quais são os boxes que, para você, mais se relacionam.



# APÊNDICE C – Teste objetivo

Avaliação de conceitos de Acústica

Nome: \_\_\_\_\_ Série: \_\_\_\_\_ Turma: \_\_\_\_\_

Caro aluno(a), em cada questão, leia atentamente o enunciado e, antes de responder um dos itens, assinale uma das carinhas que indicam sua segurança na resposta que você está dando, da seguinte forma:

Como você se sente para responder a essa questão?



Bem  
seguro(a).  
Acho que sei!



Resolvo,  
mas com  
alguma  
dúvida



Muito  
inseguro(a).  
Vou chutar

No mais, bom teste!

1. A característica do som que me permite diferenciar a voz de duas pessoas, mesmo que elas estejam cantando a mesma música é chamada de:



- a) altura
- b) timbre
- c) intensidade
- d) decibéis
- e) velocidade

2. Esticar uma corda de violão, girando as tarraxas, faz com que o som emitido pela vibração da corda tenha:



- a) maior frequência
- b) menor frequência

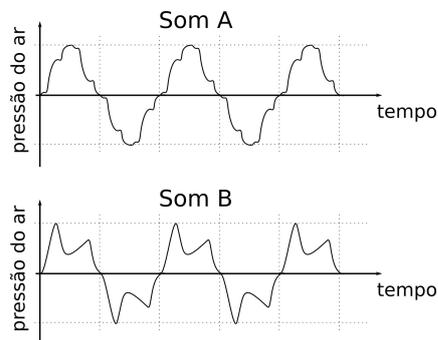
- c) maior intensidade
- d) menor intensidade
- e) menor velocidade

3. Quando aproximo meu ouvido de um fone de celular, ouço melhor o som. Essa aproximação aumenta:



- a) a frequência do som
- b) a potência do som
- c) a intensidade do som
- d) a velocidade do som
- e) o comprimento de onda do som

4. Um aplicativo de gravação de som num celular, registra os sons dos instrumentos A e B, conforme e a figura:

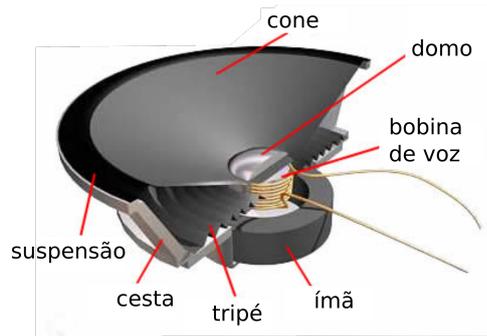


Podemos dizer que os sons A e B possuem:



- a) mesma frequência e timbres diferentes
- b) mesma velocidade e mesmo timbres
- c) mesma intensidade e frequências diferentes
- d) mesmo período e mesmo timbre
- e) mesma intensidade e mesmo timbre

5. Um alto falante serve para reproduzir som, transformando energia eletromagnética em energia mecânica. Para isso, o alto falante utiliza uma bobina de cobre, uma superfície cônica de papel e um ímã, conforme a figura.



Podemos afirmar que no funcionamento de um alto falante:



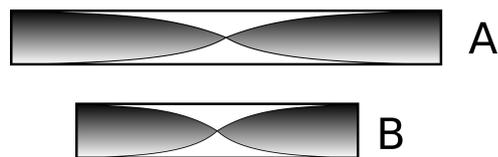
- é o aquecimento da bobina de cobre que perturba o ar, emitindo som
  - a passagem de corrente elétrica no papel movimenta o ímã, que perturba o ar, emitindo som
  - a passagem de corrente elétrica na bobina induz um campo magnético que interage com o cone, movendo-o e perturbando o ar
  - a rotação do cone induz uma corrente elétrica na bobina, que movimenta o ímã e o ar
  - a passagem de corrente elétrica pelo ímã induz um campo magnético na bobina, movimentando o domo e o ar, emitindo som
6. Um cavaquinho possui cordas mais leves e menores, já um contrabaixo possui cordas mais pesadas e maiores. Por isso caso a força de tração na corda de um cavaquinho e na corda de um violão sejam iguais, o som emitido



- pelo cavaquinho possui maior frequência de vibração
  - pelo contrabaixo possui maior frequência de vibração
  - pelo cavaquinho tem maior velocidade, no ar
  - pelo contrabaixo tem maior velocidade, no ar
  - pelo cavaquinho é mais grave
7. Utiliza-se um decibelímetro em um celular, para se medir, em  $dB$  o nível da intensidade sonora. Comparando os sons emitidos por duas caixas diferentes, situadas à mesma distância do decibelímetro, verifica-se que o aparelho registrou  $10\text{ dB}$  para a caixa X e registrou  $20\text{ dB}$  para a caixa Y. Então a intensidade do som



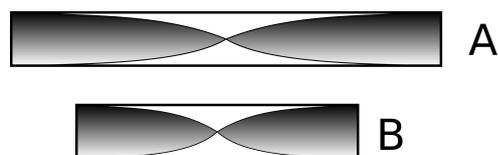
- a) emitido por X é o metade da intensidade do som emitido por Y
  - b) emitido por X é o dobro da intensidade do som emitido por Y
  - c) emitido por X é o um décimo da intensidade do som emitido por Y
  - d) emitido por X é dez vezes a intensidade do som emitido por Y
  - e) emitido por X é o um centésimo da intensidade do som emitido por Y
8. Tubos emitem naturalmente sons que dependem da vibração do ar em seu interior. A Física utiliza uma representação de ventres para regiões onde o ar tem bastante movimentação em um tubo, e nós para regiões onde o ar possui pouquíssima vibração. Observe o tubo de duas flautas, que emitem sons de primeiro harmônico (chamados de sons fundamentais) mas que possuem comprimentos diferentes:



Comparando os sons das duas flautas, podemos dizer que:



- a) A flauta A emite som mais agudo
  - b) A flauta B emite som de maior comprimento de onda
  - c) A flauta A emite som de menor velocidade
  - d) A flauta B emite som de menor frequência
  - e) A flauta B emite som de maior frequência
9. Ainda em relação ao som emitido pelas flautas da questão anterior, vamos considerar que a flauta A emite um som correspondente à nota musical Lá. podemos dizer que:



- a) Se o tubo da flauta B tiver metade do comprimento do tubo da flauta A, a nota musical emitida por B também será um Lá.
- b) Se o tubo da flauta B tiver metade do comprimento do tubo da flauta A, a nota musical emitida por B será um Si.
- c) Se o tubo da flauta B tiver metade do comprimento do tubo da flauta A, a nota musical emitida por B será um Sol.
- d) Se o tubo da flauta B tiver metade do comprimento do tubo da flauta A, o som emitido por B terá a mesma frequência que o som emitido por A.
- e) Se o tubo da flauta B tiver metade do comprimento do tubo da flauta A, a nota musical emitida por B terá metade da frequência do som emitido por A.
10. Ao tocar um violão, uma pessoa pressiona a corda em uma casa, tal que o comprimento vibrante da corda seja  $0,8\text{ m}$ . A figura a seguir ilustra o modo de vibração da corda:



Para essa vibração, o comprimento de onda, do modo normal de vibração da corda é:

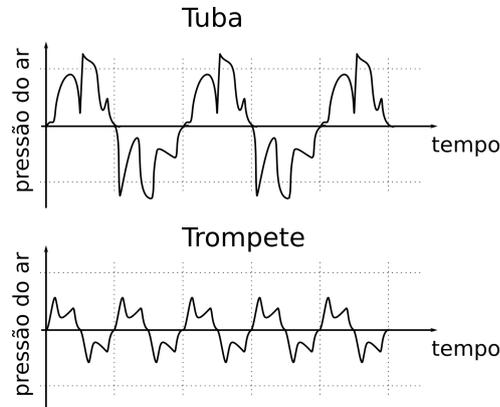


- a)  $0,4\text{ m}$ .
- b)  $0,6\text{ m}$ .
- c)  $0,8\text{ m}$ .
- d)  $1,2\text{ m}$ .
- e)  $1,6\text{ m}$ .
11. Se uma corda vibrante é encurtada, o som emitido por ela



- a) passa a ter intensidade maior.
- b) passa a ter comprimento de onda maior.
- c) passa a ter velocidade maior.
- d) passa a ter frequência maior.
- e) passa a ter nível de intensidade maior.

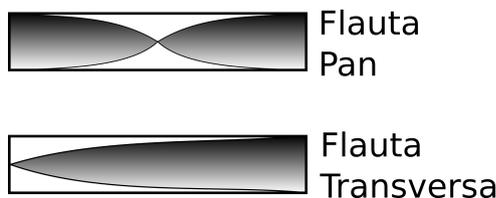
12. Os sons de uma tuba e de um trompete foram registrados, com microfone equivalentes. Os gráficos a seguir mostram as formas de onda gravadas, que representam as variações de pressão do ar em função do tempo.



Considerando a frequência de vibração do ar (som grave ou som agudo) e a intensidade sonora (volume do som) dos dois instrumentos, podemos afirmar que:



- a) a tuba emite som mais grave e de maior volume que o trompete
  - b) a tuba emite som mais agudo e de maior volume que o trompete
  - c) a tuba emite som mais agudo e de menor volume que o trompete
  - d) a tuba emite som mais grave e de menor volume que o trompete
  - e) a tuba e o trompete emitem sons de mesmo volume e de mesma altura.
13. A flauta é um instrumento musical que funciona com uma coluna de ar vibrando dentro de um tubo. A Física chama isso de Tubo Sonoro. Existem dois principais tipos de flauta: a Flauta Pan, que é um tubo aberto dos dois lados, e a Flauta Transversa, que é um tubo fechado em um dos lados.



Se tivermos uma Flauta Pan e uma Flauta Transversa, do mesmo comprimento, emitindo seus sons fundamentais, teremos necessariamente



- a) a mesma frequência no som das duas
  - b) a frequência maior para a Flauta Transversa
  - c) a intensidade maior para a Flauta Pan
  - d) o comprimento de onda maior para a Flauta Transversa
  - e) o nível de intensidade maior para a Flauta Pan.
14. Uma fonte sonora puntiforme emite som que emana esfericamente para o espaço. Como a intensidade sonora é a relação entre a potência do som e a área que a onda sonora atravessa, teremos para o caso de uma fonte puntiforme a intensidade decaindo com o quadrado da distância. Considere uma pessoa a  $1\text{ m}$  de uma fonte sonora puntiforme. Nessa posição, a pessoa ouve um som de  $90\text{ dB}$ . A que distância da fonte sonora a pessoa ouvirá um som de  $70\text{ dB}$ ?



- a)  $2\text{ m}$
  - b)  $10\text{ m}$
  - c)  $20\text{ m}$
  - d)  $50\text{ m}$
  - e)  $100\text{ m}$
15. Fones de ouvido intra auriculares mal podem ser ouvidos quando tirados do canal auditivo. No entanto, o som desses fones pode ser muito prejudicial à saúde, levando, em casos extremos à perda definitiva da audição. Considerando os termos utilizados em Física, assinale o porquê de um som de baixíssima potência ser potencialmente tão prejudicial.



- a) Porque dentro do canal auditivo, a potência do som emitido pelo fone aumenta.
- b) Porque dentro do canal auditivo, a frequência do som emitido pelo fone aumenta.
- c) Porque dentro do canal auditivo, o comprimento de onda do som emitido pelo fone aumenta.
- d) Porque dentro do canal auditivo, a intensidade do som emitido pelo fone aumenta.
- e) Porque dentro do canal auditivo, a altura do som emitido pelo fone aumenta.

# APÊNDICE D – Script do R, utilizado para análise do teste objetivo

```
##### Script análise Rasch dos dados do pré e pós teste objetivo no R
# carregar o pacote Extended Rasch Modeling
library(eRm)
# importar tabela com dados dicotômicos
notas <- read.csv("~/Documents/notas.csv", header = T)
# nesse tipo de análise, o arquivo .csv deve conter nas linhas,
# os alunos e nas colunas, as questões. Da questão 01 à 15, pré-teste
# e da questão 16 à 30, pós-teste. Cada questão
# marcada corretamente recebe o valor 1 e cada questão errada recebe
# o valor 0
# separar pré teste de pós teste
notas_pre<-cbind(notas[,c(1:15)])
notas_pos<-cbind(notas[,c(16:30)])
# teste de infit com 95% de intervalo de confiança
# no pré-teste
rmod_pre<-RM(notas_pre)
lr_pre<-LRtest(rmod_pre, splitcr = "mean", se = TRUE)
plotGOF(lr_pre, conf = list(), col="blue", pos=3)
# no pós-teste
rmod_pos<-RM(notas_pos)
lr_pos<-LRtest(rmod_pos,splitcr = "mean", se = TRUE)
plotGOF(lr_pos, conf = list(), col="blue")
# mapa dos parametros beta dos ites e teta dos alunos
plotPImap(rmod_pre, sorted=TRUE)
plotPImap(rmod_pos, sorted=TRUE)
```

# APÊNDICE E – Script do R, utilizado para senso de autoeficácia

```
##### Script da análise dos emoticons, indicativos de autoeficácia no R
# importar caras ranqueadas
# no arquivo .csv, as linhas são as questões: linha 01 até 15, pré-teste
# e linha 16 até 30 pós-teste
# as colunas representam o ranking somado das carinhas,
# na coluna 01, soma de muito seguro, na coluna 02 para pouco seguro
# e na 03 para muito seguro inseguro
somados <- read.csv("~/Documents/caras_somados.csv", header=FALSE)
# carregar o pacote HH
library(HH)
# pela função likert, plotar as barras divergentes
likert(somados[(1:15),]) # das questões, pré
likert(somados[(16:30),]) # das questões, pós
wsomados<-(somados/28) # frequência relativa das caras
# teste de Wilcoxon não pareado,
# para verificação de aumento nas caras de seguro e redução nas
# caras de inseguro
wilcox.test(wsomados[(16:30),1], wsomados[(1:15),1], paired = F,
alternative = "greater")
wilcox.test(wsomados[(16:30),2], wsomados[(1:15),2], paired = F,
alternative = "less")
wilcox.test(wsomados[(16:30),3], wsomados[(1:15),3], paired = F,
alternative = "less")
# plota a variação das frequências das caras 01 (seguro),
# 02 (pouco seguro) e 03 (muito inseguro)
plot(0.5, somados[1,1], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="blue",
ylab="Número de Alunos", xlab="", main="caras", pch=20)
par(new=TRUE)
plot(1, somados[16,1], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="red",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
segments(0.5, somados[1,1], 1, somados[16,1], lty=2)
for (i in 2:15) {
  par(new=TRUE)
  plot(0.5, somados[i,1], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="blue",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
  par(new=TRUE)
  plot(1, somados[(i+15),1], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="red",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
  par(new=TRUE)
  segments(0.5, somados[i,1], 1, somados[(i+15),1], lty=2)
}
par(new=TRUE)
plot(1.5, somados[1,2], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="blue",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
plot(2, somados[16,2], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="red",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
```

```
par(new=TRUE)
segments(1.5, somados[1,2], 2, somados[16,2], lty=2)
for (i in 2:15) {
  par(new=TRUE)
  plot(1.5, somados[i,2], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="blue",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
  par(new=TRUE)
  plot(2, somados[(i+15),2], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="red",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
  par(new=TRUE)
  segments(1.5, somados[i,2], 2, somados[(i+15),2], lty=2)
}
par(new=TRUE)
plot(2.5, somados[1,3], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="blue",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
plot(3, somados[16,3], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="red",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
segments(2.5, somados[1,3], 3, somados[16,3], lty=2)
for (i in 2:15) {
  par(new=TRUE)
  plot(2.5, somados[i,3], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="blue",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
  par(new=TRUE)
  plot(3, somados[(i+15),3], ylim=c(0,28), xlim=c(0,3), col="red",
ylab="", xlab="", pch=20, axes=FALSE)
  par(new=TRUE)
  segments(2.5, somados[i,3], 3, somados[(i+15),3], lty=2)
}
```

# APÊNDICE F – Script do R, para análise dos grafos

```
##### Script análise dos dados da atividade de redes, no R
# caso o usuário não tenha experiência com o R, sugere-se o uso
# do RStudio como interface.
# carregar o pacote igraph
library(igraph)
# caso o pacote não esteja instalado, baixar e instalar
# montar redes a partir da lista de arestas
# no caso, a atividade oferecia 34 arestas. Depois de numeradas, a rede
# (grafo) é carregado no padrão:
# graph(c(VA,VB, VA,VC, VF,VB), directed=FALSE, n=34)
#A seguir, alguns exemplos:
#Aluno 01, pré
ga01 <- graph(c(2,6, 3,4, 5,8), directed=FALSE, n=34)
#Aluno 01, pós
gd01 <- graph(c(1,10, 2,16, 3,10, 4,5, 4,8), directed=FALSE, n=34)
#Aluno 02, pré
ga02 <- graph(c(1,13, 4,21, 5,9), directed=FALSE, n=34)
#Aluno 02, pós
gd02 <- graph(c(1,33, 3,29, 3,24, 4,8, 5,9), directed=FALSE, n=34)
# gerar uma lista com todos os grafos
#pré
g_a<-list(ga1, ga2, ga3, gaN)
#pós
g_d<-list(gd1, gd2, gd3, gdN)
# gerando vetores vazios a serem preenchidos com as propriedades das redes
# substituir a letra N pelo número de alunos participantes
tamanho_a<-rep(NA, N)
tamanho_d<-rep(NA, N)
densidade_a<-rep(NA, N)
densidade_d<-rep(NA, N)
pt_art_a<-rep(NA, N)
pt_art_d<-rep(NA, N)
nclusters_a<-rep(NA, N)
nclusters_d<-rep(NA, N)
# loops para calcular por aluno o tamanho da rede (pré/pós),
# a densidade da rede (pré/pós), o número de pontos de articulação
# da rede (pré/pós) e o número de clusters (pré/pós), preenchido
# cada vetor acima com o resultado.
# Substituir a letra N pelo número de alunos
for (i in 1:N) {tamanho_a[i]<-gsize(g_a[[i]])}
for (i in 1:N) {tamanho_d[i]<-gsize(g_d[[i]])}
for (i in 1:N) {densidade_a[i]<-edge_density(g_a[[i]])}
for (i in 1:N) {densidade_d[i]<-edge_density(g_d[[i]])}
for (i in 1:28) {pt_art_a[i]<-NROW(articulation.points(g_a[[i]])}
for (i in 1:28) {pt_art_d[i]<-NROW(articulation.points(g_d[[i]])}
for (i in 1:28) {nclusters_a[i]<-NROW(
  cluster_walktrap(delete.vertices(g_a[[i]], which(degree(g_a[[i]])<2))))}
for (i in 1:28) {nclusters_d[i]<-NROW(
```

```

cluster_walktrap(delete.vertices(g_d[[i]], which(degree(g_d[[i]])<2)))
# coloca todos os dados das redes pré/pós num único arquivo para
# construção de uma tabela
redes_ad_dados<-cbind(tamanho_a, tamanho_d, densidade_a, densidade_d,
                     pt_art_a, pt_art_d, nclusters_a, nclusters_d)
# exportar tabela com dados das propriedades das redes
write.csv(redes_ad_dados, "redes_ad_dados.csv", row.names=FALSE,
          col.names=FALSE)
# de cada grafo, contar a quantidade de conexões baseadas em
# concepções alternativas, ou cientificamente equivocadas
# arquivo .csv contendo nas linhas todos os alunos e nas colunas o número
# de conexões equivocadas... coluna 01 pré e coluna 02 pós.
# importado o número de equívocos contados
eq_ad <- read.csv("~/Documents/eq_ad")
# calcular a relação conexões válidas/tamanho com valor percentual
dd_a<-(tamanho_a-eq_ad[,1])/tamanho_a*100
dd_d<-(tamanho_d-eq_ad[,2])/tamanho_d*100
dd_a
dd_d
# teste de Wilcoxon, pareado, para verificação de aumento ou não na
# categoria das redes
wilcox.test(tamanho_d, tamanho_a, paired = TRUE, alternative = "greater")
wilcox.test(densidade_d, densidade_a, paired = TRUE, alternative = "greater")
wilcox.test(pt_art_d, pt_art_a, paired = TRUE, alternative = "greater")
wilcox.test(nclusters_d, nclusters_a, paired = TRUE, alternative = "greater")
wilcox.test(dd_d, dd_a, paired = TRUE, alternative = "greater")
# plotar um grafo, antes e depois, como exemplo
# pré-instrução
V(ga01)$label.cex <- .3 # determina o tamanho do vértice
wcga01 <- cluster_walktrap(ga01) # calcula os clusters
plot(wcga01, ga01, layout = layout.fruchterman.reingold) # plota o grafo
#pós-instrução
V(gd01)$label.cex <- .3 # determina o tamanho do rótulo do vértice
wcgd01 <- cluster_walktrap(gd01) # calcula os clusters
plot(wcgd01, gd01, layout=layout.fruchterman.reingold) # plota o grafo
## concatenar todos os grafos, onde N é o número de alunos
junto_a<-(union(ga01, ga02, gaN))
junto_d<-(union(gd01, gd02, gdN))
# plotar junto_a com vértices de tamanho proporcional a seu grau e
# arestas de espessura proporcional a seu peso para os grafos concatenados,
# pré-instrução
get.adjacency(junto_a) # obtem a matriz de adjacência
V(junto_a)$label.cex <- .2 # determina o tamanho do rótulo do vértice
E(junto_a)$weight <- runif(ecount(junto_a)) # calcula o peso das arestas
get.adjacency(junto_a, attr="weight") # nova matriz de adjacência com os pesos
plot.igraph(junto_a, vertex.size=degree(junto_a),
            edge.width=E(junto_a)$weight,
            layout=layout.fruchterman.reingold,
            vertex.label.color="black",
            edge.color=rgb(35, 35, 35, maxColorValue = 255),
            vertex.color="grey",
            edge.curved=F) # plota o grafo ajustando o tamanho do vértice
# ao grau, a espessura da aresta ao peso, colorindo vértice, aresta e rótulos
# para os grafos concatenados, pós-instrução
get.adjacency(junto_d) # obtem a matriz de adjacência
V(junto_d)$label.cex <- .2 # determina o tamanho do rótulo do vértice
E(junto_d)$weight <- runif(ecount(junto_d)) # calcula o peso das arestas

```

```

get.adjacency(junto_d, attr="weight") # nova matriz de adjacência com os pesos
plot.igraph(junto_d, vertex.size=degree(junto_d),
            edge.width=E(junto_d)$weight,
            layout=layout.fruchterman.reingold,
            vertex.label.color="black",
            edge.color=rgb(35, 35, 35, maxColorValue = 255),
            vertex.color="grey",
            edge.curved=F) # plota o grafo ajustando o tamanho do vértice
# ao grau, a espessura da aresta ao peso, colorindo vértice, aresta e rótulos
## obter lista de pesos por aresta
# foram detectados 214 arestas (tamanho do grafo, pré-instrução)
junto_a<-(union(ga01, ga02, gaN))
E(junto_a)$weight <- runif(ecount(junto_a))
E(junto_a)$weight <- E(junto_a)$weight/ max(E(junto_a)$weight)
# cria um vetor com a lista de arestas
pesos_a<-cbind(get.edgelist(junto_a), round(E(junto_a)$weight, 2))
colnames(pesos_a, do.NULL = FALSE)
colnames(pesos_a) <- c("V1", "V2", "Peso")
pesos_a = data.frame(pesos_a)
pesos_a<-pesos_a[ order(pesos_a$Peso, decreasing = TRUE), ]
# verifica quais são as posições dos quartis
summary(pesos_a[,3])
# quarto quartil para pesos acima de .80
pesos_a[,3]>=0.80
pesos_a[1:54,c(1,2)]
# primeiro quartil para pesos acima de .80
pesos_a[,3]<=0.26
pesos_a[160:214,c(1,2)]
# foram detectados 211 arestas (tamanho do grafo, pós-instrução)
junto_d<-(union(gd01, gd02, gdN))
E(junto_d)$weight <- runif(ecount(junto_d))
E(junto_d)$weight <- E(junto_d)$weight/ max(E(junto_d)$weight)
# cria um vetor com a lista de arestas
pesos_d<-cbind(get.edgelist(junto_d), round(E(junto_d)$weight, 2))
colnames(pesos_d, do.NULL = FALSE)
colnames(pesos_d) <- c("V1", "V2", "Peso")
pesos_d = data.frame(pesos_d)
pesos_d<-pesos_d[ order(pesos_d$Peso, decreasing = TRUE), ]
# verifica quais são as posições dos quartis
summary(pesos_d[,3])
# quarto quartil para pesos acima de .78
pesos_d[,3]>=0.78
pesos_d[1:52,c(1,2)]
# primeiro quartil para pesos abaixo de .26
pesos_d[,3]<=0.26
pesos_d[161:211,c(1,2)]
# plotar variação dos pesos nos quartis extremos para comparação pré/pós dos
# das conexões válidas e dos equívocos, tanto nas menos frequentes
# (primeiro quartil) quanto nas mais frequentes (quarto quartil)
plot(0.5, 100*20/56, ylim=c(0,100),
     xlim=c(0,5),col="blue",ylab="",xlab="",main="", pch=24)
par(new=TRUE)
plot(1, 100*18/52, ylim=c(0,100),
     xlim=c(0,5),col="red",ylab="",xlab="",pch=24, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
segments(0.5, 100*20/56, 1,100*18/52, lty=2)
par(new=TRUE)

```

```
plot(1.5, 100*36/56, ylim=c(0,100),
     xlim=c(0,5), col="blue", ylab="", xlab="", main="", pch=22, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
plot(2, 100*34/52, ylim=c(0,100),
     xlim=c(0,5), col="red", ylab="", xlab="", pch=22, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
segments(1.5, 100*36/56, 2, 100*34/52, lty=2)
par(new=TRUE)
plot(3, 100*15/55, ylim=c(0,100),
     xlim=c(0,5), col="blue", ylab="", xlab="", main="", pch=24, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
plot(3.5, 100*21/53, ylim=c(0,100),
     xlim=c(0,5), col="red", ylab="", xlab="", pch=24, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
segments(3, 100*15/55, 3.5, 100*21/53, lty=2)
par(new=TRUE)
plot(4, 100*40/55, ylim=c(0,100),
     xlim=c(0,5), col="blue", ylab="", xlab="", main="", pch=22, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
plot(4.5, 100*32/53, ylim=c(0,100),
     xlim=c(0,5), col="red", ylab="", xlab="", pch=22, axes=FALSE)
par(new=TRUE)
segments(4, 100*40/55, 4.5, 100*32/53, lty=2)
```

# APÊNDICE G – Script do R, utilizado para teste Scree e Componente Principal

```
##### Script teste Scree e Componente Principal no R
# Para determinar o número de fatores a extrair
library(nFactors)
ev <- eigen(cor(dados)) # calcula autovalores
ap <- parallel(subject=nrow(dados),var=ncol(dados),
  rep=100,cent=.05)
nS <- nScree(x=ev$values, aparallel=ap$eigen$qevpea)
#plotar o resultado do teste Scree
plotnScree(nS)

# Análise de Componente Principal e mapa de variáveis por dimensão
library(FactoMineR)
result <- PCA(dados) #plota automaticamente o resultado
```

# APÊNDICE H – Termo de consentimento

## TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Caro aluno (ou responsável, em caso de aluno menor de 18 anos), você está sendo consultado sobre a participação como voluntário, em uma pesquisa educacional. Este estudo pretende investigar a aprendizagem de conceitos científicos em Física relacionados ao conteúdo de Acústica. Pretendemos investigar como a nossa metodologia de trabalho experimental contribui para a compreensão de conceitos nesse tema. Durante quatro semanas nos reuniremos em uma tarde para um encontro de aproximadamente 2:30h de duração. Durante o desenvolvimento das atividades, o aluno presente manipulará experimentos ligados a Acústica, responderá a um teste de conceitos em Acústica, debaterá sobre esses conceitos, construirá mapas mentais e conectará redes causais sobre Acústica. O aluno participante desse processo deve estar ciente que não haverá nenhum custo financeiro nem tampouco recebimento de valores por isso. Também não haverá registro de notas escolares resultantes das atividades desenvolvidas. Por se tratar de uma pesquisa, alguns eventos da sala de aula serão registrados em áudio ou em vídeo. É assegurado o anonimato do aluno, sempre que nos referirmos a algum acontecimento da sala de aula que o envolva, em nossas produções científicas. O aluno terá total liberdade de deixar de participar das atividades no instante que quiser, pelo motivo que lhe aprouver. Não há qualquer risco pessoal na participação da pesquisa. Os conhecimentos resultantes desta pesquisa serão divulgados em revistas especializadas, em congressos e simpósios sobre pesquisas educacionais e em uma dissertação de mestrado. Além disso, os dados coletados dessa pesquisa serão armazenados por 05 anos e poderão ser utilizados em futuras pesquisas. Depois desse prazo, os dados serão destruídos.

Pesquisador responsável: Prof. Ernani Vassoler Rodrigues. Tel. (27) 999446656. Mestrado Profissional em Ensino de Física – UFES. email: ernanivr@gmail.com

Orientador da pesquisa: Prof. Giuseppi Gava Camiletti. Tel. (27) 999744725. Departamento de Física – UFES. email: giuseppi.ufes@gmail.com

## CONSENTIMENTO DA PARTICIPAÇÃO

Eu li e entendi os detalhes descritos neste documento. Concordo que os dados coletados para o estudo sejam usados para o propósito acima descrito.

Vitória, 10 de setembro de 2015.

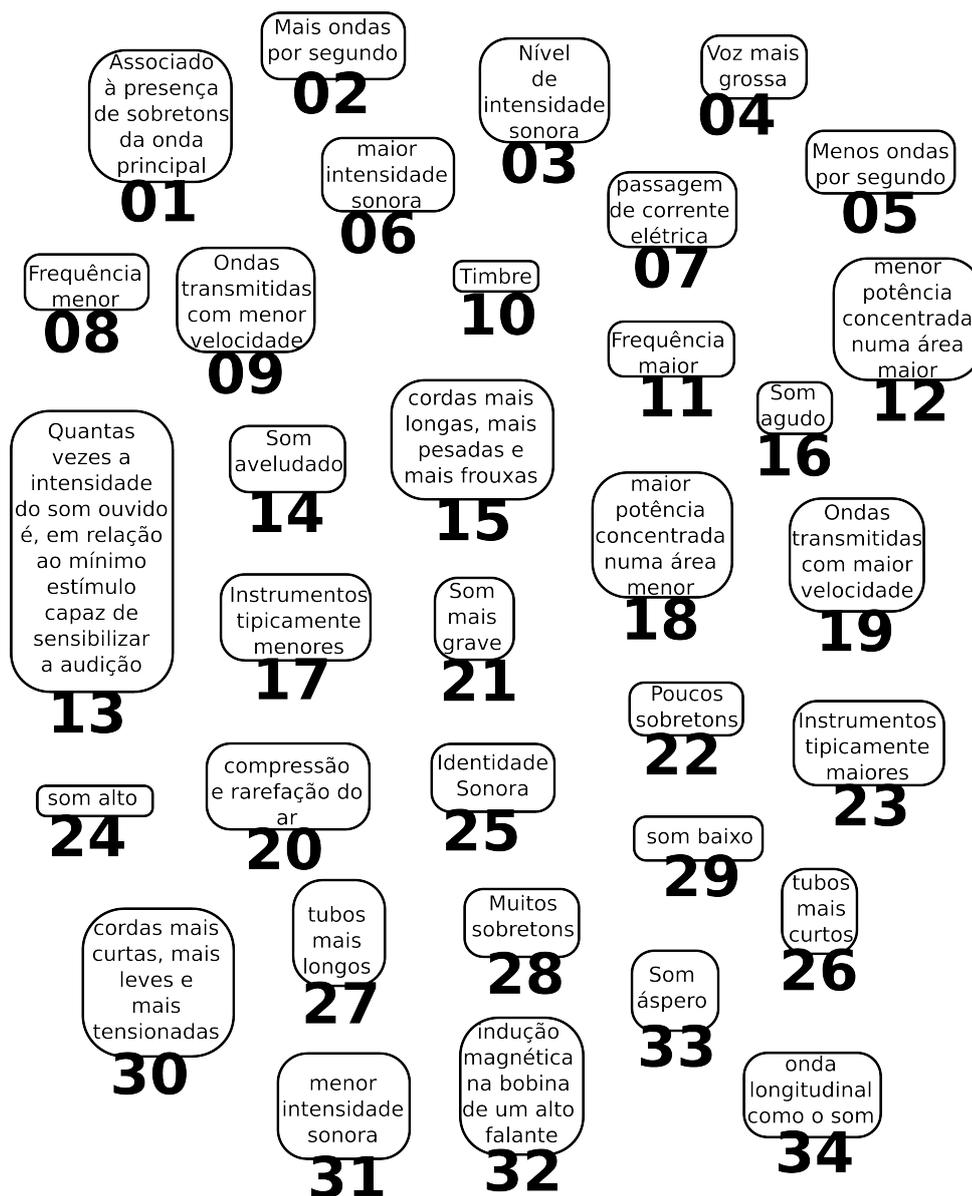
Nome legível do aluno e idade:

Assinatura do aluno (ou do responsável):

Nome e RG do responsável, caso o aluno seja menor de 18 anos:

# APÊNDICE I – Grafos construídos pelos alunos pré instrução e pós instrução

Codificação utilizada para os grafos



A seguir, todos os grafos pré instrução e pós instrução, por aluno.

