UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

JOÃO FILIPE SOUZA FERREIRA

PROPOSTA INTERDISCIPLINAR ENTRE FÍSICA E MÚSICA ATRAVÉS DA APRENDIZAGEM COOPERATIVA

FORTALEZA
2019

JOÃO FILIPE SOUZA FERREIRA

PROPOSTA INTERDISCIPLINAR ENTRE FÍSICA E MÚSICA ATRAVÉS DA APRENDIZAGEM COOPERATIVA

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física, do Departamento de Física, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Saulo-Davi Soares e Reis

Fortaleza
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F441p Ferreira, João Filipe Souza.
PROPOSTA INTERDISCIPLINAR ENTRE FÍSICA E MÚSICA ATRAVÉS DA APRENDIZAGEM COOPERATIVA / João Filipe Souza Ferreira. – 2019.
105 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Física, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Saulo Davi Soares e Reis.

1. Música. 2. Ensino de física. 3. Interdisciplinaridade. 4. Aprendizagem Cooperativa. 5. Acústica. I. Título.

CDD 530

JOÃO FILIPE SOUZA FERREIRA

PROPOSTA INTERDISCIPLINAR ENTRE FÍSICA E MÚSICA ATRAVÉS DA APRENDIZAGEM COOPERATIVA

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física, do Departamento de Física, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Aprovada em: 19 / 06 / 2019 .

BANCA EXAMINADORA

____
Prof. Dr. Saulo-Davi Soares e Reis (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

____
Prof. Dr. José Ramos Gonçalves
Universidade Federal do Ceará (UFC)

____
Prof. Dr. Marcos Antônio Araújo Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Irismar e João, professores que, desde cedo, mostraram-me o poder da educação.

AGRADECIMENTOS

A todos os professores que passaram pela minha vida, que inspiram e me motivam a ser um pouco de cada um.

Ao Prof. Dr. Saulo Davi Soares e Reis, exímio professor e orientador.

Aos Prof. Dr. José Ramos Gonçalves e Marcos Antônio Araújo Silva, por aceitarem o convite para participar da banca examinadora e contribuírem para o resultado final deste trabalho.

Ao Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência, um dos maiores responsáveis por me dar a certeza de seguir na docência.

Ao Programa de Estímulo à Cooperação na Escola, por expandir meu horizonte e formar o futuro docente que serei.

À Raquel Garcia e sua família, por seres prestativos e me hospedarem em sua casa durante minha estadia em Pacajús.

À EEM Dione Maria Bezerra Pessoa e aos alunos da escola, que aceitaram fazer parte dessa pesquisa.

A todos os familiares e amigos que me ajudaram com tanto carinho e estímulo para que eu conseguisse chegar até essa etapa da minha formação.

"As maiores formas de compreensão que conseguimos alcançar são risos e compaixão".

Richard P. Feynman

RESUMO

A resistência de uma grande parte dos estudantes de ensino médio em acompanhar as aulas de física motiva a busca por estratégias de ensino alternativas. No presente estudo, foi usada a junção natural entre música e física para promover uma experiência de aprendizado atrativa e simplificada. Para aumentar mais a distância das aulas tradicionais, que podem parecer monótonas para muitos estudantes, estratégias de Aprendizagem Cooperativa também foram usadas, tornando as aulas de física mais dinâmicas e interativas. Para que seja mais eficaz com os conceitos musicais, é necessário compreender as conexões interdisciplinares entre música e física e saber como aplicar essa base epistemológica na experiência de aprendizado. Foi percebido que a música foi uma ferramenta útil nas aulas que vão desde o Movimento Harmônico Simples (MHS) até a Acústica, aplicando seus conceitos físicos paranos estudantes junto às noções de ritmo, compasso, harmonia, oitava, dinâmica e assim por diante, além do uso de instrumentos musicais. No final, foram encontrados resultados satisfatórios, onde 75% dos estudantes mostraram-se cooperativos de forma eficiente e entendedores de conceitos físico na música.

Palavras-chave: Música. Ensino de física. Interdisciplinaridade. Aprendizagem Cooperativa. Acústica.

ABSTRACT

The resistance of a large portion of high school students to follow physics classes inspires the searching for alternative teaching strategies. In the present study, the use of the natural link between music and physics to provide an attractive and simplified learning experience to the students was used. To increase the distance from the traditional approach, which may sound monotonous to many students, Cooperative Learning Strategies are also used, turning physics classes more dynamic and interactive. In order to be more effective with the use of music concepts, it is necessary to understand the interdisciplinary connections between music and physics and how to apply its epistemological basis to the learning experience. It was realized that music was an useful tool in classes ranging from Simple Harmonic Motion to Acoustics, applying the physical concepts presented to the students together with the musical notions of rhythm, bar, harmony, octaves, dynamics and so forth, besides the use of musical instruments in class. In the end, satisfactory results were found, where 75% of the students were shown to be cooperate efficiently and understand physics concepts in music.

Keywords: Music. Physics teaching. Interdisciplinarity. Cooperative Learning. Acoustics.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

Em qualquer etapa do ensino básico, as disciplinas de Ciências Exatas, geralmente, são ensinadas com uma abordagem desconexa da realidade dos estudantes. Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais (2000, p. 20), o aprendizado nessa área "indica a compreensão e a utilização dos conhecimentos científicos, para explicar o funcionamento do mundo, bem como planejar, executar e avaliar as ações de intervenção na realidade".

Também há a quebra do vínculo entre as outras disciplinas básicas do Ensino Médio que, infelizmente, gera um contexto no qual um conteúdo não está relacionado com o outro, ficando distante do saber universal idealizado pelos gregos (Esmeraldo, 2004). A ausência de conexão com outras disciplinas, junto à falta de estímulo, faz que a Física seja uma das matérias mais rejeitadas durante o Ensino Básico de muitos. Como as aulas de Física carregam um caráter abstrato, que ofusca todo o seu potencial de fazer os alunos ficarem maravilhados com o nosso Universo, cria-se um bloqueio em muitos estudantes, que perdem a vontade de estudar e, consequentemente, têm baixo desempenho nas disciplinas que constroem conexão com a mesma (Esmeraldo, 2004).

A interdisciplinaridade com a Música é uma alternativa diferenciada para os estudantes, porque é fato que todos gostam de música, independente do gênero, além da possibilidade de conhecerem algum músico ou até mesmo ter alunos dentro da turma que toquem algo. Dentro do estudo de Movimento Harmônico Simples (MHS), Ondulatória e Acústica, normalmente carregados de bastante Matemática, a Música é uma opção bastante eficiente porque, devido ao fato de estar dentro da realidade dos estudantes, permite um ensino mais pragmático e atraente, a fim de que os estudantes notem a importância dos cálculos, a partir da teoria musical, dos instrumentos e do som produzido por eles, elencando um pouco de História, para conhecer as raízes da Música, e, assim, motivando cada vez mais os alunos.

Outro fruto do ensino tradicional são os livros didáticos, idealizando as demonstrações de inúmeros cálculos executados de forma repetitiva e decoreba, criando uma cultura exaustiva de resolver vários problemas constantemente. Então, com as aulas desvinculadas da realidade dos alunos e com exercícios que não os estimulam, a Física possui uma formalidade desnecessária, com todos os conteúdos já separados e preparados para serem ensinados de forma linear e, geralmente, abstrata. Segundo Normando (1985, p. 7), “é imperioso que o aluno veja a física funcionando, ao invés de aceitar as conclusões em função da autoridade de professor”, despertando sua curiosidade em descobrir um universo que a todo o momento esteve escondido dele, só não foi mostrado por conta do formalismo escolar. Castro (s/d, p. 17) pondera:

> “[...] Pode-se pedir que faça ele mesmo a ponte entre o que aprendeu de matemática na segunda-feira com a lição sobre atrito na aula de física da terça e com a sua observação de um automóvel cantando pneus na tarde da quarta. Mas para a maioria dos outros alunos, infelizmente, ou a escola o ajuda a fazer estas pontes ou elas permanecerão sem ser feitas, perdendo-se assim a essência do que é uma boa educação.”

Com esses pressupostos, nosso propósito é levar aos estudantes a presença da Física dentro do universo da música de forma didática, visto que não foi encontrado um exemplar da literatura que é capaz de mostrar isso. Para isso, construímos um pequeno livro para ser distribuído entre os alunos, a fim de que esse exemplar fosse material didático durante as aulas. A divisão das seções e das atividades desse livro estão de acordo com as etapas da Aprendizagem Cooperativa e durante as aulas foi usada a técnica *jigsaw*.

Mesmo nas questões que abordam aplicações cotidianas, os professores ainda usam a abordagem da memorização, usando recursos que não permitem a união entre aplicabilidade e realidade. Em algumas aulas, os estudantes tiveram a oportunidade de manusear alguns instrumentos musicais e participar de experimentos que envolvem os mesmos, a fim de presenciar a Física de uma forma mais sensorial, beneficiando o entendimento da aula e, assim, perceber que os exercícios podem ir além de problemas resumidos ao “bloco deslizando na rampa”.

Em suma, esta monografia possui as seguintes seções:

a) Introdução, mostrando ao leitor sobre o que esse trabalho se trata;
b) Referencial teórico, apresentando a Aprendizagem Cooperativa, Interdisciplinaridade e os conceitos de Física abordados nas aulas;
c) Metodologia para o desenvolvimento do trabalho, informando as medidas e procedimentos adotados, bem como a descrição dos passos;
d) Comentários e conclusões acerca dos resultados obtidos.

2 APRENDIZAGEM COOPERATIVA

Resumidamente, a Aprendizagem Cooperativa une os estudantes para que eles aprendam uns com os outros a fim de atingir um objetivo principal. Seus elementos aparecem desde a Grécia Antiga, através de Sócrates, que usava a "arte do discurso" para ensinar seus discípulos através de diálogos em grupo, por exemplo. Com isso, não só os estudantes saem ganhando com a melhora de seus desempenhos acadêmico e social, mas também o professor aprende mais sobre seus alunos (FREIRE, 1974), pois observa como eles realizam o trabalho em equipe e como se saem nas atividades, e com isso ele pode adaptar as próximas aulas de modo a nivelá-las de acordo com a capacidade dos estudantes.

A partir disso, este capítulo tem o objetivo de realizar uma breve histórico acerca da aprendizagem cooperativo, bem como elucidar seus princípios e técnicas. Tais considerações foram relevantes a nossa pesquisa, uma vez que a metodologia de que nos valemos para desenvolvimento das atividades se ancora na Aprendizagem Cooperativa.

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO

A cooperação está presente desde o início da história humana, porque, se não fosse o trabalho em equipe, a humanidade não teria prosperado por muito tempo (Montagu, 1966). Até a década de 1960, de acordo com Gillies, Ashman e Terwel (2007), a Aprendizagem Cooperativa era desconhecida e amplamente ignorada pelos docentes porque, na época, o pensamento predominante era da competição baseada no individualismo, em que os estudantes eram ensinados a viver numa sociedade para se destacarem e então se sobressair em relação aos outros, dando a ideia de que todos os outros alunos são concorrentes. Entretanto, já havia pesquisas na primeira metade do século XX mostrando as vantagens de se trabalhar em grupo.

Como exemplo Marjorie E. Shaw fez um estudo, em 1932 (Gillies e Ashman, 2003), intitulado, em inglês, *A comparison of individuals and small groups in the rational solution of complex problems*[1]. O estudo foi realizado a partir da análise do desempenho de estudantes de uma turma universitária, quando estes resolveram quebra-cabeças que só tinham uma solução sozinhos e, posteriormente, em grupos. Dos quebra-cabeças corretos, os

[1] Tradução nossa: "Uma comparação de indivíduos e pequenos grupos na solução racional de problemas."

estudantes sozinhos foram capazes de resolver 7.9%, enquanto que, nos grupos, 53% conseguiram.

Para Gillies e Ashman (2003), houve um aumento significante dentro do estudo da Aprendizagem Cooperativa na segunda metade do século XX graças a dois movimentos dentro das Ciências Sociais: o reconhecimento da necessidade do estudo de que a formação de grupos afeta no desempenho das pessoas, e o desenvolvimento de mais pesquisas envolvendo metodologias de ciências comportamentais.

Os irmãos, também professores da Universidade de Minnesota, David W. Johnson, psicólogo social, e Roger T. Johnson, pesquisador educacional, fizeram estudos que levaram à Aprendizagem Cooperativa conhecida atualmente, reforçando o fato de que apenas formar grupos não garante que a metodologia será aplicada automaticamente (Johnson e Johnson, 1999).

2.2 ASPECTOS GERAIS

De acordo com Johnson e Johnson (1999), alguns grupos podem dificultar o aprendizado e, no pior dos casos, gerar atritos entre os estudantes. Portanto, é importante conhecer quais tipos de grupos podem ser formados e sua eficiência dentro da Aprendizagem Cooperativa ou não:

a) Grupo de pseudo aprendizagem: os estudantes que compõem esse tipo de grupos, apesar de juntos, não possuem interesse coletivo na atividade, porque pensam que serão avaliados individualmente. Consequentemente, não ajudam uns aos outros, seja escondendo informações, desconfiando, ignorando e confundindo o próximo;

b) Grupo tradicional de aprendizagem em sala de aula: nesse caso, os alunos têm consciência do trabalho equipe e assim o fazem. Por outro lado, as atividades ainda são feitas de modo a avaliar os membros individualmente. Dito isso, essa forma de avaliar faz o estudante adquirir um comportamento comumente visto em sala de aula. Apesar de buscar o que o colega sabe, não possuem a iniciativa de ajudar quem precisa. Outro comportamento danoso para a cooperatividade, como consequência da passividade dos estudantes, é de alunos que "se escoram" nos que fazem maior parte da atividade, desmotivando aqueles que estão mais dedicados, pois se sentem explorados;

c) Grupo de aprendizagem cooperativa: aqui os estudantes já trabalham em prol de um bem comum, de tal forma que os resultados sejam benéficos para todos. Eles encorajam seus colegas a se dedicar ao estudo, ajudam e são ajudados. Graças a isso, a evolução do grupo é significativamente maior do que se tivessem estudando sozinhos;
d) Grupo de aprendizagem cooperativa de alta performance: O último tipo de grupo descrito pelos autores é aquele que, além de fazer tudo que um grupo de aprendizagem cooperativa faz, supera todas as expectativas em relação o comprometimento de seus membros. Poucos conseguem tal nível de evolução.

Com essa classificação, vemos que apenas formar um grupo, não garante que ele vai funcionar de forma cooperativa. Portanto, é importante que o educador entenda como a Aprendizagem Cooperativa pode ser usada e os elementos principais que precisam ser trabalhados em cada atividade, a fim de que os discentes se sintam confortáveis em trabalhar em equipe, porque, como já foi visto, alguns têm resistência em trabalhar em equipe, seja na dificuldade de se comunicar com os outros, seja na falta de costume de fazer atividades ativamente, porque passaram a maior parte do tempo tendo o professor como uma espécie de mentor, que dá instruções diretas sobre o que e como deve ser estudado (Hansen e Stephens, 2000).

2.2.1 Pilares da Aprendizagem Cooperativa

Johnson e Johnson (1999) afirmam que, para um grupo ser cooperativo, os estudantes precisam praticar os seguintes conceitos:

a) Interdependência positiva: é considerada a qualidade mais importante para que a cooperação seja estimulada. Ela é praticada quando os participantes de uma célula de estudo criam uma relação de dependência entre eles para garantir o sucesso do próprio e dos outros, pois, se um estudante falhar, o grupo inteiro falha. Para isso, o professor precisa realizar atividades diferentes para cada membro do grupo, criando uma espécie de especialistas em uma parte específica do conteúdo;

b) Responsabilidade individual: ela reforça que, apesar dos estudantes trabalharem em grupo, cada estudante é responsável pela uma tarefa a qual lhe foi atribuída. Diante disso, o estudante percebe sua importância para o sucesso do grupo, com o professor avaliando a partir das tarefas individuais como a célula de estudo está se saindo como um todo. Firmiano (2011) diz que “o compromisso individual na aprendizagem é a chave para assegurar que todos os membros da célula saiam fortalecidos”;
c) Habilidades sociais: dentro da célula de estudo, elas são especiais para um bom relacionamento entre os estudantes, pois permitem que também aprendam a conviver com pessoas diferentes, respeitando suas diferenças e apoiando uns aos outros. Ninguém nasce com estas habilidades, então é necessário que esse elemento seja trabalhado para que os estudantes confiem uns nos outros, a fim de desenvolver um ambiente mais saudável para as aulas, promovendo a formação de indivíduos mais empáticos e respeitosos;
d) Interação promotora: como o nome sugere, os integrantes da célula estimulam uns aos outros para garantir que o desempenho da equipe não caia, seja por motivos de falta de motivação seja pelas dificuldades para entender a atividade, por exemplo. Com a prática desse elemento, os integrantes adquirem um apoio mais eficiente, a troca de informações, redução de ansiedade e estresse;
e) Processamento de grupo: aparece no fim da atividade como uma forma de *feedback* entre os integrantes, a fim de analisar como foi o processo de aprendizagem. Esse momento não pode ser deixado de lado, porque serve para refletir se a célula funcionou como deveria, respeitando as etapas da atividade e se todos os outros elementos foram aplicados corretamente, além de comemorar os pontos positivos e repensar sobre os problemas encontrados (Maset, 2002).

A partir desses pressupostos, Fiminiano (2011, p. 9) destaca, em conclusão, que:

> “Deste modo, os membros de uma célula cooperativa têm uma dupla responsabilidade: aprender o que o professor lhes ensina e procurar que todos os estudantes da célula aprendam o mesmo [...], de tal forma que sejam capazes de

> realizar sozinhos tarefas parecidas com aquelas que realizaram na célula, tanto a nível cognitivo como atitudinal."

Percebe-se, dessa maneira, que a aprendizagem cooperativa retira do ambiente escola a unilateralidade e a verticalidade na construção do conhecimento em busca de uma maior interação entre os estudantes, com vistas à formação de seres mais abertos ao pensamento de seus semelhantes e protagonistas de sua aprendizagem.

2.3 BREVE HISTÓRIA DA APRENDIZAGEM COOPERATIVA NO CEARÁ

No Ceará, a Aprendizagem Cooperativa é recente. Para compreender sua ascensão no estado, é necessário situarmo-nos em 1980, quando Manoel Andrade Neto, atual professor do Departamento de Química Orgânica e Inorgânica da Universidade Federal do Ceará (UFC), ingressou no curso de Química. Natural de Pentecoste e filho de agricultores, Neto foi alfabetizado em 1969 por uma vizinha, porque na época não tinha escolas em Cipó, comunidade localizada na zona rural do município. Posteriormente, mudou-se para a casa de sua avó ainda criança para ter melhores condições de estudo, porque não aspirava seguir o caminho dos demais moradores da região: a agricultura.

Durante o estudo na UFC, periodicamente retornava à sua cidade natal para ajudar e estimular outras pessoas que buscavam aprender, criando grupos de estudo e, mesmo que lentamente, atraindo mais pessoas. Ao que parece, a resistência dos moradores locais fez o avanço começar de forma lenta, porque eles não enxergavam propósito em estudar numa região que para eles tinha nada senão o trabalho na roça.

Em 1994, um grupo formado por seis homens e uma mulher decidiu se dedicar aos estudos na comunidade: Toinho, 22; Noberto, 20; Francisco, 18; Beto, 16; Orismar, 17; Raquel, 17 e Eudimar, 22. Eles ocuparam uma casa de fazer farinha abandonada para ser o local definitivo dos estudos. Depois disso, surgiu o Programa Educacional Coração de Estudante (PRECE[1]). Apenas Toinho havia concluído a educação básica através do supletivo, enquanto que os outros, segundo Neto (2016, p. 5):

> Noberto (20) estava fora da escola, Francisco (18) e Orismar (17) cursavam a 6ª série do ensino fundamental e os demais haviam apenas concluído o ensino fundamental pela escola regular local e não tinham como dar continuidade aos estudos na própria comunidade.

Então, o primeiro objetivo do grupo foi ajudar os demais para que eles também conseguissem terminar os estudos, para depois focar na aprovação no vestibular.

O primeiro resultado do grupo veio em 1996, quando Toinho foi aprovado em primeiro lugar no curso de Pedagogia da UFC. Com o tempo, "depois do Toinho veio o Francisco, e depois o Norberto, o Beto, o Adriano, e mais outros" (Neto, 2016). Depois que outras pessoas descobriram os resultados do grupo, mais pessoas apareceram da zona urbana de Pentecoste e das cidades vizinhas. Toinho tornou-se uma figura importante entre os estudantes, porque servia de exemplo para quem queria alcançar o mesmo objetivo. Assim como Andrade, Toinho e os outros aprovados também se dividiam entre Pentecoste e Fortaleza, a fim de ajudar os novos estudantes, como uma forma de retribuição por tudo que conseguiram. Atualmente, Toinho é mestre em Educação e professor da Rede Pública de Educação do Município de Fortaleza.

A partir de 2001, já estava na casa das dezenas o número tanto de aprovações no vestibular quanto no supletivo. Com muitas pessoas estudando, a casa de farinha começou a ficar pequena, levando os estudantes a formarem grupos que se encontravam sob árvores. Posteriormente, parcerias foram realizadas com escolas da região, que reconheceram todo o trabalho feito.

Todavia, os problemas presentes pesavam em alguns pontos. O transporte era difícil na região, devido a população na zona rural ser bastante dispersa, chegando a ser exaustivo para alguns. Consequentemente, muitos chegavam com a aprendizagem deficiente, e as famílias de baixa renda tinham dificuldades para custear a alimentação, por exemplo, que era por conta própria. Isso levou à desistência de muitos que queriam procurar mais oportunidades, além da vida sertaneja.

Mesmo usando o método do estudo em grupos, só conheceram a Aprendizagem Cooperativa em 2004, através de estudos dos irmãos Johnson. Desde então, a metodologia tornou-se a base para que os estudos dentro do projeto continuem. A descoberta foi muito importante porque a iniciativa, formada por pessoas autônomas, sem saber que faziam uso de uma metodologia que existe há bastante tempo e estudada em países diferentes, levou ao "aperfeiçoamento da experiência, promovendo maior eficiência e eficácia de suas ações, possibilitando a sistematização destas e sua reaplicação a tantas outras comunidades excluídas" (Neto, 2016, p. 14).

O aumento incomum de pessoas de Pentecoste e municípios adjacentes ingressando na UFC motivou esta Universidade a buscar a origem de tais aprovações. Quando descobriu o $PRECE_1$, a UFC transformou o que era uma iniciativa de vários amigos, com o objetivo de seguir uma realidade diferente daquela que predomina no sertão, em um projeto de extensão. Em 2009, a UFC criou a Coordenadoria de Formação e Aprendizagem Cooperativa (COFAC), a fim de criar grupos que usam a Aprendizagem Cooperativa dentro da UFC. A COFAC, em seguida, cria o Programa de Aprendizagem em Células Cooperativas Estudantis (PACCE), a fim de estimular os graduandos a estudar através da Aprendizagem Cooperativa, como uma forma de evitar a evasão acadêmica, problema que ocorre em todos os cursos.

A Aprendizagem Cooperativa também garantiu no programa experiências pioneiras, porque, em 2011, a partir de uma parceria com a Secretaria de Estado da Educação (SEDUC) e as Secretarias Municipais de Educação (SME), permitiu-se que a metodologia fosse aplicada dentro de uma Escola Estadual de Educação Profissional (EEEP) cearense graças à sua implantação no Projeto Político-Pedagógico da mesma. Nesse contexto, a EEEP Alan Pinho Tabosa, localizada em Pentecoste, tornou-se tanto a primeira escola do Ceará a aplicar e desenvolver a Aprendizagem Cooperativa, como a primeira escola do país a ter uma universidade como co-gestora. A UFC contribui para as novas experiências dentro da escola, graças aos universitários que têm a oportunidade de realizar estágios, atividades e projetos que contribuem para a evolução do aprendizado na escola..

Em 2015, funda-se a Escola Integrada de Desenvolvimento e Inovação Acadêmica (EIDEIA), que coordena o PACCE e o, agora, Programa de Estímulo à Cooperação na Escola ($PRECE_2$). Atualmente, o $PRECE_2$ atua em vários municípios do Ceará, junto ao vínculo com as secretarias estadual e municipal. Mais formalizado, o $PRECE_2$, tem o objetivo de, segundo Neto (2016, p. 18):

> […] Produzir excelência acadêmica com equidade, em que todos os seus estudantes sejam protagonistas autônomos, cooperativos, solidários, socialmente competentes e preparados para contribuírem com o estabelecimento e a manutenção de uma sociedade menos desigual, mais justa e democrática.

Por meio desse histórico, percebe-se que o Ceará apresenta uma relação já bem próxima com a metodologia de aprendizagem cooperativa, apesar de as ações de implementação ainda serem humildes e partirem, muitas vezes, de iniciativas individuais.

Interessa-nos, após fazer esse apanhado histórico, perceber como a escola se configura quando adota a aprendizagem cooperativa como fio condutor das atividades em sala de aula, discussão que empreendemos a seguir.

2.4 PAPEL DA ESCOLA NA APRENDIZAGEM COOPERATIVA

Para Gillies e Ashman (2003), há uma crescente procura por maneiras de ensinar, de tal forma que elas estimulem os estudantes a ter uma participação mais ativa nas aulas. Devido ao fato das vantagens da Aprendizagem Cooperativa serem conhecidas, muitas escolas optam por ela. Já foi visto que apenas a formação de grupos em sala de aula não garante, por si, que os alunos serão reciprocamente cooperativos. Sendo assim, é essencial que a escola adquira experiência, visto que muitos têm dificuldade para aplicá-la com sucesso, porque é uma maneira deveras diferente da forma tradicional como se concebe as atividades escolares.

2.4.1 O Professor e o Aluno

No geral, segundo Gillies e Boyle (2010), a dificuldade da maioria dos professores está na parte de que é uma metodologia distante da sua zona de conforto, pois o docente precisa adequar as atividades para a Aprendizagem Cooperativa, socializar com mais frequência com os estudantes, dedicar-se para cumprir cada etapa das aulas, e deixar-se levar pelo imediatismo. Essas questões fazem com que a Aprendizagem Cooperativa ainda seja difícil de ser aceita pelo docente, visto que exige mais esforço e tempo.

Toda aula, independente do nível escolar e da disciplina, pode ser realizada através da cooperatividade. Para Gillies, Ashman e Terwell (2007), o professor pode aplicar a cooperatividade a partir de três formas:

a) Aprendizagem Cooperativa Formal, que possui a mesma definição da metodologia, em que os estudantes trabalham juntos com o objetivo de atingir metas em comum. O professor precisa, portanto:
   - Dar instruções iniciais, mostrando para os estudantes os objetivos da aula; o que será ensinado; os papéis de cada membro do grupo; como os grupos serão formados e os materiais que serão usados;

- Explicar a tarefa instrucional e a estrutura cooperativa, destacando os critérios para avaliar o sucesso da equipe; as habilidades sociais que são recomendadas a serem praticadas durante a atividade e estimular a cooperatividade da classe;
- Observar o aprendizado dos estudantes e ajudar quando necessário, pois, quando o professor está a todo momento observando se todos estão fazendo a sua parte, estimula-se a responsabilidade e o comprometimento dos alunos;
- Avaliar o aprendizado e mediar o processamento de grupo, primeiramente encerrando a aula e, em seguida, fazendo a correção das atividades para depois estimular a reflexão dos estudantes sobre seus comportamentos durante a atividade;

b) Aprendizagem Cooperativa Informal, utilizada para focar a atenção dos estudantes em uma atividade em específico, seja uma palestra, filme, livro etc. Consequentemente, ela permite um estudo mais focado em um determinado conteúdo. O uso dessa modalidade de cooperação parte do momento em que o professor estimula:

- A Discussão Focada Introdutória, cujo objetivo dos estudos é dito e, com isso, os membros da equipe começam a conversar sobre o que sabem relacionado ao assunto e estabelecem suas expectativas;
- A Discussão Focada Intermitente, que ocorre durante as etapas da atividade, divididas a fim de propor um tempo que não sobrecarregue o estudante apenas em um dever em específico. Durante as discussões, os membros são aconselhados a usar a interação promotora através de perguntas entre eles;
- A Discussão Focada no Encerramento, propondo um fechamento para a atividade que estimule o processamento de grupo, por meio do qual os estudantes resumem o que aprenderam, também podendo ser usado como pontapé para o assunto das atividades que virão;

c) Grupos Cooperativos de Base, em que os membros são fixos e os encontros são regulares, ou seja, independente da atividade, as mesmas pessoas trabalharão juntas. Por conta disso, os membros se conhecem há mais tempo e conseguem fazer um trabalho com mais qualidade. No entanto, segundo

Johnson, Johnson e Holubec (1999), quando os membros não eram próximos antes do grupo ser formado, ao longo das atividades, pode-se criar um vínculo afetivo que não atrapalha o profissionalismo da equipe. Logo, para garantir esse sucesso, é necessário que o professor:

- Crie encontros que reforcem os encontros com frequência com objetivos gerais, fazendo com que os cinco princípios da Aprendizagem Cooperativa sejam usados e os grupos avaliem frequentemente como está a sua eficiência;

Para Gillies, Ashman e Terwell (2007) *apud.* Johnson e Johnson (1999), nada impede que o professor possa usar todas as três abordagens. Entretanto, é recomendado que o professor forme os grupos, porque, Johnson, Johnson e Holubec (1999) falam que, quando os alunos formam os grupos, geralmente escolhem os amigos mais próximos, não levando a atividade a seriedade que deveria.

Grupos onde os membros são parecidos em gostos pessoais, gênero e classe social, são chamados de grupos homogêneos, enquanto que os grupos heterogêneos são compostos por pessoas que praticamente não se conhecem. Devido a isso, o último tipo de grupo se dedica mais ao trabalho, porque não se distraem com facilidade e, portanto, alunos que têm dificuldade em realizar as atividades, beneficiam-se mais (Krüger, Parchmann e Schecker, 2018). Porém, os grupos heterogêneos são os que mais precisam do uso de habilidades sociais, visto que os membros podem se distanciar por conta de primeiras impressões negativas.

Em suma, Johnson, Johnson e Holubec (1999) aconselham que o professor pode pedir que os alunos escrevam em um papel o nome das pessoas com quem gostariam de estudar em grupo, respeitando as opiniões dos alunos na formação heterogênea das equipes, a fim de proporcionar uma experiência mais confortável. Diante disso, as atividades que o professor elabora têm o objetivo de que o aluno seja proativo, protagonista e ciente das suas responsabilidades dentro do grupo, a fim de que, segundo Firmiano (2011), o próprio gere resultados tanto para si, como para os colegas, através das funções que o professor designa para cada membro da equipe. É importante que as funções sejam rotativas, a fim de que cada membro conheça os diferentes papéis e fique familiarizado com os deveres dos colegas. Por outro lado, apesar do professor possuir essa flexibilidade para separar as funções, é importante que todas tenham sua relevância para a realização da atividade.

2.5 A técnica *jigsaw*

O método *jigsaw*, ou quebra cabeças, é uma técnica que tem como foco principal a redução de conflitos raciais entre os estudantes. Sua comparação com um quebra cabeças está na parte que cada estudante é essencial para o sucesso do grupo, assim como uma peça de quebra cabeça é importante para a conclusão do produto final.

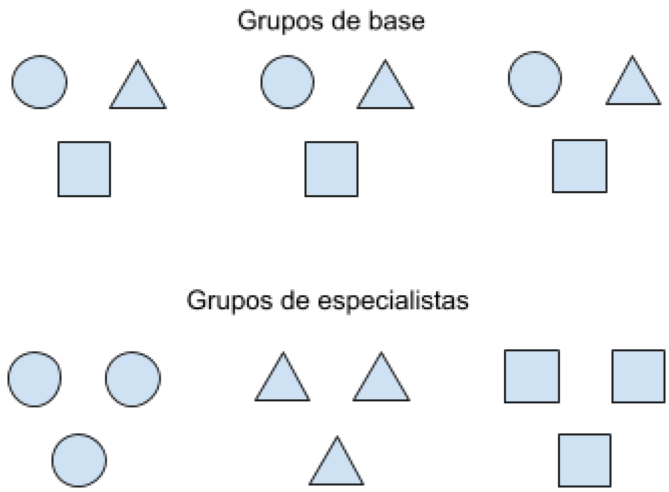
O método foi desenvolvido no início da década de 1970 por Elliot Aronson e seus alunos da Universidade do Texas e da Universidade da Califórnia, com o objetivo de reverter um problema que, durante a época, era predominante. Em Austin, capital do estado do Texas, as escolas começaram a unir alunos brancos, negros e latinos na mesma sala. Consequentemente, o preconceito era acentuado devido a realidade vigente: segregação racial intensa e a luta por direitos civis. Aronson e seus alunos concluíram que, a partir de pesquisas dentro das escolas, a hostilidade entre os estudantes criava uma sala de aula individualista e competitiva (COCHITO, 2004).

As etapas para a aplicação da técnica são:

a) O professor, inicialmente, forma os "grupos de base", podendo ser trios, quartetos ou quintetos. Após a formação, os membros criam o contrato de cooperação, para dividir funções e estabelecer regras para o bom andamento da atividade;
b) O grupo recebe o material de estudo, que é comum para todos, devendo esse material estar dividido em partes, em que cada uma delas será estudada por um estudante específico. Consequentemente, o número de partes existentes é proporcional à quantidade de membros. Porém, de início, o grupo de base estuda junto, permitindo que cada um faça um estudo individual;
c) Em seguida, os estudantes que possuem a mesma part, juntam-se no "grupo de especialistas", com o fito de discutir sobre o conteúdo em comum que possuem;
d) Depois dessa discussão, os estudantes voltam para o grupo de base, compartilham o que aprenderam no grupo de especialistas e, finalmente, realizam as atividades após o compartilhamento, que são geralmente mais

avançadas, pois é esperado que, após o retorno dos especialistas, os estudantes aprimorem seus conhecimentos.

Figura 1 - Ilustração dos tipos de grupos na técnica *jigsaw*.



Fonte: criado pelo autor.

Cochito (2004) recomenda que o professor também pode aumentar o rendimento da aula realizando uma exposição antes dos grupos começarem a estudar, e/ou fazer uma síntese de tudo que foi estudado durante a aula após a atividades grupais. Também após a aula, pode-se distribuir uma avaliação individual após o fechamento, que funciona como se fosse uma atividade de revisão que confere se o aluno conseguiu aprender os conteúdos de forma satisfatória.

2.6 O IDACI$^4_{mod}$

Aquele que possui o mais simples tato pedagógico sabe que ensinar vai além de mostrar os conteúdos em sala de aula. Sendo assim, é importante avaliar outras competências do estudante, porque, de acordo com Gardner (1993), o ser humano é dotado de vários tipos de inteligência. Por outro lado, o tradicionalismo predominante nas escolas apenas valoriza a inteligência lógico-matemática. Então, quando a teoria de múltiplas inteligências foi apresentada, dentro do mundo pedagógico, ela foi impactante. Todavia, esse assunto será discutido de forma aprofundada posteriormente.

Com o objetivo de avaliar não só o desempenho acadêmico, mas também a cooperação entre os integrantes do grupo, Cunha (2014) e Sousa (2015) desenvolveram, através de suas pesquisas de mestrado, realizadas na EEEP Alan Pinho Tabosa, o Índice de Desempenho Cooperativo Individual (IDACI). A sigla $IDACI^4_{mod}$ possui os índices superior, que representam que a avaliação é feita dentro de um ciclo de quatro aulas; e inferiores, que destacam o fato de ser uma modificação, porque "mod" vem de "modificado" do $IDACI^4$, fugindo este último do propósito deste trabalho.

O índice é feito a partir de três algarismos. A unidade e a dezena representam o desempenho acadêmico, enquanto que a centena faz referência ao desempenho cooperativo. Como exemplo, podemos ter índices na forma 354, 131, 024 etc. A construção dos valores é feita a partir de uma atividade de cinco questões ou itens. A partir da estudante fictícia Luíza, podemos analisar os valores da seguinte forma: ao longo das quatro aulas, ela teve o total de treze acertos. Por outro lado, dentro do $IDACI^4_{mod}$ existe o conceito da meta individual, que basicamente é o aluno conseguir acertar, no mínimo, três das cinco questões. Portanto, apenas na segunda avaliação a estudante conseguiu atingir a meta individual.

Outro conceito existente é a meta cooperativa, que está relacionado com a meta individual. A meta cooperativa é alcançada quando todos os estudantes da célula conseguem chegar na meta individual. Sendo assim, apenas na segunda avaliação os estudantes conseguiram chegar no objetivo.

Tabela 1: $IDACI^4_{mod}$ da estudante fictícia Luíza

Nome do estudante	Quantidade de itens corretos				Total de acertos
	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4	
	Avaliação 1	Avaliação 2	Avaliação 3	Avaliação 4	
Luíza	3	5	2	3	13
Colega 1	1	4	3	2	-
Colega 2	5	5	4	2	-
Bônus	0	100	0	0	100
$IDACI^4_{mod}$ absoluto					113

Fonte: elaborado pelo autor.

É perceptível que quanto maior a centena mais cooperativo é o grupo. Então, a seguinte classificação é feita:

Tabela 2: Níveis de desempenho cooperativo de acordo com o $IDACI^{4}_{mod}$

Nível de Desempenho Cooperativo (NDC)	Possibilidades de $IDACI^{4}_{mod}$ obtidos em sala de aula
Muito cooperativo	412-420
Cooperativo	309-320
Mediano cooperativo	206-220
Pouco cooperativo	103-120
Cooperativo insuficiente	0-20

Fonte: Cunha, 2014.

Apesar da classificação dos estudantes, o índice não tem o propósito de separar conforme a nota, mas sim de avaliar como estão se desenvolvendo os conceitos fundamentais da Aprendizagem Cooperativa (COCHITO, 2004).

2.6.1 O "$IDACI^{5}_{mod}$"

A mudança do índice superior é apenas uma pequena adaptação baseada no $IDACI^{4}_{mod}$, porque as avaliações deste trabalho foram feitas seguindo um período de cinco aulas. O motivo das aspas é porque o índice em questão não foi elaborado a partir de um estudo profundo, como o dos professores Cunha (2014) e Sousa (2015), pois a única mudança é da adição de mais uma aula, o que aponta a necessidade de adaptação da Tabela 2.

Tabela 3: Níveis de desempenho cooperativo de acordo com o “$IDACI^5_{mod}$”

Nível de Desempenho Cooperativo (NDC)	Possibilidades de “$IDACI^5_{mod}$” obtidos em sala de aula
Extremamente cooperativo	515-525
Muito cooperativo	412-425
Cooperativo	309-325
Mediano cooperativo	206-225
Pouco cooperativo	103-125
Cooperativo insuficiente	0-25

Fonte: elaborado pelo autor.

3 INTERDISCIPLINARIDADE

Aplicar a Física à realidade dos estudantes permite uma abordagem mais clara e atraente. Então, o conhecimento da interdisciplinaridade permite a criação de atividades por meio das quais os estudantes sintam prazer em aprender e, mais do que isso, percebam que os conhecimentos construídos na escola são aplicáveis à realidade.

3.1 Contexto

Para Japiassu (1976), as disciplinas dentro das aulas tradicionais costumam ter uma postura de “exclusividade”, como se fossem únicas, incomparáveis. Dessa forma, por mais que elas tenham sua importância para a formação acadêmica do estudante, essa divisão faz as aulas deficientes de uma abordagem que permita o estudante adquirir uma visão de mundo mais abrangente, pois, no momento em que ele consegue ter uma melhor percepção de sua realidade, também é capaz de interpretar melhor os acontecimentos.

A partir da necessidade de buscar novas maneiras de expandir a mente dos alunos, a interdisciplinaridade começa a crescer. No Brasil, os primeiros trabalhos apareceram na década de 1970 e, desde então, sua popularidade entre os educadores aumenta, chegando até aos PCN e às Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+).

Por outro lado, a interdisciplinaridade não está definida de forma clara nos PCN, nem existe, inclusive, uma orientação de como praticá-la na escola, porque os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) (1999, p. 12) “buscam dar significado ao conhecimento escolar mediante a contextualização, e evitar a compartimentalização, mediante a interdisciplinaridade.”. Segundo as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM+) (2002, p. 13), as disciplinas continuam sendo disciplinares, ou seja, distintas entre si. No entanto, o documento reforça que elas devem ser ensinadas com o intuito de formar uma “cultura geral e instrumento para a vida, ou seja, desenvolver, em conjunto, conhecimentos e competências”.

Diante dessa perspectiva, é positiva a aceitação da interdisciplinaridade por parte dos educadores que procuram aumentar a eficiência de suas aulas, mas ainda há uma parcela que a conhece apenas por nome, acha bonito seu propósito, porém não sabe como aplicar (LÜCK, 1995).

3.2 Definição

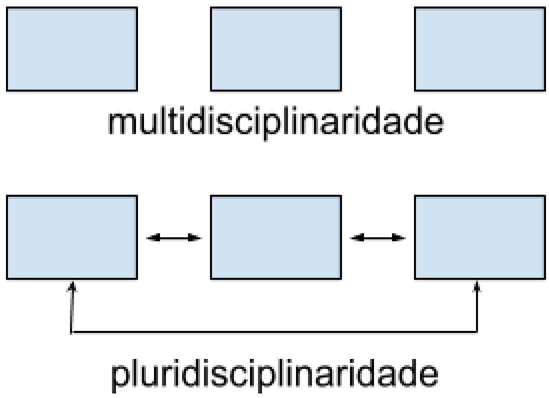
Antes da definição de interdisciplinaridade, convém esclarecer as diferenças entre disciplina, disciplinaridade, multidisciplinaridade, pluridisciplinaridade e transdisciplinaridade. Como o presente trabalho foca a interdisciplinaridade, será feito um breve resumo sobre as outras definições. Ao longo delas, há a reprodução de esquemas que representam cada base epistemológica, de acordo com Jantsch (*apud*. Japiassú, 1976).

3.2.1 Resumo da diferenças entre os termos

Japiassú (1976) diz que “disciplina” é a ciência propriamente dita, enquanto que a “disciplinaridade” diz respeito ao estudo especializado desta ciência. Então, cabe aos prefixos mostrar como que o estudo destas disciplinas é feito.

Tanto a multi- como a pluridisciplinaridade dão a ideia de junção das matérias, mas na primeira não há uma conexão entre elas, enquanto que na segunda há poucas relações. Ou seja, na multidisciplinaridade, as matérias são completamente desconexas, independentes, como normalmente é visto nas aulas tradicionais. Já na pluridisciplinaridade, temos uma pequena cooperação entre as disciplinas, embora ainda tenham objetivos diferentes entre elas.

Figura 2 - Representação da multi- e da pluridisciplinaridade



Fonte: elaborado pelo autor

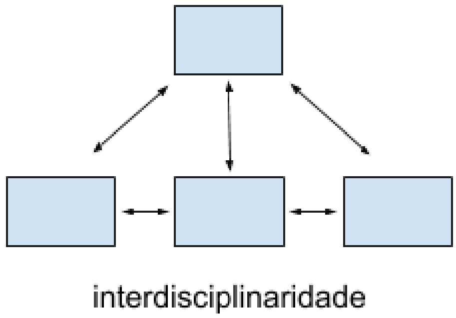
3.2.1.1 A interdisciplinaridade propriamente dita

Da multi-, passando pela pluri- até a inter-, temos um grau crescente de conexão entre as áreas. Portanto, resumidamente, na interdisciplinaridade, temos uma intensa troca de conexões, extinguindo as fronteiras disciplinares, sendo possível até criar outra disciplina a partir dessa junção (JAPIASSÚ, 1976). No entanto, como a interdisciplinaridade é a base epistemológica principal para esse trabalho, ela requer mais detalhes para a sua definição.

Fazenda (1994) parte para uma abordagem mais pragmática. Ela diz que para existir o inter-, é necessária a parceria entre professores. A autora defende que a interdisciplinaridade é um processo empírico a partir de uma relação de reciprocidade e interatividade, seja na criação de projetos ou de aulas conjuntas.

Continuando o raciocínio de Japiassú (1976), a reciprocidade entre as disciplinas contribui para que todas saiam ganhando, ou seja, sejam enriquecidas. Então, as atividades têm o objetivo principal de excluir as fronteiras entre as áreas que, inicialmente, foram feitas com o intuito de certificar que cada disciplina tenha seu estudo de modo específico e exclusivo.

Figura 3 - Representação da interdisciplinaridade



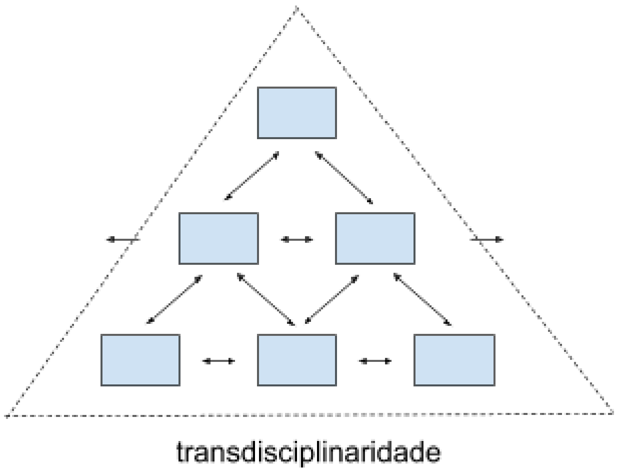
Fonte: elaborado pelo autor

3.2.1.2 Transdisciplinaridade?

Seguindo a ordem crescente de conexões, desde a multi- até a inter-, Piaget (*apud.* Japiassú, 1976) criou o termo transdisciplinaridade para se referir a uma base que não se contenta só em buscar relações entre as disciplinas, mas fala da existência de numerosas ligações entre elas dentro de um "sistema total", sem fronteiras.

Apesar dessa definição, a presença de um ponto de interrogação junto ao termo "transdisciplinaridade", no começo desta seção, é porque o próprio autor considera a transdisciplinaridade como algo utópico, porque estamos distantes de atingir este "sistema total".

Figura 4 - Representação da transdisciplinaridade



Fonte: elaborado pelo autor

3.3 Interdisciplinaridade no ensino de física

O aluno que tem facilidade na hora de estudar física, de acordo com o senso comum, não tem problemas na hora de lidar com números. Segundo Gardner (1993), essa característica está relacionada à inteligência lógico-matemática. Alguém que possui esse tipo de inteligência desenvolvido, além de lidar com números sem problemas, consegue resolver problemas dotados de certa complexidade, fragmentando-o em problemas menores e usando as respostas para encontrar a solução final.

Também é senso comum a afirmação de que Física é uma disciplina difícil e bastante rejeitada pelos alunos (HAZEN, 2006). Uma causa para isso é a deficiência desse tipo de inteligência nos estudantes, visto que é uma disciplina normalmente vista no ensino médio e, consequentemente, os alunos já começam a estudar Física deficientes nessa inteligência.

Como uma alternativa para reverter essa situação, o Ministério da Educação (MEC) aconselha que a Física seja ensinada através da interdisciplinaridade com o objetivo principal de "Articular, integrar e sistematizar fenômenos e teorias dentro de uma ciência, entre as várias ciências e áreas de conhecimento." (PCNEM+, 2002, p. 66). Para esse objetivo, recomenda-se que também sejam cumpridos os seguintes passos:

a) "Construir uma visão sistematizada dos diversos tipos de interação e das diferentes naturezas de fenômenos da física para poder fazer uso desse conhecimento de forma integrada e articulada." (PCNEM+, 2002, p. 66).
b) "Identificar e compreender os diversos níveis de explicação física, microscópicos ou macroscópicos, utilizando-os apropriadamente na compreensão de fenômenos." (PCNEM+, 2002, p. 66).
c) "Adquirir uma compreensão cósmica do Universo, das teorias relativas ao seu surgimento e sua evolução, assim como do surgimento da vida, de forma a poder situar a Terra, a vida e o ser humano em suas dimensões Modelos explicativos e representativos Relações entre conhecimentos disciplinares, interdisciplinares e interáreas Medidas, quantificações, grandezas e escalas." (PCNEM+, 2002, p. 66).

d) “Na utilização de um conceito ou unidade de grandeza, reconhecer ao mesmo tempo sua generalidade e o seu significado específico em cada ciência.” (PCNEM+, 2002, p. 67).
e) “Reconhecer, na análise de um mesmo fenômeno, as características de cada ciência, de maneira a adquirir uma visão mais articulada dos fenômenos.” (PCNEM+, 2002, p. 67).

Fazendo uso correto da interdisciplinaridade, outros tipos de inteligência também são desenvolvidos. Consequentemente, o estudante expande sua visão de mundo de uma forma mais intensa e até prazerosa, pois mostra uma física desconhecida por dentro de áreas que atraem os alunos (ROEDERER, 2002 *apud.* CAVALCANTE *et al.* 2012).

Uma das inteligências que pode ser beneficiada com o uso interdisciplinar das aulas de física é a inteligência musical. Gardner (1993) diz que esse perfil permite às pessoas a habilidade de diferenciar e processar sons de uma forma mais eficiente que a maioria. Consequentemente, quem possui uma grande inteligência musical consegue aprender a tocar instrumentos e a compor músicas sozinho.

Apesar do benefício que essa inteligência traz, o objetivo principal da pesquisa deste trabalho é levar uma abordagem diferente e envolvente às aulas de física para alunos que nunca tinham antes visto. Sendo assim, a música foi escolhida porque ela está presente na realidade de todos e, portanto, unindo seus elementos (compasso, ritmo, escala musical, a estrutura e o som dos instrumentos musicais) em aulas que vão desde o MHS até a Acústica, que são conteúdos carregados de uma matemática e lógica trabalhosos, pode-se ajudar a diminuir o estresse e a monotonia das aulas, além de evidenciar para os alunos a aplicação prática dessa teorização.

Diante dessa perspectiva, algumas conexões que foram feitas nas aulas, com base no conceito de interdisciplinaridade, são: o uso dos ritmos de gêneros musicais para reforçar a definição física de período e frequência e como as notas musicais são alteradas quando o instrumento é afinado.

4 FÍSICA NA MÚSICA

A organização das aulas foi feita com o objetivo de o estudante aprender, com o auxílio da música e da teoria musical, os conceitos iniciais de oscilação, partindo para uma descrição mais detalhada do Movimento Harmônico simples (MHS), finalizando com uma ilustração do que é o som e como ele se comporta.

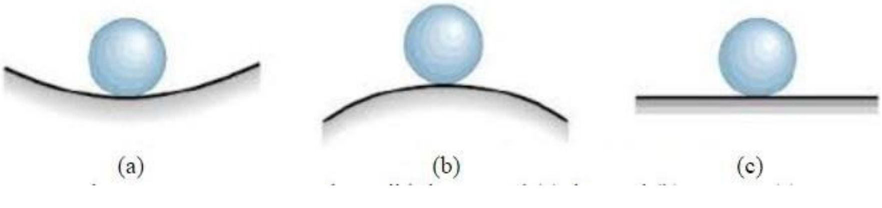
4.1 MHS Parte 1

4.1.1 Movimento e oscilação

Antes de iniciar o estudo sobre o MHS, é necessário descrever como é possível identificar um movimento que produz algum tipo de repetição. Dito isso, a primeira aula foi dedicada ao estudo do movimento periódico, no qual um objeto sempre percorre o mesmo trajeto e repete as mesmas características de movimento em intervalos de tempo iguais. O movimento oscilatório ou vibratório é um caso específico de movimento periódico, porque ele alterna o sentido da trajetória periodicamente em relação a uma posição de equilíbrio (HENRIQUE, 2002). Um exemplo de movimento periódico são as pás de um ventilador girando em relação ao seu eixo, enquanto que o movimento oscilatório pode ser reproduzido por uma palheta de clarinete.

Sobre a posição de equilíbrio, é importante saber os diferentes tipos que existem: estável, instável e neutro (ou indiferente). De acordo com Henrique (2002), o equilíbrio estável é aquele que, se o corpo for perturbado para sair da posição de equilíbrio, ele retornará para a posição inicial através de uma força de restituição. No equilíbrio instável, uma mínima perturbação faz o corpo se afastar da posição de equilíbrio e não retornará para sua posição inicial. Por fim, no equilíbrio neutro, qualquer que seja a perturbação fará ele se afastar da posição de equilíbrio, mas ele não retornará nem se afastará da posição inicial se for abandonado.

Figura 5 - Representação de equilíbrios estável (a), instável (b) e neutro (c).



Fonte: http://www.madeira.ufpr.br/dvissotto/resmatII/Flambagem.pdf.

Portanto, para um movimento oscilatório é necessário que exista uma posição de equilíbrio estável. Exemplos dentro da música são os instrumentos de corda. Para produzir uma nota, o músico tensiona a corda e logo depois a libera. Graças a essa ação, a corda ficará vibrando até que volte a sua posição de equilíbrio.

4.1.2 Frequência, período e amplitude

Vibrações realizadas por movimentos oscilatórios dependem de uma força restauradora para retornar ao equilíbrio, obedecendo à lei de Hooke:

$$F = -kx \qquad (1)$$

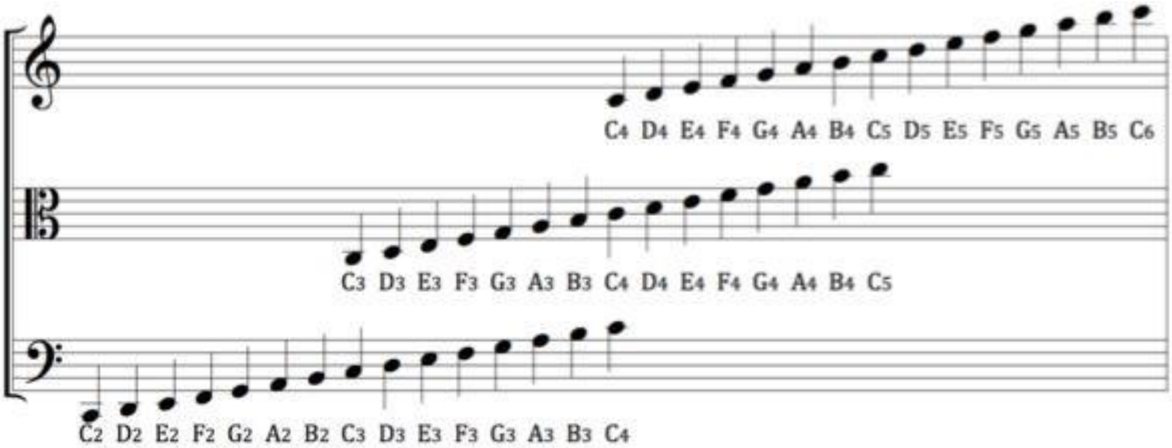
A força restauradora da maioria desses corpos depende de como o corpo estica e contrai por conta de seu material (que está relacionado com a constante elástica *k*). Pelo fato de o movimento se repetir regularmente, é necessário conhecer quantas vezes essas repetições acontecem, o que ocorre através da frequência.

A frequência *f* é uma grandeza fundamental nos movimentos periódicos, pois ela nos diz quantas vezes a oscilação ocorre durante um intervalo de tempo definido (YOUNG, FREEDMAN, 2003). Em outras palavras, ela diz quantas vezes um evento é repetido durante um certo tempo, ou seja, ela não se aplica só na física. Sua unidade no Sistema Internacional (SI) é medida como ciclo por segundo (ou ciclo/s). Visto que ciclo é uma grandeza adimensional (sem dimensão), a unidade de frequência é o Hertz:

$$f = \frac{ciclo}{tempo} = \frac{[1]}{[s]} = [s]^{-1} = Hz \qquad (2)$$

Dizer que, por exemplo, uma corda de guitarra vibra a 440 Hz significa que ela vibra 440 vezes por segundo. Outra informação que a frequência nos oferece é qual a nota musical que está sendo tocada. No caso 440 Hz é correspondente à nota *lá 4* (um lá na quarta oitava). A necessidade de organizar as notas musicais e suas características dentro da música levou o homem a inventar a partitura e, com a grande variedade de notas musicais existentes, elas são separadas por claves. Então, dependendo do instrumento, uma clave é mais apropriada para ele.

Figura 6 - Posição das notas em cada clave. As claves de cima para baixo são: *sol*, para notas mais agudas; *dó* para notas médias (em desuso) e *fá*, para notas mais graves.



Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Clef.

As notas que aparecem na figura acima estão representadas na forma de cifra, bastante útil para quem toca violão, por exemplo. Respectivamente, as notas *dó, ré, mi, fá, sol, lá* e *si* são representadas por C, D, E, F, G, A e B. No entanto, na sequenciação das aulas, o conceito de frequência não foi abordado a partir das notas porque o som ainda seria estudado posteriormente. Sendo assim, a abordagem utilizada foi o andamento musical, cuja unidade mais usual é o batimento por minuto (bpm), que informa a frequência de variação das notas através de pulsos, que podem ser realizados por um metrônomo ou pelo movimento das mãos de um maestro durante um concerto. Ou seja, ele serve para ditar o ritmo da música que está sendo tocada. Cada gênero musical costuma ter um andamento diferente: a bossa nova costuma ser tocada em 60, o samba em 100 bpm e o *funk* entre 120 e 150 bpm. Em suma, maior a frequência de batimento, mais rápida é a música.

O período T é a grandeza referente ao tempo necessário para a repetição de um ciclo (YOUNG, FREEDMAN, 2003). A relação com a frequência é simples: o período é o inverso da frequência e vice-versa. Portanto, se soubermos uma grandeza, automaticamente saberemos a outra através da relação:

$$f T = 1 \tag{3}$$

Ainda dentro da partitura musical, o período aparece na maneira de representar o tempo das notas (e pausas) a serem tocadas. Nesse caso, é de extrema importância que o músico saiba qual é o andamento vigente. Outra aparição está no compasso, definindo a unidade de tempo, do pulso e do ritmo da composição ou de partes dela. O número superior indica o número de batimentos que formam um compasso, já o inferior mostra em quantas vezes uma nota semibreve pode ser dividida sem que o compasso seja desfeito.

Figura 7 - Tempo das notas e das pausas em uma partitura.

Nome	Figuras de Som	Figuras de Silêncio	Duração
Semibreve	𝅝	𝄻	4 tempos
Mínima	𝅗𝅥	𝄼	2 tempos
Semínima	𝅘𝅥	𝄽	1 tempo
Colcheia	𝅘𝅥𝅮	𝄾	½ tempo
Semicolcheia	𝅘𝅥𝅯	𝄿	¼ tempo
Fusa	𝅘𝅥𝅰	𝅀	⅛ tempo
Semifusa	𝅘𝅥𝅱	𝅁	1/16 tempo

Fonte: http://knoow.net/arteseletras/musica/ritmo/.

Figura 8 - Exemplos de compassos.

Fonte: https://es.wikipedia.org/wiki/Comp%C3%A1s_(m%C3%Basica).

Durante a execução de um movimento oscilatório, a elasticidade do material é um fator importante a se considerar, e a amplitude, a última grandeza desta subseção, está diretamente relacionada a isso. Quando alguém toca um instrumento de corda, aplica-se uma força para fazê-la vibrar, a qual, por seu turno, faz a corda se deformar para longe do seu ponto de equilíbrio, cuja intensidade é proporcional à distância que a corda está longe da sua posição de repouso, ou seja, do equilíbrio. Portanto, a amplitude A é o deslocamento máximo do movimento oscilatório (YOUNG, FREEDMAN, 2003). Retornando à equação (1), concluímos:

$$F_{máx} = -kA \tag{4}$$

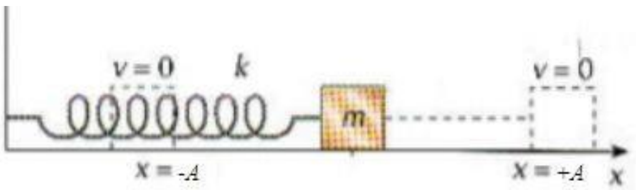
4.1.3 Osciladores simples

Os osciladores simples podem representar movimentos simplificados de muitas coisas. Entre elas, de alguns instrumentos musicais. Entretanto, nesse momento, o objetivo será entender os sistemas por eles mesmos. Os osciladores estudados são o sistema massa/mola e o pêndulo simples, constantemente utilizados no início do estudo de movimentos oscilatórios, porque mostram, sem muita complexidade, as propriedades desse tipo de movimento.

O sistema massa/mola é composto de um corpo de massa *m* preso na extremidade livre de uma mola helicoidal de constante elástica *k* (HENRIQUE, 2002). Desconsiderando forças dissipativas, quando aplicamos uma força externa *F*, a partícula fica oscilando com período e frequência bem definidos.

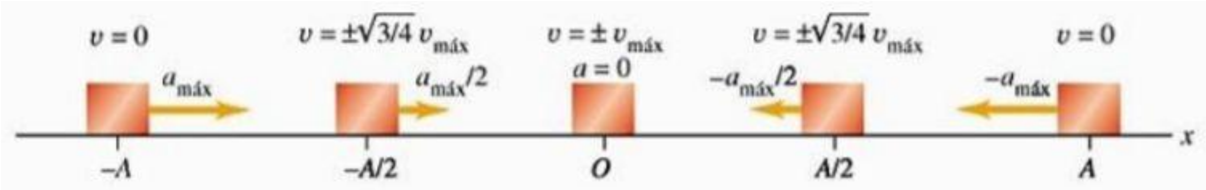
É possível observar, nos extremos do movimento, que a deformação tem o valor da amplitude *A*. Após chegar na extremidade, o sentido do movimento muda, portanto, na amplitude do movimento, a velocidade é zero. Por outro lado, se a velocidade é nula nas extremidades, ela será máxima no centro da trajetória, porque, como a força restauradora é máxima na amplitude, ela empurrará/puxará o bloco com tudo até a posição de equilíbrio, cuja força restauradora é zero.

Figura 9 - Um sistema massa/mola.



Fonte: JÚNIOR, FERRARO, SOARES, 2007, p.381.

Figura 10 - Variações de velocidade, aceleração e amplitude no sistema massa/mola.



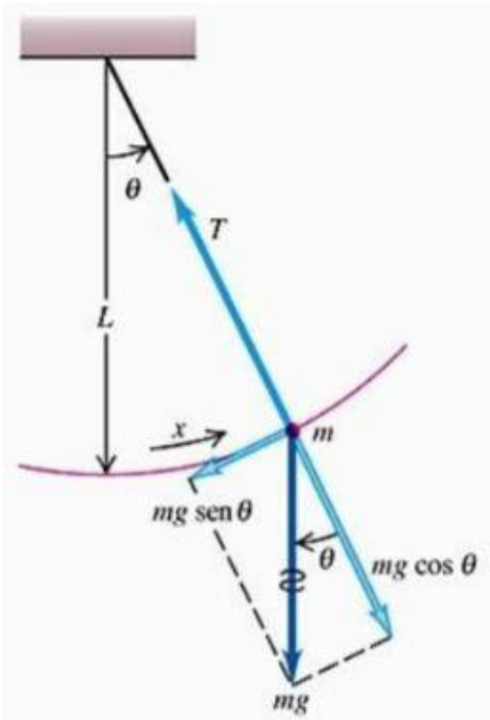
Fonte: YOUNG, FREEDMAN, 2003, p. 43.

Com essas mudanças de velocidade, há a presença de uma aceleração. A partir da segunda Lei de Newton, podemos reforçar que, se a aceleração é máxima nas pontas, a força também será:

$$F = ma \tag{5}$$

Como pode a aceleração ser máxima, mas a velocidade ser nula e vice-versa? Quando a velocidade é máxima no centro, a mola já deformou tudo o que tinha de deformar. Desse modo, quando o bloco passa pelo centro, não há mais força para ser aplicada — consequentemente, o bloco não acelera —, ficando sua velocidade constante por um mínimo período de tempo, até que ele ultrapasse o centro e volte a ser puxado pela mola, com o fito de reduzir sua velocidade até a outra extremidade - e o ciclo se repete (YOUNG, FREEDMAN, 2003).

Figura 11 - Um pêndulo simples destacando suas principais grandezas



Fonte: YOUNG, FREEDMAN, 2003, p. 49.

Conforme Young e Freedman (2003), o pêndulo simples é um corpo puntiforme preso a um fio ideal. Assim como o sistema massa/mola, no pêndulo simples, o objeto também oscila em torno da posição de equilíbrio, mas a trajetória do pêndulo é um arco de circunferência de raio L. Sendo assim, o caminho que o corpo percorre possui comprimento:

$$x = L\theta \tag{6}$$

A força restauradora no pêndulo é a própria força gravitacional. Mas, como a trajetória é ao longo de *x*, onde a direção positiva é anti-horária, a força restauradora nessa direção será a componente *x* de *mg*. O sinal negativo é porque o vetor F_x aponta na direção oposta ao sentido positivo de *x*:

$$F_x = -mg\, sen\theta \tag{7}$$

Por mais que o pêndulo represente um movimento oscilatório, ele não necessariamente será um movimento harmônico, porque a força não é proporcional ao ângulo em si, mas ao seno dele. Com essa informação, é possível definir o que é um movimento harmônico: para Young e Freedman (2003), o MHS é um tipo especial de movimento periódico, no qual a força restauradora é proporcional, porém de sentido oposto ao deslocamento. Em suma, o MHS é a forma mais simples de um movimento periódico. Para um movimento ser harmônico, é necessário saber que, quando um ângulo é muito pequeno,

$$sen\theta = \theta \tag{8}$$

Modificando a equação (7) com o auxílio das equações (6) e (8), tem-se o que se evidencia em (9):

$$\begin{aligned} F_x &= -mg\, sen\theta \\ F_x &= -mg\,\theta \\ F_x &= -mg\frac{x}{L} \end{aligned} \tag{9}$$

Comparando com a equação (1), tem-se:

$$k = \frac{mg}{L} \tag{10}$$

As últimas informações que faltam são a frequência e o período para esses sistemas em especial. Para a frequência nesses sistemas, é importante conhecer a *frequência angular ω*:

$$\omega = 2\pi f \tag{11}$$

Enquanto que f diz respeito ao número de ciclos por segundo, ω informa a quantidades de ângulos (em radianos) por segundo referente ao ciclo analisado. Todavia, se não tivermos f para ajudar a encontrar ω, também podemos definir a frequência angular a partir dos elementos que compõem os dois sistemas:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{12}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \tag{13}$$

O período de oscilação para esses sistemas unindo as equações (3) e (11) é:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \tag{14}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \tag{15}$$

Substituindo ω na equação (14), o período de oscilação para o sistema massa/mola e o pêndulo simples são, respectivamente:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{16}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \tag{17}$$

4.2 MHS: Parte 2 e Ondas: Parte 1

4.2.1 Energia e grandezas cinemáticas do MHS

Um corpo possui energia cinética E_C e potencial E_P. Sua energia total E é uma soma de valor constante delas (NUSSENZVEIG, 2002). No mundo ideal, os valores dessas energias se transformam, de tal forma que a energia total permanece constante. É importante observar qual o oscilador analisado, porque, no sistema massa/mola, a energia potencial é a elástica, enquanto que, no pêndulo simples, há a presença da energia potencial gravitacional, em que x é a distância horizontal e h é a distância vertical do objeto em relação à origem:

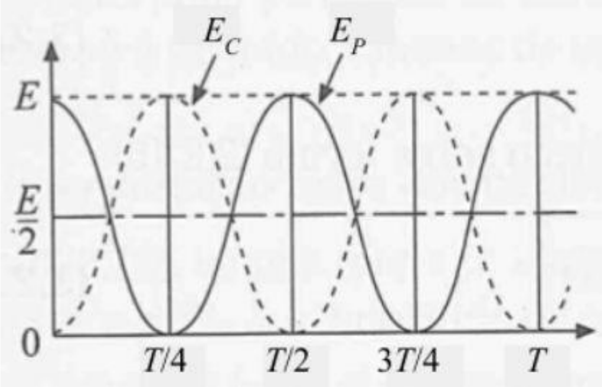
$$E = E_C + E_P \tag{17}$$

$$E_C = \tfrac{1}{2}mv^2 \tag{18}$$

$$E_{Pel} = \tfrac{1}{2}kx^2 \tag{19}$$

$$E_{Pgr} = mgh \tag{20}$$

Figura 12 - Relação entre as energias cinética e potencial



Fonte: NUSSENZVEIG, 2002, p. 46.

Nos momentos em que o objeto está passando pela origem, a energia total é puramente cinética, enquanto que, nas extremidades do movimento, ela é puramente potencial. Isso acontece devido aos valores de velocidade e aceleração que o objeto possui enquanto realiza o movimento. Como no centro a aceleração é nula, não temos força atuante naquele instante de tempo. Assim, não há energia potencial naquele momento, mas a presença de uma velocidade exige a existência de energia cinética. Analogamente, nos extremos não temos velocidade, mas temos uma aceleração máxima, então vale o fato de o objeto não ter energia cinética, mas possuir energia potencial.

O próximo objetivo é encontrar a posição, velocidade e aceleração do objeto que oscila, a fim de determinar as energias de forma mais prática. Através da união e desenvolvimento das equações (1) e (5), reforçamos a definição de MHS: a força resultante que atua no objeto é proporcional ao deslocamento e de direção oposta. O resultado fornece a descrição matemática de um oscilador harmônico (TAYLOR, 2005):

$$ma = -kx \tag{21}$$

$$a + \frac{k}{m}x = 0$$

$$a + \omega^2 x = 0 \tag{22}$$

A partir disso, é possível determinar as grandezas cinemáticas do MHS:

$$x(t) = A\,cos(\omega t + \varphi) \tag{23}$$

$$v(t) = -\,\omega A\,sen(\omega t + \varphi) \tag{24}$$

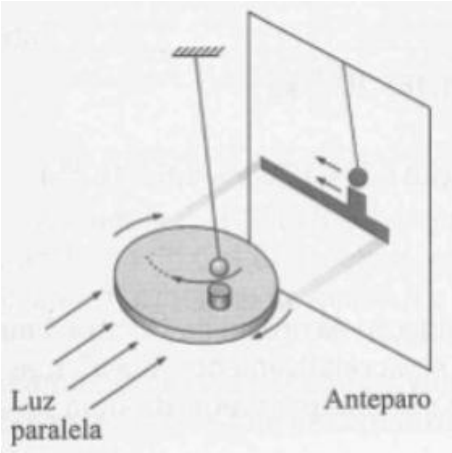
$$a(t) = -\,\omega^2 A\,cos(\omega t + \varphi) \tag{25}$$

Nas equações (23), (24) e (25), há a presença de ângulos que variam à medida que o tempo passa. Consequentemente, *x*, *v* e *a* também mudam com o tempo.

4.2.2 Relação entre Movimento Harmônico Simples e Movimento Circular Uniforme.

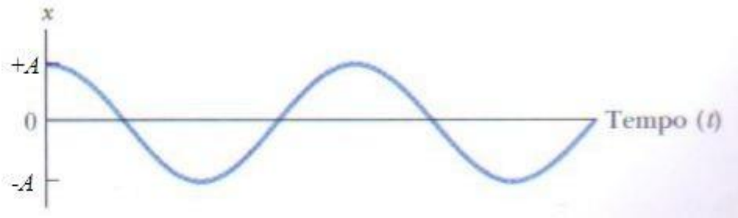
A percepção de que o MHS pode ser uma projeção de um Movimento Circular Uniforme (MCU) está na figura abaixo. Ao tirar fotos da sombra e depois posicionando cada uma em sequência, o movimento é semelhante a uma senoide (HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2009).

Figura 13 - Relação entre os movimentos.



Fonte: NUSSENZVEIG, 2005, p.56

Figura 14 - Gráfico da posição da sombra em função do tempo.



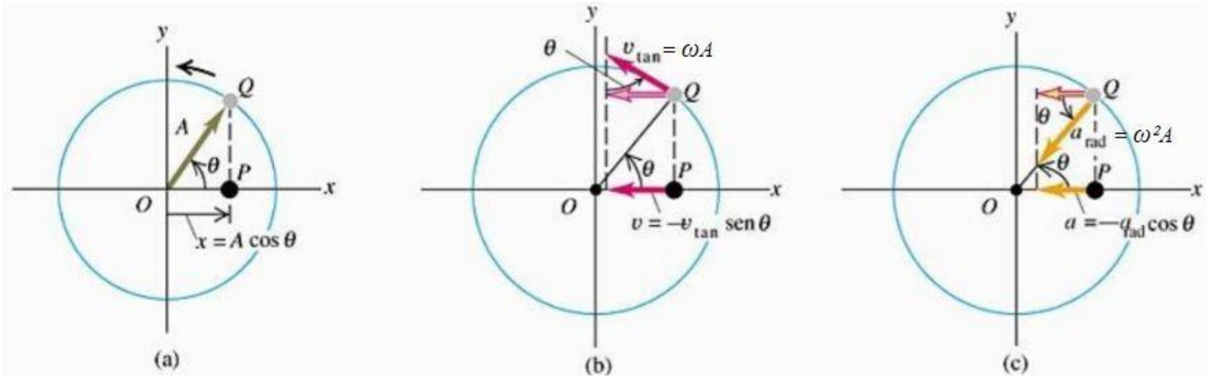
Fonte: HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2009, p. 87

O destaque para os ângulos é evidente a partir da análise vetorial dos movimentos. Na figura abaixo, conforme Young e Freedman (2003), está sendo usado $\theta = \omega t + \varphi$ para simplificação. O ponto *Q* mostra o movimento em MCU, e o ponto *P* é a projeção em MHS.

No MCU, v_{tan} e a_{rad} representam, respectivamente, a velocidade tangencial e a aceleração radial (ou centrípeta), enquanto que *v* e *a* são as projeções desses vetores no eixo *x*, que representam a velocidade e a aceleração dentro do MHS. Como a projeção está intimamente relacionada com o ângulo θ, é importante aprender o que significa cada termo:

a) φ é a chamada *fase inicial*, que informa onde o movimento começa. Ou seja, no instante t = 0, $\theta = \varphi$. Assim, por meio disso, é possível ver se o movimento começa no centro, nas extremidades ou em algum ponto intermediário;
b) ωt informa a variação do ângulo à medida que o tempo passa. Quanto maior ω, mais rápido será o ciclo. Somado com a fase inicial, é possível identificar a quantidade de ângulos percorrida pelo objeto.

Figura 15 - Vetores das grandezas que compõem as equações (23), (24) e (25).



Fonte: YOUNG, FREEDMAN, 2003, p. 37.

Possuindo as expressões para essas três grandezas, podemos encontrar as energias cinética, potencial e total em função delas:

$$E_C = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2\, sen^2(\omega t + \varphi) \tag{26}$$

$$E_P = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \tag{27}$$

$$E = E_C + E_P = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2} kA^2 \tag{28}$$

Figura 16 - Movimento da corda de um violino consequente da alternância das energias cinética e potencial.

Fonte: http://picshype.com/strings-on-a-violin/strings-on-a-violin/134412

Graças à compreensão da energia presente em uma oscilação, fica fácil de ser visualizado que, quando um instrumento de corda é tocado, por exemplo, a dependência direta de E com a amplitude informa que um aumento no deslocamento máximo faz a corda vibrar com mais intensidade. Portanto, ela vibra por mais tempo e o som gerado por ela é mais forte.

4.2.3 O que é uma onda?

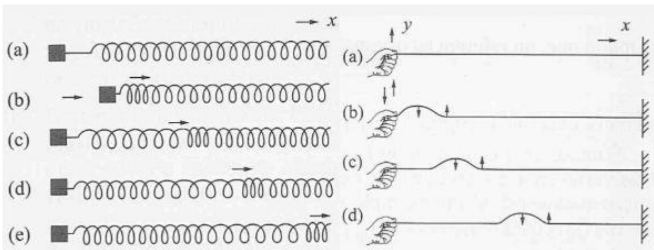
A onda é um conceito muito importante dentro da Física. Seu campo de estudo é a Ondulatória. Ela está presente nas nossas vidas de várias formas e, obviamente, dentro da indústria musical, ela é dominante. Isso é visível devido à quantidade de instrumentos musicais e de vozes existentes que podem compor uma música, além de várias técnicas criadas para que ela seja agradável ao público, seja na edição dentro de um estúdio de gravação seja na construção de espaços com acústica apropriada para apresentações sem perda de som. Outras áreas como a Óptica, a Astronomia e a Física Nuclear também estudam.

Uma onda é uma perturbação que propaga energia, porém não propaga matéria. Ela se propaga em vários sentidos, de várias formas, através de vários meios. A forma pela qual uma onda se propaga vai depender de sua natureza, ou seja, como ela é gerada, bem como de seu tipo, que diz respeito a como sua vibração é propagada.

A natureza de uma onda pode ser mecânica, na qual sua criação e propagação ocorre num meio material; ou eletromagnética, quando fontes de energia elétrica e magnética são liberadas em conjunto. Exemplos de ondas mecânicas são o som, ondas do mar e ondas sísmicas; as eletromagnéticas são a luz, raios-x e microondas.

Os tipos de ondas se diferenciam entre longitudinal, quando a onda vibra no mesmo sentido da propagação, e transversal, quando ela vibra perpendicularmente à propagação. Apesar dessas diferenças, qualquer onda, como, aliás, qualquer movimento oscilatório, pode ser representada à maneira de uma onda transversal, porque esta é uma maneira mais simples de mostrar tudo de fundamental que uma onda possui.

Figura 17 - Na esquerda e na direita, respectivamente, uma onda de propagação longitudinal e transversal.



Fonte: NUSSENZVEIG, 2005, p. 98 e 99.

4.3 Ondas: Parte 2 e Interferência

4.3.1 Velocidade de propagação de um pulso transversal

Segundo Henrique (2002), a velocidade *v* de uma onda em um determinado meio pode ser expressa a partir da generalização:

$$v = \sqrt{\frac{coeficiente\ de\ elasticidade\ do\ meio}{coeficiente\ de\ inércia\ do\ meio}} \tag{29}$$

Um meio qualquer é composto por átomos e, em geral, dependendo de seu formato e elementos químicos, elas estão unidas e organizadas com uma certa intensidade. Então, o coeficiente de elasticidade do meio é a facilidade desse pulso ser transferido de um átomo para outro, enquanto que o coeficiente de inércia é a quantidade de átomos do meio.

As velocidades de um pulso para cada estado físico estão logo a seguir. Para o ensino médio, elas são relativamentes avançadas, visto que há grandezas que não são estudadas. Consequentemente, em nossas aulas, elas foram apresentadas como curiosidade e alternativa de simples compreensão sobre a propagação de ondas:

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{d}} \tag{30}$$

$$v_l = \sqrt{\frac{B}{d}} \tag{31}$$

$$v_g = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \tag{32}$$

Tanto nos sólidos como nos líquidos, a velocidade vai depender da densidade *d* do material, uma grandeza conhecida. Por outro lado, nos sólidos, há o módulo de Young *E*, que representa a rigidez do material, e o módulo de compressibilidade volumétrico *B*, porque, na realidade, um líquido pode ser comprimido, mas ele precisa estar sujeito a uma força extrema para isso.

Nos gases há conceitos que são estudados no ensino médio como *R*, *T* e *M*, que são, respectivamente, a constante universal dos gases, a temperatura (em Kelvin) e a massa molecular. A novidade está no coeficiente de expansão adiabática γ, referente à relação entre a capacidade térmica do gás quando submetida à pressão e a volume constantes. Isso é importante de se levar em conta devido à facilidade de expandir ou comprimir um gás, pois sua velocidade será diferente se o mesmo gás estiver expandido ou comprimido.

Dentro do nível médio, convém calcular a velocidade a partir da equação (29), a partir da seguinte situação: ao balançar uma corda de tal forma a criar uma onda transversal que se propaga ao longo de seu comprimento, se quisermos saber a forma da equação, é necessário analisar como os coeficientes se encaixam nela.

Quanto mais forte a corda está tensionada, ou até mesmo se balançarmos mais forte, o pulso sairá mais rápido. Outro fator é que essa velocidade também vai depender se a corda é pesada ou leve. A elasticidade depende justamente da tensão feita para manter a corda flexível para gerar o pulso. Já a inércia vai depender da massa, mas não dela literalmente, pois há um conceito chamado densidade linear, que é a relação entre a massa de um objeto e seu comprimento. Ela é análoga à densidade *d,* a diferença está no fato de μ ser uma densidade unidimensional, enquanto que *d* é em corpos tridimensionais. Portanto, a velocidade *v* de um pulso ao longo da corda é:

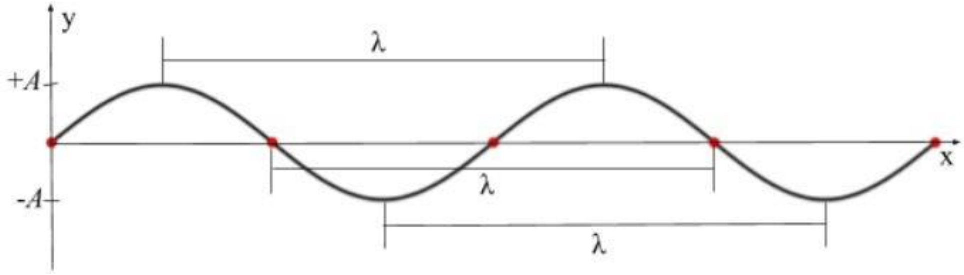
$$\mu = \frac{m}{L}\,. \tag{33}$$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \tag{34}$$

4.3.2 Elementos de uma onda periódica

É redundante falar “onda periódica”, porque a própria onda é uma consequência de um movimento periódico. Dentre os elementos fundamentais de uma onda, alguns já foram estudados, como a amplitude, o período e a frequência. Através de um gráfico, fica fácil de identificar cada uma dessas grandezas. Um conceito novo é o comprimento de onda, representado pela letra grega λ. Ele nos diz qual é o comprimento, paralelo ao sentido de propagação, de dois pontos repetidos.

Figura 18 - Uma onda periódica.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Onda#/media/File:Standing_wave.gif

Para identificar o comprimento de onda, é preciso saber que ele é formado por cristas, vales e nós. As cristas são os locais em que a amplitude é máxima; o vale é o oposto da crista; e os nós são os locais da onda em que o deslocamento é nulo. Também é possível chamar a região das cristas e vales de ventres. Portanto, o comprimento de onda é definido pela distância entre duas cristas, dois vales, ou três nós.

Outra grandeza importante é o número de onda, representado pela letra *k*, que simplesmente nos diz a quantidade de comprimentos de onda por unidade de distância, sendo sua unidade o radiano (rad) ou m^{-1}:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{35}$$

Também podemos achar a velocidade de uma onda a partir da velocidade escalar:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \tag{36}$$

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{\lambda}{2\pi} = \lambda f \tag{37}$$

4.3.3 Interferência de ondas

Como é de se esperar, há vários tipos de ondas e, frequentemente, elas interagem umas com as outras. Para entender a ocorrência da interferência, é preciso conhecer o princípio da superposição: quando duas ou mais ondas se “chocam”, elas se unem, seja somando ou subtraindo. Consequentemente, a onda resultante será a soma das ondas separadas:

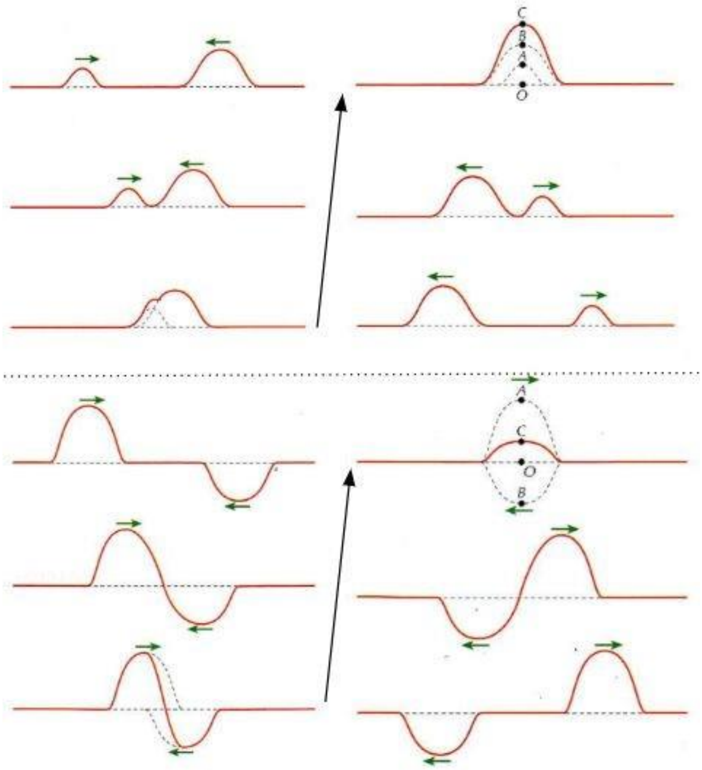
$$y'(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) + ... + y_n(x, t) \tag{38}$$

Na equação, *y'*(*x*,*t*) representa a amplitude resultante ao longo da superposição, enquanto que o termo da direita representa as ondas que serão unidas para formá-la. A parte que pode ser confusa para a maioria das pessoas é que há duas variáveis: *x* e *t*. Isso significa que, de uma forma geral, a amplitude resultante muda tanto ao longo de sua trajetória, como durante o passar do tempo.

Outro conceito importante é o princípio da independência das ondas, porque, apesar de as ondas se unirem, após a "colisão", elas continuam o mesmo trajeto inicial, como se nada tivesse acontecido.

A interferência propriamente dita ocorre de duas formas: construtiva e destrutiva. A diferença entre elas é simples: na interferência construtiva, a interação das ondas provoca a soma destas; enquanto que, na destrutiva, provoca a subtração.

Figura 19 - Ilustração dos princípios da superposição; independência e das interferências construtiva e destrutiva.



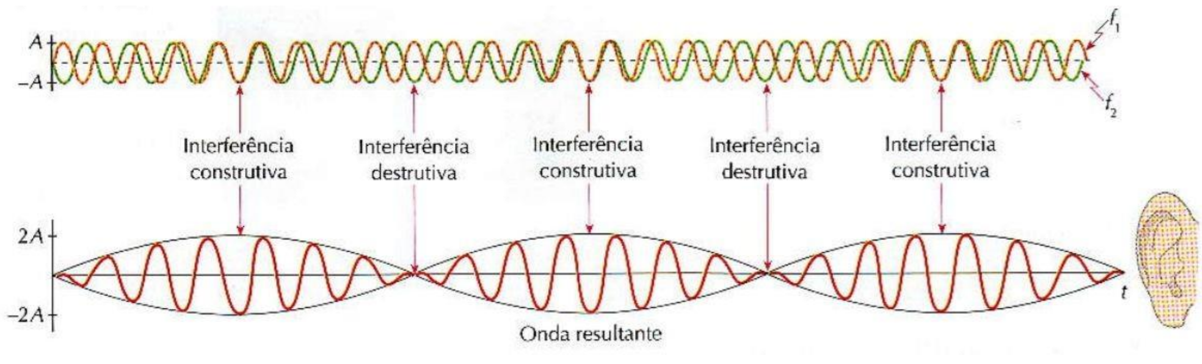
Fonte: JÚNIOR, FERRARO, SOARES, 2007, p.436.

Na música, a interferência é bastante utilizada na hora de afinar um instrumento em relação ao outro, especialmente em concertos, quando todos os instrumentos precisam estar afinados corretamente para não ter “vibrações indesejadas” ao ouvir as apresentações. O procedimento para afinação de uma banda ou orquestra é:

a) O maestro escolhe um instrumentista do grupo, para que todos ajustem seus instrumentos em relação ao escolhido;
b) Em seguida, o maestro diz a nota que o restante tocará, a fim de que cada um faça o ajuste necessário para que seu instrumento toque conforme o escolhido;
c) No final, o maestro pede que todos os naipes toquem ao mesmo tempo a mesma nota usada durante a afinação, para se certificar que todos conseguiram afinar corretamente.

Fisicamente falando, as “vibrações indesejadas” correspondem às sequências de interferências que são geradas quando um instrumento está desafinado em relação ao outro. Isso acontece porque a afinação serve para os instrumentos emitirem a mesma nota na mesma frequência. Assim, a superposição de suas ondas não terá interferência destrutiva. Uma mínima diferença de uma frequência em relação a outra causa um fenômeno chamado de “batimento”, que é justamente a vibração que os músicos tanto evitam. Se um batimento é ouvido durante a afinação, fica evidente que um dos instrumentos está em desacordo com o outro. Sensorialmente, os batimentos são percebidos quando há intervalos de redução e aumento do som.

Figura 20 - Desenho da onda resultante quando há batimentos.



Fonte: JÚNIOR, FERRARO, SOARES, 2007, p.470.

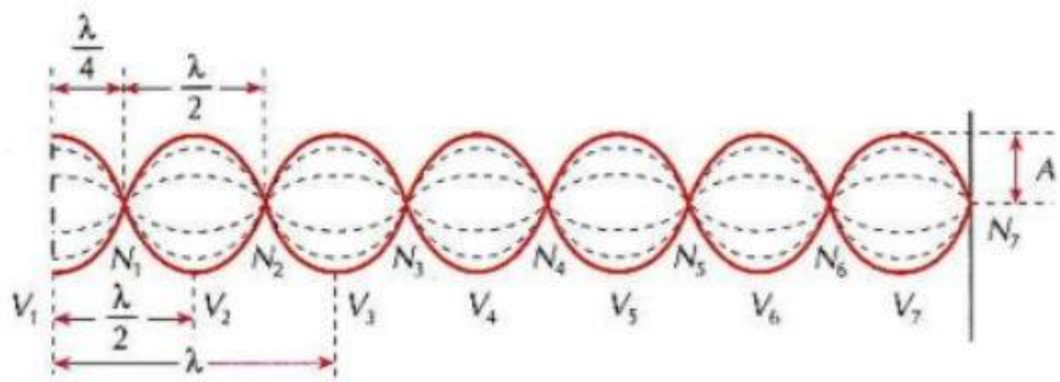
Dependendo da diferença entre as frequências, o batimento pode ser rápido ou lento. Portanto, a frequência de batimento f_b entre duas ondas f_1 e f_2, sendo f_2 de maior valor é dada por:

$$f_b = f_2 - f_1 \tag{39}$$

Uma informação que falta é descobrir características da onda a partir da interferência. Para isso, foi feita uma análise de como ela acontece em uma e duas dimensões, respectivamente.

Começando com a interferência unidimensional, convém usar como exemplo alguém tocando um violão. Se a mesma corda for tocada sucessivamente, vários pulsos serão gerados, de modo que haverá uma superposição entre eles.

Figura 21 - Pulsos sofrendo interferência numa corda de extremidade fixa.



Fonte: JÚNIOR, FERRARO, SOARES, 2007, p.438.

Para Júnior, Ferraro e Soares (2007), analisando o comprimento de onda ao longo da corda faz ser perceptível que a distância entre nós e ventres (representados por *N* e *V*, respectivamente) consecutivos é igual a metade do comprimento de onda:

$$V_1V_2 = N_1N_2 = \frac{\lambda}{2}. \tag{40}$$

Sendo assim, a distância entre um ventre e um nó consecutivo é um quarto do comprimento de onda. Não convém estudar o caso de extremidade solta, pois esta não é plausível dentro do universo da música:

$$V_1N_1 = N_1V_2 = \frac{\lambda}{4} \quad (41)$$

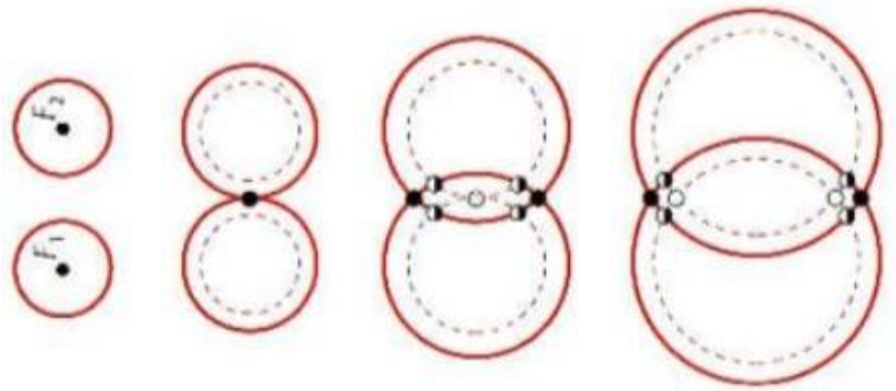
Para o caso da interferência em duas dimensões, há duas fontes de onda F_1 e F_2, uma do lado da outra, vibrando com a mesma frequência e "de forma igual". Esse "forma" de vibração diz que as fontes estão *em fase*. Ou seja:

$$\Delta\varphi = 2n\pi \text{ , n = 0, 1, 2,...} \quad (42)$$

Quando as fontes estão em *oposição de fase*, é como se uma começasse vibrando para cima e outra para baixo, por exemplo. Matematicamente:

$$\Delta\varphi = (2n + 1)\pi \text{ , n = 0, 1, 2,...} \quad (43)$$

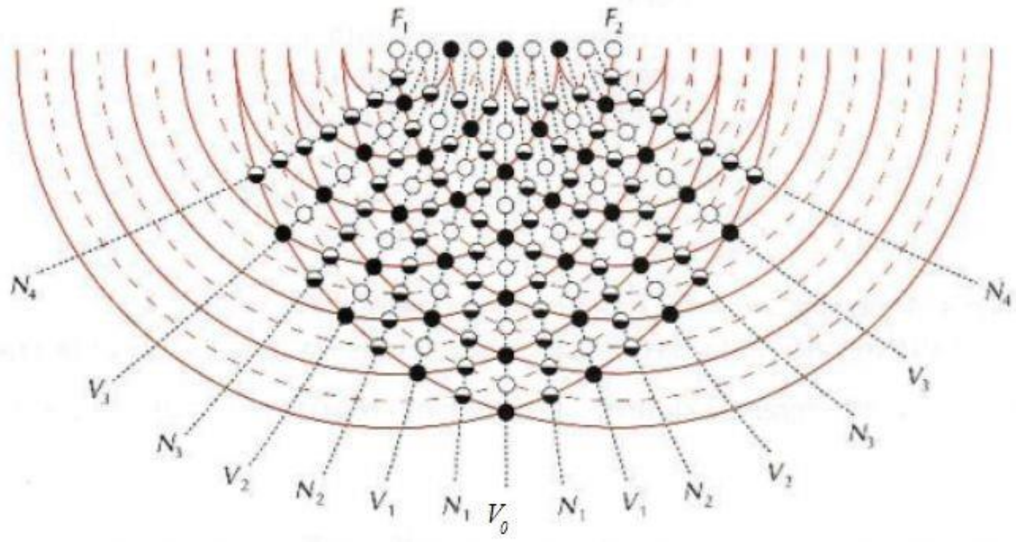
Figura 22 - Ilustração de uma interferência bidimensional.



Fonte: JÚNIOR, FERRARO, SOARES, 2007, p.440.

Usando a figura acima como referência, as ondas geradas pelas fontes criam pontos de interferência construtiva (● para junção de duas cristas e □ para dois vales) e destrutiva (◒), que vão se expandindo à medida que o tempo passa. Através de um padrão de interferência mais complexo, podemos tirar mais conclusões.

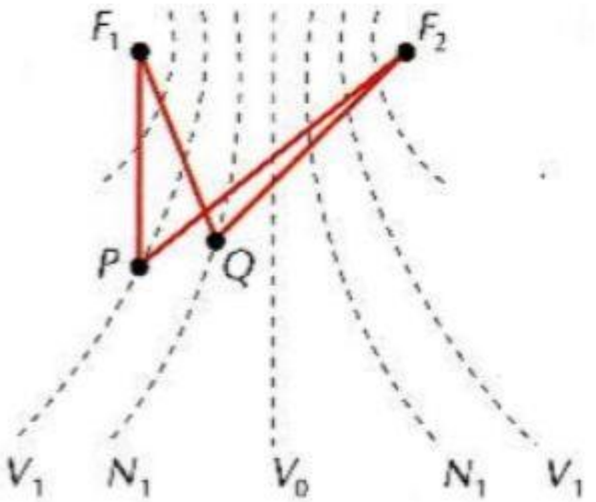
Figura 23 - Interferência bidimensional mais detalhada.



Fonte: JÚNIOR, FERRARO, SOARES, 2007, p.441.

Para facilitar a compreensão matemática, vamos pegar um pedaço do padrão de interferência e ver o que se pode tirar dele. Os pontos *P* e *Q* estão posicionados em uma linha ventral e nodal, respectivamente. A fim de ajudar na compreensão física dos dados, convém supor que as fontes são alto-falantes, enquanto *P* e *Q* são microfones.

Figura 24 - Pedaço da interferência bidimensional.



Fonte: JÚNIOR, FERRARO, SOARES, 2007, p.442.

Como *P* está em uma linha ventral, isso quer dizer que ele está em um local de interferência construtiva. Portanto, segundo Júnior, Ferraro e Soares (2007), a diferença de distância entre *P* e as fontes é igual a um múltiplo par da metade do comprimento de onda gerado. Se $p = 0$, quer dizer que *P* está em V_0; se $p = 2$, *P* está em V_1, e assim sucessivamente:

$$PF_2 - PF_1 = p\frac{\lambda}{2};\ p = 0, 2, 4, ... \qquad (44)$$

O ponto *Q*, quando está em uma linha nodal, tem interferência destrutiva. Então, a diferença de distância entre *Q* e as fontes é igual a um múltiplo ímpar da metade do comprimento de onda gerado. Consequentemente, se $i = 1$, significa que *Q* está em N_0; se $i = 3$, *Q* está em N_1 e assim sucessivamente:

$$QF_2 - QF_1 = i\frac{\lambda}{2};\ i = 1, 3, 5, ... \qquad (45)$$

Uma importante informação é a de que as equações (44) e (45) são válidas para fontes que estão em fase. Para o caso de oposição de fase, será o oposto: ímpar para construtivo e par para destrutivo:

$$PF_2 - PF_1 = i\frac{\lambda}{2};\ i = 1, 3, 5, ... \qquad (46)$$

$$QF_2 - QF_1 = p\frac{\lambda}{2};\ p = 0, 2, 4, ... \qquad (47)$$

Podem não ser convidativas, mas essas equações são muito úteis, porque elas ajudam a conhecer mais sobre a onda gerada e como ela se distribui pelo ambiente. Se mudarmos a posição das fontes e/ou as características da onda gerada, teremos um padrão de interferência totalmente diferente.

4.4 Introdução ao som

4.4.1 Ondas sonoras

De acordo com Fletcher e Rossing (1998), o que entendemos como som é, na verdade, a mudança de pressão do ar, que, quando detectada pelo nosso aparelho auditivo, é convertida em pulsos elétricos que vão para o nosso cérebro. Graças a isso, somos capazes de escutar o que nos cerca.

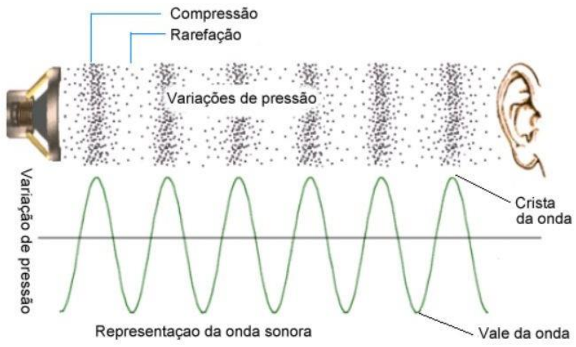
Essa mudança de pressão não é a pressão atmosférica, mas sim uma compressão e rarefação do ar tão rápida que ocasiona a vibração que conhecemos. Não conseguimos detectar todas as frequências porque nosso corpo possui limitações. O intervalo que nosso ouvido é capaz de detectar fica entre 20 Hz e 20.000 Hz. Aquém ou além disso, os chamados, respectivamente, infrassom e ultrassom, não conseguimos ouvir.

Devido à natureza mecânica das ondas sonoras, é necessário um meio material para que a propagação seja possível. Como os meios materiais possuem massa e elasticidade, geralmente as ondas têm comportamentos bem complicados de serem descritos, porque sua propagação será tanto de forma transversal como longitudinal. Para não subir tanto o nível de dificuldade das aulas, consideramos que as ondas são geradas por fontes tão pontuais, de tal forma que, se observarmos em três dimensões, a propagação será quase que esférica.

Ainda no que se refere à propagação, o som, na maioria das vezes, é imaginado apenas no meio gasoso, mas é possível ouvi-lo tanto em sólidos como em líquidos. Por exemplo, os índios nativos da América do Norte tinham o costume de colocar seus ouvidos à terra para identificar um grupo de cavalos distante. Essa técnica era importante para a época porque, assim, eles eram capazes de saber se um grupo aliado ou inimigo estava se aproximando (NUSSENZVEIG, 2002).

Partindo para um descrição mais detalhada, ondas sonoras costumam ser representadas a partir de ondas senoidais transversais. Porém, essas ondas são referentes à propagação longitudinal do som. Isso é possível porque, como dito inicialmente, as ondas são geradas a partir da compressão e da rarefação do meio material e, no meio gasoso, isso causa a oscilação da pressão do ar.

Figura 25 - Ilustração de como o som é representado na forma de uma onda transversal.



Fonte: http://www.fq.pt/som/propagacao-do-som

É importante destacar que a amplitude da onda mostra a pressão do ar, mas os valores abaixo do eixo *x* não representam uma pressão negativa. Para Henrique (2002), essa pressão, na verdade, é chamada de pressão acústica, pois representa a diferença em relação à pressão atmosférica. Portanto, se a pressão acústica é nula, ela é igual à atmosférica.

A velocidade do som no ar de 20 °C é aproximadamente 344 m/s, porém é comum arredondar-se esse valor para 340 m/s porque há vários parâmetros que influenciam nele, como visto na equação (32). Por mais que essa velocidade seja bem alta, bastam algumas dezenas de metros para que seja possível perceber uma “falta de sincronia” entre o que é visto e escutado, porque a velocidade da luz é aproximadamente 300.000.000 m/s, um exemplo simples de se observar é quando estamos num estádio esportivo e, quando a arquibancada grita e se levanta ao mesmo tempo, é possível notar que há uma demora pro som chegar, se estivermos do outro lado do estádio.

Também há casos dentro da música. Em concertos/shows em grandes locais, é perceptível para as pessoas que ficam distantes do palco, porque os movimentos dos instrumentos são vistos antes de escutarmos o som que reproduzem. Consequentemente, esse fenômeno também acontece para os próprios músicos que tocam durante o concerto. Para grandes grupos musicais, o maestro precisa tomar cuidado na hora de sincronizar seus movimentos com os músicos mais distantes. Uma obra que se encaixa nesse caso é a Sinfonia nº 8 de Mahler, também conhecida como a Sinfonia dos Mil. Ela tem esse apelido porque precisa de muitas pessoas para ser executada.

4.4.2 Qualidades do som: Parte 1

Quando falamos de qualidade, não necessariamente quer dizer que um som é melhor do que outro. Fala-se, na verdade, de características que nos ajudam a perceber sons diferentes. As qualidades são divididas em três: altura, intensidade e timbre.

Para Young e Freedman (2003), a altura está diretamente relacionada à sensação de comparar sons graves de agudos, ou seja, ela é a qualidade por meio da qual conseguimos perceber sons de diferentes frequências. Sons graves (baixa frequência) são ditos como sons baixos, enquanto que os agudos (alta frequência) são os altos. De acordo com Nussenzveig (2002), a relação entre altura e frequência foi estabelecida por Hooke em 1681. O intervalo entre elas é dado em relação à nota *dó*:

Tabela 4 - Intervalo entre frequências.

Nota	Dó 4	Ré 4	Mi 4	Fá 4	Sol 4	Lá 4	Si 4	Dó 5
Frequência (Hz)	264	297	330	352	396	440	495	528
Intervalo ($\frac{f_{maior}}{f_{menor}}$)	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2

Fonte: NUSSENZVEIG, 2002, p.133.

A partir desse conceito de intervalo, é possível entender o conceito de oitava. Dentro da teoria musical, o intervalo entre uma nota com frequência f e outra de frequência $2f$ caracteriza uma oitava. A partir da tabela acima, além da frequência ser o dobro, o número ao lado, que é o indicativo de qual oitava a nota pertence, também aumenta.

A segunda qualidade é a intensidade, que nos ajuda a diferenciar um som forte de um fraco. Ou seja, ela se refere ao volume. É importante fazermos uma desambiguação porque, no senso comum, há o hábito de dizer que um som alto é um som forte, mas, fisicamente falando, isso está errado.

De acordo com Yamamoto e Fuke (2017), quanto maior a amplitude, maior a pressão que a frente de onda possui, na medida em que, como já mencionado, a amplitude da onda está diretamente relacionada à sua intensidade. Contudo, existe a intensidade física I e a intensidade auditiva β.

Matematicamente, a intensidade física está descrita abaixo, em que I representa justamente essa energia que a onda carrega. Sua intensidade no SI é o J/m² ou W/m²:

$$I = \frac{E}{A\,\Delta t} = \frac{P}{A} \tag{48}$$

A intensidade física da onda depende da energia E acumulada dentro da área A da frente de onda ao longo do intervalo de tempo Δt, ou podemos dizer que é a potência P da frente de onda ao longo do tempo Δt. Como I possui nenhuma relação com a frequência, é possível que frequências iguais tenham intensidades físicas diferentes, como se fossem dois instrumentos iguais tocando a mesma nota, mas um deles está tocando com mais força.

A intensidade auditiva β, mais conhecida por nível sonoro, é mais utilizada na prática, pois ela diz respeito à nossa sensibilidade auditiva. Sua unidade é o bel (B), mas costumamos usar o decibel (dB) com mais frequência:

$$\beta = 10 log \frac{I}{I_o} \tag{49}$$

I_o representa o chamado limiar de audição, ou seja, a intensidade mínima que nosso ouvido é capaz de escutar. Seu valor é 10^{-12} W/m². Abaixo disso, nosso ouvido não consegue detectar. $I_{máx}$ é o limiar de dor, cujo valor é 10^0 W/m² = 1 W/m². Dessa maneira, se nossos ouvidos estiverem sujeitos a um valor maior ou igual a $I_{máx}$,vamos começar a sentir dor, de tão forte que é esse som.

Em suma, β nos diz como percebemos I, dependendo da distância que estamos da fonte sonora. Ou seja, supondo que uma auto falante emite um som com I constante, ao variarmos nossa distância dela, teremos um β diferente para cada distância.

Na música, há uma ferramenta que informa aos músicos quando eles devem tocar com mais ou menos intensidade: a dinâmica. Ela aparece abaixo das linhas de partitura na forma de siglas, sinais de < ou >, e, na parte superior, a partir de palavras indicativas de intensidade.

Figura 26 - Trechos de partituras com dinâmica.

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamics_(music)

A forma mais básica da escala da dinâmica está na tabela abaixo. Apesar da maioria dos termos, dentro da teoria musical como um todo, ser derivada do italiano, não é necessário um grande conhecimento do idioma para a sua compreensão:

Tabela 5 - Símbolos da dinâmica musical.

Dinâmica	Nome	Comparação com a voz
ppp	*pianississimo*	Sussurro
pp	*pianissimo*	Quase um sussurro
p	*piano*	Voz suave
mp	*mezzopiano*	Voz normal
mf	*mezzoforte*	
f	*forte*	Falando alto
ff	*fortissimo*	Quase gritando
fff	*fortississimo*	Gritando
<	*crescendo*	Falando cada vez mais forte
>	*diminuendo*	Falando cada vez mais fraco
sfz	*sforzando*	Aumento súbito da força

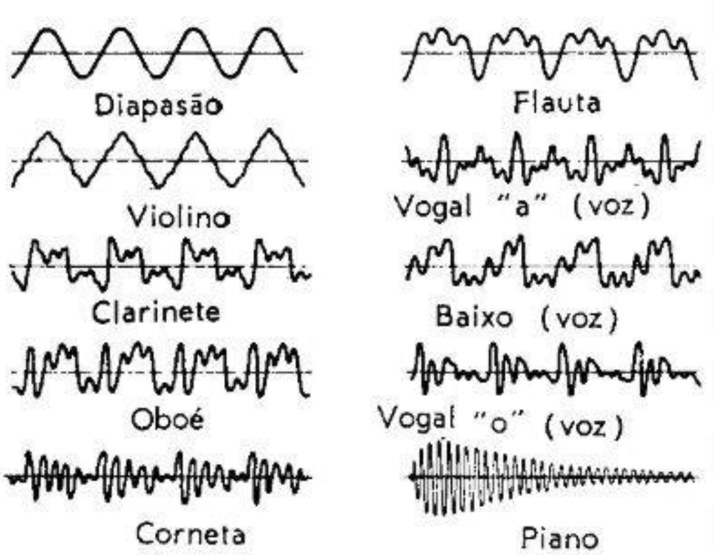
Fonte: https://ramontessmann.com.br/dinamica-musical/

4.4.3 Qualidades do som: Parte 2

Mesmo se dois sons possuam mesma intensidade e altura, ainda é possível diferenciar um do outro: através do timbre. Graças a isso, conseguimos identificar sons tocados por um piano, violino, gaita, flauta etc. O timbre é como se fosse a "assinatura" do som. Para entender melhor esse conceito, é necessário retornar para a representação senoidal de uma onda.

Para Yamamoto e Fuke (2017), a onda senoidal é uma simplificação exagerada, dando a ideia de que aquele som não tem "imperfeições". Na verdade, uma onda sonora presente na natureza não é pura, mas sim o resultado de várias frequências desiguais que ficam superpostas. Portanto, os sinais sonoros são bem mais complexos do que aparentam ser.

Figura 27 - Timbres de fontes sonoras variadas.



Fonte: https://br.pinterest.com/pin/441423200953584460/

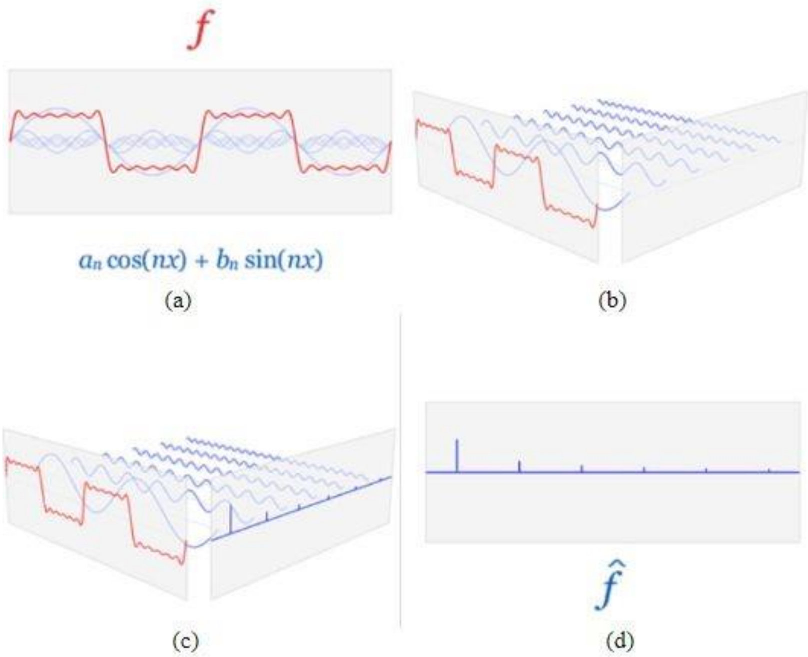
Apesar dos sinais sonoros serem bastante complexos, é possível descrever e separar cada onda que dá a sua complexidade através de uma matemática deveras complexa para o ensino médio. Para fins de curiosidade e informação básica, os métodos usados são as séries e transformadas de Fourier (TAYLOR, 2005). Respectivamente, elas são escritas nas seguintes formas:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \, cos(n\omega t) + b_n \, sen(n\omega t)] \quad (50)$$

$$\hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \xi} dx \quad (51)$$

A série de Fourier é usada quando o objetivo é definir a onda $f(t)$ como uma sequência de senos e cossenos (Figura Xa e Xb). Para decompor essa onda em outras menores, usa-se a transformada de Fourier. Quando a transformada é feita, em vez de separar em senos e cossenos, a onda é separada por picos de frequência (Figura Xc). Consequentemente, $\hat{f}(\xi)$ será o conjunto dos picos (Figura Xd) que formam a onda que originalmente é $f(x)$.

Figura 28 - ilustração de como as equações (50) e (51) funcionam.



Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_transform

Se não fossem as equações (50) e (51), o formatos MP3 não existiria. Segundo o texto “A música digital não existiria sem a transformada de Fourier”, para entender o formato MP3, pode-se usar o exemplo de uma música que acabou de ser gravada em um estúdio. A música que sai da gravadora está de uma forma muito bruta. Consequentemente, o tamanho do seu arquivo é muito grande, característico dos formatos de áudio WAV, do inglês *Wave Audio File Format*. A razão para o seu tamanho é porque tudo que foi gravado está registrado, tanto o espectro audível como o inaudível, a partir de equipamentos profissionais. Utilizando a transformada de Fourier na música, é possível ver que existem alguns picos de frequência que são incrivelmente dominantes, como voz e instrumentos, e outros desprezíveis, como ruídos e frequências que o nosso ouvido não detecta. O formato MP3 descarta os picos desprezíveis para economizar espaço. O resultado final é um arquivo bem menor e aproximadamente igual à original.

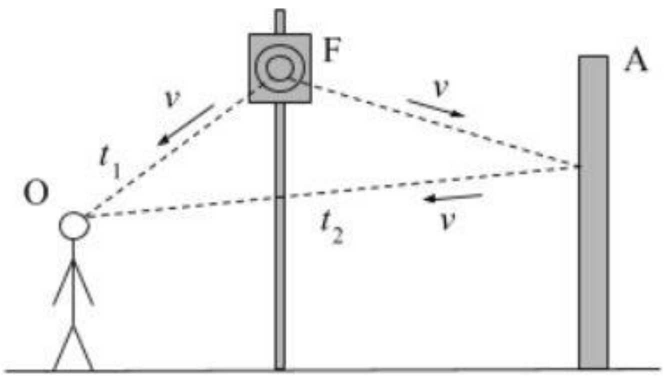
4.5 Comportamento das ondas sonoras

4.5.1 Ondas sonoras

De acordo com Fletcher e Rossing (1998), quando uma onda encontra algum tipo de variação no meio em que ela se encontra, seu comportamento será perturbado. Por exemplo, uma mudança no comprimento de onda provoca uma mudança na velocidade e na direção de propagação da tal onda.

A fim de simplificar a compreensão desse fenômeno, será considerada uma onda sonora que se propaga pelo ar em que uma frente de onda acaba colidindo com a parede. Parte dela passará a se propagar "dentro" da parede graças à refração, enquanto que parte dela continuará no ar graças à reflexão. Então, a parede funciona para o som da mesma forma que uma piscina funciona para a luz, por exemplo. Entretanto, como a mudança de meio (do ar para a parede) é mais abrupta, a maior parte é refletida. Por isso, ouvimos pouca coisa quando encostamos nosso ouvido na parede para ouvir o que acontece do outro lado.

Figura 29 - Ilustração para o desenvolvimento da equação (52).



Fonte: elaborado pelo autor.

Para Yamamoto e Fuke (2017), a reflexão acústica, dependendo da diferença de tempo entre o som direto da fonte *F*, que é t_1, e o som refletido na parede *A*, representado por t_2, ocasiona três fenômenos: eco, reverberação e reforço:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \tag{52}$$

A compreensão desses fenômenos é melhor a partir de um conceito chamado persistência acústica, que significa o intervalo limite para que o nosso ouvido seja capaz de diferenciar dois sons diferentes, que é 0,1 s. A partir disso, conseguimos diferenciar cada um dos casos. O entendimento dos fenômenos será mais claro a partir da suposição de que alguém está tocando em um quarto fechado:

a) Eco: $\Delta t \geq 0{,}1$ s. Um intervalo maior ou igual à persistência acústica significa que o ouvido humano é capaz de diferenciar os dois sons de tempos diferentes. A distância mínima para que seja possível escutar um eco é de 17 m. Consequentemente, a sala hipotética precisa ter dimensões dessa ordem para detectar um eco.
b) Reverberação: $\Delta t < 0{,}1$ s. Uma variação de tempo dessa ordem quer dizer que não é possível diferenciar os dois sons. Entretanto, será ouvido um som prolongado. Então, a sala precisa ter dimensões menores que 17 m.
c) Reforço: $\Delta t \cong 0$ s. Uma diferença quase nula permite escutar os dois sons simultaneamente. Consequentemente, há uma superposição na qual o som será ouvido com mais intensidade. De acordo com a última figura, o observador *O* precisa ficar bastante próximo da fonte *F* e da parede *A*. Para fins de comparação, a sala precisa ter dimensões relativamente claustrofóbicas.

A refração do som foi, nas aulas para os alunos, explicada de uma forma breve no começo desta subseção, e uma discussão desse caso torna o conteúdo demasiadamente avançado para o ensino médio, pois, para o som, a refração é bastante complicada.

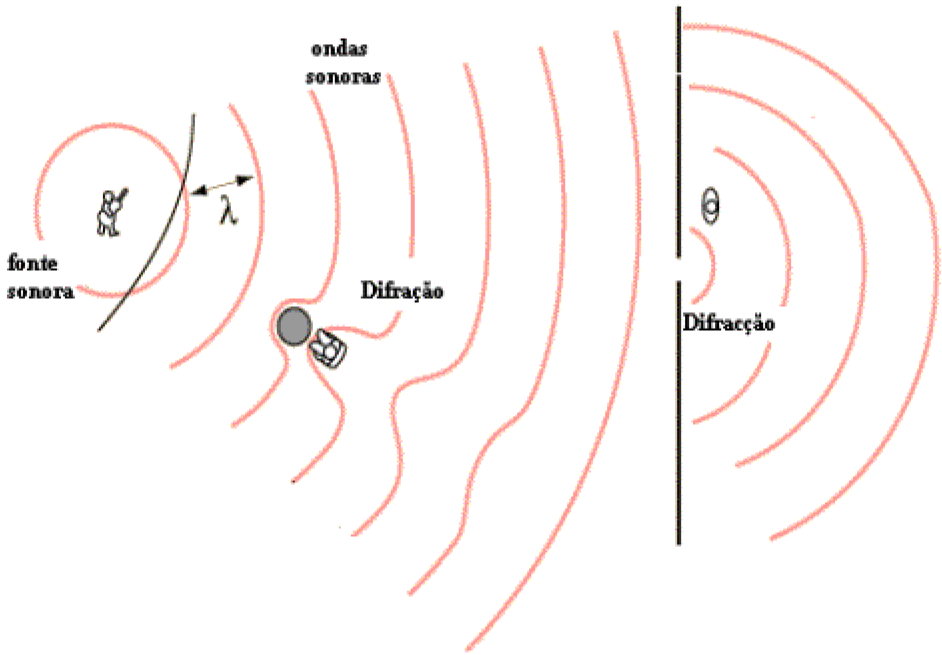
Apesar da difração ser estudada com mais ênfase na Óptica, é importante analisar como ela ocorre para o som. É nítido que não é obrigado estarmos observando uma fonte sonora para ser capaz de escutá-la, porque, mesmo que o som se propague em linha reta, ele (e qualquer outra onda) é capaz de contornar obstáculos, pois eles provocam uma distorção da frente de onda (HENRIQUE, 2002).

Para termos uma ideia de a partir das dimensões por meio das quais o som sofre difração, é importante o conhecimento sobre o espectro audível, entre 20 Hz e 20.000 Hz. Se usarmos a velocidade do som igual a 340 m/s, vemos que os obstáculos precisam ter entre 1,7 cm e 17 m para a difração ocorrer:

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{340}{20} = 17\ m. \tag{53}$$

$$\lambda_2 = \frac{v}{f_2} = \frac{340}{20000} = 0,0017\ m = 1,7\ cm. \tag{54}$$

Figura 30 - Ilustração da ocorrência da difração.

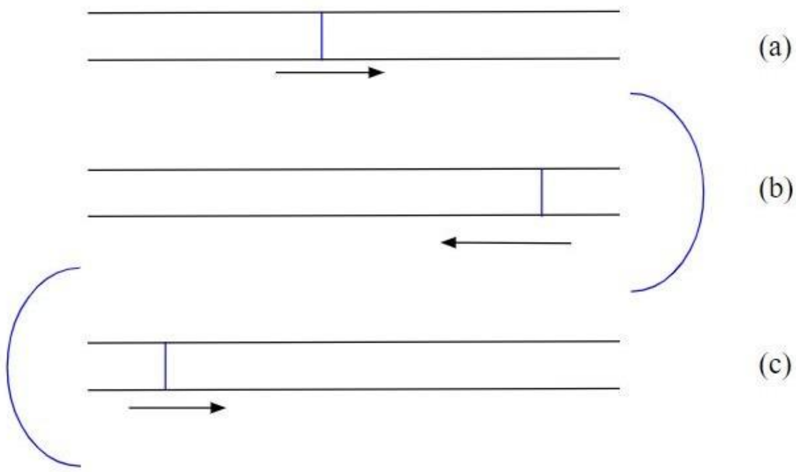


Fonte: https://www.stoodi.com.br/resumos/fisica/ondas-reflexao-refracao-e-difracao/

4.5.2 Impedância e ressonância

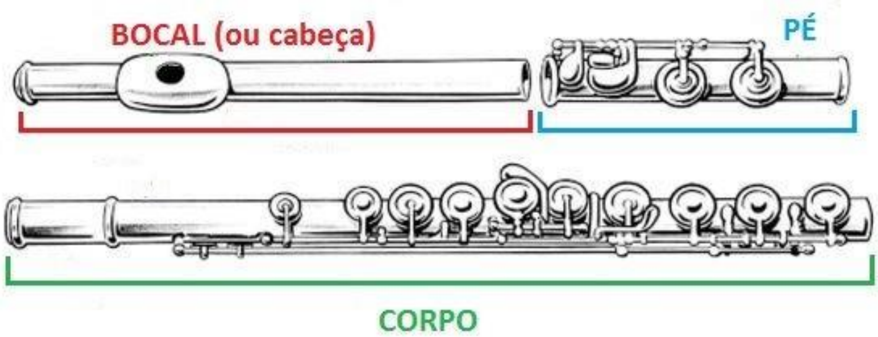
Um fenômeno que ocorre com as ondas, mas que poucos conhecem é a impedância. Há impedâncias de vários tipos, mas, para o contexto das aulas, foi abordada a impedância acústica. De uma forma geral, a impedância acústica reflete o grau de resistência que um meio oferece ao movimento (HENRIQUE, 2002). Para facilitar a compreensão, vamos imaginar uma frente de onda que inicialmente está dentro de uma flauta transversal e se propaga em direção a uma das extremidades.

Figura 31 - Exemplo de impedância acústica na flauta transversal.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 32 - Partes da flauta transversal.



Fonte: http://blog.multisom.com.br/flauta-transversal-tudo-o-que-voce-precisa-saber/

A flauta transversal é um tubo aberto em ambas as extremidades . Supondo que a extremidade esquerda é a abertura do bocal e a direita é a extremidade do pé, ao assoprar, há a variação da pressão acústica dentro do tubo, criando-se, assim, uma frente de onda dentro dele (Figura 31a). De acordo com o texto, em inglês, *Flute acoustics: an introduction to how a flute works* (tradução: Acústica da flauta: uma introdução de como uma flauta funciona), da Universidade de Nova Gales do Sul, no momento em que essa frente de onda chega no pé da flauta, é pensado que essa frente de onda sai do instrumento sem dificuldades. Porém, o que realmente acontece é que parte da onda sai da flauta e difrata e parte dela reflete para o interior (Figura 31b). Consequentemente, essa mesma frente de onda refletida irá para o buraco do bocal, sendo o processo repetido na outra extremidade do instrumento (Figura 31c).

Esse fenômeno também nos permite conhecer mais sobre a física do instrumento. Como essa frente de onda vai e volta dentro do tubo, temos, então, um movimento oscilatório, de maneira que é possível definir o período e a frequência desse movimento, porque é conhecida a velocidade do som e o comprimento do tubo. Descoberta a frequência, sabe-se qual nota é tocada. O comprimento entre o final do pé e o bocal é de 66 cm. Se a onda vai e volta, a distância total é de 132 cm = 1,32 m. Considerando a velocidade do som igual a 345 m/s, tem-se que:

$$v = \frac{\Delta s}{T} \rightarrow T = \frac{\Delta s}{v} = \frac{1{,}32}{345} = 0{,}00382\ s \tag{55}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}00382} = 261{,}63\ Hz \tag{56}$$

Essa frequência é a mesma da nota *dó 4*, que é justamente a nota mais grave do instrumento, quando as chaves do instrumento tampam todos os buracos.

Qual a resistência encontrada no meio, sendo que a onda não saiu do ar? Para o texto, em inglês, *What is acoustic impedance and why is it important?*[2], da Universidade de Nova Gales do Sul, a propagação foi perturbada quando a frente de onda estava em um local fechado e pequeno, que possui uma impedância própria, e passou repentinamente para um local aberto de impedância completamente diferente. Essa mudança abrupta mostra que não tinha concordância entre as impedâncias acústicas dentro e fora da flauta. Com esse raciocínio, fica mais fácil entender como o som se propaga dentro de outros instrumentos de tubo, como o clarinete, saxofone, oboé etc.

O som também estimula os materiais que estão no ambiente. Quando as ondas encostam em qualquer material, eles também vão vibrar na frequência da onda que bateu

[2] Tradução nossa: O que é impedância acústica e por quê é importante?

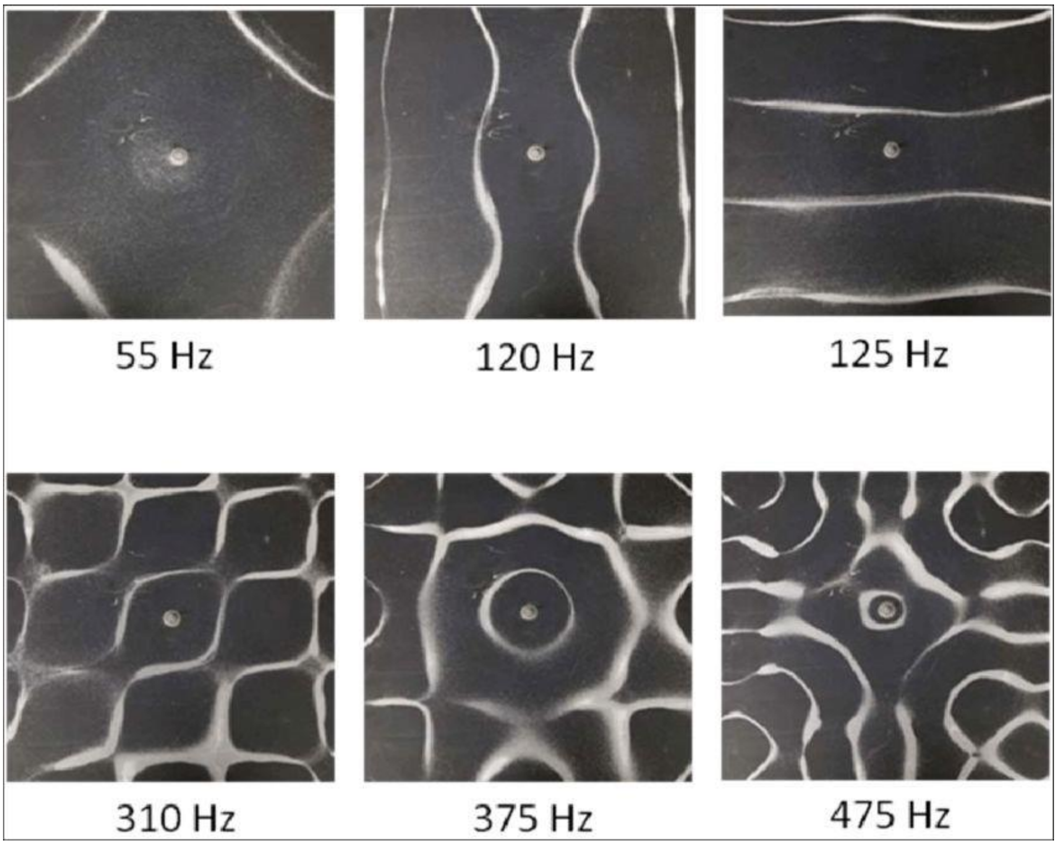
neles. Um fenômeno interessante acontece quando essa frequência é igual à frequência fundamental do material, que é aquela de menor valor de uma série harmônica, que será vista na próxima subseção.

Sobre a frequência fundamental, tudo no universo possui a sua. Se a frequência do som coincide com a frequência fundamental do corpo, ele vai ganhar tanta energia que começará a vibrar com uma amplitude muito grande, característico do fenômeno da ressonância (JÚNIOR, FERRARO, SOARES, 2007).

Esse aumento de amplitude ocorre graças ao princípio da superposição. Como são vibrações de frequências iguais, há interferência construtiva. Um exemplo clássico de ressonância é quando um cantor lírico, cuja voz naturalmente possui uma intensidade absurdamente grande, emite uma nota próximo a uma taça de cristal. O ganho de energia da taça é tão grande que, se a nota que o cantor emite é igual à frequência fundamental da taça, ela quebra.

Os próprios instrumentos musicais vibram quando são tocados, mas essa vibração é, visualmente, tão imperceptível que pensamos que o instrumento está vibrando sempre da mesma forma. Entretanto, isso não acontece, pois, durante a vibração, há regiões onde a vibração será mais forte do que em outras. Segundo Henrique (2002), Ernst Chladini publicou em 1787 um estudo sobre os modos de vibração de placas planas quando elas são estimuladas por alguma vibração. Nesse experimento, Chladini fixou uma placa de metal num suporte, jogou um pouco de areia em cima dela e usou um arco de violino para fazê-la vibrar. Dependendo da frequência de vibração da placa, a areia formava padrões, que posteriormente foram chamados de Figuras de Chladini.

Figura 33 - frequência para cada modo de vibração para uma membrana de formato quadriculado.



Fonte:https://www.researchgate.net/figure/ARL-photo-of-Chladni-Plate-patterns_fig8_272366763

A placa funciona como uma membrana, cuja vibração é considerada bidimensional. Como toda onda, ela é formada por cristas, vales e nós. A diferença é que os nós, em vez de pontuais, serão linhas, chamados assim de linhas nodais. Portanto, os modos de vibração são os padrões que aparecem para cada frequência. Consequentemente, a areia ficará acumulada nas linhas modais, pois é a região de menor vibração.

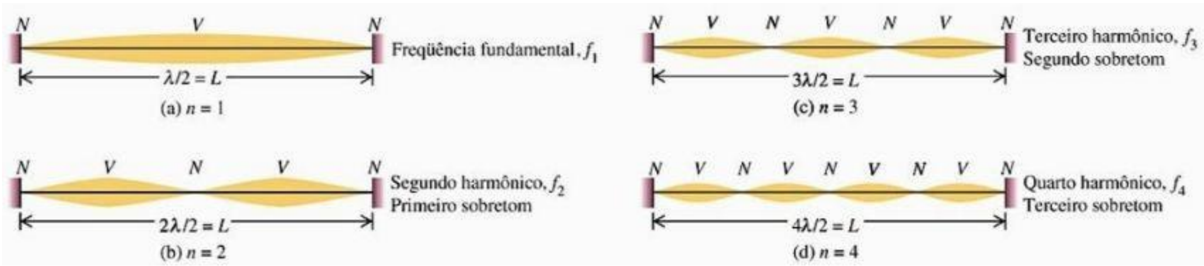
As Figuras de Chladini também são usadas quando da construção de instrumentos como violão, violino, piano, tambores etc, que são instrumentos nos quais boa parte do corpo se comporta como uma membrana. Os padrões ajudam o *luthier* (nome dado aos profissionais que constroem e fazem manutenção de instrumentos musicais) a construir o instrumento sem que a vibração prejudique a qualidade do som.

4.5.3 Cordas vibrantes e tubos sonoros

Apesar de haver comentários sobre comportamento e cordas, esta subseção é dedicada à influência das propriedades físicas dos materiais sobre as ondas formadas nelas e dentro de tubos.

De acordo com Yamamoto e Fuke (2017), quando a corda está presa em ambas as extremidades e está tensionada o suficiente de tal modo que, quando o pulso é criado, ela vibra durante um tempo considerável, esse pulso vai se propagar ao longo da corda e refletir nas extremidades, consequentemente a interferência entre elas gera uma onda estacionária, que transfere energia para o ambiente. Assim, ela produz o som que escutamos. A partir dos modos de vibração da corda, é possível obter mais informações envolvendo o comprimento de onda e da corda.

Figura 34 - Relação entre o comprimento de corda e da onda.



Fonte: YOUNG, FREEDMAN, 2003, p.271.

Segundo Young e Freedman (2003), sendo o comprimento da corda L, o primeiro modo de vibração é a chamada frequência fundamental, e a onda formada por ela é igual à metade do comprimento de onda. Então, se chamarmos a frequência fundamental de f_1:

$$L = \frac{\lambda}{2} \tag{57}$$

Os modos de vibração sucessivos (também chamados de harmônicos) são múltiplos da frequência natural e, consequentemente, as ondas formadas por elas também são múltiplos da metade do comprimento de onda. Então, para o segundo modo (ou segundo harmônico), f_2, temos $L = \frac{2\lambda}{2}$; para o terceiro, $L = \frac{3\lambda}{2}$ e assim sucessivamente. Portanto, o índice n de f nos diz quantas vezes $\frac{\lambda}{2}$ será multiplicado:

$$L = n\frac{\lambda}{2} \rightarrow \lambda_n = \frac{2L}{n} \tag{58}$$

A partir do resultado das equações (36) e (37), temos:

$$\lambda = \frac{v}{f} \rightarrow \frac{2L}{n} = \frac{v}{f_n} \rightarrow f_n = n\frac{v}{2L} \tag{59}$$

Portanto, é possível encontrar a frequência f_n que corresponde ao enésimo modo de vibração a partir da velocidade da onda e do comprimento da corda. Usando a equação (34), conseguimos encontrar a frequência da corda apenas com suas propriedades físicas:

$$f_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}};\ n = 1, 2, 3, ... \tag{60}$$

O último resultado nos diz que a frequência é inversamente proporcional ao comprimento da corda e à densidade linear, bem como diretamente proporcional à tensão. Instrumentos como violino, cavaquinho e o *ukulele* são mais agudos porque possuem cordas mais curtas, mais finas e leves. Em contrapartida, um baixo e as cordas mais graves de um piano ou de uma harpa são bastante longas e/ou grossas/pesadas. Para as cordas mais graves de um violão, por exemplo, é normal vê-las enroladas por outro fio de modo que ela seja mais grossa sem precisar esticar seu comprimento. Para a tensão, se o objetivo é a corda emitir uma frequência maior, aumentamos a tensão nela e vice-versa.

Da mesma forma que as cordas, o som dentro de um tudo também se comporta como uma onda estacionária, porém há dois casos para analisar: quando o tubo está aberto e quando está fechado.

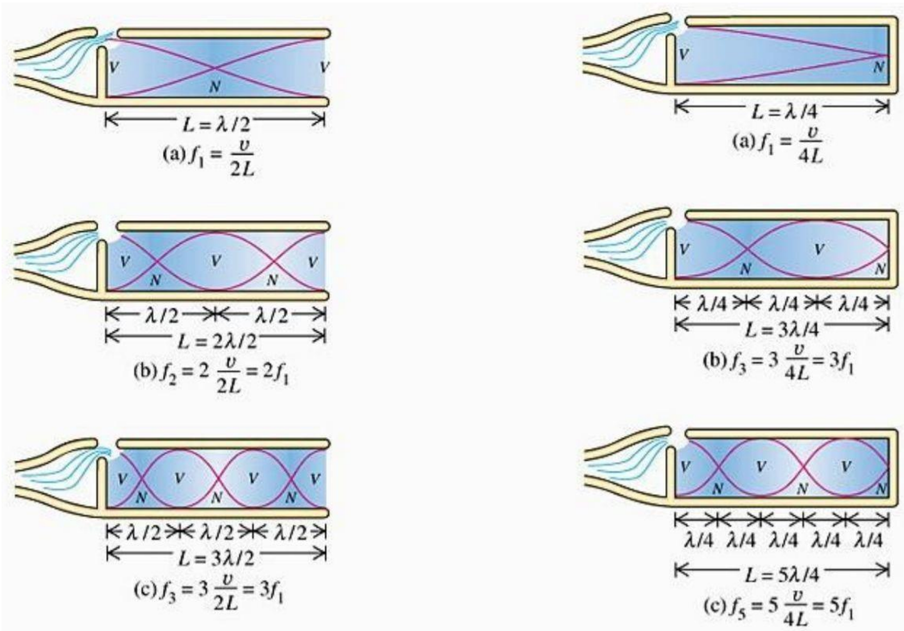
De acordo com Young e Freedman (2003), para o tubo aberto, a configuração das ondas está na próxima figura. Nesse caso, os ventres da onda tocam as extremidades do tubo. De uma forma geral, a frequência da onda para um tubo aberto é igual para a corda vibrante:

$$f_n = \frac{nv}{2L};\ n = 1, 2, 3... \tag{61}$$

No caso do tubo fechado, nos extremos do tubo, há um nó e um ventre. Comparando com o tubo aberto, em vez da frequência fundamental equivaler à metade do comprimento, ela será um quarto do comprimento de onda:

$$f_n = \frac{nv}{4L}; n = 1, 3, 5... \quad (62)$$

Figura 35 - Modos de vibração para os tubos aberto e fechado.



Fonte: YOUNG, FREEDMAN, 2003, p. 277.

É possível substituir *v* que nem na equação (60), porém a substituição será a equação (32). Para analisar como esses parâmetros afetam na nota que está sendo tocada, o conteúdo irá se estender de tal forma que será necessário adicionar conceitos de Termodinâmica. Para não fugir do objetivo principal, a análise que parte apenas do comprimento do tubo é suficientemente necessária.

Instrumentos musicais de tubo aberto são conhecidos: flauta, clarinete, trompete, trompa etc. Um instrumento de tubo fechado é a flauta de pã. Um tubo maior resulta em uma frequência menor, ou seja, a nota fica mais grave, pois o comprimento de onda é maior. Ao aumentar os harmônicos, o comprimento de onda será menor e, assim, a frequência aumenta.

5 APLICAÇÃO DAS AULAS

Para que as aulas fossem capazes de extrair a maior eficiência a partir da junção física e música, através da aprendizagem cooperativa, foi realizada uma pesquisa bibliográfica com o intuito de achar exemplares confiáveis que conseguem unir ambas as áreas do conhecimento de forma didática (PRODANOV, FREITAS, 2013). Entretanto, pouco material capaz de destacar essa junção dentro do nível do ensino médio foi encontrado. Por conta disso, o conteúdo das aulas foi elaborado pelo autor tendo como base a estrutura curricular do ensino de física dentro do ensino médio e organizado para ser capaz de ser ensinado através da técnica *jigsaw* de aprendizagem cooperativa. Ao longo deste capítulo, será detalhado como esse processo foi realizado.

5.1 A escola

A escola onde a pesquisa foi realizada é a EEM Dione Maria Bezerra Pessoa, localizada na zona urbana do município de Pacajús, que fica dentro da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), a 51,1 km de Fortaleza. Visualmente, a zona urbana lembra um bairro de classe média da capital, com regiões mais pobres e, infelizmente, afetadas pela desigualdade e violência.

Figura 36 - Localização da escola dentro da zona urbana de Pacajús.

Fonte: Google Maps.

É uma escola recente na cidade, fundada há cerca de dois anos e engajada na Aprendizagem Cooperativa. Esse estabelecimento de ensino procura, através dessa metodologia e da realização de projetos extracurriculares, levar uma educação de qualidade para seus alunos. Resultado disso é a aprovação de dezenas de estudantes no vestibular e o destaque de seus estudantes na participação de eventos em nível estadual.

Estruturalmente falando, a escola possui salas de aula e laboratórios equipados, apesar de pequenas marcas de vandalismo, como algumas portas sem maçanetas e carteiras riscadas. A escola disponibiliza laboratórios de informática, matemática, biologia, química e física. Todos são climatizados e proporcionam diversas aulas e experimentos.

O primeiro contato com a escola foi através da I Feira das Profissões de Pacajús, em que o autor desta pesquisa foi convidado para representar o curso de Física. Essa oportunidade foi importante para perceber o potencial da escola para as atividades. O segundo foi através do convite para ajudar a ministrar, junto ao $PRECE_2$, uma oficina para os estudantes dos primeiros e segundos anos familiarizados com a aprendizagem cooperativa. Ela não é aplicada nos terceiros anos porque os alunos desse nível já conhecem e participam das atividades propostas pela escola sem dificuldades.

Apesar de todos esses triunfos, a escola também é vítima da violência local. devido ao crescente domínio das facções criminosas no Ceará, alguns alunos estão na criminalidade. Há estudantes, independentemente da série, que já foram detidos ou presos, ainda cometem delitos e outros que, infelizmente, vieram a óbito. Essa triste informação é importante para que uma técnica específica de aprendizagem cooperativa fosse utilizada durante as aulas.

5.2 Convite

As aulas foram organizadas para ser ministradas no contraturno para os estudantes do terceiro ano do ensino médio, nos dias de terça e quinta-feira. Pela manhã, o horário foi de 7:30 às 9:10 e, à tarde, de 13:30 às 15:10. Durante o convite, foi destacado que a as aulas teriam o objetivo de não só reforçar o conteúdo que normalmente é visto no 2º ano do ensino médio, mas também conhecer uma física que é ignorada.

Outro recurso utilizado para estimular a participação dos estudantes foi que aqueles que frequentassem até o final, faltando apenas uma vez, também seriam recompensados com um certificado emitido pela escola e o bônus de um ponto na nota parcial. Por fim, foi passada uma lista em branco na qual os estudantes interessados em participar escreviam seu nome e o número de celular, para que fosse criado um grupo no *Whatsapp* a fim de uma comunicação mais direta com os alunos.

5.3 Material didático

No capítulo anterior, foi mostrado como as áreas estão unidas. No entanto, devido à deficiência de textos didáticos, os materiais de nível médio e, inclusive, superior disponíveis serviram de base para que o material fosse feito de tal forma que os conceitos relevantes fossem adaptados para o nível dos estudantes.

A princípio, o conteúdo do material foi organizado em capítulos, em que cada um deles corresponde a aula do dia. O padrão dos capítulos é:

a) Nome do capítulo;
b) Breve introdução sobre o que será estudado;
c) Material teórico usado como referência ao longo do curso;
d) Tarefa individual a ser feita antes do momento de formar os grupos de especialistas;
e) Meta coletiva, que deve ser feita em grupo, após o retorno dos especialistas ao grupo de base;
f) Avaliação individual, que funciona como uma revisão final sobre o que foi estudado na aula em questão.

Um detalhe que não pode ser deixado de lado é que há conteúdos de nível médio que, apesar de serem importantes, não foram ensinados, porque a junção com a música é complicada, como o efeito doppler, por exemplo. Em função disso, o “espaço vazio” deixado pela ausência desses conteúdos foi preenchido por conceitos vistos no ensino superior que são interessantes de serem abordados quando se atrela física e música. Alguns deles são: membranas; impedância acústica; série e transformada de Fourier. Obviamente, esses conteúdos foram ensinados de forma adequada ao nível dos estudantes participantes.

A avaliação individual é a ferramenta principal de coleta de dados para esta pesquisa. Para a avaliação satisfazer o “$IDACI^{5}_{mod}$”, ela foi elaborada para ter cinco questões curtas de “verdadeiro ou falso”. Apesar da simplicidade da organização, o estudante é avaliado através das seguintes competências: conceitos e fenômenos estudados, significado físico e matemático da forma das equações e suas grandezas. A meta individual estabelecida é de acertar, no mínimo, três das cinco afirmativas. Já a meta coletiva é que todos os membros alcançassem a meta individual.

5.3.1 Instrumentos musicais

O fator vital para que o propósito do trabalho fosse alcançado foi a presença de instrumentos musicais. Tanto os que a escola possui como os instrumentos levados pelo autor foram utilizados, com o fito de reforçar o significado físico das grandezas que as equações possuem e, dependendo de seu valor, como elas são afetadas, além do fato de proporcionar uma experiência diferenciada para os alunos.

Durante as aulas, por exemplo, o trompete foi usado para mostrar que a vibração dos lábios é um movimento oscilatório e que a força que o trompetista assopra, bem como rigidez que ele aplica aos lábios provocam uma variação na frequência do movimento labial, provocando, também, a variação da frequência das notas musicais tocadas.

Ao todo, os instrumentos que contribuíram com nosso trabalho foram: bombardino, bumbo, clarinete, flauta doce contralto, flauta doce sopranino, flauta doce soprano, flauta transversal, pratos, surdo, tarol, trompete e violão. Para promover uma experiência mais dinâmica, os alunos também tiveram a oportunidade de experimentar os instrumentos, favorecendo não só uma experiência auditiva, mas também tátil (KRUMMENAUER *et. al*, 2009).

Figura 37 - Instrumentos utilizados nas aulas.

Fonte: fotografado pelo autor

5.3.2 Motivação para o uso da técnica jigsaw

Para satisfazer a técnica, cada aula foi dividida em três partes, de tal forma que os grupos formados fossem trios e que cada parte seria destinada ao estudante especialista. Sobre a técnica, sua escolha foi decidida a partir de pesquisas que envolvem desde os fundamentos da aprendizagem cooperativa, até o conhecimento das diversas técnicas existentes. Muitas técnicas são eficientes para aulas de física, mas a *jigsaw* foi a escolhida porque, a nosso ver, ela permite um grande engajamento dos alunos durante as atividades e, por isso, tanto ela como o uso dos instrumentos ajudam a desmistificar a ideia de que física é tedioso.

Outro motivo importante é que, como já foi mencionado antes, a técnica ajuda na redução de conflitos raciais e violentos. Esse fator faz com que alunos de certas turmas não tivessem relações amistosas com outros, de tal forma que o atrito é intenso. Por isso, foi necessário cautela na hora de formar os grupos das atividades, para que nenhuma atitude extrema, por parte dos alunos, acontecesse durante as aulas. O material elaborado está no Apêndice A.

5.4 Aulas

Ao todo, sete aulas foram ministradas. A primeira, é a chamada oficina de história de vida. Resumidamente, o professor e os estudantes têm a oportunidade de se conhecer e criar vínculos afetivos a fim de criar um ambiente mais saudável ao longo das aulas. Em seguida, as cinco aulas de física, como mencionado no capítulo anterior, foram realizadas a partir da seguinte ordem:

a) Aula 1: MHS - Parte 1, dedicada a mostrar para os alunos a definição de um um movimento oscilatório e, através da música, associar essa oscilação a um marcador de ritmo, para as composições e fazer uma descrição rudimentar do movimento de certos instrumentos;
b) Aula 2: MHS - Parte 1 e Ondas - Parte 1. O foco dessa aula se manteve na explicação das oscilações. Contudo, a aula usa a energia gerada pelo movimento para revelar mais informações. Nela, também iniciamos o estudo das ondas, mostrando apenas a sua definição. A aplicação dentro da música

não é muito diferente da aula anterior, estando a diferença na parte de usar as cordas e a frente de onda do som para exemplificar algumas ondas;

c) Aula 3: Ondas - Parte 2 e Interferência. A continuação do estudo sobre ondas teve foco na descrição de seus elementos fundamentais, como o comprimento de onda e sua amplitude, além de termos descrito como as ondas se comportam quando duas ou mais interagem entre si. Nessa aula, o conteúdo possibilitou uma aplicação mais sensorial da música, porque, ao tocar dois ou mais instrumentos simultaneamente, é possível entender os conceitos abordados na interferência;
d) Aula 4: Introdução ao som. Com todo o conhecimento sobre oscilações e ondas, é possível definir o que é o som. Depois, a aula em questão também possibilitou que o estudante fosse capaz de diferenciar sons, a partir do estudo sobre altura, intensidade e timbre. Os instrumentos foram muito importantes nessa aula, pois auxiliaram a mostrar exemplos das qualidades estudadas;
e) Aula 5: Comportamento das ondas sonoras. Finalizando, a quinta aula teve foco em mostrar como som se comporta no ambiente e em cordas e tubos. Para isso, a música foi muito importante para mostrar não apenas o som em si, mas também a influência do material dos instrumentos na hora de tocar.

Nota-se uma forte presença dos instrumentos ao longo da aula. Além deles, também foi utilizada a teoria musical, através de conceitos como a harmonia, oitava, ritmo, melodia, compasso entre outros; e a notação musical, como a partitura e seus elementos. Outro fator, também comum às aulas, é a presença de trechos remetentes à história da música e da física, apresentando personalidades e informações de ambas as áreas. A adição desses conteúdos ajuda a reforçar tanto a presença da física dentro da realidade dos alunos, como o seu conhecimento sob o ponto de vista histórico e humano (BRASIL, 2000).

5.4.1 Mudança emergencial

Não se tinha o conhecimento do nível acadêmico dos estudantes para ter uma ideia melhor de como as aulas deveriam ser elaboradas. Consequentemente, o nível do material era mediano, partindo da ideia de que, pelo fato de serem estudantes de terceiro ano e, como o conteúdo abordado é, geralmente, visto no segundo ano, eles tinham um conhecimento prévio do conteúdo.

Infelizmente, na primeira aula de física foi notada grande dificuldade dos alunos, ficando perdidos na hora da exposição e das atividades. Pouco tempo depois, ao fim da aula, na sala dos professores, a professora de física dos estudantes destacou que, durante o segundo ano, não teve tempo suficiente para ensinar o conteúdo das aulas desta pesquisa de forma satisfatória. Sendo assim, foi necessária uma mudança considerável na organização e no nível das aulas.

Basicamente, as mudanças mais drásticas foram concentradas na mudança na tarefa individual e na meta coletiva. Primeiramente, a tarefa individual era, além da leitura do material do especialista, algumas questões a fim de fixar o que foi lido. Essas questões iam desde a interpretação textual até aplicação das equações. Com a mudança, a tarefa individual passou a ser apenas a leitura do texto.

5.4.1.1 Bingo cooperativo

A meta coletiva anterior era uma ou duas questões envolvendo todo o conteúdo da aula para serem resolvidas em grupo. A mudança na estrutura dessa atividade foi vantajosa para deixar as aulas ainda mais envolventes, que é justamente a aplicação de um bingo cooperativo.

Depois do momento de leitura e dos grupos de especialistas, uma cartela é entregue por equipe, contendo nove espaços que, juntos, os estudantes devem preencher. O conteúdo dos espaços foi escolhido para ser uma pergunta, uma frase para ser concluída ou, simplesmente, uma equação ou uma grandeza para ser escrita. Como essa ideia surgiu após as aulas já terem começado, só foi possível aplicá-la a partir da aula 3. Para estimular o engajamento dos alunos na meta coletiva, bombons eram entregues aos alunos cada vez que acertavam um quadrado do bingo. As cartelas feitas estão no Apêndice B.

5.4.2 Aula extra

Durante os encontros, os estudantes também pediram que, após as aulas previamente feitas, fosse ministrada uma aula extra com o objetivo de serem resolvidas apenas questões. A maioria entrou em acordo.

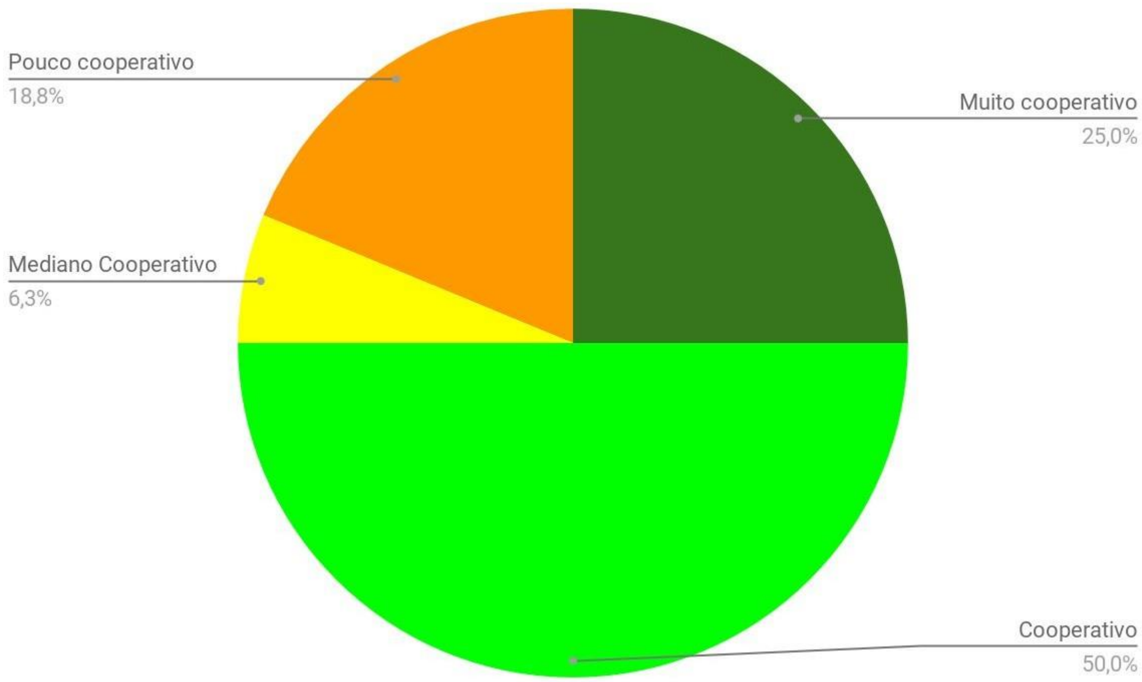
A aula em si foi realizada de forma tradicional, a fim de mostrar a maior quantidade de questões possíveis. Foram elaboradas dez questões, sendo que cinco seriam resolvidas para os alunos com o objetivo de treinar o pensamento lógico tanto para a física como para a matemática, baseando-se em seguir certos passos: identificar os conceitos relevantes nas questões; preparar os cálculos a partir das informações que as questões oferecem e, com ela,s identificar o que precisa ser encontrado; resolver, de fato, as equações, focando na matemática; e, por fim, analisar as respostas para avaliar se elas, fisicamente, faziam sentido (YOUNG, FREEDMAN, 2003). As outras cinco foram deixadas para que fossem resolvidas pelos alunos. No entanto, foi mostrado para os estudantes os passos iniciais para serem resolvidas, a fim de que eles continuassem sozinhos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse momento, serão discutidos os resultados referentes às avaliações individuais para a elaboração do “IDACI[5]$_{mod}$” e o *feedback* dos alunos participantes sobre a iniciativa das aulas como um todo.

Depois de calcular o índice individual dos alunos, cada estudante foi classificado a partir do nível de cooperatividade e, por fim, um gráfico foi feito a partir de uma análise quantitativa das notas de cada estudante. A seguir, no gráfico, cada fatia representa um intervalo de cooperatividade.

Gráfico 1: nível de cooperatividade dos estudantes.



Fonte: elaborado pelo autor.

No total, 16 estudantes foram avaliados, em que 4 foram muito cooperativos, 8 foram cooperativos, 1 foi mediano cooperativo e 3 foram pouco cooperativos. Percebe-se um resultado positivo referente às notas, pois 75 % dos alunos foram considerados como cooperativos de uma forma satisfatória, enquanto que 25 % deles teve desempenho aquém do esperado. O resultado favorável é, a nosso ver, em primeiro lugar, um reflexo do conhecimento dos estudantes perante à Aprendizagem Cooperativa, além de que, ao que parece, a maioria também ficou motivada pela interdisciplinaridade entre física e música, bem como conseguiu entender melhor os conceitos graças à didática adotada durante as aulas, que ajuda a criar um clima agradável dentro da sala de aula, de acordo com o depoimento da aluna Y.:

> "Eu entendi muito da parte das ondas, com os instrumentos ficou bem mais fácil de entender. E que a gente vai descobrindo instrumentos novos, sons diferentes. Eu gostei dessa parte e do professor também, a maneira de dar aula é diferente. Não é tão formal, mas também não é tão desleixado. É tudo misturado, e envolve os alunos sempre fazendo amizade, essa coisa toda."

Por outro lado, o resultado negativo pode ser atribuído ao comportamento pouco amistoso de alguns estudantes, especialmente na etapa de formação dos grupos, pois apresentavam bastante resistência quando eram designados para um grupo que tinha membros com quem não possuíam vínculo afetivo, porque sempre queriam ficar juntos dos amigos mais próximos, fruto de estudantes que ainda estão acostumados com as aulas tradicionais.

Contudo, apesar dessa resistência, foi observado que nenhum estudante obteve desempenho “cooperativo insuficiente”, mostrando que, mesmo assim, mostravam um pouco de cooperação. Outra observação é a de que nenhum aluno foi classificado como “extremamente cooperativo”, como consequência de não terem estudado previamente o conteúdo das aulas de forma apropriada. Com isso, os estudantes ainda apresentavam certas dificuldades. Mesmo com toda dedicação para que os alunos entendessem da melhor forma possível, cada pessoa tem um ritmo específico de aprendizado, então nem sempre todos os estudantes serão capazes de entender o mesmo conteúdo da mesma forma e no mesmo ritmo (CAIADO, 201-?), tanto é que constantemente as aulas de física eram interrompidas para recapitular conceitos básicos, tanto dela como da matemática, para que os estudantes fossem capazes de compreender as equações de forma eficiente. Essa questão também entra como justificativa para os resultados não-favoráveis, mostrando que há estudantes com ritmos de aprendizado de todas as velocidades.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se dizer sobre este trabalho que, em sete aulas, conseguiu-se mostrar o poder que a interdisciplinaridade e aprendizagem cooperativa possuem, porque 12 dos 16 estudantes conseguiram atingir um bom desempenho.

A aprendizagem cooperativa também favoreceu os estudantes a praticar sua oratória e trabalho em equipe. Por seu turno, a interdisciplinaridade ajudou tanto na facilidade de os estudantes se aproximarem melhor dos conceitos das aulas, quanto na atração dos estudantes pelos instrumentos.

Certos alunos ficaram com interesse em aprender a tocar alguns dos instrumentos que foram levados para as aulas, como o trompete e o clarinete, por exemplo. Além disso, uma aluna também demonstrou facilidade para tocar alguns deles, porque conseguiu manusear o trompete e a flauta transversal sem problemas, não só gerando o som, mas tocando algumas notas da escala musical. Também é importante destacar que essa estudante nunca tinha encostado nesses instrumentos antes, revelando uma musicista em potencial.

Nesse contexto, foi perceptível que as aulas os agradaram, além de mostrar que a dura realidade em que alguns vivem não é um obstáculo para que consigam alcançar seus objetivos, pois a escola é uma grande aliada na jornada que seguem. Dessa forma, a partir de profissionais engajados e que realizam um trabalho responsável, os estudantes podem conhecer uma nova perspectiva acerca do conhecimento e de seu estar-no-mundo, o que destaca ainda mais que educar é um ato poderoso de grandes proporções.

REFERÊNCIAS

Aprendizagem Cooperativa: a multiplicação solidária do conhecimento. **Jornal da UFC**, Fortaleza, jun. 2017. Ensino, p. 4.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio. Brasília: Ministério da Educação, 1999.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio. Brasília: Ministério da Educação, 2000.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. PCN + Ensino Médio: Orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Brasília: Ministério da Educação, 2002.

CAIADO, E. C. **Respeitando os limites de aprendizagem de cada aluno.** Disponível em: <https://educador.brasilescola.uol.com.br/orientacoes/respeitando-os-limites-aprendizagem-cada-aluno.htm>. Acesso em: 08 jun. 2019.

CAVALCANTE, J.; BUENO, F.; COSTA, C.; AMORIM, R. FÍSICA E MÚSICA: UMA PROPOSTA INTERDISCIPLINAR. **Revista Areté | Revista Amazônica de Ensino de Ciências**, [S.l.], v. 5, n. 9, ago-dez. 2012.

COCHITO, Maria Isabel Geraldes Santos. **Cooperação e aprendizagem**: educação intercultural. ACIME — Alto Comissariado para a Imigração e Minorias Étnicas. Portugal, 2004

CUNHA, U. A. **Aprendizagem Cooperativa em Química:** Estratégia para Promover Interação Discente em Sala de Aula. Dissertação (Mestrado em Química) – UFC. Fortaleza, 2014.

ESMERALDO, P. Ê. C. **A Matemática, a Música e a Acústica:** Uma proposta de ensino interdisciplinar. 2004. Monografia (Especialização em Metodologia do Ensino de Matemática) – Curso de Especialização em Metodologia do Ensino de Matemática, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2004.

FIRMIANO, E. P. **Aprendizagem Cooperativa na Sala de Aula**. Dispoível em: <https://www2.olimpiadadehistoria.com.br/vw/1I8b0SK4wNQ_MDA_b3dfd_/APOSTILA%20DE%20Aprendizagem%20Cooperativa%20-%20Autor-%20Ednaldo.pdf>. Acesso em: 03 julho 2018.

FREIRE, P. **Pedagogia do Oprimido.** Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1974. **Frequencies of Musical Notes, A4 = 440 Hz.** Disponível em: <http://pages.mtu.edu/suits/notefreqs.html>. Acessado em: 25 set. 2018.

FLETCHER, N. H.; ROSSING, T. D. **The Physics of Musical Instruments**. 2. ed. Nova York: Spinger-Verlag, 1998.

Flute acoustics: an introduction to how a flute works. Disponível em: <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/fluteacoustics.htmlacousticimpedance>. Acesso em 19 mar. 2019.

GARDNER, H. **Frames of Mind:** the theorie of multiple inteligences. 10. ed. [*S. l.*]: Basic Books, 1993.

GILLIES, R. M.; ASHMAN, A.; TERWEL, J. **The Teacher's Role in Implementing**

Cooperative Learning in the Classroom. [*S. l.*]: Springer, 2008.

GILLIES, R. M.; BOYLE, M. Teachers' reflections of cooperative learning (CL): A two-year follow-up. **Teaching Education**. v. 22, n. 1, p. 63-78, mar. 2011.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de Física:** Volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HANSEN, E. J.; STEPHENS, J. A. The Ethics of Learner-Centered Education: Dynamics That Impede the Process. **Change:** The Magazine of Higher Learning, v. 32, n. 5, p. 40-47, ago. 2000.

HAZEN, R. M. Física Viva. v. 2, Rio de Janeiro: LTC, 2006.

HENRIQUE, L. L. **Acústica Musical.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. HEWITT, P. G. **Física conceitual.** 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

JAPIASSU, H. **Interdisciplinaridade e patologia do saber.** Rio de Janeiro: Imago, 1976.

JOHNSON, D. W.; JOHNSON, R. T. **What is Cooperative Learning?** Disponível em: <http://www.co-operation.org/what-is-cooperative-learning>. Acesso em: 03 julho 2018

JOHNSON, D. W.; JOHNSON, R. T.; HOLUBEC, E. J. **Los nuevos círculos del aprendizaje:** la cooperación en el aula y la escuela. Virginia: Aique, 1999.

KONRAD, K. **Lernen lernen – allein und mit anderen:** Konzepte, Lösungen, Beispiele. Springer: Berlim, 2014.

KRUMMENAUER, W. L.; PASQUALETTO, T. I.; COSTA, S. S. C, O uso de instrumentos musicais para o ensino de acústica. **Física na Escola**, v. 10, n. 2, p. 22-24, .2009

KRÜGER, D.; PARCHMANN, I.; SCHECKER, H. **Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung.** Springer: Berlim , 2018.

LOPES, E. L. **PRECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO EM CÉLULAS COOPERATIVAS**: um movimento de educação para a autonomia. 2006. Monografia (Licenciatura em Química) – Curso de Licenciatura em Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

LÜCK, H. **Pedagogia interdisciplinar:** fundamentos teórico-metodológicos. Petrópolis: Vozes, 1995.

MASET, P. P. **El Aprendizaje Cooperativo:** algunas propuestas para organizar de forma cooperativa el aprendizaje en el aula. Disponível em: <http://www.ugr.es/~fjjrios/pce/media/7a-AprendizajeCooperativoAula.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2018

MONTAGU, A. **On being human**. Nova York: Hawthorn,1966.

NETO, M. A. **HISTÓRIA DO PRECE**: por Manoel Andrade Neto. [*S. l.; s. n.*], [200-].

NORMANDO, R. A. **Física Fenomenológica.** Fortaleza: Edições UFC, 1985.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**: Volume 2: Fluidos, Oscilações e Calor, Ondas. 4. ed. São Paulo, Blucher, 2002.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico**: Métodos e

Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. 2a. ed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013.

SHAW, M. E. A comparison of individuals and small groups in the rational solution of complex problems. **The American Journal of Psychology**, Champaign, v. 44, n. 3, p. 491-504, jul. 1932.

TAYLOR, J. R. **Classical Mechanics.** Sausalito: University Science Books, 2005.

The Jigsaw Classroom. Disponível em: <https://www.jigsaw.org/>. Acesso em 12 mai. 2019.

WALKER, J. **O Circo Voador da Física.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

YAMAMOTO, K.; FUKE, L. F. **Física para o ensino médio:** Volume 2: Termologia, Óptica e Ondulatória. 4. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2017.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física II: Termodinâmica e Ondas. 10. ed. São Paulo, Addison Wesley, 2003.

APÊNDICE A - LIVRO ESCRITO PARA AS AULAS, JUNTO ÀS AVALIAÇÕES INDIVIDUAIS

1 MHS - Parte 1

1.1 Movimento e oscilação

Recapitulando o que foi estudado no início da Cinemática, todo movimento que analisamos é observado a partir de um referencial, ou seja, um ponto de vista. Imagine que está andando na rua e repentinamente você observa um avião no céu. Agora, imagine outra pessoa em um lugar totalmente diferente do seu, mas observando o mesmo avião. Se pararmos para pensar, a situação mostra dois referenciais diferentes analisando o mesmo movimento.

Para começar nosso estudo sobre o movimento harmônico simples, precisamos entender como que um movimento pode ser caracterizado como harmônico, porque tudo que conhecemos muda de posição, ou seja, realiza algum tipo de movimentação. Dito isso, nosso estudo será dedicado ao **movimento periódico**, no qual o objeto *sempre percorre o mesmo trajeto, e repete as mesmas características de movimento — ou seja, suas características cinemáticas — em intervalos de tempo iguais*. Alguns exemplos são: o pêndulo de um relógio; os movimentos das mãos de um maestro e os movimentos de rotação e translação da Terra (tendo o Sol como referencial).

Dentro do estudo do movimento periódico há um caso particular, que é o **movimento oscilatório ou vibratório**. Sua diferença é porque o objeto, mesmo fazendo um movimento periódico, ele muda o sentido da trajetória periodicamente. Em suma, *o movimento oscilatório é um movimento periódico alternado em torno de uma posição de equilíbrio.*

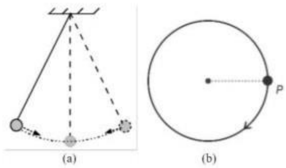


Figura 1 - Exemplos de movimento periódico: um pêndulo simples (a) e de um objeto realizando movimento circular uniforme (b).

Sua diferença pode ser notada com mais clareza se comparado com o movimento circular uniforme. Para ficar mais fácil de visualizar, vamos comparar o pêndulo de um relógio com as pás de um ventilador. O primeiro, é um movimento oscilatório porque o pêndulo altera o sentido de sua trajetória em relação ao seu centro (Figura 1a). Já as pás de um ventilador (que podem ser representadas pela Figura 1b) em movimento não realizam um movimento oscilatório, visto que repetem seu trajeto periodicamente, porém não mudam de sentido.

Sobre a tal posição de equilíbrio, ela é necessária para que o movimento seja de oscilação. Portanto, vamos lembrar que existem diferentes tipos de equilíbrio: estável, instável e neutro (ou indiferente). Recapitulando brevemente, o equilíbrio estável (Figura 2a) é aquele que se o corpo for perturbado para sair da posição de equilíbrio, ele retornará para a posição inicial através de uma força de restituição. No equilíbrio instável (Figura 2b), uma mínima perturbação no corpo faz este se afastar da posição de equilíbrio e não retornará para sua posição inicial. Por fim, no equilíbrio neutro (Figura 2c), qualquer que seja a perturbação fará ele se afastar da posição de equilíbrio, mas ele não retornará e nem se afastará da posição inicial se for abandonado.

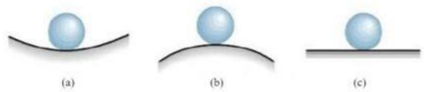


Figura 2 - Representação de equilíbrios estável (a), instável (b) e neutro (c).

Portanto, *para um movimento oscilatório é necessário que exista uma posição de equilíbrio* ***estável*** *para a mudança de sentido da trajetória.* Um exemplo dentro da música q é fácil de ver são os instrumentos de corda. Para produzir uma nota, o músico tensiona a corda e logo depois a libera. Graça a essa ação, a corda ficará vibrando até que volte a sua posição de equilíbrio.

1.2 Frequência, período e amplitude

Agora que sabemos a natureza de movimentos periódicos, chegou a hora de fazermos uma análise mais quantitativa, ou seja, uma análise mais matemática para entender como os objetos que realizam esses movimentos se comportam.

Lembrando que as vibrações realizadas por movimentos oscilatórios possuem equilíbrio estável e dependem de uma força restauradora, e essa força depende de como o corpo estica e contrai por conta de seu material (que está relacionado com a constante elástica k). A força restauradora da maioria desses corpos obedece a lei de Hooke:

$$F = -kx \tag{1}$$

Então, como sabemos que o movimento repete regularmente, precisamos saber quantas vezes essas repetições acontecem, e sabemos a partir da **frequência**.

A frequência f é uma grandeza fundamental nos movimentos periódicos que nos diz *quantas vezes a oscilação ocorre durante um intervalo de tempo definido.* Em outras palavras, ela diz *quantas vezes um evento é repetido durante um certo tempo*, ou seja, ela não se aplica só na Física.

A unidade de frequência no Sistema Internacional podemos definir como ciclo por segundo (ou ciclo/s). Visto que ciclo é uma grandeza adimensional (sem dimensão), a unidade de frequência é

$$f = \frac{ciclo}{tempo} = \frac{[1]}{[s]} = [s]^{-1} = Hz \tag{2}$$

o Hz é chamado de Hertz, em homenagem ao físico alemão Heinrich Rudolf Hertz. Dizer que, por exemplo, uma corda de guitarra vibra a 440 Hz significa que ela vibra 440 vezes por segundo. Outra informação que a frequência nos oferece é dizer qual é a nota musical que está sendo tocada. No caso 440 Hz é correspondente à nota lá 4 (um lá na quarta oitava.), outras notas com suas respectivas frequências na mesma oitava podem ser observadas na seguinte tabela:

Nota musical	Frequência (Hz)
Dó 4 (C4)	261.63
Ré 4 (D4)	293.66
Mi 4 (E4)	329.63
Fá 4 (F4)	349.23
Sol 4 (G4)	392.00
Lá 4 (A4)	440.00
Si 4 (B4)	493.88
Dó 5 (C5)	523.55

Tabela 1 - Notas musicais na quarta oitava. Entre parênteses está a representação das notas em cifra, muito útil para quem toca violão, por exemplo.

Percebe-se que quanto maior a frequência, mais aguda é a nota (isso será estudado com mais detalhes adiante). A necessidade de organizar as notas musicais e suas características dentro da música levou o homem a inventar a partitura, e com a grande variedade de notas musicais existentes, elas são separadas por claves (Figura 5). Então dependendo do instrumento, uma clave é mais apropriada para ele. Além desta, uma utilidade importantíssima na notação musical é o andamento musical, no qual sua unidade é o batimento por minuto (bpm) e ela nos diz qual é a frequência de variação das notas através de pulsos, que podem ser realizados por um metrônomo ou pelo movimento das mãos de um maestro durante um concerto.

Outra grandeza importante para o nosso estudo é o período, que está intimamente relacionado com a frequência. O período T nos diz o tempo necessário para a repetição de um ciclo. A relação com a frequência é simples: o período é o inverso da frequência e vice-versa. Portanto, se soubermos uma grandeza, automaticamente sabemos a outra através da relação:

$$fT = 1; f = \frac{1}{T}; T = \frac{1}{f} \tag{3}$$

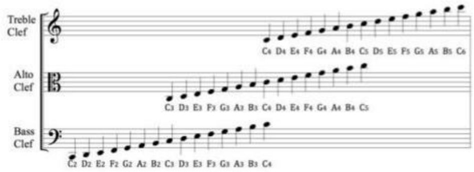


Figura 5 – posição das notas em cada clave. As claves de cima para baixo são: sol, para notas mais agudas; dó para notas médias e fá, para notas mais graves.

Voltando para a partitura musical, a presença do período aparece na maneira de representar o tempo das notas (e pausas) a serem tocadas, que estão representados na Figura 6. Nesse caso, é de extrema importância que o músico saiba qual é o número de batimentos por minuto estabelecido para que ele toque no ritmo correto. Para isso. Há uma ferramenta muito importante que une todas essas características: o compasso, facilitando a execução musical, ao definir a unidade de tempo, o pulso e o ritmo da composição ou de partes dela. O número de cima diz o número de batimentos que formam um compasso, já o de baixo mostra o número de vezes que uma semibreve pode ser dividida sem que o compasso seja desfeito.

Nome	Figuras de Som	Figuras de Silêncio	Duração
Semibreve	𝅝	𝄻	4 tempos
Mínima	𝅗𝅥	𝄼	2 tempos
Semínima	𝅘𝅥	𝄽	1 tempo
Colcheia	𝅘𝅥𝅮	𝄾	½ tempo
Semicolcheia	𝅘𝅥𝅯	𝄿	¼ tempo
Fusa	𝅘𝅥𝅰	𝅀	⅛ tempo
Semifusa	𝅘𝅥𝅱	𝅁	1/16 tempo

Figura 6 – Representação dos tempos das notas e das pausas na partitura.

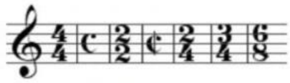


Figura 7 – Alguns exemplos de compasso.

A última grandeza fundamental é referente à característica de elasticidade do material quando ele executa um movimento oscilatório. Veremos que muitos desses movimentos podem ser reduzidos para sistemas mais simples, tais como o sistema massa/mola e o pêndulo simples. Devido a essa possibilidade, voltamos para o ato de exercer uma força para gerar a vibração. É aí que entra a **amplitude**, que está diretamente relacionada com o deslocamento da oscilação.

Eis o porquê: vamos considerar um baixista tocando seu instrumento, como mostra a Figura 8. Quando ele aplica uma força para fazê-la vibrar, essa força faz a corda se deformar para longe do seu ponto de equilíbrio, e sua intensidade é proporcional à distância que ela está longe do equilíbrio. Portanto *a amplitude A é o deslocamento máximo do movimento oscilatório.*

Figura 8 – No instante que o baixista solta a corda, ele definiu sua amplitude.

Se retornarmos à equação (1), podemos concluir que

$$F_{máx} = -kA \tag{4}$$

1.3 Osciladores simples

Nesse momento, partiremos para uma análise mais detalhada dos movimentos oscilatórios para sistemas mais simples, como o **sistema massa/mola** e o

pêndulo simples. Cada um deles podem representar movimentos simplificados de alguns instrumentos musicais. No entanto, vamos buscar compreender os sistemas por eles mesmos. Eles são constantemente utilizados no início do estudo de movimentos oscilatórios porque mostram sem muita complexidade as propriedades desse tipo de movimento.

O sistema massa/mola é composto de uma corpo de massa m preso a uma mola de constante elástica k. Desconsiderando forças dissipativas, quando aplicamos uma força F à esse corpo, ele fica oscilando com período e frequência bem definidos.

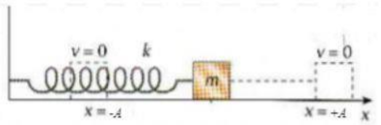


Figura 9 – Representação de um sistema massa/mola.

Recordando do que foi estudado antes, sabemos que nos extremos do movimento, a deformação é justamente a amplitude A, e após chegar na extremidade, o sentido do movimento muda. Ou seja, *na amplitude do movimento, a velocidade é zero*, e isso vale para **todos** os movimentos oscilatórios.

Por outro lado, se a velocidade é nula nas extremidades, *ela será máxima no centro da trajetória*, porque como a força restauradora é máxima na amplitude, ela empurrará/puxará o bloco com tudo até a posição de equilíbrio, *onde a força restauradora é zero.*

Figura 10 – destaque para a velicidade, amplitude e aceleração do corpo em um sistema massa/mola.

Através da Figura 10, percebemos que graças à mudança de velocidade, há a presença de uma aceleração. Pela Segunda Lei de Newton que descreve a força a partir da massa e aceleração do corpo, podemos reforçar que *se a aceleração é máxima nas pontas, a força também será.*

$$F = ma \tag{5}$$

Então como pode a aceleração ser máxima, mas a velocidade ser nula e vice-versa? Em primeiro lugar, quando a velocidade é máxima no centro é porque a mola já deformou tudo o que tinha de deformar e assim, quando o bloco passa no centro, não há mais força para ser aplicada — consequentemente, o bloco não acelera — e sua velocidade fica constante por um curtíssimo período de tempo, até que ele ultrapasse o centro e volte a ser puxado pela mola, reduzindo sua velocidade até a outra extremidade, repetindo então o ciclo.

O segundo oscilador simples é o **pêndulo simples**, que nada mais é do que um corpo puntiforme (ou seja, é tão pequeno que sua dimensão é desprezível e assim podemos considerar ele como um ponto) preso a um fio de comprimento fixo (ou seja, ele não pode ser esticado nem comprimido).

Assim como o sistema massa/mola, no pêndulo simples o objeto também oscila em torno da posição de equilíbrio, mas a trajetória do pêndulo é um arco de circunferência de raio L. Sendo assim, a trajetória x do corpo do pêndulo é:

$$x = L\theta \tag{6}$$

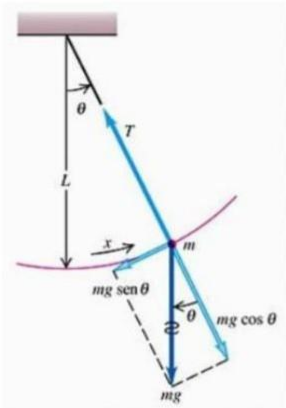


Figura 11 - Um pêndulo simples e as grandezas que estão presentes nele.

Ainda precisamos ter cuidado porque a força restauradora no pêndulo é a própria força gravitacional. Mas, como a trajetória é ao longo de x, no qual a direção positiva é anti-horária, a força restauradora nessa direção vai ser a componente x de mg. Lembre-se de que o sinal negativo é porque o vetor Fx aponta na direção oposta ao sentido positivo de x.

$$F_x = -mgsen\theta \tag{7}$$

Outra peculiaridade do pêndulo físico é que apesar do corpo descrever um movimento oscilatório, ele não necessariamente vai ser um movimento harmônico, isso porque a força não é proporcional ao ângulo em si, mas ao seno dele.

Mas até agora ainda não definimos o que é um movimento harmônico simples, e esse é o momento. Um movimento harmônico simples é um tipo especial de movimento periódico, no qual a força restauradora é proporcional ao deslocamento. Entretanto, essa força tem sentido contrário ao deslocamento (a Figura 10 mostra essa relação com mais clareza). Em suma, *o MHS é a forma mais simples de um movimento periódico.*

Então em qual circunstância o movimento do pêndulo será harmônico? Em primeiro lugar, precisamos entender que quando um ângulo é muito pequeno, podemos fazer a aproximação

$$sen\theta = \theta \tag{8}$$

Por exemplo, em radianos: sen (0,1) = 0,0998. Isso nos permite definir a força restauradora para o caso do pêndulo exercer um movimento harmônico.

Modificando a equação (7) com o auxílio das equações (6) e (8):

$$F_x = -mgsen\theta = -mg\theta \to F_x = -mg\frac{x}{L} \tag{9}$$

e assim, para ângulos pequenos a força é proporcional à própria coordenada. Se compararmos com a equação (1) podemos achar a constante k

$$F_x = -mg\frac{x}{L} = -\frac{mg}{L}x = -kx; k = \frac{mg}{L} \tag{10}$$

Mesmo com essa novidade para um movimento periódico, as semelhanças com o sistema massa/mola estão presentes no que se diz respeito à relação entre as mudanças de velocidade, aceleração e amplitude. Se não lembrar muito bem dela, a explicação está logo após a Figura 10.

Com todos esses dados coletados, as últimas grandezas que precisamos encontrar são a frequência e o período para esses sistemas em especial. Para a frequência nesses sistemas, é preciso cautela pois além da frequência que conhecemos no início dessa aula, também é importante conhecer a *frequência angular* ω.

$$\omega = 2\pi f \tag{11}$$

É essencial frisar a diferença entre f e ω: enquanto que f nos diz o números de ciclos por segundo, ω nos diz a quantidade de ângulos (em radianos) por segundo referente ao ciclo analisado. Todavia, se não tivermos f para ajudar

a encontrar ω, também podemos definir a frequência angular a partir dos elementos que compõem os dois sistemas. O cálculo é um pouco avançado para o ensino médio, porém os resultados para o sistema massa/mola e o pêndulo simples são, respectivamente:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{12}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \tag{13}$$

Perceba que na equação (13) substituímos k conforme a equação (10), então a equação (12) é uma representação mais generalizada da frequência angular. Por fim, esses dados também nos permite encontrar o período de oscilação para esses sistemas unindo as equações (3) e (11) e em seguida substituindo as equações (12) e (13) para cada oscilador:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \to T = \frac{2\pi}{\omega} \tag{14}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}; T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \tag{15}$$

Meta coletiva

1. A corda de um piano emite um lá 4, cuja frequência vale 440 Hz. **(a)** Qual é o período de oscilação e a frequência angular? **(b)** Calcule a frequência angular de outra corda que emite um lá 6, que é igual a quatro vezes a frequência da primeira corda. **(c)** Se considerarmos que o centro dessas cordas se comportam feito um sistema massa/mola, qual é a "constante de mola" da corda de 440 Hz, cuja a massa do centro é aproximadamente $1,7 \times 10^{-5}$ kg?

Avaliação individual

Nome:

Nome dos colegas de equipe:

1. Sobre o que aprendemos na aula de hoje, pinte os círculos dos intens verdadeiros.

◯ Uma oscilação é um tipo de movimento periódico em uma região de equilíbrio instável.

◯ O motivo da velocidade ser nula na amplitude de um MHS é porque a mola já esticou totalmente antes de voltar para sua posição original.

◯ Vários movimentos podem ser descritos por MHS.

◯ O período de uma mola depende da gravidade e da massa do corpo preso à ela

◯ Quanto mais longas as cordas de um piano, mais graves elas ficam.

Meta coletiva

1. A corda de um piano emite um lá 4, cuja frequência vale 440 Hz. **(a)** Qual é o período de oscilação e a frequência angular? **(b)** Calcule a frequência angular de outra corda que emite um lá 6, que é igual a quatro vezes a frequência da primeira corda. **(c)** Se considerarmos que o centro dessas cordas se comportam feito um sistema massa/mola, qual é a "constante de mola" da corda de 440 Hz, cuja a massa do centro é aproximadamente $1,7 \times 10^{-5}$ kg?

Avaliação individual

Nome:

Nome dos colegas de equipe:

1. Sobre o que aprendemos na aula de hoje, pinte os círculos dos intens verdadeiros.

◯ Uma oscilação é um tipo de movimento periódico em uma região de equilíbrio instável.

◯ O motivo da velocidade ser nula na amplitude de um MHS é porque a mola já esticou totalmente antes de voltar para sua posição original.

◯ Vários movimentos podem ser descritos por MHS.

◯ O período de uma mola depende da gravidade e da massa do corpo preso à ela

◯ Quanto mais longas as cordas de um piano, mais graves elas ficam.

2 MHS - Parte 2 e Ondas - Parte 1

Demos o pontapé inicial para o Movimento Harmônico Simples na aula anterior, aprendendo sobre as grandezas fundamentais e vendo sua presença em osciladores simples, tudo isso com a grande ajuda do universo musical. Agora, nessa aula vamos aprender outros detalhes do MHS que vamos precisar de uma matemática mais trabalhosa, mas fundamental para entender esse tipo movimento por completo.

2.1 Energia e grandezas cinemáticas do Movimento Harmônico Simples

Dando continuidade à aula anterior, podemos conhecer mais sobre esse tipo de movimento se analisarmos os tipos de energia presentes. Lembrando um pouco da Cinemática, um corpo possui energia cinética E_c e potencial E_p, portanto, sua energia total E é a soma delas.

$$E = E_c + E_p \tag{16}$$

Os valores dessas energias alternam entre si, enquanto que a energia total permanece constante. No MHS não é diferente, mas precisamos ter cuidado sobre o tipo de oscilador que estamos analisando, porque num sistema massa/mola a energia potencial é a *energia potencial elástica*, enquanto que num pêndulo simples há a presença da *energia potencial gravitacional*, onde x é a distância que o corpo está da posição de equilíbrio, e h é a distância vertical do objeto em relação à origem:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \tag{17}$$

$$E_{pel} = \frac{1}{2}kx^2; E_{pgr} = mgh \tag{18}$$

Com a ajuda da Figura 12, vamos perceber que nos momentos onde o objeto está passando pela origem a energia total é puramente cinética, enquanto que nas extremidades do movimento ela é puramente potencial. Em qualquer outro ponto além destes, nenhuma dessas duas energias é nula.

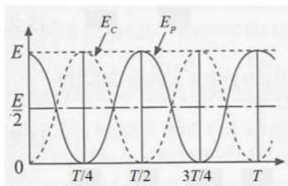


Figura 12 - Relação entre a energia cinética e a potencial

Isso acontece porque só temos energia cinética enquanto o corpo está de movendo, e só temos energia potencial quando a mola está deformada ou a massa do pêndulo está distante da origem.

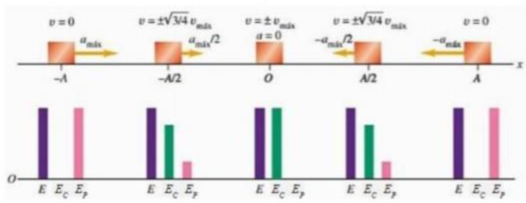


Figura 13 - Reprodução da Figura 10 com as distribuições de energia

Com a energia e a segunda lei de newton, é possível determinar as expressões para encontrar a posição, a velocidade, e a aceleração do objeto que oscila. O cálculo é bem avançado, então aqui aparece só as respostas:

$$x = A cos(\omega t + \varphi) \tag{19}$$

$$v = -\omega A sen(\omega t + \varphi) \tag{20}$$

$$a = -\omega^2 A cos(\omega t + \varphi) \tag{21}$$

Percebemos que a posição, velocidade e aceleração estão associados a um ângulo, porque temos um pouco de trigonometria. Também percebemos que esses ângulos mudam de acordo com o tempo, então x, v e a também mudam com o tempo. Na próxima parte será visto com mais calma a importância desse ângulo.

2.2 Relação entre Movimento Harmônico Simples e Movimento Circular Uniforme

De onde esses ângulos apareceram? E por que eles são importantes para o estudo do MHS? Para entendermos essa relação é necessário identificar que o Movimento Harmônico Simples pode ser uma projeção (ou seja, uma "sombra") de um Movimento Circular Uniforme. Para ficar melhor de visualizar essa afirmação, vamos prestar atenção na seguinte situação:

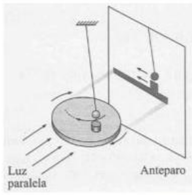


Figura 14 - Relação entre MHS e MCU.

Se prendermos uma bolinha suspensa num fio para realizar um movimento circular uniforme próximo a uma parede e, em seguida, colocarmos algo para iluminar lateralmente o movimento da bolinha, seremos capazes de observar que a sombra da bolinha realiza movimento harmônico simples.

Tirando várias fotos em sequência do movimento da sombra, podemos ver que a sombra realiza um movimento de "vai e vem" que, se colocarmos cada foto uma em cima da outra, vai aparecer o seguinte:

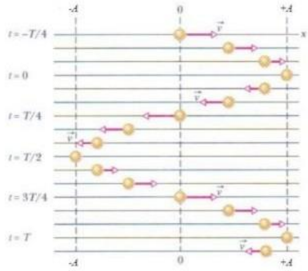


Figura 15 - Posição da sombra em cada instante de tempo.

Em um gráfico:

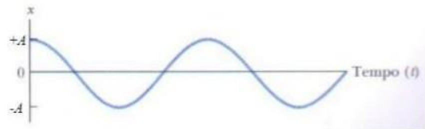


Figura 16 - Gráfico da posição da sombra da bolinha em função do tempo.

O motivo para o ângulo ser escrito na forma $\theta = \omega t + \varphi$ é porque φ é a chamada *fase inicial*, ela é quem vai dizer onde o movimento começa. Ou seja, no instante $t = 0$, $\theta = \varphi$ e assim veremos se o movimento tem origem no centro, nas extremidades ou em um local qualquer.

ωt nos diz o quanto que o ângulo vai variar à medida que o tempo passa. Vale lembrar que ω é a frequência angular do movimento e ele nos diz a quantidade de ângulos por segundo que é percorrida dentro do ciclo. Ou seja, quanto maior ω, mais rápido será o ciclo, e assim, a cada segundo que passa, o objeto mudará seu ângulo em ω, 2ω, $3\omega\ldots$ Esse valor será somado com a fase inicial para finalmente nos dizer a quantidade de ângulos percorrida pelo objeto.

Outra informação importante para o estudo do MHS, é que como agora temos as expressões para essas três grandezas, podemos encontrar as energias cinética, potencial e total em função delas:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 sen^2(\omega t + \varphi) \tag{22}$$

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 cos^2(\omega t + \varphi) \tag{23}$$

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 sen^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 cos^2(\omega t + \varphi) =$$

$$= \frac{1}{2}kA^2 \tag{24}$$

E assim finalizamos o estudo sobre o Movimento Harmônico Simples. O próximo e último passo nessa aula será conhecer a definição física de onda e seus elementos principais.

2.3 O que é uma onda?

Para finalizar a aula de hoje, vamos aprender o que é uma onda, o que a compõe e as formas na qual ela está presente no nosso dia a dia. E a partir dela, as aulas terão um contato mais próximo com a música, o que pode ser bastante atraente para muitos.

A onda é um conceito muito importante dentro da física, e seu campo de estudo é a Ondulatória. Ela está presente nas nossas vidas em várias formas e, obviamente, dentro da indústria musical ela é dominante. Isso é visível devido a quantidade instrumentos musicais e vozes que podem compor uma música, além de várias técnicas criadas para que a música seja agradável ao público, seja na edição dentro de um estúdio de gravação ou na construção de espaços com acústica apropriada para apresentações sem a perca de som.

Obviamente o som não é o único tipo de onda existente, porque áreas como Óptica, Astronomia e Física Nuclear, por exemplo, também possuem ondas dentro do seu campo de estudo. Como nossas aulas terão foco na música o destaque maior será pro som, mas as outras ondas não serão deixadas de lado para melhor percepção desses fenômenos na nossa realidade.

Por que tivemos que estudar o MHS para depois entrar nessa nova área? Vimos que o MHS serve para aprendermos como acontece um movimento oscilatório de forma mais fundamental. Portanto, ele nos ajuda a entender formas de oscilações mais complexas. Essas oscilações, no caso, terão seu estudo focado na forma de suas ondas e não no movimento em si.

Indo para o que interessa, a onda é uma perturbação que propaga energia, porém não propaga matéria. Para entendermos isso com mais facilidade, vamos imaginar um barco de papel flutuando em um lago. Quando jogamos uma pedra próximo a ele, ato da pedra caindo no lago criará uma perturbação (ou seja, uma onda), e a sua propagação passará pelo barquinho.Independente da velocidade da onda, ela não levará o barquinho.

Figura 17 - Um barquinho boiando na água não mudará de posição se estiver passando uma onda por ele.

Uma onda se propaga em vários sentidos, de várias formas, através de vários meios. A maneira que uma onda se propaga vai depender de sua **natureza**, ou seja, como ela é gerada; e de seu **tipo**, que diz respeito a como ela vibra. Sobre a natureza de uma onda, esta pode ser **mecânica** ou **eletromagnética**.

Uma onda mecânica é aquela na qual sua criação e propagação ocorre num meio material. Exemplos de ondas mecânicas são o som, as ondas do mar e as ondas sísmicas (ondas que geram terremotos). A Figura 20 também ilustra uma onda mecânica. *Quando fontes de energia elétrica e magnética são liberadas em conjunto, a energia liberada apresenta um aspecto de onda, que é a onda eletromagnética* (Figura 21). Ondas como essa são a luz, raios-x e as microondas.

Mesmo que as ondas eletromagnéticas apesar de não precisarem de um meio material para se propagar, elas podem ser bloqueadas.

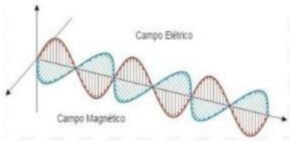


Figura 18 - Representação de uma onda eletroamgnética.

Os tipos de ondas se diferenciam entre **longitudinal** ou **transversal**. *A onda longitudinal vibra no mesmo sentido da propagação, enquanto que a transversal vibra perpendicularmente à propagação.* Apesar dessas diferenças, qualquer onda (qualquer movimento oscilatório) pode ser representado como uma onda transversal porque é uma maneira mais simples de mostrar tudo de fundamental que uma onda possui.

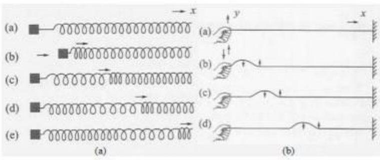


Figura 19 - Representação de uma onda (a) longitudinal e (b) transversal.

* * *

Meta coletiva

1. Frequentemente, quando ouvimos uma música, há aqueles momentos onde o som é tão intenso que sentimos "tremer" quando ele chega nos nossos ouvidos e, se o volume for muito alto o suficiente, o nosso corpo e outras coisas também treme. Qual a natureza e o tipo de onda que o som possui?

Avaliação individual

Nome:

Equipe:

1. Sobre o que aprendemos na aula de hoje, pinte os círculos dos itens verdadeiros.

◯ A energia total de um movimento oscilatório é uma alternância entre as energias cinética e potencial que ele possui.

◯ Uma relação entre MHS e MCU está na parte que o MCU funciona como uma projeção do MHS.

◯ Quando estamos analisando um Movimento Harmônico Simples, seu movimento está relacionado com o tempo, a partir de um ângulo na forma $\omega t + \varphi$, onde φ mostra o local de início do movimento e ωt nos diz a variação do ângulo conforme o tempo passa.

◯ O som funciona como uma onda mecânica, pois ele é capaz de se propagar no vácuo.

◯ Dizer que

$$E = \frac{1}{2}kA^2$$

é a mesma coisa que dizer que, a amplitude do movimento e o suas características físicas, influenciam na energia total da oscilação.

Meta coletiva

1. Frequentemente, quando ouvimos uma música, há aqueles momentos onde o som é tão intenso que sentimos "tremer" quando ele chega nos nossos ouvidos e, se o volume for muito alto o suficiente, o nosso corpo e outras coisas também treme. Qual a natureza e o tipo de onda que o som possui?

Avaliação individual

Nome:

Equipe:

1. Sobre o que aprendemos na aula de hoje, pinte os círculos dos itens verdadeiros.

◯ A energia total de um movimento oscilatório é uma alternância entre as energias cinética e potencial que ele possui.

◯ Uma relação entre MHS e MCU está na parte que o MCU funciona como uma projeção do MHS.

◯ Quando estamos analisando um Movimento Harmônico Simples, seu movimento está relacionado com o tempo, a partir de um ângulo na forma $\omega t + \varphi$, onde φ mostra o local de início do movimento e ωt nos diz a variação do ângulo conforme o tempo passa.

◯ O som funciona como uma onda mecânica, pois ele é capaz de se propagar no vácuo.

◯ Dizer que

$$E = \frac{1}{2}kA^2$$

é a mesma coisa que dizer que, a amplitude do movimento e o suas características físicas, influenciam na energia total da oscilação.

3 Ondas - Parte 2 e Interferência

Na última aula, finalizamos a descrição do Movimento Harmônico Simples (MHS) e começamos a estudar um conceito novo: a onda. Sobre ela, vimos que uma onda se resume a uma perturbação que se propaga num meio, além de como uma onda se manifesta e como elas se propagam. Nessa aula, vamos aprender mais sobre a propagação de ondas. A começar sobre sua velocidade de propagação, e em seguida veremos o que acontece quando as ondas interagem umas com as outras.

3.1 Velocidade de propagação de um pulso transversal

Como já sabemos dos tipos de propagação de uma onda, chegou a hora de entendermos a maneira que ela se propaga. Em geral, a velocidade v de uma onda em um determinado meio pode ser expressa como:

$$v = \sqrt{\frac{coeficiente\ de\ elasticidade\ do\ meio}{coeficiente\ de\ inércia\ do\ meio}} \tag{25}$$

Para explicar com mais clareza o que significa cada coeficiente, vamos imaginar que você criou uma onda em um meio qualquer. Como é de se imaginar, esse meio é composto por átomos. Então, *o coeficiente de elasticidade do meio é a facilidade desse pulso (ou seja, a energia) ser transferido de um átomo para outro*, enquanto que *o coeficiente de inércia é a quantidade de átomos do meio (entenda isso como a densidade do material)*.

Dando continuidade ao estudo, a partir da Equação (25) podemos definir a velocidade de um pulso de onda com base em seus coeficientes para cada meio específico:

$$v_{sol} = \sqrt{\frac{E}{d}} \tag{26}$$

$$v_{liq} = \sqrt{\frac{B}{d}} \tag{27}$$

$$v_{gas} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \tag{28}$$

Sólidos	
Vidro (20 °C)	5130 m/s
Aluminio (20 °C)	5100 m/s
Líquidos	
Glicerina (25 °C)	1904 m/s
Água do mar (25 °C)	1533 m/s
Água (25 °C)	1493 m/s
Mercúrio (25 °C)	1450 m/s
Gases	
Hidrogênio (0 °C)	1286 m/s
Hélio (0 °C)	972 m/s
Ar (20 °C)	343 m/s
Ar (0 °C)	330 m/s

Figura 20 - Velocidade do som para diferentes materiais.

Portanto, vemos que nos sólidos a velocidade é bem maior do que nos outros meios. Isso faz mais sentido porque nele seus átomos estão unidos com mais rigidez e mais próximos, além de, no geral, serem mais pesados.

As Equações (26), (27) e (28), mostram a velocidade de uma onda para um meio sólido, líquido e gasoso, respectivamente. Para o ensino médio elas são relativamente avançadas, tanto é que não entraremos em muitos detalhes. Porém, elas são uma grande ajuda para entender como a velocidade das ondas mudam de acordo com o meio.

Por exemplo, tanto nos sólidos como nos líquidos a velocidade vai depender da densidade d do material, que é um conceito conhecido. Por outro lado, nos sólidos há a grandeza E, chamada de *módulo de Young*, que representa a rigidez do material. Nos líquidos há B, que representa o *módulo de compressibilidade volumétrico*. Na realidade, um líquido pode ser comprimido, mas é necessário uma força extrema para isso.

Nos gases, há conceitos que são estudados no ensino médio (principalmente em Química e em Termodinâmica) como R, T e M, que são, respectivamente a constante universal dos gases, temperatura (em Kelvin) e massa molecular. Mas a novidade está no γ, que representa o *coeficiente de expansão adiabática*, que nos fala sobre seu comportamento em transformações gasosas. Isso é importante de se levar em conta devido a facilidade de expandir ou comprimir um gás, e por isso a velocidade será diferente, dependendo da pressão que ele se encontra.

No ensino médio, o que convém para essa aula de hoje é outra forma de calcular a velocidade a partir da equação (25). Imagine a partir da seguinte

situação: você está com uma corda e balança ela de forma a criar uma onda transversal que se propaga ao longo de seu comprimento. Se quisermos saber a velocidade de propagação do pulso, precisamos analisar quais coeficientes são apropriados.

É fácil de perceber que, quanto mais forte a corda está tensionada, ou até mesmo se balançarmos mais forte, o pulso sairá mais rápido. Outro fator é que essa velocidade também vai depender do peso da corda. Então quais serão os coeficientes de elasticidade e de inércia que nos mostrará a nova forma da equação (25)?

A elasticidade depende justamente da tensão feita para manter a corda flexível para gerar o pulso, como mostra a Figura 21. Já a inércia vai depender da massa mas não dela literalmente, porque há um conceito chamado *densidade linear*, que é a relação entre a massa de um objeto e seu comprimento, representada pela letra grega μ.

$$\mu = \frac{m}{L} \tag{29}$$

Ela é análoga à densidade d, a diferença está no fato de μ ser uma densidade unidimensional, enquanto que d é em corpos tridimensionais.

Com essas informações, da equação (25) encontramos

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \tag{30}$$

Figura 21 - Em um violão de seis cordas, as notas de cada corda são: mi 4, si 3, sol 3, ré 3, lá 2 e mi 2. Cada uma tem sua densidade linear. Quando se mexe nas tarraxas de um violão, a tensão nas cordas está sendo variada de forma a mudar a nota. Isso, também vai muda a velocidade de propagação da onda feita na corda

3.2 Elementos de uma onda periódica

Chega a ser redundante falar "onda periódica", porque a própria onda é a consequência de um movimento periódico, então não existe "ondas não-periódicas". Dentre os elementos fundamentais de uma onda, alguns já foram estudados ainda na parte de MHS, tais como a amplitude, período e frequência. Relembrando o que cada um significa: *a amplitude A* é o deslocamento máximo de um movimento oscilatório; *o período T* é o tempo para a repetição de um evento; e *a frequência f* é o quanto desse evento foi realizado em uma unidade de tempo.

Através de um gráfico, fica fácil de identificar cada uma dessas grandezas. Entretanto, uma novidade está no *comprimento de onda*, representado pela letra grega λ. Ela nos diz qual é *o comprimento, paralelo ao sentido de propagação, entre dois pontos repetidos da onda.* Para ficar mais fácil de enxergar como essa grandeza está presente, vamos prestar atenção na Figura 22 e conhecer mais sobre a onda.

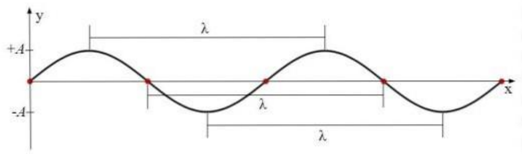


Figura 22 - Representação gráfica de uma onda com destaque para a amplitude e o comprimento de onda.

Para identificar o comprimento de onda, é preciso saber que ela é formada por cristas, vales e nós. As cristas são os locais onde a amplitude é máxima, melhor falando, onde a onda é mais alta. O vale é o oposto da crista e os nós são os locais da onda onde nem é máximo e nem mínimo. Também é possível chamar a região onde ficam as cristas e vales de *ventres*. Na Figura 22 os nós estão representados pelas bolinhas que ficam no eixo x. Portanto, *o comprimento de onda é definido pela distância entre duas cristas; dois vales; ou três* *nós.*

Outra grandeza importante é o *número de onda*, representado pela letra k, que simplesmente nos diz a *quantidade de comprimentos de onda por unidade de distância* e sua unidade é o radiano (rad) ou m^{-1}.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{31}$$

O motivo de ter 2π é porque como a onda é uma função senoidal, a função seno se repete toda vez que seu ângulo aumenta 2π. Com λ, podemos determinar a velocidade de uma onda a partir da velocidade escalar:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda\frac{1}{T} = \lambda f \tag{32}$$

Ou pelas grandezas do MHS e da Ondulatória:

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi}{T}\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \tag{33}$$

Perceba que na equação (33) foi usada a frequência angular, então é importante que você ainda lembre qual a diferença entre ω e f. Note também que foi usada a propriedade de divisão de frações que resulta no produto entre a primeira fração e o inverso da segunda.

O resultado $v = \lambda f$ é muito valioso dentro do estudo das ondas, pois ela pode ser uma ferramenta poderosa na resolução de problemas.

3.3 Interferência de ondas

Como é se esperar, há vários tipos de ondas e elas interagem umas com as outras frequentemente. Nessa parte da aula de hoje, vamos estudar como acontece essa interação e descrevê-las. Apesar de ser um conceito simples, sua descrição matemática costuma ser confusa para muitas pessoas. Por conta disso, começaremos com calma.

Para entender a ocorrência da interferência, é preciso entender o *princípio da superposição*. Ele nos diz que quando duas ou mais ondas se "chocam", elas se unem, seja somando ou subtraindo. Matematicamente isso fica:

$$y(x) = y_1(x) + y_2(x) + ... + y_n(x) \tag{34}$$

Consequentemente, a onda resultante será a soma das ondas separadas. $y(x)$ representa a amplitude resultante ao longo da superposição, enquanto que o termo da direita representa as ondas que serão unidas para formá-la. A Figura 23 mostra isso de uma forma bem simples.

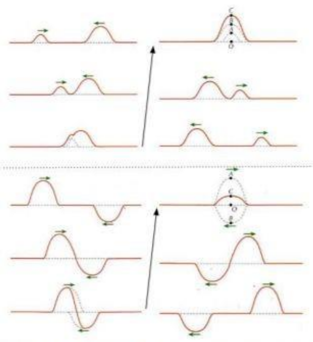


Figura 23 - Ilustração dos princípios da superposição e da independência de ondas.

Perceba que depois da superposição, elas continuam o mesmo trajeto como se nada tivesse acontecido, portanto, as *ondas são independentes* e assim também aprendemos o *princípio da independência das ondas.*

Agora, partindo para interferência propriamente dita, ela ocorre em duas formas: construtiva e destrutiva. A diferença entre elas é bem simples: na interferência construtiva a interação das ondas provoca um aumento da amplitude total, enquanto que a destrutiva provoca a resução.

Na música, a interferência é bastante utilizada na hora de afinar um instrumento em relação ao outro, especialmente em concertos, onde todos os instrumentos precisam estar afinados corretamente para não ter "vibrações indesejadas" ao ouvir as apresentações.

O procedimento para afinação de uma banda ou orquestra consiste em:

→ O maestro escolhe um instrumentista do grupo para que todos corrijam seus instrumentos em relação a ele;

→ Em seguida, o maestro diz a nota que o restante tocará a fim de cada um faça um ajuste preciso para que seu instrumento toque conforme o outro;

→ No final, o maestro pede que todos os naipes toquem ao mesmo tempo a nota usada durante a afinação a fim de certificar que todos conseguiram afinar corretamente.

Fisicamente falando, as "vibrações indesejadas" são sequências de interferências construtivas e destrutivas que são geradas quando um instrumento está desafinado em relação a outro, como mostra a Figura 29. Isso acontece porque a afinação serve para os instrumentos emitirem a mesma nota na mesma frequência, e assim a superposição de suas ondas não terá interferência destrutiva. Quando todos os instrumentos estão afinados, queme escuta tem a impressão que apenas um grande instrumento está tocando.

Uma mínima diferença de uma frequência em relação a outra causa um fenômeno chamado de "batimento" que é justamente a vibração que os músicos tanto evitam. Se um batimento é ouvido durante a afinação, ela já denuncia que um dos instrumentos está em desacordo com o outro. Sensorialmente, conseguimos escutar quando há intervalos de silêncio e intensificação do som, por exemplo. Mas sabemos que isso pode acontecer com qualquer tipo de onda.

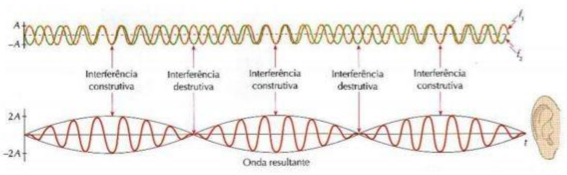


Figura 24 - Representação de batimentos. Supondo que as ondas de frequência f_1 e f_2 representam instrumentos que estão sendo afinados. Claramente podemos ver que há uma diferença entre o valor das frequências. Portanto, a onda resultante através da superposição possui a configuração de uma onda que possui batimentos.

Dependendo da diferença entre as frequências, um batimento pode ser rápido ou lento. Portanto, a frequência de batimento f_b entre duas ondas f_1 e f_2, sendo f_2 de maior valor é:

$$f_b = f_2 - f_1 \tag{35}$$

Agora, vamos descobrir mais detalhes de uma onda gerada pela interferência ou que sofre ela. Para isso, vamos ver como ela acontece em uma dimensão, depois em duas, e assim, desenvolver uma matemática mais elaborada.

Começando com a interferência unidimensional, imagine alguém tocando um violão e, como já aprendemos, ele gera pulsos em suas cordas. Se a mesma corda for tocada sucessivamente, vários pulsos serão gerados e assim haverá uma superposição entre eles. Para simplificar, vamos supor que a mesma nota está sendo tocada na mesma intensidade.

Figura 25 - Assinatura das ondas criadas numa corda de violão. Durante uma música, as cordas são estimuladas continuamente e assim vários pulsos são gerados, assim como inúmeras interferências.

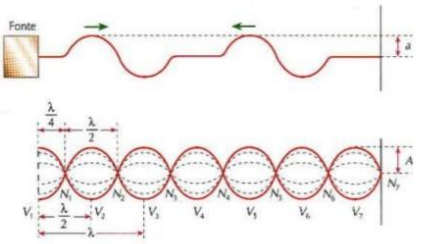


Figura 26 - Pulsos sofrendo interferência numa corda de extremidade fixa.

Analisando o comprimento de onda ao longo da corda, podemos perceber que*a distância entre nós e ventres (representados por N e V, respectivamente) consecutivos é igual a metade do comprimento de onda*:

$$N_1N_2 = V_1V_2 = \frac{\lambda}{2} \tag{36}$$

Sendo assim, *a distância entre um ventre e nó consecutivo é um quarto do comprimento de onda.*

$$V_1N_1 = N_1V_2 = \frac{\lambda}{4} \tag{37}$$

Não vamos estudar para o caso de extremidade solta pois não é plausível para o objetivo principal dessas aulas, que é ver a física dentro da música. Essa parte do conteúdo fica reservada às aulas normais que são dadas pelo currículo tradicional do ano letivo.

Para finalizar a aula, veremos a interferência em duas dimensões. Vamos imaginar suas fontes de ondas F_1 e F_2, uma do lado da outra, vibrando com a mesma frequência e "de forma igual", como se ambas as fontes começassem a vibrar no mesmo tempo e da mesma forma. Esse tipo de vibração diz que as fontes estão *em fase* (lembre-se de que a letra grega φ representa a fase da onda, ou seja, sua posição inicial). E quando as fontes estão em oposição de fase, é como se uma começasse vibrando para cima e outra para baixo, por exemplo.

Segundo a Figura 32, as ondas geradas pelas fontes criam pontos de interferência construtiva (a bolinha preta mostra a junção de duas cristas e a bolinha branca mostra a junção de dois vales) e destrutiva (bolinha com metade preenchida) que vão se expandindo à medida que o tempo passa.

Tratando-se de som, e até mesmo na música em si, imagine duas pessoas, uma um pouco longe da outra, tocando a mesma nota no mesmo instrumento, o padrão de interferência mais detalhado aprece na Figura 33. Apesar de mostrar muita informação, fica claro para perceber os pontos de interferência para duas fontes de onda.

Para uma descrição matemática mais detalhada da interferência em duas dimensões, vamos pegar um pedaço desse padrão mais detalhada e ver o que podemos tirar dele. Para facilitar o entendimento, vamos colocar os pontos P e Q em uma linha ventral e nodal, respectivamente. Com isso, imagine que F_1 e F_2 são alto-falantes, enquanto que P e Q são microfones.

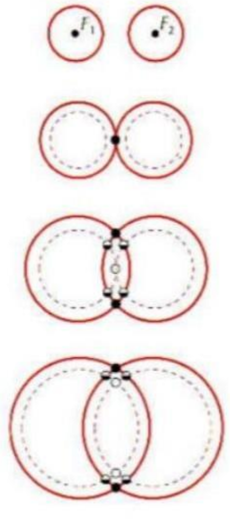


Figura 32 - Ilustração de uma interferência bidimensional.

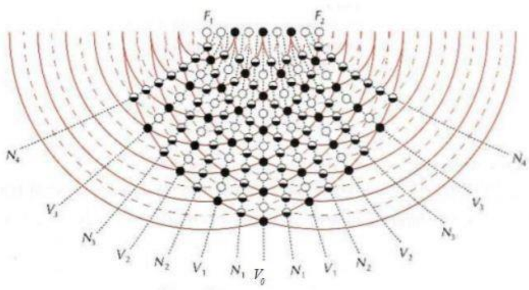


Figura 33 - Interferência bidimensional de uma forma mais detalhada.

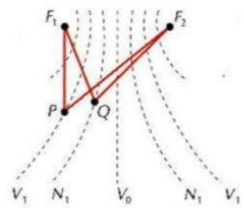


Figura 34 - Pedaço da interferência.

Como P está em uma linha ventral, isso quer dizer que ele está em um local de interferência construtiva. Então, *a diferença de distância entre P e as fontes é igual a um múltiplo par da metade do comprimento de onda gerado.*

$$PF_2 - PF_1 = p\frac{\lambda}{2}; p = 0, 2, 4, ... \tag{38}$$

Se $p = 0$, quer dizer que P está em V_0; se $p = 2$, P está em V_1 e assim sucessivamente. Para o ponto Q que está em uma linha nodal, a interferência é destrutiva, então a diferença de distância entre Q e as fontes é igual a um múltiplo ímpar da metade do comprimento de onda gerado.

$$QF_2 - QF_1 = 1\frac{\lambda}{2}; p = 1, 3, 5, ... \tag{39}$$

Então, se $i = 1$, quer dizer que Q está em N_0; se $i = 3$, Q está em N_1 e assim sucessivamente.

Uma informação que não pode ser deixada de lado é que as equações 41 e 42 *são válidas para fontes que estão em fase. Se elas estão em oposição de fase, será o oposto: ímpar para construtivo e par para destrutivo.*

$$PF_2 - PF_1 = p\frac{\lambda}{2}; p = 1, 3, 5, ... \tag{40}$$

$$QF_2 - QF_1 = 1\frac{\lambda}{2}; p = 0, 2, 4, ... \tag{41}$$

Por que todo esse trabalho? Essas equações nos ajudam bastante quando queremos saber detalhes sobre o que está acontecendo duarnte uma interferência. Podem não ser convidativas, mas são muito úteis. As equações nos ajudam a saber mais sobre a onda gerada e como ela se distribui pelo ambiente. Se mudarmos a posição das fontes e/ou a onda gerada, teremos um padrão de interferência totalmente diferente.

Avaliação individual

Nome:

Equipe:

1. Sobre o que aprendemos na aula de hoje, pinte os círculos dos itens verdadeiros.

◯ É possível determinar a velocidade de uma onda a partir de seu comprimento de onda e seu período

◯ A interferência nos ajuda a saber se um instrumento está afinado.

◯ $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ mostra que uma das características que afeta na velocidade de uma onda é o material da corda.

◯ Quando duas fontes de onda estão em concordância de fase, quer dizer que elas estão vibrando em igualdade.

◯ Como a junção de três nós forma um comprimento de onda, faz sentido dizer que $N_1N_2N_3 = V_1V_2V_3 = \lambda$.

Avaliação individual

Nome:

Equipe:

1. Sobre o que aprendemos na aula de hoje, pinte os círculos dos itens verdadeiros.

◯ É possível determinar a velocidade de uma onda a partir de seu comprimento de onda e seu período

◯ A interferência nos ajuda a saber se um instrumento está afinado.

◯ $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ mostra que uma das características que afeta na velocidade de uma onda é o material da corda.

◯ Quando duas fontes de onda estão em concordância de fase, quer dizer que elas estão vibrando em igualdade.

◯ Como a junção de três nós forma um comprimento de onda, faz sentido dizer que $N_1N_2N_3 = V_1V_2V_3 = \lambda$.

4 Introdução ao som

A partir de agora, as aulas estão de mãos dadas com a música, mas com a teoria musical como um todo. Isso porque nessa aula, vamos deixar de estudar ondas de uma forma generalizada e estudar um tipo específico com mais detalhes: o som. O que é? Como se propaga? Como diferenciar um som de outro? Essas e outras perguntas serão respondidas a partir de um estudo mais detalhado dessa onda que a todo momento está presente nas nosso dia a dia.

4.1 Ondas sonoras

O que entendemos como som é na verdade a mudança de pressão no ar que, quando detectada pelo nosso aparelho auditivo, é convertida em pulsos elétricos que vão para o nosso cérebro. Daí, somos capazes de escutar o que nos cerca.

Essa mudança de pressão não é a pressão atmosférica, mas sim uma compressão e rarefação do ar tão rápida que ocasiona a vibração que conhecemos. Como o som é uma onda, ela possui frequência. Porém, não conseguimos ouvir todas porque nosso corpo possui limitações. O intervalo que nosso ouvido é capaz de detectar fica entre 20 Hz e 20.000 Hz. Aquém ou além disso, os chamados, respectivamente, infrassom e ultrassom, não conseguimos ouvir.

Figura 36 - Se um concerto for realizado num local que possui boa acústica. O nosso corpo consegue sentir a vibração gerada pelos instrumentos.

Devido à natureza mecânica das ondas sonoras, é necessário um meio material para que a propagação seja possível. Como os meios materiais possuem massa e elasticidade, geralmente as ondas têm comportamentos bem complicados de serem descritos, porque sua propagação será tanto de forma transversal como longitudinal. Para não subir tanto o nível de dificuldade, vamos considerar que as ondas são geradas por fontes tão pontuais de tal forma que, se observarmos em três dimensões, a propagação será quase que esférica.

Continuando sobre a propagação, quando falamos sobre o som na maioria das vezes imaginamos as ondas no meio gasoso, mas lembre-se de que é possível ouvir o som tanto em sólidos como em líquidos. Por exemplo, os índios nativos da América do Norte tinham costume de colocar seus ouvidos à terra para identificar um grupo de cavalos distante. Essa técnica era importante para época porque assim eles eram capazes de saber se um grupo aliado ou inimigo estava se aproximando.

Partindo para um descrição mais detalhada, ondas sonoras costumam ser representadas a partir de ondas senoidais transversais. Porém, essas ondas representam a propagação longitudinal do som, mas como? No início foi dito que as ondas são geradas a partir da compressão e rarefação do meio material, e no meio gasoso, isso causa a variação da pressão do ar, ou seja, na compressão há mais moléculas de ar concentradas e vice versa, como mostra a Figura 37.

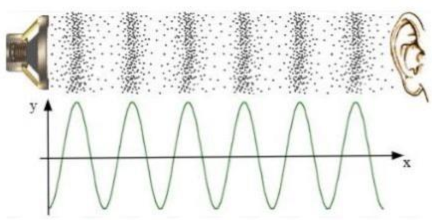


Figura 37 - Ilustração de como o som (onda longitudinal) é descrito através de uma onda transversal.

Agora fica fácil de perceber como uma onda transversal pode representar uma longitudinal. Para o caso do som, as cristas são equivalentes às áreas de compressão (as moléculas de ar estão mais unidas e assim possuem mais energia acumulada) e vice-versa. Ou seja, a amplitude da onda mostra a pressão do ar, porém é importante saber que os valores abaixo do eixo x não representam uma *pressão negativa*. Essa pressão na verdade é a chamada *pressão acústica*, que representa a diferença em relação à pressão atmosférica. Como assim? Vamos definir a pressão atmosférica como zero e assim o gráfico da Figura 37 nos mostra quais regiões da onda possui uma maior ou menor pressão em relação à pressão atmosférica. Portanto, se $y = 0$, a pressão acústica é igual à atmosférica.

A partir dessa representação, podemos entrar no conceito de *frente de onda*, que representa *os pontos da mesma que possuem a mesma fase*. Para ficar fácil de entender, vamos retornar para parte que estudamos interferência bidimensional. Ali, cada circunferência é uma frente de onda. Então, juntando o que aprendemos no nosso estudo de hoje, uma frente de onda representa os pontos que possuem a mesma pressão acústica que, consequentemente, também terão a mesma fase.

A velocidade do som no ar de 20° C é aproximadamente 344 m/s, porém é comum arredondar esse valor para 340 m/s porque há vários parâmetros que influenciam nesse valor (basta retornar para a equação (30) se você não se lembrar). Por mais que essa velocidade seja bem alta, bastam alguns metros para que seja possível perceber uma "falta de sincronia" entre o que vemos e o que escutamos.

Além fato da velocidade da luz ser 300.000.000 m/s, um exemplo simples de observar é quando estamos num estádio esportivos e, quando a arquibancada grita e se levanta ao mesmo tempo, é possível notar que há uma demora pro som chegar, quando estamos do outro lado do estádio.

Também há casos dentro da música. Em concertos/shows em grandes locais, é perceptível para as pessoas que ficam distantes do palco: os movimentos dos instrumentos chegam antes de escutarmos o som que reproduzem. Entretanto, esse fenômeno também acontece para os próprios músicos que tocam durante o concerto. Para grandes grupos musicais, o maestro precisa tomar cuidado na hora se sincronizar seus movimentos com os músicos mais distantes. Uma obra que se encaixa nesse caso é a Sinfonia nº 8 de Mahler, também conhecida como *Sinfonia dos Mil*.

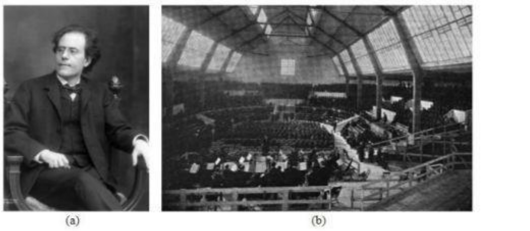


Figura 38 - (a) Gustav Mahler, regente e compositor checo-austríaco. (b) Concerto da Sinfonia dos Mil em Munique, 1910. Na foto, todas as pessoas que aparecem são integrantes da orquestra.

4.2 Qualidades do som - Parte 1

Quando falamos de qualidade, não necessariamente quer dizer se um som é melhor do que outro. Porém, são características que nos ajudam a perceber sons diferentes. As qualidades são divididas em três: altura, intensidade e timbre. Altura está diretamente relacionada à sensação de diferenciarmos sons graves de agudos, ou seja, ela é a qualidade que conseguimos perceber sons de diferentes frequências. Sons graves são ditos como sons baixos, enquanto que os agudos são os altos. Consequentemente, os sons baixos possuem uma baixa frequência e por aí vai.

Relembrando a aula sobre MHS, mais especificamente, a primeira parte, falamos brevemente sobre as frequências das notas musicais e das claves, na qual esta ajuda o músico a ler as notas da partitura. Como vimos naquela aula, a medida que as notas "sobem", sua frequência também cresce, tanto é que levou o homem a criar a clave, porque se ela não existisse, seria muito confuso na hora de ler as músicas.

Fisicamente falando, as relação entre altura e frequência foi estabelecida por Hooke em 1681 e, como já vimos, as notas possuem frequências bem definidas. O intervalo entre elas é, em relação à nota dó:

Nota	Dó 4	Ré 4	Mi 4	Fá 4	Sol 4	Lá 4	Si 4	Dó 5
Frequência (Hz)	264	297	330	352	396	440	495	528
Intervalo ($\frac{f_{maior}}{f_{menor}}$)	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2

A partir desse conceito de intervalo, podemos entender melhor sobre o que os músicos chamam de *oitava*. Dentro da teoria musical, o intervalo entre uma nota com frequência f e outra de frequência $2f$ caracteriza uma oitava. Como podemos ver na tabela acima, além da frequência ser o dobro, o número ao lado da nota também aumenta.

A segunda qualidade é a intensidade, que nos ajuda a diferenciar um som forte de um fraco, ou seja, *é a qualidade que diz respeito ao volume*. É importante fazermos uma desambiguação porque no senso comum temos o hábito de falarmos que um som alto é um som forte, mas fisicamente falando, sabemos que isso está errado.

Partindo para uma análise mais detalhada de como é possível diferenciar um som forte do fraco, vamos reforçar que ondas transferem energia. Vamos usar a Figura 37 para mostrar que *as variações de pressão também mostram variações de energia*. Como assim? Quanto maior a amplitude, maior a pressão que a frente de onda possui, consequentemente essa energia é a que faz o som ser forte ou fraco. Portanto, *a amplitude da onda está diretamente relacionada com sua intensidade*. Contudo, há a intensidade física I e a intensidade auditiva β.

Matematicamente, essa intensidade física pode ser descrita como

$$I = \frac{E}{A\Delta t} = \frac{P}{A} \tag{42}$$

onde I representa justamente essa energia que a onda carrega. Sua intensidade no SI é o J/m^2 ou W/m^2. Perceba que ela depende da energia E, da área A que a onda possui ao longo do intervalo de tempo Δt. Ou simplesmente podemos dizer que é a potência P longo do tempo Δt. Perceba que a intensidade possui nenhuma relação com a frequência, então é possível que frequências iguais possuam intensidades físicas diferentes (imagine dois instrumentos iguais tocando a mesma nota, mas um deles está tocando com mais força).

A intensidade auditiva β (também chamada de nível sonoro) é mais utilizada na prática porque diz respeito à nossa sensibilidade auditiva. Matematicamente escrevemos:

$$\beta = log\frac{I}{I_0} \tag{43}$$

A novidade está na constante I_0 que representa o chamado *limiar de audição*, que é intensidade mínima que nosso ouvido é capaz de escutar. Seu valor é $10^{-12}\ W/m^2$ e abaixo dele, nosso ouvido não consegue detectar. Também temos o chamado limiar de dor, ou $I_{máx}$ cujo valor é $10^0\ W/m^2 = 1\ W/m^2$. Portanto, se nossos ouvidos estiverem sujeitos a um valor maior ou igual a $I_{máx}$ vamos começar a sentir dor, de tão forte que é esse som.

Em suma, β nos diz como percebemos I dependendo da distância que estamos da fonte sonora. Ou seja, supondo que uma caixa de som emite um som com I constante, se ficarmos muito perto ou muito longe dela, teremos um diferente para cada distância. Sua unidade é o bel (B) mas costumamos usar o decibel (dB) com mais frequência. Para entender como essa unidade funciona, observe a tabela:

β (dB)	Atividade	Sensação auditiva	Exposição máxima antes que nossos ouvidos sofram danos irreversíveis
0	Silêncio absoluto	*Limiar de audição*	-
40	Sala de estar calma	Repousante	-
60	Rua animada	Incomodativo	-
90	Alarme de viatura	Fatigante	4 h
110	Serra elétrica	Perigosa	15 min
120	Passagem de um carro de F1	*Limiar de dor*	~ 4 min
140	Turbina de avião	Dolorosa	14 s

Por mais que a unidade mais usada seja o dB, a equação (46) nos dá a resposta em B. Se quisermos a resposta já em dB, podemos fazer

$$\beta = 10\, log \frac{I}{I_0} \tag{44}$$

Na música há uma ferramenta que informa aos músicos quando eles devem tocar com mais ou menos intensidade: a dinâmica. Ela aparece abaixo das linhas de partitura na forma de letras e sinais de $<$ ou $>$. Também aparecem na parte superior a partir de palavras.

Figura 39 - trechos de partituras com dinâmica.

A forma mais básica da escala da dinâmica é a seguinte:

Dinâmica	Nome	Comparação com a voz
ppp	*pianississimo*	Sussurro
pp	*pianissimo*	Quase um sussurro
p	*piano*	Voz suave
mp	*mezzopiano*	Voz normal
mf	*mezzoforte*	
f	*forte*	Falando alto
ff	*fortissimo*	Quase gritando
fff	*fortississimo*	Gritando
<	*crescendo*	Falando cada vez mais forte
>	*diminuendo*	Falando cada vez mais fraco

4.3 Qualidades do som - Parte 2

Mesmo se dois sons possuem mesma intensidade e altura, ainda é possível diferenciar um do outro: através do timbre. Graças a isso, conseguimos separar a mesma nota tocada por um piano, violino, gaita, flauta etc. O timbre é como se fosse a "assinatura" do som. Para entender melhor esse conceito, é necessário retornarmos para a representação senoidal de uma onda.

Acontece que ela é uma simplificação bem exagerada, dando a ideia de que aquele som não tem "imperfeições". Na verdade, uma onda sonora presente na natureza não é uma onda pura, e sim o resultado de várias frequências desiguais que ficam superpostas. Portanto, os sinais sonoros são bem mais complexos do que aparentam ser, como mostra a Figura 40. Perceba que cada instrumento, ou de maneira geral, cada fonte de som, vai gerar um timbre característico.

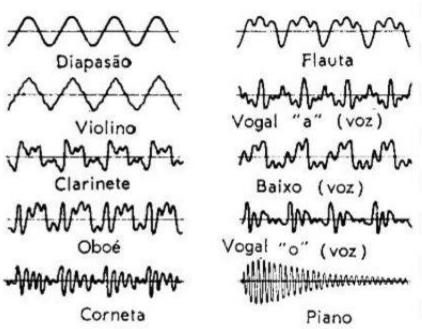


Figura 40 - Exemplos de timbres.

O canto gutural é uma técnica vocal que produz um som rouco, grave ou profundo, que se obtém através do apoio diafragmático (comumente usado na maioria dos estilos de canto), que é uma técnica de respiração, juntamente com distorções no som produzido nas pregas vocais e laringe, que produz um som grave e rouco, com uma agressividade característica. O estilo é muito usado em bandas de metal de estilo *death metal*, metalcore, deathcore e *trash metal*. Também é bastante comum no black metal, *gothic metal* e em algumas variantes do *symphonic metal*.

Figura 43 - George "Corpsegrinder" Fisher (1970-), vocalista da banda Cannibal Corpse.

Fisicamente falando, o canto gutural é formado por um zumbido de baixa frequência e um de alta frequência. Por mais que seja estranho, durante o canto gutural o cantor está emitindo mais de uma nota ao mesmo tempo.

Apesar dos sinais sonoros serem bastante complexos, é possível descrever e separar cada onda que dá a sua complexidade através de uma matemática bastante complexa para o ensino médio. Fique tranquilo que não faremos tais cálculos. Mas para fins de curiosidade, os métodos usados são as séries e transformadas de Fourier. Respectivamente, elas são escritas nas seguintes formas:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n cos(n\omega t) + b_n sen(n\omega t)] \tag{45}$$

$$\hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \xi} dx \tag{46}$$

Vamos imaginar a assinatura do clarinete que está na Figura 40, por exemplo. Para mostrarmos a equação dessa onda a partir da soma de senos e cossenos, usamos a série de fourier, que é a equação 48. $f(t)$ vai ser justamente essa onda que queremos descrever (Figura 41a). Se eu quiser decompor essa onda em outras mais simples (Figura 41b), usamos a equação 49, que é a transformada de Fourier. $\hat{f}(\xi)$ será o conjunto dos picos de frequência que formam a onda que originalmente é *f(x)* (Figura 41d).

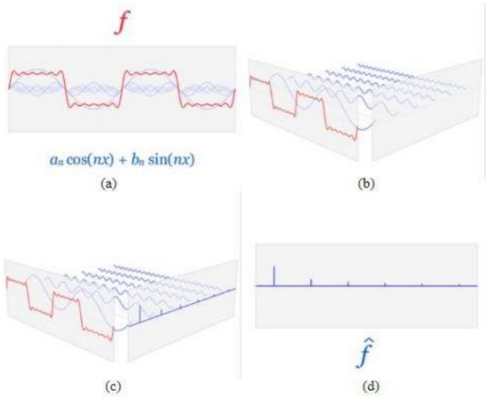


Figura 41 - Ilustração de como a série a transformada de Fourier funcionam.

Figura 42 - Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), matemático e físico francês.

Se não fossem as equações 48 e 49, a música digital não existiriria. Para deixar claro isso que acabou de ser dito, imagine que uma música acabou de ser gravada em um estúdio. A música que sai da gravadora está de uma forma muito bruta. Consequentemente, seu tamanho do seu arquivo é muito grande, característico dos formatos de áudio WAV, do inglês *Wave Audio File Format.* A razão para o seu tamanho é porque tudo que foi gravado está registrado, tanto o espectro audível como o inaudível, a partir de equipamentos profissionais. Utilizando a transformada de Fourier na música, é possível ver que existem alguns picos de frequência que são incrivelmente dominantes, como voz e instrumentos, e outros desprezíveis, como ruídos e as frequências que o nosso ouvido não detecta. O formato MP3 descarta os picos desprezíveis para economizar espaço. O resultado final é um arquivo bem menor e aproximadamente igual à original.

Avaliação individual

Nome:

Nome dos seus colegas de equipe:

1. Sobre o que aprendemos na aula de hoje, pinte os círculos dos itens verdadeiros.

◯ O som não se propaga no vácuo porque é uma onda eletromagnética.

◯ A pressão acústica tem relação com a qualidade da intensidade.

◯ Em $\beta = log\frac{I}{I_0}$, quanto maior o I, mais forte é o som.

◯ Em uma orquestra, podemos dizer que cada músico é que nem um pico de frequência de uma transformada de Fourier.

◯ O timbre é o que nos permite diferenciar um violão de um piano.

Avaliação individual

Nome:

Nome dos seus colegas de equipe:

1. Sobre o que aprendemos na aula de hoje, pinte os círculos dos itens verdadeiros.

◯ O som não se propaga no vácuo porque é uma onda eletromagnética.

◯ A pressão acústica tem relação com a qualidade da intensidade.

◯ Em $\beta = log\frac{I}{I_0}$, quanto maior o I, mais forte é o som.

◯ Em uma orquestra, podemos dizer que cada músico é que nem um pico de frequência de uma transformada de Fourier.

◯ O timbre é o que nos permite diferenciar um violão de um piano.

5 Comportamento das ondas sonoras

Dessa vez já sabemos mais sobre o som: suas características e o que nos pode ajudar a anos diferenciar vários sons, seja pelo ponto de vista físico ou fisiológico. Nessa aula de hoje, seremos capazes de aprender mais sobre o som quando este tem sua trajetória perturbada.

5.1 Reflexão, refração e difração

Quando uma onda encontra algum tipo de variação no meio no qual ela se encontra, seu comportamento será perturbado. Por exemplo, uma mudança no comprimento de onda provoca uma mudança na velocidade e na direção de propagação da tal onda. Como já foi estudado na Óptica, quando a luz passa de um meio para o outro, parte reflete e refrata. Isso acontece para qualquer onda e, obviamente, isso acontece para o som, então não é uma grande novidade.

Mas para simplificar a compreensão desse fenômeno, imagine uma onda sonora que está se propagando pelo ar e uma frente de onda acaba colidindo com uma parede. Como já falamos, parte dela passará a se propagar "dentro" da parede graças à refração, enquanto que parte dela continuará no ar graças à reflexão. Então, a parede funciona para o som, da mesma forma que uma piscina funciona para a luz, por exemplo. Mas nesse caso, como a mudança de meio (do ar para a parede) é mais abrupta, a maior parte é refletida enquanto que uma pequena parte é refratada.

Por isso que ouvimos pouca coisa quando encostamos nosso ouvido na parede para ouvir o que acontece do outro lado. Primeiramente, vamos usar a Figura 45 partir para uma análise de o que acontece com o som quando ele é *refletido*.

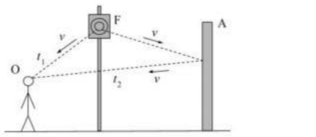


Figura 45 - Ilustração para o desenvolvimento da Equação (50)

Na *reflexão acústica*, digamos assim, dependendo da diferença de tempo

$$\Delta t = t_2 - t_1 \tag{47}$$

entre o som direto da fonte F (t_1), e o som refletido na parede A (t_2) ocasiona três fenômenos: eco, reverberação e reforço. Para caso, respectivamente, a diferença é:

→ Eco: $\Delta t \geq 0,1s$.
→ Reverberação: $\Delta t < 0,1s$.
→ Reforço: $\Delta t \cong 0s$.

Esse valor aparece a partir de um conceito chamado *persistência acústica*, que significa *o intervalo limite para que o nosso ouvido seja capaz de diferenciar dois sons diferentes*, que é justamente 0,1 s. A partir disso, conseguimos diferenciar cada um dos casos. Para facilitar como cada caso funciona na prática, imagine que você está tocando em um quarto fechado.

Para o eco, um intervalo maior do que a persistência acústica *significa que conseguimos diferenciar os dois sons de tempos diferentes*. Nessa sala que você está, ela precisa ter dimensões relativamente grandes para que você seja capaz de escutar o eco, porque *a distância mínima para percebê-lo é de 17 m.*

A reverberação quer dizer que não conseguimos diferenciar os dois sons. Entretanto, *o observador ouvirá um som prolongado.* Isso faz sentido porque devido ao fato da diferença de tempo ser menor do que a persistência acústica, e $t_2 > t_1$, é justamente a diferença entre os tempos que nos faz escutar o prolongamento. Para perceber a reverberação enquanto você toca, a sala precisa ter dimensões menores que 17 m mas não tanto.

Por fim, *o reforço nos permite escutar os dois sons simultaneamente. Consequentemente, teremos uma superposição na qual* ***escutaremos esse som com maior intensidade sonora***. Para esse caso, fica mais prático quando o observador O fica bem próximo tanto da fonte F como da parede A. Esse raciocínio também se aplica dentro da suposta sala na qual você toca. Para fins de comparação essa sala deveria ter dimensões um pouco claustrofóbicas.

A refração do som explicamos de uma forma breve no começo desse tópico, e de certa não precisamos nos estender muito porque isso faria com que a discussão desse tópico ficasse desnecessariamente avançada, pois para o som a refração é bastante complicada.

A difração já foi estudada na Óptica, porém é importante relembrarmos e vermos como ela ocorre para o som. No dia a dia, percebemos que não é obrigado estarmos observando uma fonte sonora para que sejamos capazes de escutá-la, porque mesmo que o som se propague em linha reta, ele (e qualquer outra onda) é capaz de *contornar os obstáculos. Esses obstáculos provocam uma* ***distorção da frente de onda***. Pela Figura 46 percebemos que um obstáculo não necessariamente precisa ser algo "material".

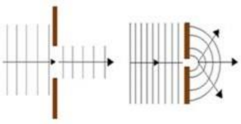


Figura 46 - Ilustração de como ocorre a difração.

No nosso dia a dia, imagine que você está cantando no seu quarto, de porta aberta, e mesmo assim as pessoas que não estão no mesmo cômodo que o seu conseguem te escutar graças à ajuda a difração (claro que as outras propriedades também ajudam), porque a porta aberta funciona como uma espécie de fenda para o som se expandir.

Nos instrumentos também há difração. Quando a frente de onda sai do instrumento, ela se expande no ambiente até chegar nos nossos ouvidos. Se isso não acontecesse, todas as pessoas que quisessem escutar o que está sendo tocado teriam que ficar dispostas em uma linha reta onde o instrumento passa.

Para termos uma ideia de quais dimensões o som sofre difração, lembre-se de que o nosso ouvido escuta entre 20 Hz e 20.000 Hz. Então, vamos usar a equação $v = \lambda f$ para o som:

$$\lambda_1 = \frac{v_{som}}{f_1} = \frac{340}{20} = 17m \tag{48}$$

$$\lambda_2 = \frac{v_{som}}{f_2} = \frac{340}{20000} = 0,0017m = 1,7cm \tag{49}$$

Portanto, os obstáculos precisam ter entre 1,7 cm e 17 m para a difração ocorrer.

Um estúdio de gravação é uma sala dedicada à gravação de som. Diferentes tipos de estúdios se adequam a gravações de bandas e artistas, dublagens e sons para filmes, e mesmo a gravação de uma orquestra. Um estúdio de gravação típico consiste de uma sala, o "estúdio" (Figura 47a) propriamente dito, onde os instrumentistas e vocalistas fazem suas execuções; e a "sala de controle" (Figura 47b), onde estão os equipamentos de gravação e manipulação do som. Geralmente existem salas menores chamadas "cabines de isolamento", que se prestam à acomodação de instrumentos altos como uma bateria ou amplificadores de guitarra, de modo a isolá-los da captação dos microfones que captam o som dos outros instrumentos ou vocalistas.

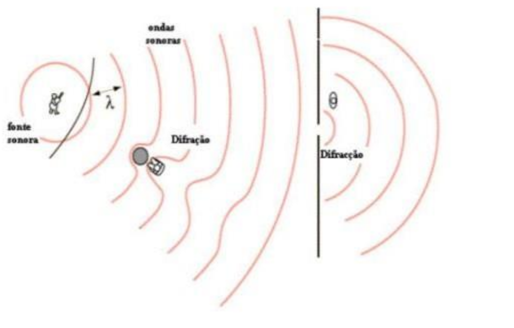


Figura 47 - Você pode transformar qualquer espaço num estúdio de gravação, desde que saiba quais equipamentos são necessários.

5.2 Impedância e ressonância

Um fenômeno que ocorre com as ondas mas que poucos conhecem é a *impedância*. Há impedâncias de vários tipos, mas para o contexto dessas aulas, a que nos convém é a *impedância acústica*. De uma forma geral, a impedância acústica reflete o grau de resistência que um meio oferece ao movimento. Para explicar melhor o que rola, vamos imaginar uma frente de onda que inicialmente está dentro de uma flauta transversal e se propaga em direção à uma das extremidades, como ilustra a Figura 48.

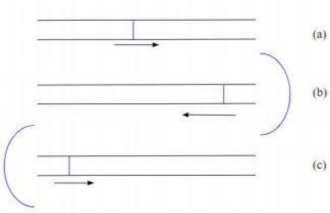


Figura 48 - Impedância acústica numa flauta transversal.

A flauta transversal é um tubo aberto em ambas as extremidades, e vamos supor que a extremidade esquerda é o bocal e a direita é o final do instrumento. Quando assopramos, estamos variando a pressão interna dentro do tubo e então geramos uma frente de onda no mesmo (Figura 48a). No momento que essa frente de onda chega no final da flauta, o que normalmente pensamos é que essa frente de onda sai do instrumento sem dificuldades. Porém, o que realmente acontece é que parte da onda sai da flauta através da difração e parte dela reflete para o interior(Figura 48b). Consequentemente, essa mesma frente de onda refletida irá para o buraco do porta-lábios e o processo repete na outra extremidade do instrumento (Figura 48c).

Esse fenômeno também nos permite conhecer mais sobre a física do instrumento. Como essa frente de onda vai e volta dentro do tubo, temos então um movimento oscilatório e assim, somos capazes de definir o período e frequência desse movimento porque conhecemos a velocidade do som e comprimento do tubo. Se temos a frequência da onda, sabemos qual nota está sendo tocada.

Figura 49 - Partes da flauta transversal. Os números 1 e 2 mostram, respectivamente, a coroa e o porta-lábios.

Por exemplo, o comprimento entre o final do pé e o porta-lábios é de aproximadamente 60 cm e a velocidade do som vale 345 m/s (dessa vez vamos fzer uma abordagem mais realista). Se a onda vai e volta, a distância total é de 132 cm = 1,32 m.

Então:

$$v = \frac{\Delta s}{T} \rightarrow T = \frac{\Delta s}{v} = \frac{1,32}{344} = 0,00382\ s \tag{50}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,00382} = 261,63\ Hz \tag{51}$$

Essa frequência é a mesma da nota dó 4, que é justamente a nota mais grave do instrumento, quando todos os buracos do corpo e do pé estão tampados.

Mas qual a resistência encontrada no meio, sendo que a onda não saiu do ar? Na verdade, a propagação foi perturbada quando a frente de onda estava em um local fechado e pequeno, que possui uma impedância própria, e passou repentinamente para um local aberto de impedância completamente diferente. Essa mudança abrupta mostra que não tinha concordância entre as impedâncias acústicas dentro e fora da flauta. Com esse raciocínio, fica mais fácil de entender como o som se propaga dentro de outros instrumentos, desde que você conheça suas partes.

Acontece que o som também estimula os materiais que também estão no ambiente. Quando as ondas encostam em qualquer material, eles também vão vibrar na frequência da onda que bateu neles. Algo muito interessante acontece quando essa frequência é igual à *frequência fundamental* do material. A frequência fundamental é a frequência de menor valor de uma série harmônica. Como assim? Vamos estudar ela com mais detalhes no tópico 5.3. Por enquanto, essa é a definição de frequência fundamental.

Voltando para a vibração, tudo no universo possui uma frequência fundamental. *Se a frequência do som coincide com a frequência fundamental do corpo, ele vai ganhar tanta energia que o corpo vai começar a vibrar e a amplitude dessa vibração é muito grande. O que aconteceu foi o fenômeno da* ***ressonância***.

Esse aumento de amplitude fica mais fácil de entender se você lembrar do princípio da superposição, e como são vibrações de frequências iguais, teremos uma interferência construtiva delas e assim a amplitude aumenta. Um exemplo clássico de ressonância é quando um cantor de ópera, que naturalmente possui uma intensidade absurdamente grande, emitindo uma nota próximo a uma taça de vidro/cristal. O ganho de energia da taça é tão grande que vibração a quebra.

Como é de se esperar, se você está tocando algum instrumento, ele também vai vibrar. Acontece que visualmente essa vibração é tão imperceptível que pensamos que o instrumento está vibrando sempre da mesma forma. Entretanto, isso não acontece.

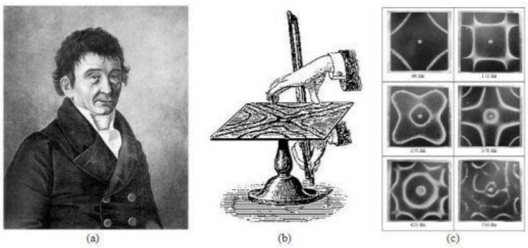


Figura 50 - (a) Ernst Florenz Friedrich Chladin (1756-1827), físico e músico alemão, também conhecido como "pai da acústica". (b) Ilustração de como as figuras foram criadas e (c) alguns padrões gerados pela vibração.

Se a vibração for igual a frequência própria, haverá locais que a vibração será mais forte que outras. Ernst Chladini (Figura 50a) publicou em 1787 um estudo sobre os *modos de vibração* de placas planas quando elas são estimuladas por algo que as faz vibrar. Nesse experimento, Chladini fixou uma placa de metal num suporte, jogou um pouco de areia em cima dessa placa e usou um arco de violino para fazê-la vibrar (Figura 50b). Dependendo da frequência de vibração da placa, desenhos eram formados nela (Figura 50c), que posteriormente foram chamados de *Figuras de Chladini.*

Para entender com mais detalhes como essas vibrações são formadas, é necessário esticar um pouco para o estudo de membranas. Basicamente, a vibração de uma membrana cria uma onda bidimensional. Como toda onda, ela é formada por cristas, vales e nós. Os modos de vibração são justamente os padrões que aparecem para cada frequência, como aparece na figura abaixo.

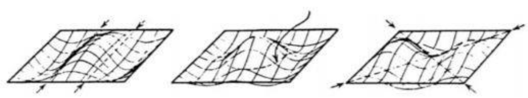


Figura 51 - Modos de vibração para uma placa quadrada. As setas e os tracejados destacam as linhas nodais para cada modo.

Nessa figura conseguimos ver com facilidade onde estão a cristas e vales de cada modo. Mas os nós em uma vibração bi/tridimensional não são pontos, mas linhas nodais. E é justamente nessas linhas onde a areia fica acumulada, porque nelas a vibração é menor. As Figuras de Chladini também são usadas na hora da construção de instrumentos como violão, violino, piano, tambores etc que são instrumentos onde boa parte do corpo se comporta como uma membrana. Os padrões ajudam o luthier (nome dado aos profissionais que constroem e fazem manutenção de instrumentos musicais) a construir o instrumentos sem que a vibração comprometa na qualidade do som.

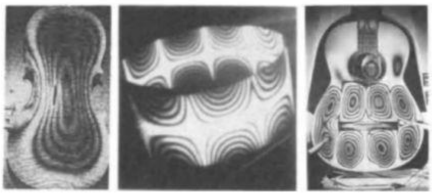


Figura 52 - Modos de vibração visualizados a partir de um interferômetro para um violoncelo, surdo e violão. A frequência de vibração para cada um é, respectivamente: 131 Hz, 835 Hz e 1010 Hz.

5.3 Cordas vibrantes e tubos sonoros

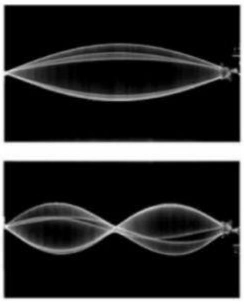


Figura 54 - Fotografias que mostram alguns dos modos de vibração de uma corda vibrante.

Já falamos brevemente sobre o comportamento e cordas. Aqui, vamos aprender mais sobre sobre as ondas formadas nelas e isso também vai nos ajudar a entender como as ondas surgem dentro de tubos. É a mesma coisa? Há diferenças? Já vimos que na realidade o movimento de uma corda é bastante complexo. Se tocarmos um piano ou uma guitarra, por exemplo, o movimento de suas cordas será tão complicado que a equação de seu movimento provavelmente não cabe em uma linha de texto. Por conta disso, vamos considerar apenas ondas senoidais simples.

Quando a corda está presa em ambas as extremidades e está tensionada o suficiente de tal modo que, quando criamos um pulso (seja com os dedos ou com um arco), ela fique vibrando com um tempo considerável. Esse pulso vai se propagar ao longo da corda e refletir nas extremidades, consequentemente a interferência entre eles cria uma onda estacionária, que transfere energia para o ambiente e assim ela gera o som que escutamos.

Como já estudamos anteriormente, o comprimento de onda pode ser encontrado a partir da distância de dois ventres ou três nós sucessivos. Se colocarmos nos modos de vibração os detalhes envolvendo o comprimento de onda, vamos ver o seguinte:

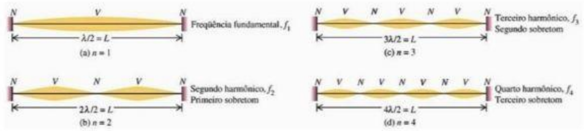


Figura 55 - Comprimento de onda em função do comprimento da corda.

Vamos chamar o comprimento da corda de L. Observando as Figuras 54 e 55 percebemos que o primeiro modo de vibração é a chamada *frequência fundamental* que a onda formada por ela é igual à metade do comprimento de onda. Então, se chamarmos essa frequência de f_1 a relação entre L e λ é:

$$L = \frac{\lambda}{2} \tag{52}$$

Prestando mais atenção na Figura 55, os modos de vibração seguintes (também chamados de *harmônicos*) são múltiplos da frequência natural e, consequentemente as ondas formadas por elas também são múltiplos da metade do comprimento de onda. Então para o segundo modo (ou segundo harmônico),

f_2, temos $L = \frac{2\lambda}{2}$, para o terceiro temos $L = \frac{3\lambda}{2}$. Portanto, vemos que o índice de f nos diz quantas vezes $\frac{\lambda}{2}$ será multiplicado. Escrevendo de uma forma mais geral:

$$L = n\frac{\lambda}{2} \rightarrow \lambda_n = \frac{2L}{n} \tag{53}$$

Onde n representa o índice que diz o modo de vibração. Então para f_1, $n = 1$ e assim sucessivamente. Usando a equação $v = \lambda f$ podemos chegar em:

$$\lambda = \frac{v}{f} \rightarrow \frac{2L}{n} = \frac{v}{f_n} \rightarrow f_n = n\frac{v}{2L} \tag{54}$$

Assim, conseguimos encontrar a frequência f_n que corresponde ao enésimo modo de vibração a partir da velocidade da onda e do comprimento da corda.

Lembra da equação da $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$? Substituindo na equação (57) temos

$$f_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}}, n = 1, 2, 3, ... \tag{55}$$

e então conseguimos entender como a frequência da corda muda apenas com suas propriedades físicas. Perceba que aequação 58 nos diz que a frequência é inversamente proporcional ao comprimento da corda e a densidade linear, enquanto que é diretamente proporcional à tensão.

Figura 56 - Comparação do tamanho das cordas de um baixo, violoncelo, viola e violino com as cordas de um piano. Também há nas teclas do piano até que notas cada um alcança.

Vamos discutir o porquê disso fazer sentido. Instrumentos como violino, cavaquinho e o *ukulele* são mais agudos porque possuem cordas mais curtas e mais finas/leves. Em contrapartida, um baixo e as cordas mais graves de um piano e de uma harpa são bastante longas e/ou grossas/pesadas. Para as cordas mais graves de um violão, por exemplo, é normal vê-las enroladas por um fio de modo que ela seja mais grossa sem precisar esticar seu comprimento (Figura 57). A tensão aparece quando estamos afinando as cordas. Se quisermos que a corda produza uma frequência maior, aumentamos a tensão que elas possuem e vice-versa.

Figura 57 - Para que uma corda que produza uma frequência mais baixa sem aumentarmos seu comprimento, enrolar-la-á com um fio para ela ficar mais grossa, dando esse aspecto de "mola".

Da mesma forma que as cordas, o som dentro de um tudo também se comporta como uma onda estacionária. Aqui, vamos agora entrar no território dos instrumentos de sopro, mas vamos ter dois casos para analisar: quando o tubo está aberto e quando está fechado.

Para o *tubo aberto*, a configuração das ondas é mostrada na Figura 58. Note que os ventres da onda tocam as extremidades do tubo. Sendo assim, para a frequência fundamental serão os ventres vizinhos, sendo separados por apenas um nó, como aparece na Figura 58a. De uma forma geral, a frequência da onda para um tubo aberto é:

$$f_n = \frac{nv}{2L}, n = 1, 2, 3, ... \quad (56)$$

Perceba que a fórmula é igual para o caso da corda vibrante. Isso acontece porque na corda nas extremidades temos dois nós. Mesmo que para o tubo aberto sejam dois ventres, matematicamente (e fisicamente) também faz sentido.

No caso do tubo fechado, em um lado temos um nó e do outro um ventre. Comparando com o tubo aberto, em vez da frequência fundamental equivaler à metade do comprimento, aqui será um quarto do comprimento de onda. Portanto:

$$f_n = \frac{nv}{4L}, n = 1, 3, 5, ... \quad (57)$$

Outra diferença que também percebemos é que para o tubo fechado n não varia de um em um. Se isso acontecesse, a equação seria que nem para o tubo aberto, e agora sabemos que é um caso à parte.

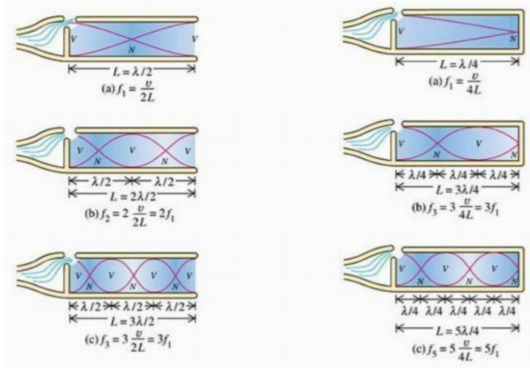


Figura 58 - Modos de vibração para os dois tipos de tubos.

Podemos até substituir v em ambas as equações, porém teríamos que usar a equação $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$. Mas se realmente fossemos analisar como esses parâmetros afetam a nota que está sendo tocada, levaríamos muito tempo e colocaríamos Termodinâmica dentro do conteúdo. Por conta disso, vamos analisar apenas o comprimento do tubo.

Instrumentos musicais de tubo aberto são bem conhecidos: flauta, saxofone, clarinete, oboé etc. Instrumentos de tubo fechado não são tão conhecidos, en-

tretanto existe a flauta de pã. Alguns podem até conhecer o instrumento, mas não sabem seu nome.

Como é de se imaginar, um tubo maior resulta em uma frequência menor, ou seja, a nota fica mais grave. Isso faz sentido porque o comprimento de onda é maior. Quando aumentamos os harmônicos, o comprimento de onda será menor e assim a frequência aumenta.

Figura 59 - Uma flauta de pã.

Avaliação individual

Nome:

Nome dos colegas de equipe:

1. Sobre o que aprendemos na aula de hoje, pinte os círculos dos itens verdadeiros.

○ Quando estamos numa sala vazia e fazemos algum barulho, escutamos o som mais "abafado" por conta da reverberação.

○ A ressonância é importante na hora da construção de um instrumento musical.

○ Quando aumentamos o comprimento de uma corda ou tubo, fazemos a nota ficar mais aguda.

○ A caixa do violão ajuda a deixar o som gerado pela corda mais fácil de se ouvir para se ouvir graças ao eco.

○ É possível que uma corda e um tubo produzam a mesma nota, mas não necessariamente eles precisam ter o mesmo comprimento.

Avaliação individual

Nome:

Nome dos colegas de equipe:

1. Sobre o que aprendemos na aula de hoje, pinte os círculos dos itens verdadeiros.

○ Quando estamos numa sala vazia e fazemos algum barulho, escutamos o som mais "abafado" por conta da reverberação.

○ A ressonância é importante na hora da construção de um instrumento musical.

○ Quando aumentamos o comprimento de uma corda ou tubo, fazemos a nota ficar mais aguda.

○ A caixa do violão ajuda a deixar o som gerado pela corda mais fácil de se ouvir para se ouvir graças ao eco.

○ É possível que uma corda e um tubo produzam a mesma nota, mas não necessariamente eles precisam ter o mesmo comprimento.

APÊNDICE B - CARTELAS DO BINGO COOPERATIVO

Aula 3

Equipe:

Grandeza que mede a rigidez de uma corda:	Tipo de interferência quando a amplitude da onda cresce:	Equação do número de onda:
Fenômeno que acontece quando há a interferência de ondas com frequências próximas:	A forma que a densidade linear pode ser definida:	Distância entre nós e ventres consecutivos:
Desenho que mostra um comprimento de onda:	Equação extremamente importante para as ondas:	Concordância de fase é o mesmo que:

Aula 4

Equipe:

Equação que é pode dizer se a intensidade de um som é perigosa para os ouvidos:	Valor para o limiar de audição: ---------------- Valor para o limiar de dor:	Um violão possui ________________diferente de uma harpa.
Na dinâmica, a notação ***pp*** tem uma ________________________m enor que a notação ***f***.	Um som agudo é aquele que tem alta: ( ) intensidade ( ) frequência ( ) timbre	Velocidade do som no ar:
O limiar de dor equivale a quantos dB?	Intervalo de frequência sonora que o ser humano consegue escutar:	Se uma oitava é o mesmo que 2x da frequência, duas oitavas corresponde a quantas vezes?

Aula 5

Equipe:

Equação para encontrar a frequência de uma corda vibrante:	Aumento da amplitude por conta da interferência entre onda sonora e o material:	No reforço, a qualidade sonora que é aumentada é: ( ) frequência ( ) intensidade ( ) timbre
Quando o tubo ___________ de tamanho, sua frequência diminui.	Distância mínima para a ocorrência do eco:	Quando uma corda é esticada, sua frequência irá _________________.
No violão, qual símbolo que diz a diferença entre uma corda de náilon e uma de aço?	Valor da persistência acústica:	Equação para encontrar a frequência da frente de onda dentro de um tubo sonoro:

APÊNDICE C - QUESTÕES ELABORADAS PARA A AULA EXTRA

6 Questões

Se necessário, considere $\pi = 3{,}14$.

1. A partitura da seguinte música informa que 108 bpm correspondem a uma nota semínima. Logo, o período dessa nota é de, aproximadamente, quantos segundos?

2. A corda de um piano emite um lá 4, cuja frequência vale 440 Hz. **(a)** Qual é o seu período de oscilação e frequência angular? **(b)** Calcule a frequência angular de outra corda que emite um lá 6, que é igual a quatro vezes a frequência da primeira corda. **(c)** Se considerarmos que o centro dessas cordas se comportam feito um sistema massa/mola, qual é a "constante de mola" da corda de 440 Hz, cuja a massa do centro é aproximadamente $1,7 \times 10^{-5}$ kg.

3. Um baterista está ensaiando com seus amigos para uma apresentaçaõ que fará no outro dia. No instante que ele pisa no pedal para fazer som no bumbo, o btedor atinge exatamente o centro da membrana. Ele aplica uma força de 300 N e desloca esse centro 0,5 cm, se o centro de comporta que nem um MHS, qual é a constante elástica da membrana do bumbo?

(a)

(b)

4. A corda de um violão vibra com frequência igual a 440 Hz, Um ponto em seu centro se comporta feito um MHS, com uma amplitude de 3,0 mm. Olhando a corda por cima, vemos que um músico dedilha a corda de forma que ela começa a vibrar de baixo pra cima. Com essas informações, escrevas as qeuações para a posição, velocidade e aceleração.

5. Todo músico afina seu instrumento antes de tocar. Imagine a contrabaixista da figura está ensaiando para um concerto. O contrabaixo acústico possui 4 cordas: mi 1, lá 1, ré 2 e sol

36

2. O comprimento delas entre a pestana e o cavalete é de 1,10 m. Quando ela vai afinar uma corda de densidade linear de 0,0024 kg/m, cria um pulso com velocidade de 160 m/s. Qual é a tensão que a corda está sujeita?

6. Quando uma criança está entrando no universo da música, é comum que ela comece por instrumentos mais simples. Um deles é a flauta doce, de fácil manuseio e, quando bem tocada, produz um som brilhante e fluido. Uma das poucas coisas que se sabe sobre a flauta doce é que dá para tocar tampando o "buraco da frente". Na flauta doce contralto, por exemplo, algumas das notas são: mi3, fá5 ou sol$\flat$5, lá5 ou si$\flat$5 e mi3. Respectivamente, a frequência de cada uma dessas notas é, aproximadamente: 164 Hz, 740 Hz, 933 Hz. Como a velocidade do som no ar é de 340 m/s, quanl é o comprimento e o número de onda de cada uma delas?

7. Um estudante está aprendendo a tocar violino. A corda mais grave tem frequência de 196 Hz (essa é a nota sol 3), possui densidade linear de 0,0015 kg/m e está esticada co muam tensão de 15 N. Qual é a velocidade do pulso gerado e seu comprimento de onda?

8. Imagine que está no show de uma banda que você curte bastante, está muito lotado e você

37

precisa encontrar seus amigos. Enquanto está caminhando no meio das pessoas, você passa por duas caixas de som. Em relação a você, uma delas tem intensidade física de $10^{-6} W/m^2$ e a outra é de $10^{-3} W/m^2$. Em qual das caixas você estava mais perto?

9. O piano possui algumass características que o faz ser muito difícil de se afinar. A primeira delas é o número de cordas, porque um piano comum possui 88 notas. Além disso, nas notas mais agudas, chega a ter 3 cordas por notas, o que fica bastante complicado do pianista afinar o próprio instrumento. Outra característica é que essas cordas precisam ficar bastante esticadas, de tal forma que se você encostar o dedo nelas, vai perceber que estão muito rígidas.

Como é uma atividade bem difícil, o pianista precisa pagar para que um afinador profissional venha fazer esse trabalho, pelo menos, uma ou duas vezes por ano, e não é barato. Para se ter uma noção, apenas para afinar costuma ficar entre 350 e 500 reais. Se for necessário trocar alguma peça, pode passar de 1000 reais facilmente. É um serviço que dura, mais ou menos, uma hora.

Supondo que esse afinador está no seu trabalho, ele estica uma corda aplicando uma tensão de 800 N, ela tem 40 cm e pesa 3,0 g. Qual é a frequência fundamental desse fio?

10. O trato vocal humano pode ser considerado como um tubo fechado que se estende desde os lábios sté as cordas vocais. Seu comptimento médio pode é de 17 cm, mas, obviamente,

varia de pessoa para pessoa. considerando a velocidade do som de 340 m/s, quais são as frequências dos três primeiros modos de vibração?