

Maria Lúcia Grillo
Luiz Roberto Perez
Organizadores

Física e Música

MNPEF

LF
EDITORIAL



Uma das mais belas frases de Cora Carolina, que mantenho postada na porta de minha sala, para alentar meu espírito em cada novo dia de trabalho na universidade, é

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina”

Não posso pensar em frase mais apropriada para descrever o que deve estar passando pelo espírito dos professores de escolas do Ensino Médio que, com muito sacrifício e dedicação, estão se aperfeiçoando no programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física! Na tarefa de ajudá-los a aprender e alegrar seus espíritos, estão envolvidos, com grande dedicação e profissionalismo, professores universitários de sessenta e três polos, espalhados por todo o país, e os membros da Comissão de Pós-Graduação da SBF, incluindo a Pró - Reitoria. Todos têm plena consciência de que, para que o programa tenha o êxito almejado, é absolutamente necessário disponibilizar instrumentos didáticos adequados para profissionais que, embora estejam ensinando a matéria no Ensino Médio, nem sempre tiveram acesso a uma formação satisfatória em Física. Para isso a Série MNPEF foi planejada – prover material didático adequado para os alunos do programa evitando as dificuldades de textos preparados para a formação sequencial tradicional dos cursos de licenciatura e bacharelado. Agradeço profundamente aos colegas que estão se empenhando nessa tarefa. A recompensa por sua dedicação provavelmente não virá de promoções ou recompensas acadêmicas, mas sim do lampejo de satisfação no olhar de cada aluno ao aprender um novo tópico através de seus livros!

Ricardo Galvão

Maria Lúcia Grillo
Luiz Roberto Perez
Organizadores

FÍSICA E MÚSICA

MNPEF



Comissão editorial da Série MNPEF

Anderson Gomes
Ildu de Castro Moreira
Iramaia Jorge Cabral de Paulo (Coordenadora)
Jorge Megid Neto
Rita Maria Cunha de Almeida

Copyright © 2016 Editora Livraria da Física
1ª Edição

Direção editorial

José Roberto Marinho

Revisão

Paula Santos

Projeto gráfico

Fabício Ribeiro

Diagramação e capa

Fabício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Física e música / Maria Lúcia Grillo, Luiz Roberto Perez, organizadores. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.

Vários autores.
ISBN 978-85-7861-422-5

I. Física - Estudo e ensino 2. Música - Acústica e física I. Grillo, Maria Lúcia. II. Perez, Luiz Roberto.

16-05014

CDD-781.1

Índices para catálogo sistemático:

I. Música: Acústica e física 781.1

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora.
Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei N° 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



EDITORIAL

Editora Livraria da Física
www.livrariadafisica.com.br

Apresentação da série

O Mestrado Profissional Nacional em Ensino de Física – MNPEF (PROFIS) é, como sugere o título, um programa nacional de caráter profissionalizante voltado a professores de Física da Educação Básica com vistas a melhorar, recuperar, atualizar o ensino de Física no país. É uma iniciativa da Sociedade Brasileira de Física, com apoio da CAPES e de várias Instituições de Ensino Superior que atuam como Polos do MNPEF.

O ensino de Física na Educação Básica precisa passar por mudanças significativas, pois está desatualizado em termos de conteúdos e metodologias. Embora possam constar nos programas das disciplinas, conteúdos de Física Moderna e Contemporânea não são abordados. Os conteúdos trabalhados são, majoritariamente, do século XIX e as metodologias de ensino são, predominantemente, aulas expositivas e resolução de exercícios, sem incorporar as tecnologias de informação e comunicação.

A proposta do MNPEF procura contribuir para essa mudança: o currículo enfatiza conteúdos de Física mais atualizados e o uso de tecnologias de informação e comunicação, mas também dá atenção a marcos históricos e epistemológicos no desenvolvimento da Física, assim como para teorias de aprendizagem. Além disso, o trabalho de conclusão

do mestrado deve incluir um produto educacional que tenha sido usado em condições reais de sala de aula e possa ser utilizado por outros professores de forma independente do mestrado.

Para alcançar os objetivos dessa proposta é preciso que o mestrando passe por um ensino diferente do tradicional e que disponham de materiais instrucionais adequados a esse ensino.

Materiais instrucionais incluem livros como os da Série MNPEF. São textos sobre conteúdos de Física, por exemplo, de Mecânica Quântica, com um enfoque mais conceitual e fenomenológico, porém sem descuidar de um formalismo básico. São também textos sobre o uso de estratégias como modelagem e simulação computacionais ou sobre marcos no desenvolvimento de Física. Outra possibilidade é a inclusão de textos que abordem tópicos como Física e música, Física e arte, Física e medicina, Física e engenharia, porém sempre com o objetivo de ensinar Física.

É nesse sentido que é feita a apresentação desta Série do MNPEF. O ensino de Física carece de livros que não sejam centralizados em questões de exames ou de problemas a serem resolvidos mecanicamente com aplicações de fórmulas.

Marco Antonio Moreira

Sumário

Apresentação	9
<i>Prof. Dr. Oscar João Abdounur</i>	
Prefácio	11
<i>Maestro Luiz Roberto Perez</i>	
Capítulo 1 – Os intervalos musicais	13
<i>Maestro Luiz Roberto Perez</i>	
Capítulo 2 – Os sentidos humanos.....	17
<i>Maestro Luiz Roberto Perez</i>	
Capítulo 3 – Fundamentos da acústica ambiental e musical no ensino de Física	21
<i>Profa. Dra. Maria Lúcia Grillo, Calazans Barbosa Marques Macchiutti de Oliveira e Suelen Nascimento da Costa</i>	
Capítulo 4 – Contexto histórico: antiguidade, idade média, renascimento, barroco, classicismo, romantismo e influências na música atual	37
<i>Profa. Dra. Maria Lúcia Grillo e Maestro Luiz Roberto Perez</i>	
Capítulo 5 – O violão no ensino de física	61
<i>Profa. Dra. Maria Lúcia Grillo e Prof. Luiz Pugginelli Brandão</i>	
Capítulo 6 – Uma abordagem interdisciplinar dos cordofones friccionados	77
<i>Profa. Dra. Maria Lúcia Grillo e Maestro Luiz Roberto Perez</i>	
Capítulo 7 – Roteiros de experimentos.....	101
<i>Profa. Dra. Maria Lúcia Grillo, Prof. Luiz Pugginelli Brandão, Profa. Vanessa Rodrigues da Conceição e Diones Luiz Gramelicky</i>	

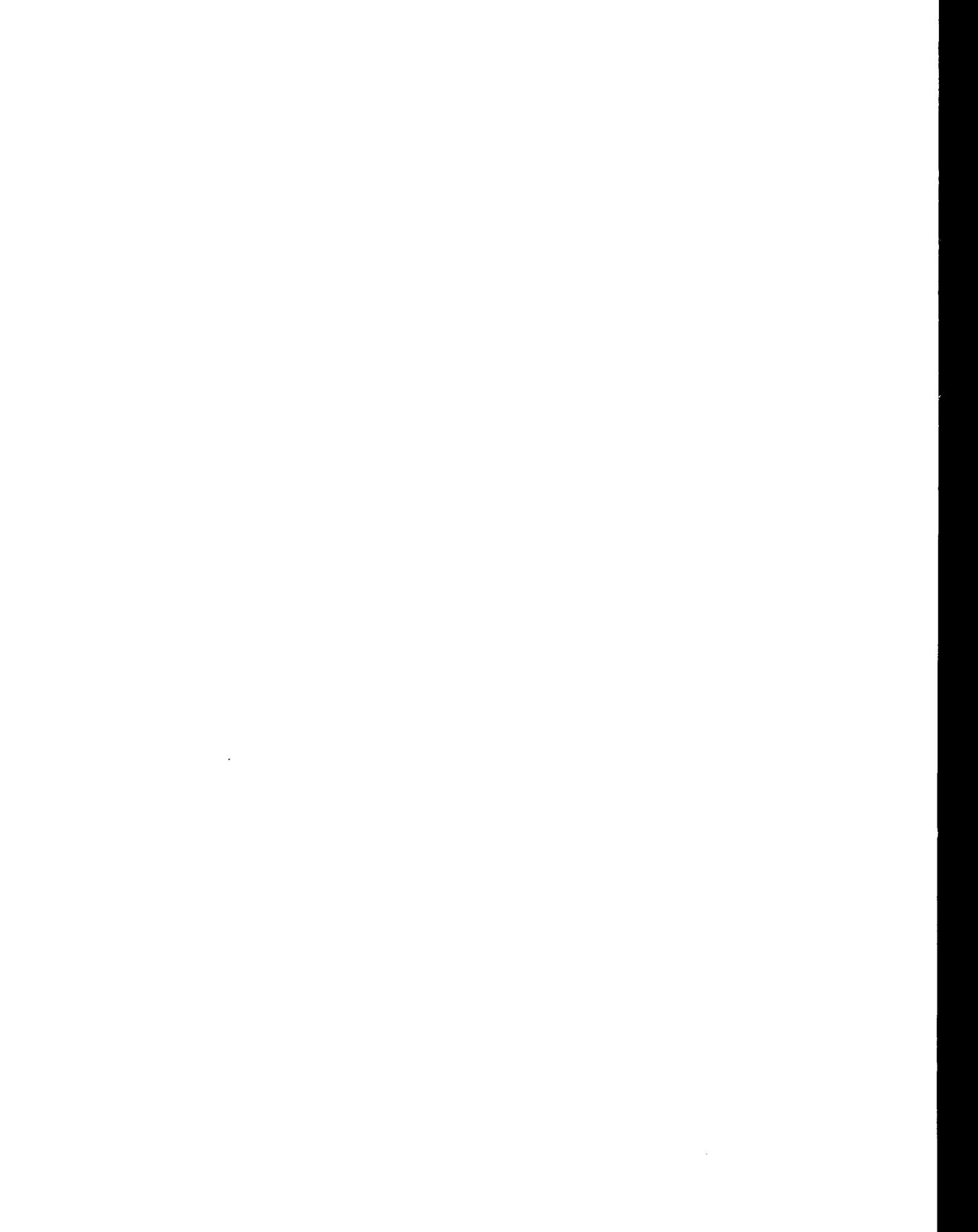


Apresentação

Prof. Dr. Oscar João Abdounur
(Professor Associado do Instituto de Matemática da USP e
Professor Visitante do Instituto Max-Planck de Berlin)

Este livro reúne em uma linguagem clara contribuições de estudos envolvendo música, física, percepção musical, história da música, história da ciência, acústica, apresentadas em contexto. Ele procura responder questões, presentes no nosso dia a dia, centradas no som e na audição, discutindo e racionalizando, sob uma ótica educacional e também histórica, fenômenos musicais envolvendo ou não instrumentos, nos quais muitas vezes não aprofundamos em suas possíveis explicações.

Trata-se de uma importante leitura para aqueles envolvidos com educação formal e informal, mas principalmente para aqueles preocupados em sensibilizar para a audição em uma cultura preponderantemente visual.



Prefácio

Maestro Luiz Roberto Perez

Um livro sempre nos traz a esperança de novas ideias e procedimentos, senão, qual seria o motivo para lê-lo? Se não acreditamos naquilo que transmitimos, melhor seria não professar tal conhecimento. Temos aqui um trabalho sincero com o intuito de apoiar o curso de mestrado profissional, voltado, principalmente, para professores de Física da rede pública do nível médio. Esperamos que seja útil também para outros professores de Física e estudantes de Licenciatura em Física, ou mesmo para interessados em conhecer um pouco mais de alguns aspectos da Acústica.

A Música foi uma sedução e também motivo de aprimoramento pessoal para Albert Einstein, que tocava violino e gostava de ler filosofia. O filósofo Henri Poincaré ganhou destaque por ter influenciado a sua famosa teoria da relatividade. Mas o que realmente quero salientar é a importância da interdisciplinaridade que pode provocar a multidisciplinaridade. Einstein era um exemplo disso. Kepler, além de matemático e astrônomo, era muito interessado por Música e chegou a escrever compêndios de Música. Schopenhauer, filósofo do “pior dos mundos” (conforme ele dizia), onde Deus seria um ser que se diverte com o sofrimento dos mortais: opiniões à parte, ele também era fascinado por Música e tocava flauta, tendo escrito sobre a metafísica da Música.

Um país que almeja ser evoluído e respeitado tem que cuidar da Educação de seus cidadãos plenamente. Como funciona a Educação no Brasil? A pessoa cursa o ensino fundamental, onde adquire ou não conhecimentos que irão levá-la ao ensino médio e, se houver interesse, depois à universidade. Torna-se necessário que haja nesse percurso uma orientação vocacional. Muitas pessoas entram na universidade sem saber no que consiste a área profissional escolhida, perdem tempo até descobrirem que não era aquela carreira exatamente de seu desejo e nisso se passaram 2 ou 3 anos. As profissões implicam em habilidades específicas e também talento para a área escolhida, portanto, não deve ser objeto de ilusão, fuga ou desejo de autoafirmação.

Propomos aqui o estudo da Acústica, que é uma área da Física que privilegia a audição como sentido e oferece uma opção profissional inusitada num mundo extremamente visual. Ouvir é tão importante quanto ver e melhora a percepção quando visão e audição atuam em conjunto. Esperamos que este livro suscite dúvidas que levem a um aprimoramento maior e force a busca de soluções inovadoras.

Além do texto deste livro, produzimos muitos outros artigos, textos e aulas em PowerPoint, que estão disponíveis no site: <http://sites.google.com/site/afisicanamusica>

Destacamos a importância do estudo das oscilações, das ondas em geral e especificamente das ondas sonoras. Há muitos livros que abordam esses temas. Temos algumas apresentações em PowerPoint de alguns livros, inclusive com animações, que sempre ajudam a motivar o aluno e melhorar o entendimento, além de citações de sites que fazem simulações interessantes.

Este livro é fruto dos trabalhos de ensino, pesquisa e extensão, desenvolvidos no LACUSTAMM (Laboratório de Acústica Ambiental e Musical) do Instituto de Física da UERJ. Para contatos: afisicanamusica@gmail.com

Capítulo 1

Os intervalos musicais

Maestro Luiz Roberto Perez

Segundo Sadie (1994), a Escala Geral, ou todos os sons musicais audíveis que podemos utilizar para fazer Música, compõe-se de aproximadamente 97 sons com frequências variando entre 27,5 Hz a 7.040 Hz. O que chamamos de intervalos musicais é justamente a distância entre um som e outro. Matematicamente, o intervalo é medido pela razão entre as frequências. Ao invés de trabalharmos com números de frequências (27,5 Hz), usamos na Música nomes próprios da linguagem musical, tirados por Guido D'Arezzo, no século XI, das sílabas iniciais de um hino a S. João Batista. Como exemplo, podemos citar a escala de Dó Maior: DÓ RÉ MI FÁ SOL LÁ SI DÓ, que substituem os números de Hz das frequências utilizadas na Física/Acústica e na Matemática. O intervalo de Dó para Ré é uma segunda maior, de Dó para Mi é uma terça maior, de Dó para Fá é uma quarta justa (DÓ RE MI FÁ – lembrando que conta-se o intervalo do ponto de início, que é o primeiro grau, nesse caso o Dó). Da nota Dó para a nota Sol o intervalo é uma quinta justa, de Dó para Lá é uma sexta maior, de Dó para Si é uma sétima maior e finalmente de Dó₃, por exemplo, para Dó₄ (o número ao lado é um artifício usado para descrever melhor ambos os Dós) é uma

oitava justa. Os intervalos podem ser: Justos (4^{as}, 5^{as} e 8^{as}), maiores e menores (2^{as}, 3^{as}, 6^{as} e 7^{as}), aumentados e diminutos (uníssonos, 2^{as}, 3^{as}, 4^{as}, 5^{as}, 6^{as}, 7^{as} e 8^{as}) (KÁROLVI, 2002).

Conforme Grillo e Perez (2013), no livro *A Física na Música*, no Capítulo 1, p. 14, “Os intervalos são a chave mestra para se penetrar na linguagem musical no que se refere à sua melodia e à sua harmonia”. Os diletantes não se importam com esse conhecimento dos intervalos musicais, pois repetem incessantemente a música, muitas vezes com erros de afinação por falta de estudo dos intervalos. E depois que o cérebro registra a mensagem musical, certa ou errada, fica difícil a correção ou modificação técnica do texto musical. Os corais, de um modo geral, por executarem a música mais por repetição do que por entendimento real dos intervalos musicais, estão sujeitos a enganos e erros que se repetem por falta de estudo dos intervalos. Poderíamos fazer uma analogia dos intervalos com a tabuada em matemática, e o que está por trás das notas realmente são números de Hz (frequências), e a escala musical temperada é uma Progressão Geométrica (conforme veremos no Capítulo 3).

Nas orquestras, a afinação é parte primordial para todos os músicos e é bem mais complexa do que nos corais. Há instrumentos com diversos tipos de mecanismos de produção do som; como exemplo, uma flauta (embocadura livre) e um oboé (palheta dupla), que têm princípios completamente diferentes para produção sonora e quando tocam juntos têm de ficar atentos para que as frequências não variem ligeiramente. Portanto, a orquestra é formada por músicos de quem se exige muito mais conhecimento e dedicação. Quando o nível técnico é muito alto, essa dedicação, dos cantores e instrumentistas, torna-se igual.

Estudar os intervalos musicais, além de ser necessário para um eficiente estudo da Música, é um excelente, senão um dos melhores aliados da recomposição de neurônios no cérebro. As pessoas, atualmente, com a tecnologia facilitando

muito a vida, se acostumaram a ter tudo pronto em segundos. Mas nesse estudo dos intervalos, se “perde” algum ou bastante tempo para memorizá-los. Há vários processos para isso acontecer mais rápido e de uma forma consistente.

Referências

GRILLO, M. L.; PEREZ, L. R. (Org.). **A Física na Música**. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2013.

KÁROLVI, O. **Introdução à Música**. São Paulo: Martins Fontes, 2002.

SADIE, S., **Dicionário Grove de Música**, Rio de Janeiro: Zahar, 1994.



Capítulo 2

Os sentidos humanos

Maestro Luiz Roberto

Sentir é quase perceber! Sentir é um ato mais primitivo, instintivo, ligado às nossas origens remotas nas cavernas. Perceber é usar nosso cérebro para explicar para si mesmo e para outros humanos o fato ou o ato experimentado. Alguns animais têm sentidos mais apurados que os nossos. O cão tem um olfato e uma audição muito mais abrangente que a nossa. Os predadores, como leões, tigres e lobos, têm uma visão noturna impossível para os humanos (são capazes de enxergar no infravermelho). A nossa habilidade com as mãos moldou praticamente o que somos hoje. O tato, que na maioria das vezes passa como se fosse um sentido menor, foi fundamental para a nossa evolução humana. tocar instrumentos, criar e manipular ferramentas, construir coisas são algumas de uma infinidade de atividades que envolvem o tato.

Hoje temos um quadro sensitivo 90% voltado para a visão. A vida humana se tornou muito visual e isso inibe os outros sentidos. Quando vamos a um restaurante, por exemplo, e recebemos um prato bem enfeitado com várias cores, temos a impressão de que o gosto ou o paladar será ótimo.

Sabemos que nem sempre é assim e a decepção gustativa da comida pode ser imediata ao iniciarmos a degustação. Isso é um pequeno exemplo de como somos bastante enganados por não usarmos os sentidos em conjunto ou termos todos eles bem desenvolvidos.

De acordo com Grillo e Perez (2013), “Há certas coisas na vida que são imutáveis, nas quais não podemos mexer, sob pena de perigo iminente”, isso significa que certas coisas independem de modismos e vontades inócuas e ditatoriais. Apesar da nossa orgulhosa evolução tecnológica, precisamos ainda, como nas cavernas, do ar, da água e do alimento, e isso só mudará se nos tornarmos andróides ou robôs que tenham como combustível vital outros meios que não os nossos. O Planeta Terra nunca foi tão violentado pelos homens como atualmente: desmatamentos, lixo em todos os lugares, poluição generalizada, destruição da fauna e da flora, coisas que poluem também os nossos sentidos humanos e transformam as pessoas em *Walking Deads*. As drogas envenenam os sentidos e fazem com que a nossa percepção seja alterada e depois destruída, e não falo em razão moral, mas vital. Quando se perde a noção de bom e mau para si mesmo reside aí o fator primordial da verdadeira loucura. Quando não percebo mais o que como, respiro, vejo, toco ou ouço, torno-me seguramente um suicida induzido por propagandas alienantes e irresponsáveis, também por políticos gananciosos e corruptos que querem juntar e roubar muito, mas, para levar para onde? Não há outro Planeta em que possamos viver e mesmo que houvesse, eles, os gananciosos malfeitores, fariam a mesma coisa que fazem na Terra. Os sentidos humanos são importantes exatamente para acabar com as justificativas repugnantes e ditatoriais. Se os líderes mundiais não defendem a vida humana, para o que é que servem afinal? Se é “cada um por si e o diabo por todos”, somos apenas escravos que pensam ser livres. Porém utilizando bem

todos os sentidos somos capazes de orientar de forma adequada a nossa vida.

Os sentidos bem apurados impedem que sejamos enganados na vida! Parece exagero de nossa parte, mas pense: por que continuo a comer coisas que comprovadamente são cancerígenas? Por que fumo, apesar de saber que vai me matar rápido? Por que bebo coisas que colocam a mim e a outros humanos em perigo? Por que ouço música doentia numa intensidade além do que meu corpo pode suportar? Por que toco em material radioativo mesmo sabendo do perigo? Por que vejo coisas repugnantes que vão alterar o meu estado psíquico e me deixar em depressão no final? Ou você quer viver ou quer morrer! Não existe meio termo. A importância de percebermos rápido o que é saudável ou não faz toda a diferença na vida. Não importa a idade, desenvolver os sentidos humanos não é só importante, é, sobretudo, VITAL.

Referências

GRILLO, M. L.; PEREZ L. R. (Org.). **A Física na Música**. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2013.



Capítulo 3

Fundamentos da acústica ambiental e musical no ensino de Física

*Profa. Dra. Maria Lúcia Grillo
Calazans B. M. Macchiutti de Oliveira
Suelen Nascimento da Costa*

Natureza do Som

O som pode ser definido como uma variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo, ou seja, uma onda sonora que percorre um caminho em um meio material (como ar, água e parede) até aos ouvidos humanos.

Pode-se tornar mais clara a ideia da forma de propagação de uma onda sonora ao excitar-se um diapasão; observa-se uma deformação no diapasão que faz com que vibre em posições extremas: ele comprime as porções adjacentes das partículas de ar ao redor, assim formando zonas de compressão. Quando o diapasão retorna para trás, cria-se então uma zona rarefeita de ar que é preenchida pela região próxima. Esse conjunto de processos repetidos gera a onda sonora.

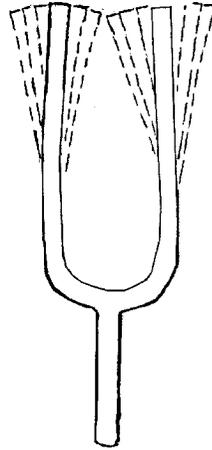


Figura 1 – Diapasão vibrando

As ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais. As ondas longitudinais precisam de um meio material de propagação como um sólido, um líquido ou um gás. Por essa razão, o som não pode se propagar no vácuo (NUSSENZVEIG, 1999).

As características do som

No ouvido humano, as ondas sonoras são captadas pelo tímpano, uma membrana responsável pelo processo primário de transformação das frequências das ondas em pulsos elétricos, permitindo que características fundamentais sejam percebidas para diferenciação do som.

A onda sonora apresenta quatro características físicas: altura, timbre, intensidade e duração. A altura é uma característica do som que está relacionada com a frequência e que permite distinguir os sons agudos (altas frequências) dos sons graves (baixas frequências). O ouvido humano é capaz de perceber frequências de 20 Hz a 20.000 Hz, aproximadamente. O timbre se relaciona diretamente com a composição dos harmônicos da onda sonora (ver Cap. 6, seção “Resultados experimentais” e o experimento “Espectroscopia

Sonora dos Instrumentos Musicais”, no Cap. 7), é a propriedade que nos permite diferenciar a fonte sonora, como por exemplo, uma mesma nota musical reproduzida por dois instrumentos diferentes. A intensidade do som diz respeito à amplitude da onda sonora, confundida com a definição de volume do som, está relacionada com variação de pressão do meio. Tal propriedade está ligada à quantidade média de energia que atravessa a unidade de superfície, medida pela potência sonora propagada por unidade de superfície. A unidade da intensidade é W/m^2 e é indicada nas músicas como pp (pianíssimo), p (piano), mf (meio forte), f (forte) e ff (fortíssimo). A duração é representada pelo tempo que o som dura. Em uma música as notas possuem tempos diferentes e são representadas por figuras diferentes: semibreve, mínima, semínima, colcheia, semicolcheia, fusa e semifusa. Os tempos de silêncio também possuem diferentes durações e são representados pelas pausas referentes a cada figura.

As frequências não são percebidas pelo ouvido humano da mesma maneira, a sensibilidade do ouvido varia com a frequência. Um teste audiométrico pode ser feito a fim de comprovar essa variação, no site: <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/hearing.html>

A propagação do som

Em um campo livre, a intensidade do som de uma fonte isotrópica varia conforme $1/r^2$, como nos estudos do comportamento do campo elétrico, onde r é a distância à fonte.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

O nível de intensidade sonora está ligado à comparação entre duas intensidades, ou seja, sendo a intensidade inicial de referência I_0 (valor mínimo audível: $10^{-12} W/m^2$), poderemos saber o nível de intensidade de I , através da equação L_i (intensity level),

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

É possível calcular as pequenas variações periódicas na pressão do ar causadas pela onda sonora. Esse parâmetro é chamado de nível de pressão sonora, onde a mínima pressão audível (p_0), usada como referência, corresponde a 2×10^{-5} Pa. Está intimamente ligado ao cálculo da intensidade de uma onda sonora:

$$I = \frac{p^2}{\alpha c}$$

onde p^2 corresponde ao quadrado da pressão, α é a densidade do ar e c corresponde à velocidade do som. Ao colocarmos logaritmo, na intensidade (I) tem-se a relação do nível de intensidade sonora e na pressão sonora temos o nível de pressão sonora.

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

Pode-se observar que a pressão sonora p é reduzida à metade quando a distância r dobra, já que a pressão varia com $1/r$. Em ambientes fechados (como salas de aula ou auditórios), os melhores lugares de percepção do som são aqueles que estão perto da fonte sonora, pois o som será percorrido em uma curta distância antes de encontrar paredes e outros obstáculos; esse som é chamado de som direto. Após encontrar obstáculos, serão refletidos ou absorvidos, com energia reduzida (ROSSING, MOORE, WHEELER, 2002).

O nível de pressão sonora e o nível de intensidade sonora são expressos em decibel, unidade feita em homenagem ao inventor do telefone, Alexander Graham Bell. Na escala logarítmica em decibéis, as flutuações (compressão – rarefação) da pressão e da intensidade sonora se aproximam

da percepção do ouvido humano (SOUZA, ALMEIDA, BRAGANÇA, 2012).

A sensação auditiva do ouvido humano possui uma faixa de intensidade extensa, do mínimo audível de 10^{-12} W/m² (0 dB) até o limiar da dor, cerca de 50 W/m² (120 dB). No dia a dia é possível comparar cada nível audível a um ruído que reconhecemos.

Tabela 1 – Níveis sonoros típicos que podemos encontrar

120 dB	Uma decolagem a jato a 60 m de distância	
110 dB	Uma intensa construção civil	Intolerável
100 dB	Um grito a cerca de 2 m de distância	
90 dB	Um grande caminhão a 15 m	Bastante barulhento
80 dB	Rua de uma cidade movimentada	
70 dB	Interior de um automóvel	Barulhento
60 dB	Uma conversa normal a 1 m de distância	
50 dB	Escritório, sala de aula	Moderado
40 dB	Sala de estar	
30 dB	Quarto à noite	Quieto
20 dB	Estúdio de gravação	
10 dB	Farfalhar de folhas de árvores	Pouco audível
0 dB		

Fonte: Conforme Rossing, Moore e Wheeler (2002).

Podemos expressar matematicamente a escala Bell comparando duas taxas de potências, como por exemplo, descobrir quão o som pode ser mais intenso que o outro: será que o nível de intensidade sonora de dois contrabaixos equivale realmente ao dobro do nível de intensidade de um deles? Ou seja, quando ouvimos 2 contrabaixos percebemos o dobro do L_1 de 1 contrabaixo?

A notação decibel (dB), pode ser escrita como:

$$\Delta L = L_2 - L_1 = 10 \text{ Log} \left(\frac{I_1}{I_0} \right)$$

Conforme Grillo e Baptista (2012), podemos usar um dado experimental (citado no Capítulo 6), o nível de intensidade sonora de um contrabaixo de valor 79 dB:

$$79 \text{ dB} = 10 \text{ Log} \left(\frac{I_1}{I_0} \right)$$

Se são tocados 2 contrabaixos a intensidade será duplicada. Mas ao duplicarmos a intensidade I_1 , tem-se que

$$Y \text{ dB} = 10 \log \left(\frac{2 \cdot I_1}{I_0} \right)$$

$$Y \text{ dB} = 10 \log 2 + 10 \text{ Log} \left(\frac{I_1}{I_0} \right)$$

$$Y \text{ dB} = 3 + 79 = 82 \text{ dB}$$

Então, se 1 contrabaixo emite 79 dB, 2 contrabaixos emitem apenas 82 dB. Embora a intensidade seja duplicada, não percebemos o dobro do nível de intensidade sonora. Isso pode ser comprovado experimentalmente com o uso de um sonômetro (chamado popularmente de decibelímetro).

Reflexões do som e geometria do espaço

Em um ambiente repleto de barreiras refletoras, o som pode apresentar comportamentos geométricos de reflexão, assim como é representado na reflexão da luz ou então como num jogo de sinuca, onde a mesa possui seis barreiras de “reflexão” para bola.

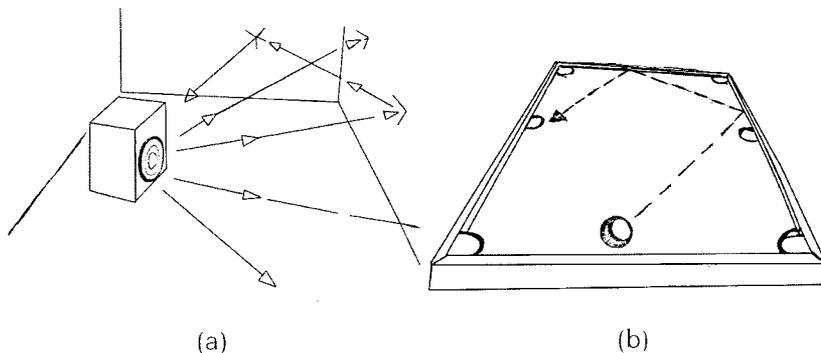


Figura 2 – a) representação das reflexões das ondas sonoras
 b) representação das reflexões de uma bola de sinuca

Conforme Rossing, Moore e Wheeler (2002), existem três comportamentos em que o som é percebido pelo nosso ouvido: o som direto, onde é o primeiro contato da propagação do som desde a fonte até o ouvido (sem influência das superfícies); as primeiras reflexões, que são feitas em um curto tempo de 20 até 200 ms; e as reflexões tardias, que são de reflexões das reflexões já ocorridas. Em um ambiente fechado, essas reflexões formam o som reverberante, que é percebido como um prolongamento do som.

O fenômeno da reverberação é muito confundido com o conceito de eco. O eco também é devido à reflexão do som, porém é percebido como um segundo som após o som incidente. Para que o ouvido humano perceba dois sons sucessivos é necessário um intervalo de tempo de pelo menos 0,1 s entre os dois sons; para que isso ocorra é necessária uma distância mínima de cerca de 17 m para haver a percepção do eco, considerando a velocidade do som no valor de 340 m/s. Temos então 17 m da fonte ao obstáculo e 17 m de volta. O som percorre 34 m em 0,1 s.

A presença das reflexões sonoras em uma sala pode ser planejada e desejável, proporcionando o “prolongamento” das ondas sonoras, o que gera uma aparência de sustentação e uma certa amplificação para som produzido, como por exemplo, em salas de concerto, em que mesmo

que aconteça interrupção de uma nota em um instrumento musical, ela ainda persistirá no ambiente. Esse fenômeno explica o motivo de, ao cantarmos no banheiro, termos a sensação de amplificação, devido às reflexões do som nas paredes, normalmente de azulejos, que são bons refletores.

Para avaliação de ambientes com muitas reflexões ou poucas reflexões, é feita uma análise do tempo de reverberação, que é baseado no tempo de decaimento da produção de um impulso sonoro. Existem diversas metodologias para avaliação, como o tempo de decaimento de 60 decibéis (RT-60) e a fórmula de Sabine, que calcula a relação do volume da sala pela absorção de energia de todas as superfícies da sala:

$$RT = K \frac{Volume}{area}$$

onde k é o coeficiente de absorção do material.

O tempo de reverberação pode ser obtido com o programa Audacity, conforme Figura 3.

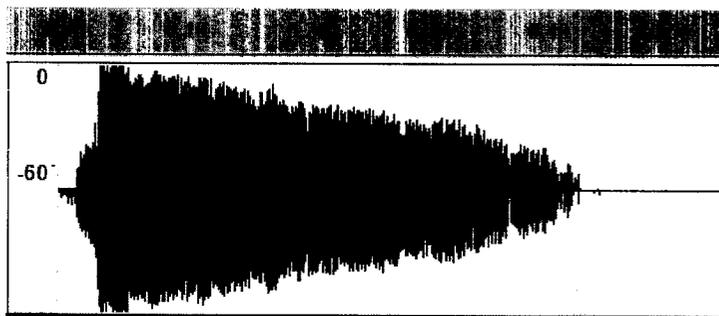


Figura 3 – Análise de tempo de reverberação feita no software Audacity, com um som intenso emitido rapidamente (ver experimento “Tempo de Reverberação” no Capítulo 7)

O tempo de reverberação adequado de uma sala depende da função que a sala terá, como por exemplo, uma sala de concertos, em que o tempo de reverberação pode ser questão de uma necessidade estética, ou em uma sala de aula e um auditório, em que o tempo de reverberação pode ser necessário para compreensão da fala.

Uma solução para amenizar as reflexões sonoras indesejáveis em uma sala de aula, onde a inteligibilidade da fala é afetada, é a utilização de materiais bons absorvedores sonoros. Conforme Rossing, Moore e Wheeler (2002), a absorção sonora está relacionada à absorção da quantidade de energia de um meio, como por exemplo o ar, que contribui com uma quantidade substancial para absorção das altas frequências em um grande auditório, ou materiais como telhas acústicas, que absorvem uma alta gama de frequências com um grande coeficiente de absorção sonora.

A utilização de materiais absorventes em todo ambiente fechado pode contribuir para a redução total do tempo de reverberação, como no caso das câmaras anecoicas. A câmara anecoica é um ambiente fechado e projetado para absorver a energia de qualquer reflexão de onda sonora. Geralmente nessas câmaras são conduzidos experimentos para representação de efeito de campo livre que incluem experimentos como de radiação sonora de instrumentos industriais e musicais.



Figura 4 – Experimento sendo realizado em uma câmara anecoica do INMETRO/RJ

As escalas natural e igualmente temperada

Primeiramente o que é uma escala? Segundo Henrique (2007), escala é uma palavra que tem derivação do latim, *scala*, que significa escada. Ela serve para organizar um conjunto de sons, geralmente limitados em um intervalo de oitava, de maneira a obedecer a uma determinada regra, que depende do tipo de escala. De forma mais simples podemos dizer que a escala é uma sequência de notas musicais comportadas geralmente dentro de uma oitava.

As escalas têm uma grande importância na Música, toda execução de uma composição musical é realizada com base em uma escala. Existem escalas que são características de uma cultura, como por exemplo, as escalas oriundas da cultura europeia e as de origem indiana. Falaremos de dois tipos de escalas que são utilizadas na música ocidental: natural e igualmente temperada. Veremos que na escala natural o intervalo de 2ª menor (1 semitom) ou o de 2ª maior (1 tom) pode assumir valores diferentes; na escala igualmente temperada todos os semitons são iguais, bem como todos os tons.

Dentro dessas escalas podemos ter outra classificação: as escalas diatônicas e as escalas cromáticas. A diatônica tem intervalos, entre notas seguidas, que podem ser semitons ou tons; a escala cromática possui apenas semitons. Então podemos ter uma escala natural diatônica ou cromática; da mesma forma temos a escala igualmente temperada diatônica ou cromática.

Segundo Henrique (2007) a escala natural, que foi criada por Gioseffo Zarlino (por isso é também conhecida como escala de Zarlino), tem sua origem no conceito de série harmônica. A série harmônica é uma série de sons que possuem frequências múltiplas de uma frequência fundamental (f_0), ou seja: $f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0, 6f_0, \dots$

Tomando como exemplo de frequência fundamental $f_0 = \text{Dó}_1$, teremos a seguinte série harmônica (ver Tabela 2):

Tabela 2 – Série harmônica de Dó_1

Frequência (Hz)	Nota	Intervalo musical em relação à nota anterior
f_0	Dó_1	
$2f_0$	Dó_2	8ª justa
$3f_0$	Sol_2	5ª justa
$4f_0$	Dó_3	4ª justa
$5f_0$	Mi_3	3ª maior
$6f_0$	Sol_3	3ª menor
$7f_0$	Sib_3	3ª menor
$8f_0$	Dó_4	2ª maior
$9f_0$	Ré_4	2ª maior
$10f_0$	Mi_4	2ª maior
$11f_0$	$\text{Fá}\#_4$	2ª maior
$12f_0$	Sol_4	2ª menor
$13f_0$	Láb_4	2ª menor
$14f_0$	Sib_4	2ª maior
$15f_0$	Si_4	2ª menor (enarmonicamente)
$16f_0$	Dó_5	2ª menor

Fonte: GRILLO; PEREZ (Org.), 2013.

Temos a seguir o exemplo da escala diatônica de Dó maior:

$\text{Dó} - \text{Ré} - \text{Mi} - \text{Fá} - \text{Sol} - \text{Lá} - \text{Si} - \text{Dó}$

Se considerarmos a organização da escala diatônica em função dos intervalos musicais formados a partir de cada nota da sequência em relação à primeira nota da escala, teremos a seguinte sequência de intervalos:

	$\text{Dó}_1 - \text{Ré}_1$	$\text{Dó}_1 - \text{Mi}_1$	$\text{Dó}_1 - \text{Fá}_1$	$\text{Dó}_1 - \text{Sol}_1$	$\text{Dó}_1 - \text{Lá}_1$	$\text{Dó}_1 - \text{Si}_1$	$\text{Dó}_1 - \text{Dó}_2$
Intervalo musical	2ª maior	3ª maior	4ª justa	5ª justa	6ª maior	7ª maior	8ª justa

Considerando o intervalo entre notas sucessivas, a escala diatônica tem a seguinte formação em relação à distribuição de tons e semitons:

Dó - Ré	Ré - Mi	Mi - Fá	Fá - Sol	Sol - Lá	Lá - Si	Si - Dó
1 tom	1 tom	1 semitom	1 tom	1 tom	1 tom	1 semitom

Podemos fazer uma análise dos intervalos da escala natural por meio da razão entre as frequências presentes na série harmônica, de acordo com a Tabela 2.

$$2^{\text{a}} \text{ maior: } Dó_4 (8f_0) - Ré_4 (9f_0) \quad 9/8 = 1,125$$

$$3^{\text{a}} \text{ maior: } Dó_3 (4f_0) - Mi_3 (5f_0) \quad 5/4 = 1,25$$

$$4^{\text{a}} \text{ justa: } Sol_2 (3f_0) - Dó_3 (4f_0) \quad 4/3 = 1,33$$

$$5^{\text{a}} \text{ justa: } Dó_2 (2f_0) - Sol_2 (3f_0) \quad 3/2 = 1,5$$

6^a maior: $Sol_3 (6f_0) - Mi_4 (10f_0) \quad 10/6 = 5/3 = 1,666$. Esse intervalo não aparece na série harmônica, porém entre as notas Sol_3 e Mi_4 há um intervalo de 6^a maior.

7^a maior: $Dó_4 (8f_0) - Si_4 (15f_0) \quad 15/8 = 1,875$. Esse caso é análogo ao anterior.

$$8^{\text{a}} \text{ justa: } Dó_1 (f_0) - Dó_2 (2f_0) \quad 2/1 = 2$$

Com isso temos os intervalos musicais da escala diatônica natural:

Escala diatônica	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Intervalos escala natural		1,125	1,25	1,333	1,5	1,666	1,875	2

A dependência da escala natural com o conceito de série harmônica não permitia um sistema físico simples para alguns instrumentos musicais, como por exemplo o órgão, que para a utilização dessa escala dependia do uso de 53 teclas por oitava para que fosse possível tocar em todas as tonalidades. Foi por isso que se buscou um tipo de sistema que simplificasse a funcionalidade desses instrumentos, surgindo assim vários tipos de sistemas de temperamento até chegar à criação do sistema de temperamento igual, que foi

o que resolveu tal problema com maior eficácia (HENRIQUE, 2007).

Consideremos a escala cromática: sabendo que um semitom equivale à metade de um tom, um tom equivale a dois semitons, então, calculando-se a quantidade total de semitons presentes na escala cromática, temos um resultado de 12 semitons em um total de 13 notas:

Dó – Dó# – **Ré** – Ré# – **Mi** – **Fá** – Fá# – **Sol** – Sol# – **Lá** – Lá# – **Si** – **Dó**

Conforme citado anteriormente, na escala cromática, entre cada nota há um intervalo de um semitom. As notas em negrito representam a escala diatônica.

Na escala igualmente temperada, a razão entre frequências de notas vizinhas, como por exemplo, dó# e ré, é constante, assim, podemos escrever tal relação em função de uma progressão geométrica (PG):

$$b_n = b_1 x^{n-1}, \text{ (equação 1)}$$

Consideramos duas notas distantes de uma oitava justa, como por exemplo, dó₂ e dó₃. Nesse caso a nota mais aguda (dó₃) apresentará uma frequência igual ao dobro da frequência da nota mais grave (dó₂). Temos então uma PG de $n = 13$ (número de termos):

$$2f_0 = b_{13}$$

onde x representa a razão nessa progressão geométrica, $2f_0 = b_{13}$ e $f_0 = b_1$. Logo:

$$x = 2^{1/12} = 1,059463$$

ou seja, x é o valor de um semitom na escala igualmente temperada.

Com a utilização da equação 1 podem ser obtidos os valores dos intervalos entre as notas componentes da escala igualmente temperada diatônica em relação à primeira nota da escala, Dó (b_1):

Escala diatônica	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Intervalos escala temperada		1,1224	1,2599	1,3348	1,4983	1,6817	1,8877	2

Dessa forma podemos comparar as escalas diatônicas natural e temperada. Vemos que esses dois tipos de escalas são ligeiramente diferentes. Um ponto interessante nessa comparação entre as duas escalas é a presença do batimento. Como a escala natural é formada a partir de seus harmônicos, ou seja, frequências que são múltiplas inteiras da fundamental (nesse caso a primeira nota da escala), logo será impossível ocorrer batimento entre as notas. Ao contrário da escala natural, a escala igualmente temperada tem a presença desse fenômeno físico, pois as notas que a compõem possuem frequências que apresentam certo grau de inarmonicidade devido ao fato de elas serem ligeiramente desviadas das frequências dos harmônicos da nota que inicia a escala, e há harmônicos com frequências próximas.

OBS: Através do programa Scala (gratuito) podemos gerar os sons das escalas natural e temperada e compará-las. Veremos que percebemos os sons como muito parecidos.

Outro ponto importante é o cuidado que precisamos ter para não confundirmos os termos afinação e escala. A afinação é uma seleção de frequências que determinarão as disposições de notas de um determinado instrumento musical. Tal seleção ocorre baseada em um intervalo musical específico. Por exemplo, a afinação do violoncelo, que é feita por intervalo de quintas ascendentes, pois suas cordas possuem a seguinte disposição de notas: cordas $dó_2$, sol_2 , $ré_3$ e $lá_3$. Já o contrabaixo é afinado por intervalos de quartas ascendentes, cujas cordas são: mi_1 , $lá_1$, $ré_2$ e sol_2 . Segundo Menezes (2014), a afinação passou a existir bem antes da criação das escalas.

Então podemos concluir que, para a música ocidental se tornar o que atualmente é, foi necessário o estabelecimento do sistema de temperamento igual. Como consequência, as

frequências selecionadas possibilitaram a organização dos intervalos musicais que hoje conhecemos, o que colaborou para o surgimento da afinação de cada instrumento.

Na Tabela 3, temos os valores das frequências de $Dó_1$ a Si_7 (em outra classificação: de $Dó_0$ a Si_6).

Tabela 3 – Frequências em Hz da escala igualmente temperada (com aproximação em uma casa decimal)

$Dó_1$	16,4	$Dó_2$	130,8	$Dó_3$	1046,5
$Dó\#_1$	17,3	$Dó\#_2$	138,6	$Dó\#_3$	1108,7
$Ré_1$	18,4	$Ré_2$	146,8	$Ré_3$	1174,7
$Ré\#_1$	19,4	$Ré\#_2$	155,6	$Ré\#_3$	1244,5
Mi_1	20,6	Mi_2	164,8	Mi_3	1318,5
$Fá_1$	21,8	$Fá_2$	174,6	$Fá_3$	1396,9
$Fá\#_1$	23,1	$Fá\#_2$	185,0	$Fá\#_3$	1480,0
Sol_1	24,5	Sol_2	196,0	Sol_3	1568,0
$Sol\#_1$	26,0	$Sol\#_2$	207,7	$Sol\#_3$	1661,2
$Lá_1$	27,5	$Lá_2$	220,0	$Lá_3$	1760,0
$Lá\#_1$	29,1	$Lá\#_2$	233,08	$Lá\#_3$	1864,7
Si_1	30,9	Si_2	246,9	Si_3	1975,5
$Dó_0$	32,7	$Dó_3$	261,6	$Dó_6$	2093,0
$Dó\#_0$	34,6	$Dó\#_3$	277,2	$Dó\#_6$	2217,5
$Ré_0$	36,7	$Ré_3$	293,7	$Ré_6$	2349,3
$Ré\#_0$	38,9	$Ré\#_3$	311,1	$Ré\#_6$	2489,0
Mi_0	41,2	Mi_3	329,6	Mi_6	2637,0
$Fá_0$	43,7	$Fá_3$	349,2	$Fá_6$	2793,8
$Fá\#_0$	46,2	$Fá\#_3$	370,0	$Fá\#_6$	2960,0
Sol_0	49,0	Sol_3	392,0	Sol_6	3136,0
$Sol\#_0$	51,9	$Sol\#_3$	415,3	$Sol\#_6$	3322,4
$Lá_0$	55,0	$Lá_3$	440,0	$Lá_6$	3520,0
$Lá\#_0$	58,3	$Lá\#_3$	466,2	$Lá\#_6$	3729,3
Si_0	61,7	Si_3	493,9	Si_6	3951,1
$Dó_1$	65,4	$Dó_4$	523,3	$Dó_7$	4186,0
$Dó\#_1$	69,3	$Dó\#_4$	554,4	$Dó\#_7$	4434,9
$Ré_1$	73,4	$Ré_4$	587,3	$Ré_7$	4698,6
$Ré\#_1$	77,8	$Ré\#_4$	622,3	$Ré\#_7$	4978,0
Mi_1	82,4	Mi_4	659,3	Mi_7	5274,0
$Fá_1$	87,3	$Fá_4$	698,5	$Fá_7$	5587,7
$Fá\#_1$	92,5	$Fá\#_4$	740,0	$Fá\#_7$	5919,9
Sol_1	98,0	Sol_4	784,0	Sol_7	6271,9
$Sol\#_1$	103,8	$Sol\#_4$	830,6	$Sol\#_7$	6644,9
$Lá_1$	110,0	$Lá_4$	880,0	$Lá_7$	7040,0
$Lá\#_1$	116,5	$Lá\#_4$	932,3	$Lá\#_7$	7458,6
Si_1	123,5	Si_4	987,8	Si_7	7902,1

Fonte: Adaptada de Rossing, Moore, e Wheeler (2002).

Referências

- GRILLO, M. L. N.; BAPTISTA, L. R. P. L. Uma Abordagem Interdisciplinar dos Cordofones Friccionados. VIII Congresso Iberoamericano de Acústica, 2012, Évora – Portugal, **Acústica 2012**. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Acústica, 2012. v.1. p. 1 – 12.
- HENRIQUE, L. L. **Acústica Musical**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.
- MENEZES, F. **A acústica musical em palavras e sons**. Cotia: Ateliê Editorial, 2014.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**, v. 2, São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- ROSSING, D. T., MOORE, F. R.; WHEELER, P. A. **The Science of Sound**, California: Addison-Wesley Publishing Company, 2002.
- SOUZA, L. C. L.; ALMEIDA, M. G.; BRAGANÇA, L. **Bê-á-bá da Acústica Arquitetônica**. São Carlos: EduFSCar, 2012.

Capítulo 4

Contexto histórico: Antiguidade, Idade Média, Renascimento, Barroco, Classicismo, Romantismo e influências na Música atual

*Profa. Dra. Maria Lúcia Grillo
Maestro Luiz Roberto Perez*

Desde a Antiguidade a humanidade está envolvida com a emissão do som e seu controle, com usos em vários setores, dentre eles a Música. Temos visto pessoas de várias áreas, ao longo da História, envolvidas nessas atividades. O desenvolvimento tecnológico em um setor sempre influencia outros setores, e isso pode ser visto também no desenvolvimento da Acústica Musical e áreas correlatas. Temos neste capítulo uma visão geral do desenvolvimento da Acústica desde a Antiguidade. Veremos que algumas épocas foram decisivas para o desenvolvimento, com destaque de alguns expoentes como Vincenzo Galilei, Marin Mersene, J. S. Bach, Joseph Fourier, dentre outros. Nossa época atual pode ser entendida melhor através de uma abordagem histórica.

Não podemos fixar datas precisas para um estilo musical. Vemos ao longo da História alguns autores que vivem num período e sua Música pertence ao período anterior, ou mesmo posterior. Buscamos, no entanto, evidenciar o estilo musical predominante de cada época.

A Física enquanto atividade humana tem a sua importância na História, além de ela mesma pertencer a um determinado tempo histórico. Logo, o estudo da Física relacionado com a História se torna fundamental. Entretanto, essa importância não fica restrita a sua construção histórica, mas na sua relação com o social, o político, o econômico, o filosófico, o mental e até o religioso (não seria preciso lembrar que Newton além de grande físico foi um teólogo renomado) que a ciência como um todo está imersa. A História no ensino da Física permite que o estudante e o pesquisador tenham uma dimensão de “totalidade” e dos múltiplos ritmos dos diversos segmentos da sociedade, com a relação da sua disciplina com o seu exterior. Isso os permite ter uma gama de conhecimentos que lhes garante ser mais crítico em relação a sua disciplina, bem como com a realidade que o cerca.

Inserir um caráter histórico-filosófico nas nossas pesquisas tem nos servido para ampliar a perspectiva interdisciplinar de nossos trabalhos, pois a História busca relacionar esses dois campos, a Física e a Música. Podemos perceber que numa visão mais completa do processo histórico, há pontes ligando um aspecto ao outro, como por exemplo, a Revolução Científica e o Barroco, que pertencem ao mesmo período histórico, em que aspectos exteriores (política, economia, religião etc.) interferem no seu desenvolvimento. No que se refere à História da Ciência, por exemplo, “o desenvolvimento torna-se o processo gradativo através do qual itens foram adicionados, isoladamente ou em combinação, ao estoque sempre crescente que constitui o conhecimento e a técnica científicos. E a História da Ciência torna-se a disciplina que registra tanto esses aumentos sucessivos como

os obstáculos que inibiram sua acumulação” (KUHN, 2003). Logo, a História e a Filosofia têm nos auxiliado na percepção mais ampla da construção do conhecimento científico, bem como, nos aspectos sociais e culturais que afetaram também as transformações na Música (GRILLO, BAPTISTA, BRANDÃO, 2013).

Antiguidade

A Música desempenha desde sempre importante presença na cultura de todas as civilizações. Musicalidade e festas, apresentações a reis e rainhas e o domínio desse saber são constituintes de todos os tempos. Desde os bardos celtas aos hindus, até os gregos precursores do racionalismo ocidental, a Música sempre despertou o interesse de pensadores. Estes buscaram a relação entre a religiosidade que praticavam e a natureza que os cercava. Os gregos foram primordiais na questão de relacionar essa mesma natureza e os princípios da Filosofia Natural, algo que chamamos hoje de princípios científicos (GRILLO *et al.*, 2012a).

O maior dos personagens da época foi Pitágoras, nascido na ilha grega de Samos por volta do século VI a.C. Segundo Boyer (1996), admite-se que desapareceu após as perseguições impostas a ele e aos seus discípulos quando sua Escola foi obrigada a fechar. As relações matemáticas desenvolvidas pelos pitagóricos seriam a expressão da própria divindade, descrita com um simbolismo particular: a Matemática, cuja essência espiritual era os números. O número um, por exemplo, refletia a razão e seria gerador dos demais. O número dois era o primeiro par, feminino. O três é o primeiro com propriedades masculinas verdadeiras, o da harmonia. O algarismo quatro representava a justiça ou o ajuste de contas, e o cinco era a união entre os primeiros números, feminino e masculino. Seis, o número da criação. Assim, os ímpares eram masculinos em suas qualidades, e os elementos pares, femininos (conceito muito em voga até a Idade Média). O

mais sagrado era o dez, o número do universo, do Divino, e que descreveria a perfeição da Criação. Chamada em grego de “Tetraktys sagrada”, a escola de Samos desenvolveu maneiras para se chegar à compreensão maior de seus símbolos, algo adotado para a estruturação da Música. Foi a adição de vários deles, sequenciais ou não, dando como resultado outros Algarismos que demonstravam o significado mais profundo da identidade daquilo que se queria estudar. Por exemplo, com a adição dos quatro primeiros números inteiros obtém-se como resultado a “Tetraktys”, ou o dez Divino: $1 + 2 + 3 + 4 = 10$, onde: $1 + 0 = 1$, o retorno à Unidade (MARCONDES, 1997). Ainda segundo Boyer (1996), os “ternos numéricos pitagóricos” mostram novamente a relação entre o quadrado de um número inteiro e uma espécie de “ressonância” entre os dois lados de uma soma (GRILLO *et al.*, 2012a).

Idade Média

Segundo nosso interesse, que é conhecer o passado para entendermos o presente, fazemos como Otto Maria Carpeaux e a maioria dos historiadores da Música: consideramos a Música da Europa. “Nossa Literatura, nossas Artes Plásticas, nossa Filosofia seriam incompreensíveis sem o conhecimento dos seus fundamentos Greco-romanos” (CARPEAUX, 2009, p. 17). A origem da Música Ocidental está na Idade Média, com o coral gregoriano, o cantochão, o canto litúrgico da Igreja Católica Romana. Esse estilo de Música foi incentivado pelo Papa Gregório I, por isso ficou conhecido como gregoriano, embora não seja obra dele. O termo foi criado em 1903, pelo Papa Pio X (CHAIM, 2006, p. 13). Essa Música ficou conhecida mais tarde como “ars antiqua” (séculos VI-XIII). Nessa época coexistiam outros estilos: a Música profana – a poesia lírica aristocrática dos “troubadours”, cantada nos castelos, e a poesia lírica popular, cantada nas aldeias (CARPEAUX, 2009, p. 19).

Em torno do século XII já surgiam as primeiras tentativas do uso de notas longas e curtas. Era o início do que ficou conhecido como “ars nova” (sécs. XII a XIV). Surgiam nessa época novos conhecimentos na Matemática e na Filosofia, com o nominalismo e as novas regras, “com precisão matemática... sem ferir as exigências do ouvido” (CARPEAUX, 2009, p. 21).

A Música profana teve muita influência na “ars nova”, o que não aconteceu com a “ars antiqua”, que era predominantemente litúrgica. O grande compositor dessa época é Guillaume de Machaut (1310-1377), que foi o primeiro que escolheu cinco partes fixas do texto da missa e musicou (o Senhor tende piedade – o Kyrie, o Glória, o Credo, o Santo e o Cordeiro de Deus – Agnus Dei). Essa tradição permanece ainda hoje na Igreja Católica (GRILLO *et al.*, 2012a).

Renascimento

Nem sempre Arte e Ciência foram consideradas próximas, no entanto, na Música durante um longo período essa relação foi bastante relevante. Vincenzo Galilei, pai de Galileu, músico, professor e teórico musical, atesta a impossibilidade de encaixar um número inteiro da escala pitagórica, com isso, inicia estudos sobre os intervalos musicais – que, posteriormente, com Bach, resultará na escala igualmente temperada – preocupando-se mais com a experimentação do que a visão dogmática como os pitagóricos. Nesse contexto, começam a se desenvolver os estudos sobre a Acústica Musical, no qual se destacam físicos e matemáticos como: John Wallis, Johannes Kepler, Vincenzo Galilei, Galileu Galilei, René Descartes, Christian Huygens e Joseph Saveur; este último, considerado o pai da Acústica. No que diz respeito à Música, há a emergência da polifonia renascentista no lugar dos excessos da polifonia medieval, no qual se destacam os compositores Josquin des Près, Guillaume Dufay, Johannes Ockeghem, John Dustable, Palestrina e Lassus. Renascença

ou Renascimento é um período que, na Música, corresponde aos séculos XV e XVI e nas demais Artes e Ciências teve início no século XIV. Seu início foi na Itália e foi se propagando por toda a Europa. Na Música seu início é considerado na região flamenga (GRILLO *et al.*, 2012a).

No século XV teve início uma mudança na forma de abordar todas as áreas do conhecimento, uma mudança epistemológica, caracterizada por processos de matematização, experimentação e mecanização. A nova Ciência buscava modelos matemáticos para explicar os fenômenos naturais. Foi uma verdadeira revolução, não a única conhecida na história, porém devido às grandes proporções ficou conhecida como “A Revolução Científica” (GRILLO *et al.*, 2012b).

As áreas da Física que mais se desenvolveram nesse período foram o magnetismo terrestre, a ótica, a mecânica e a acústica musical. Simon Stevin, nascido em 1548 em Bruges (Bélgica), escreveu três livros sobre estática e hidrostática. Publicou também pequenos tratados sobre vários temas como forças dos ventos, astronomia (apoiando Copérnico) e escalas musicais. A ótica se desenvolveu inicialmente com o interesse em óculos, que surgiram no final do século XIII na Itália e no século XVI já eram conhecidos em toda a Europa. Depois os estudos de associações de lentes levaram Giambattista della Porta a encontrar os princípios do telescópio e do microscópio composto (GRILLO *et al.*, 2012a).

Nos séculos XV e XVI, predomina a polifonia vocal. As formas musicais dominantes dessa época eram as missas e os motetos, ambos cantados sem acompanhamento de instrumentos musicais (“a capella”). Essa Música era constituída de arabescos e ornamentos bem complexos, mais semelhantes à arte gótica da Idade Média. Essa complexidade, com vozes linearmente independentes, foi aos poucos aumentando, com um número de vozes cada vez maior e mais tarde com dois ou mais coros simultâneos. Os músicos eram então cientistas, criando uma arte só executada e compreendida

por profissionais. Faziam uma Música que nem sempre se parece destinada aos ouvidos, mas à inteligência. A complexidade chegou a 36 ou mais vozes independentes, com inversão e reinversão de temas (CARPEAUX, 2009, p. 25).

O final do Renascimento (fim do séc. XVI e início do XVII), considerado também como período pré-barroco, é caracterizado pelo maneirismo na Música, marcado pela polichoralidade. “Efeitos de impacto (especialmente harmônicos), visando ilustrar certas passagens do texto (habitualmente em um madrigal), têm precedência sobre um tratamento mais amplo da forma musical” (SADIE, 1994).

A origem dos estudos em Acústica foi relacionada com a Música. Não havia ainda a noção de propagação das ondas acústicas. Só no século XVII, depois do desenvolvimento da teoria ondulatória com Huygens (1629-1695), foram desenvolvidas teorias sobre a propagação das ondas sonoras. A altura já tinha sido associada à frequência por Benedetti, mas também só no século XVII Galileu apresentou explicações mais claras, aperfeiçoadas por Mersenne. Zarlino escreveu sobre contraponto e sobre as tríades em termos harmônicos, embora na época só se levasse em conta os intervalos. Deu uma explicação racional sobre as quintas e oitavas paralelas, que até então eram consideradas proibidas e distinguiu os tons maiores e menores. Criou o critério de consonância, usando analogias sobre a inversão de intervalos: “a quarta perfeita (inversão da 5ª perfeita) deveria ser consonante, já que 3^{as} consonantes e 2^{as} dissonantes invertidas resultam respectivamente em 6^{as} consonantes e 7^{as} dissonantes”.

No Renascimento, com Vincenzo Galilei, que foi aluno de Zarlino, o estudo da Música adquire um caráter teórico empírico, retomando características do aristoxenismo que “interessava-se fundamentalmente pela percepção auditiva” (ADBOUNUR, 2003, p. 18). Com isso, evidencia-se que o princípio da Música é o som e não o número. Esse paradigma estabelecido por Vincenzo colaborou entre outras coisas

para modificar a importância excessiva do número na Música que contrapunha a questão sensível da Música que é o som. O som ganha outra significação e importância, passando a ser o eixo do estudo da Música. Dentre os que contribuíram está inclusive seu filho Galileu, que, talvez influenciado pelo pai, tomou gosto por experimentos. Galileu descobriu que a altura musical se relacionava com o conceito de frequência e, segundo Abdounur, “marca o início da física da música em sua concepção atual” (ABDOUNUR, 2003, p. 29).

A Revolução Científica, iniciada no Renascimento, induzirá novas ideias no âmbito musical, com argumentos racionais, que substituem as analogias de Zarlino.

Barroco

O século do Barroco foi coincidentemente o século da considerada Revolução Científica, a saber, século XVII. Esse século foi rico em transformações, tanto que elas se multiplicaram nos diversos campos da sociedade. Assim, podemos observar que na política há a consolidação da monarquia absoluta que tinha como figura emblemática Luís XIV, considerado o rei Sol; no campo religioso, os conflitos decorrentes da Reforma e da Contrarreforma; no econômico, o avanço do mercantilismo sobre o decadente feudalismo, além da emergência dos Países Baixos como potência econômica por conta da sua independência da Espanha e de suas conquistas no Atlântico-Sul; nas Artes, há a imponência e o rebuscamento do Barroco, seja na Literatura, na Arquitetura ou na Música; e o advento da dita Ciência Moderna (GRILLO *et al.*, 2011).

O Barroco é um período da História que compreende os anos de 1600 a 1750 aproximadamente, e que trouxe mudanças marcantes e contribuições para as Ciências e as Artes, com importância até nossos dias. Conforme Chaim (2006, p. 25): “este período caracterizou-se por uma enorme evolução da expressão musical, aperfeiçoando-se e dando-se

maior esplendor e ornamentação às linhas melódicas, consolidando-se a tonalidade e o sentido de harmonia”. Em Candé (2001), temos que para a Enciclopédia, o adjetivo barroco qualificava “uma nuance do bizarro” na arquitetura. A pintura da época foi então também chamada de barroca, com temas “entulhados de tapeçarias, anjinhos, folhagens, motivos arquitetônicos”. Por extensão depois a época inteira foi chamada de Barroca (CANDÉ, 2001, p. 422).

É o tempo da revolução científica, de Galileu, Newton, Mersenne, Descartes, do advento da chamada Física Moderna, de grandes desenvolvimentos na Literatura, Pintura, Música, consequentes processos iniciados ainda no Renascimento. É o tempo de Miguel Cervantes na Literatura, Rembrandt na Pintura, Cláudio Monteverdi, Henry Purcell, Handel, Corelli, Scarlatti e Bach na Música. Acompanhando a revolução científica, podemos dizer de certa maneira que aconteceu também a revolução nas Artes, especialmente na Música, embora não seja normalmente usado esse termo. Surgem novos estilos na Pintura, Escultura e Arquitetura, altamente decorativas, que emergem durante a Contrarreforma, diferentes do estilo linear do Renascimento. Teatros e igrejas eram locais altamente decorados. Todo esse rebuscado combina bem com o estilo das Músicas de Scarlatti, que não se contenta com uma linha melódica, mas acrescenta uma série de ornamentos, assim como Bach, com seus contrapontos e suas modulações. Esses novos recursos levaram ao temperamento igual, que, segundo Menezes (2004, p. 263), já vinha sendo discutido há muitos anos e foi reconhecido como uma necessidade – conforme trabalho histórico e teórico, desenvolvido em 1636/1637, sobre afinação e temperamento, de Mersenne (que obteve a 1ª medida correta da velocidade do som) e apresentado inicialmente no “Cravo Bem Temperado de Bach”, que usa muitas modulações, inadmissíveis sem o temperamento igual. A escala igualmente temperada é a escala mais utilizada no Ocidente até hoje, apesar dos

pequenos batimentos, devidos à superposição de ondas de frequências muito próximas (GRILLO *et al.*, 2011).

Galileu Galilei, considerado o pai da Física Moderna, era filho do compositor e musicólogo, Vincenzo Galilei. Nascido em Pisa, criado numa família que via nas Artes uma grande importância e recebia com entusiasmo ideias novas. Na Universidade de Pisa, estudou Medicina, mas essa não era sua vocação, gostava da Matemática. Ao longo do curso de Medicina, durante alguns serviços da igreja, descobriu, utilizando sua pulsação, o isocronismo do pêndulo medindo o tempo do balançar de um candelabro. Verificou, então, que o tempo de cada balanço era igual, independente da amplitude de oscilação (RONAN, 1987, p. 79).

Suas contribuições foram vastas principalmente na Mecânica. Estudou também a vibração e a ressonância, apresentando a caracterização, por relações de frequência dos sons, dos intervalos musicais. Fez vários experimentos com sons, o que faz com que considerem-no o fundador da Acústica Experimental. Através desses experimentos, apresentou uma “dedução quantitativa das leis das cordas estabelecendo as relações entre frequência, comprimento, diâmetro, densidade e tensão” (HENRIQUE, 2007).

Marin Mersenne, jesuíta, filósofo natural, matemático e musicólogo, nasceu em uma família de classe trabalhadora na pequena cidade de Oizé. Famoso por suas intervenções em atividades científicas, ele teve importância no estudo do som dos instrumentos musicais, principalmente no que diz respeito às cordas e aos tubos sonoros. Seu diferencial foi estudar o som de duas cordas variando seus aspectos geométricos (tensão, comprimento, diâmetro). Em relação aos tubos sonoros, enunciou as influências que a pressão do ar poderia interferir no deslocamento pelo tubo. Com isso, mais tarde, ao observar as características do fenômeno de eco, conseguiu um brilhante erro, aproximado de 10% para a velocidade do som, que posteriormente foi tabelado pelos

estudos avançados de Isaac Newton. Boyle, também, contribuiu para os estudos com relação à Acústica, sendo ele um dos cientistas a enunciar as leis dos gases perfeitos na termodinâmica. Questionando-se algumas particularidades, fez estudos sobre a propagação de som no vácuo, materializando-os num livro (HENRIQUE, 2007).

O matemático e físico Joseph Sauveur é considerado o criador da Acústica Musical. Isso porque no século XVIII apresentou um formalismo para o movimento harmônico a partir da vibração de uma corda tensa, e de som fundamental (HENRIQUE, 2007). Descreveu também as ideias primordiais do movimento de ondas nas cordas e que elas podem vibrar com vários movimentos harmônicos de modo simultâneo. Essa explicação física caracteriza o som produzido por instrumentos de corda.

O período do Barroco e da Revolução Científica produziu as bases dos conhecimentos que temos hoje, nas Ciências, nas Artes, na Tecnologia, no conhecimento em geral. Estudar esse aspecto histórico-científico é importante, de acordo com o enfoque CTS (Ciência-Tecnologia-Sociedade), para motivar o estudo e o trabalho nas Ciências porque propicia a compreensão do que realmente seja fazer Ciência, e para que serve, incluindo a sua contribuição social.

Classicismo

“O Classicismo na Música começa em 1750 e termina em 1830. É considerado o gênero galante que, por ser elegante e propiciar o fazer a corte, agrada e faz muito sucesso com as damas da época. A Arquitetura é Rococó, a estética criada por Baumgarten. Temos o Enciclopedismo francês e o Iluminismo alemão (Aufklärung – luzes). Na Filosofia surge Montesquieu (1689-1755), na Pintura, Hogarth (1697-1764) e na Literatura, Goeth (1749-1832). Nesse período se cultiva a Música de Câmara: Duos, Trios, Quartetos etc. Na Alemanha,

a Sonata Clássica de Felipe Manuel Bach (filho de J.S. Bach) tem no máximo quatro movimentos e abandona a obrigação de que sejam escritas na mesma tonalidade, com exceção do primeiro movimento e do último. É escrita no estilo galante. Surgem o Minueto de Sonata (Mozart) e o Rondó de Sonata (Beethoven). J. Haydn cria a Sonata Orquestral (Sinfonia) com quatro movimentos e introduz nela o Minueto (que sempre foi uma dança)” (RIEMANN, 1913).

Sob o ponto de vista da Acústica Musical, houve avanços consideráveis nos instrumentos musicais e nas vozes, através dos corais. Havia mais investimentos por parte dos nobres, pois lhes trazia diversão ou prestígio e quanto ao clero atraía as pessoas para as igrejas com as Missas e Cantatas. Os cordofones friccionados que conhecemos hoje foram aperfeiçoados nessa época (GRILLO, BAPTISTA, 2013).

A Música instrumental ganhou mais importância. Os instrumentos ganharam uma linguagem própria, deixando de serem utilizados apenas para acompanhamento de canto. Segundo Medaglia (2008, p. 84), as melodias ganham mais fluência, leveza e até simplicidade. Em alguns desenvolvimentos do discurso musical, o contraponto é também usado, mas não como técnica predominante. O timbre dos diferentes instrumentos ganha maior importância bem como a dinâmica (forte e piano). Toda a base da orquestração moderna nasce nesse período. Duas orquestras tiveram destaque: a de Mannheim, na Alemanha, criada por Johann Stamitz, que reuniu principalmente músicos austríacos, e a de Viena, de Georg Christoph Wagenseil (1715-1777), compositor austríaco. Vários membros da orquestra de Mannheim foram compositores, dentre eles Johann Anton Stamitz (1717-1757), cuja Música não é mais tocada hoje, porém sua influência histórica permaneceu, principalmente pela transformação da abertura italiana em sinfonia, a introdução do minueto como terceiro movimento e a criação do crescendo e decrescendo na dinâmica (GRILLO *et al.*, 2013).

Dois fatos importantes incentivaram o aumento da produção musical: o aperfeiçoamento do piano e o aperfeiçoamento da edição musical. Segundo Medaglia (2008, p. 85), os quatro grandes compositores da época foram: o alemão Christoph Willibard Gluck (1714-1787), famoso por suas óperas e reformas estruturais no gênero; Franz Joseph Haydn (1732-1809), austríaco que escreveu mais de 100 sinfonias, muitas Músicas de câmara e oratórios, sendo o principal compositor que influenciou o chamado “Barroco mineiro”, com José Joaquim Emérico Lobo de Mesquita (1746-1805) e o padre José Maurício Nunes Garcia (1767-1830); Mozart, também austríaco, nascido em Salzburg, foi impecável e criativo em todas as áreas – Música sinfônica, concertante, camerística e operística; e, finalmente, Ludwig van Beethoven (1770-1827), alemão considerado o ponto culminante do classicismo e o introdutor do estilo seguinte, o Romantismo.

Para atingir um ideal na reprodução daquilo que se podia ver e sentir, os intelectuais e artistas do Classicismo necessitaram conhecer como verdadeiros naturalistas o mundo que os cercava. Aprofundaram muito o conhecimento sobre a constituição da natureza em geral – em seus aspectos biológicos, na Medicina, no estudo da Óptica, na Matemática, e na Acústica. Só com o estudo da Óptica, por exemplo, se poderia dar às pinturas daquela época a noção de perspectiva e de tridimensionalidade características de corpos sólidos.

Mozart foi vítima do seu tempo. Essa frase, por mais fatalista que possa parecer, retrata toda uma elucubração sobre a vida e a sociedade de Wolfgang Amadeus Mozart. A morte precoce do gênio de Salzburg, aos 35 anos, serve como reflexão sobre as condições dos músicos nas sociedades do Antigo Regime. O caso de Mozart evidencia as tensões entre a burguesia cortesã e a aristocracia que na sociedade de cortes demonstrava grande proximidade espacial, mesmo mantendo grande desigualdade social. Assim, a luta do “gênio”

Mozart por autonomia numa sociedade hierarquizada, na estrutura das cortes, mostrou-se “revolucionária”, apesar da sua consequência trágica.

Nessa estrutura social, os músicos eram fortemente dependentes das cortes principescas, ou seja, do palácio do príncipe e da vida cortesã, sem os quais não conseguiam sobreviver, como destaca Elias (1995, p. 18): “Não tinha escolha. Se sentisse uma vocação que o levasse a realizações notáveis, quer como instrumentista, quer como compositor, era praticamente certo que só poderia alcançar sua meta caso conseguisse um cargo permanente numa corte, de preferência uma corte rica e esplêndida”. Não se tinha muita opção e Mozart foi educado para se inserir nessa realidade, cumprindo algo muito próximo da tradição dos ofícios artesanais. “No interior de tal estrutura era comum o pai assumir o papel de mestre e ensinar ao filho as artes do ofício, talvez até, mesmo desejando que algum dia o filho excedesse sua própria perícia” (ELIAS, 1995, p. 26). No caso de Wolfgang foi isso que aconteceu, Leopold, seu pai, burguês de classe média, viu no seu filho uma possibilidade de ascensão, para assumir quem sabe uma corte maior e de mais prestígio como Munique ou Paris, mas sem romper com a condição de serviçal.

Beethoven, apesar de ser 15 anos mais novo que Mozart, encontrou um cenário em que tal autonomia era possível, conforme se difundiam os concertos para audiência composta de pagantes, e não de convidados. Houve, portanto, uma mudança estrutural na posição social do músico, na medida que havia um público consumidor de sua Música, coisa que Mozart não encontrou. Todavia, Mozart, como vimos, foi educado para pertencer a um mundo exclusivo e hierarquizado, algo que Beethoven recusou. A vida de ofício limitou as possibilidades de Mozart de viver autonomamente, que ficou restrito à esfera das cortes, porém, não havia escolha, tanto que quando optou por ser autônomo, “ele ainda dependia, como qualquer artista artesão, de um limitado

círculo local de clientes. E tratava-se de um círculo bastante fechado, fortemente integrado. Se corresse o rumor de que o imperador não tinha um músico especialmente em conta, a boa sociedade simplesmente o deixava de lado” (ELIAS, 1995, p. 35). Assim, mesmo buscando viver autonomamente, Mozart nunca rompeu com a tradição aristocrática – como Beethoven – e, por conta disso, quando ele perdeu o prestígio com a corte de Viena, passou por sérias dificuldades.

Em meio a tantos desenvolvimentos e transformações, na passagem do século XVIII e XIX, a sociedade precisou enfrentar muitas dificuldades devido às guerras e às mudanças de regimes de governo. Era a passagem da Idade Moderna para a Idade Contemporânea. Napoleão foi uma figura de destaque inicialmente na França, vencendo o absolutismo do rei, porém vindo a se autodenominar mais tarde também como rei. Era também a época de desenvolvimentos técnicos e científicos. Nessa sociedade de transformações encontramos dois personagens que se destacaram em suas áreas de trabalho, com contribuições importantes até nossos dias: Fourier e Beethoven. Na época, buscando melhores condições para a sociedade, ambos acreditaram que a figura de Napoleão seria importante para o progresso. Fourier chegou a ser militar no exército francês e Beethoven compôs uma sinfonia dedicada ao importante político, que desejava conhecer pessoalmente. Ambos se decepcionaram e mudaram seus rumos, buscando outros caminhos, longe do novo ditador.

Beethoven nasceu no período do classicismo da Música, na então pequena cidade de Bonn, Alemanha. Os trabalhos de Beethoven podem ser divididos em três períodos: o clássico, o heroico e o sublime. Muitas de suas composições não se enquadram em nenhum desses períodos. Em 1803, em seu período heroico, teve algumas ideias musicais que aos poucos revelavam o perfil de uma sinfonia de alcance épico, para a qual deu o nome de Bonaparte. Em junho de 1804,

quando Beethoven fez o primeiro ensaio da sua 3ª Sinfonia, Napoleão havia se autoproclamado rei. Ao tomar conhecimento, Beethoven arrancou seu nome da Sinfonia, para a qual deu o novo nome de Heroica, num acesso de raiva. Ele exclamou: “Napoleão não passa de um mortal como outro qualquer... haverá de pisotear os direitos humanos e tornar-se um tirano” (HORNE, 2013, p. 57).

Fourier nasceu em Auxerre, na França, em 21 de março de 1768. Fourier chegou a se envolver com a política de Napoleão, porém começou a não concordar com as práticas políticas francesas, com várias correntes que se debatiam violentamente. Tentou abandonar atividades políticas, mas não conseguiu. Ainda em 1794 foi escolhido para cursar a École Normale de Paris, onde teve como professores os já eminentes Lagrange, Laplace e Monge. Fourier começou a ensinar no Collège de France e obteve uma posição numa instituição que passaria logo a se denominar École Polytechnique, que logo se tornaria uma das instituições de mais prestígio no mundo acadêmico. Em 1797 sucedeu Lagrange na cátedra de Análise e Mecânica. No ano seguinte acompanhou Napoleão como assessor científico, na invasão ao Egito, no Cairo, onde ajudou a criar estabelecimentos de educação e se dedicou a trabalhos arqueológicos (FERREIRA, 2009, p. 85).

Os trabalhos de Fourier são hoje aplicados em muitas áreas, também na Música. As percepções e análises dos timbres dos instrumentos musicais, que eram feitas por Beethoven, com seu ouvido muito apurado (até cerca de 25 anos de idade), hoje podem ser feitas facilmente através da espectroscopia sonora, utilizando as séries de Fourier. A série harmônica e a escala natural são também estudadas com a mesma ferramenta matemática. Vimos então que Fourier e Beethoven deixaram importantes contribuições para a humanidade e que são fruto de uma época de grandes transformações. Apesar de ambos terem uma atração pelo poder e pelo reconhecimento da sociedade, poder que tinha como

modelo Napoleão (vimos que Fourier chegou a trabalhar com Napoleão e Beethoven compôs uma sinfonia para ele), eles souberam dosar essa atração de forma a não prejudicar ninguém (GRILLO, BAPTISTA, 2015).

Romantismo

O Romantismo inicia-se como um movimento literário, político e filosófico, que se estende das duas últimas décadas do século XVIII até os fins da primeira metade do século XIX. A forma de pensamento romântica se caracteriza como uma abrupta ruptura aos padrões vigentes na época clássica que, por sua vez, prolongaram-se por meio do Neoclassicismo Iluminista. Segundo os românticos, o Racionalismo, legado pelo Iluminismo, nada criava, tendo exclusivamente uma conotação negativa. Essa posição estéril frente à realidade despiu o mundo de todo encanto fornecido pelos discursos transcendentais: a única explicação verdadeira deveria ser mecanicista e embasada por um discurso claro e racional. Esse movimento exclusivamente negativo, segundo os românticos, exercia um efeito altamente nocivo à sociedade, retirando desta toda aura de encanto e sentimento de comunidade. Ao lugar desses sentimentos, imperava o ideal de um cosmopolitismo abstrato que apagaria todas as diferenças nacionais. A esse mundo cosmopolita pertencia igualmente um homem abstraído de suas singularidades (GRILLO *et al.*, 2015).

Para entendermos como o Romantismo se deu na Música, precisamos recorrer às suas raízes filosóficas. Já no Classicismo de Haydn e Mozart, encontramos elementos do Sturm und Drang (tempestade e ímpeto), movimento cultural alemão que antecedeu e possibilitou o estabelecimento do Romantismo. A figura do gênio, a supervalorização dos sentimentos, a busca de uma conexão maior do homem com a natureza, o rompimento com o racionalismo vigente na Arte clássica e a valorização dos aspectos culturais do povo,

trazendo para as mais diversas manifestações artísticas elementos folclóricos constituintes das raízes históricas nacionais foram alguns dos aspectos mais relevantes instaurados pelo Sturm und Drang.

Segundo Bruno Kiefer em Guinsburg (2013), o Romantismo, como todo movimento estético, não é dotado de uma uniformidade, sendo caracterizado pela multiplicidade estilística encontrada em todas as suas vertentes. Tendo isso em vista, costuma-se estabelecer uma divisão entre alguns períodos do Romantismo, sendo eles: fase inaugural, seguida pela chamada fase do apogeu, e, por fim, a fase do pós-Romantismo.

A primeira fase é normalmente delimitada entre 1810 e 1828, tendo como seus principais expoentes Schubert, Hoffmann, Weber e Spohr. Essa fase é marcada pelo rompimento com o Classicismo puro e a consolidação da estética romântica na Música.

A segunda fase do movimento romântico, também conhecida como fase de Apogeu, tem como principais representantes Schumann, Mendelssohn e Chopin, se dando entre 1828 e 1850. Nascido em 1810, Robert Schumann sintetizava em si e em suas composições os conflitos clássico-românticos. Tendo se destacado na literatura musical, Schumann foi responsável pela retomada do piano no cenário musical. Escrevendo exclusivamente para piano nas suas primeiras 23 obras, manteve uma forte presença desse instrumento em suas demais composições. Considerado o clássico entre os românticos e o romântico entre os clássicos, Mendelssohn traz elementos conservadores em suas composições românticas.

O pós-Romantismo é o nome atribuído a um conjunto de movimentos distintos que se deram no ou partidos do Romantismo. É o período mais complexo do Romantismo e costuma ser subdividido em três correntes: o Realismo-romântico, que traz a figura revolucionária que foi Wagner, acompanhado de outros grandes nomes, como, Verdi, Bizet,

Liszt e Strauss; o Classicismo-romântico com Brahms, Bruckner, Mahler e Cesar Franck e por fim o Impressionismo de Debussy. O Realismo romântico aparece com uma ousada proposta estética de integração de diversas formas de Arte, como o Teatro, a Poesia e a Música.

O período anterior ao Romantismo tinha em potencial todas as mudanças ocorridas no século XIX. Os governos absolutistas, com o domínio de poucas pessoas sobre toda a população, impediam esse desenvolvimento e foram aos poucos sendo derrotados. As músicas, que antes eram compostas e apresentadas para a classe da nobreza, passaram a ser largamente divulgadas, e vemos um grande aumento do número de compositores de valor ao longo do século XIX, com grande variedade de estilos, reflexo da abertura de ideias e possibilidades. A Música de Beethoven, em sua 3ª fase, deu origem a um novo estilo, seguido por muitos, criticado também por muitos, como Hanslick (GRILLO *et al.*, 2015).

Segundo Lord (2008), “com a ascensão do concerto público surgiu também a possibilidade do comentador especialista enquanto mediador entre novas obras e o público. Com o crescimento do jornalismo impresso durante o século XIX, estes juízes do gosto vieram a conquistar um poder e uma autoridade consideráveis, e um dos mais influentes foi o crítico austríaco Eduard Hanlick (1825-1904)”. Brahms foi defendido por ele como uma volta ao estilo Clássico e atacava as “depravações modernas” de Wagner. Sua influência foi muito grande levando Wagner a fazer uma paródia de Hanslick, em sua famosa ópera *Mestres Cantores de Nuremberg*.

Apesar das críticas, Wagner tornou-se uma referência no estilo operístico, muito valorizado até hoje. A eletricidade e o magnetismo não ficaram confinados em laboratórios chegando aos indiscutíveis avanços reconhecidos em nossos dias.

Vivemos também hoje em uma transição da visão filosófica dominante, como na transição dos séculos XVIII para

XIX. Hoje podemos ver os frutos de toda uma luta, que teve altos e baixos, com a ajuda de líderes que contribuíram com a popularização de todas as áreas do conhecimento. Não só a eletricidade e o magnetismo são vistos hoje como matérias distintas e convergentes, mas todas as áreas, num reconhecimento da importância da interdisciplinaridade para o entendimento real de qualquer área de conhecimento. Porém muitos líderes se deixaram dominar pelo desejo de poder. Segundo Grillo e Baptista (2015), Napoleão foi um desses líderes, e hoje ainda vivemos nessa problemática. A Revolução Industrial da época foi substituída hoje pela Revolução na Tecnologia e nas Comunicações, principalmente com os recursos computacionais, que cobram uma mudança de postura e desmascaram os que enganam toda uma população em vista de interesses particulares (GRILLO *et al.*, 2015).

Influências na Música atual: Pós-Romantismo, Impressionismo, Dodecafonismo e outros

Mesmo após Wagner, que foi considerado na ópera o auge do Romantismo, tivemos adiante, no século XX, diversos compositores ainda utilizando a linguagem romântica na Música. Rachmaninov, Villa-Lôbos, Prokofiev, em pleno século XX, têm composições nitidamente do período Romântico. Mas um francês, que viveu entre 1862 e 1918, Debussy, trabalhou uma nova ideia, que era a escala de tons inteiros, ou seja, cria uma nova perspectiva de tensão e repouso, porque antes, tom implicava em tensão e o semitom em relaxamento, conceito estético que vem desde os antigos modos gregos. O Impressionismo, termo emprestado da pintura, realmente nos mostra uma Música completamente inovadora e tem como maior expoente Claude Debussy que, em 1894, inspirado nas obras de escritores contemporâneos como Mallarmé, no Prélude à “Láprés-midi d’un faune”, cria

essa obra orquestral primorosa que é marco de ruptura com o Romantismo do século XIX (SADIE, 1994).

A guerra sempre transforma as coisas e as pessoas e o século XX teve duas guerras mundiais terríveis: de 1914 a 1918 (primeira grande guerra) e de 1939 a 1945 (segunda guerra mundial). Esses acontecimentos influenciaram todas as áreas, também a Música. Em 1874 nasce em Viena um compositor que produziu o Expressionismo, corrente que em síntese usa a Música serial dodecafônica que tem uma estrutura bem rígida e atonal. Cria-se uma série de 12 sons que não podem ser repetidos até que todos sejam ouvidos e através da ordem: original, inverso e retrógrado da série. Produz-se uma Música não mais baseada na estética romântica (FREDERICO, 1999). O resultado é sempre surpreendente e inovador.

Muitas outras tentativas de produzir uma Música nova e inovadora foram tentadas e continuam mais discretamente, uma vez que a mídia televisiva e a *web* absorvem completamente a atenção das pessoas, deixando pouco espaço para a tradicional forma de se fazer Arte Musical. O que sempre moveu a demanda musical foi o desenvolvimento intelectual do público consumidor e se não há interessados em ouvir inovações na arte musical, ela se retrai e aguarda melhores momentos. Alguns apressados críticos se colocam a dizer que a música morreu como Arte. Morrer é um termo muito forte e ruidoso para uma Arte secular que tem conexão intrínseca com os valores morais e filosóficos das sociedades humanas. A economia, quando não encontra eco, também se retrai fortemente, contudo não morre totalmente, apenas aguarda a oportunidade melhor para se restabelecer. Isso é muito compreensível. Enquanto isso, os “oportunistas de plantão” impõem qualquer produto cultural, como se fosse possível atribuir algum valor de Arte às suas mercadorias, consumidas por um público alienado por fórmulas de consumo com baixa qualidade e que se denominam artistas, quando na verdade

são artesãos que repetem à exaustão fórmulas primitivas de fazer Música e Arte. Na verdade, não fazem nem poema e nem Música, apenas ganham dinheiro dos famintos por qualquer distração alienante.

Referências

- ABDOUNUR, O. J. **Matemática e Música**: O pensamento analógico na construção de significados. São Paulo: Escrituras, 2003.
- BOYER, C. B. **História da Matemática**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1996.
- CANDÉ, R. **História Universal da Música**. São Paulo: Martins Fontes, 2001.
- CARPEAUX, O. M. **O Livro de Ouro da História da Música**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2009.
- CHAIM, I. A. **A Música Erudita da Idade Média ao Século XX**. São Paulo: Letras e Letras, 2006.
- ELIAS, N. **Mozart**: Sociologia de um Gênio. Rio de Janeiro: Zahar, 1995.
- FERREIRA, P. M. G. **A fé em Deus de grandes cientistas**, Rio de Janeiro: PUC-RIO, 2009. 309 p.
- FREDERICO, E. **Música - breve história**. São Paulo: Irmãos Vitale, 1999.
- GRILLO, M. L. N., BAPTISTA, L. R. P. L., BRANDÃO, L. P. Ensino de Física Contextualizado Através da História, da Filosofia e da Música. **Anais do XX SNEF**. São Paulo: EDUSP, 2013. v.1. p. 1 – 8.
- GRILLO, M. L. N., MARQUES, A. J., BAPTISTA, L. R. P. L., MARTINS, R. P. A Acústica Musical no Renascimento da Música, **Anais do 13º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia**. S. Paulo: USP, 2012a. v.1. p.1924 – 1938.
- GRILLO, M. L. N., MARQUES, A. J., MARTINS, R. P., BRASIL, N. G. P., SILVA, J. A. **As transformações epistemológicas da acústica**

musical iniciadas no século XVI. Scientiarum História, v. V, p.1 - 8, 2012b.

GRILLO, M. L. N., FILHO, M. C. P., BARRETO, J. A. Conexões Interdisciplinares no Romantismo: Música, Filosofia, Física. **Scientiarum Historia VIII.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2015. v.1. p.1 – 8.

GRILLO, M. L. N., BAPTISTA, L. R. P. L., MARQUES, A. J., MARTINS, R. P., BRASIL, N. G. P. Os grandes desenvolvimentos da física e da Música no barroco. **Scientiarum Historia**, v. 4, p.534 - 540, 2011.

GRILLO, M. L. N., BAPTISTA, L. R. P. L. Uma abordagem interdisciplinar da acústica musical, **Tecniacústica 2013 – 44º Congresso Espanhol de Acústica**, 2013, Valladolid, Espanha.v.1. p.1259 – 1267.

GRILLO, M. L. N., BAPTISTA, L. R. P. L., MARQUES, A. J., MARTINS, R. P. A Música no Período Clássico: Mozart e o Idealismo Artes-Ciências, **Scientiarum Historia VI**, 2013, v. 1, p. 161-168, Rio de Janeiro.

GRILLO, M. L. N., BAPTISTA, L. R. P. L. A verdade histórica buscada através de Beethoven e Fourier, **Anais do 14º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia.** Belo Horizonte: SBHC, 2015. v. 1. p. 1-11.

GUINSBURG, J. (Org.). **Os Fundamentos Históricos do Romantismo.** São Paulo: Perspectiva, 2013, 322 p.

HENRIQUE, L. L. **Acústica Musical.** Lisboa: Calouste Gulbenkian, 2007.

HORNE, A. **A Era de Napoleão.** Rio de Janeiro: Objetiva, 2013. 227 p.

KUHN, T. S. **A Estrutura das Revoluções Científicas.** São Paulo: Perspectiva, 2003.

LORD, M. **História da Música – da Antiguidade aos nossos dias.** Eslovênia: Tandem Verlag, 2008, 120 p.

MARCONDES, D. **Introdução à História da Filosofia – dos pré-socráticos a Wittgenstein.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1997.

- MEDAGLIA, J. **Música Maestro**: do Canto Gregoriano ao Sintetizador. Rio de Janeiro: Globo, 2008.
- MENEZES, F. **A Acústica Musical em Palavras e Sons**. Cotia: Ateliê Editorial, 2004.
- RIEMANN, H. **Dictionnaire de musique**, Payot, Paris, 1913.
- RONAN, C. A. **História Ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge**, v. 3. São Paulo: Zahar, 1987.
- SADIE, S. **Dicionário Grove de Música**. Rio de Janeiro: Zahar, 1994.

Capítulo 5

O Violão no Ensino de Física

Profª. Dra. Maria Lúcia Grillo

Prof. Luiz Pugginelli Brandão

Uma grande dificuldade enfrentada pelo professor de Física, especialmente do nível médio, é a falta de motivação de seus alunos, para quem a disciplina parece muito distante do cotidiano. Desejamos tornar o ensino de Física, principalmente a área de Acústica, mais prazerosa para nossos alunos. É fácil constatar que a Física é confundida pelos alunos com a Matemática, pois, na prática, o que em geral os professores da disciplina fazem é uma “matematização” da Física, ou seja, apresentam a teoria e logo em seguida resolvem problemas, sem ter a preocupação de relacionar o que ensinam com o cotidiano de nossos alunos, aumentando o abismo existente entre o que se ensina e o mundo real.

Nas escolas secundárias, principalmente as da rede pública estadual, em sua maioria, existe uma carência enorme de mão de obra, de material, e de algo que é fundamental para um bom aprendizado de Física: os laboratórios. Outro fato importante e que chama a atenção é que, no currículo mínimo, na rede estadual do Rio de Janeiro, o conteúdo de

Acústica está “mascarado” no ensino de Ondas, pois na realidade o que ele trata é de Ondas Eletromagnéticas, esquecendo-se das Ondas Mecânicas, e o que presenciamos é uma quantidade enorme de alunos portando instrumentos musicais, principalmente, o violão. Esse instrumento na realidade é um grande laboratório que pode ser explorado e, dessa forma, juntamente com outros recursos, facilitar o aprendizado e, principalmente, fazer que os alunos tenham gosto em aprender essa disciplina tão bela, sentida e vivenciada todos os dias de nossas vidas.

O estudo de uma corda vibrante, por exemplo, pode ser estudado em laboratórios de Física e muito bem ilustrado se aplicado diretamente à vibração de uma corda em um instrumento musical, como um violão ou um violino. Através do violão, os alunos perceberão fenômenos que estão em seu cotidiano como, por exemplo, a reflexão, a interferência, a ressonância, as ondas estacionárias e outros que podem ser associados a vários instrumentos musicais. Além do uso do violão e de outros instrumentos muito utilizados, como a flauta doce, podem ser usados também materiais para os experimentos, de baixo custo ou nem tanto, de forma que eles possam ter a oportunidade de interagir com os experimentos. No último capítulo deste livro (Capítulo 7), propomos alguns experimentos que podem complementar as atividades propostas nesse capítulo.

O importante, para contornar o problema da desmotivação do estudante, é a utilização de exemplos e atividades relacionadas com os interesses dos estudantes. Nesse sentido, a Música pode ser uma importante aliada do professor na busca por motivação.

Introdução

O cientista/pesquisador possui um papel que vai além da produção de conhecimento em sua área específica e ele

não deve esquecer a sua responsabilidade frente à sociedade atual.

Segundo Kneller (1978), todo cientista tem uma responsabilidade moral e social mínima e específica. Ele deve abster-se de realizar qualquer pesquisa que possa por em perigo o público ou ter aplicações tecnológicas potencialmente mais nocivas que benéficas.

É desejável e inevitável um certo controle democrático da Ciência. Os cientistas podem, sobretudo, educar e incentivar o grande público para entender a natureza da Ciência e participar em sua administração. Podem fazê-lo da melhor maneira, debatendo abertamente as finalidades e limitações da atividade científica. O cientista pode e deve explicar o seu trabalho de um modo que o público possa entender. Nesse sentido podemos falar de combate à exclusão social, não só daqueles economicamente excluídos, mas também daqueles que, vivendo em plena era de desenvolvimento científico e tecnológico, não conseguem usufruir e entender bem os novos conhecimentos. Se forem científica e economicamente excluídos a situação se agrava bem como nossa responsabilidade.

Conforme Moreira (2006), um dos aspectos da inclusão social é possibilitar que cada brasileiro tenha a oportunidade de adquirir conhecimento básico sobre a Ciência e seu funcionamento, que lhe dê condições de entender o seu entorno, de ampliar suas oportunidades no mercado de trabalho e de atuar politicamente com conhecimento de causa.

Podemos dizer mesmo, conforme Kneller (1978), que os cientistas também deveriam interessar-se mais pelo ensino e pela divulgação da Ciência, discutindo seus trabalhos com professores, e explicando-os pessoalmente aos estudantes. Isso fica mais simples de ser realizado quando as tarefas de professor e pesquisador são acumuladas, podendo atuar nos três setores que são os alicerces de toda universidade: ensino, pesquisa e extensão. Os jovens podem entender

melhor a natureza da Ciência se um professor/pesquisador os encorajar a realizar pesquisas por conta própria, formulando e resolvendo problemas dentro dos limites de sua experiência e compreensão. O cientista deve também apresentar a Ciência como atividade humana e falível que é. Deve encorajar o professor a cultivar um espírito crítico e inquiridor nos jovens. Para essa abordagem é importante levar em conta os aspectos históricos e filosóficos, como vimos no Capítulo 4.

Com esses objetivos de um maior alcance do conhecimento científico e tecnológico, isto é, uma maior popularização da ciência, buscam-se hoje novas modalidades de transmissão desses conhecimentos, incluindo a educação formal e a informal. A III Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (em novembro de 2005) apresentou várias propostas nesse sentido. Na área da Educação Científica, propõe-se: apoiar programas de aprimoramento da formação inicial e qualificação de professores nas áreas de ciências; promover a valorização da atividade do professor com bolsas, apoio a projetos de pesquisa nas escolas e estágios em laboratórios, premiações etc; estimular e apoiar a realização de feiras de ciências, olimpíadas e concursos que favoreçam a criatividade, a inovação e a interdisciplinaridade, entre outras atividades (MOREIRA, 2006).

Conforme Moreira (2006), um dos aspectos dos desafios para a melhora no ensino de Física é a necessidade de as Universidades se abrirem mais para a sociedade. Durante muitas décadas, inclusive por razões históricas, ela esteve muito voltada para a elite. Nos últimos anos, tem-se intensificado o movimento de abertura para a comunidade, com expansão das atividades de extensão e pesquisa em Ensino de Física. É surpreendente que as pessoas consigam aprender tanto em tão pouco tempo. No entanto, serão capazes de aprender mais se o conteúdo for apresentado de maneira interessante.

A interdisciplinaridade é hoje reconhecida como sendo de grande importância e necessidade: “Todo trabalho científico de real importância transcende os limites disciplinares e também a capacidade de trabalho de um pensador isolado” (COHN, 2006).

O que está em jogo na interdisciplinaridade é a produção de novas questões, e não o acúmulo de conhecimento, que permite apenas a solução de problemas técnicos pontuais, o que não exclui, entretanto, a ideia do trabalho especializado. “É preciso conhecer muito bem a teoria do meu campo de estudo para dialogar com alguém de outra área, e fazer isso com competência” (FLORIANI, 2006).

Os Parâmetros Curriculares Nacionais – PCNs compreendem as recomendações oficiais para o desenvolvimento de projetos direcionados ao Ensino Médio (PCNEM, 2000). Assim, nos pautamos em seu texto na elaboração da nossa proposta de ensino da Física em parceria com a Música. Já os PCN+’s (2002) são orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais, e exploram detalhadamente as competências que se deseja desenvolver em conjunto com o conteúdo da disciplina. Dentro da perspectiva dos PCN+’s, destacamos como uma das competências esperadas na área de ciências da natureza e suas tecnologias:

compreender a Física como parte integrante da cultura contemporânea, identificando sua presença em diferentes âmbitos e setores, como por exemplo, nas manifestações artísticas ou literárias, em peças de teatro, letras de música etc., estando atento à contribuição da ciência para a cultura humana.

Os PCN+’s (2002) propõem ainda a divisão da Física em seis temas estruturadores, que visam organizar o ensino da disciplina. Destacamos o Tema 3 – Som, imagem e informação. Ele sugere que as fontes sonoras sejam abordadas a fim de:

- identificar objetos, sistemas e fenômenos que produzem sons para reconhecer as características que os diferenciam;
- associar diferentes características de sons a grandezas físicas (como frequência, intensidade etc.) para explicar, reproduzir, avaliar ou controlar a emissão de sons por instrumentos musicais ou outros semelhantes.

A interdisciplinaridade é a palavra-chave para a educação básica. Através dela várias disciplinas são interligadas proporcionando uma melhor compreensão dos fenômenos que acontecem diariamente. A Música pode ser usada para fazer a ligação entre as diversas disciplinas ensinadas no ensino médio como, por exemplo, a Matemática, a História, a Filosofia e a Física. A Lei 9.394 indica que a interdisciplinaridade deve ser aplicada no nível médio, conforme texto a seguir:

A Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996, denominada Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB), 9ª edição, estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Foi atualizada em 20/5/2014, tendo como presidente da mesa da Câmara dos Deputados, o Sr. Henrique Eduardo Alves. Segundo o deputado Henrique Eduardo, no texto são encontradas as disposições sobre a organização da educação escolar; as responsabilidades dos entes federados, das escolas, dos pais e dos educadores; os níveis e modalidades de ensino; os requisitos para a formação e a valorização do magistério; e o financiamento da educação. O conhecimento da LDB é fundamental para que a educação seja compreendida como direito de todo cidadão brasileiro, desde a creche até os níveis mais avançados da formação superior. A acessibilidade é uma questão de justiça e uma marca de política pública de sociedades democráticas.

Na seção IV que trata do Ensino Médio, temos os artigos 35 e 36 que dizem:

Art. 35. O ensino médio, etapa final da educação básica, com duração mínima de três anos, terá como finalidades:

- I – a consolidação e o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no ensino fundamental, possibilitando o prosseguimento de estudos;
- II – a preparação básica para o trabalho e a cidadania do educando, para continuar aprendendo, de modo a ser capaz de se adaptar com flexibilidade a novas condições de ocupação ou aperfeiçoamento posteriores;
- III – o aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico;
- IV – a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.

Art. 36. O currículo do ensino médio observará o disposto na Seção I deste capítulo e as seguintes diretrizes:

- I – destacará a educação tecnológica básica, a compreensão do significado da ciência, das letras e das artes; o processo histórico de transformação da sociedade e da cultura; a língua portuguesa como instrumento de comunicação, acesso ao conhecimento e exercício da cidadania;
- II – adotará metodologias de ensino e de avaliação que estimulem a iniciativa dos estudantes;
- III – será incluída uma língua estrangeira moderna, como disciplina obrigatória, escolhida pela comunidade escolar, e uma segunda, em caráter optativo, dentro das disponibilidades da instituição;

IV – serão incluídas a filosofia e a sociologia como disciplinas obrigatórias em todas as séries do ensino médio.

§ 1º Os conteúdos, as metodologias e as formas de avaliação serão organizados de tal forma que ao final do ensino médio o educando demonstre:

I – domínio dos princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna;

II – conhecimento das formas contemporâneas de linguagem.

A interdisciplinaridade Física-Música

Conforme Grillo e Perez (2013), as atividades humanas, sejam artísticas ou científicas, seguem normas rígidas de conduta. Todas passaram pelo empirismo, chegando a um ponto onde os resultados são satisfatórios e as possibilidades são previsíveis. A distinção entre as duas está na utilização ou para que servem. Depende do grau de interesse de cada grupo social ou da educação e cultura de cada povo. O que deve ser buscado em todas as atividades é o desenvolvimento da criatividade, isso é importante tanto para a ciência quanto para a arte: a novidade, a busca de um caminho diverso, inusitado, ou aquele pouco visitado. Um gênio só precisa de uma ideia, o resto é desenvolvimento como num texto. Quem não é superdotado pode muito bem aprender a desenvolver ideias já propostas, mas pouco exploradas.

A Arte tem muito do pensamento científico, que necessita desesperadamente ser pelo menos um pouco artístico, no sentido da invenção: a busca da descoberta, a novidade procurada a todo custo e não ser apenas uma repetição tola. E isso ocorre tanto na Ciência quanto na Arte. O caminho da mediocridade é rápido e às vezes lucrativo, mas traz embutido o ônus da frustração quando inevitavelmente comparamos

a verdadeira invenção com uma simples repetição sem criatividade. A construção de instrumentos musicais é Física pura, porém não há em nenhuma Universidade as disciplinas Apreciação Musical, Percepção, Luthieria, e outras, constando dos currículos de Física, Matemática, Psicologia e outras áreas mais. Nem mesmo a disciplina de Acústica tem sido incluída ultimamente nos currículos de Física. A Música pode muito bem ser utilizada no ensino da Matemática e da Física, trazendo assim um maior interesse para as atividades científicas. Também no currículo da Medicina pode-se usar a Música como relaxante e auxiliar anestésico (GRILLO; PEREZ, 2013).

A pintura tem sido utilizada como auxiliar na terapia de pacientes que precisam estimular a defesa imunológica. O teatro é uma outra atividade artística que utiliza a experimentação de realidades diferentes do real e que pode também ser usado no ensino da Ciência. A dança serve como interação e aproximação das pessoas, o cinema como incentivador de ideias científicas avançadas ou enfatizador de realidades pouco visíveis. Estudar Arte, principalmente nos primeiros anos de vida, significa ampliar a expectativa de vida dos humanos, mas não como elitismo e sim como possibilidade de ampliar o pensamento humano, que se tornou deteriorado em virtude de uma série de fatores, principalmente econômicos e políticos. Mas os maus políticos se esquecem que o mercado de Música, por exemplo, é da ordem de trilhões de dólares em todo o planeta. E as Universidades e órgãos afins não conseguem em geral vislumbrar as vantagens da Arte integrada ao estudo científico. Albert Einstein tocava violino muito bem e o violino o ajudou muito na elaboração da sua famosa Teoria da Relatividade. E o violino é um instrumento não temperado que possui uma gama de sons muito grande, e difícil de ser executado.

Existe hoje uma necessidade urgente de diálogo entre as Ciências e as Artes que passará consequentemente pela Educação.

A Física do violão

Dentro das inúmeras possibilidades de estudo, na interface Física-Música, uma das nossas escolhas foi o estudo da Física do violão, por ser um instrumento musical muito conhecido, barato e fácil de ser encontrado.

O violão faz parte do grupo dos instrumentos de cordas (cordofone dedilhado). Em sua origem, possivelmente na antiguidade, tinha uma forma diferente da atual, com diferentes quantidades de cordas. Hoje o violão possui seis cordas, afinadas conforme a Tabela 1 (ROSSING, 1990).

A numeração ao lado do nome da nota indica em que faixa de frequência está localizada. A música para violão é notada uma 8ª acima do que soa (SADIE, 1994).

Todo instrumento, antes de ser utilizado, precisa ser afinado, de modo que possa reproduzir as notas que sua estrutura física permite, mas que estejam dentro das frequências que foram historicamente definidas como fazendo parte das escalas em uso (MENEZES, 2003). No Ocidente, a escala mais usada é a temperada (as escalas foram explicadas no Capítulo 3). A escala natural por vezes é utilizada, especialmente em instrumentos de sopro (aerofones), quando não serão acompanhados por instrumentos como piano e teclado, que usam a escala temperada.

Tabela 1 – Notas e frequências das cordas do violão

Cordas	Notas	Frequências
1ª	Mi ₃	329,6
2ª	Si ₂	246,9
3ª	Sol ₂	196,0
4ª	Ré ₂	146,8
5ª	Lá ₁	110,0
6ª	Mi ₁	82,4

Conforme Grillo e Perez (2013), o violão possui um dispositivo para a afinação que regula a tensão na corda, uma espécie de parafuso onde a corda é presa e enrolada (ver Figura 1). No braço do violão, são colocados trastes de metal que dividem o seu comprimento em tamanhos pré-calculados de modo que o comprimento efetivo da corda vibrante sempre produza sons respeitando as frequências da escala temperada.

O som do violão é emitido através de principalmente três processos físicos: as ondas transversais estacionárias nas cordas, com o modo fundamental e seus harmônicos (com frequências aproximadamente múltiplas da fundamental), a propagação do som produzido pelas cordas para o corpo, de madeira, onde são produzidos os modos ressonantes e finalmente a onda sonora propagada no ar, que atinge nossos ouvidos.

1. mão ou paleta
2. pestana
3. tarrachas ou cravelhas
4. trastes
5. braço
6. tróculo (junta do braço)
7. corpo
8. cavalete (ou ponte)
9. fundo
10. tampo
11. lateral ou faixas
12. abertura ou boca
13. cordas
14. rastilho
15. escala

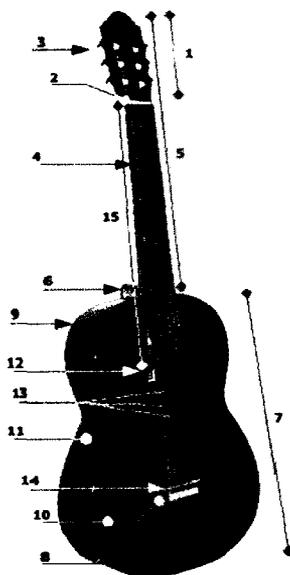


Figura 1 – Violão atual

A velocidade (v) de uma onda transversal estacionária numa corda está relacionada com a tensão aplicada (T) e a densidade da corda (μ) pela equação 1 (RESNICK, HALLIDAY,

KRANE, 2003). Também falaremos dessa expressão no Capítulo 6:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (\text{eq. 1})$$

A condição para que uma onda estacionária seja gerada em uma corda de comprimento L fixa nas duas extremidades é:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{eq. 2})$$

Logo,

$$f_n = \frac{nv}{2L} \quad (\text{eq. 3})$$

onde n é a ordem do modo de vibração (o modo fundamental possui $n = 1$) e L normalmente mede 65 cm.

Substituindo o valor de v da eq. 1 na eq. 3 temos a relação entre a tensão e a frequência:

$$f_n = \frac{nv}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \Rightarrow f_n^2 = \frac{n^2 T}{4L^2 \mu} \Rightarrow \quad (\text{eq. 4})$$
$$T = \frac{f_n^2 4L^2 \mu}{n^2}$$

Então, quando afinamos um violão, ajustamos cada corda de forma que a tensão aplicada T produza a frequência f desejada, conforme Tabela 1.

Convencionalmente, a nota Lá₃ serve de “norte” para a afinação de todos os instrumentos. No violão, o Lá₃ corresponde à primeira corda pressionada na quinta casa. Para sabermos que tensão deve ser aplicada em cada corda podemos usar o diapasão como referência, que emite o Lá₃ ou algum outro instrumento que esteja afinado. Essas formas de afinação exigem uma boa percepção, especialmente a primeira, já que o diapasão tradicional só emite uma única nota. Quando se afina o violão por outro instrumento, pode-se

observar a coincidência de frequências e também o fenômeno do batimento. O batimento é um fenômeno físico que ocorre sempre que dois sons de frequências muito próximas são tocados juntos e geram um terceiro som, cuja frequência é a diferença entre as duas primeiras. Se o batimento depende da diferença entre as frequências, quanto menor a diferença entre as alturas dos sons tocados menor será a frequência do batimento. Ao afinarmos um violão escutando os batimentos, vamos ajustando a tensão da corda de modo que a frequência do som do violão vá se aproximando à desejada e por consequência o batimento vai ficando cada vez mais lento. Quando não ouvimos mais o batimento, sabemos que a corda está afinada, pois:

$$f_{\text{batim}} = f_1 - f_2 = 0 \rightarrow f_1 = f_2 \text{ (eq. 5)}$$

Uma outra maneira de afinar o violão, que dispensa a necessidade de uma boa percepção, é usando o programa Gram 10 (ou outro semelhante), que separa as frequências presentes num som. A frequência fundamental será a que deve ser usada como referência.

A espectroscopia sonora do violão

Os sistemas de vibração podem vibrar em vários modos diferentes. Cada modo é relacionado a uma frequência diferente e, portanto, um modo de vibração pode ser excitado individualmente por algum tipo de perturbação relacionado a uma certa frequência.

Entretanto, é mais comum quando um sistema de vibração entra em ressonância que os vários modos sejam perturbados simultaneamente. A descrição desse movimento vibracional é bastante difícil, pois é necessário saber a amplitude (ou intensidade) e a frequência de cada modo de vibração perturbado. A obtenção desse resultado é feita através da análise do espectro da vibração.

O espectro de uma vibração indica quais frequências entraram em ressonância e com que intensidade cada uma vibrou. Essa análise de espectros é também chamada de análise de Fourier, onde cada uma dessas frequências perturbadas pode ser representada como componentes de uma série de Fourier. É o espectro de um som que representa o timbre de cada instrumento musical. Quanto maior o número de frequências em ressonância, mais rico é o som, porém se as frequências não forem múltiplas da fundamental (primeiro pico de frequência), o som não será harmônico.

Obtivemos alguns espectros de instrumentos acústicos (não eletrônicos) com a ajuda do Gram 10. Podem ser usados outros programas, como o Audacity. Essas experiências podem ser facilmente realizadas nas escolas, bastando ter disponível um computador com o programa apropriado, que pode ser obtido pela internet. Quanto aos instrumentos, os próprios alunos poderão levar para as experiências e mesmo realizá-las em casa (ver experiência “Espectroscopia Sonora” do Capítulo 7).

Resultados e conclusões

Estudamos alguns aspectos da Física do violão. Apesar de ser um instrumento relativamente simples, a Física envolvida é bastante complexa e pode ser bastante explorada e aprofundada, conforme o nível desejado e o público que se deseja atingir. Desde o início do nosso trabalho nessa linha de pesquisa sempre confirmamos que se trata de um tema que desperta interesse em todo tipo de pessoa, de todos os níveis de conhecimento e de diferentes áreas.

Ministramos cursos de extensão e oficinas nas semanas do “UERJ sem muros”, e muita gente mostrou interesse em observar e ouvir as explicações sobre os fenômenos físicos envolvidos nos instrumentos, principalmente no violão. Dentre todos os instrumentos que estudamos fisicamente, o

violão é sempre o que desperta maior interesse. A procura por esses cursos envolveu todas as áreas, principalmente estudantes de Física e de Música, mas também de outros cursos, como Medicina, Pedagogia, Letras, Biologia e Oceanografia. Inclusive pessoas que trabalham em lutheria nos procuraram para tentar aperfeiçoar a construção de violões. Implantamos uma disciplina eletiva de Acústica, para estudantes do curso de Física, e observamos também grande interesse.

Estamos certos de que não exaurimos o assunto, e pretendemos continuar os estudos envolvendo a Física do violão e de outros instrumentos de corda.

Referências

BRASIL, MEC (Ministério da Educação), Secretaria de Educação Média e Tecnológica (Semtec), **PCN+, Ensino médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC/Semtec, 2002.**

BRASIL, MEC (Ministério da Educação), Secretaria de Educação Média e Tecnológica (Semtec), **PCNEM, Parâmetros Curriculares Nacionais – Ensino Médio, Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC/Semtec, 2000.**

COHN, G. Interdisciplinaridade é fundamental para pensar os novos dilemas do planeta. **Jornal da Ciência**, 21 de julho de 2006.

FLORIANI, D. Reunião anual da SBPC: A arte de inventar questões sob a ótica da interdisciplinaridade. **Jornal da Ciência**, 21 de julho de 2006.

GRILLO, M. L. e PEREZ, L. R. (org.). **A Física na Música**. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2013.

KNELLER, G. F. **A Ciência como Atividade Humana**, São Paulo: Ed. Zahar, 1978.

MENEZES, F. **A Acústica Musical em Palavras e Sons**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

MOREIRA, I. de C. A inclusão social e a popularização da ciência e tecnologia no Brasil. **Inclusão Social**, v. 1, n. 2, p. 11-16, Brasília, 2006.

RESNICK R., HALLIDAY D., KRANE, K. S. **Física 2**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2003.

ROSSING, T. D. **The Science of Sound**. U.S.A.: Addison Wesley, 1990.

SADIE, S. **Dicionário Grove de Música**. Rio de Janeiro: Zahar, 1994.

Uma abordagem interdisciplinar dos cordofones friccionados

GRILLO, M. L. N.; BAPTISTA, L. R. P. L. VIII Congresso Iberoamericano de Acústica, 2012, Évora – Portugal. **Acústica 2012**. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Acústica, 2012. v.1. p. 1-12

Introdução

Uma analogia imediata se faz presente entre os instrumentos de cordas e o corpo humano. Somos entrecortados por veias e vasos sanguíneos que se assemelham às cordas dos instrumentos, e aliás, antes das cordas serem de metal elas eram feitas de tripa de carneiro. Talvez aí resida o fato de as cordas ou os instrumentos de cordas serem inconscientemente tão importantes para a Música e para os músicos. Nas veias se encontram os nutrientes que são levados para o corpo todo; nas cordas têm início as vibrações que são levadas para todas as partes do instrumento. Todos os grandes compositores da História da Música escreveram para os instrumentos de cordas friccionadas: violino, viola, violoncelo (tendo um mesmo padrão de construção) e o contrabaixo (com um modelo de construção baseado na viola da gamba). Os instrumentos de um modo geral pedem

sempre uma “Família” de instrumentos que passa necessariamente pelo subgrave, grave, médio, agudo e superagudo. Isso está sustentado pela capacidade de percepção humana dos sons. A Escala Geral, composta de 97 sons considerados musicais, delimita isso, mas é possível ultrapassá-la chegando mesmo aos infrasons e ultrasons, que não podem ser percebidos pelo ouvido humano.

A História nos apresenta algumas versões sobre o aparecimento e o desenvolvimento dos instrumentos de cordas friccionadas ao longo do tempo. O formato atual deles tem origem na Renascença (século XVI) e o desenvolvimento se deu no Barroco e Classicismo com os famosos Luthiers: Ammati, Stradivari, Guarneri e outros. Questiona-se hoje a real eficácia desses instrumentos antigos em relação aos modernos instrumentos. Uma coisa vale ressaltar: esses instrumentos de cordas friccionadas melhoram muito ao longo do tempo e sendo tocados por músicos de técnica precisa têm um ganho sonoro grande. Então, dependendo também de quem os toca, a sonoridade vai crescendo e as respostas acústicas vão se ampliando com o ato de executar as notas conscientemente (obedecendo às frequências determinadas).

O vibrato é um outro aspecto muito importante para esses instrumentos que mudam muito sendo tocados sem vibrato e com vibrato regular (que é a alternância de ínfimas desafinações com a frequência pretendida). Nisso se parece muito com a voz humana, que pede naturalmente o vibrato (variando a velocidade e a regularidade).

Uso e Funcionamento

Propriedades gerais

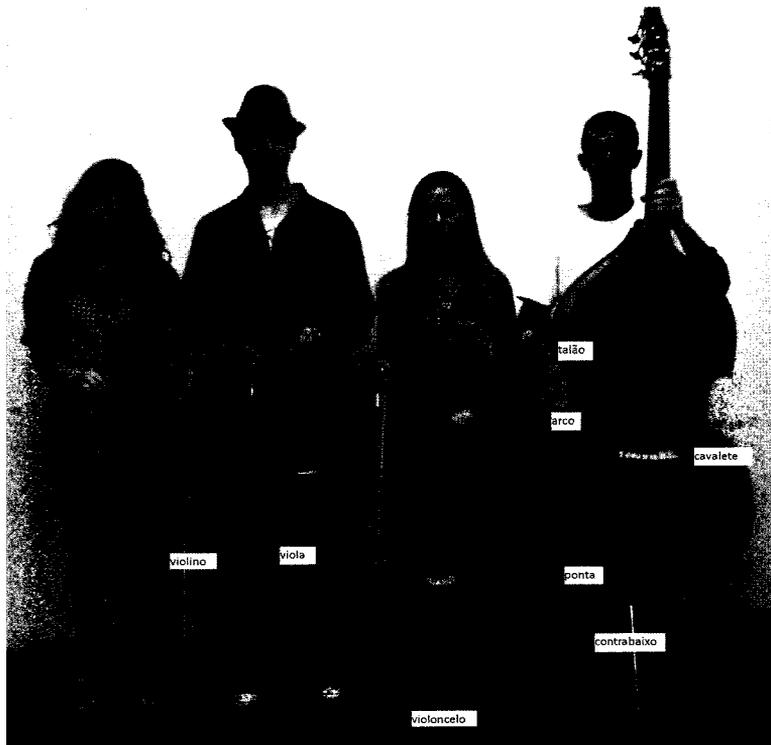


Figura 1 – Cordofones friccionados

Na Figura 1, vemos os cordofones friccionados (ou a arco, em inglês *bowed*). São usados principalmente em orquestras sinfônicas, em músicas eruditas. Seu uso é bem amplo também em pequenos grupos (orquestras de câmara, quintetos, quartetos ou em solo, em geral com outros instrumentos), em músicas populares. Conforme Ribeiro (2005), para serem executados, as cordas “são tangenciadas fricativamente, a arco”. A evolução desses instrumentos foi lenta e acompanhou o “progresso tecnológico e a diversidade e as variáveis históricas e socioeconômico-culturais que vem passando o Ocidente” nos últimos séculos, desde em torno de 1750 (RIBEIRO, 2005).

O arco, que propicia o nome de friccionados a esses instrumentos, tem suas particularidades: é constituído de vara, crina, talão e ponta. É feito de uma madeira ao mesmo tempo dura e flexível, sendo usado o Pau-Brasil como preferência pelos *luthiers* em diversas partes do mundo. A crina pode ser feita do rabo de cavalos tordilhos (quase brancos ou brancos) ou de nylon; é a parte que funcionará como elemento friccionador junto às cordas. O ajuste da tensão da crina é feito através de um parafuso localizado no talão.

O movimento do arco “para baixo ou para cima” (no violino e na viola) ou “para a direita ou para a esquerda” (no violoncelo e no contrabaixo) gera timbres e intensidades diferentes. O compositor indica nas peças musicais se determinada nota musical deve ser executada a partir do talão ou da ponta. O talão é a extremidade que recebe a mão do instrumentista e a ponta é a extremidade oposta.

Ribeiro (2005) lembra que os instrumentos do naipe das cordas possuem uma riqueza de timbres muito grande, conforme o tipo e o local de excitação da corda: pizzicato (ação direta dos dedos), sul tasto (sobre o espelho – régua que prolonga o braço do instrumento), sul ponticello (próximo ao cavalete ou ponte), martellato (cordas percutidas com as cerdas do arco), ricochet (o arco pula de 2 a 4 vezes sobre a corda), tremolo (movimento de vai-e-vem do arco sobre uma corda) e vibrato (oscilação dos dedos da mão esquerda sobre a corda friccionada). Esses efeitos geram notas curtas, diferentes das obtidas com arco friccionado lentamente sobre a corda.

Os cordofones friccionados possuem um cavalete ou ponte por onde as cordas passam e transmitem a vibração das cordas para a alma e esta transmite ao tampo e fundo, que formam a caixa acústica. É através do ajuste do cavalete, feito por um *luthier*, (que é um profissional que conhece as medidas pertinentes a cada instrumento), que temos a altura e a distância das cordas para o braço e o espelho e entre elas

para que não haja esbarro em corda próxima não desejada pelo executante. Há também o ajuste e posicionamento da alma que faz o instrumento soar desta ou daquela maneira de acordo com a posição dela. A alma é uma pequena coluna de madeira que liga o tampo ao fundo do instrumento, paralela às ilhargas (parte lateral perpendicular ao tampo e ao fundo); tem a função de aliviar a pressão sobre o cavalete e também distribuir as vibrações das cordas pelo corpo do instrumento (SADIE, 1994).

Por último, há um elemento importante ao qual se costuma dar pouca atenção, que é o breu ou resina, o agente que provoca a fricção (atrito) que, conforme Donoso (2008), “formalmente chamado de colofone, é uma forma sólida da resina obtida de pinheiros e de outras coníferas”. A crina do arco, sem a aquisição do breu, não produz com as cordas fricção e conseqüentemente inviabiliza qualquer som nas cordas. Então tentar usar um arco sem breu nos instrumentos de cordas friccionadas significa que o arco deslizará sem som algum por todo o seu trajeto de ida e volta.

O violino, a viola e o violoncelo

O violino, a viola e o violoncelo formam um grupo classificado como família desde a sua origem, por possuírem características semelhantes, como por exemplo, a afinação das suas cordas. Conforme Henrique (2007), o violino é o menor dos cordofones friccionados e tem sua construção baseada no número de ouro, proporção áurea.

As cordas dos violinos são sol_2 , $ré_3$, $lá_3$ e mi_4 (196 Hz, 293,66 Hz, 440 Hz e 659 Hz respectivamente). Suas músicas são escritas em clave de sol. As notas soam como estão escritas, isto é, não é um instrumento transpositor, assim como a viola e o violoncelo.

As músicas da viola são normalmente escritas em clave de dó na 3ª linha e para as notas mais agudas usa-se a clave

de sol. Segundo Fletcher e Rossing (2008), suas cordas são afinadas uma quinta abaixo das cordas do violino ($dó_2$, sol_2 , $ré_3$ e $lá_3$) e são apenas cerca de 15% maiores que as do violino e o principal modo de ressonância está entre 20 a 40% abaixo do violino. Conforme Henrique (2007): “Ao contrário do que acontece com o violino, as principais ressonâncias da viola estão entre as frequências das cordas soltas”. A viola passou por várias modificações ao longo de sua história e hoje temos uma viola que não acompanha exatamente as proporções do violino e do violoncelo, o que gera efeitos físicos diferentes. “Para se chegar ao equilíbrio ideal da viola seria preciso que ela fosse consideravelmente maior, o que inviabilizaria seu manuseio normal” (RIBEIRO, 2005).

O repertório da viola não é tão amplo quanto o do violino. De início, até a 1ª metade do século XVIII, a viola era usada apenas para tocar uma oitava abaixo da melodia do violino. A partir de 1770 aparecem peças nas quais a viola entra como solista. Entre o seu repertório destacamos a “Sinfonia Concertante para violino e viola K364”, do ano 1778, de Mozart, na qual a viola é afinada meio-tom acima do padrão (efeito chamado de scordatura). Do século XX destacamos o “Concerto para Viola e Orquestra”, de 1945, escrito quase todo por Béla Bartók e concluído por seu assistente Tibor Serly.

O violoncelo tem suas cordas afinadas em $dó_1$, sol_1 , $ré_2$ e $lá_2$. Depois de algumas modificações na sua construção, chegou a seu modelo definitivo em 1680, com Antonio Stradivari. Suas músicas são escritas em três claves: fá, dó na 4ª linha e sol.

Seu repertório de destaque teve início com o violoncelista italiano Domenico Gabrieli. Em 1689, ele compôs vários “Ricercari per Violoncello Solo con un Canone a due Violoncelli” e “Alcuni Ricercari per Violoncelli e Basso Continuo”, para violoncelo solo. As obras de maior destaque para violoncelo solo são as 6 Suítes de Bach, de 1720, “cuja

sonoridade exigida pelo instrumento chega a parecer orquestral, em alguns momentos” (RIBEIRO, 2005).

O contrabaixo

O contrabaixo é o maior e mais grave instrumento do naipe das cordas. Suas cordas são afinadas por quartas e não por quintas como os outros três. Possui diferenças de construção em relação aos outros, como as costas planas para facilitar a execução, pelo fato de ser muito grande e de notas muito graves. Foi usado no Barroco e no Classicismo como apoio ao baixo e no Romantismo ganhou mais importância começando a ser também solista.

Destacamos no seu repertório uma peça do século XVIII, o “Concerto para Contrabaixo em Ré Maior”, de Giuseppe Capuzzi. O compositor brasileiro Raul do Valle escreveu em 1973 a peça “Encadeamento”, para cinco contrabaixos, em que o autor explora muito bem as possibilidades técnicas e de timbre do instrumento (RIBEIRO, 2005).

Existem diferentes tamanhos e modelos de contrabaixo. Neste trabalho utilizamos um contrabaixo chinês de marca “Michel”, com cordas de 112 cm, com arco modelo alemão. É um instrumento transpositor de 8ª – soa uma oitava abaixo do que está escrito, em clave de fá. Conforme Donoso (2008), suas cordas soam como mi_1 , $lá_1$, $ré_1$ e sol_1 (41,2 Hz, 55 Hz, 73,4 Hz e 97,99 Hz respectivamente), mas nas músicas aparecem as notas mi_1 , $lá_1$, $ré_2$ e sol_2 . Segundo Fletcher e Rossing (2008), suas notas mais graves apresentam dois ou mais parciais dentro da mesma banda crítica, o que faz com que apresente um som áspero. Suas cordas são as mais longas e mais espessas do naipe, o que implica em fenômenos físicos não presentes nos outros, ou não tão evidenciados.

Ondas geradas nas cordas

Consideramos inicialmente as cordas ideais, perfeitamente uniformes e totalmente flexíveis, com rigidez à flexão nula, sendo a força de restituição, responsável pela sua vibração, resultante inteiramente da força longitudinal (ou axial) externa aplicada (HENRIQUE, 2007). Veremos depois os efeitos que acontecem em cordas reais.

As ondas não dispersivas, cuja velocidade não varia com o vetor de onda, podem ser expressas como:

$$y(x,t) = A \cos(kx - \omega t), \quad (1)$$

onde $\omega = vk$, com v constante.

Derivando y duas vezes em relação a t e a x obtemos:

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

que é a conhecida equação da onda, que descreve a cinemática de qualquer onda linear propagando-se na direção x (CHAVES, 2007).

Conforme Henrique (2007), uma corda pode ter quatro modos vibracionais diferentes: transversal, longitudinal, torcional e de oitava. Cada modo obedece à equação (2), com diferentes velocidades, que dependem de parâmetros específicos de cada modo.

As ondas geradas nos instrumentos musicais são estacionárias, resultantes da superposição de duas ondas com sentidos contrários. Podem então ser expressas pela equação

$$y = A \sin(kx + \omega t) + A \sin(kx - \omega t) \quad (3),$$

onde A é amplitude do movimento em cada uma das ondas (RANDALL, 1951), considerando a fase inicial nula.

Podemos reescrever a equação (3) na forma:

$$y = 2A \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (4)$$

onde $k = 2\pi/\lambda$, $v = \lambda f$ e $\omega = 2\pi f$

Considerando as extremidades fixas, quando $x = L$ (L é o comprimento da corda) é necessário que y seja nulo em qualquer valor de t . Nesse caso o termo em seno se anula:

$$\text{sen}(kx) = 0, \text{ o que leva a } kx = n\pi \text{ e } \lambda = 2L/n \quad (5)$$

Substituindo o valor de λ da equação (5), na equação (4), obtemos:

$$y = 2A \text{sen}(2\pi x/\lambda) \cos(2\pi vt/\lambda) = 2A \text{sen}(\pi x n/L) \cos(\pi v t n/L) \quad (6)$$

que é uma equação de onda estacionária (RANDALL, 1951).

A velocidade das ondas transversais em uma corda pode ser obtida considerando-se um pulso de onda com formato de uma curva (um arco de raio R e amplitude 2θ – ver Figura 2), com força T em cada lado (CHAVES, 2007). O comprimento do arco é $\Delta l = 2R\theta$. A massa do elemento de arco será $\Delta m = \mu\Delta l = 2R\mu\theta$, onde μ é a densidade linear da corda. Considerando v a velocidade do deslocamento do pulso, a aceleração centrípeta será $a_y = v^2/R$. Temos então:

$$T_y = 2T\theta = \Delta m a_y = 2\mu R\theta v^2/R \quad (7),$$

considerando pequenos ângulos.

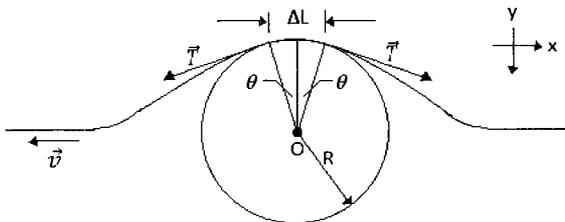


Figura 2 – Modelo para o estudo das ondas transversais em cordas

Então:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (8)$$

Usando a equação (5) obtemos a frequência:

$$f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (9)$$

que é conhecida como lei de Taylor (HENRIQUE, 2007).

Substituindo (8) na equação (2):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (10)$$

Considerando a densidade volumétrica ρ da corda podemos escrever $\mu = \rho S$, onde S é a área da seção transversal e obtemos de (10):

$$\rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (11)$$

Os modos vibracionais transversais são os mais fáceis de serem visualizados nas cordas vibrantes. Os movimentos de cada ponto da corda são perpendiculares ao eixo da corda. Nesses modos não são considerados os módulos de elasticidade E (módulo de Young) e G (módulo de rigidez à torção).

Na vibração longitudinal, cada ponto da corda oscila na direção paralela à corda. A velocidade dessas ondas depende do módulo de Young do material da corda e da densidade volumétrica:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (12)$$

Usando a equação (5) e relacionando v com λ , temos:

$$f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (13)$$

que expressa as frequências dos modos longitudinais da corda.

Considerando a equação da onda (2), obtemos para as ondas longitudinais:

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (14)$$

Segundo Henrique (2007), “quando as cordas vibram transversalmente há um alongamento provocado pela elasticidade e a vibração longitudinal também é excitada”. Esses modos podem ser evidenciados passando o arco de forma oblíqua na corda ou friccionando a corda com um pano com resina. Esse movimento possui frequências muito agudas, muito acima dos modos transversais.

Os modos longitudinais são difíceis de serem visualizados, mas são fáceis de serem ouvidos, principalmente se o instrumentista não é muito qualificado. Segundo Fletcher e Rossing (2008), quando o arco fricciona a corda fortemente e com um ângulo ao longo da corda, ouve-se um rangido. Esse som é não harmônico em relação às vibrações transversais principais.

É interessante perceber, como observa Henrique (2007), que o comprimento e a densidade da corda influenciam nas frequências dos modos longitudinais, mas as forças tensoras não: esticando a corda o som da vibração longitudinal praticamente não se altera.

A vibração torcional está presente de forma especial nos instrumentos de arco. Geram ondas que podem ser expressas pela mesma equação da onda (2) e possuem velocidade que depende do módulo de rigidez à torção e da densidade volumétrica do material da corda:

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (15)$$

Usando a equação (5) e relacionando v com o comprimento de onda λ , obtemos:

$$f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (16)$$

Da mesma forma que as ondas longitudinais, as ondas de torção não dependem da força tensora, apenas do material e do comprimento da corda. As frequências desse modo são bem mais agudas que as frequências dos modos transversais.

Nesse modo a corda gira em torno de seu eixo. Antes da emissão da nota, em instrumentos de arco, é necessário passar resina na crina do arco para que haja atrito entre a corda e a crina, o que provoca a torção. Os modos torcionais são mais evidentes quanto mais longe dos pontos de fixação o arco friccionar a corda. Isso significa que no sul tasto esses modos são mais evidenciados que no sul ponticello. Esses modos são difíceis de serem visualizados (como os longitudinais), mas podem ser ouvidos por serem bem agudos (HENRIQUE, 2007).

Na obtenção da equação (6) das ondas estacionárias, consideramos as extremidades da corda como fixas. Porém nos cordofones as extremidades da corda também vibram quando a corda vibra, o que gera a chamada vibração de oitava. Segundo Henrique (2007), “enquanto a corda em vibração transversal efetua um ciclo, os pontos de fixação efetua dois ciclos. Deste modo, a fundamental deste tipo de vibração é uma 8ª acima da fundamental da vibração transversal”. Isso faz com que o primeiro harmônico seja reforçado, o que pode ser observado nos espectros sonoros.

As cordas friccionadas exercem uma oscilação autoexcitada, pois há interação entre as ondas que se propagam na corda e o movimento do arco. Esse fenômeno faz com que a relação entre a frequência fundamental e as parciais seja praticamente harmônica. O arco alterna entre aderência e escorregamento da corda ao emitir o som (HENRIQUE, 2007).

O som emitido varia com a posição do arco, a velocidade e a força sobre a corda. O modo mais intenso é o transversal. Os modos inarmônicos são excitados em cordas reais, uma vez que a resistência à flexão é não nula. A frequência dos modos vibracionais fica um pouco maior devido à força de restituição da flexão. Quanto mais elevados os modos, maior é a força de restituição, pois a corda sofre flexões com maior curvatura. Quanto maior o comprimento da corda, menor é a influência dessa força. Quanto menor a resistência

à flexão, melhor é a corda, mas quanto mais densa a corda, maior será essa resistência. No contrabaixo, as cordas são mais longas (menor resistência à flexão), porém a densidade é maior, o que faz aumentar essa resistência.

Segundo Donoso (2008), há um fenômeno que resulta da rigidez da corda, chamado jitter, que surge devido a variações aleatórias do período de vibração da corda, que gera um ruído e afasta o som da harmonicidade.

Resultados experimentais

Comparando os espectros sonoros: violino, viola, violoncelo e contrabaixo – ré₃

Nas figuras 3 e 4 vemos os espectros sonoros da nota ré₃ nos quatro cordofones friccionados, com a frequência fundamental e 12 harmônicos. A Figura 3 apresenta três espectros superpostos, para uma melhor comparação.

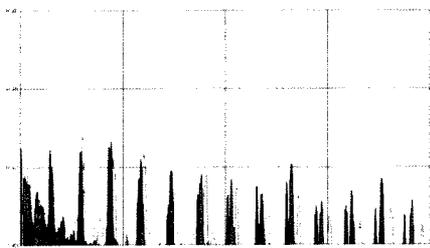


Figura 3 – Ré₃ contrabaixo (claro), violoncelo (médio) e violino (escuro)

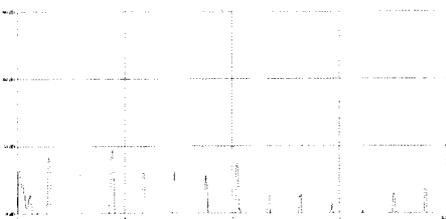


Figura 4 – Ré₃ viola

Vemos, através da diferença de intensidades relativas dos sons parciais, a diferença de timbre entre os quatro instrumentos. O violoncelo e a viola podem ser considerados

fisicamente e matematicamente harmônicos, já que as frequências dos harmônicos são múltiplos inteiros da frequência fundamental. O violino e o contrabaixo apresentam um deslocamento para frequências menores e maiores, respectivamente, o que pode ser observado na Figura 3. A diferença é maior para harmônicos mais agudos.

Os instrumentos de cordas são sistemas muito complexos, difíceis de serem explicados por um modelo teórico. As equações apresentadas na seção anterior são aproximadas e há uma série de fenômenos não lineares, que podem ocorrer por muitos motivos, em uma região de frequências e não ocorrer em outra região de frequências. Isso resulta no fato de que um instrumento pode ser harmônico em uma frequência e não em outra ou perder um pouco a harmonicidade devido à velocidade do arco. Um dos motivos é o fenômeno da vibração autoexcitada, que pode gerar efeitos inesperados, por vezes até favorecendo a harmonicidade. O deslocamento dos harmônicos nos cordofones é sempre pequeno, o que não impede que a sensação final seja de um som harmônico, bem diferente, por exemplo, de um sino.

A posição normal de execução é localizada entre o sul tasto e o sul ponticello. O comprimento útil da corda (entre o cavalete e a trasteira – região de vibração da corda) varia de acordo com o instrumento e está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comprimento de vibração das cordas e distância aproximada do arco ao cavale numa execução normal

Instrumento	comprimento útil L (cm)	distância arco- cavalete (cm)
Violino	33	3
Viola	37	3,5
Violoncelo	70	7
Contrabaixo	112	10

No ponto de excitação, não deverá haver um nó, o que significa que o harmônico, que teria nó nessa posição, será

cancelado ou enfraquecido. A posição não é exata, é uma região, devido à largura da crina. Podemos observar esse enfraquecimento dos harmônicos nos espectros das figuras 3 e 4. No violino há um enfraquecimento dos harmônicos de 9 a 12. Temos que o ponto de contato arco-corda é em torno de 2,5 a 3,5 (a crina possui 1 cm de largura) e essa distância é em torno de $L/11=33/11$, o que corresponde ao ponto do nó do 10º harmônico, que está diminuído na Figura 3. A viola teve o ponto de excitação em torno de 3,5 cm, que corresponde a cerca de $L/10$, gerando uma redução do harmônico 9. Na figura vemos os harmônicos 9 e 10 bem reduzidos. Para o violoncelo vemos uma redução do harmônico 9 (Figura 3), o que está de acordo com a posição de excitação em torno de 7 cm. No caso do contrabaixo, como o ponto de excitação é em torno de 10 cm, há uma redução do 10º harmônico. Na Figura 3 vemos que os harmônicos de 9 a 12 do contrabaixo estão reduzidos em comparação aos vizinhos.

Espectros sonoros do contrabaixo

Arco na posição normal (entre o sul tasto e o sul ponticello), variando a corda

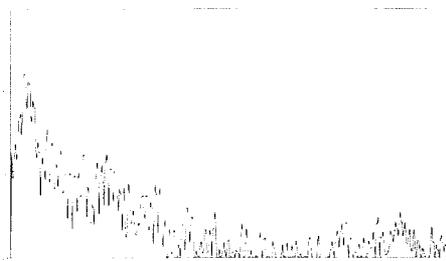


Figura 5 – Corda mi com arco lento

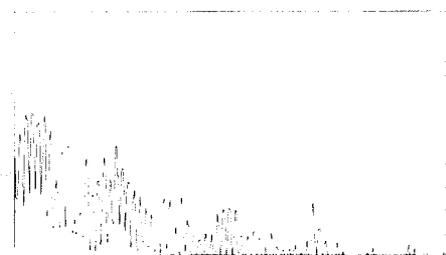


Figura 6 – Corda lá com arco lento

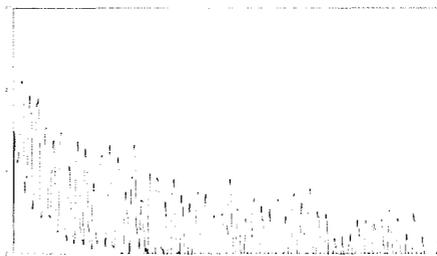


Figura 7 – Corda ré com arco lento

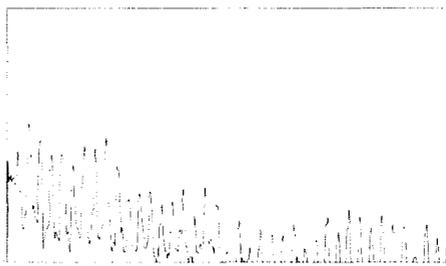


Figura 8 – Corda sol com arco lento

Nas figuras 5, 6, 7 e 8 temos os espectros sonoros das cordas mi, lá, ré e sol, do contrabaixo, respectivamente. Todos foram obtidos com o arco na posição entre o sul tasto e o sul ponticello. Essa é a posição usada normalmente nas execuções, quando não há indicação especial na música sobre a posição do arco. Vemos que cada corda possui um timbre diferente. A relação das intensidades dos harmônicos varia.

O espaçamento entre os harmônicos aumenta na ordem mi, lá, ré, sol, o que já era esperado porque a frequência da fundamental aumenta nessa ordem e os harmônicos possuem frequências múltiplas da fundamental.

Como o ponto de excitação é em torno de 9 cm a 11 cm (a crina possui 2 cm de largura), temos $L/n \cong 10$. Como a corda possui 112 cm de comprimento, nesse caso $n \cong 11$. No espectro do mi (Figura 5), o 9º harmônico é pouco intenso

e o 11º também. Na Figura 6 (corda lá), os harmônicos de ordem 9 e 10 são pouco intensos; na Figura 5 (corda ré) o 10º harmônico é um pouco menor que os outros, o mesmo ocorrendo na Figura 8 (corda sol). Devido à largura da crina do arco, a excitação não é aplicada em um ponto determinado, mas numa região.

Apenas na Figura 7 o modo fundamental se apresenta mais intenso. A diminuição do modo fundamental pode ocorrer devido à superposição com a frequência de ressonância da caixa do instrumento e também devido à vibração de oitava, que tende a reforçar o 1º harmônico.

Vemos em vários harmônicos de todas as cordas a presença de uma certa inarmonicidade, que gera um alargamento de linha devido à superposição de modos vibracionais de frequências muito próximas. Uma das causas é a resistência à flexão da corda. Conforme já foi citado anteriormente, os sons muito graves normalmente apresentam dois ou mais parciais dentro da mesma região, e isso faz o som parecer áspero.

3.2.2 Arco variando a velocidade, na corda sol

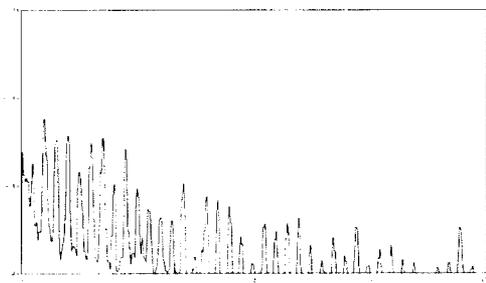


Figura 9 – Corda sol com arco rápido

As figuras 8 e 9 apresentam espectros da corda sol, com variação da velocidade do arco: lento e rápido respectivamente. Vemos que os timbres são diferentes, especialmente pela diminuição dos harmônicos mais agudos na passagem rápida do arco.

3.2.3 Arco na corda sol variando a posição

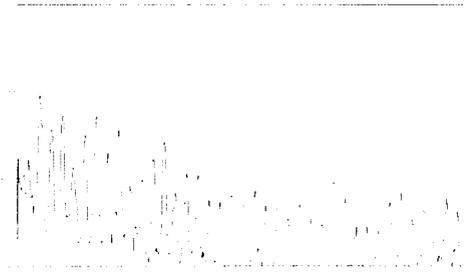


Figura 10 – Corda sol sul ponticello

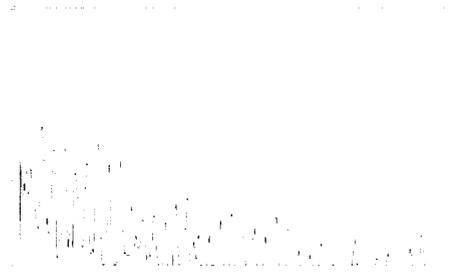


Figura 11 – Corda sol sul tasto

As figuras 8, 10 e 11 evidenciam a diferença de timbre com a variação da posição de contato arco-corda. Na Figura 10, o arco passa próximo ao cavalete (ponte), numa distância de 2 cm a 4 cm. Na Figura 11, a distância ao cavalete é de 20 cm a 22 cm e na figura 8 a posição é intermediária entre as outras duas (como citado anteriormente).

Na posição sul tasto (mais distante do cavalete), a intensidade do som é menor, especialmente nos harmônicos mais agudos. A relação entre as intensidades é diferente e podemos observar o enfraquecimento ou a anulação dos harmônicos conforme o ponto de contato. Na posição sul tasto, o 4º harmônico é menos intenso que os vizinhos ($L/n = 112/5 \cong 22$) e na posição sul ponticello, o harmônico 37 está ausente ($L/n = 112/3 \cong 37$).

3.2.4 Arco formando ângulo diferente de 90° com a corda e corda atritada com pano enresinado

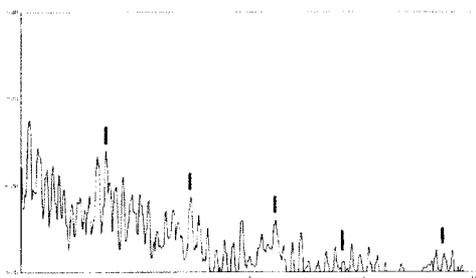


Figura 12 – Corda ré com arco enviesado

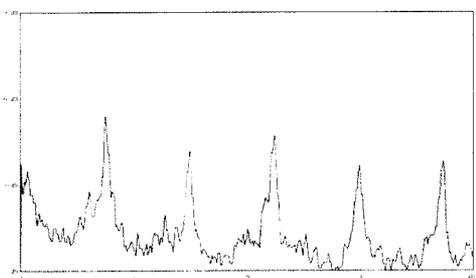


Figura 13 – Corda ré com pano enresinado

Os modos longitudinais podem ser observados nas figuras 7, 12 e 13, na corda ré. Na Figura 7, dominam os modos transversais, pois o arco e a corda estão perpendiculares. Na Figura 12, o arco faz um ângulo diferente de 90° com a corda, o que evidencia um pouco os modos longitudinais (marcados com traços). A Figura 13 apresenta um espectro obtido sem arco, apenas com o atrito na corda de um pano com resina (breu), o que gera principalmente os modos longitudinais, observados na Figura 12 ao lado dos modos transversais.

3.3 Intensidade relativa

Podemos comparar o nível de intensidade sonora entre os quatro cordofones friccionados e com outros instrumentos, como os metais (utilizamos a trompa e o trompete). Cada instrumento possui um alcance próprio e os

compositores levam isso em conta, particularmente as regiões formânticas, se desejam destacar alguma passagem. O timbre muda com a frequência bem como a intensidade e o nível de intensidade sonora (NIS). Para compararmos os instrumentos, medimos o NIS utilizando notas em regiões formânticas da região média de sua tessitura. As medidas foram feitas a 50 cm de cada instrumento, na parte da frente do instrumentista, e estão citadas na Tabela 2.

Conforme vimos no Capítulo 3, consideramos que, para 2 sons de intensidades I_1 e I_2 , um é dito ser mais intenso que o outro por um número de decibéis (dB), onde a diferença das intensidades em dB = $10 \log (I_1/I_2)$ (RANDALL, 1951).

Tabela 2 – Nível de intensidade sonora em dB em região média

Instrumento	NIS (dB)
Violino	84
Viola	82
Violoncelo	81
Contrabaixo	79
Trompa	95
Trompete	97

As medidas em dB do nível de intensidade sonora (NIS) são feitas normalmente usando como nível de referência o valor $I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$. Temos então:

$$\text{NIS} = 10 \log (I/I_0) \quad (17)$$

“A sensação sonora está relacionada de uma forma aproximadamente logarítmica ao fluxo de energia incidente no ouvido” (DONOSO, 2008).

Usando a equação 17 podemos calcular, por exemplo, quantos contrabaixos são necessários para igualar o NIS de um violino, de uma viola e de um violoncelo.

Se I_1 é a intensidade do som de um contrabaixo, a intensidade de n contrabaixos será nI_1 . Então:

$$\alpha_{1n} = 10 \log (nI_1/I_0) \quad (18)$$

Seja α_2 o NIS do outro instrumento com o qual queremos comparar o contrabaixo:

$$\alpha_2 = 10 \log (I_2/I_0) \quad (19)$$

Da equação 18 temos:

$$\alpha_{1n} = \{\log n + \log (I_1/I_0)\} = 10 \log n + \alpha_1$$

Igualando os NIS:

$$\alpha_{1n} = \alpha_2 \text{ então: } 10 \log n + \alpha_1 = \alpha_2 \quad (20)$$

Usando a equação 20 e os valores da Tabela 2 obtivemos que, para igualar o NIS de 1 violino precisamos de aproximadamente 3 contrabaixos. Para igualar o NIS de 1 viola precisamos de 2 contrabaixos e para igualar o NIS de 1 violoncelo precisamos de 1,6 contrabaixos. Considerando o trompete, seriam necessários 63 contrabaixos e para a trompa 39.

Lembramos que como o NIS depende do log, 2 contrabaixos, por exemplo, não resultam no dobro do NIS de 1 contrabaixo:

$$\alpha_{12} = 10 \log (2I_1/I_0) = 10 \log 2 + 79 = 82 \text{ dB}$$

Levando em consideração a experiência de um dos autores como músico instrumentista no contrabaixo, dentro de orquestras sinfônicas, observamos o seguinte: não é necessário um grande número de contrabaixos na orquestra sinfônica porque ele se destaca timbristicamente e, por ter uma caixa acústica grande, possibilita uma reprodução satisfatória com menos instrumentos. Nem por isso os contrabaixos são menos importantes: a nota grave, apesar de normalmente executar menos tarefas que os médios e agudos, é

extremamente importante na música, pois funciona como a fundação de um prédio que sendo malfeita compromete toda a estrutura da construção.

4. Conclusões

Os cordofones friccionados são usados há vários séculos e o interesse nesses instrumentos continua, com uso em diferentes estilos musicais. O desenvolvimento tecnológico em outras áreas tem sido aplicado em estudos para um melhor entendimento desses instrumentos e visando a construção de novos instrumentos, com materiais da natureza ou manufaturados. Demos um pouco mais de atenção ao contrabaixo, aproveitando a experiência de um dos autores como contrabaixista de orquestra e por observarmos que a literatura tem se dedicado pouco ao contrabaixo (mais ao violino, dentre os cordofones friccionados). Concluimos que a Acústica Musical, sob a ótica dos cordofones, é um elo entre várias áreas, permitindo um conhecimento mais amplo de cada uma individualmente e suas relações. Temos abordado essa área com interesse em desenvolver aspectos da História e Filosofia da Ciência, Matemática, Musicoterapia e Pesquisa em Ensino de Física.

Referências

- CHAVES, A. **Física Básica**: gravitação, fluidos, ondas e termodinâmica. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- DONOSO, J. P. V. *et al.* A Física do Violino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, 2008, 2305-1 a 21.
- FLETCHER, N. H.; ROSSING, T. D. **The Physics of Musical Instruments**. New York: Springer, 2008.
- HENRIQUE, L. L. **Acústica Musical**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.

RANDALL, R. H. **An Introduction to Acoustics**. New York: Dover Publications, 1951.

RIBEIRO, J. A. S. **Sobre os Instrumentos Sinfônicos, e em torno deles**. Rio de Janeiro: Record, 2005.

SADIE, S. **Dicionário Grove de Música**. Rio de Janeiro: Zahar, 1994.



Capítulo 7

Roteiros de experimentos

Profa. Dra. Maria Lúcia Grillo

Prof. Luiz Pugginelli Brandão

Diones Luiz Gramelicky

Profa. Vanessa Rodrigues da Conceição

Neste capítulo reunimos alguns experimentos básicos que preparam para o estudo de Acústica. Alguns utilizam materiais comprados em empresas fabricantes de materiais didáticos, um pouco caros para a maioria dos colégios. Porém esses materiais podem ser substituídos, com um pouco de criatividade, por outros mais simples e de baixo custo. Outros experimentos propostos envolvem materiais realmente muito baratos, alguns são brinquedos, como a mola maluca. Os experimentos que envolvem materiais conhecidos dos estudantes são importantes, não apenas pelo baixo custo, mas porque evidenciam que a Física está presente no nosso dia a dia, em qualquer atividade que façamos. Alguns experimentos poderão ser preparados pelos próprios estudantes, e isso é muito positivo.

Se observarmos bem, as crianças quando começam a falar, fazem muitas perguntas sobre o mundo, e muitos de seus questionamentos são na verdade perguntas de Física (Por que isso funciona assim? Por que esse material escorrega?

Por que essa lâmpada pisca? Por que minha voz fica melhor quando canto no banheiro? Por que a Lua aumenta e diminui depois? Por que se eu grito neste corredor o som volta?).

O conhecimento da Física é importante para todas as pessoas. O seu conhecimento permite um melhor aproveitamento de tudo que existe, bem como melhor apreciar as situações, sabendo porque ocorrem de tal forma e não de outra (como o céu azul ou o pôr do sol).

Não temos dúvida de que os experimentos facilitam muito o entendimento dos fenômenos, e é bom lembrar que a Física é antes de tudo um fenômeno, que pode ser observado, antes de ser “aplicação de fórmulas”, que na maioria das vezes não são reconhecidas no dia a dia. O ensino de Física é muitas vezes reduzido a Matemática. A Física é vida e se relaciona com muitas outras áreas, como a História, a Filosofia e a Música, como vimos nos capítulos anteriores deste livro.

Um violão pode ser tocado pelos alunos nos intervalos das aulas, para esquecerem as aulas, ou pode ser usado como um material de laboratório, para demonstrar uma série de fenômenos físicos, como a reflexão, as ondas estacionárias, a ressonância ou a espectroscopia sonora. Usar um violão na aula de Física modifica muito a forma como os estudantes irão olhar a Física, diferente de substituir números em fórmulas ou mesmo decorar as fórmulas.

Propomos então alguns experimentos e esperamos que sejam úteis para evidenciar os fenômenos, que poderão ser observados por qualquer pessoa, pelos que desejam seguir a carreira de Física ou, quem sabe, pelos que acabarão descobrindo seu talento para as Ciências, ou mesmo pelos que já estão no caminho da Física (estudantes ou profissionais).

Os primeiros quatro experimentos são indicados para uma introdução aos tipos de ondas e utilizam apenas materiais de baixo custo. Os experimentos seguintes são

indicados para serem realizados com equipamentos de laboratório, mas podem ser adaptados para materiais de baixo custo. Alguns roteiros foram corrigidos e atualizados do livro *A Física na Música* (2013), que tem os mesmos organizadores deste livro (propomos 13 experimentos).

Propagação das Ondas

Introdução

As ondas podem ser eletromagnéticas ou mecânicas. São muito diferentes, porém podem ser expressas na mesma forma matemática. Todas as ondas possuem comprimento de onda, período temporal ou apenas período, período espacial ou comprimento de onda, amplitude, velocidade. As ondas estão presentes no nosso dia a dia em uma infinidade de ocasiões: ouvimos as ondas sonoras, vemos as ondas do mar, vemos a luz, sentimos o calor das ondas infravermelhas etc. Nosso interesse aqui são as ondas mecânicas, principalmente as sonoras.

As ondas caminham no tempo T (período) a distância de um comprimento de onda (λ). Como a velocidade média é a razão do deslocamento sobre o tempo, temos que a velocidade das ondas pode ser expressa como λ/T . Como T é o inverso da frequência f , podemos escrever: $v = \lambda f$.

As ondas podem ser propagadas de três formas: ondas longitudinais, ondas transversais e ondas de torção. Os três tipos podem ser demonstrados facilmente, com materiais baratos.

Como uma terceira forma de classificar as ondas podemos lembrar das ondas estacionárias e das ondas progressivas. Entre as extremidades fixas de uma corda são formadas ondas estacionárias e no mar aberto as ondas são progressivas.

Objetivo

Visualizar as três formas de propagação das ondas mecânicas.

Material

- Mola maluca
- Espiral de apostila
- Corda usada para pular (por crianças ou em academias de ginástica)
- Elásticos
- Garrafa PET (sugerimos a de 600 ml)
- Gesso
- Tesoura
- Arame fino

Procedimento

1. Duas pessoas, de pé, seguram a espiral de apostila ou a corda, cada uma em uma extremidade, sem deixar tocar o chão. Mantendo uma extremidade fixa, a outra extremidade terá movimentos verticais. Observe e explique o tipo de onda formada. A pessoa que produz os movimentos verticais poderá variar a frequência. Observe e explique o que mudou.
2. Duas pessoas seguram as extremidades da mola maluca ou da espiral de caderno sobre uma mesa. Uma das extremidades ficará fixa. A pessoa da outra extremidade produzirá movimentos de vai e volta com a mola, produzindo assim compressões e distensões. Observe e explique o tipo de onda formada.
3. Com uma tesoura recortar uma garrafa PET de 600 ml formando um cone. Colocar uma massa de gesso, com a garrafa tampada, e o arame fino, formando

uma haste central no sentido do eixo da garrafa, formando na extremidade um gancho. Aguarde secar.

Os elásticos deverão ser entrelaçados entre si, formando um fio longo. A seguir, a extremidade desse fio deverá ser presa no gancho e seguro na vertical. Segurando na extremidade desse fio, mantendo suspenso o conjunto (elástico + garrafa), girar a garrafa até esse fio ficar bem enrolado. Observe e explique o que ocorre.

Perguntas

1. Que tipo de onda é formada no procedimento 1 (considere o tipo de propagação)? A onda é estacionária ou progressiva? O que muda se a frequência do movimento variar? Dê exemplos de instrumentos musicais que apresentam esse tipo de onda.
2. Faça a mesma análise do item 1 para a onda proposta no procedimento 2. Há algum instrumento musical com esse tipo de onda? Dê outro exemplo desse tipo de onda.
3. Analise e explique a onda formada no procedimento 3. Que tipo de instrumento musical forma essas ondas?
4. Comparando as ondas mecânicas com as ondas eletromagnéticas, que tipo de onda é a luz?

Reflexão

Introdução

A reflexão é um fenômeno físico simples de ser explicado e entendido. Podemos falar de reflexão de uma onda dando o exemplo de uma bola que é jogada a uma parede e retorna, ou seja, caminhava em um sentido e muda ao encontrar a parede. A lei da reflexão, que diz que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, é muito usada,

por exemplo, em jogo de sinuca. Trata-se de um fenômeno importante também para ondas sonoras: a acústica de uma sala muda muito se as paredes são boas refletoras ou boas absorvedoras. Os materiais que revestem as paredes devem ser escolhidos conforme o uso que a sala terá.

A reflexão pode ocorrer de formas diferentes em relação à fase da onda: poderá sofrer ou não inversão de fase. Esse aspecto é importante especialmente na formação das ondas estacionárias, que são formadas pela soma de uma onda e da reflexão dela. Na Figura 1, podemos ver dois tipos de reflexão: se a extremidade é fixa a reflexão será com inversão de fase e se a extremidade é livre (móvel) não haverá inversão de fase.

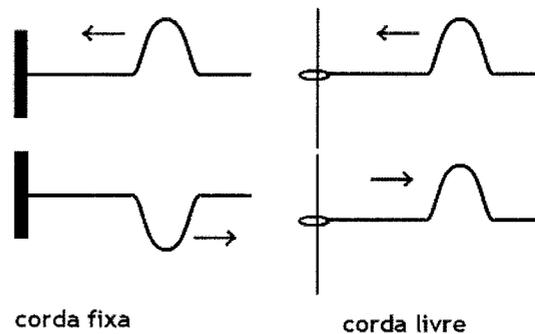


Figura 1 – Reflexão de um pulso com extremidade fixa e livre
Fonte: <http://tudodeconcursosvestibulares.blogspot.com.br>

Objetivo

Visualizar a reflexão de onda com e sem inversão de fase.

Material

- 01 corda usada para pular (por crianças ou em academias de ginástica)
- 01 cano de PVC fino

Procedimento

1. Amarrar uma das extremidades da corda no cano de PVC, para que fique fixa. Na extremidade livre, executar um movimento vertical produzindo uma onda transversal. Observar o que ocorre na extremidade da corda que está fixa. Esse mesmo procedimento poderá ser feito com a mola maluca.
2. Prender uma das extremidades da mesma corda através de um laço, deixando-a livre para se movimentar no cano de PVC (como na Figura 1). Na extremidade livre, executar um movimento vertical. Observar o que ocorre. Esse mesmo procedimento poderá ser feito com a mola maluca.

Perguntas

1. Como ocorre a reflexão da onda no procedimento 1?
2. Como ocorre a reflexão da onda no procedimento 2?
3. Usando o procedimento 1, explique: como é formada uma onda estacionária com as extremidades fixas? Identifique esse fenômeno em instrumentos musicais.
4. As extremidades das cordas nos instrumentos musicais são fixas? O que ocorre em instrumentos musicais quando as extremidades não são fixas?

Observação: No caso da mola maluca, caso seja necessário um aumento em seu comprimento, o mesmo poderá ser feito juntando duas molas e colando-as com cola (a cola quente é adequada).

Refração

Introdução

O fenômeno físico da refração ocorre toda vez que uma onda passa de um meio para outro, ou seja, trata-se de uma transmissão, movimento contrário à reflexão, onde a onda se mantém no mesmo meio. A frequência sempre se mantém, mesmo quando a onda muda de meio, porém a mudança de meio modifica a velocidade, conseqüentemente seu comprimento de onda.

A lei da refração é conhecida como lei de Snell e Descartes e mostra como é a relação entre as velocidades e entre os ângulos em relação à normal da superfície.

Objetivo

Visualizar a refração de ondas em cordas e molas.

Material

- 01 mola maluca
- 01 espiral de apostila
- Cola
- 02 cordas com espessuras diferentes

Procedimento

1. Com a cola atar a mola maluca à espiral de apostila. Apoiar o sistema sobre uma mesa. Prender primeiramente a mola maluca e, pela extremidade da espiral, executar um movimento da esquerda para a direita ou vice-versa, produzindo assim um pulso. Observar o que ocorre. O mesmo procedimento poderá ser feito com as cordas diferentes.

2. Repetir o mesmo procedimento, agora com a extremidade da espiral presa. Observar o que ocorre. O mesmo procedimento poderá ser feito com as cordas diferentes.

Perguntas

1. O que ocorre na refração do procedimento 1?
2. E no procedimento 2?
3. Esse fenômeno ocorre também com as ondas sonoras e em todo tipo de onda. Como podemos observar a refração de uma onda sonora? Ocorre também em instrumentos musicais?

Interferência – Ondas estacionárias

Introdução

A interferência é um fenômeno que ocorre quando duas ou mais ondas se superpõem. Para que ocorra é necessário que a diferença de fase entre as ondas seja constante (ondas coerentes), caso contrário serão ondas independentes, como os diversos sons que escutamos ao mesmo tempo e nenhum deles é cancelado pelo outro (música, conversa etc.). A interferência pode ocorrer de forma destrutiva, quando a crista de uma das ondas coincide com o vale da outra: a onda resultante terá amplitude, que será a diferença das amplitudes das ondas componentes. Se a interferência é construtiva, os vales e as cristas vão coincidir, e a onda resultante terá como amplitude a soma das amplitudes. A interferência pode ser também parcialmente construtiva (ou parcialmente destrutiva), que é a situação mais comum.

O fator determinante para o tipo de interferência é a diferença de fase ($\Delta\phi$), que deverá ser $2n\pi$ (n inteiro) para a interferência construtiva e $n\pi$ (n ímpar) para a interferência destrutiva. Um exemplo de interferência de 2 ondas é a

onda estacionária, que resulta da superposição de uma onda com a sua reflexão (conforme já explicado no experimento de reflexão).

Como a onda estacionária é a soma de 2 ondas iguais, mas de sentidos opostos, podemos expressar da forma:

$$y = A \sin(kx + \omega t) + A \sin(kx - \omega t) \quad (3)$$

onde A é amplitude do movimento em cada uma das ondas, considerando a fase inicial nula.

Considerando a relação trigonométrica da soma de senos:

sen A + sen B = $2 \sin \frac{1}{2} (A+B)$ $\cos \frac{1}{2} (A-B)$ chegamos à expressão:

$$y = 2A \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (4)$$

onde $k = 2\pi/\lambda$, $v = \lambda f$ e $\omega = 2\pi f$

Considerando as extremidades fixas, quando $x = L$ (L é o comprimento da corda) é necessário que y seja nulo em qualquer valor de t. Nesse caso o termo em seno se anula:

$$\sin(kx) = 0, \text{ o que leva a } kx = n\pi \text{ e } \lambda = 2L/n \text{ (n inteiro).}$$

Nesse caso n significa o número de ventres na onda estacionária e também a ordem do modo de vibração (Se $n = 1$ temos $\lambda = 2L$, que é o primeiro modo vibracional ou modo fundamental).

Considerando a equação $v = \lambda f$, já vista no experimento de propagação das ondas:

$v = \lambda f = (2L/n) f$, podemos escrever a frequência na forma:

$$f = \frac{nv}{2L}$$

A velocidade das ondas estacionárias numa corda depende da tensão T da corda e da sua densidade linear μ :

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

Substituindo v na equação de f temos:

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Mas: $\mu = \frac{m}{L}$

Substituindo μ na equação de f temos:

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{TL}{m}}$$

ou ainda:

$$f = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{T}{mL}}$$

Evidenciando n temos:

$$n = 2f \sqrt{\frac{mL}{T}}$$

Pode-se usar a expressão sem substituir a densidade linear μ :

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$$f^2 = \frac{n^2}{4L^2} \frac{T}{\mu}$$

Evidenciando n temos:

$$n^2 = \frac{f^2 4L^2 \mu}{T}$$

Dessa expressão vemos que, aumentando a tensão (aumentando os pesos dentro do copo), o n vai diminuir. Então conseguiremos o modo fundamental ($n=1$) com mais pesos. O experimento deve começar com poucos pesos e n com valores de, pelo menos, 2 ou 3.

Objetivo

Estudar as ondas estacionárias em uma corda vertical: obter os vários modos vibracionais e medir a velocidade das ondas.

Material

- 01 mixer (pode ser um pequeno aparelho para agitar café ou mesmo uma escova de dentes elétrica – algo que vibre com frequência constante)
- Fio
- Copinho de café
- Objetos para serem colocados dentro do copo de café
- 01 fita métrica
- 01 balança precisa

Procedimento

1. Pesar o fio e calcular sua densidade linear μ .
2. Pesar os objetos que serão colocados dentro do copo de café.
3. Prender o fio ao mixer (ou escova) e na outra extremidade do fio fixar o copinho de café.
4. Medir o comprimento do fio L .
5. Colocar no copinho alguns pesos com a massa conhecida.

6. Ligar o mixer (ou escova) e verificar se é formada uma onda estacionária, caso contrário colocar mais pesos até que a onda seja formada.
7. Aumentar o peso no copo de café para obter outros modos vibracionais.
8. Medir os comprimentos de onda, número de nós e número de ventres para cada modo vibracional obtido.
9. Calcular a velocidade, relacionando com a tensão (pesos) e a densidade do fio.
10. Calcular a frequência do mixer (ou escova) relacionando as duas expressões da velocidade.

OBS: Se não for possível pesar o fio e os objetos, o experimento será qualitativo: a expressão que relaciona T e n deverá ser confirmada qualitativamente (aumentando T diminui n).

Batimento e Ressonância – experimento qualitativo

Introdução

O batimento é o fenômeno resultante da superposição de duas ondas com frequências muito próximas. O fenômeno é usado, por exemplo, para afinar instrumentos musicais: usando um som como referência, um segundo som deverá ficar igual ao som de referência. Um batimento surgirá quando as frequências estiverem próximas, porém não iguais. A frequência do batimento diminuirá até que se anulará, quando os sons forem iguais. A frequência do batimento é igual à diferença entre as frequências.

A ressonância é o fenômeno que ocorre quando uma onda incide sobre um corpo e, se a frequência natural do corpo for igual à frequência incidente, o corpo vibrará. Nos instrumentos musicais, é muito usado: alguns instrumentos possuem cordas que nunca são tocadas, porém vibram por ressonância através da vibração de outra corda. No violão, por

exemplo, se uma corda é tocada com a frequência da outra, esta outra vai vibrar. Chama-se o fenômeno de “vibração por simpatia”. O corpo dos instrumentos de corda vibra por ressonância com as frequências das cordas: o corpo amplifica o som e modifica o timbre do instrumento.

Objetivos

- Educar o ouvido para reconhecer o batimento e provocar a variação da frequência do batimento.
- Reconhecer qualitativamente o fenômeno da ressonância.

Material

- 02 diapasões iguais com caixa (ao menos um deles deverá ter uma massa com um parafuso, de forma que a massa possa se mover ao longo de uma das hastes do diapasão)
- 02 latas de leite
- Um pouco de açúcar
- 01 baqueta

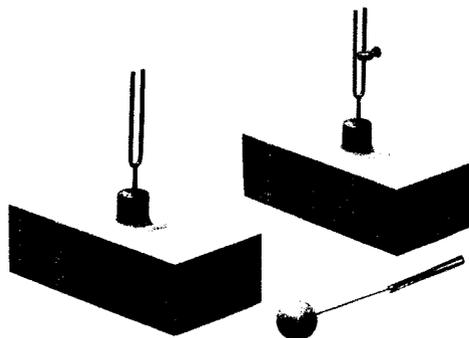


Figura 3 – Diapasões com caixa e baqueta
Fonte: Fabricante Cidepe (Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa)

Procedimento

1. Colocar as latas de leite invertidas lado a lado sobre uma superfície. Sobre uma delas será depositado um pouco de açúcar.
2. Bater com a baqueta na lata que não tem o açúcar. Observar o que ocorre com a lata que contém o açúcar. Observe e explique.
3. Colocar os diapasões iguais lado a lado e tocar com a baqueta em um deles. Segurar rapidamente as hastes desse diapasão e observar o que ocorre com o outro. Observar e explicar.
4. Colocar os diapasões iguais lado a lado (um deles deverá ter a massa de posição variável). Tocar com a baqueta em ambos os diapasões. Observar o som resultante.
5. Variar a posição da massa extra do diapasão e repetir o teste. Observar e explicar o ocorrido.

OBS: Os dois fenômenos também poderão ser demonstrados com um violão (tocar uma corda e fazer a outra vibrar; tocar 2 cordas de frequências próximas e observar o som resultante).

Perguntas

1. O que ocorre com as latas de leite quando uma delas sofre a pancada com a baqueta? Explique.
2. Explique o que ocorre com os diapasões iguais quando um deles é tocado com a baqueta.
3. Como é o som resultante quando se toca 2 diapasões diferentes (um com massa extra e outro sem a massa)? O que ocorre quando variamos a posição da massa no diapasão e tocamos ambos?

OBS: É interessante visualizar o batimento através do programa Audacity, como mostra a Figura 4 a seguir:

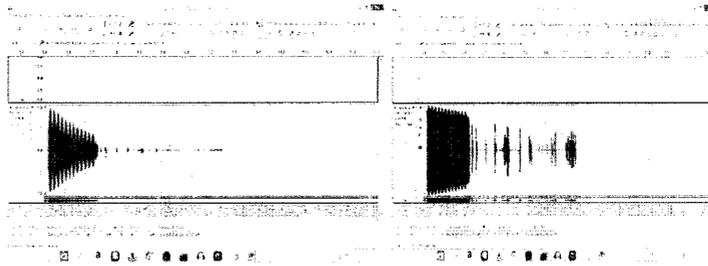


Figura 4 – Batimento de 2 diapasões com 439 Hz e 435 Hz, com programa Audacity.

A figura da direita foi obtida acionando o item “faixa de áudio” (à esquerda da figura dentro do programa) e em seguida “forma de onda (dB)”

Espectroscopia sonora dos instrumentos musicais

Introdução

Qualquer sistema de vibração em geral vibra em vários modos diferentes ao mesmo tempo. Cada modo é relacionado a uma frequência diferente e, portanto, um modo de vibração pode ser excitado individualmente por algum tipo de perturbação relacionado a uma certa frequência.

A descrição desse movimento vibracional é bastante difícil, pois é necessário saber a amplitude (ou intensidade) e a frequência de cada modo de vibração perturbado. A obtenção desse resultado é feita através da análise do espectro da vibração.

O espectro de uma vibração indica quais frequências entraram em ressonância e com que intensidade cada uma vibrou. Essa análise de espectros é também chamada de análise de Fourier, em que cada uma dessas frequências perturbadas pode ser representada como componente de uma série de Fourier. É o espectro de um som que está relacionado ao timbre de cada instrumento musical. Quanto maior o número de frequências em ressonância, mais rico é o som, porém se as frequências não forem múltiplas da fundamental (primeiro pico de frequência), o som não será harmônico. Se

as frequências dos harmônicos forem múltiplas da frequência fundamental (a menor frequência), então o instrumento é harmônico. Em geral isso acontece de forma aproximada, como por exemplo, em um piano, que não é exatamente harmônico, porém percebemos como se fosse.

Obtivemos alguns espectros de instrumentos acústicos (não eletrônicos) e de um diapásão, com a ajuda de um programa de computador chamado Gram 10 (pode-se usar também outro semelhante).



Figura 5 – Espectro de um diapásão de 440 Hz

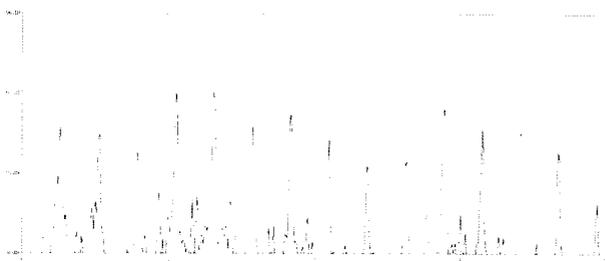


Figura 6 – Espectro do d_3 do oboé, com frequência fundamental de 261,6 Hz

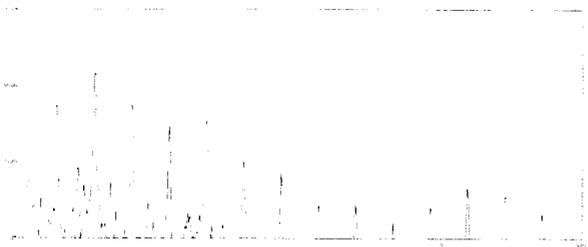


Figura 7 – Espectro do d_3 do fagote, com frequência fundamental de 261,6 Hz

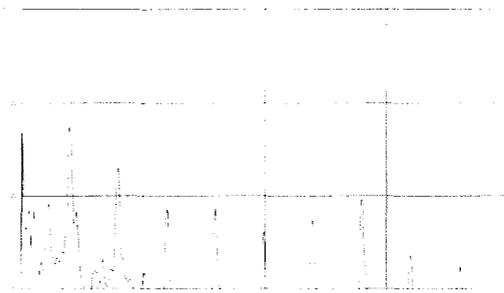


Figura 8 – Espectro do sol 3 no violão, com frequência fundamental 392 Hz

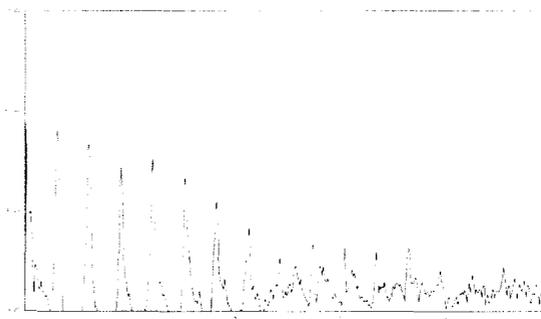


Figura 9 – Espectro do ré 3 na flauta transversa com frequência fundamental 293,6 Hz

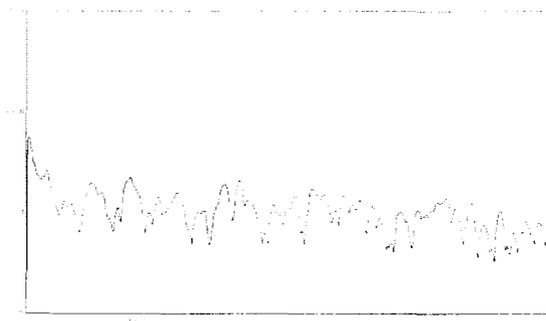


Figura 10 – Espectro de um som emitido por um tarol, onde muitas frequências são ativadas

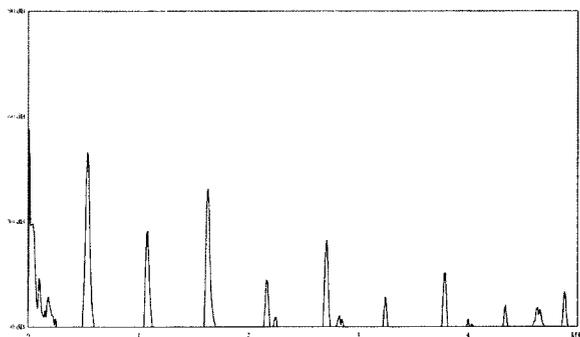


Figura 11 – Espectro do dó 4 na flauta doce, com frequência fundamental 523,2 Hz

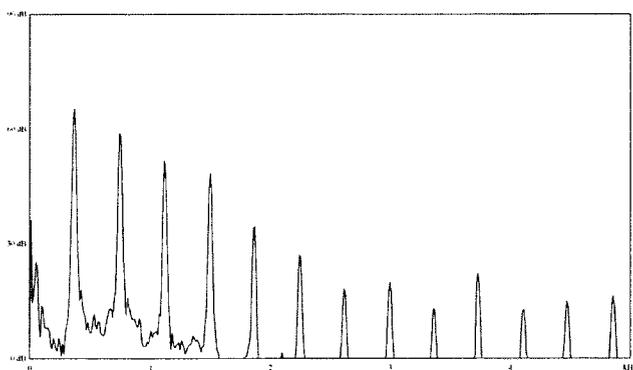


Figura 12 – Espectro do fá # 3 na trompa com frequência fundamental 369,9 Hz

Objetivo

Entender o espectro sonoro de diferentes instrumentos musicais.

Material

- 01 computador com microfone e programa Gram 10 ou outro semelhante
- Alguns instrumentos musicais

Procedimento

1. Aproxime um dos instrumentos musicais do microfone do computador e toque alguma nota.
2. Meça as frequências de cada pico.
3. Grave o espectro sonoro obtido.
4. Faça o mesmo procedimento com outra nota e compare os espectros.
5. Repita o experimento com outro instrumento e compare.
6. Escolha uma nota musical e grave o espectro. Em seguida você (ou outra pessoa) deverá repetir a nota. Grave o espectro da nota cantada e compare.

Perguntas

1. Os instrumentos são harmônicos? Explique.
2. Como são os espectros? Iguais ou diferentes? Todos os picos possuem a mesma intensidade? O que isso significa?
3. Os instrumentos estão afinados? (nesse caso será necessário consultar uma tabela de frequências, da escala igualmente temperada – ver Capítulo 3).
4. A pessoa que repetiu a nota (procedimento 6) é afinada? Por quê?

Batimentos

Introdução

O batimento é um fenômeno físico resultante da soma de duas ondas de frequências próximas. Ondas que ocorrem no mesmo espaço ao mesmo tempo e se somam, ou seja, em cada ponto as elongações das ondas se somam e a diferença de fase entre as duas ondas interfere diretamente no resultado dessa soma. Esse fenômeno é conhecido como

interferência. A interferência entre duas ondas de frequências próximas gera o batimento, uma onda resultante, que possui frequência igual à média aritmética entre as frequências das duas ondas e uma variação periódica na amplitude, com frequência que é a diferença entre as frequências (som pulsante). Se essa diferença ultrapassar 20 Hz, o ouvido humano não percebe mais um batimento.

Objetivos

- Observar e identificar experimentalmente o som resultante de uma soma de duas ondas de frequências próximas, o fenômeno chamado batimento.
- Determinar experimentalmente a frequência do batimento a partir da medida do período.
- Calcular quantos períodos um som realiza a mais que o outro no intervalo de tempo de um batimento.
- Determinar qualitativamente a relação entre a frequência do batimento e a diferença entre as frequências dos sons tocados.

Material

- 01 oscilador de áudio com 2 canais com alto-falantes independentes e frequencímetro digital (ou dois osciladores)
- 01 cronômetro

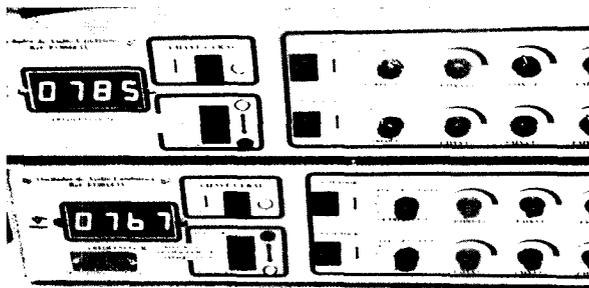


Figura 13 – Osciladores de áudio do Cidepe

Procedimento

1. Coloque os alto-falantes de frente um para o outro.
2. Ligue a chave geral.
3. Selecione os dois canais para a faixa F1 de frequências.
4. Selecione o frequencímetro para o oscilador 1.
5. Escolha arbitrariamente uma frequência (f_1) para o oscilador 1. Registre esse valor, ele permanecerá fixo.
6. Ligue o oscilador 1 e ajuste um nível de intensidade agradável.
7. Selecione o frequencímetro para o oscilador 2.
8. Ligue o oscilador 2 e varie sua frequência gradativamente em torno da frequência registrada do oscilador 1 (varie em torno de 10 Hz para cima e para baixo de f_1). Tente se aproximar bem lentamente de f_1 , observando com clareza o que acontece na aproximação, no instante em que f_2 se iguala a f_1 , e quando f_2 ultrapassa f_1 , no afastamento.
9. Volte com f_2 para um valor um pouco abaixo de f_1 . Registre f_2 .
10. Meça com o cronômetro o período do batimento (para uma melhor precisão, observe o tempo de 30 oscilações e divida o valor obtido).
11. Calcule a frequência do batimento.
12. Com os dados obtidos complete a tabela a seguir:

f_1	f_2	f_{batim}	T_1	T_2	T_{batim}

Perguntas

1. Explique o que foi observado no procedimento 8. O que acontece quando a diferença entre as frequências f_1 e f_2 diminui? E quando aumenta?

2. Considerando que o período do batimento está relacionado aos períodos das ondas componentes pela relação:

$$T_{\text{batim}} = n_1 \cdot T_1 \text{ e } T_{\text{batim}} = n_2 \cdot T_2$$

determine n_1 e n_2 e comparando seus dados e verifique a validade da seguinte afirmação: “Entre dois batimentos um dos sons componentes realiza um período (ou uma oscilação) a mais que o outro”. Demonstre que $n_2 - n_1 = 1$.

3. Como você faria para afinar um instrumento em comparação com um outro que lhe serviria de referência?

Determinação da velocidade do som com tubo de PVC

Introdução

Há muitos séculos já se estuda a natureza do som e, em particular, a sua forma de propagação. Existem inúmeros experimentos com o objetivo de determinar a velocidade das ondas sonoras em vários meios, inclusive no ar. Realizaremos um experimento para averiguar a velocidade do som no ar.

Vamos começar tomando um tubo de ar (PVC) de comprimento L fixo, de seção constante e a princípio aberto nas duas extremidades.

Dentro de tubos abertos nas duas extremidades, ou fechados em uma extremidade, podem ser formadas ondas sonoras estacionárias. Essas ondas podem ser formadas colocando-se um alto-falante em uma das extremidades ou simplesmente batendo com a palma da mão em uma das extremidades. Vejamos que ao bater com a palma da mão em uma das extremidades abertas do tubo, podemos ouvir um som característico que depende do comprimento L (note que ao bater com a palma da mão em uma das extremidades, esse tubo se torna fechado em uma das extremidades). Assim, na extensão do tubo só podem se formar ondas com

um número inteiro ímpar de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda;
 $L = n (\lambda/4)$.

Na extremidade aberta do tubo, forma-se um nó de pressão e um ventre de deslocamento. Porém os nós ou ventres não são formados exatamente na extremidade, mas um pouco para fora, numa distância de cerca de $0,6 R$ no comprimento do tubo, onde R é o raio do tubo. O primeiro harmônico formado em um tubo aberto-fechado será o correspondente a $\lambda = 4L$, quando $n = 1$. A medida de L a ser considerada é o comprimento do tubo acrescido de $0,6 R$.

Observando que tal coluna de ar constitui um caso clássico de tubo com uma extremidade aberta e outra fechada, pode-se determinar a velocidade do som no ar através de cálculos simples, uma boa aproximação para velocidade do som no ar é $v = 330,4 + 0,59T$ (m/s), onde T é a temperatura ambiente em Celsius.

Dispondo de um computador com placa de som, microfone e o programa de computador Gram 10 (ou outro que faça espectros), podemos determinar a frequência do som dentro do tubo.

Objetivos

- Determinar o comprimento da coluna de ar no tubo para que determinada frequência entre em ressonância.
- Representar graficamente as diversas configurações de ondas ressonantes.
- Determinar a velocidade do som.
- Calcular a temperatura ambiente, utilizando a velocidade do som como parâmetro.

Material

- 01 tubo de PVC
- 01 microfone

- OI computador com o software Gram 10 instalado (ou outro programa semelhante)

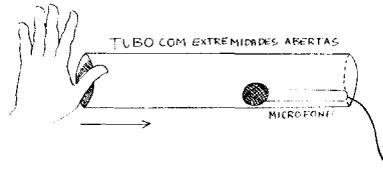


Figura 14 – esquema para o experimento

Procedimento

1. Coloque o microfone no interior do tubo (pode também apenas aproximar o tubo do microfone).
2. Execute o programa GRAM 10.
3. Dê um tapa no tubo de forma a tampar totalmente uma das partes do tubo (cuidado para que o tubo não esbarre no microfone).
4. Registre a frequência fundamental encontrada pelo programa após o tapa.
5. Meça o comprimento e o raio do tubo.
6. Com a frequência conhecida através do procedimento (4), calcule a velocidade do som através da relação $v = \lambda f$.
7. Utilizando a expressão da velocidade $V = 330,04 + 0,59 T$, ache a temperatura aproximada da sala.
8. Faça os mesmos cálculos para o primeiro harmônico superior. (Lembre-se de que apenas os harmônicos ímpares deverão estar presentes).

	Frequência (Hz)	Comprimento de onda (cm)	Velocidade do som (m/s)	Temperatura (°C)
Frequência fundamental				
1º harmônico				

Perguntas

1. Qual o comprimento de onda, da onda formada no interior do tubo?
2. Qual a velocidade do som na sala?
3. Qual a temperatura da sala usando o resultado da velocidade do som?

Determinação da velocidade do som com 2 microfones

A velocidade do som é bem menor que a velocidade da luz, o que facilita muito a sua medida. Ao longo da história muitas tentativas foram feitas para medir a velocidade do som, no ar e em outros meios, experimentalmente e teoricamente. Dentre as formas de medir a velocidade do som, vimos que podemos usar um simples tubo de PVC (conforme visto no experimento anterior), ou podemos também utilizar 2 microfones, com uma distância entre eles. Se a fonte sonora estiver alinhada com os 2 microfones, o som chegará no primeiro e depois no segundo. Conhecendo a distância entre eles e o intervalo de tempo que o sinal demora de um para o outro, podemos calcular a velocidade do som.

Usamos um sistema do Cidepe (Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa), porém pode ser usado outro, desde que possua uma maneira de obter o parâmetro Δt entre os microfones.

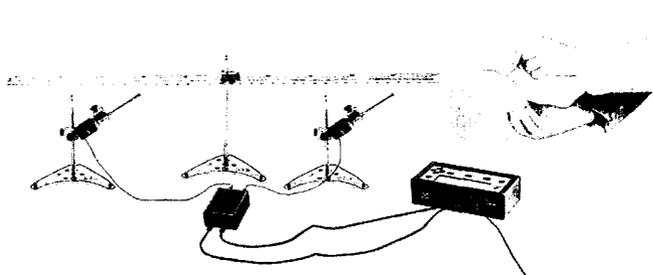


Figura 15 – Montagem do experimento
Fonte: Fabricante Cidepe (Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa)

Objetivo

Medir a velocidade do som.

Material

- 02 sensores sonoros (microfones)
- 01 multicronômetro com tratamento e rolagem de dados
- Bolas de gás ou outra fonte sonora que produza som intenso e curto
- 01 régua

Procedimento

1. Armar o kit conforme mostra a figura. A fonte sonora deve estar alinhada com os dois sensores.
2. Medir a distância entre os sensores.
3. Produzir o som intenso e obter o resultado da velocidade do som no multicronômetro.

Perguntas

1. Obtenha o valor médio da velocidade do som (para isso será necessário repetir o experimento diversas vezes).
2. Qual a temperatura aproximada da sala?

Ondas estacionárias em um fio e em uma mola vibrantes

Introdução

Quando duas ou mais ondas ocupam um determinado espaço ao mesmo tempo, os deslocamentos causados por cada uma delas se adicionam em cada ponto, de acordo com o *princípio da superposição*. Assim, quando a crista de uma onda se superpõe à crista de outra, seus efeitos individuais

se somam e produzem uma onda resultante com amplitude maior, estabelecendo uma *interferência construtiva*. Quando a crista de uma onda se superpõe com o vale da outra, seus efeitos individuais são reduzidos. A parte alta de uma onda simplesmente preenche a parte baixa da outra, ocasionando uma *interferência destrutiva*.

As ondas estacionárias resultam da interferência. Quando duas ondas com mesma amplitude e mesmo comprimento de onda passam uma pela outra em sentidos opostos, elas estão constante e alternadamente em fase e fora de fase. Isso ocorre quando uma onda é refletida sobre si mesma. Nessa situação, são produzidas regiões de interferência construtiva (ventres) e destrutiva (nós).

Ondas estacionárias podem ser produzidas tanto por vibrações transversais como longitudinais, assim, quando o movimento do meio em que a onda se propaga (nesse caso a corda), é transversal à direção da propagação dessa onda, esta recebe o nome de *onda transversal*. Quando o movimento do meio ocorre ao longo da direção de propagação da onda, esta é denominada *onda longitudinal*.

Objetivos

- Identificar os diversos elementos de uma onda.
- Calcular a velocidade de propagação de uma onda estacionária a partir de duas relações distintas.
- Justificar a formação de ondas estacionárias em um fio vibrante e em uma mola.

Material

- 01 gerador de abalos
- 01 subconjunto para ondas mecânicas transversais (tripé), com dinamômetro de 2N
- 01 fio de densidade linear conhecida

- 01 mola
- 01 escala milimetrada retrátil (trena)

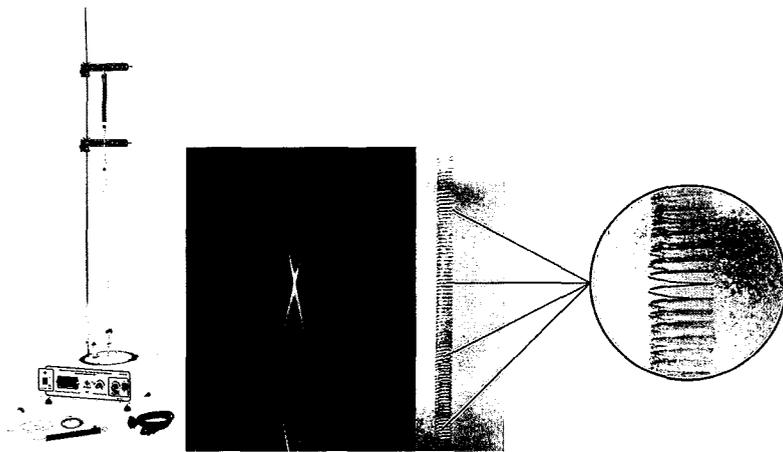


Figura 16 – Esquema de montagem para o fio e mola vibrantes
Fonte: Fabricante Cidepe (Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa)

Procedimento

1. Desenrosque levemente o parafuso vertical do eixo do gerador de abalos, e contorne a extremidade livre do fio no parafuso, fazendo uma meia-volta, e enrosque-o levemente.
2. Aproxime o suporte do gerador de abalos e prenda a extremidade metálica do fio no gancho do dinamômetro.
3. Observe a escala do dinamômetro: cada traço corresponde à 0,02 N. Com muito cuidado, afaste o suporte do gerador até que a força aplicada ao fio seja de 1,0 N.
4. Meça o comprimento do fio desde o eixo do gerador até o centro da roldana.
5. Coloque os botões “amplitude” e “frequência” em suas posições mínimas e ligue o gerador de abalos; ajuste a frequência em aproximadamente 25 Hz. Aumente

gradualmente a amplitude até que seja possível identificar a formação de nós e ventres da onda.

6. Identifique os valores de frequência para os quais observamos a formação de 1, 2, 3, 4 e 5 ventres, e construa uma tabela com os valores obtidos.
7. Repita os procedimentos aplicando agora uma força de 0,5 N.
8. Determine a velocidade de propagação da onda no fio vibrante através das relações [1] e [2] e compare seus resultados:

$$[1] \quad v = \lambda f$$

onde:

λ = comprimento de onda (m) e f = frequência (Hz)

$$[2] \quad v = \left(\frac{F}{\delta} \right)^{\frac{1}{2}}$$

onde:

F = força de tração no fio (N) e δ = densidade linear do fio (kg/m)

Verifique se os valores esperados são os encontrados experimentalmente para cada frequência.

9. Coloque a mola e ligue o gerador de abalos. Observe a onda formada variando a frequência.

Dados Experimentais:

1º caso

$\delta = \dots\dots\dots$; $F = \dots\dots\dots$; $L = \dots\dots\dots$;

$v =$ (usar eq. 2) $\dots\dots\dots$

Medida	f (Hz)	Nº de Nós	Nº de Ventres	λ (m)	v (m/s) (usar eq. 1)
1					
2					
3					
4					
5					

2º caso

$\delta = \dots\dots\dots$; $F = \dots\dots\dots$; $L = \dots\dots\dots$;

$v =$ (usar eq. 2) $\dots\dots\dots$

Medida	f (Hz)	Nº de Nós	Nº de Ventres	λ (m)	v (m/s) (usar eq. 1)
1					
2					
3					
4					
5					

Perguntas

1. Esclareça a formação de ondas estacionárias em uma corda vibrante e em uma mola, relatando, para isso, como ocorre a formação de nós e ventres.
2. As ondas formadas no fio são transversais ou longitudinais? E na mola? Explique.
3. Nas extremidades do fio são formados nós ou ventres? Explique.
4. Existe alguma relação entre a força de tração aplicada ao fio e o número de comprimentos de onda formados?

Ressonância em tubos abertos e fechados

Introdução

As ondas estacionárias são ondas que apresentam sempre um mesmo padrão, uma configuração fixa de nós (regiões imóveis) e ventres (regiões com deslocamento), conforme vimos no experimento com fio e mola vibrantes. A onda sonora em um tubo é um exemplo de onda estacionária longitudinal, na qual as moléculas de ar dentro do tubo sofrem rarefações e compressões – que se traduzem na forma de som – e deslocam-se na mesma direção que a onda caminha.

Nesses experimentos, dispomos de um dispositivo chamado tubo de Kundt (aberto ou fechado) e de tubo com água (fechado). No interior do tubo (devido a um alto-falante colocado em uma das extremidades ou devido a um diapasão), tem-se a formação de ondas sonoras estacionárias. Nesse caso as ondas formadas são de ar. A configuração das ondas estacionárias formadas no tubo é observada através do comportamento do pó de cortiça dentro do tubo ou de um estetoscópio (tubo de Kundt) ou através da ressonância que amplifica o som.

As vibrações da coluna de ar podem ser estudadas como ondas estacionárias resultantes de interferências do som enviado na extremidade aberta com o som refletido na outra extremidade. Na extremidade aberta, a coluna de ar contida no tubo se expande, ou seja, se rarefaz. Como a onda sonora é uma sucessão de compressões e rarefações, na extremidade aberta tem de haver rarefação (forma-se um nó de pressão). É necessário fazer uma correção aumentando o tamanho da coluna de ar na extremidade aberta em $0,6R$, onde R é o raio do tubo. Essa condição determina que somente configurações de ondas estacionárias com ventres de deslocamento nas extremidades podem se formar no

interior desse tubo. Na extremidade fechada haverá compressão, ou seja, um nó de deslocamento e um ventre de pressão.

Assim, na extensão do tubo fechado, só podem se formar ondas com um número inteiro ímpar de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda (visto também no experimento de cálculo de v com tubo de PVC): $L = n (\lambda/4)$

onde $n = 1, 3, 5, \dots$ (números inteiros ímpares)

Nos tubos abertos a relação é de $L = n (\lambda/2)$, como em fios.

Muitos instrumentos musicais utilizam tubos sonoros ressoadores, como a flauta, o saxofone, o órgão de tubos etc.

I – Tubo de Kundt

Objetivos

- Visualizar a formação de ondas sonoras estacionárias dentro de tubos abertos e fechados e identificar os elementos que as compõem.
- Medir e relacionar o comprimento de onda λ das ondas estacionárias obtidas com o comprimento L do tubo.
- Determinar a velocidade de propagação do som.

Material

- 01 gerador de sinais de áudio de dois canais com frequência digital e controles independentes para os dois osciladores
- 01 estrutura mecânica central com tubo sonoro, orientador de haste e escala milimetrada
- 01 caixa de alto-falante
- 01 pá com haste
- 01 cuba coletora para o pó de cortiça
- 01 frasco com 10g de pó de cortiça
- 01 estetoscópio com extensor

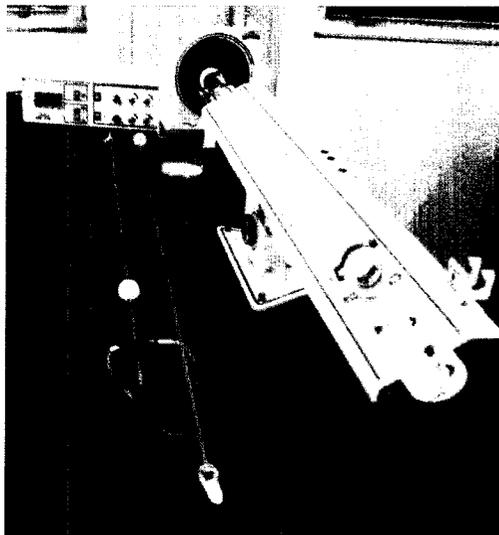


Figura 17 – Montagem do experimento do tubo de Kundt

Procedimento

1. Com auxílio da pá com haste, distribua uma pequena camada uniforme de pó de cortiça ao longo do interior do tubo, formando assim um “cordão” de espessura média. Não exagere na quantidade. Coloque uma cuba coletora sob uma das extremidades do tubo.
2. Com o gerador de sinais desligado, conecte o alto-falante no gerador de sinais na saída do oscilador 01 e posicione-o diante de uma das extremidades abertas do tubo, deixando-o bem rente a esta.
3. Estando os controles de volume e frequência do gerador de sinais no nível zero, ligue a chave geral e acione o oscilador 1. Ajuste o volume para um nível bem intenso e varie lentamente a frequência até que se observe a formação de regiões alternadas de nós (regiões imóveis) e ventres (regiões em movimento) de pó de cortiça. Nesse momento é interessante o uso de protetores auriculares (abafadores).

4. Anote a frequência para a qual foi encontrada a onda estacionária e meça o comprimento de onda λ utilizando a régua milimetrada posicionada ao longo do tubo.
5. Faça um desenho esquematizando a envoltória da onda estacionária observada para essa frequência, indicando os modos nodais e ventrais;
6. Repita o item 4 para outros valores de frequência para os quais possam ser observadas formação de ondas estacionárias;
7. Com os dados obtidos, encontre o valor da velocidade de propagação do som. Compare com o valor teórico ($v_{\text{som}} = 340 \text{ m/s}$);
8. Com base nos desenhos das configurações das ondas estacionárias, encontre uma relação do comprimento L do tubo aberto com o comprimento de onda λ medido para cada frequência; verifique também a validade da expressão

$$L = n \cdot \left(\frac{\lambda}{2} \right),$$

para tubos sonoros abertos, onde n é o número de nós da onda estacionária observada (não esqueça de levar em conta a correção de $0,6R$ no comprimento do tubo, em cada lado aberto);

9. Usando as expressões

$$L = n \cdot \left(\frac{\lambda}{2} \right) \quad v = \lambda \cdot f,$$

faça uma relação entre o comprimento do tubo (L) com as frequências correspondentes aos possíveis sons que entram em ressonância com a coluna de moléculas de ar dentro do tubo.

10. Diminua a intensidade (volume) do oscilador 1. Com o estetoscópio nos ouvidos, insira a extremidade do extensor a este acoplado dentro do tubo. Mude lentamente a posição do extensor dentro do tubo, verificando o que

ocorre com a intensidade do som nas regiões de rarefação e nas regiões de compressão de pó de cortiça. Comente e explique o que foi verificado.

11. Faça os mesmos procedimentos agora com o tubo fechado com $L = n (\lambda/4)$.

Perguntas

1. Como se dá o fenômeno da ressonância em tubos sonoros abertos? E fechados?
2. O que é uma onda estacionária e como esta se forma no interior de um tubo aberto? E fechado?
3. Que evidência experimental permite admitir que a velocidade das ondas sonoras no ar é a mesma para todos os comprimentos de onda?
4. Faça uma analogia entre os tubos sonoros e os instrumentos de sopro. Como são produzidas as diferentes notas nesses instrumentos?

II – Tubos ressonantes com colunas d'água

Objetivos

- Identificar ondas estacionárias em um tubo ressonante com extremidade fechada.
- Determinar o comprimento da coluna de ar no tubo para que determinada frequência entre em ressonância.
- Representar graficamente as diversas configurações de ondas ressonantes.
- Determinar a velocidade do som.
- Identificar a temperatura ambiente, utilizando a velocidade do som como parâmetro.

Material

- 02 tubos de vidro para colunas d'água
- 02 hastes de 1000 mm de comprimento
- 01 régua de 850 mm
- 01 tripé universal Delta Max
- 04 pinças com mufa
- 01 mangueira de conexão
- 01 suporte alinhador com mufas e pinças
- 01 funil
- Diapasão de 440Hz (podem ser usados diapasões de outras frequências também)
- 600 ml de água, aproximadamente



Figura 18 – bolsistas do projeto preparam um experimento com tubos ressonantes

Procedimento

1. Fazer a montagem de dois tubos de vidro, unidos por uma mangueira flexível, parcialmente preenchidos com água. A variação do comprimento da coluna de ar é obtida pela modificação na altura do outro tubo, que contém certa quantidade de água. Assim, através do som produzido pela vibração do diapasão numa determinada frequência,

é possível variar o comprimento da coluna de ar até um valor tal que ocorra a ressonância, devido à reflexão das ondas na superfície líquida (interface ar-água). Observando que tal coluna de ar constitui um caso clássico de tubo com uma extremidade aberta e outra fechada, pode-se determinar a velocidade do som no ar através de cálculos simples. Uma boa aproximação para a velocidade do som no ar é

$$v = 330,4 + 0,59T \text{ (m/s)}$$

onde T é a temperatura ambiente em Celsius.

OBS: A fim de agilizar o ajuste da altura da coluna de água é interessante fazer uma previsão teórica (sabendo f e prevendo um valor aproximado de v).

2. Deixa-se uma coluna de ar no interior de um tubo de vidro, denominado tubo sonoro. Essa coluna gasosa possui frequências naturais de vibração na forma de ondas longitudinais. Quando uma dessas colunas é excitada em uma ou mais de suas frequências naturais, ocorre o fenômeno de ressonância e o som se amplifica. Os sons produzidos na extremidade aberta do tubo compõem-se de várias frequências, mas só ressoam ou se amplificam aquelas que correspondem a frequências naturais, isto é, ao som fundamental e aos harmônicos secundários (múltiplos superiores) da coluna gasosa.

Na extensão do tubo, só podem se formar ondas com um número inteiro ímpar de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda;

$$L = n (\lambda/4),$$

onde $n = 1, 3, 5, \dots$ (números inteiros ímpares)

3. Coloque, com o auxílio do funil, aproximadamente 600 ml de água dentro de um dos tubos.
4. Toque um diapasão acima da extremidade do tubo, sem tocar na borda do tubo, que contém a régua ao seu lado.

5. Varie a posição do segundo tubo utilizando o suporte alinhador, até encontrar a condição de ressonância.
6. Repita o item 3 para mais uma condição onde ocorre ressonância (primeiro harmônico).
7. Com as duas condições em que ocorrem ressonâncias, determine o comprimento de onda para cada uma delas.
8. Com a frequência conhecida de 440Hz, calcule a velocidade do som através da relação $v = \lambda f$;
9. Utilizando a expressão da velocidade $V = 330,4 + 0,59T$, ache a temperatura para cada condição ressonante.

$$R = 1,5 \text{ cm}; \quad f = 440 \text{ Hz}$$

L_{med} (cm)	L_{ef} (cm)	λ (cm)	V (m/s)	T (°C)

Perguntas

1. Qual o comprimento de onda da primeira condição em que ocorre ressonância (menor coluna de ar)?
2. Qual o comprimento de onda da condição em que ocorre a ressonância seguinte?
3. Qual a velocidade do som nos três casos?
4. Qual a temperatura da sala calculada para cada caso de ressonância?
5. Faça um esboço da configuração das ondas estacionárias, dentro do tubo, nesses casos.

Tempo de reverberação

Introdução

O tempo de reverberação é um parâmetro muito importante para avaliação do conforto acústico de uma sala e

corresponde ao tempo que um som persiste em um ambiente após a fonte cessar de emitir o som. Há várias formas de medir esse tempo e o mais usado é o TR 60, que mede o tempo que o som demora para decair 60 dB. Pode ser obtido experimentalmente através da fórmula de Sabine (depende do volume da sala, das áreas e coeficientes de absorção de cada material presente na sala), com uma fonte omnidirecional e um sonômetro apropriado, ou, ainda, com um som rápido e um software que registre a onda sonora.

Objetivos

- Medir o tempo de reverberação de diferentes salas.
- Avaliar o conforto acústico da sala.

Material

- 01 notebook com software Audacity
- Bolas de gás ou outra fonte sonora que produza som intenso e curto

Procedimento

1. Escolher pelo menos duas salas para depois fazer a comparação dos tempos de reverberação. É interessante que sejam escolhidas salas com características diferentes.
2. Com o material para o experimento, escolher a posição no centro da sala.
3. Ligar o Audacity e gravar o estouro das bolas em três lugares diferentes da sala (ver Figura 3, Capítulo 3).
4. Normalize o sinal de áudio com a ferramenta normalizar (clique em efeitos depois em normalizar).
5. Clique em áudio e modo de visualização: forma de onda (dB).



Os autores

Maria Lúcia Grillo – Professora Associada do Instituto de Física da UERJ (organizadora)

Luiz Roberto Perez – Maestro e Professor de Música dos projetos do LACUSTAMM (organizador)

Luiz Pugginelli Brandão – Licenciado em Física, mestrando do MNPEF, Professor de Física das redes pública e particular

Vanessa Rodrigues da Conceição – ex-aluna de Iniciação Científica da Profa. Dra. Maria Lúcia; Licenciada em Física pela UERJ

Diones Luiz Gramelicky – ex-aluno de Iniciação Científica da Profa. Dra. Maria Lúcia

Calazans Barbosa Marques Macchiutti de Oliveira e Suelen Nascimento da Costa – alunos de Iniciação Científica da Profa. Dra. Maria Lúcia; alunos de Licenciatura e Bacharelado em Física da UERJ

Livros da Série MNPEF

SIMULAÇÃO E MODELAGEM
COMPUTACIONAL COM
O SOFTWARE MODELLUS:

Aplicações práticas para o ensino
de física

Marcelo Esteves de Andrade

A CONSTRUÇÃO DA
ESTRUTURA CONCEITUAL DA
FÍSICA CLÁSSICA

Antony M. M. Polito

MECÂNICA QUÂNTICA:

Um curso para professores da
Educação Básica

Silvana Perez

FÍSICA E MÚSICA

Maria Lúcia Grillo

Luiz Roberto Perez

(Organizadores)

MECÂNICA QUÂNTICA BÁSICA

Marcel Novaes

Nelson Studart

O que é o som? Como percebemos? Qual a importância do som no dia a dia? Como foi o desenvolvimento histórico desse estudo? Como o som é estudado na Física? E na Música? Essas são algumas perguntas que procuramos responder nesse livro. Propomos aqui o estudo da Acústica, que é uma área da Física que privilegia a audição como sentido, e oferece uma opção profissional inusitada num mundo extremamente visual. Ouvir é tão importante quanto ver e melhora a percepção, quando visão e audição atuam em conjunto. Através de 7 capítulos procuramos despertar o interesse por esta área muitas vezes esquecida, num mundo mais preocupado com a poluição do ar e das águas. E a poluição sonora? O som tem diversas utilidades e deve ser bem controlado, caso contrário poderá gerar danos físicos, psicológicos e materiais. Os instrumentos musicais são fontes sonoras utilizadas desde que a humanidade surgiu. Abordamos um pouco dos sentidos, falamos dos intervalos musicais e dos fundamentos para o entendimento da Acústica, além do desenvolvimento histórico. Destacamos que o estudo da Acústica teve início com os teóricos musicais e nos dedicamos à Física dos instrumentos de cordas: violão (cordofone dedilhado) e cordofones friccionados (violino, viola, violoncelo e contrabaixo). Por fim propomos alguns experimentos que podem ser aplicados em cursos de diferentes níveis, com abordagens que podem ser adaptadas ao público alvo, quase todos com materiais simples e de baixo custo. Esperamos que este livro suscite dúvidas que levem a um aprimoramento maior e force à busca de soluções inovadoras.



MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



