

Ouvido mecânico: um dispositivo experimental para o estudo da propagação e transmissão de uma onda sonora

(*Mechanical ear: A test for studying the propagation and transmission of a sound wave*)

Hudson Azevedo Errobidart¹, Shirley Takeco Gobara², Sérgio Luiz Piubelli²,
Nádia Cristina Guimarães Errobidart²

¹*Escola Estadual Joaquim Murtinho, SED, Campo Grande, MS, Brasil*

²*Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, Brasil*

Recebido em 8/8/2013; Aceito em 10/10/2013; Publicado em 6/3/2014

Considerando que entre as principais dificuldades para o emprego de atividades experimentais no ensino de física está a falta de materiais de apoio e orientações que permitam ao professor a utilização dessa estratégia metodológica, elaborou-se o dispositivo experimental ouvido mecânico. Ele foi construído com materiais de baixo custo e pode ser utilizado para explorar conceitos relacionados a ondas, particularmente a propagação, transmissão e amplificação da pressão de uma onda sonora no ouvido externo, o qual é constituído pela orelha, conduto auditivo e tímpano, e os processos mecânicos associados aos três ossículos do ouvido médio (martelo, estribo e bigorna). Para auxiliar o professor a utilizar o dispositivo em sala de aula, elaboraram-se algumas orientações de forma a explorar significativamente os efeitos do uso inadequado do fone de ouvido.

Palavras-chave: atividade experimental demonstrativa, ouvido externo e médio, propagação de ondas sonoras, fone de ouvido.

Taking into account that one of the main difficulties for the use of experimental activities in physics education is the lack of support materials and guidelines to enable the teacher to use this methodological strategy, we proposed an experimental device that works as a mechanical ear. It was constructed with low cost materials and can be used to explore several concepts related to waves, in particular propagation and amplification of the pressure and transmission of a sound wave at the external ear, which is composed by ear, ear canal and eardrum, and mechanical processes associated with the three middle ear ossicles (hammer, anvil and stirrup). To help the teacher to use the device in the classroom, we have written some guidelines in order to explore the effects of significant inappropriate use of the headset.

Keywords: Demonstrative experimental activity, external and middle ear, propagation of sound waves, headset.

1. Introdução

O emprego de uma atividade experimental é entendido, por autores como Pinho Alves [1] e Araújo e Abib [2], como um objeto didático com qualidades variadas, capaz de favorecer uma aprendizagem significativa, quando explorado de forma a propiciar momentos de reflexão e generalização, desenvolvendo no aluno a capacidade de elaborar novos conhecimentos, conceitos e significados, ou seja, uma reestruturação conceptual [2]. Apesar de sua potencialidade como estratégia metodológica, ela é pouco empregada no ensino de física e os motivos vão desde a ausência de laboratórios e equipamentos nas escolas até a inexpressiva quantidade de orientações que podem auxiliar o professor no planejamento de suas aulas [3].

¹E-mail: huaerrte@gmail.com.

Considerando essa realidade, elaborou-se e construiu um dispositivo experimental que possibilita um estudo qualitativo da propagação de ondas sonoras no ouvido externo e médio e um conjunto de orientações para sua utilização, numa atividade demonstrativa, tomando como referência a teoria da aprendizagem significativa [4].

2. Onda sonora e o ouvido humano

O ouvido humano, apresentado na Fig. 1, é dividido em três partes: externa, média e interna, as quais desempenham funções distintas no processo de recepção, transmissão e percepção de um som.

Nosso sistema auditivo é constituído por um ouvido externo composto pela orelha ou pavilhão auditivo, o

conduto auditivo e o tímpano.

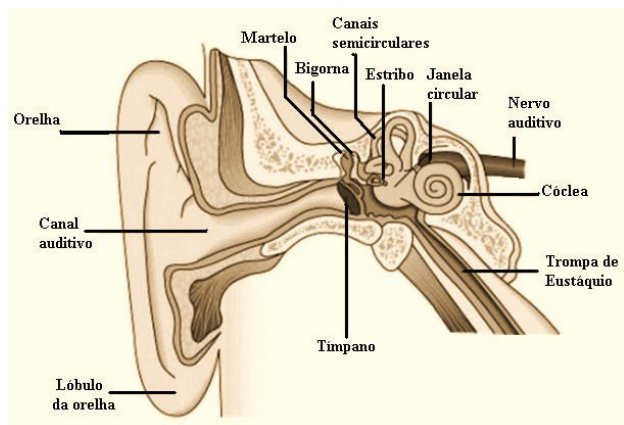


Figura 1 - Corte transversal mostrando os órgãos do ouvido humano (disponível em <http://www.granvox.com.br/arquivos/fotos/ouvido.jpg>).

O tímpano é uma membrana fina e flexível, localizado exatamente no ponto de separação entre o ouvido externo e médio o que, provavelmente, é responsável pela divergência que se evidencia em seu enquadramento.

O ouvido médio é composto por três minúsculos ossos: o martelo, a bigorna e o estribo, envolvidos numa cavidade cheia de ar, e o ouvido interno composto pela janela oval, também denominada de janela circular, cóclea, trompa de eustáquio e o nervo auditivo.

Os órgãos que compõem o ouvido externo e médio são responsáveis pela captação e transmissão da energia sonora, através de vibrações mecânicas, até o ouvido interno, onde essas vibrações são transformadas em impulsos elétricos codificados, sendo, então, encaminhados ao sistema nervoso central para sua interpretação e percepção [5].

A orelha, constituída de cartilagem revestida de pele, apresenta “forma ovalada e vai se afunilando em direção” à entrada do conduto auditivo. As irregularidades anatómicas ou dobras da orelha são, segundo Menezes e cols. [5], fundamentais no direcionamento da onda sonora para o interior do conduto auditivo.

Na interpretação de Rui [6] e Bistaffa [7], uma onda sonora, proveniente de uma dada fonte, sofre reflexões nessas irregularidades presentes na orelha com o objetivo de ser direcionada para o conduto auditivo onde se soma às ondas diretas e as que sofreram difração sonora ao interagirem com a cabeça do indivíduo.

O conduto auditivo é um tubo com aproximadamente sete milímetros de diâmetro e três centímetros de comprimento. Suas paredes internas possuem saliências que dificultam a visão da membrana timpânica e a pele que recobre essa parede apresenta glândulas ceruminosas e sudoríparas e folículos pilosos que têm por objetivo realizar a proteção do tímpano. No processo de audição, desempenha a função de transferência por ressonância da onda sonora até o tímpano [5].

O tímpano é uma membrana constituída por um tecido fibroso, com forma levemente cônica, localizada no final do conduto auditivo, local onde ocorre a separação entre o ouvido externo e o médio. Possui, como principal finalidade, a recepção da energia sonora proveniente de uma fonte, para entrar, e vibração com a mesma frequência com que foi excitada. Sua forma cônica faz com que a energia concentre-se no centro da membrana, local onde se faz o contato com o martelo.

Segundo Rui [6], o tímpano possui uma espessura aproximada de um décimo de milímetros e entre nove e dez milímetros de diâmetro. Quando a energia proveniente da fonte sonora “[...] atinge o tímpano, a energia associada à perturbação do ar [...] é transmitida a membrana timpânica, fazendo-a vibrar de acordo com a frequência e amplitude do som que a atingiu”. A onda formada por “regiões de compressão e rarefação das partículas do ar” provoca as perturbações no tímpano, as quais são transmitidas por meio dos ossículos à janela oval.

Os três ossículos que compõem o ouvido médio fazem a conexão entre a parte externa e interna do ouvido. Eles formam uma cadeia óssea articulada fixada, de um lado, na membrana timpânica e, de outra, na janela oval, responsáveis pela transmissão das pressões recebidas pelo tímpano à janela oval. A articulação entre os ossículos faz com que funcionem como uma alavanca interfixa, conforme mostrado na Fig. 2, abaixo.

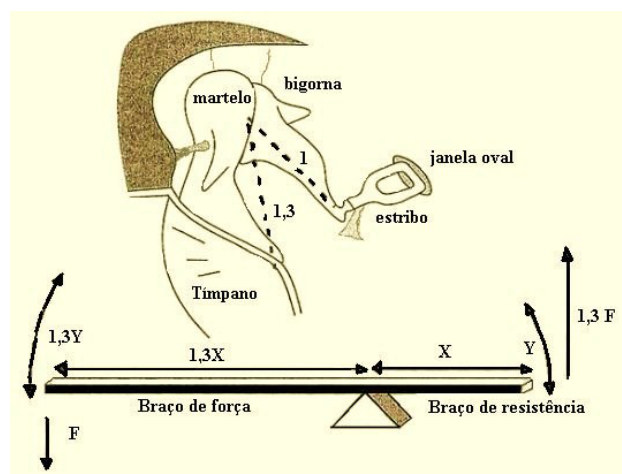


Figura 2 - Ilustração do efeito alavanca interfixa [5].

O martelo representa o braço de força da alavanca; a bigorna, o braço da resistência e o ponto fixo é representado pela articulação incudomaleolar. O cabo do martelo é aproximadamente 1,3 vezes maior que a apófise longa da bigorna, o que permite um ganho de força na mesma proporção da relação entre o braço de força e o de resistência. O braço de alavanca formado pelo martelo ($1,3x$), mais longo que o braço formado pela bigorna (x), transforma o movimento junto ao tímpano, de maior amplitude ($1,3Y$) e menor força (F), em um movimento de menor amplitude (Y) e maior

força ($1,3F$) na janela oval. Essa força de maior intensidade faz com que a bigorna impulsione alternadamente o estribo para dentro e para fora da janela oval.

Além do mecanismo de alavanca dos ossículos, contribui também para o ganho de pressão a relação entre as superfícies das áreas do tímpano ($\sim 55 \text{ mm}^2$) e da janela oval ($\sim 3,2 \text{ mm}^2$). Como a área do tímpano é cerca de 17 vezes maior que a da janela oval, e tomando por base o princípio de Pascal, pode-se concluir que a pressão exercida em uma superfície, por uma força constante, será maior quanto menor for a área de contato com essa superfície. A força $1,3$ maior aplicada à reduzida área da janela oval produz uma amplificação do sinal que chega até o ouvido interno, mais especificamente na cóclea [5], órgão do ouvido interno, local onde ocorre a percepção sensorial e a discriminação do som.

No processo de percepção, as vibrações mecânicas, que o estribo transfere ao espaço perilinfático, causam ondas no líquido que preenche a cóclea, as quais se propagam dentro do ouvido interno no “sentido basal-apical da cóclea, pela rampa vestibular e helicotrema e retornam no sentido apical-basal pela rampa timpânica até atingir” a janela oval. Este jogo de janelas é essencial para a produção da onda que se propaga no ouvido interno [5].

A discriminação de um som inicia-se com processos puramente mecânicos intracocleares e, assim, mantém-se a medida que a informação vai passando pelos diversos segmentos da via auditiva até ganhar complexidade máxima ao chegar ao córtex temporal.

Os processos de seleção de frequências sonoras ainda não são totalmente conhecidos. É possível afirmar apenas que só se pode perceber sons com frequências que variam de 20 Hz a 20000 Hz aproximadamente. Esse intervalo pode sofrer variações dependendo da fisiologia do sistema auditivo e da idade de cada indivíduo. Problemas patológicos congênitos ou adquiridos do ouvido interno geralmente resultam em déficit auditivo irreversível com ou sem perda da capacidade de discriminação [5].

3. O dispositivo experimental

Considerando a possibilidade de estudar a propagação de uma onda sonora no ouvido externo e médio, iniciou-

se uma etapa de elaboração e construção de um dispositivo experimental utilizado para o estudo de ondas sonoras e do funcionamento físico parcial do ouvido humano, especificamente a parte externa e média, mostrado na Fig. 3.



Figura 3 - Dispositivo experimental para estudar ondas e a propagação de uma onda sonora no ouvido externo e médio.

O processo de transmissão de uma onda sonora no ouvido externo e médio envolve unicamente processos mecânicos e buscou-se mobilizá-los por meio de um dispositivo experimental. Ele foi projetado para explorar os conceitos de propagação, transmissão e amplificação do sinal sonoro no ouvido externo e ouvido médio e abordar os efeitos do uso inadequado do fone de ouvido.

Para a construção, utilizaram-se os seguintes materiais: fonte sonora móvel - um balde plástico de 20 litros; pistão - fundo de um balde plástico de 15 litros, 50 cm de cano de PVC 1/2 polegada e uma luva para cano 1/2 polegada; conduto auditivo - 90cm de cano de PVC de 250 mm; membrana timpânica - bastidor plástico tamanho ajustável ($\sim 27 \text{ cm}$ diâmetro), placas de registro de imagens radiológicas (raio-X), elástico fino e palitos de madeira; suporte de madeira para apoiar o dispositivo.

A construção da membrana, com o bastidor e as placas de raios-X, buscou diminuir a absorção da energia sonora, evitando seu contato com o bastidor, utilizando elástico, tal construção é mostrada em detalhes na Fig. 4. Para construí-la, recortou-se o material de radiografia com um diâmetro de vinte e três centímetros e meio (23,5 cm), três centímetros a menos que o diâmetro do bastidor.

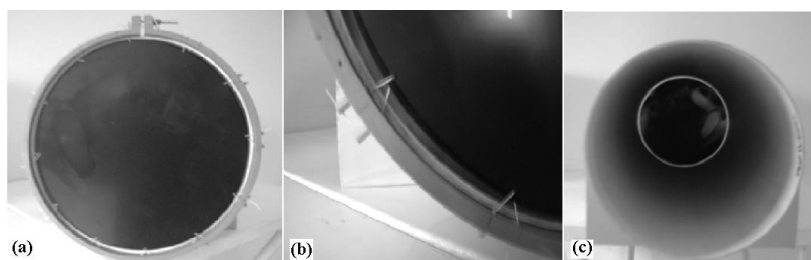


Figura 4 - Detalhes da membrana utilizada no dispositivo experimental para estudar ondas: (a) visão frontal, (b) detalhe da fixação com elástico e (c) visão pela extremidade aberta do tubo.

O pistão foi elaborado para produzir o movimento ou o deslocamento do ar dentro do tubo, representando as regiões de compressão e rarefação do ar dentro do tubo e para representar os efeitos produzidos na membrana quando a fonte sonora está dentro do conduto auditivo, como o fone de ouvido, por exemplo.

Para representar o ouvido médio, o martelo, a bigorna e o estribo que são os três pequenos ossos que fazem conexão entre o tímpano (membrana que separa o ouvido externo do médio) e a janela oval (membrana que separa o ouvido médio do interno), construiu-se o dispositivo com plástico de capa de DVD e material de radiografia. Várias tentativas, com diferentes materiais, foram realizadas para produzir essa peça com as devidas articulações, mas dadas as dificuldades para reduzir o atrito entre os dispositivos que representam os ossículos, foi necessário construí-los como uma peça única.

A peça mostrada em detalhes na Fig. 5 não possibilita explorar o ganho de força no ouvido médio,² resultante do sistema de alavanca entre os ossículos martelo e bigorna, mas viabiliza explorar a amplificação do nível de pressão pela diferença de área das superfícies do tímpano e da janela oval.

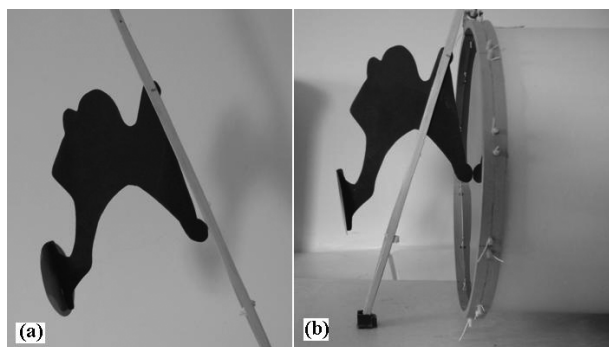


Figura 5 - (a) detalhe do dispositivo elaborado para representar os três ossículos (martelo, bigorna e estribo) e janela oval; (b) junção do dispositivo com as demais partes do aparato ouvido mecânico.

A janela oval foi elaborada e construída com placa de imagem de raio X, levando em consideração suas proporções em relação à membrana timpânica. Ela foi fixada com uma fina camada de cola na extremidade da peça que representa o estribo.

4. Orientações metodologias para o desenvolvimento da atividade experimental

No dispositivo ouvido mecânico: o tubo de PVC de 250 mm é o conduto auditivo; a membrana elaborada com placa de imagem de raio X representa o tímpano;

²A área de conexão entre os ossículos possibilita a existência de uma articulação. O martelo, fortemente ligado ao tímpano, recebe a vibração transmitida pela onda sonora ao ouvido externo, transmitindo-a à bigorna, por meio de uma articulação entre ambos. O tímpano possui uma curta saliência com a qual estabelece a ligação com a bigorna. Esta última, por sua vez, possui uma saliência longa com a qual estabelece a ligação com o estribo. Essas saliências funcionam como braços de potência de uma alavanca interfixa.

a peça de plástico de capa de DVD simboliza o ouvido médio (martelo, bigorna, estribo e janela oval); o balde de 20 litros pode ser empregado para demonstrar o efeito da proximidade com uma caixa de som numa festa e o pistão pode ser utilizado para demonstrar os efeitos do fone de ouvido.

Considerando a sequência tradicionalmente usada na abordagem conceitual de ondas sonoras, e que se acha presente em livros didáticos, sugere-se que o professor faça uso da atividade experimental demonstrativa ao final da explanação dos conceitos de ondas e o processo de recepção e transmissão de uma onda sonora dentro do ouvido externo e médio, principalmente.

4.1. Utilizando o dispositivo experimental

A parte do aparato que representa o ouvido externo (tubo e membrana), o balde que representa a fonte sonora móvel e o pistão podem ser utilizados pelo professor para desenvolver suas aulas teóricas sobre os conceitos de: meio material, fonte sonora, frentes de onda, formas da frente de onda, as noções de amplitude e frequência, as propriedades de reflexão, refração e difração de uma onda.

A atividade experimental demonstrativa com o ouvido mecânico (parte externa e média) foi elaborada com o objetivo de auxiliar o professor a abordar as propriedades de reflexão, refração e difração de uma onda, estudar a propagação, a transmissão e a amplificação do som no ouvido externo e ouvido médio e abordar os efeitos do uso inadequado do fone de ouvido.

Antes de iniciar os procedimentos, o professor deve solicitar aos alunos que respondam as questões presentes no roteiro. Em seguida, ele realiza a demonstração, promove uma discussão sobre os fenômenos evidenciados, orientando os alunos a avaliarem suas respostas e, se necessário, reescrevê-las.

O roteiro foi dividido em quatro procedimentos. O primeiro, o dispositivo e as partes do ouvido externo e médio (mostrado na Fig. 6), busca relacionar as partes que compõem o ouvido externo e médio com as respectivas modelizações no dispositivo. Tem como objetivo promover uma revisão de conceitos apresentados na aula expositiva.

No procedimento 02 (A física e a audição humana), com o auxílio do balde usado como uma fonte sonora móvel, o professor deve explorar/relembrar conceitos associados à fonte sonora, meio material, frente de onda. Sugere-se que insira, no roteiro, questões como: 1) Quando uma fonte sonora começa a emitir um som em um ambiente aberto, a frente de onda é de que forma? E se aproximar a fonte da abertura do ouvido mecânico, a frente de onda mudaria? 2) Uma frente

de onda esférica implica que se tenham partículas vibrando em quantas direções? E a que se propaga dentro do conduto auditivo? 3) Se essa fonte sonora não estivesse, aqui, dentro da sala, mas lá na coordenação, por exemplo, quais as propriedades ondulatórias que se poderia associar à trajetória dessa onda sonora que transporta apenas energia até atingir nosso ouvido? 4) Qual é, então, a função da nossa orelha e do conduto auditivo no processo auditivo?

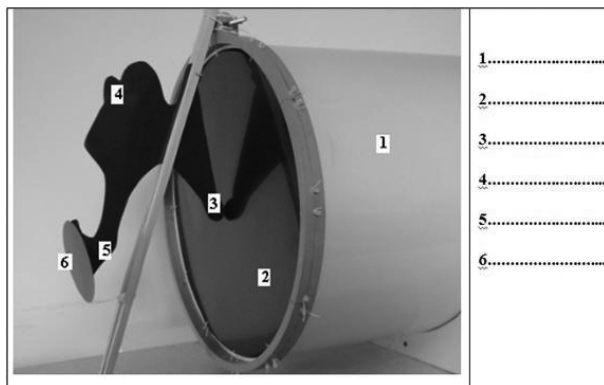


Figura 6 - Ilustração das partes do ouvido representadas pelo dispositivo ouvido mecânico presente no procedimento 1 do roteiro.

No procedimento 3 (As qualidades fisiológicas do som que ouvimos), sugere-se que o professor busque mostrar aos alunos os efeitos produzidos por sons grande intensidade ou pequena, agudos e graves na membrana timpânica e na janela oval. Para isso, ele deve alterar a intensidade com que bate no balde e a frequência das oscilações produzidas com a mão no seu fundo. Com a ajuda de um apontador laser, fixado num anteparo, mostrar os efeitos das vibrações produzidas no tímpano e na janela oval.

Sugere-se que, no roteiro, explore questões como: Qual a diferença entre um som agudo e um grave? Como se pode produzir um som agudo com nossa fonte móvel? E um grave? Existe diferença entre a vibração do tímpano e da janela oval? Que fatores influenciam essa diferença?

Nessa etapa, o professor pode promover uma discussão sobre o hábito de muitos jovens escutarem música, próximo de fontes sonoras como carros com sons potentes.

O procedimento 04 (a utilização do fone de ouvido) tem como objetivo buscar conscientizar os alunos sobre os problemas resultantes do uso frequente do fone de ouvido.

Na atividade, o pistão vai representar o fone de ouvido e, com ele, o professor deve abordar a diferença na quantidade de energia transportada pela onda sonora quando produzida dentro e fora do conduto auditivo.

Deve lembrar os alunos que, quando produzida fora, as frentes de onda têm forma esférica e com a propagação ocorre uma diluição da energia, o que provoca uma atenuação da intensidade da onda. Essa di-

minuição ocorre devido ao aumento da superfície e da poluição do ar.

O uso do fone de ouvido vai produzir a perturbação dentro do conduto auditivo e a cera do ouvido e os folículos pilosos podem até produzir uma pequena atenuação, mas ela é tão insignificante que se pode dizer que a energia será integralmente transmitida à membrana timpânica. Ela entra em vibração, e como o fone está em contato com os ossículos, ela transmite essa vibração para eles que, por sua vez, transmite à janela oval. É importante mostrar o processo no dispositivo, produzindo oscilações no pistão, frisando que a quantidade de energia que o pulso transmite ao tímpano, ou seja, a intensidade da onda sonora está associada à amplitude da onda. É possível simular essa amplitude variando a profundidade do pistão no tubo.

O professor deve, nesse momento, lembrar aos alunos que, no ouvido médio, composto pelos ossículos, ocorrem dois processos de transmissão de energia: um associado a um mecanismo de alavanca e outro associado a um processo hidráulico.

No processo de alavanca, o martelo em contato com a membrana timpânica começa a vibrar com a mesma intensidade a qual transmite para a bigorna, que impulsiona o estribo alternadamente para dentro e para fora da janela oval, finalizando o processo de transmissão do som.

A relação hidráulica existe graças à diferença na área do tímpano e da janela oval, o primeiro tem área de aproximadamente 55 mm^2 , enquanto que a área da janela oval é de cerca 3 mm^2 .

Seria interessante o professor explorar o ganho de pressão, abordando o princípio de Pascal, frisando que, quando se utiliza o fone de ouvido, praticamente não se tem atenuação da energia sonora e isso resulta numa maior pressão no tímpano e muito maior ainda na janela oval. O uso prolongado do fone de ouvido com baixa intensidade ou num intervalo de tempo menor, mas com grande intensidade pode ser igualmente prejudicial.

O professor pode ainda explorar a diferença na vibração produzida por um som grave e um som agudo, variando a frequência de oscilação do pistão. No primeiro caso, o tímpano será atingido por frentes de ondas mais espaçadas, enquanto que, no caso do som agudo, a membrana será bombardeada por frentes de ondas.

Ao finalizar a atividade experimental, lembrar aos alunos que a membrana timpânica é flexível/elástica e que o uso prolongado do fone de ouvido pode provocar perda da elasticidade, prejudicando a audição. É como se fosse uma roupa com elástico que você gosta muito e usa quase todo dia. Com o passar do tempo, ele vai perdendo a elasticidade e acaba estragando. O mesmo pode acontecer com o tímpano, quando o uso é muito frequente. Se o uso não é frequente, mas as poucas vezes que usa ele coloca o volume com máxima intensidade, isso também vai prejudicar a saúde da sua audição.

Referências

- [1] J. Pinho Alves, disponível em http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/viii/PDFs/COCD6_2.pdf, acesso em 15/3/2010.
- [2] M.S.T. de Araújo e M.L.V.S. Abib, Revista Brasileira de Ensino de Física **25**, 2 (2007).
- [3] A.G. Violin. Revista Brasileira de Ensino de Física **1**, 2 (1979).
- [4] D.P. Ausubel J.D. Novak e H. Hanesian, *Psicologia Educacional* (Interamericana, Rio de Janeiro, 1980).
- [5] P.L. Menezes, S. Caldas Neto e M.A. Mota, *Biofísica da Audição* (Lovise LTDA., São Paulo, 2005).
- [6] L.R. Rui, Texto de apoio ao professor de física, disponível em http://www.if.ufrgs.br/tapf/v18n1_Rui.pdf.
- [7] S.R. Bistafa, *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído* (Edgard Blucher, São Paulo, 2006), 1^a ed.