

ONDULATÓRIA E ACÚSTICA ATRAVÉS DE EXPERIMENTOS ASSISTIDOS POR COMPUTADOR

Marisa Almeida Cavalcante marisac@pucsp.br
Cristiane R. C. Tavoraro cris@pucsp.br

GoPEF/PUC/SP - Departamento de Física da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo apresentar alguns recursos experimentais desenvolvidos para compreensão de tópicos de Ondulatória e Acústica.

Além da metodologia inovadora, podemos destacar a versatilidade do equipamento, alta tecnologia e o baixo custo. Por outro lado, esses recursos permitiram a montagem de um laboratório didático de acústica (Kit de Acústica) para ser utilizado nas disciplinas de Física Acústica e Fonética Acústica do curso de Fonoaudiologia da PUC/SP. O processo de construção dos equipamentos bem como a elaboração da metodologia para o ensino de acústica nasceu das discussões realizadas entre o GoPEF (Grupo de Pesquisa em Ensino de Física) e o LIAC- Laboratório Integrado de Análise Acústica – PUC/SP através de seminários multidisciplinares.

Este kit permite estabelecer duas montagens; uma delas dirigida ao estudo dos modos de vibração em cordas vibrantes e a outra nos permite estudar em detalhes os fenômenos de ressonância em tubos sonoros. Tanto os geradores de ondas sonoras quanto os analisadores de espectros sonoros são obtidos a partir de versões shareware de softwares. Diversas medidas podem ser efetuadas desde a determinação da velocidade do som até estudos detalhados de diferentes espectros sonoros em múltiplas condições experimentais tais como tubo aberto, tubo fechado em uma das extremidades em duas extremidades e diferentes comprimentos.

O equipamento, bem como a metodologia desenvolvida tem atendido a disciplinas específicas do curso de Fonoaudiologia da PUC/SP permitindo aos alunos uma melhor compreensão dos processos físicos envolvidos na produção da fala.

Cabe ressaltar que a simplicidade do equipamento utilizado possibilitou sua reprodução na Oficina do CCET-PUC / SP e também em algumas escolas de Ensino Médio da rede pública através dos professores que participaram do Prociências 2002 promovido pelo Departamento de Física da PUC/SP.

INTRODUÇÃO

Há cerca de 30 anos a física teórica vem modelando a origem e a evolução do universo, bem como o comportamento de partículas elementares, através da teoria das supercordas que postula que toda matéria consiste em minúsculas cordas vibráteis, isto é, as propriedades da matéria são reflexos das diversas maneiras em que uma corda pode vibrar.

A Revista Scientific American Brasil ^{R1}, em sua edição de março de 2004, trouxe num artigo intitulado “As Vibrações Harmônicas que acompanharam o Nascimento do Universo” uma interessante discussão sobre a expansão do Universo nos primeiros instantes após o Big Bang. As sucessivas compressões e rarefações do plasma primordial se propagaram da mesma forma que uma onda sonora no ar e o estudo do padrão dessa onda, através das variações de temperatura da radiação cósmica de fundo em microondas, revela um “espectro sonoro” com harmônicos, semelhante ao produzido por um instrumento musical.

Esses são alguns exemplos que mostram a importância da Ondulatória como base para a compreensão das principais conquistas da física desde Einstein. Mostra ainda, como a analogia é um instrumento poderoso para a pesquisa e o aprendizado porque expressa conceitos incomuns em imagens e termos comuns.

O modelo ondulatório, essencialmente mecânico, tem se mostrado altamente eficiente como analogia para a descrição de muitos fenômenos da física moderna e se queremos compartilhar do entusiasmo pelas descobertas que vem sendo feitas precisamos compreendê-lo não somente em essência mas também enquanto linguagem matemática.

Esse trabalho tem como objetivo contribuir para que professores do Ensino Médio tenham recursos educacionais que facilitem o entendimento de aspectos da Física importantes no desenvolvimento do conteúdo de Ondulatória e Acústica. Esperamos dessa forma, fornecer as ferramentas necessárias para que professores e alunos tenham clareza quanto ao modelo ondulatório tão importante para a compreensão da física contemporânea.

Por outro lado, um dos problemas fundamentais para a compreensão da produção da fala é o entendimento do fenômeno de ressonância em tubos sonoros, já que o modelo adotado para o trato vocal é de um tubo fechado na extremidade onde se localizam as pregas vocais e aberto na extremidade onde se localizam os lábios. Dessa forma, o estudo da voz humana requer a definição de conceitos ou propriedades dos sons produzidos que identificam as estruturas sonoras: ressonância e harmônicos. Os experimentos desenvolvidos a partir do kit de acústica permitem estudar a ressonância bem como a formação de harmônicos em cordas vibrantes e tubos sonoros, proporcionando a visualização e melhor compreensão dos conceitos abordados na disciplina de Acústica do curso de Fonoaudiologia.

CORDAS VIBRANTES

O sistema de cordas vibrantes produz ondas estacionárias em cordas (ressonância) e permite verificar a formação de frequências harmônicas. Os conceitos de ressonância e de onda estacionária bem como a produção de diferentes modos de vibração num dado sistema, são amplamente utilizados nos modelos teóricos formulados para o estudo da Acústica e Produção da Fala. Daí a importância dada a este experimento pois o mesmo permite visualizar diferentes condições de ressonância em uma corda vibrante.

Ondas Estacionárias

Suponha que numa mesma corda, sejam produzidos dois pulsos em extremidades opostas. O que acontece quando esses pulsos se cruzam? E depois do cruzamento?

Durante o cruzamento, cada ponto é a soma algébrica das alturas de cada onda nesse instante. Essa afirmação denomina-se Princípio da Superposição. Depois do cruzamento, cada pulso continua com suas próprias características. Por isso ouvimos o som de uma orquestra distinguindo seus instrumentos, embora todas as ondas sonoras produzidas se propaguem no mesmo meio e na mesma região do espaço.

A consequência da superposição das ondas é o fenômeno da Interferência. A onda resultante pode ter a amplitude aumentada ou reduzida. No primeiro caso ocorre a Interferência construtiva, no segundo a Interferência destrutiva. Os modos de vibração da corda ocorrem em virtude da superposição das ondas incidentes e refletidas nas extremidades fixas da corda. O efeito visível é o resultado da interferência entre essas ondas, que recebeu o nome, aparentemente contraditório de onda estacionária.

Um experimento que pode mostrar como se formam as ondas estacionárias consiste em prender uma extremidade da corda de comprimento L a um oscilador mecânico (como a membrana de um alto falante por exemplo), e tracionar a outra extremidade da corda mantendo-a esticada e fixa, como a corda de um violão. Um som é produzido ao fazê-la vibrar pois o ar que a envolve sofre compressões e rarefações, constituindo uma onda sonora. Aumentando a frequência do oscilador gradativamente, observa-se que a corda oscila de modo irregular até que para uma dada frequência, a corda passa a vibrar intensamente, formando um único ventre entre dois nós – a corda entra em ressonância. Este modo de vibração (fig.1) é chamado fundamental (ou primeira harmônica), correspondendo à menor frequência f_1 de vibração da corda e maior comprimento de onda λ_1 (observe que o comprimento L da corda acomoda apenas metade da onda, isto é, $L = \lambda_1/2$).

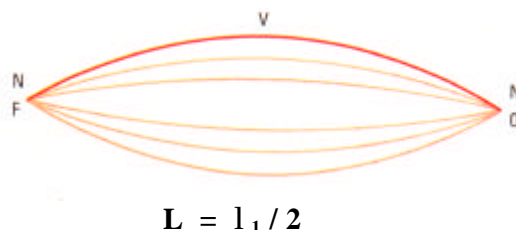


Figura 1: Modo de vibração fundamental de uma corda vibrante de comprimento L , onde N corresponde aos nós e V é o ventre.

Aumentando – se mais a frequência do oscilador a corda volta à condição de vibração irregular até entrar em ressonância novamente, vibrando intensamente, mas agora com dois ventres e três nós (observe na fig. 2 que agora a corda acomoda uma onda inteira, isto é, $L = \lambda_2$). Neste caso a frequência f_2 (segunda harmônica) corresponde ao dobro de f_1 .

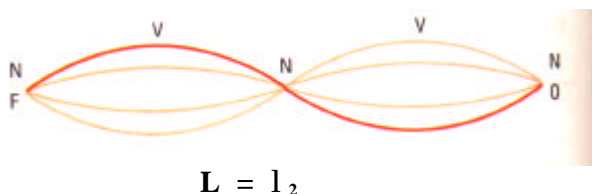


Figura 2: Segundo modo de vibração da corda. Nessa condição de vibração, o comprimento de onda coincide com o comprimento da corda.

Se continuarmos aumentando a frequência do oscilador, haverá novas ressonâncias em frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. Podemos então escrever que as frequências de ressonância da corda de comprimento L são

$$f = n \cdot f_1 \quad \text{onde} \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (1)$$

As extremidades fixas da corda são nós, pontos onde a corda não vibra. Isso nos leva a concluir que, para haver ressonância, o comprimento da corda L deve ser igual ao múltiplo da metade do comprimento de onda das ondas que geram a configuração, caso contrário, as ondas não se encaixam exatamente entre as extremidades. Então

$$L = n \cdot \lambda/2 \quad \text{onde} \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (2) \quad \text{e como}$$

$$f = v / \lambda \quad (3)$$

podemos dizer que as frequências de ressonância da corda são dadas por

$$f = \frac{n}{2L} \cdot v \quad (4)$$

onde v é a velocidade de propagação das ondas na corda e é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (5)$$

onde T é a força de tração na corda e μ é a densidade linear da corda.

Descrição do equipamento e procedimentos para produção e análise de cordas vibrantes

Material Utilizado:

1. Software^{R2} de geração de sinais “Sine Wave Generator”
2. Alto falante
3. Caixa de som ligada ao PC
4. Base de madeira
5. Corda com um peso (presa ao alto falante)
6. Polia
7. PC

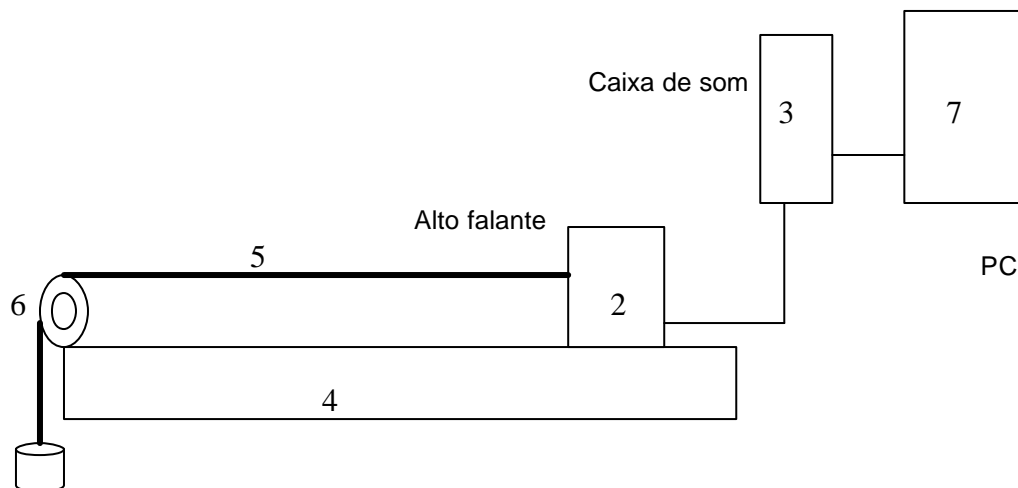


Figura 3: Diagrama de blocos do sistema de cordas vibrantes.

Os sinais de áudio com frequências variáveis são obtidos a partir do software "sine wave generator", disponível na internet ^{R2}. A fig 4 mostra a tela que é observada para este software. Na saída de áudio do PC usamos caixas de som para PC com amplificador (com controle de volume) e a vibração é obtida a partir de um dos alto-falantes que foi retirado de uma das caixas de som.

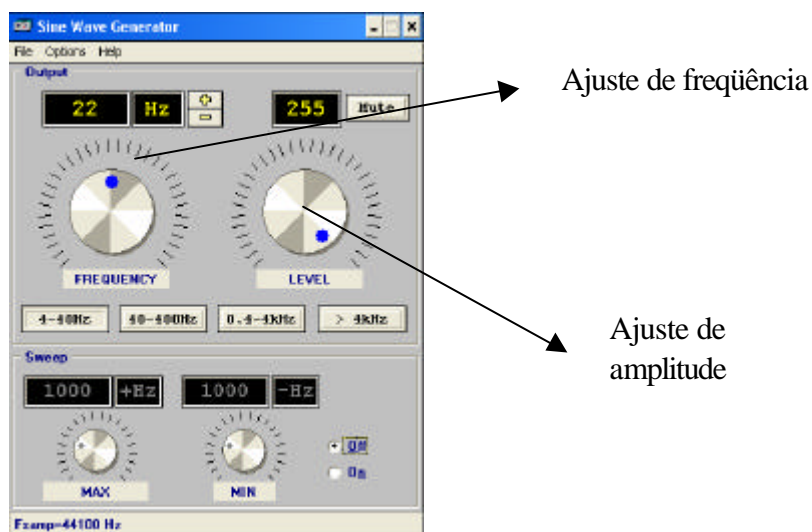


Figura 4: Tela observada na versão para windows 98 do software "sine wave gerador" que permite variar a frequência de vibração da corda de 1 em 1 Hz.

Um pino de PVC foi colado ao alto falante (fig.5) de modo que se pode prender um barbante em sua extremidade. O alto falante encaixa num trilho de madeira graduado.

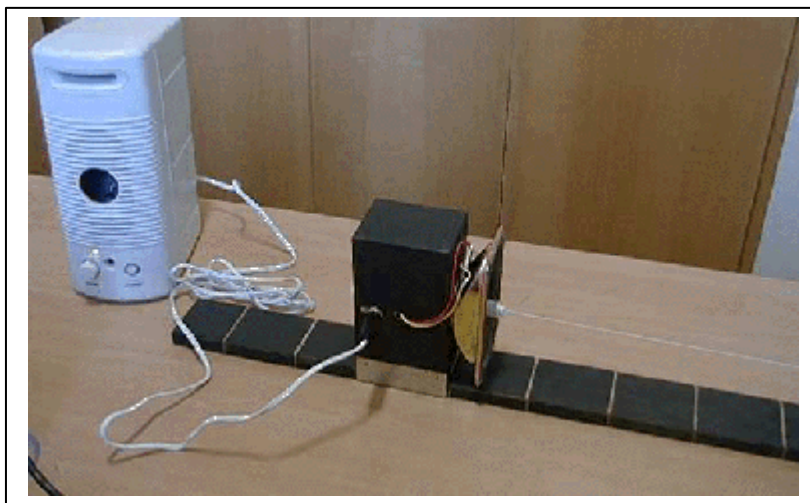


Figura 5: A corda fixa no pino de PVC, vibra com a mesma frequência do sinal produzido no alto falante. Na outra extremidade, um peso estica a corda que passa por uma polia.

Fixando-se um comprimento para a corda, podemos variar a frequência de vibração até obter diferentes condições de ressonância. A relação entre a frequência e o número de harmônicos

correspondente permite obter a medida da velocidade de propagação da onda na corda bem como sua densidade (equações 4 e 5). A figura 6 mostra um dos modos de vibração da corda.

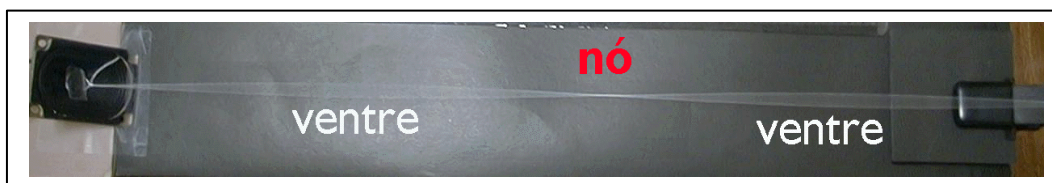


Figura 6: A corda apresenta o segundo modo de vibração, isto é, $n = 2$.

Outro procedimento que pode ser adotado com essa montagem para obter diferentes condições de ressonância: mantendo fixa a frequência do gerador e deslizando o alto falante sobre o trilho de madeira é possível aumentar ou diminuir o número de ventres que se estabelecem na corda.

É importante ainda observar que o gerador de sinais permite uma variação discreta de frequência no intervalo de 4 a 40000Hz, o que assegura obter os diferentes modos de vibração com resoluções de pelo menos 1Hz

TUBOS SONOROS

O sistema de tubos sonoros permite fazer medidas de velocidade do som no ar, medidas de comprimentos de onda através da formação de ondas sonoras estacionárias observáveis com pó de cortiça dentro do tubo ou através da análise dos componentes harmônicos que integram o espectro sonoro do tubo de ressonância.

Por outro lado, um dos modelos mais utilizados para o estudo da produção da fala é o proposto por Fant^{R3} (1956), no qual a fala é produzida a partir da associação fonte - ressoador (ou filtro). A fonte é constituída pela vibração das pregas vocais e o filtro é constituído pelo trato vocal, cuja função é selecionar as frequências que são amplificadas. O modelo normalmente utilizado para o trato vocal é o de um tubo constituído por uma sequência de pequenos tubos cilíndricos (fig.7). Nos experimentos sugeridos, estudamos a contribuição do tubo sonoro simples sem deformações, atuando como filtro, com o objetivo de entender os conceitos envolvidos.

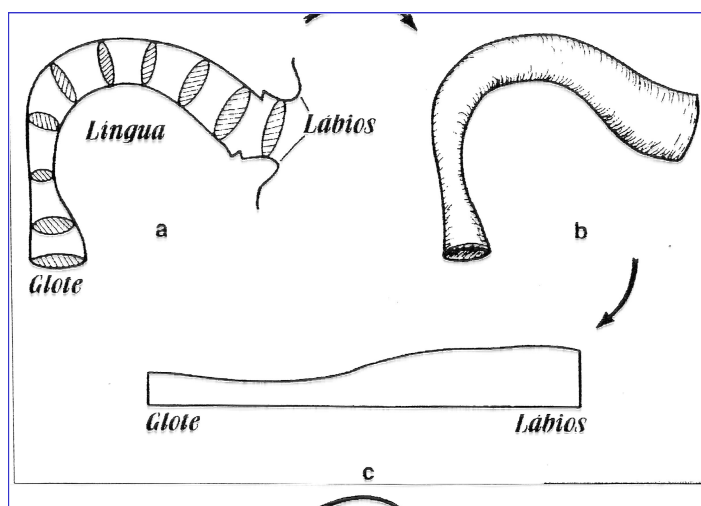


Figura 7: O trato vocal (a) pode ser comparado a um tubo sonoro deformado (b e c).

Ondas sonoras em tubos

O som é uma onda mecânica longitudinal, ou seja, precisa de um meio material para se propagar e sua propagação tem a mesma direção que a perturbação que a causou. A onda sonora se propaga pelo ar criando regiões de compressão e rarefação deste meio. O princípio de funcionamento da maioria dos instrumentos de sopro é a produção de ondas sonoras estacionárias dentro de tubos (conhecidos como tubo de Kundt). Somente ondas com determinadas frequências são reforçadas quando se assopra para dentro de um tubo. Essas frequências são chamadas de **frequências naturais de vibração**, similares às frequências que podem existir em uma corda vibrando. As possíveis ondas estacionárias que se formam dentro de um tubo de comprimento L , por exemplo, com uma extremidade fechada, podem ser estudadas a partir do procedimento proposto neste trabalho.

Tubo fechado numa extremidade

A onda estacionária de menor frequência que se forma, também chamada de fundamental, corresponde ao maior comprimento de onda possível neste tubo. A figura 8 mostra como se dá o movimento do ar dentro do tubo. Nota-se que o deslocamento das moléculas de ar que estão próximas à extremidade fechada do tubo é zero (**nó**) e que o deslocamento máximo ocorre na extremidade aberta (**ventre**). A simulação em Java ^{R4} que produziu a figura integra a metodologia de trabalho adotada no estudo do tubo sonoro.

O comprimento de onda neste caso é relacionado ao comprimento L do tubo por

$$L = \lambda/4 \quad \text{ou} \quad \lambda = 4L \quad (6)$$

e a frequência de oscilação pode ser calculada fazendo

$$f = v / \lambda \quad \text{ou} \quad f = v / 4L \quad (7)$$

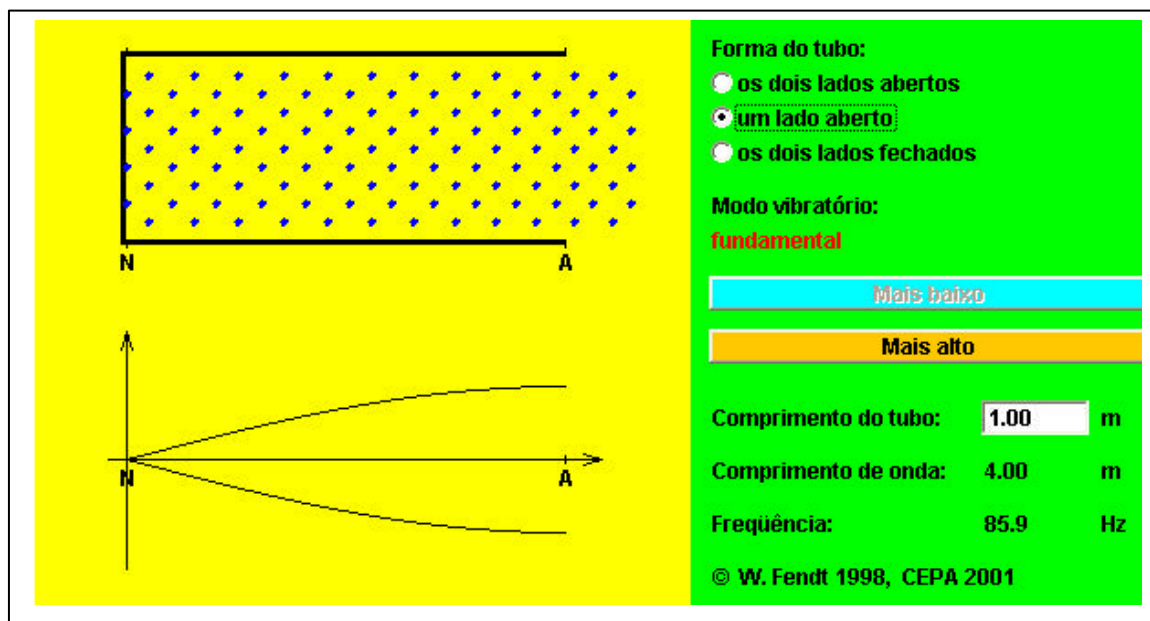


Figura 8: A figura mostra o deslocamento máximo das partículas do ar no lado aberto e a representação do ventre correspondente. No lado fechado, um nó de deslocamento de partículas. Essa figura foi obtida a partir de uma simulação em Java^{R4} (autoria de Walter Fendt) .

A pressão do ar por sua vez, tem um comportamento diferente. Nota-se na figura 8, que na extremidade aberta, a pressão do ar deve igualar a pressão atmosférica, e desta forma, temos aí um nó de pressão. Na extremidade fechada teremos um ventre de pressão, já que aí teremos pressão máxima. É importante ressaltar neste momento que, a intensidade de uma onda sonora depende da pressão, e dessa forma, onde temos pressão máxima, temos intensidade máxima de som, e vice-versa. Além da frequência fundamental, a onda de pressão pode oscilar com outras frequências, chamadas de harmônicas. O importante é que essa onda possua o nó (de deslocamento de partículas) na extremidade fechada e um ventre na extremidade aberta.

Os comprimentos de onda possíveis são

$$\lambda = 4L / n \quad \text{onde } n = 1, 3, 5, \dots \quad (8)$$

pois para n par teríamos ventre na extremidade fechada, o que é impossível.

As frequências correspondentes são obtidas fazendo

$$f_n = v / \lambda \quad \text{ou} \quad f_n = n v / 4L \quad (9)$$

Descrição do equipamento e procedimentos para produção e análise de ondas sonoras em tubos

O gerador ^{R2} de ondas sonoras é o mesmo utilizado no sistema de cordas vibrantes (fig.4), agora associado à outra caixa de som, adaptada para que se encaixe um tubo de PVC transparente de cerca de 4 cm de diâmetro como mostra a figura 9.(a). A análise das frequências harmônicas pode ser feita observando os nós e ventres produzidos no tubo a partir da vibração do pó de cortiça (fig. 9.(a)) ou a partir da análise do espectro sonoro. Para isso, usamos um microfone acoplado ao PC, que através de softwares disponíveis na Internet ^{R5} (gram V6) faz a análise espectral do som captado pela placa de som do PC (fig. 9.(b)).

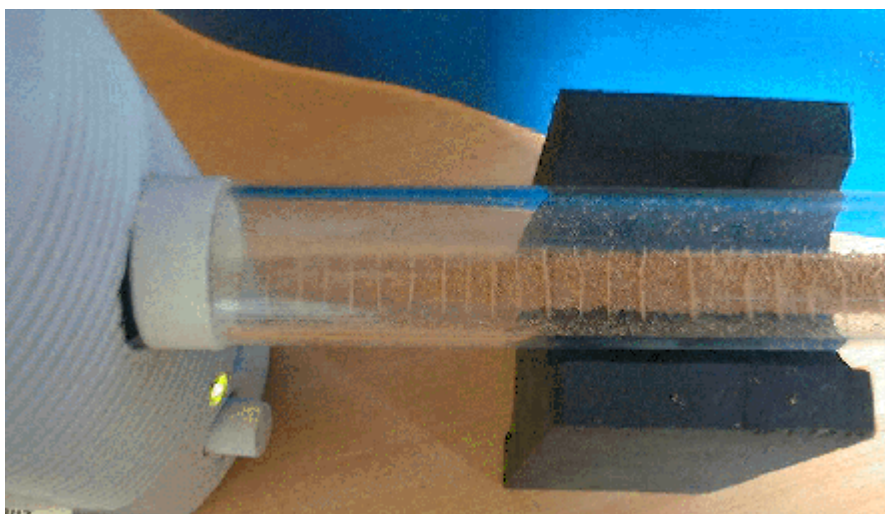


Fig.9.a: Acoplamento entre a caixa de som e o tubo.

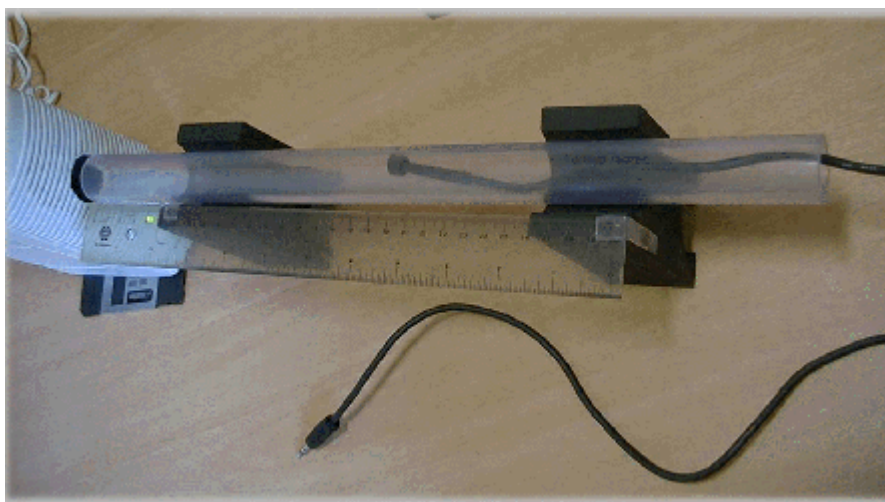


Fig.9.b: Microfone piezelétrico varrendo a extensão do tubo.

Figura 9: É possível visualizar ventres e nós de deslocamento de partículas de ar dentro do tubo em ressonância introduzindo pó de cortiça em sua extensão (fig.9.a). Para escutar os máximos e mínimos produzidos bem como para fazer a análise espectral, utiliza-se o microfone dentro do tubo, associado a um software de análise ^{R5}(fig.9.b).

Material Utilizado:

1. Software de simulação em Java “Ondas Estacionárias Longitudinais”
2. Tubos cilíndricos de PVC transparente de diferentes comprimentos
3. Caixa de som com furo central
4. Microfone
5. Pó de cortiça
6. Base de madeira
7. Embolo móvel
8. Software gerador de sinais
9. Software de análise sonora GRAM versão 6.0

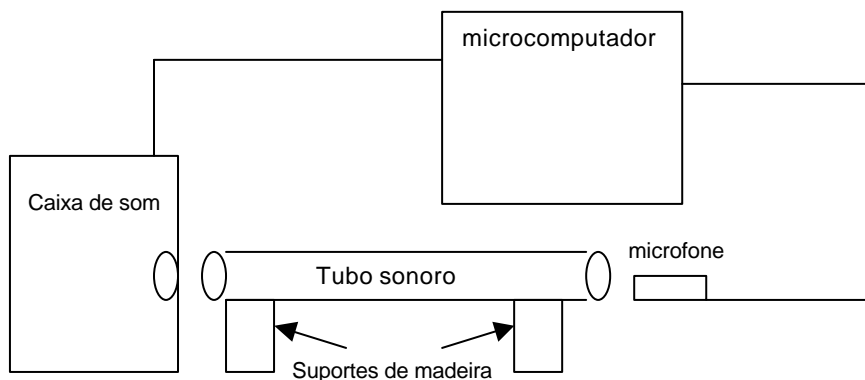


Figura 10: Diagrama de blocos do sistema de tubos sonoros.

Experimento 1 : Observação de nós e ventres em tubos sonoros

Antes de iniciarmos o experimento *real*, utiliza-se a simulação em Java ^{R4} de Ondas Longitudinais (fig. 8), introduzindo o comprimento do tubo disponível para o experimento e selecionando a opção “um lado aberto”. Dessa forma, a simulação fornecerá os valores da frequência fundamental e primeira harmônica do tubo. Também é possível observar o número de nós e ventres correspondentes. A seguir, o tubo contendo pó de cortiça é acoplado à caixa de som e o gerador de sinais é acionado já com a frequência fundamental selecionada. No entanto, como a simulação utiliza um valor fixo para a velocidade de propagação das ondas sonoras no ar ($v = 343,5 \text{ m/s}$, correspondente à temperatura de 20°C), a frequência do gerador de sinais deve ser ajustada para outras condições de velocidade até que se possa visualizar a ressonância, com o pó de cortiça vibrando na extremidade aberta, como mostra a figura 9.a.

O mesmo procedimento pode ser repetido com as duas extremidades abertas para justificar o funcionamento de alguns instrumentos musicais como flautas, por exemplo.

Experimento 2 : Espectro sonoro do tubo.

Todo som complexo pode ser decomposto em uma combinação de sons mais simples, harmonicamente relacionados, ou seja, numa série de tons puros, semelhantes ao de um diapásão, e com frequências que são múltiplos inteiros de uma frequência fundamental. Quando quebramos um determinado som em seus componentes simples, estamos realizando uma análise espectral.

Para estudar as frequências naturais de vibração de um tubo sonoro é interessante comparar o espectro de tubos de comprimentos diferentes. O som pode ser produzido batendo com a palma da mão numa das extremidades figura 11, colocando a outra extremidade próxima ao microfone conectado ao PC. A figura 12 mostra a análise espectral^{R5} de um tubo de 20 cm.

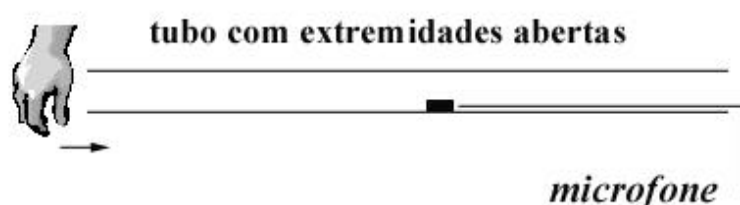


Figura 10: Fonte sonora que pode ser utilizada para obter o espectro sonoro de um tubo com uma das extremidades fechada.

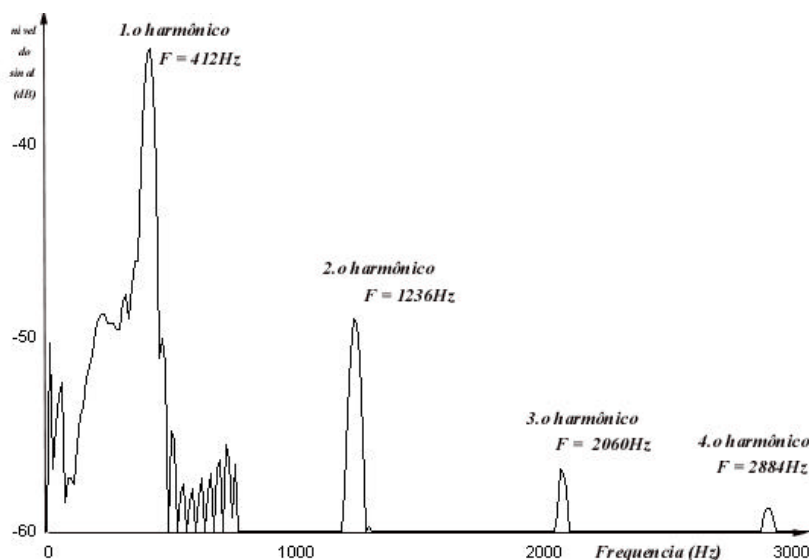


Figura 12: Espectro sonoro obtido para um tubo de 20cm fechado em uma das extremidades^{R1}. O espectro foi obtido através do software gram V.6^{R5}.

O procedimento descrito pode ser utilizado para determinar a velocidade do som no ar dentro do tubo, a partir da equação 9, pois o comprimento do tubo é conhecido e as frequências naturais de vibração podem ser determinadas com bastante precisão^{R7, R8 e R9}.

Experimento 3: Tubo Sonoro atuando como filtro

O software analisador Adobe audition 1.0^{R6} (ou similar) possui opções de geração de ruído (mistura de frequências). Esse ruído pode ser introduzido na caixa de som acoplada ao tubo (utilizar volumes baixos para não gerar microfonia). Inicialmente analisa-se o espectro do ruído com o microfone próximo à caixa de som.

A seguir, o microfone é introduzido no tubo (tubo fechado em uma extremidade) para que se analise o “novo espectro”. Apenas as frequências naturais de vibração do tubo serão amplificadas e poderão ser “observadas” no espectro do tubo. Dessa forma verifica-se que o tubo atua como um filtro. A figura 13 mostra a diferença observada no espectro sonoro quando se introduz o microfone no interior de um tubo de 40 cm. A esquerda observa-se apenas o espectro do ruído branco obtido através do Adobe audition 1.0^{R6}. A direita observa-se a contribuição dos harmônicos, reforçado pelo tubo.

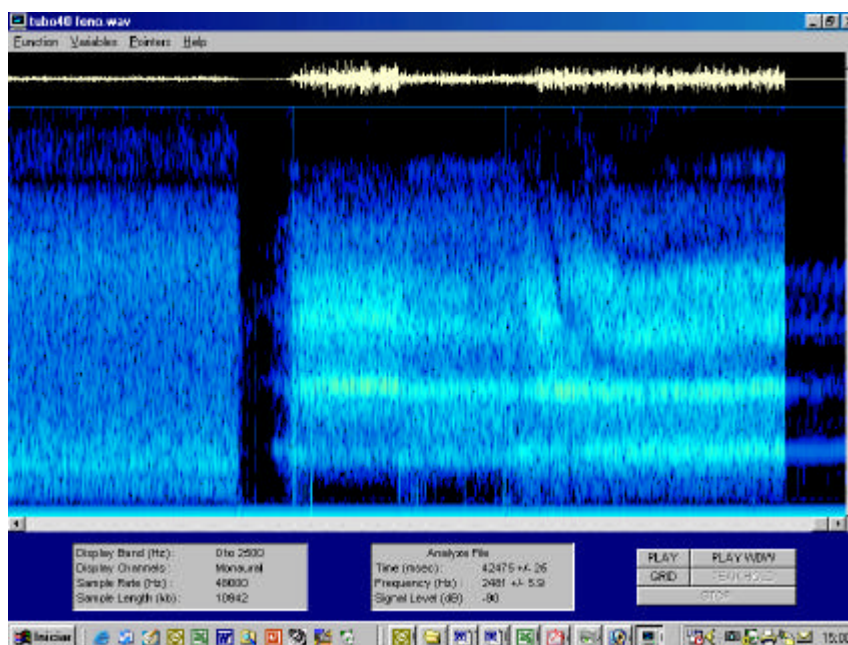


Figura 13. Espectro sonoro do ruído branco alterado pelo tubo de 40cm aberto nas duas extremidades.

Com este estudo de tubos sonoros compreende-se porque no trato vocal algumas frequências são amplificadas dando origem à função de transferência do modelo de Fant^{R3}. O espectro glotal é modificado pela ação do filtro, isto é, a configuração do filtro determina as frequências que devem ser amplificadas.

CONCLUSÃO

Os roteiros dos experimentos propostos aqui foram executados e testados por professores responsáveis pelas disciplinas do curso de Fonoaudiologia da PUC/SP para a posterior aplicação do experimento em suas respectivas turmas. Conforme esperávamos, os experimentos permitem a

visualização e melhor compreensão dos conceitos abordados na disciplina de Acústica, principalmente no que se refere à atuação do trato vocal como filtro.

Por outro lado, a tecnologia de captação e análise de som assistida por computador, vem sendo desenvolvida e aperfeiçoada em outros experimentos, como por exemplo, em sistemas de detecção em Dinâmica^{R10}, o que demonstra a relevância da proposta apresentada neste trabalho.

Referências Bibliográficas

R1- Revista Scientific American Brasil. “As Vibrações Harmônicas que acompanharam o Nascimento do Universo”. março de 2004.

R2- <http://www.via.nl/users/bikkel> Gerador de Sinais: Sine Wave Generator. Autor : Marcel Veldhuijzen.

R3- FANT, G. On the predictability of formant level and spectrum envelopes from formant frequencies. For Roman Jakobson, 1956, p. 109 - 20.

R4- <http://home.a-city.de/walter.fendt/phe> Simulação em Java.Ondas Longitudinais. Autor: Walter Fendt.

R5- www.monumental.com/rshorne/gram.html Analisador de Espectros Sonoros: Gram V6. Autor: Philip Van Baren.

R6- <http://www.adobe.com/products/audition/main.html> Adobe audition 1.0. Software analisador de espectros sonoros.

R7- CAVALCANTE, M. A. e TAVOLARO, C. R. C. *Medindo a Velocidade do Som*. A Física na Escola (suplemento da RBEF) v.4 n.1, maio de 2003.

R8-BARBETA, V. B. e MARZZULLI, C. R. Experimento Didático para Determinação da Velocidade do Som no Ar, Assistido por Computador. RBEF vol. 22 no 4, dezembro de 2000.

R9- OLIVEIRA, L. M.; VEIT, E. A. e SCHNEIDER, C. Projeto: Novas Tecnologias no Ensino de Física em Nível Médio- CREF - Instituto de Física - UFRGS (<http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef>)

R10- CAVALCANTE, M. A.; SILVA, E.; PRADO, R. e HAAG, R. . *O Estudo de Colisões através do Som*. Rev. Bras. Ens. Fís. v. 24, n. 2, p. 150-157, 2002.