

**Universidade Estadual de Campinas  
Instituto de Física Gleb Wataghin**

**Relatório Final para a disciplina F609 – Tópicos de ensino de Física  
Primeiro semestre de 2010**

**Estudo de ondas estacionárias em tubos fechados por  
meio de software de osciloscopia.**

Orientando: Vicente Lima Ventura Seco<sup>1</sup> RA: 046865  
Orientador: Eliermes A. Menezes<sup>2</sup>

1 – vicenteventura2112 @ yahoo . com . br  
2 – eliermes @ ifi . unicamp . br

## 1) **Resumo**

O experimento consiste em utilizar um software que simule um osciloscópio para gerar ondas em um tubo com ambas extremidades fechadas, utilizando um microfone como receptor para varrer o tubo e captar as regiões de máxima e mínima amplitude da onda formada. Esta montagem complementa outros experimentos semelhantes, como a bureta com coluna d'água variável, utilizada para simular um tubo vertical fechado em uma extremidade e aberto na outra.

## 2) **Introdução**

O estudo da Física Ondulatória se mostra cada vez mais necessário em nossa sociedade, visto a quantidade de fenômenos e equipamentos presentes em nosso cotidiano que utilizam-se de ondas para existir e funcionar. Somente a sua aplicabilidade já justificaria a extrema importância do seu estudo para alunos do ensino fundamental e médio.

Uma vez que grande parte das ondas não podem ser observadas visualmente, entendemos que todas as montagens experimentais que permitam ao estudante um contato mais amplo com os conceitos ensinados pelo professor, auxiliarão na absorção e compreensão dos mesmos. Visualizar de forma gráfica por meio do osciloscópio o padrão móvel ou estacionário da onda, constatar pela movimentação do microfone ao longo do tubo as características periódicas da mesma – como a variação da amplitude e o comprimento de onda da onda, auxiliam os alunos a compreenderem alguns dos conceitos mais importantes da ondulatória clássica, como frequência, período, comprimento de onda e velocidade de propagação de onda. Com as informações obtidas com o osciloscópio é possível discutir outros temas referentes a acústica, como a intensidade e altura de um som utilizando as vozes dos próprios estudantes.

Por ser uma variação do conhecido Tubo de Kundt, esta montagem também pode ser introdutória a análise de experimentos semelhantes (referências 3, 7 e 8), permitindo que os alunos reapliquem os conceitos apreendidos.

## 3) **Originalidade**

Existem diversos trabalhos abordando a detecção de ondas estacionárias, mas nenhuma referência cuja montagem seja essencialmente igual a esta foi encontrada. Trabalhos semelhantes utilizando colunas d'água de altura variável para formar as ondas estacionárias, ou objetos leves no interior de tubos que se agrupam de acordo com a amplitude das ondas estacionárias são citados nas referências.

## 4) **Teoria**

As ondas podem ser interpretadas como oscilações, pulsos ou perturbações que transportam energia durante a sua propagação, sendo classificadas de acordo com a sua natureza (mecânicas ou eletromagnéticas) e sua propagação (transversais ou longitudinais).

*Ondas mecânicas:* ondas que precisam de um meio material para se propagar, como por exemplo as ondas sonoras, sísmicas e marítimas.

*Ondas eletromagnéticas:* ondas que não precisam de um meio material para se propagar, ou seja, podem se propagar no vácuo, como por exemplo a luz, ondas de rádio e raio x.

*Ondas transversais:* quando o sentido da propagação é perpendicular a oscilação geradora da onda.

*Ondas longitudinais:* quando o sentido da propagação é paralelo ao sentido da oscilação geradora da onda.

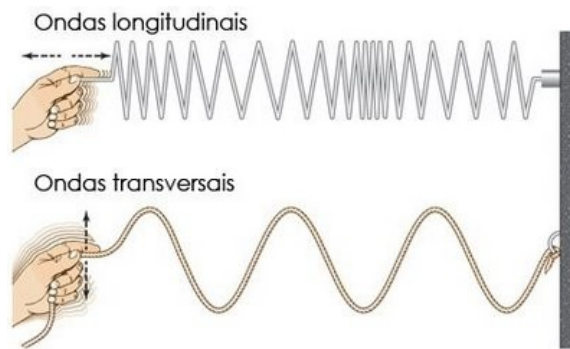


Figura 1: representação de ondas longitudinais e transversais [9]

Por serem oscilações periódicas, as ondas podem ser representadas por uma função senoidal ou cossenoidal, de forma a representar a posição de um elemento da onda para um dado tempo de propagação, como indicado na figura 2.

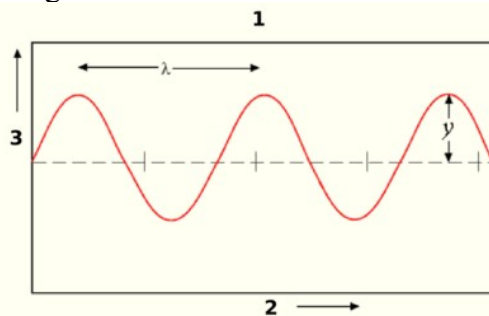


figura 2: comprimento de onda e amplitude [10]

podendo ser matematicamente representada por:

$$y(x,t) = y_m \text{sen}(kx - \omega t) \quad [1.1]$$

Onde

$y(x,t)$ : deslocamento da onda para um tempo “t”;

$y_m$ : amplitude da onda – intensidade do deslocamento máximo dos elementos a partir das suas posições de equilíbrio.

$\lambda$ : distância paralela a direção da propagação da onda entre repetições da forma de onda.

$T$ : período - tempo necessário para que uma onda ou ciclo se complete.

$f$ : frequência - número de ciclos completos na unidade de tempo.

$\text{sen}(kx - \omega t)$ : termo oscilatório da onda.

$kx - \omega t$ : fase – responsável pela variação da função seno entre os valores 1 e -1, resultando no caráter oscilatório da onda.

$k = 2\pi/\lambda$ : número de onda angular.

$\omega = 2\pi/T$ : frequência angular.

Uma vez que a equação [1] representa a posição da onda para um dado tempo t, podemos obter a velocidade de propagação da onda ao considerar que um ponto A sobre a corda mantém sua posição vertical constante ao admitir que a onda (ou padrão de onda) se locomove inteiramente no sentido da propagação, resultando que

$$kx - \omega t = \text{constante}, \quad [1.2]$$

mas ao aplicarmos a derivada temporal sobre [2] obteremos

$$k \frac{dx}{dt} - \omega = 0 \rightarrow \frac{dx}{dt} = v = \frac{\omega}{k} \quad [1.3],$$

ou seja

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad [1.4]$$

Uma vez que utilizaremos nossa montagem para estudar ondas sonoras no ar, devemos considerar algumas características das ondas sonoras:

*Fenômenos compatíveis com a propagação da onda sonora [3]*

Na propagação do som observam-se os fenômenos gerais da propagação ondulatória. Dada sua natureza longitudinal, o som não pode ser polarizado; sofre, entretanto, os demais fenômenos, a saber: difração, reflexão, refração, interferência e efeito Doppler.

A difração depende do comprimento de onda; é a propriedade que a onda apresenta em contornar (devido ao modelo de fontes secundárias, posto na teoria da ondulatória, no princípio de Huyghens) os obstáculos que encontra durante sua propagação. Como o comprimento de onda ( $\lambda$ ) das ondas sonoras é bastante grande (enorme, em relação ao comprimento de onda da luz), a difração sonora é intensa.

A reflexão do som obedece às leis da reflexão ondulatória nos meios materiais elásticos e suas consequências. Convém frisar que a reflexão do som ocorre bem em superfícies cuja extensão seja grande em comparação com o comprimento de onda. Ainda derivado do fenômeno da reflexão do som, temos a considerar a formação de ondas estacionárias nos campos ondulatórios limitados, como é o caso de colunas gasosas aprisionadas em tubos.

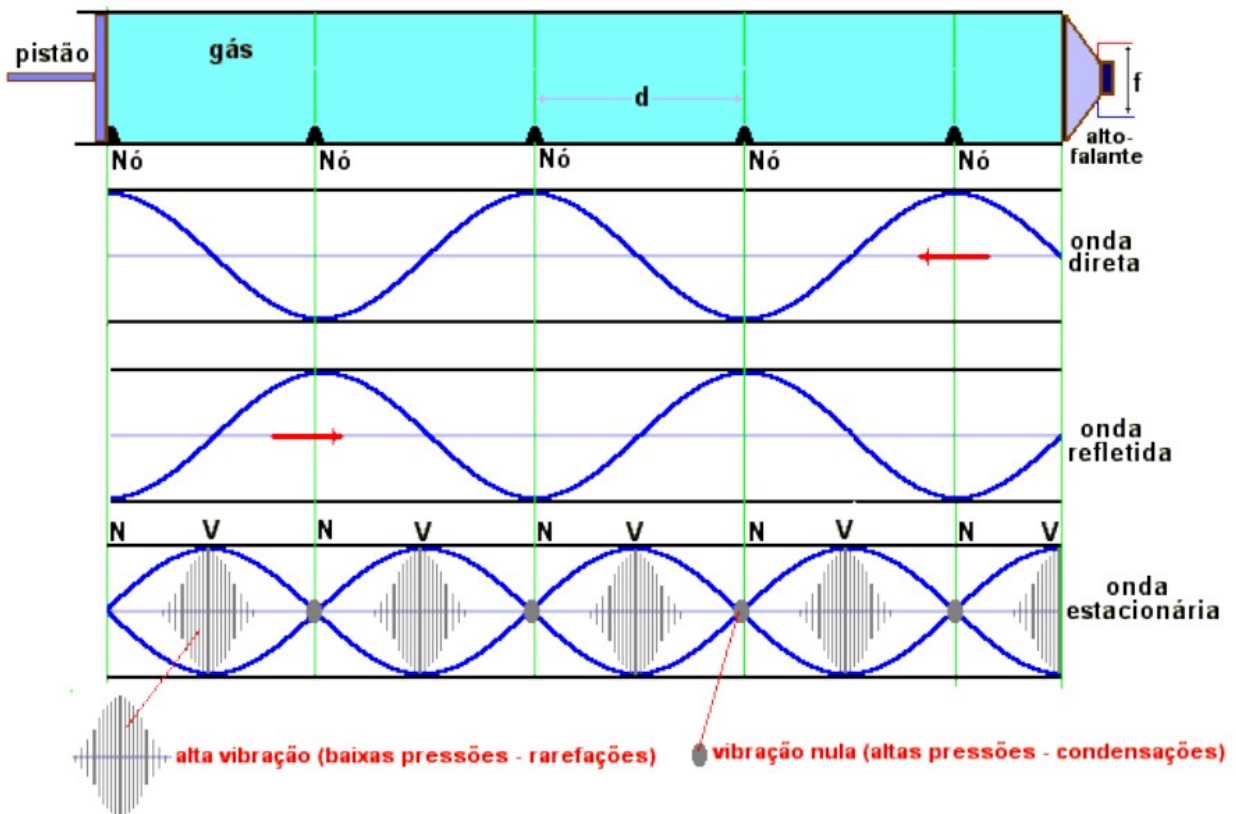


Figura 3: representação de ondas estacionárias em um tubo fechado

A distância ( $d$ ) entre dois nós consecutivos é de meio comprimento de onda ( $d = \lambda/2$ ). Sendo  $V_{\text{gás}} = \lambda f$  tem-se:  $V_{\text{gás}} = 2fd$ . Que resulta num processo que permite calcular a velocidade de propagação do som em um gás qualquer! A frequência  $f$  é fornecida pelo oscilador de áudio-frequência que alimenta o auto-falante. A refração do som obedece às leis da refração ondulatória, fenômeno que caracteriza o desvio sofrido pela frente de onda, que geralmente ocorre, quando ela passa de um campo ondulatório (por exemplo, ar) a outro de elasticidade (ou compressibilidade, para as ondas longitudinais) diferente (por exemplo, água). Convém frisar que ao passar de um campo (meio) para outro (do ar para a água, no exemplo), a característica do som que se mantém é a sua altura (frequência); assim, tanto o comprimento de onda ( $\lambda$  como sua velocidade de propagação ( $V$ ) são diferentes em cada campo ondulatório.

$$f = V_1/\lambda_1 = V_2/\lambda_2 = V_3/\lambda_3 \dots \quad [2.1]$$

A interferência é a consequência da superposição de ondas sonoras. Dois sons de alturas iguais (frequências iguais) se reforçam ou se extinguem permanentemente conforme se superponham em concordância ou em oposição de fase. Se suas frequências não forem rigorosamente iguais, ora eles se superpõem em concordância de fase, ora em oposição de fase, ocorrendo isso a intervalos de tempo iguais, isto é, periodicamente se reforçam e se extinguem. É o fenômeno de batimento.

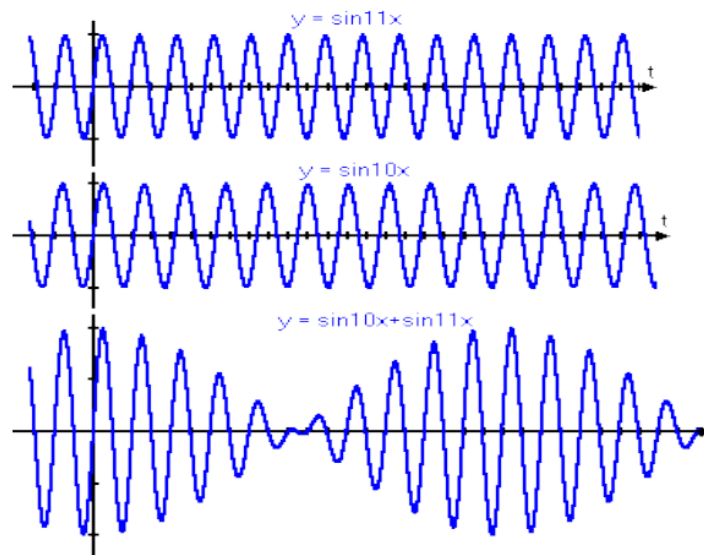


Figura 4: batimento

O efeito Doppler é a consequência do movimento relativo entre o observador e a fonte sonora, o que determina uma modificação aparente na altura do som recebido pelo observador.

#### *As equações de uma onda estacionária*

Consideremos a superposição de duas ondas, uma caminhando para a direita e a outra se deslocando para a esquerda, de mesma frequência e amplitude.

$$Y_1 = Y_0 \text{sen}(kx - \omega t) \rightarrow \text{movendo-se para a direita.} \quad [3.1]$$

$$Y_2 = Y_0 \text{sen}(kx + \omega t) \rightarrow \text{movendo-se para a esquerda.} \quad [3.2]$$

A onda resultante da superposição destas duas ondas é aquela dada por :

$$Y = Y_0 [\text{sen}(kx - \omega t) + \text{sen}(kx + \omega t)] \quad [3.3]$$

Usando a expressão trigonométrica para a soma de dois senos, obtemos que:

$$Y = 2Y_0 \cos(\omega t) \sin(kx) \quad [3.4]$$

Pelo resultado verifica-se que a amplitude da onda resultante será dada por  $2Y_0 \cos(\omega t)$ . Da mesma maneira observa-se que a amplitude da onda resultante será nula nos pontos em que tivermos a equação  $\sin(kx) = 0$ .

Por isso, planos nodais da onda estacionária ficam definidas pela relação :

$$x = n\lambda/2. \quad [3.5]$$

A equação da onda resultante podendo ser re-escrita como:

$$Y = 2Y_0 \cos(\omega t) \sin(kn\lambda/2) \quad [3.6]$$

Podemos visualizar a forma da onda estacionária na figura abaixo, onde se distingue os "ventres" e os "nós", correspondentes a uma distância de  $\lambda/2$ .

## 5) Construção do Tubo (TK1)

### *Lista de materiais:*

- 1 Emissor de som – fone de ouvido;
- 1 Suporte para o fone de ouvido;
- 1 Receptor de som – microfone;
- 1 Suporte para o microfone;
- 1 Tubo transparente com comprimento maior que 15 cm;
- 1 Antena de televisão telescópica;
- 2 Acabamentos para pés de cadeiras feito de borracha;
- 1 Computador com entrada para microfone e saída pra fone de ouvido;
- 1 Software para osciloscopia Soundcard Oscilloscope – Scope 13 2  
([http://www.zeitnitz.de/Christian/scope\\_en](http://www.zeitnitz.de/Christian/scope_en));
- Ferro de solda, solda, alicates, tesoura, super-bonder e fita crepe.



Figura 5: fone de ouvido



Figura 6: microfone

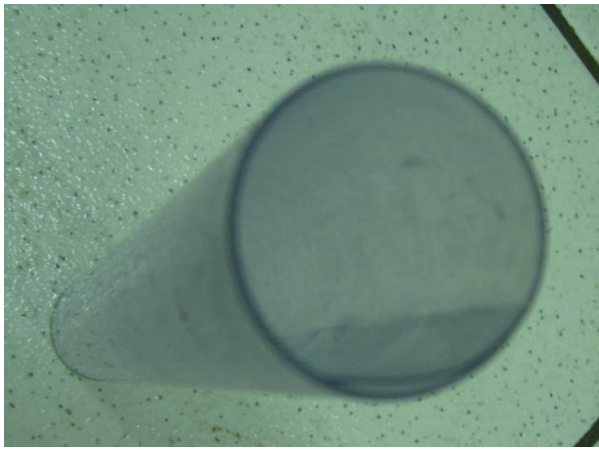


Figura 7: tubo transparente

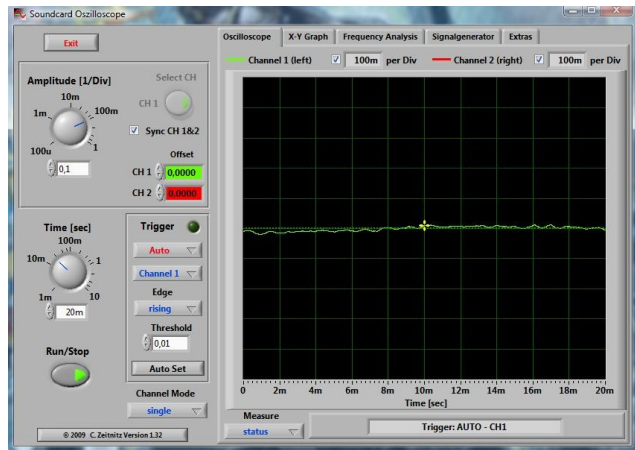


Figura 8: Soundcard Oscilloscope

Todos os materiais utilizados podem ser encontrados em lojas e mercados comuns, permitindo que os estudantes possam refazer a montagem em suas casas. Apenas o tubo transparente pode ser um pouco mais trabalhoso de se obter, visto que ele restringirá as dimensões das demais peças utilizadas.

As alternativas encontradas para o tubo transparente foram:

– Lâmpada tubular de vidro

prós: extremamente transparente, resultando em uma montagem bonita e funcional

contras: quebra com facilidade, principalmente durante o manuseio dos estudantes

: o corte para ajustar o comprimento do tubo não é simples de ser feito, mesmo em vidrarias e vidraçarias, tornando suas extremidades cortantes e perigosas.

– Vasos cilíndricos encontrados em mercados e floriculturas, mas estes frequentemente são de vidro e recaem nos mesmos problemas da lâmpada tubular.

– Tubos de acrílico utilizados em porta copos. Este tubo mostrou ser a melhor alternativa, pois tanto seu comprimento quanto diâmetro podem ser modificados de acordo com a necessidade. Na nossa montagem compramos uma folha de acrílico semi-maleável e enrolamos a mesma até obter o diâmetro desejado.

Após desmontarmos o fone e o microfone de forma a ficar apenas com as partes que nos interessavam para a montagem (alto falante, receptor, plugues e cabos) moldamos os suportes que sustentariam tais peças, considerando que estes suportes ficariam no interior do tubo de acrílico.



Figura 9: Suporte do microfone



Figura 10: suporte do fone de ouvido



Com podemos observar nas figuras 9 e 11, o microfone foi fixado a antena telescópica de televisão, com a sua fiação passando pelo interior do tubo. Na nossa montagem o alto falante ficará fixo enquanto o tubo será percorrido pelo microfone.



Figura 11: pés de borracha, microfone, fone de ouvido e suportes



Figura 12: tubo TK1 completo

Uma vez que o tubo TK1 esteja pronto, basta conectar os plugues ao computador e executar o programa Soundcard Oscilloscope, alterando os parâmetros desejados e observando as variações



obtidas na tela do computador

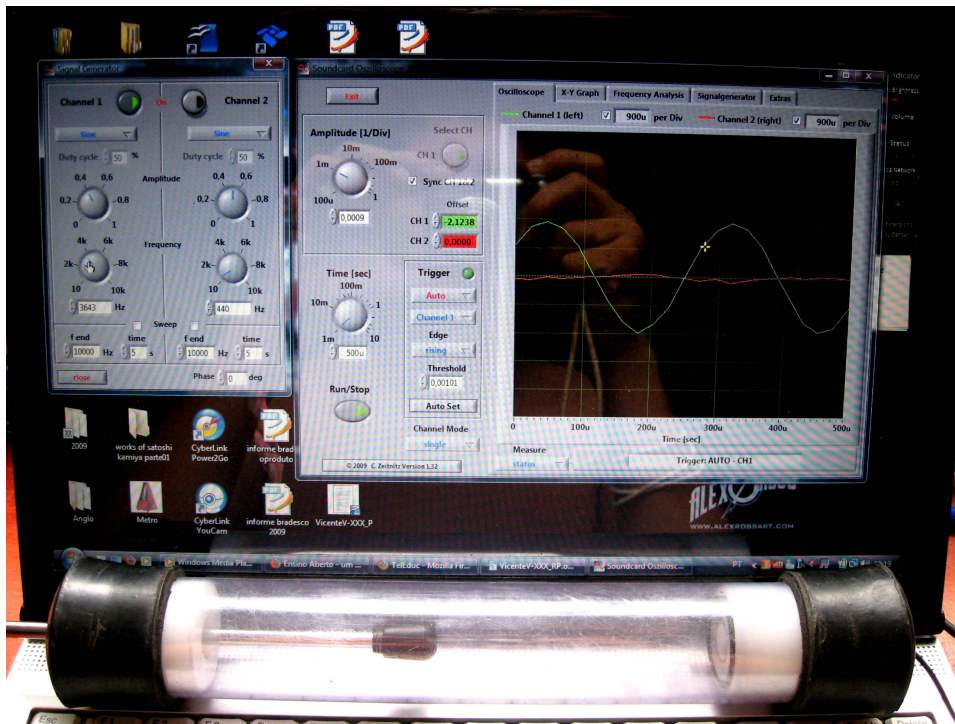


Figura 13: montagem em funcionamento

### Utilizando a Montagem Experimental

Para que o conjunto de componentes utilizados apresente resultados úteis para a demonstração em sala de aula, os seguintes parâmetros se mostraram adequados:

para a demonstração da formação de ondas estacionárias em intervalos periódicos:  
 $f = 740$  Hz, amplitude de 50%, fonte senoidal

para a demonstração da amplitude das ondas estacionárias  
 $f = 3$  kHz, amplitude de 50%, fonte senoidal

Com o figura de ondas estacionárias formada no osciloscópio, utilizaremos o microfone para percorrer o interior do tubo TK1 de forma a captar as regiões de máxima e mínima amplitude das ondas formadas. Tal variação de amplitude é apresentada pelo próprio programa de osciloscopia responsável pela geração das ondas no fone de ouvido.

Informações complementares:

De acordo com o professor Lunazzi [11], ondas senoidais podem ser geradas a partir do assobio ou de uma flauta doce. Durante a apresentação do tubo TDK1, constatamos junto ao professor a veracidade desta informação.

### 6) Experimento complementar

Após o experimento estar pronto para a utilização, algumas pequenas demonstrações foram feitas para professores do ensino médio, com intuito de receber sugestões para torná-lo mais útil tanto para os professores quanto para os estudantes. Em uma das apresentações, o Prof. Marcelo Teixeira sugeriu uma montagem simples de forma a complementar a demonstração proposta pelo tubo TK1. Para esta montagem são necessários os seguintes materiais:

- 1) Vasilha com água

- 2) Bureta
- 3) Diapasão de frequência conhecida



Figura 10: líquido colorido

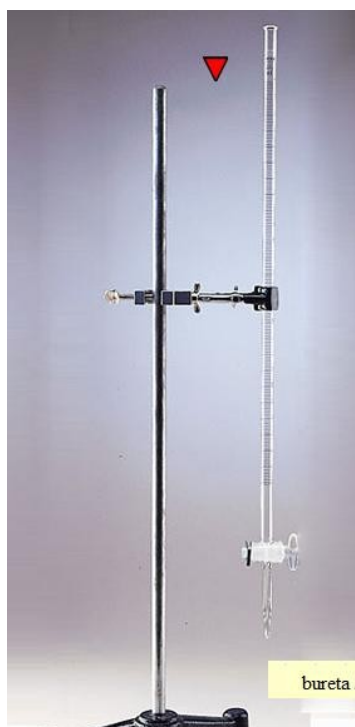


Figura 11: bureta



Figura 12: diapasão

Neste experimento, preenchemos a bureta com o líquido colorido (água com corante) e aproximamos o diapasão (já oscilante) da abertura superior da bureta, somente então, abrindo o registro para que o líquido escoe lentamente.

Durante o escoamento do líquido, perceberemos que a bureta emitirá um som intenso em intervalos iguais de tempo, correspondendo a formação de ondas estacionárias no interior do tubo. Desta forma, utilizando uma frequência constante, teremos a formação de ondas estacionárias a partir da variação do comprimento do tubo. Este procedimento difere do utilizado no tubo TK1 em dois aspectos:

- tubo com uma extremidade fechada e outra aberta
- frequência constante, comprimento variável

Segundo os professores, o experimento está adequado para a duração das aulas (em média 45 minutos) permitindo sua utilização em diferentes momentos, como na exemplificação de exercícios e conceitos teóricos.

### 7) Dificuldades e Conclusões

A primeira dificuldade esteve relacionada com a construção de um tubo transparente, que se mostrasse resistente ao manuseio dos alunos e que permitisse a visualização do seu interior, assim como a fixação rígida do microfone e do fone de ouvido. A segunda dificuldade surgiu durante a determinação da faixa de frequências ideais para a formação das ondas que pudessem ser adequadamente captadas pelo microfone.

Após superadas estas dificuldades, ficou clara a utilidade deste experimento - uma vez que este foi aprovado por professores experientes do ensino médio e utilizado com alguns estudantes da rede particular de ensino.

O baixo custo dos materiais, assim como a facilidade de obtenção dos mesmos, permite que este experimento seja refeito por professores e estudantes, alcançando um dos principais objetivos desta disciplina: oferecer ferramentas para a melhoria do ensino de Física.

## 8) Referências:

- 1) <ftp://ftp.pasco.com/Support/Documents/English/WA/WA-9895/012-10507A.pdf>  
mais um kit da PASCO ([www.pasco.com](http://www.pasco.com)) com diversas demonstrações de ondulatória.
- 2) [http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2009/AidaT\\_Tessler\\_RP.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2009/AidaT_Tessler_RP.pdf)  
relatório parcial referente a construção de um tubo de kundt - disciplina F609 da aluna Aída Rita com orientação do professor Leandro Tessler – UNICAMP – 2009)
- 3) [http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem2\\_2004/930365\\_Derik\\_Dirceu\\_RF.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2004/930365_Derik_Dirceu_RF.pdf)  
relatório final referente a construção de um Áudio-osciloscópio de chamas - disciplina F809 do aluno Derik José com orientação do professor Dr. Dirceu da Silva – UNICAMP)
- 4) <http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/ondas2/ondas2.html>  
informações úteis sobre a teoria ondulatória
- 5) [http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor\\_ondas/pulsos\\_sonoros\\_2k5.pdf](http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_ondas/pulsos_sonoros_2k5.pdf)  
experimento utilizado no curso de física da Universidad Favaloro - 2005, com ideias que auxiliaram na elaboração do tubo TK1
- 6) [http://www.physics.ucla.edu/demoweb/demomanual/acoustics/effects\\_of\\_sound/kundts\\_tube.html](http://www.physics.ucla.edu/demoweb/demomanual/acoustics/effects_of_sound/kundts_tube.html)  
montagem experimental que auxiliou a elaboração do tubo TK1 e suas aplicações
- 7) <http://www.youtube.com/watch?v=JpAUNtKLIAs>  
Demonstração de um tubo de kundt em funcionamento
- 8) <http://www.youtube.com/watch?v=GiHoD5P2PRI&feature=related>  
Demonstração de um tubo de kundt em funcionamento
- 9) <http://cfq8.files.wordpress.com/2010/04/ondas1.jpg>  
figura utilizada no relatório
- 10) <http://brodtec.com/files/images/onda.png>  
figura utilizada no relatório
- 11) [www.ifi.unicamp.br/~lunazzi](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi)  
página pessoal do professor coordenador da disciplina José J. Lunazzi

Meu orientador, o Prof. Dr. Eliermes A. Meneses concorda com os termos aqui estabelecidos para o projeto e declara que poderá dispor de todos os elementos necessários a menos de exceções indicadas embaixo.

Exceções: não há.

Sigilo: não solicita

**Declaração do orientador:**

“Meu orientador concorda com o expressado neste relatório parcial e deu a seguinte opinião:

No geral o trabalho está muito bom.

Eliermes

**Apresentação do projeto**

**4a dia 16 de junho**, das 15 às 18 h (primeira parte, sendo 15-17 h o horário da primeira turma, e 16-18 h o da segunda)

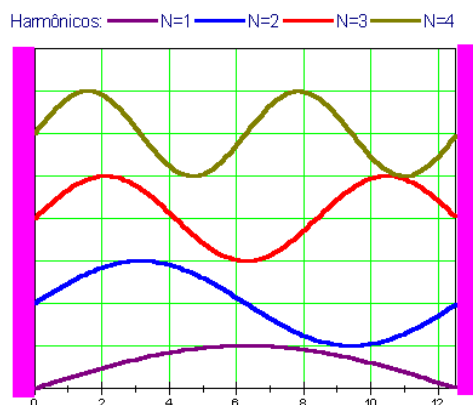
## Anexos 1 - Referência extraídas da internet

Referência 4: <http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/ondas2/ondas2.html>

Ondas sonoras

(\* Preparado por [C.A. Bertulani](#) para o projeto de Ensino de Física a Distância)

Inicialmente vamos falar um pouco sobre os instrumentos acústicos de cordas. Como o próprio nome diz, todos eles possuem pelo menos uma corda esticada, apresentando suas duas extremidades fixas. Uma perturbação é fornecida a esta corda através da própria mão ou de algum outro agente externo (palheta, arco no caso do violino ou violoncelo, etc), fazendo a corda entrar em vibração. Esta vibração está confinada entre as extremidades da corda e através de interferências entre os pulsos refletidos nas extremidades acabam formando uma onda estacionária com uma frequência bem definida.

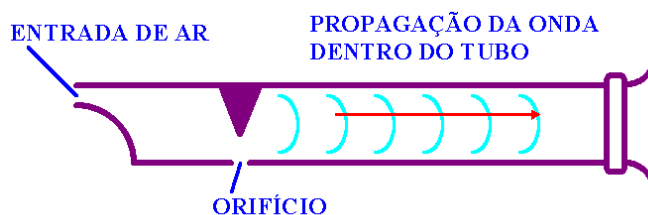


Como vimos no capítulo anterior, as frequências possíveis são:  $f = n v / 2 L$  [11.15]

Desta forma, para  $n = 1$  temos a frequência fundamental ou **primeiro harmônico**. Todos os outros harmônicos ( $n = 2, 3, 4, \dots$ ) são múltiplos inteiros da frequência fundamental, sendo este o princípio de funcionamento de todos os instrumentos de cordas como o violão, banjo, berimbau, etc.

Passamos agora a falar um pouco a respeito dos instrumentos de sopro, os quais nada mais são do que tubos sonoros, sendo que dentro deles uma coluna de ar é posta a vibrar. Estas vibrações são obtidas através de sistemas denominados **embocaduras**, que se classificam em dois tipos:

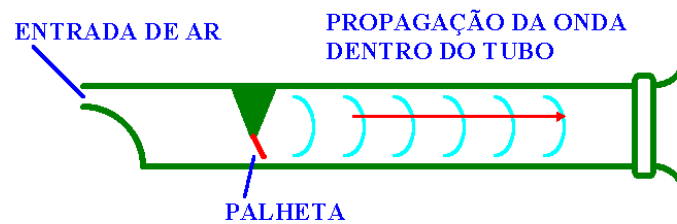
**Embocadura tipo flauta:** Neste tipo, o músico injeta um jato de ar que é comprimido por um calço para depois colidir contra um corte em diagonal, efetuado na parede do tubo. Nestas circunstâncias, o jato de ar sofre turbilhonamentos e variações de pressão que o lançam alternadamente ora para fora, ora para dentro do tubo. Dessa maneira, a coluna gasosa interna do tubo é golpeada intermitentemente, dando origem a uma onda longitudinal que se propaga no interior do tubo.



**Embocadura tipo palheta:** Neste tipo, o operador injeta um jato de ar do mesmo modo que a



embocadura anterior. Logo na entrada, o ar é comprimido pelo calço, tendo sua velocidade aumentada antes de passar ao interior do tubo, o qual é por uma folga existente entre uma lâmina flexível (palheta) e a parede do tubo. A passagem de ar se dá com turbilhonamentos e variações de pressão, que fazem a lâmina vibrar. Em consequência, esta passa a golpear o ar no interior do tubo, dando origem a uma onda.

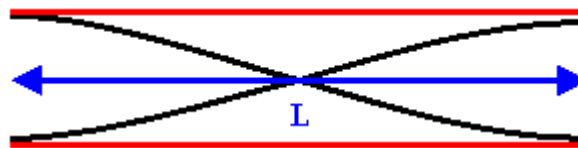


De acordo com as extremidades dos tubos sonoros, podemos classificá-los em **abertos** ou **fechados**, sendo que os abertos possuem as duas extremidades livres enquanto que nos fechados apresentam uma de suas extremidades obstruída.

**Tubo aberto:** São tubos que apresentam as duas extremidades livres, de modo que em cada extremidade aberta sempre existe um ventre. Os primeiros harmônicos estão mostrados nas figuras abaixo: o primeiro harmônico (fundamental) e o segundo harmônico.

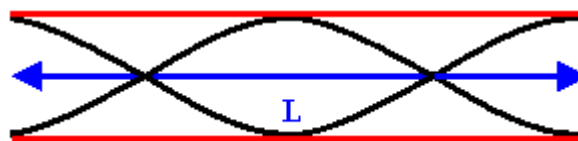
#### Fundamental

$$\lambda = 2L \quad f = v / 2L$$



#### Segundo harmônico

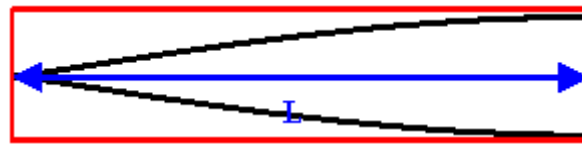
$$\lambda = L \quad f = v / L$$



**Tubo fechado:** São tubos que apresentam uma extremidade aberta e outra fechada, de modo que na extremidade aberta sempre existe um ventre e na fechada um nó. Com isto, a frequência dos harmônicos fica determinada por  $f = (2n - 1) / 2L$ , onde  $L$  é o comprimento do tubo e  $n$  o número de ventres dentro do instrumento. Pela própria definição, percebemos que apenas a ocorrência de harmônicos ímpares. Alguns harmônicos estão mostrados nas figuras abaixo.

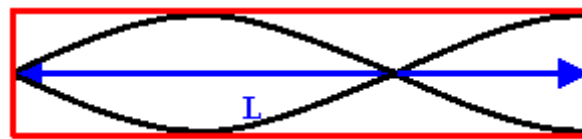
### Fundamental

$$\lambda = 4L \quad f = v / 4L$$



### Terceiro harmônico

$$\lambda = 4/3 L \quad f = 3v / 4L$$



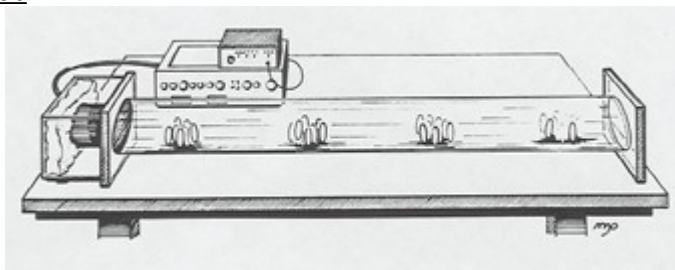
OBS.: Quando existir um furo nos tubos (como é o caso da flauta, saxofone, clarinetes, pistão, órgãos antigos, etc), acarretará na formação de um ventre naquele local.

Projeto: Ensino de Física a distância  
Desenvolvido por: [Carlos Bertulani](#)

### Referência 6:

[http://www.physics.ucla.edu/demoweb/demomanual/acoustics/effects\\_of\\_sound/kundts\\_tube.html](http://www.physics.ucla.edu/demoweb/demomanual/acoustics/effects_of_sound/kundts_tube.html)

#### A.2.6 Kundt's Tube



Our large Kundt's tube, designed by Prof. Rudnick, dramatically demonstrates standing acoustical waves. See the [animation of standing waves](#) in the waves section of the demo manual. Additional demonstrations and accessories with this apparatus are:

a. Microphone probe connected to an oscilloscope to accurately determine positions of the pressure antinodes. Using a frequency counter to measure the exciting frequency and the measured distance between the antinodes, you can determine the speed of sound to within 1%.

b. Hot wire probe (designed by S. Baker) detects the position of the velocity antinodes (which are at the position of the pressure nodes). The observed frequency on the scope is twice the exciting frequency since the probe responds to the square of the velocity. A pressure gradient mike is scheduled to replace this.

c. Acoustical levitation: the tube can be stood upright to levitate the Styrofoam chips or a single light disc at about 30 watts of input power.

d. Bernoulli effects: Two Styrofoam balls arranged laterally in the tube at a velocity antinode attract, while two balls arranged longitudinally repel. The fact that the discs in the illustration at the top arrange themselves perpendicular to the particle velocity is also a Bernoulli effect, explained briefly in [A.2.13.1](#).

e. "Cooper pairs": - balls at different antinodes oscillate together in the sound field.

**Styrofoam chips levitating  
in a vertical Kundt's tube**

