

*Medida da Velocidade do Som no Ar usando  
microcomputador e material simples*

**Aluno:** Márcio Luis Lanfredi Viola

**Ra:** 962837



**Orientador:** Francisco das Chagas Marques

**Nota:**

---

Índice

1- Introdução -----	3
2- Ondas Sonoras -----	3
3- Modelo Teórico para a Velocidade do Som no Ar -----	5
4- Ondas Estacionárias e Ressonância:	
4.1- Introdução -----	6
4.2- Tratamento Matemático do Movimento Ondulatório -----	6
4.3- Tubos com uma Extremidade Aberta e a outra Fechada -----	10
5- Montagem Experimental:	
5.1- Objetivo -----	12
5.2- Material -----	12
5.3- Procedimento Experimental -----	12
6- Resultados Experimentais -----	14
7- Conclusão -----	16
8- Bibliografia -----	17

## 1- Introdução:

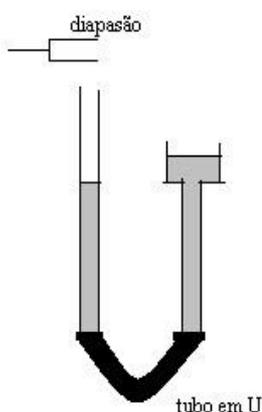
Há muitos séculos já se estuda a natureza do som e, em particular, a sua forma de propagação. Existem inúmeras montagens experimentais com o objetivo de determinar a velocidade de ondas sonoras em vários meios, inclusive no ar.

Uma montagem experimental clássica consiste de um tubo flexível em U, parcialmente preenchido com água, e um diapasão que vibra com determinada frequência, próximo do ramo do tubo que contém uma coluna de ar na parte superior. A Figura 1 ilustra esta montagem.

Nos últimos anos, com a popularização dos microcomputadores, surgiram várias propostas de montagens para a determinação da velocidade do som. Porém, tais montagens envolvem não só o micro, em si, mas também circuitos eletrônicos com microfone, alto-falante e outros componentes.

Qualquer de seja o tipo de montagem para a determinação da velocidade do som no ar, sente-se a necessidade do ambiente do laboratório. Na montagem clássica, deve haver a disponibilidade de tubos, mangueira, reservatório de água, cola e um conjunto de diapasões ou um gerador de áudio. Apesar da montagem não ser complicada e não requerer mão de obra especializada, é possível que muitos laboratórios de ensino (seja de universidades ou de escolas de nível médio) não disponham de alguns dos equipamentos necessários para a realização do experimento. Já a determinação da velocidade do som com a utilização de um micro associado a circuitos eletrônicos requer, além de mão de obra especializada para as montagens, de alguns equipamentos que também podem não estar disponíveis.

Este projeto possui a finalidade de descrever um experimento de fácil execução para determinar-se a velocidade do som no ar. Além disso, este projeto pode ser executado por alunos do segundo grau e por universitários.



**Figura 1:** Montagem clássica para a determinação da velocidade do som no ar.

## 2- Ondas Sonoras:

Quem já teve a oportunidade de observar um navio à grande distância no alto-mar deve ter notado que o som proveniente de seu apito só é escutado momentos após terem sido expelidos os vapores resultantes. Sabe-se também que durante as tempestades, provocadas por violentas perturbações elétricas na atmosfera, o ruído do trovão chega até nós alguns segundos após a claridade do relâmpago, e quanto maior for a distância do local onde se produzir o ruído maior o intervalo entre este e a claridade do relâmpago. Em distâncias curtas, podemos considerar a velocidade da luz como praticamente instantânea e, portanto, o tempo decorrido entre vermos o

relâmpago e ouvirmos a trovoadas deve ser o tempo para o som deslocar-se de sua origem até ao ouvido do observador.

Estes fatos evidenciam que o som se propaga através do ar com uma velocidade pequena, comparada com a velocidade da luz. A velocidade do som no ar é relativamente pequena pelo fato de as moléculas que se movimentam terem de se chocar umas com as outras a fim de propagar a onda longitudinal de pressão.

A luz se propaga na velocidade de 300.000 km/s, enquanto as ondas sonoras circulam no ar à razão de 340,9 m/s à 15,9° C. Em dias quentes o som se propaga com mais velocidade do que nos dias frios, pelo fato de o ar quente ser menos denso do que o ar frio. Nos dias de frio intenso a velocidade do som pode chegar a 328,7 m/s.

A mais antiga tentativa para a determinação da velocidade do som, de que temos notícia, foi realizada na França, em 1738, cuja tentativa não foi entretanto coroada de êxito. Mas, em 1822, pelas experiências conduzidas por uma comissão designada pela Academia Francesa, chegou-se à conclusão de que a velocidade do som no ar, a uma temperatura de 15,9° C, é de 340,9 m/s, e que esta velocidade aumenta de 60 cm/s para cada aumento de um grau centígrado na temperatura. A 0° C a velocidade do som é de 331,4 m/s. As mais recentes experiências realizadas não dão resultados significativamente diferentes daqueles que foram obtidos em 1822.

Os sons de todas as frequências propagam-se com igual velocidade. Se isto não fosse verdade, sons agudos, de alta frequência, como o píforo, numa banda musical, chegariam aos seus ouvidos antes (ou depois) dos sons de baixa frequência, como o do tambor e, assim, a música seria deformada. Quando ouvimos uma orquestra tocando, cada instrumento produz som de uma forma diferente, no entanto, todos são ouvidos ao mesmo tempo.

É fácil perceber como seria catastrófico o entendimento de uma conversa se os sons agudos, graves, fortes e fracos se propagassem com velocidades diferentes.

Os aviões a jato mais rápidos podem voar com velocidade maior que a do som. Viajar a tais velocidades é difícil porque o ar comprimido se acumula na frente do avião e este tem de “furar” o seu caminho como uma “bala”. Aviões a jato de alta velocidade têm a forma mais parecida com a de uma bala do que os aviões de baixa velocidade.

Nos líquidos e nos sólidos, onde as moléculas estão mais próximas umas das outras, a velocidade do som é bem maior do que em um gás ( $v_{\text{sólidos}} > v_{\text{líquidos}} > v_{\text{gases}}$ ). Na água, a velocidade do som é cerca de quatro vezes a sua velocidade no ar; a 25° C é de aproximadamente 1500 m/s. e no aço chega a 5000 m/s, ou seja, cerca de quinze vezes maior.

Se você ficar ao lado de uma estrada de ferro e escutar enquanto um trabalhador bate um espigão com o martelo, você ouvirá cada golpe duas vezes. O som que se propaga através do aço dos trilhos chega antes do som que se transmite através do ar.

Em geral, as fontes de som são os corpos em vibração, como o cone de um alto-falante, as cordas vocais, etc. As ondas sonoras são ondas mecânicas e, portanto, não se propagam no vácuo. São audíveis pelo homem quando sua frequência se situa entre 20 Hz e 20.000 Hz.

O som possui as seguintes qualidades:

1. **Intensidade:** É a qualidade que nos permite distinguir os sons fortes dos fracos;
2. **Timbre:** É a qualidade que nos faz distinguir as vozes de duas pessoas, mesmo quando emitindo sons de mesma frequência. Também permite diferenciar os sons de dois instrumentos musicais, mesmo quando eles emitem a mesma nota;
3. **Altura:** É a qualidade do som que nos permite distinguir os sons graves dos agudos.

### 3- Modelo Teórico para a Velocidade do Som no Ar:

Um modelo simples [3] para a “visualização” da propagação do som em um meio (por exemplo, numa barra longa), consiste na analogia do meio com esferas em repouso, enfileiradas ao longo de um tubo, muito próximas uma das outras. Ao impulsionarmos as esferas de uma extremidade (batendo com um pequeno martelo da esquerda para a direita), com uma pequena velocidade  $\mu$ , durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , todas as esferas contidas na distância  $L = v\Delta t$  terão sido impulsionadas devido às colisões sucessivas. Observe que  $v$  é a velocidade com que as colisões sucessivas foram transmitidas ao longo do tubo.

Por outro lado, observe que, com o impulso, há um “encolhimento”  $\Delta L = \mu\Delta t$  na distância  $L$ . Este encolhimento corresponde ao deslocamento das esferas da esquerda para a direita após o impulso. Portanto, a deformação devido ao impulso, dada por  $D = \Delta L / L$ , será  $D = \mu/v$ .

Lembrando que o impulso das esferas (contidas ao longo da distância  $L = v\Delta t$ ) é igual à variação de sua quantidade de movimento, pode-se escrever:

$$F \Delta t = v \Delta t \rho_L \mu$$

ou

$$F = \rho_L v \mu'$$

onde  $\rho_L$  é a densidade linear da fila de esferas.

No caso real de uma barra longa com seção reta de área  $A$ , a tensão em sua extremidade, dada por  $S = F/A$ , devido ao impulso, é:

$$S = \frac{\rho_L v \mu}{A}$$

ou

$$S = \rho v \mu$$

onde  $\rho$  é a densidade do material, dada por  $\rho = \rho_L / A$ .

Utilizando-se o módulo de Young  $Y = S/D$ , a velocidade com que uma informação é transmitida na barra é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

Para um gás ideal submetido a processos adiabáticos (como é o caso da propagação do som nesse meio), utilizando a expressão  $Y = \gamma P$ , obtém-se

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

onde  $\gamma$  é a constante adiabática dada por  $C_p/C_v$ ,  $R$  é a constante universal dos gases ideais ( $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$ ),  $T$  é a temperatura absoluta do gás e  $M$  é a sua massa molecular.

Considerando o ar como um gás ideal com  $\gamma = 1,40$ ;  $M = 29,0 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol}$  e  $T = 296 \text{ K}$  obtém-se uma velocidade do som no ar igual a  $v = 345 \text{ m/s}$ . E, para  $T = 298 \text{ K}$  ( $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) obtém-se  $v = 344,59 \text{ m/s}$ .

## 4- Ondas Estacionárias e Ressonância:

### 4.1- Introdução:

A fonte de qualquer som é um “objeto” vibrando. Praticamente qualquer “objeto” pode vibrar e, assim, pode ser uma fonte de som. Em um tubo de PVC, o ar é posto em vibração ao se bater na extremidade aberta do tubo com a mão espalmada. Uma vez perturbado, o ar dentro do tubo vibra com uma certa variedade de frequências, mas só aquelas frequências compatíveis com um sistema de ondas estacionárias persistem.

Uma onda estacionária ocorre quando uma onda contínua percorre um dado meio (uma corda tensa, por exemplo), reflete-se em algum obstáculo, volta atrás e interfere com a onda original. É uma superposição de ondas de mesma frequência e mesma amplitude que se propagam no mesmo meio numa dada direção e sentidos opostos. Essa superposição especial recebe o nome de ondas estacionárias pelo fato de dar a impressão de que não há nada se propagando, ou seja, não se nota a onda progressiva ou a retrógrada.

As ondas estacionárias são caracterizadas por posições fixas de deslocamento zero chamada de nodos e as posições de deslocamento máximos chamadas de antinodos ou ventres. As regiões onde ocorrem interferência destrutiva são os nodos e aquelas onde ocorrem interferência construtiva são os antinodos sendo que os nodos e antinodos ocupam posições fixas num sistema de ondas estacionárias.

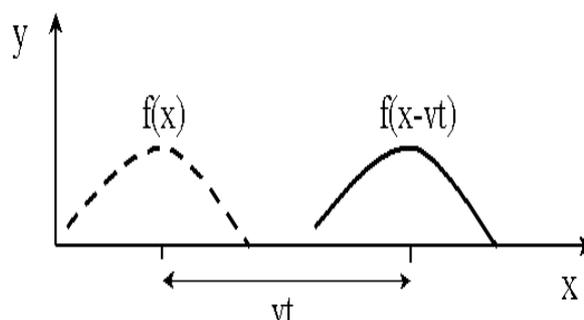
Embora uma onda estacionária seja o resultado da interferência de duas ondas que percorrem em sentidos opostos, também é um exemplo de um objeto vibrando em ressonância. Uma placa ou uma membrana que vibra de forma estacionária apresentará padrões de nós e ventres.

Quando, num sistema físico qualquer, são injetados impulsos de energia periodicamente com uma frequência igual a uma de suas frequências preferenciais de vibração, o sistema passa a vibrar com amplitude progressivamente crescente, que tende ao maior valor possível. Neste caso, dizemos que o sistema em questão entrou em ressonância.

### 4.2- Tratamento Matemático de Movimento Ondulatório:

Um pulso de onda é uma perturbação que se propaga através de um meio [1, 4]. Assim, suponha que no tempo  $t = 0$  o pulso seja descrito por uma função no espaço na forma  $y = f(x)$ .

Se o pulso se propaga para a direita, sem se deformar, com velocidade constante  $v$ , então após um tempo  $t$  a função que descreve o pulso será dada por  $y = f(x - vt)$ .



**Figura 2:** Pulso de onda, com velocidade  $v$ , representado no tempo  $t = 0$  e num tempo arbitrário  $t$ .

Assim, para sabermos se um pulso unidimensional se propaga como uma onda, basta determinarmos se a forma desse pulso depende no espaço e no tempo da forma

$$y(x,t) = f(x - vt) \quad (\text{pulso de onda movimentando-se para a direita}) \quad (1)$$

Se o pulso viajar para a esquerda, a velocidade muda de  $v$  para  $-v$ , e a forma do pulso de onda muda para

$$y(x,t) = f(x + vt) \quad (\text{pulso de onda movimentando-se para a esquerda}) \quad (2)$$

Uma onda periódica é uma perturbação periódica que se move através de um meio. O meio em si não vai a canto nenhum. Os átomos individuais e as moléculas oscilam em torno das suas posições de equilíbrio, mas a posição média delas não se alteram. À medida que elas interagem com os vizinhos, elas transferem parte da sua energia para elas. Por sua vez, os átomos vizinhos transferem energia aos próximos vizinhos, em seqüência. Desta maneira, a energia é transportada através do meio, sem haver transporte de qualquer matéria.

Uma forma comum para as ondas periódicas é uma função *seno* ou *coseno*, também conhecidas como ondas harmônicas:

$$y(x,t) = y_m \text{sen}[k(x + vt)] = y_m \text{sen}[kx + kv t]$$

onde  $y_m$  e  $k$  são constantes.  $y_m$  é a amplitude da onda, ou seja, o valor máximo que a "perturbação" pode ter. Esta "perturbação" pode ser, por exemplo, o deslocamento vertical de uma onda se propagando em uma corda, ou seja, dos átomos e moléculas que compõe a corda a partir da posição de equilíbrio. O valor de  $k$  está relacionado com o comprimento de onda.

Agora, vamos verificar a forma da onda em um dado instante. Para  $t = 0$  temos que  $y = y_m \text{sen}(kx) = y_m \text{sen}(kx + k\lambda) = y_m \text{sen}(kx + 2\pi)$ , onde usamos que a onda se repete depois de um comprimento  $\lambda$  (comprimento de onda), e que a função *seno* se repete depois de uma variação de  $2\pi$ . Logo, temos que

$$k = 2\pi/\lambda$$

O produto  $kv$  também possui uma relação com o período, ou frequência, da onda. Definindo  $\omega = kv$ , temos que, para  $x = 0$ ,  $y = -y_m \text{sen}(\omega t) = -y_m \text{sen}(\omega t + \omega T) = y_m \text{sen}(\omega t + 2\pi)$ , onde usamos que a oscilação em um dado ponto se repete a cada período  $T$ . Logo, temos que

$$\omega = 2\pi/T \quad (3)$$

Combinado estas relações, temos que a velocidade da onda,  $v$ , pode ser por

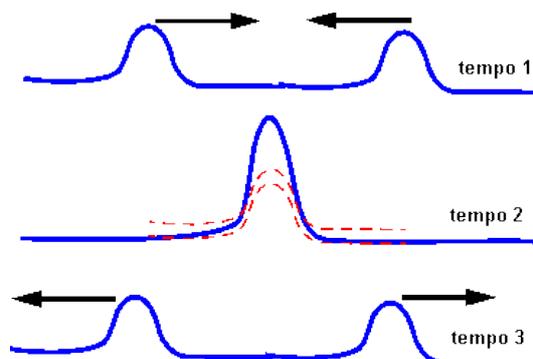
$$v = \omega / k = \lambda / T = \lambda f$$

sendo que esta relação é válida para qualquer onda periódica.

Duas ou mais ondas viajam no mesmo meio independentemente e podem passar através da outra. Este é o chamado princípio da superposição que, matematicamente, é expresso por

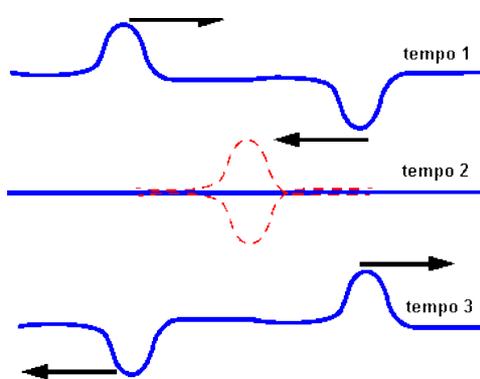
$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$

Em regiões que elas podem se superpor somente uma única perturbação observa-se uma interferência. Se duas ondas com amplitudes iguais se somam em fase, isto é, se os máximos se encontram, então observa-se uma onda com amplitude igual à soma das amplitudes das ondas originais e, assim, teremos uma interferência construtiva.



**Figura 3:** Processo de interferência construtiva de dois pulsos de onda.

Se as duas ondas superpostas estiverem, no entanto, totalmente fora de fase, isto é, se os máximos se encontram com os mínimos, as duas ondas tendem a se cancelar e, assim, teremos uma interferência destrutiva.



**Figura 4:** Processo de interferência destrutiva de dois pulsos de onda.

Para ondas harmônicas de mesma amplitude o princípio da superposição fica na forma

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) = y_m [\text{sen}(kx - \omega t + \phi) + \text{sen}(kx - \omega t)]$$

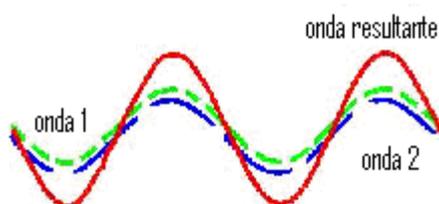
Usando a relação

$$\text{sen } \alpha + \text{sen } \beta = 2 \text{sen } [(\alpha + \beta)/2] \cos [(\alpha - \beta)/2] \quad (4)$$

temos que

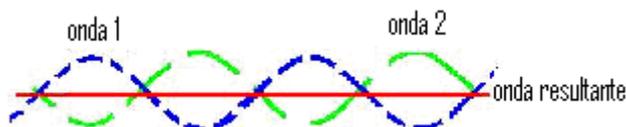
$$y(x,t) = [2y_m \cos(\phi/2)] \text{sen}(kx - \omega t + \phi/2)$$

Logo, se a fase  $\phi = 0$ , a interferência é construtiva



**Figura 5:** Interferência construtiva de duas ondas

enquanto que se a fase  $\phi = \pi$ , a interferência é destrutiva



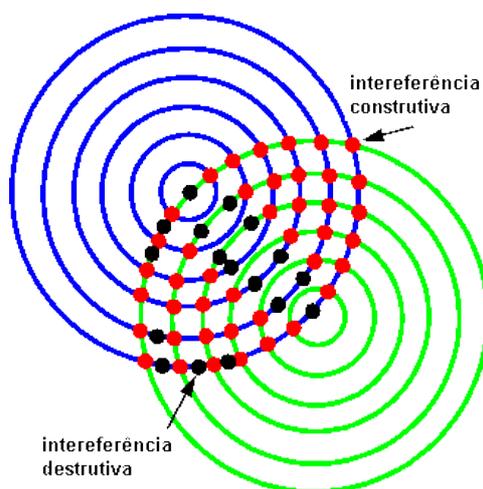
**Figura 6:** Interferência destrutiva de duas ondas

Caso as amplitudes sejam diferentes a interferência é parcial.



**Figura 7:** Interferência parcial de duas ondas

Toda a discussão acima pode ser estendida para dimensões maiores. Um caso clássico é a interferência de duas ondas circulares em um tanque de água. Neste caso o padrão de interferência resulta da superposição dos máximos e mínimos da onda em determinados pontos, como mostra a figura abaixo.



**Figura 8:** Interferência de duas ondas circulares

Se superpomos ondas iguais, mas com velocidades opostas, obtemos ondas estacionárias. Isto pode ser observado usando a equação (4). Neste caso temos

$$y(x,t) = y_m \sin(kx + \omega t) + y_m \sin(kx - \omega t) = [2y_m \sin(kx)] \cos(\omega t)$$

Observa-se que esta relação não é da forma (1) ou (2), e que, portanto, não descreve uma onda que se propaga. Em cada ponto  $x$ , há uma vibração determinada pela frequência angular (3). Os pontos em que  $\sin(kx)$  se anulam são chamados de nós. Estes pontos são obtidos quando  $kx = n\pi$ , onde  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Logo, obtemos que eles acontecem para

$$x = n \frac{\lambda}{2} \quad (\text{nós}) \quad (5)$$

enquanto que os anti-nós acontecem nas regiões intermediárias aos nós (nos máximos dos  $\sin(kx)$ ), ou seja, para

$$x = (n + 1/2) \frac{\lambda}{2} \quad (\text{anti-nós})$$

Para cordas presas em dois pontos fixos (como as cordas de um violão), podemos induzir ondas estacionárias (vibrações) onde os pontos fixos serão necessariamente nós. Logo, temos que, se a corda possui comprimento  $L$ , então os comprimentos de ondas possíveis são obtidos da relação (5), substituindo  $x$  por  $L$ :

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (\text{comprimentos de ondas dos harmônicos})$$

onde  $n = 1, 2, 3, \dots$  (note que o valor  $n = 0$  não é físico sendo que, nesse caso, seria uma onda com comprimento de onda infinito, ou seja, onda nenhuma). Estes são conhecidos como os comprimentos de ondas dos harmônicos da corda.

As vibrações da corda são transmitidas para as moléculas de ar e, devido à propagação da perturbação, chegam aos nossos ouvidos na forma de som. A frequência desses sons pode ser obtida da relação acima, resultando em

$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{2L} \quad (\text{frequências dos harmônicos})$$

#### 4.3- Tubos com uma extremidade aberta e a outra fechada:

Um tubo com uma extremidade aberta e a outra fechada é um tubo com ar que têm uma extremidade fechada, por exemplo, por uma superfície líquida, onde as ondas são refletidas, e uma outra extremidade aberta.

Se o comprimento do tubo for devidamente igualado com o comprimento da onda (ou, de modo equivalente, à frequência) da onda sonora, um padrão acentuado das ondas sonoras pode ser produzido.

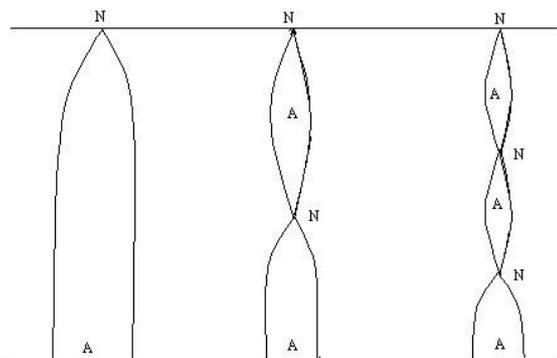
Um tubo com uma das extremidades fechada, como a extremidade fixa de uma corda, é um nodo de deslocamento, no qual a amplitude de deslocamento de um elemento oscilante de ar é zero. Na extremidade aberta do tubo, no entanto, encontramos um antinodo de deslocamento, no qual a amplitude de deslocamento dos elementos de ar oscilantes têm um valor máximo.

Como a extremidade fechada é um obstáculo fixo, o ar, nesta extremidade, não tem liberdade para se movimentar e junto a ela sempre teremos um nó de vibração. E, no extremo livre o ar tem liberdade de movimento, formando, em tal extremidade, um ventre de vibração.

A Figura 9 ilustra algumas ondas sonoras em um tubo com uma extremidade fechada e a outra aberta. Os comprimentos de onda devem ser tais que um número inteiro de meio comprimento de onda se ajustará no comprimento  $L$  do tubo, isto é, devemos ter [1, 4]

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

onde  $n$  é um número inteiro positivo chamado número harmônico e  $\lambda$  é o comprimento da onda sonora.



**Figura 9:** Ondas estacionárias num tubo com a extremidade inferior aberta e a outra fechada. Os nodos de deslocamento (N) e os antinodos (A) são indicados sendo que as figuras à esquerda, no centro e à direita representam, respectivamente, ondas com número harmônico  $n=1$ ,  $n=3$  e  $n=5$ .

Para um tubo com uma extremidade aberta e a outra fechada, as frequências permitidas são dadas por:

$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{4L} \quad (6)$$

onde  $n=1, 3, 5, \dots$ .

A frequência mais baixa que pode ser excitada, correspondente a  $n=1$ , é chamada de fundamental ou de primeiro harmônico, e as frequências remanescentes sendo designadas de segundo, terceiro, ... harmônicos sendo que, num tubo com uma extremidade aberta e a outra fechada, somente os harmônicos ímpares são excitados.

A expressão (6) pode, também, ser escrita como

$$f = (2n - 1) \frac{v}{4L}$$

onde  $n=1, 2, 3, \dots$  e  $f$  é a frequência da onda sonora.

Assim, o comprimento  $L$  da coluna de ar relativo à ressonância é dada por

$$L_{2n-1} = (2n - 1) \frac{\lambda}{4}$$

para  $n=1, 2, 3, \dots$  onde  $\lambda$  é o comprimento da onda sonora.

Então, a diferença no comprimento do tubo para duas ressonâncias consecutivas é dada por [3]

$$\Delta L = \frac{v}{2f} \quad (7)$$

onde  $f$  é a frequência.

A expressão (7) fornece  $v = 2\Delta L f$  onde  $\Delta L$  é a diferença entre os comprimentos da coluna de ar para duas ressonâncias consecutivas (nesse experimento, corresponderá à diferença entre duas distâncias  $L$  consecutivas).

## 5- Montagem Experimental:

### 5.1- Objetivo:

O objetivo do experimento proposto é aliar uma das formas clássicas de determinação da velocidade do som no ar, que é a detecção de ressonâncias em um tubo, com um programa de computador que dispensa a utilização de um conjunto de diapasões e, também, de conhecimentos de eletrônica.

Este experimento permite o ensino de conceitos como o que é o som, como o som se propaga através do meio, frequência, ressonância, velocidade de propagação do som num dado meio e, também, conceitos como condições experimentais para a realização de um experimento, medições, erro, ajuste de curvas. Além disso, este experimento é de fácil implementação permitindo, assim, a sua reprodução para estudantes do ensino médio e para universitários.

### 5.2- Material:

Para a realização do experimento proposto será necessário os seguintes materiais:

- Régua milimetrada;
- Programa gerador de frequências (VSOM);
- Microcomputador;
- 60 cm de cano PVC de 32 mm;
- Balde de água com altura mínima de 50 cm.

### 5.3- Procedimento Experimental:

A montagem experimental [3] é mostrada na Figura 10 e consiste em um balde, cuja altura mínima é de 50 cm, com água, no qual é introduzido um cano de PVC de 60 cm de comprimento e 32 mm de largura. Dessa forma, o comprimento da coluna de ar pode ser variado de forma simples, o que possibilita detectar facilmente pontos de ressonância através da audição colocando-se o ouvido na extremidade superior do cano de PVC. A distância  $L$ , mostrada na Figura 10, é medida através de uma régua milimetrada.

Essa proposta experimental elimina vários inconvenientes da montagem clássica que envolve tubos, mangueira flexível e reservatório de água, conectados conforme a Figura 1.

Para substituir o conjunto de diapasões ou o equipamento eletrônico gerador de áudio, será utilizado um programa livre de computador que geração de áudio nas frequências 1200, 1600, 2000, 2400, 2800, 3200, 3600 e 4000 Hz. Este programa de computador denomina-se “VSOM” e pode ser obtido em “<http://us.share.geocities.com/pextensao/Vsom.zip>”.

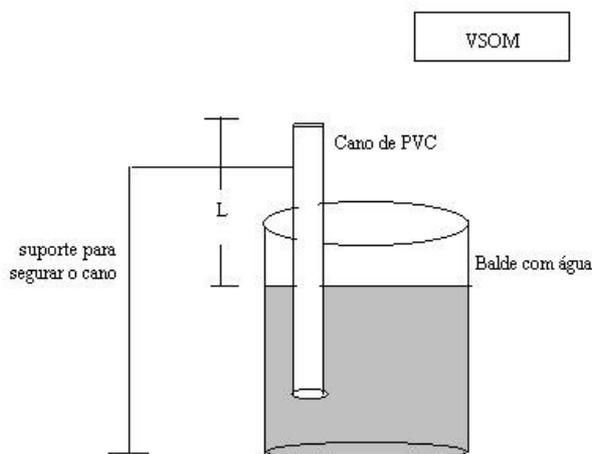
Para cada frequência disponível no programa gerador de áudio, executa-se o programa e segue-se o seguinte procedimento:

1. Introduza, lentamente, uma das suas extremidades do cano no balde cheio de água para que o comprimento da coluna de ar no cano diminua. Ao mesmo tempo, coloque o ouvido próximo do cano à outra extremidade para que a ressonância seja percebida. Quando a ressonância for atingida, através da reflexão das ondas na superfície da água no interior do tubo, tem-se a impressão de que essas ondas estão sendo emitidas de dentro do tubo sendo que isso acontece por causa do reforço na energia da onda sonora;

2. Através da percepção sonora, faça um ajuste fino na posição vertical do tubo e meça a distância  $L_1$  da extremidade superior do tubo até a lâmina d'água. Este procedimento será repetido, diminuindo a coluna de ar até a obtenção da próxima ressonância;
3. Quando a segunda ressonância for atingida, mede-se a distância  $L_2$  da extremidade superior do tubo até a lâmina d'água;
4. Repete-se o procedimento anterior até a obtenção da terceira ressonância consecutiva para que seja obtida a distância  $L_5$  da extremidade superior do tubo até a lâmina d'água.

Através das distâncias  $L_1$ ,  $L_3$  e  $L_5$  obtém-se as diferenças  $\Delta L_1 = L_3 - L_1$  e  $\Delta L_2 = L_5 - L_3$ . Obtendo-se a diferença,  $\Delta L$  entre duas distâncias  $L$  consecutivas, para cada frequência  $f$ , pode-se construir o gráfico  $\Delta L$  versus  $f$  obtendo-se uma hipérbole.

Linearizando-se a hipérbole através da transformação logarítmica, isto é,  $\text{Ln}(\Delta L) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(1/f)$ , obtém-se o coeficiente linear  $\beta_0 = \text{Ln}(v/2)$  (equação (7)) por meio de um ajuste de uma reta aos pontos experimentais. Obtido  $\beta_0$  temos  $v = 2e^{\beta_0}$  e, assim, determina-se a velocidade do som no ar.



**Figura 10:** Montagem experimental proposta.

A seguir mostramos fotos tiradas da montagem experimental.



**Figura 11:** Arranjo experimental visto de cima.



**Figura 12:** Arranjo experimental visto de perfil.

## 6- Resultados Experimentais:

Para cada frequência foi obtida a distância da lâmina d'água até a extremidade do cano situada fora da água referente à três ressonâncias consecutivas. A Tabela 1 mostra os dados coletados no experimento e a Tabela 2 mostra os dados coletados na repetição do experimento observando que foi associado um erro de 0,2 nas medições.

**Tabela 1:** Dados coletados na 1ª medição

<i>Frequência <math>f</math> (Hz)</i>	<b>1200</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2400</b>	<b>2800</b>	<b>3200</b>	<b>3600</b>	<b>4000</b>
<i>Distância <math>L</math> (cm)</i>								
$L_1$	47,6	56,6	52,3	50,5	50,1	53,3	47,7	46,0
$L_3$	33,7	45,8	44,4	43,5	43,8	48,3	42,9	41,7
$L_5$	19,5	34,9	36,6	36,2	37,7	43,0	37,8	37,9

**Tabela 2:** Dados coletados na 2ª medição

<i>Frequência <math>f</math> (Hz)</i>	<b>1200</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2400</b>	<b>2800</b>	<b>3200</b>	<b>3600</b>	<b>4000</b>
<i>Distância <math>L</math> (cm)</i>								
$L_1$	47,8	56,8	52,4	50,6	50,0	53,4	47,9	46,1
$L_3$	33,5	45,7	44,5	43,6	43,9	48,1	42,8	41,8
$L_5$	19,7	34,9	36,4	36,3	37,6	42,9	38,2	37,8

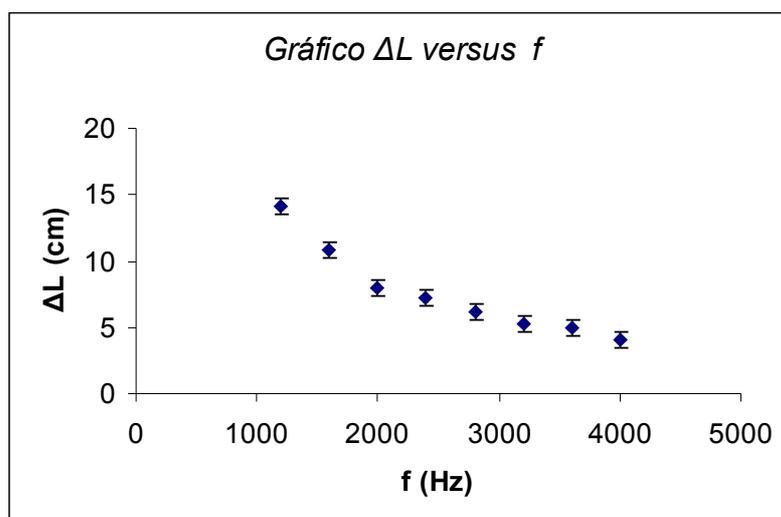
Através das medições mostradas nas Tabelas 1 e 2 obteve-se a distância  $\Delta L$  entre ressonâncias consecutivas como mostra a Tabela 3. Além disso, obteve-se a média das distâncias  $\Delta L$  entre ressonâncias consecutivas para cada frequência

**Tabela 3:** Distância  $\Delta L$  entre ressonâncias consecutivas para cada frequência  $f$

<i>Frequência <math>f</math> (Hz)</i>	<i>1200</i>	<i>1600</i>	<i>2000</i>	<i>2400</i>	<i>2800</i>	<i>3200</i>	<i>3600</i>	<i>4000</i>
<i>Distância <math>\Delta L</math> (cm)</i>								
$\Delta L_1$	13,9	10,8	7,9	7,0	6,3	5,0	4,8	4,3
$\Delta L_2$	14,3	10,9	7,8	7,3	6,1	5,3	5,1	3,8
$\Delta L_3$	14,3	11,1	7,9	7,0	6,0	5,3	5,1	4,3
$\Delta L_4$	13,8	10,8	8,1	7,3	6,0	5,2	4,6	4,0
Média dos $\Delta L_i, i = 1,2,3,4$	14,1	10,9	7,9	7,1	6,1	5,2	4,9	4,1

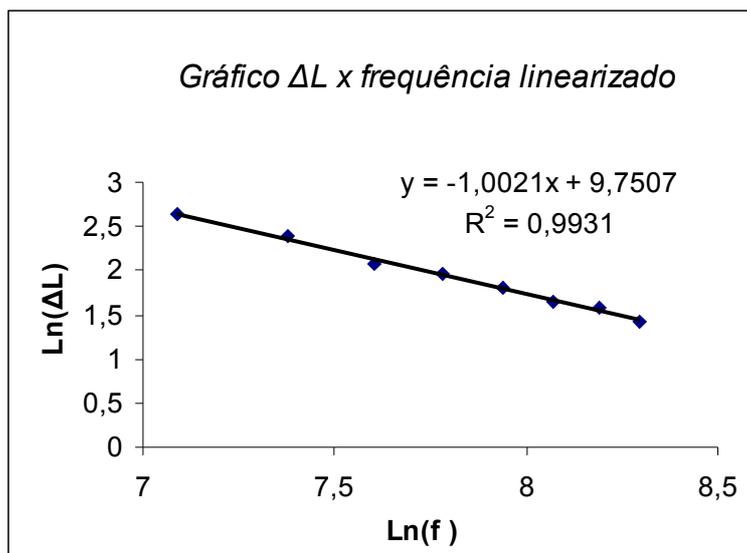
Como cada medição possui um erro de 0,2, tem-se que as diferenças  $\Delta L_i, i=1, 2, 3, 4$ , possuem um erro de 0,3 e um erro de 0,6 está associado à média dos  $\Delta L_i$ .

O gráfico seguinte mostra o comportamento hiperbólico da média das distâncias  $\Delta L$  de uma dada frequência  $f$  versus a frequência  $f$ . Tal comportamento era previsto pela equação (7).



**Figura 13:** Gráfico da média das distâncias  $\Delta L$  versus a frequência  $f$  correspondente

A equação (7) é linearizada pela aplicação do logaritmo em ambos os lados. Então, aplicando-se o logaritmo aos dados (da média das distâncias  $\Delta L$  e frequência  $f$ ) obtém-se os pontos mostrados no gráfico seguinte assim como a reta que se ajusta aos dados.



**Figura 14:** Gráfico dos pontos linearizados através do logaritmo e da reta ajustada à tais pontos

Pela Figura 14, observa-se que a reta ajustou-se bem aos pontos ( $R^2 = 0,9931$ ). Pelo coeficiente  $\beta_0 = 9,7507$  obtém-se  $v = 2e^{\beta_0}$  dado em cm/s. A velocidade, dada em m/s, é  $343,32 \pm 1,06$ , ou seja, o valor da velocidade, dada em m/s, está contido no intervalo  $[342,26 ; 344,38]$ .

## 7- Conclusão:

Supondo que o valor teórico previsto seja o valor correto para a velocidade do som no ar à  $23\text{ }^\circ\text{C}$  ( $v = 344,59\text{ m/s}$ ), o resultado experimental obtido contém um erro relativo de  $0,36\%$  e um erro absoluto de  $1,27$  sendo que esta temperatura foi aquela considerada no ambiente o qual o experimento foi realizado. Assim, pode-se concluir que tal resultado é satisfatório, levando-se em conta os objetivos educacionais da proposta apresentada que é disponibilizar uma forma prática e simples para a determinação da velocidade do som no ar. Além disso, vale ressaltar que o roteiro experimental proposto possibilita uma revisão ampla sobre propagação de ondas em meios mecânicos e a comprovação da teoria.

Comentários feitos pelo Coordenador:

O projeto foi aprovado e a nota do relatório parcial foi  $3,0$  pois este não mostrou atividade experimental alguma. Além disso, na apresentação do experimento, o coordenador comentou ter ouvido o som de eco do som ambiente no tubo e, também, salientou que o som ressonante do tubo assemelhou-se com o "som de mar" ou "som de caracola" (sensação sonora proporcionada pelas conchas) podendo definir a posição da ressonância pela igualdade da frequência (altura) do som.

## 8- Bibliografia:

- [1] Halliday, D., Resnick, R., Fundamentos de Física 2 (1977). Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (LTC);
- [2] <http://us.share.geocities.com/pextensao/Vsom.zip>;
- [3] Silva, W. P., Cleide M. D. P. S., Fereira, T. V., Rocha, J. S., Silva, D. D. P. S., Silva, C.D. P. S., Velocidade do Som no Ar: Um Experimento Caseiro com Microcomputador e Balde d' Água (2003). Revista Brasileira de Ensino de Física, Volume 25, Número 1;
- [4] Tipler, P. A., Física (1995), 3ª Edição Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.