F809 - Instrmentação para Ensino

TUBO DE QUINCKE

Relatório Final

Tiago Amancio da Silva RA:025296

Novembro de 2006

Orientador: Leandro Tessler

Cooerdenador: Jose Joaquin Lunazzi

IFGW - UNICAMP

1 Montagem

Para a montagem do tubo de Quincke, foram utilizados tubos de PVC de 1/2 polegada, conectores também de PVC, chamados de "joelho de 90°"e "T", além de uma mangueira de PVC de 3/8 de polegada (flexível). A montagem está representada na figura 1 [1].

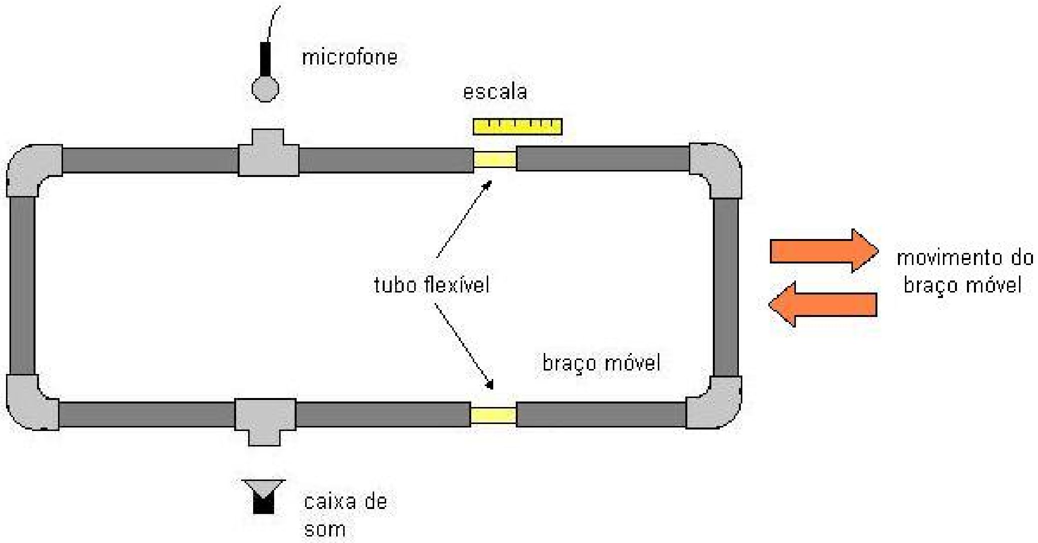


Figura 1: Representação do tubo de Quincke utilizado [1].

Os tubos representados na vertical têm aproximadamente 20cm de comprimento. Para os tubos na horizontal, foram utilizados dois tubos de 40cm, divididos em três partes iguais. Entre a primeira e a segunda parte foram colocados os conectores "T"e, entre a segunda e a terceira, foi fixado o tubo flexível, com aproximadamente 6cm de comprimento.

O comprimento do tubo flexível é importante, pois é esse comprimento que vai ser acrescido ao comprimento do tubo e deve ser, portanto, pouco maior que o comprimento de onda λ do som a ser utilizado. Para uma freqüência disponível de aproximadamente $f = 5kHz$, por exemplo, e estimando a velocidade dom som em $v_{som} = 340m/s$, a fórmula da velocidade da onda sonora nos dá:

$$v_{som} = \lambda.f \Rightarrow \lambda = \frac{v_{som}}{f} = \frac{340}{5000} \approx 7cm$$

Como são utilizados dois tubos flexíveis de $6cm$, temos $12cm$, que é satisfatoriamente maior que o comprimento de onda de $7cm$.

Os comprimentos dos tubos rígidos não tem grande influência no resultado do experimento, já que a medida de interesse é o deslocamento do tubo.

O motivo de se usar tubos flexíveis de 3/8 de polegada é que eles se ajustam no interior dos tubos rígidos, permitindo um deslizamento mais suave.

Com o auto-falante posicionado na boca de um dos conectores em "T"(a entrada) e o microfone no outro (a saída), mede-se a intensidade da onda sonora para diferentes deslocamentos do braço móvel.

Um fato de extrema importância é que durante todo o experimento, nem o microfone, nem o auto-falante podem se mexer. Como a grandeza medida no experimento é a intensidade sonora, uma variação da posição destes ou do tubo em relação a eles faz com que mude a intensidade medida (nesse caso, para ser consistente, o experimento deveria ser todo refeito).

Durante a variação do comprimento do tubo, que é manual, é muito fácil mover os componentes acidentalmente. Para evitar isso, o auto-falante foi retirado da caixa de som e fixado (com fita adesiva) na entrada do tubo. O microfone foi retirado do suporte e também fixado diretamente à saída do tubo. Essa fixação foi feita com algodão, que também ajuda a isolar o microfone dos ruídos externos.

Uma outra medida que se pode tomar para facilitar a execução do experimento é prender à parte fixa do tubo uma escala (que pode ser feita de um papel suficientemente rijo), para que não se tenha necessiade de medir o deslocamento do braço móvel ao mesmo tempo que se segura uma régua.

Tanto a geração da onda quanto a sua medição são realizadas através do programa *Visual Analyser 8* [3]. A figura 2 mostra a interface do programa. A tela superior é um osciloscópio, que mostra a amplitude da onda em função do tempo. A tela inferior mostra o espectro da onda, ou seja, mostra que freqüências estão presentes e em que intensidades (lembrando que as ondas "reais"são uma combinação de várias ondas de freqüência bem definida).

Através da função *Capture spectrum*, mostrada na figura 2 no círculo em vermelho, é possível se obter o espectro em um dado instante de tempo para análise. É desta forma que serão medidas as intensidades das ondas. Um exemplo de espectro é mostrado na figura 3.

Outras funções bastante usadas do programa são *Wave* e *Freq.meter*, que nos permite determinar a freqüência do som emitido e medi-la, respectivamente. É valido ressaltar que a freqüência "nominal", determinada em *Wave*, pode não ser exatamente a freqüência emitida. Daí a necessiadade de se medi-la com o *Freq.meter*, para se ter mais precisão. A interface desses comandos é mostrada nas figuars 4 e 5. Note que é possível determinar a resolução da medição do *Freq.meter*.

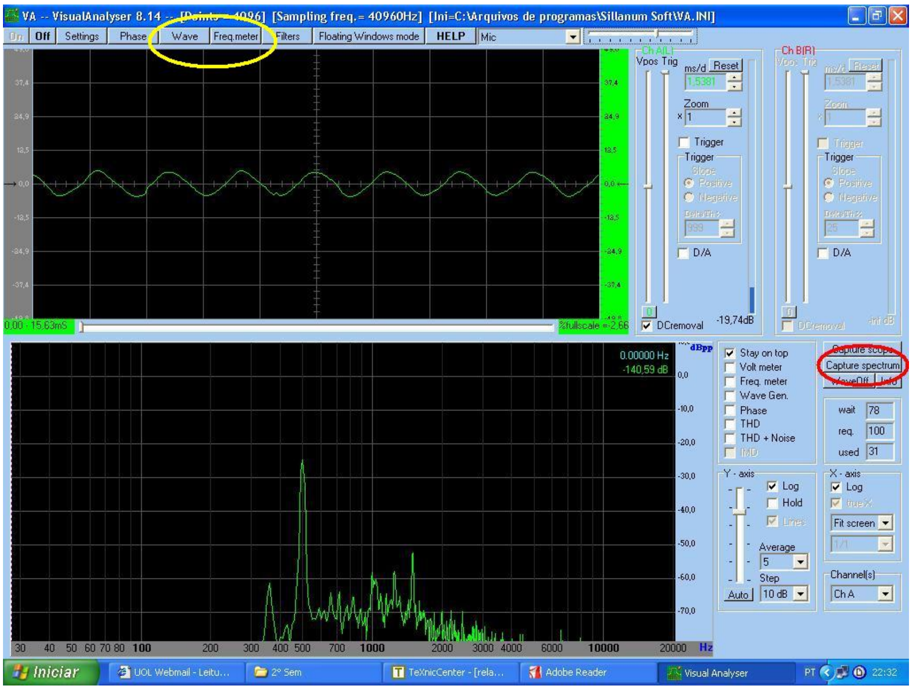


Figura 2: Interface do programa *Visual Analyser 8*.

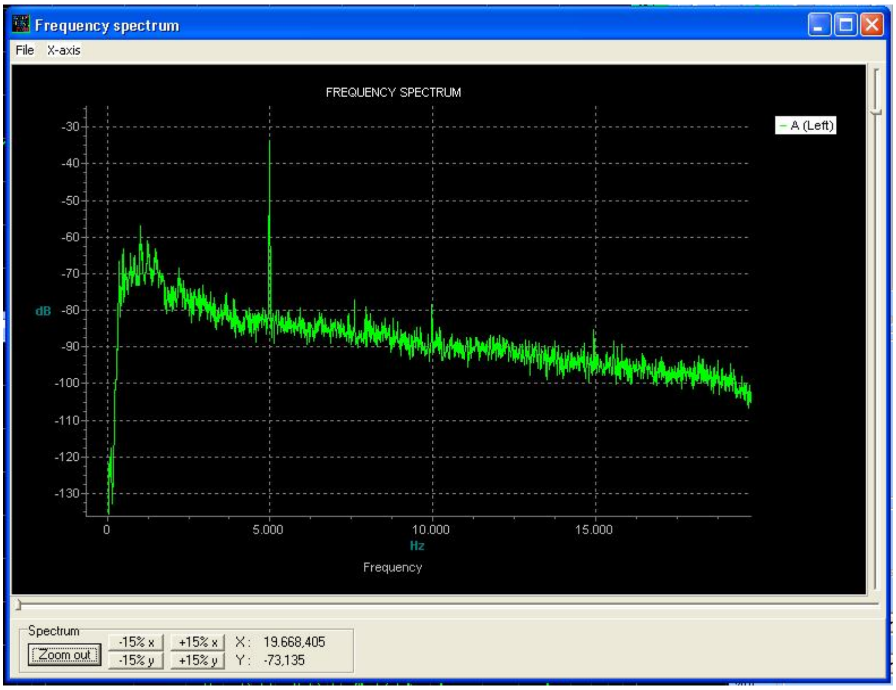


Figura 3: Espectro de uma onda senoidal de freqüência $f = 4,980kHz$.

2 Teoria

O som é uma onda mecânica, o que quer dizer que se propaga através das vibrações no ar, ou qualquer outro meio material. Uma onda é caracterizada (veja figura 6) por

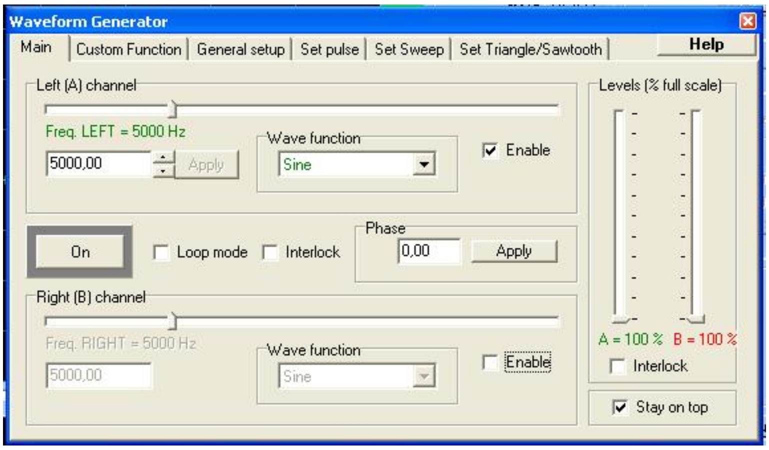


Figura 4: Determinação da freqüência da onda a ser emitida.

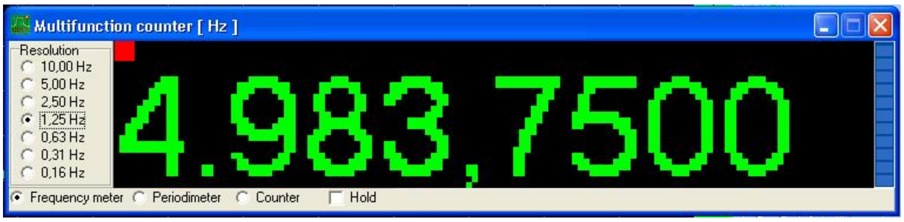


Figura 5: Medição da freqüência da onda emitida.

sua amplitude A (o máximo deslocamento que ela atinge) e por seu comprimento de onda λ (que é a distância entre valores repetidos no padrão da onda, esse comprimento é equivalente a uma oscilação completa da onda) [2].

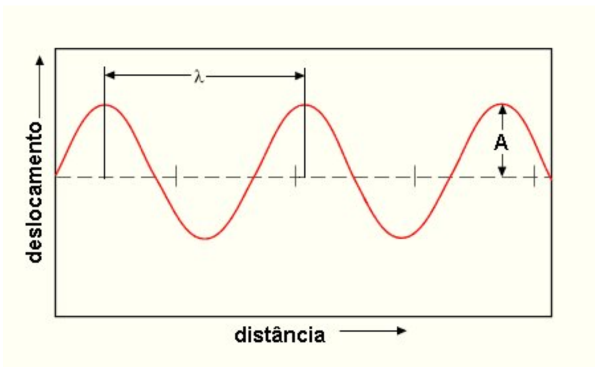


Figura 6: Onda de amplitude A e comprimento de onda λ em um instante de tempo fixo [5].

Além de apresentar oscilações no espaço em um mesmo instante de tempo, a onda também oscila com o tempo, como mostrado na figura 7, em um ponto fixo. O período T de uma onda é o tempo que a onda leva para completar uma oscilação. A freqüência

f é o número de oscilações por unidade de tempo e está relacionado com o período através de [2]:

$$f = \frac{1}{T} \tag{1}$$

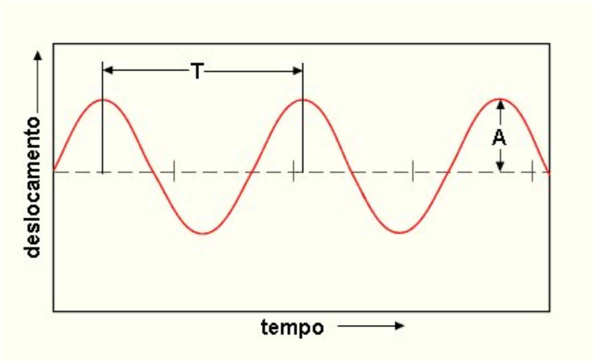
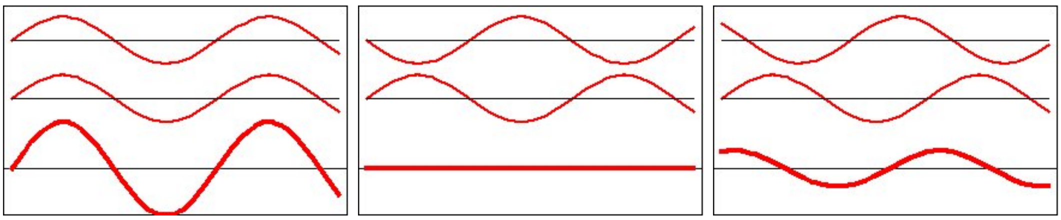


Figura 7: Onda de amplitude A e período T em um ponto fixo do espaço [5].

As ondas também podem diferir por mais um parâmetro: o ângulo de fase ϕ. Quando a diferença de fase entre duas ondas é zero, $\Delta\phi = 0$, dizemos que as ondas estão "em fase"e seus picos coincidem. Conforme essa diferença aumenta, uma onda vai se atrasando cada vez mais em relação à outra. Quando $\Delta\phi = \pi$, as ondas estão completamente defasadas: o pico de uma coincide com o vale de outra. Quando $\Delta\phi = 2\pi$, uma onda se atrasa exatamente um comprimento de onda λ em relação à outra e acontece que os picos voltam a coincidir, as ondas estão "em fase"novamente. A figura 8 mostra um exemplo de ondas totalmente "em fase"(a), totalmente defasadas (b), e uma situação intermediária (c) [2].



(a) (b) (c)

Figura 8: Duas ondas de mesma amplitude e comprimento de onda sofrendo interferência e a onda resultante (em linha mais grossa). A defasagem entre as ondas originais é $\Delta\phi = 0$ (a), $\Delta\phi = \pi$ (b) e $\Delta\phi = 3\pi/4$ (c)

As ondas se propagam no meio com uma certa velocidade. De uma forma simplificada, podemos calcular essa velocidade em função dos parâmetros da onda dados acima. Quando uma onda se desloca no espaço uma distância equivalente a um comprimento de onda λ, ela leva um tempo que é o tempo necessário para se completar uma oscilação, ou seja, um período T. Portanto, a velocidade da onda é dada por:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$$
$$v = \lambda.f \tag{2}$$

onde na última equação foi usada a eq. 1.

O fenômeno ondulatório do som que o tubo de Quincke explora é a interferência. A interferência ocorre quando duas ondas passam por uma mesma região do espaço. Nesse caso, as ondas vão se combinar, segundo o *Princípio da Superposição*: o deslocamento da onda resultante será a soma dos deslocamentos das ondas originais, naquele ponto. O fenômeno da interferência pode tanto aumentar quanto diminuir de amplitude em relação às ondas originais. Para interferência de ondas de mesma freqüência, se propagando em um mesmo eixo, como teremos neste experimento, a amplitude da onda resultante dependerá da diferença de fase entre as duas ondas (veja figura 8) [2].

Se a diferença de fase entre as duas ondas for zero (ondas "em fase"), teremos *interferência construtiva* (figura 8 (a)). Se a diferença de fase for $\Delta\phi = \pi$ (ondas completamente defasadas), teremos *interferência destrutiva* (b). A situação mostrada na figura 8 (c) é uma situação intermediária com $\Delta\phi = 3\pi/4$.

Quando a onda sonora entra no tubo (ver figura 1), se divide em duas, indo cada uma por um caminho. Essas duas ondas se reencontram na saída do tubo, onde interferem entre si. Se o comprimento dos caminhos fossem iguais, as ondas chegariam em fase e a interferência seria totalmente construtiva.

Conforme se varia o comprimento de um dos caminhos, movendo-se o braço móvel do tubo, uma onda vai se defasando em relação à outra. Isso vai modificando a intensidade da onda resultante. Essa intensidade oscilará em função da diferença entre os comprimento do caminho das duas ondas. Após se variar o comprimento em um valor igual a λ, a intensidade resultante terá completado um ciclo.

Sendo L a diferença de comprimento do caminho das duas ondas, a condição para se ter interferência totalmente construtiva é que essa diferença seja um múltiplo do comprimento de onda λ:

$$L = n.\lambda, \qquad n = 0, 1, 2, ...$$

Tendo se medido o comprimento de onda λ do som, também é possível calcular sua velocidade, através da relação:

$$v_{som} = \lambda . f$$

3 Resultados e Análise de Dados

O gráfico 1 mostra a intensidade (média dos valores medidos) da onda sonora em função do deslocamento do tubo. A freqüência usada foi de $f = 4,980kHz$, medida através da função *Freq.meter* do *Visual Analyser 8*.

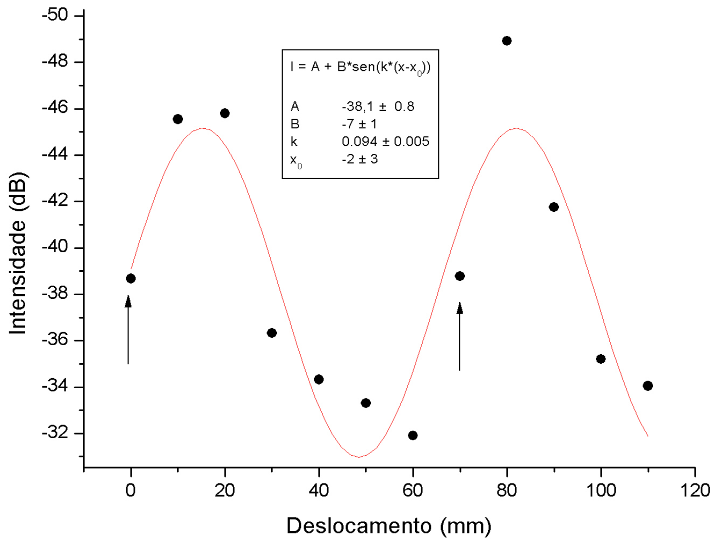


Figura 9: O gráfico mostra o comportamento oscilatório da intensidade do som conforme o tubo é deslocado. As duas setas indicam uma oscilação, de comprimento de onda $\lambda \approx 7cm$.

Embora a curva mostrada no gráfico 1 esteja bem distorcida em relação à curva senoidal esperada, podemos ver que ela apresenta um comportamento oscilatório. Na região mostrada no gráfico, ela completa aproximadamente um ciclo e meio. Sendo assim, podemos estimar o comprimento de onda grosseiramente. Por exemplo, os pontos indicados por uma seta no gráfico 1 compreendem aproximadamente um comprimento de onda. Seu valor será a distância entre esses pontos, ou seja:

$$\lambda \approx 7cm$$

conforme se tinha estimado na preparação do experimento.

Também se pode estimar a velocidade do som, com base nesse valor e no freqüência usada:

$$v_{som} = \lambda.f \approx 0,07m.4980Hz \approx 348m/s$$

Caso haja disponibilidade, podem ser usados na medição de λ programas que fazem o ajuste dos pontos experimentais por uma curva, ou seja, que ajustam os parâmetros da curva de modo a aproximá-la o mais possível dos pontos. Isso foi feito utilizando o *Origin 7.0* (veja gráfico 1)

A equação da curva (forma senoidal generalizada), mostrada na legenda do gráfico 1 é:

$$I = A + B \sin[k(x - x_0)]$$

O valor de interesse aqui é o número de onda k, que foi calculado como $k = 0,094 \pm 0.005mm$ (veja Anexo I). Este valor está relacionado com o comprimento de onda λ através de:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{3}$$

Desta forma, teremos:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{0,094} = 67 \pm 3mm$$

A velocidade do som correspondente a esse valor é:

$$v_{som} = \lambda.f = (6,7.10^{-2}m) \times (4980Hz) = 330 \pm 10m/s$$

O erro $\Delta\lambda$ foi obtido por propagação através da equação 1:

$$\Delta\lambda = \left|\frac{\partial\lambda}{\partial k}\right| \Delta k = \frac{2\pi}{\lambda^2}\Delta k$$

4 Velocidade do som

A velocidade do som no ar varia conforme a temperatura do ar. Para que se possa comparar a velocidade do som medida através deste experimento com os valores encontrados na literarura, colocamos aqui uma tabela que mostra a velocidade do som no ar para diferentes temperaturas [4].

$T(^oC)$	$v_{som}(m/s)$
-10	325,4
-5	328,5
0	331,5
5	334,5
10	337,5
15	340,5
20	343,4
25	346,3
30	349,2

Tabela 1: Velocidade do som no ar para diferentes temperaturas.

Construindo o gráfico 10 com os dados da tabela 1 podemos ver que a velocidade do som no ar varia muito aproximadamente linearmente com a temperatura, ao menos em um intervalo onde se encontram as temperaturas ambiente. Desta forma, podemos fazer uma regressão linear, mostrada no gráfico 10, que gera a seguinte equação:

$$v_{som} = 0,6.T + 331,5 \tag{4}$$

onde a temperatura T deve estar em ^oC e v_{som} é dada em m/s.

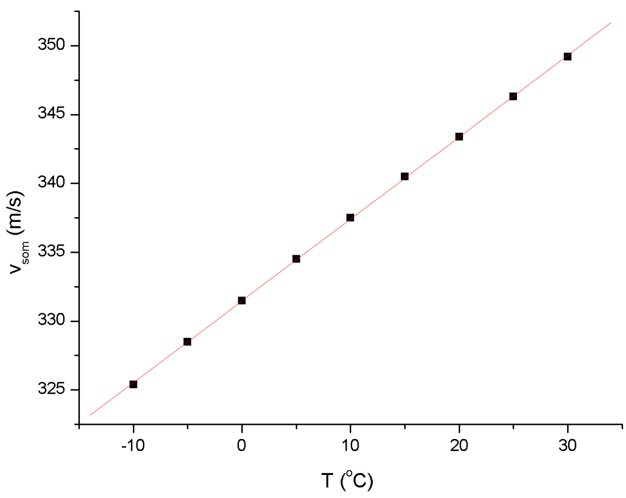


Figura 10: A velocidade do som em função da temperatura. Para temperaturas próximas à temperatura ambiente, a variação de v_{som} com T é perfeitamente linear.

Referências

[1] http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/quincke/quincke.htm
Site sobre o tubo de Quincke e como medir a velocidade do som a partir dele. Contém animações sobre interferência de pulsos e do tubo de Quincke em funcionamento. (Em espanhol). Apêndice III.

[2] Halliday, D. ; Resnick, R. *"Fundamentos de Física"*, v.2 3^a ed. LTC, 1988

[3] http://www.sillanumsoft.com/
Site onde se pode baixar gratuitamente o programa *Visual Analyser 8*, usado na produção e medição das ondas sonoras deste experimento. Apêndice IV.

[4] http://pt.wikipedia.org/wiki/Velocidade_do_som
Contém uma tabela da velociade do som em diferentes temperaturas.

[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Wave
Verbete sobre ondas (conceitos gerais). Deste site foram retiradas figuras. (Em inglês)

5 Apêndice I

Para se fazer o ajuste da curva utilizando o *Origin 7.0*, deve-se proceder da seguinte forma:

No comando *Analysis > Non-linear Curve Fit > Advanced Fitting Tool*, deve-se definir uma nova função (ver figura 7). Essa função deve ser uma senoidal generalizada com 4 parâmetros, da forma:

$$I = A + B \sin[k(x - x_0)]$$

Nessa equação, temos a intensidade I como variável dependente; o deslocamento x como variável independente; A como o deslocamento vertical, valor em torno do qual os valores de I oscilarão; B como a amplitude da onda; k como o número de onda; e x_0 relacionado com a defasagem da onda.

O próximo passo é propor valores iniciais para o cálculo por iterações. Isso se faz baseado no gráfico 1 (veja figura 8). Os valores utilizados foram:

$$A = -40$$

$$B = 8$$

$$k = 0,1$$

$$x_0 = 0$$

Finalmente, realiza-se as iterações (figura 9) para se obter os valores dos parâmetros que melhor ajustam a curva aos pontos experimentais. Esses valores foram:

$$A = -38,1 \pm 0,8$$

$$B = -7 \pm 1$$

$$k = 0,094 \pm 0,005$$

$$x_0 = -2 \pm 3$$

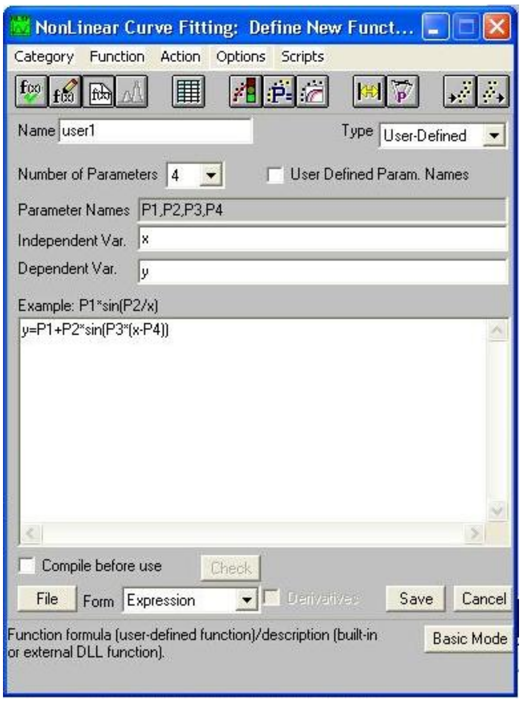


Figura 11: Passo 1

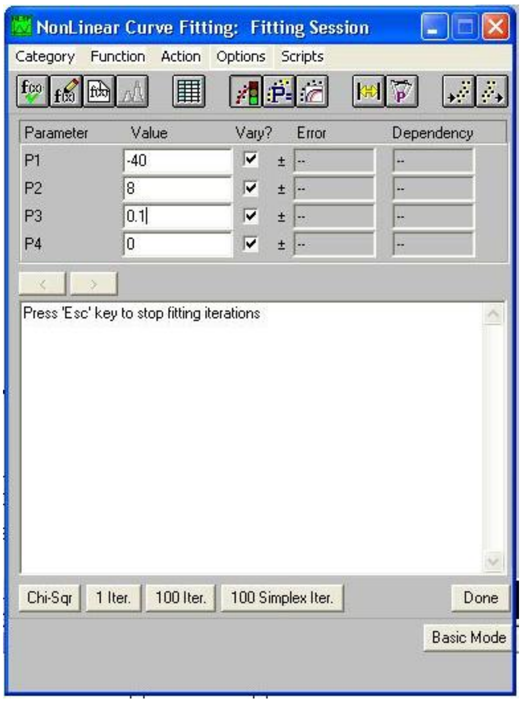


Figura 12: Passo 2

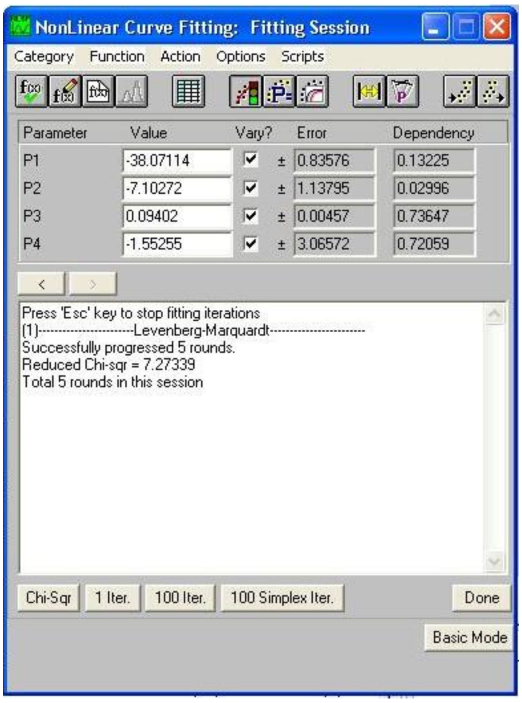


Figura 13: Passo 3

6 Apêndice II

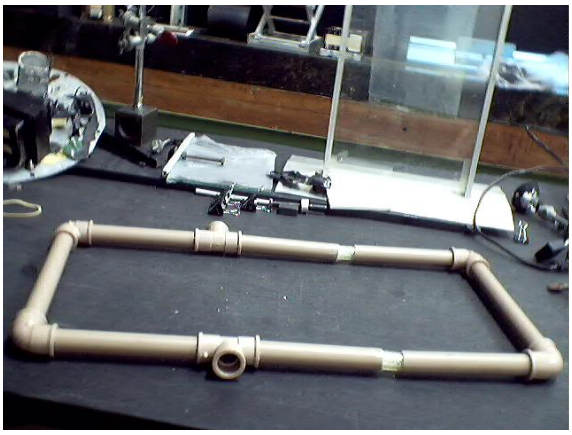


Figura 14: O tubo de Quincke montado.

Figura 15: Detalhe do tubo flexível fixado ao tubo de PVC.

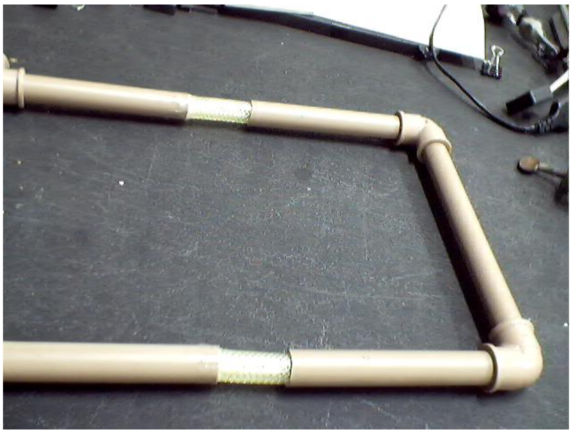


Figura 16: Detalhe do braço móvel ligado ao tubo flexível.

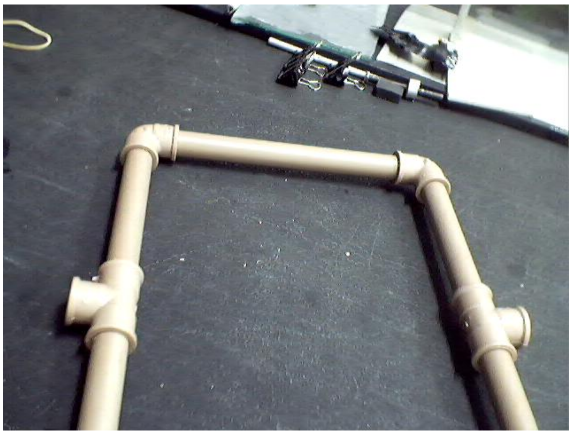
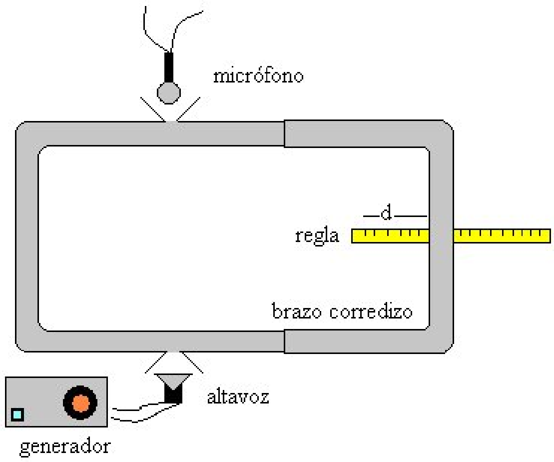


Figura 17: Detalhe das aberturas de entrada e de saída do som.

7 Apêndice III

http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/quincke/quincke.htm
Site sobre o tubo de Quincke e como medir a velocidade do som a partir dele. Contém animações sobre interferência de pulsos e do tubo de Quincke em funcionamento. (Em espanhol)

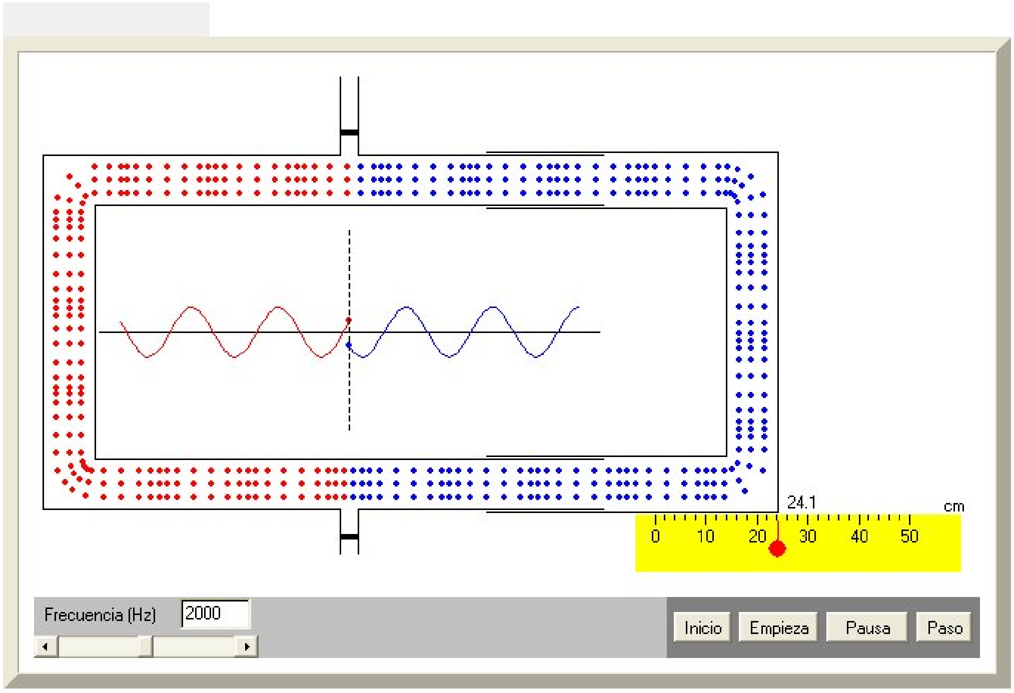
Medida de la velocidad del sonido. El tubo de Quincke



El dispositivo consta de dos tubos en forma de U, uno fijo de diámetro interno de 1 a 3 cm, y otro corredizo, cuyo diámetro interior es igual al diámetro exterior del tubo fijo. El sonido emitido por un altavoz, conectado a un generador de funciones de frecuencia variable, viaja por dos caminos diferentes: por el brazo derecho y por el brazo izquierdo. El micrófono capta la superposición de ambas ondas y su señal eléctrica generada se analiza con un osciloscopio.

Las ecuaciones de las ondas armónicas que viajan por el camino izquierdo y por el camino derecho son, respectivamente

$\Psi_1=\Psi_0\cdot \text{sen}\, k(x-vt)$
$\Psi_2=\Psi_0\cdot \text{sen}\, k(x-vt)$

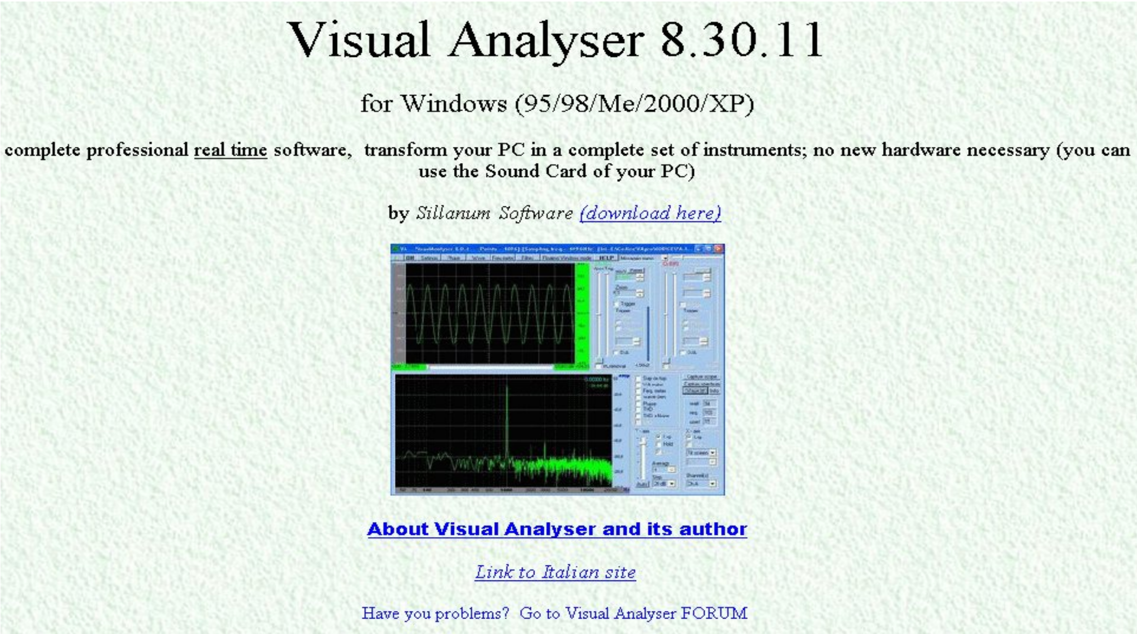


Mover con el puntero del ratón el círculo de color rojo

8 Apêndice IV

http://www.sillanumsoft.com/

Site onde se pode baixar gratuitamente o programa *Visual Analyser 8*, usado na produção e medição das ondas sonoras deste experimento. Apêndice IV.



9 Apêndice V

http://pt.wikipedia.org/wiki/Velocidade_do_som

Contém uma tabela da velociade do som em diferentes temperaturas.

Velocidade do som

Origem: Wikipédia, a enciclopédia livre.

A **velocidade do som** é a distância percorrida por uma onda sonora por unidade de tempo. É a velocidade a que uma perturbação se propaga num determinado meio. Em **instrumentação** pode-se utilizar este princípio para medir com boa exatidão distâncias entre obstáculos, assim: conhecendo-se a *velocidade de propagação* de um sinal (normalmente ultra-som no ar) é possível medir o *tempo* que ele gastou a percorrer um determinado espaço. Com este valor é simples calcular a *DISTÂNCIA* percorrida. Utilizam-se sensores especiais que emitem o sinal em forma de pulso (ultra-som) e os recebe de volta (**eco**). Um sistema microprocessado pode calcular o tempo gasto (normalmente milissegundos).

Tabela - velocidade do som no ar c e C, densidade do ar ρ, impedância acústica Z e temperatura ϑ [editar]

Impacto da temperatura				
ϑ em °C	c em m/s	C em km/h	ρ em kg/m³	Z em N·s/m³
-10	325,4	1.171,4	1.341	436,5
-5	328,5	1.182,6	1.316	432,4
0	331,5	1.193,4	1.293	428,3
+5	334,5	1.204,2	1.269	424,5
+10	337,5	1.215,0	1.247	420,7
+15	340,5	1.225,8	1.225	417,0
+20	343,4	1.237,0	1.204	413,5
+25	346,3	1.246,7	1.184	410,0
+30	349,2	1.257,1	1.164	406,6

10 Apêndice V

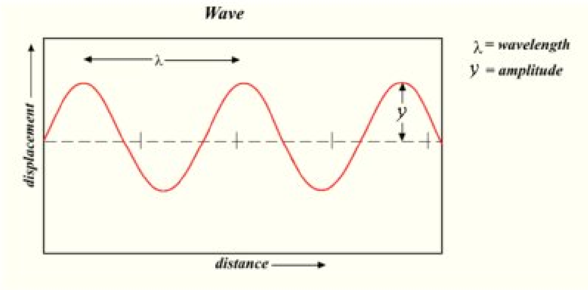
http://en.wikipedia.org/wiki/Wave

Verbete sobre ondas (conceitos gerais). Deste site foram retiradas figuras. (Em inglês)

Mathematical description

[edit]

Waves can be described mathematically using a series of parameters.



The **amplitude** of a wave (commonly notated as A, or another letter) is a measure of the maximum disturbance in the medium during one wave cycle. In the illustration to the right, this is the maximum vertical distance between the baseline and the wave. The units of the amplitude depend on the type of wave — waves on a string have an amplitude expressed as a distance (meters), sound waves as pressure (pascals) and electromagnetic waves as the amplitude of the electric field (volts/meter). The amplitude may be constant (in which case the wave is a *c.w.* or *continuous wave*), or may vary with time and/or position. The form of the variation of amplitude is called the *envelope* of the wave.

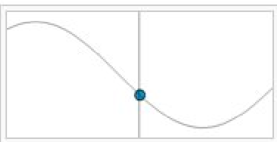
The **wavelength** (denoted as λ) is the distance between two sequential crests (or troughs). This generally has the unit of metres; it is also commonly measured in nanometres for the optical part of the electromagnetic spectrum.

A **wavenumber** k can be associated with the wavelength by the relation

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

The **period** T is the time for one complete cycle for an oscillation of a wave. The **frequency** f (also frequently denoted as ν) is how many periods per unit time (for example one second) and is measured in hertz. These are related by:

$$f = \frac{1}{T}.$$



Waves can be represented by simple harmonic motion.

In other words, the frequency and period of a wave are reciprocals of each other.

The *angular frequency* ω represents the frequency in terms of radians per second. It is related to the frequency by: