

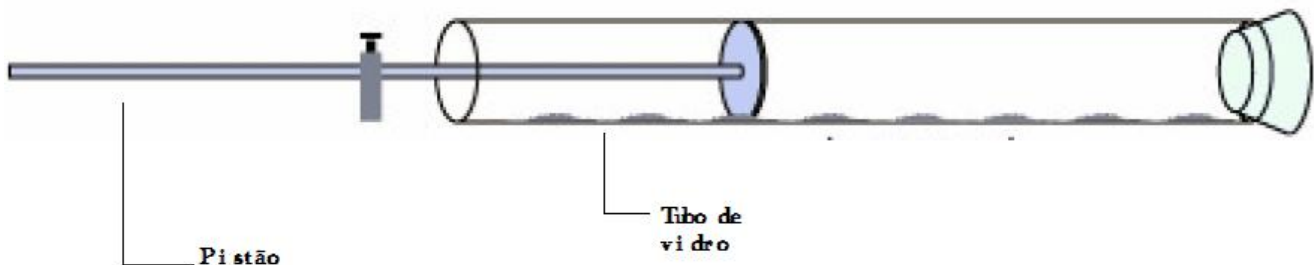
RELATÓRIO PARCIAL: Tubo de Kundt

- 1) Cópia do projeto.

I - Descrição

O projeto propõe-se a construir um Tubo de Kundt para analisar ondas sonoras se propagando no ar. A montagem foi feita inicialmente pelo físico alemão August Kundt em 1866 e reportada na revista *Annalen der Physik und Chemie* com o título *Über eine neue Art akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen* (Sobre uma nova forma de figuras de poeira acústicas e sobre o emprego das mesmas para determinar a velocidade do som em corpos rígidos e gases).

O plano é construir um tubo de material transparente de aproximadamente um metro de comprimento e alguns centímetros de diâmetro com uma das extremidades fechadas, sendo que na extremidade restante insere-se um pistão metálico móvel. Essa montagem é fixada horizontalmente em uma mesa ou apoio de madeira e o pistão é grampeado (fixado) pelo seu ponto médio. O tamanho do tubo deve ser variável, de forma que o pistão ou a extremidade simples fechada deve ser móvel e poder deslizar livremente dentro do tubo. Adiciona-se ainda um pó fino e leve ao interior do tubo, como



cortiça ou serragem. A figura a seguir mostra os elementos centrais da montagem:

FIGURA 1: Esquema mostrando os elementos centrais da montagem do Tubo de Kundt.

A idéia central do instrumento é que a barra metálica servirá como um gerador de áudio ao ser excitada com a ajuda de um pedaço de camurça ou outros materiais que causem o mesmo efeito. Como ela estará fixa em seu centro, esse ponto será um nó, enquanto as extremidades podem vibrar livremente e transmitir uma onda sonora para o gás dentro do tubo. Variando o tamanho do tubo pode-se encontrar o ponto aonde o comprimento do tubo corresponde a um numero inteiro de comprimentos de onda da onda sonora, gerando-se ondas estacionárias. Essa configuração faz com que o pó de dentro do tubo se instale nos nós da onda, onde não há movimento do ar. A partir disso pode-se medir a velocidade do som no ar, utilizando conhecimentos sobre a vibração na barra rígida ou estudar-se as vibrações de barra fica lançando mão de dados sobre a velocidade do som no ar.

A princípio será utilizada uma barra de alumínio, mas outros materiais poderão ser testados. Na

base de madeira será fixada também uma fita métrica ou instrumento semelhante, para facilitar possíveis medidas.

II - Importância didática do trabalho

O trabalho destina-se, em especial, para alunos de ensino médio entrando em contato com os primeiros conceitos fundamentais de ondulatória. A montagem, por ser simples e absolutamente palpável, com elementos bastante familiares ao dia-a-dia de toda a população, permitirá que os alunos se aproximem e se apropriem dela, compreendendo todas as fases de seu funcionamento.

A possibilidade de manipulação direta também se mostra como bastante interessante e o próprio princípio de funcionamento – baseado no aparecimento figuras *visíveis e materiais* para a análise de conceitos que podem se mostrar abstrato como os *comprimentos de onda* – torna o experimento bastante didático.

O experimento, em si, envolve conceitos fundamentais: vibração e propagação do som em materiais rígidos e no ar, ondas estacionárias, propagação de ondas em tubos fechados e a noção de ressonância. Espera-se que a característica “visual” do funcionamento do instrumento possa aproximar o público alvo da teoria e fazer conexões diretas com a prática.

III – Originalidade

Como já foi dito inicialmente essa montagem foi realizada pela primeira vez em 1866 na Universidade de Leipzig, na Alemanha. Desde então ela tem sido extensamente repetida em todo o mundo, possivelmente por seu conteúdo bastante didático. Versões mais modernas utilizam um gerador de áudio digital e pequenos alto-falantes para substituir a barra metálica. A opção desse projeto será, no entanto, manter a barra metálica, tanto por questões de acessibilidade – a montagem pode ser facilmente reproduzida por possíveis interessados sem grandes problemas financeiros -, quanto por questões didáticas – o usuário terá que gerar o som, participando de todo o processo e compreendendo-o em todas as suas partes.

Pesquisas na internet indicam que no Brasil a produção do tubo já foi realizada diversas vezes, em especial em sua versão mais moderna. Na Universidade Estadual do Rio de Janeiro a versão tradicional foi construída diversas vezes a partir de 1991 para fins didáticos. O projeto é ainda, em suas duas versões, amplamente difundido pelas áreas de ensino de física de diversas universidades do país (encontrou-se referências para a UFSC, UNESP, USP, UNB, UFBA etc.)

O projeto é, dessa forma, bastante conhecido e já foi amplamente difundido, inclusive em universidades brasileiras.

IV - Referências

As referências para a forma mais moderna da montagem são bastante abundantes e podem ser encontradas mesmo em português na internet. Para sua forma mais tradicional, no entanto, encontra-se

mais dificuldades para encontrar esquemas de montagem e observações gerais. Nenhuma página em português foi encontrada para esse caso. As principais referências para a montagem do projeto estão listadas abaixo.

É necessário indicar, em primeiro lugar, o artigo escrito pelo próprio August Kundt. A referência completa é :

1. É necessário indicar, em primeiro lugar, o artigo escrito pelo próprio August Kundt:

August Kundt: *Über eine neue Art akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen.* In: *Annalen der Physik und Chemie.* 203, Nr. 4, 1866. (<http://www3.interscience.wiley.com/journal/112502988/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>)

2. Temos também um artigo escrito por dois estudantes da Universidade de Ulm, S. Schnur e M. Diez, “*Kundtches Staubrohr und Quinckesches Resonanzrohr*”. (http://www.wirtschaftsphysik.de/e107_files/public/ap/ap1_v09c.pdf)
3. Uma explanação geral e esquemas de montagens podem ser encontrados no site Hyperphysics, (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/HBASE/Class/PhSciLab/kundt2.html>) e na Wikipédia (http://en.wikipedia.org/wiki/Kundt's_tube, http://de.wikipedia.org/wiki/Kundtsches_Staubrohr)
4. Um artigo bastante didático foi escrito por Gottfried Schubert:

Gottfried Schubert: *Staubfiguren im Kundtschen Rohr.* In: *Physik in unserer Zeit.* 12, Nr. 5, 1981, pp.147-150. (<http://www3.interscience.wiley.com/journal/112568714/abstract>)
5. Há ainda um artigo que conta sobre a construção de tubos de Kundt e sua utilização para fins didáticos na UERJ.
6. A.J.Santiago,C.A.Azevedo e R.A. Gonçalves Ledo: *Teor Didático de um Tubo de Kundt: Análise Qualitativa de um Experimento.* In: *Revista de Ensino de Física,* v. 13, dezembro/1991, p. 77-85. (<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol13a06.pdf>)

V- Lista de materiais:

Inicialmente os materiais previstos para a utilização são:

- Uma base de madeira.
- Um tubo de material transparente, a princípio de vidro ou de acrílico.
- Barra circular alumínio, e, possivelmente, de outros materiais.
- Pó de cortiça ou serragem.
- Garras para fixar a montagem.

2) Resultados atingidos

Até momento os materiais ainda estão sendo providenciados.

3) Fotos da experiência no estágio em que se encontra.

Nada que valha a pena ser fotografado até agora.

4) Dificuldades encontradas

A principal dificuldade encontrada até o momento foi encontrar o tubo de vidro. Foram feitas tentativas de utilizar materiais fabricados com outros objetivos, tanto de acrílico como de plástico transparente, principalmente devido aos custos que seriam poupados. Como nenhum material com essas características foi encontrado mandou-se fabricar o tubo em uma vidraçaria, com previsão de entrega para o dia 07/05. (Encontrar locais que produzam materiais com essas especificações também não é óbvio.)

Um segundo ponto de dificuldade foi encontrar as barras metálicas. Até o momento temos uma barra de latão, originalmente feita para suportar um tipo especial de persianas. Como os relatos feitos por pesquisadores do Rio de Janeiro (A. J. Santiago e C.A. Azevedo) não indicam sucesso como esse tipo de material, pretende-se conseguir uma barra de alumínio, disponíveis no mercado com tamanho de 6m e em geral disponíveis para pronta entrega.

A única dificuldade realmente prática encontrada diz respeito a como a barra de metal será fixada com altura correta em relação ao tubo. Isso será resolvido assim que o tubo estiver em mãos (assim espero).

5) Pesquisa realizada.

O projeto está sendo desenvolvido de acordo com as fontes já mencionadas no pré-relatório. A única fonte bibliográfica nova é um livro didático de física para o segundo grau, que tem servido de apoio para a formulação da teoria dirigida para esse público específico: Djalma Nunes da Silva Paraná, *Física – Termologia, Óptica e Ondulatória*, Editora Ática, 7ª edição, 1999, pp. 328-409.

6) Descrição do trabalho.

6.1) Resumo (público geral)

Todos nós já ouvimos falar ou temos alguma intuição a respeito do que seriam 'ondas'. De fato, elas estão sempre ao nosso redor e permeiam nossa vida cotidiana, muito mais do que a maior parte das pessoas pode imaginar. Elas estão no mar, formam-se em uma lagoa quando jogamos uma pedra sobre o espelho d'água, são as famosas ondas de rádio e até mesmo a nossa luz, sem esquecermo-nos, é claro, do tão utilizado microondas. O som é outro fenômeno que os físicos chamam de ondas. Mas o que coisas tão diferentes tem em comum para serem chamadas todas pelo mesmo nome?

A resposta pode parecer um pouco misteriosa. Todos esses fenômenos envolvem distúrbios que

são propagados para diante, movem-se de alguma forma no meio. É difícil visualizar isso para o caso das chamadas ondas eletromagnéticas (que envolve a luz e as microondas), por isso costumamos usar o exemplo de uma corda atada com uma de suas pontas uma maçaneta e com a outra ponta sendo movimentada de cima para baixo por alguém ou por alguma máquina. Vão surgir na corda ondulações, que “andam” através dela até chegarem à porta. Esse é um típico modelo de onda: cada ponto da corda se movimenta para cima e para baixo e a ondulação (perturbação) se dirige à maçaneta. Como a perturbação vai em uma direção (horizontal) e o meio material de propagação (corda) vai em outra (para cima e para baixo), chamamos essa onda de transversal. A figura abaixo ilustra a situação e nos mostra os nomes habituais dados a cada parte dessa onda: cristas, que são as partes mais altas, e os vales, que são as partes mais baixas.

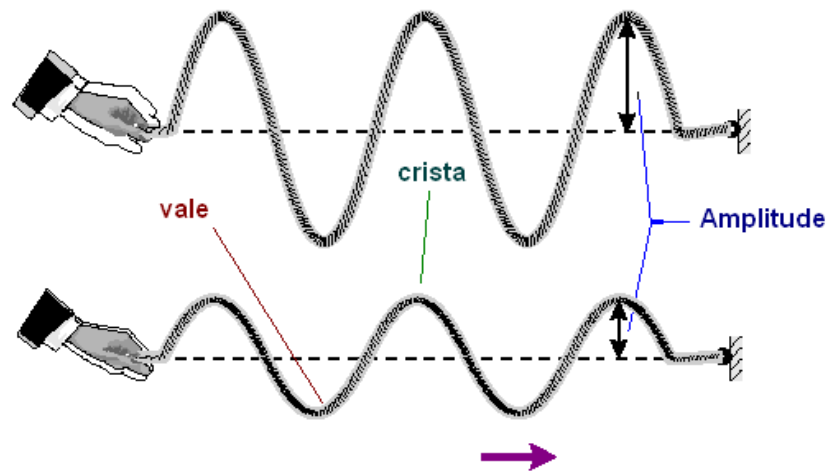


FIGURA 1: Onda em uma corda.

Um outro tipo de onda bastante conhecida são as ondas de som. Essas ondas são diferentes das ondas analisadas anteriormente para uma corda. Primeiramente elas são invisíveis, e ao invés de um pedaço de corda se movimentar o que se movimenta é o ar, que é ora comprimido, ora rarefeito: isso quer dizer que as moléculas que constituem o ar se aproximam e se afastam umas das outras ao longo do tempo. (Uma boa ilustração para uma onda de som é uma dessas molas coloridas utilizadas como brinquedo para crianças: as vezes as voltinhas estão muito juntas, as vezes muito separadas...) É por isso que temos a sensação de sermos empurrados ao nos aproximarmos de uma grande caixa de som tocando música alta: o ar está sendo movimentado pela onda sonora e nosso corpo sente esse efeito. Por esse mesmo motivo um som muito alto pode causar problemas ao tímpano: essa membrana delicada de dentro de nossos ouvidos vibra junto com o ar, transmitindo informações a respeito do som ao nosso cérebro e, caso forçada a vibrar muito para sons intensos (grandes amplitudes) pode se romper ou se danificar.

O Tubo de Kundt é um equipamento que nos permite, de certa forma, “ver” essas ondas. Isso porque não podemos ver as ondas diretamente, e sim efeitos dela. O equipamento pode ser visto na figura 2.

Temos um tubo de vidro forrado com um pó fino feito com cortiça ou qualquer outro material leve e uma barra de metal. A idéia central é que essa barra de metal pode vibrar, causando o deslocamento do ar em contato com suas extremidades, gerando uma onda de som. Essa vibração é gerada quando esfregamos essa barra com algum pano que gere atrito, como a camurça, por exemplo. Assim, nesse tubo, as vibrações da barra de metal são transmitidas para o ar dentro do vidro, e o

movimento desse ar faz as partículas de poeira se movimentarem, permitindo-nos “enxergar as ondas”. O tipo de padrão formado por esse movimento não é aleatório, estando ligado as leis físicas que regem o movimento ondulatório. Para compreender tal fenômeno devemos lançar mão de uma descrição mais detalhada das ondas e de suas propriedades.

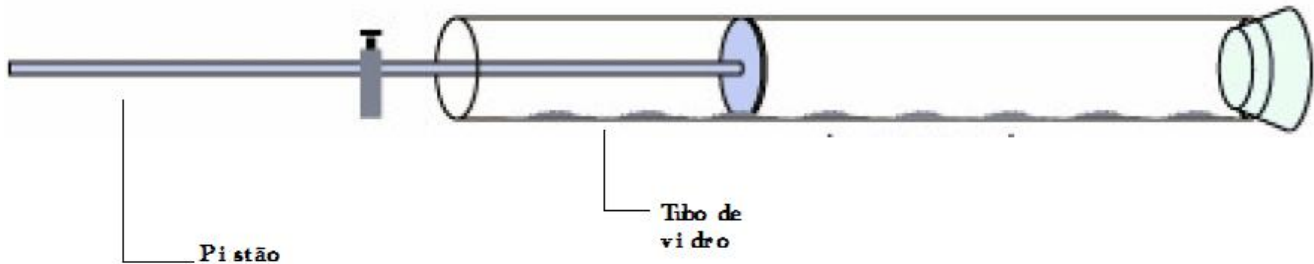


FIGURA 2: Tubo de Kundt esquematizado.

6.2) Descrição básica (dirigida ao público proveniente do ensino médio)

Tanto as ondas transversais (como as de uma corda), quanto as de pressão (como o som), tem suas propriedades regidas por determinadas leis físicas que foram estudadas por diversos cientistas ao longo dos anos. Para compreendermo-as devemos primeiramente notar a nomenclatura utilizada para descrever o fenômeno.

Chamamos de *comprimento de onda* (λ) a distância horizontal entre duas cristas ou entre dois vales de uma onda. À metade da distância vertical entre uma crista e um vale chamamos amplitude. Para descrever uma onda temos ainda uma grandeza chamada frequência, que conta o número de oscilações realizadas por unidade de tempo. Para o caso de uma onda em uma corda, a frequência corresponderia a quantas vezes a ponta da corda é movida para cima e para baixo pela mão ou máquina em cada segundo ou minuto.

Ondas podem ser refletidas. Para ondas sonoras temos o famoso 'eco': um som que emitimos é refletido pelas paredes ou quaisquer outros meios materiais a nossa volta e retorna aos nossos ouvidos. Para entender isso melhor, voltemos ao exemplo da corda. No momento em que a oscilação chega à maçaneta ela sofre a reflexão e a chamada mudança de fase: se o pulso chegar ao ponto fixo com a oscilação virada para cima, será refletido com a oscilação para baixo e vice-versa. (Figura 3)

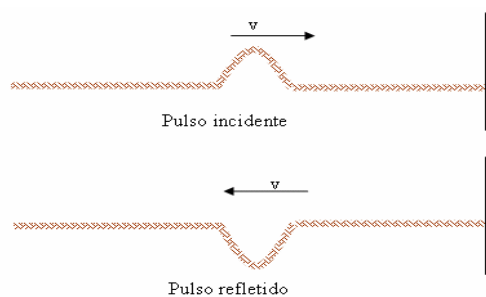


FIGURA 3: Reflexão de ondas em uma corda.

Essas ondas refletidas podem 'interferir' com as incidentes criando padrões diferenciados. Isso porque as amplitudes das ondas se somam quando elas passam pelo mesmo ponto do espaço: dois pulsos com amplitude de 1 mm, por exemplo, ao se encontrarem formam um pulso de 2mm caso estejam 'virados' para o mesmo lado. Na figura 3, por exemplo, ao combinarmos uma oscilação virada para cima (parte superior da figura) com uma virada para baixo, teríamos uma anulação do pulso no local (interferência destrutiva), pois *as amplitudes se somam*. Poderíamos ter igualmente uma interferência construtiva, caso as duas oscilações estivessem viradas para a mesma direção, como no exemplo citado acima.

É exatamente esse fenômeno que ocorre em um tubo de Kundt. As ondas sonoras produzidas pela barra são transmitidas para o ar do tubo, refletem-se na extremidade oposta e retornam, interferindo com as ondas que estão sendo continuamente produzidas pelo metal, produzindo uma onda resultante diferente da incidente.

Quando o comprimento do tubo é tal que dentro dele caiba um número inteiro de meios comprimentos da onda gerada pela barra ($\frac{1}{2}$, 1, 1 e $\frac{1}{2}$ etc.), podem surgir as chamadas ondas estacionárias. Nessa configuração os locais de interferência destrutiva são chamados de *nós*, e os outros pontos são chamados de *ventres*. Os primeiros não oscilam, enquanto os segundos oscilam com amplitude máxima (ver figura 4). Os nós e os ventres ocupam sempre a mesma posição ao longo da corda, e é por isso que as ondas recebem o nome de estacionárias.

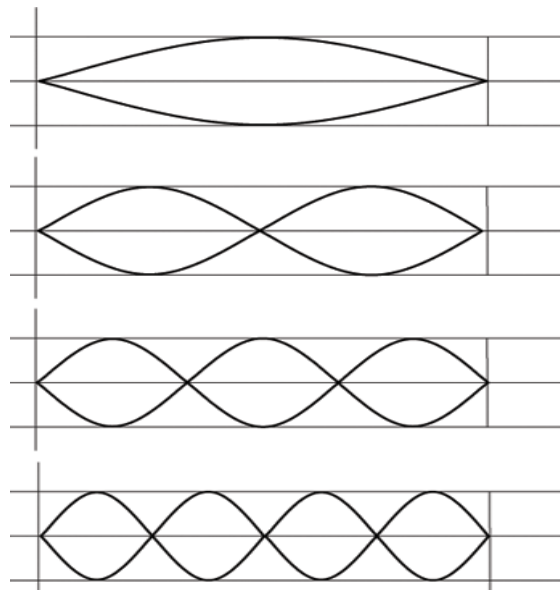


FIGURA 4: Padrões para ondas estacionárias. Essas ondas podem se formar quando o comprimento do tubo corresponde a um múltiplo do valor de meio comprimento da onda incidente/refletida.

No Tubo de Kundt, quando temos ondas estacionárias, o pó de cortiça se concentra nos nós, isso é, nos pontos onde o ar não vibra. Nós podemos variar o tamanho do tubo até encontrar essas ondas estacionárias e, medindo a distância entre os nós, descobrir o comprimento de onda da onda gerada pela barra metálica.

6.3) Descrição para alunos de graduação.

Utilizando ferramentas matemáticas adequadas podemos alcançar um bom nível de compreensão do que ocorre em um tubo de Kundt. As ondas geradas pela barra metálica em vibração

são dadas pela equação (ver ref. 6):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

onde v^2 é o quadrado da velocidade de propagação dada por $v = \sqrt{E/\rho}$, sendo E o módulo de elasticidade do material (que indica sua rigidez) e ρ sua densidade. A solução dessa equação tem por forma geral

$$y(x,t) = (A \cos wt + B \sen wt) \left(C \cos \frac{w}{v} x + D \sen \frac{w}{v} x \right)$$

Nas extremidades da barra estando livres para se mover, não atuam forças elásticas sobre elas.

Dessa forma a equação $p = -E \frac{\partial y}{\partial x}$ implica que $\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x=0, x=l} = 0$, de forma que $C=0$ e $\frac{wl}{v} = j\pi$, com $j = 1, 2, 3, \dots$

Dessa forma a frequência f_j de cada modo de vibração e seus respectivos comprimentos de onda serão:

$$f_j = \frac{j}{2l} \sqrt{E/\rho}$$

$$\lambda_j = 2l/j$$

A mesma equação tem de ser analisada para a propagação no ar, mas a velocidade é dada por:

$$v_{ar} = \sqrt{K/\rho_{ar}}$$

onde K é a constante volumétrica do ar e ρ_{ar} sua densidade. Para essa equação as soluções são semelhantes as encontradas anteriormente para a barra metálica, mas as condições de contorno são determinadas pelo fato de o tubo ser fechado, o que implica a existência de nós nas duas extremidades. As soluções exigem então sempre um número inteiro de meios comprimentos de onda e suas frequências de vibração correspondentes são dadas por:

$$f_{ar} = \frac{j}{2L} v_{ar}, \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

Quando uma dessas frequências for igual à frequência de vibração da barra, o tubo entrará em vibração ressonante e surgirão ventres e nós que serão indicados pelos pontos de deposição das partículas de pó. Usamos a frequência do modo de vibração mais intenso da barra, chamado de modo fundamental ($j = 1$, onde as extremidades da barra são ventres e o centro um nó), para escrever:

$$v_{ar} = v \frac{\lambda_{ar}}{\lambda_{barra}}$$

Essa relação pode ser utilizada para encontrarmos a velocidade do som no ar, bastando utilizar valores tabelados para a velocidade de propagação na barra, o comprimento de onda na barra correspondente ao modo fundamental ($\lambda = 2l$) e o comprimento de onda no ar como sendo o dobro da distância média entre os nós.

7) Declaração do orientador:

Aguardo a opinião do meu orientador. Assim que a obtiver a encaminharei.

8) Escolha de horário para apresentação do painel:

18 de junho. Preferencialmente no primeiro horário, mas pode ser no segundo também.

--