Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos

Atividade de Laboratório de Física II à Distância

Ondas Estacionárias

Roteiro adaptado do livro de prática de Laboratório de Física II do IFSC para uso com videoaulas

(*J. Schneider e E.R. de Azevedo. (compiladores), Laboratório de Física II, Livro de Práticas. Instituto de Física de São Carlos - USP, 2016. Disponível para download em: http://granada.ifsc.usp.br/labApoio/index.php?option=com_content&view=article&id=8&Itemid=13*)

Vídeo aulas relacionadas a esse roteiro estão disponíveis em:

https://www.youtube.com/playlist?list=PLDre2jYH3njjMv8cYlDXmIZCO1qB5h9CU

- Ondas em uma corda
- Ondas sonoras.

Ondas estacionárias

1.1 Objetivo

Estudar o comportamento de ondas transversais estacionárias em cordas e em colunas de ar, e determinar a velocidade de propagação das ondas progressivas em cada um dos meios.

1.2 Fundamentos teóricos

1.2.1 Ondas progressivas em cordas

Seja uma corda com densidade de massa linear μ, que é mantida tensa através da aplicação de uma força constante *F*. Se um dos extremos da corda for pulsado periodicamente, será gerada uma onda harmônica viajando pela corda. Essa onda é dita transversal, pois a perturbação ou oscilação, no caso de ondas periódicas, é perpendicular à direção de avanço da perturbação, ou seja, da direção de propagação. A onda se propaga com velocidade *v* determinada pela relação:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad . \tag{1}$$

A velocidade de uma onda progressiva depende somente das propriedades do meio (tensão e densidade, no caso da corda) e não, da fonte que a gera (o agente que faz o extremo da corda oscilar).

Por outro lado, a velocidade de propagação da onda progressiva pode ser calculada sabendo que uma crista percorre uma distância λ (comprimento da onda) durante o tempo *T* (período de oscilação)

$$v = \lambda / T = \lambda f \quad , \tag{2}$$

sendo $f = 1/T$ a frequência (medida em Hertz).

1.2.2 Ondas estacionárias em cordas

Se as extremidades da corda estiverem fixas, é possível obter uma onda *estacionária* resultante da superposição de duas ondas, viajando em direções opostas: a onda gerada pela fonte desde um extremo e a onda refletida no extremo oposto fixo.

A onda estacionária é uma oscilação da corda sem propagação da perturbação; as cristas não viajam pela corda. No entanto, cada elemento da corda oscila verticalmente com frequência f.

Na Figura 1.1 são mostrados os possíveis harmônicos para a corda com extremos fixos. A curva representada é a envoltória da oscilação: a máxima deflexão da corda para cima ou para abaixo. Ao longo do tempo, cada elemento de corda oscila verticalmente entre esses extremos com frequência f.

Pelo fato dos extremos da corda corresponderem aos nós da onda estacionária, os comprimentos λ_n dos harmônicos estão restritos. Da Figura 1.1 pode se concluir que os únicos valores possíveis de λ_n, numa corda de comprimento L, devem satisfazer a condição:

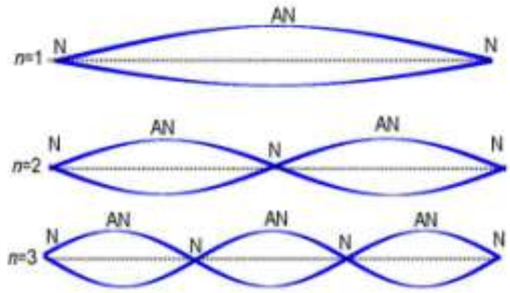
$$n\frac{\lambda_n}{2} = L \quad , \tag{3}$$

na qual n = 1, 2, 3,... é um número inteiro que identifica o harmônico gerado na corda. Como a velocidade das ondas, que se superpõem na corda, é sempre a mesma (depende unicamente do meio), então, a frequência de cada harmônico deve ser diferente para manter o produto constante em (2):

$$v = \lambda_n \; f_n \quad . \tag{4}$$

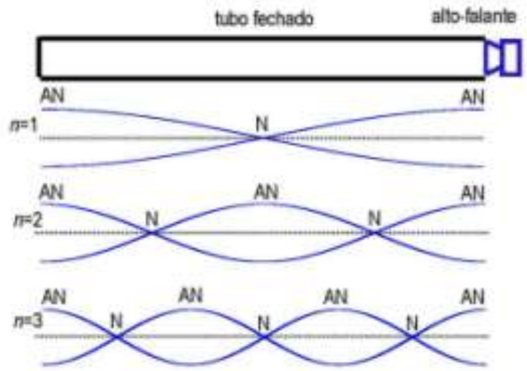
Deve ser notado que, em geral, um conjunto qualquer de valores de L, λ e f não, necessariamente, garantem a existência uma onda estacionária, a menos que satisfaçam simultaneamente as equações (1) até (4).

Figura 0.1 - Ondas estacionárias de deslocamento em uma corda presa em ambos os extremos. *n*: número de harmônico. N: nó (zero). AN: antinó (máximo ou mínimo).



Fonte elaborada pelos compiladores.

Figura 0.2 - Ondas estacionárias de pressão em um tubo fechado. *n*: número de harmônico. N: nó (zero). AN: antinó (máximo ou mínimo).



Fonte elaborada pelos compiladores.

1.2.3 Ondas de som estacionárias

As ondas de som são perturbações da pressão se propagando através de um meio material. Nesta prática serão estudadas ondas de som no ar. As cristas e vales das ondas correspondem, respectivamente, a lugares onde a pressão do ar é localmente máxima (compressão) ou mínima (expansão) com relação à pressão atmosférica média. As ondas de som são um tipo particular de onda longitudinal; a compressão ou expansão do meio ocorre na direção de avanço da onda.

Da mesma forma que ocorre na corda, a interferência de duas ondas sonoras, de amplitude e frequência iguais, viajando em direções opostas com velocidade *v*, produz uma onda estacionária. É possível criar uma onda estacionária dentro de um tubo com ar, colocando uma fonte de som em um extremo (por exemplo, um alto-falante) e deixando fechado o outro extremo (como mostrado na Figura 1.2). O alto-falante gera uma onda de som harmônica viajando para esquerda, que incide na parede oposta do tubo, onde é refletida. A superposição dessa onda, refletida com a onda emitida pelo alto-falante, cria a onda estacionária dentro do tubo. Como a parede fixa impede o deslocamento das moléculas do ar, ocorre uma crista de pressão nessa região do tubo. Portanto, nesse extremo teremos sempre a crista da onda estacionária de pressão de todos os harmônicos. No extremo oposto ocorre uma situação semelhante, pois a onda refletida incide sobre a membrana do alto-falante, comprimindo o ar e criando, assim, uma crista estacionária de pressão.

Na Figura 1.2 são representadas as envoltórias das possíveis ondas estacionárias, compatíveis com essas condições nos extremos do tubo. Observa-se na Figura 1.2 que os comprimentos de onda estão sujeitos à condição:

$$n\frac{\lambda_n}{2} = L \quad , \tag{5}$$

sendo *n,* número inteiro que identifica o modo de oscilação.

A Física e a Engenharia Civil: acústica de ambientes

Existem vários fenômenos físicos que determinam o comportamento acústico de um ambiente. Um deles é a formação de ondas estacionários de som. As paredes atuam como refletores, quase rígidos, de ondas de som incidentes. Dependendo do comprimento dessas ondas, pode ocorrer que a superposição da onda emitida pela fonte de som e a refletida por uma parede, ou entre duas ondas refletidas desde paredes opostas, produza uma onda estacionária. O fenômeno será percebido como um aumento na intensidade dos sons de certas frequências em alguns locais da sala. Esse fenômeno ressonante pode ser analisado de maneira simplificada, em uma dimensão, considerando apenas duas paredes opostas atuando como refletoras de ondas, separadas por uma distância L. Nas paredes rígidas sempre haverá um antinó (crista ou vale) da pressão. Portanto, os únicos comprimentos λ_n possíveis para as ondas estacionárias deverão satisfazer a condição $L = n\,\lambda_n/2$, na qual n é um número inteiro.

- Dadas essas condições, para quais valores de frequências f_n haverá ondas estacionárias nessa sala? Suponha uma velocidade do som de v=340m/s.
- O que poderia ser feito na sala para eliminar essas ondas estacionárias?
- O *sub-woofer* de um sistema de som é o alto-falante de maior tamanho, capaz de produzir sons com frequências entre 20 Hz e 200 Hz. Do ponto de vista da geração de ondas estacionárias, qual seria a diferença entre colocá-lo perto de uma parede ou no meio da sala?

Se o alto-falante oscila com frequência *f*, a velocidade *v* da onda emitida deve satisfazer a relação (2). Medindo o comprimento λ_n da onda estacionária e a frequência *f*, é possível determinar a velocidade do som. Como no caso de toda onda progressiva harmônica, a velocidade do som depende somente das propriedades do meio de propagação, sendo definida pela temperatura e a pressão.

Exercício: para um tubo de comprimento L fixo, determine qual é a relação entre f_n e n para ondas estacionárias no tubo fechado.

A Física e as Engenharias Aeronáutica e Eletrônica: câmaras anecoicas

Uma *câmara anecoica* é uma sala especialmente acondicionada para evitar reflexões de ondas de som ou de rádio, com a finalidade de efetuar análises precisas de equipamentos.

- Que propriedades devem satisfazer os materiais e geometria das paredes?
- Qual poderia ser o interesse de testar componentes aeronáuticos, espaciais e de comunicação nesse tipo de instalação?

1.3 Experimental

O dispositivo para gerar ondas estacionárias, mostrado na Figura 1.3, está constituído de uma corda com uma extremidade presa a um pino, vibrando verticalmente com frequência *f*. A fonte de vibração do pino é um alto-falante excitado com um sinal elétrico sinusoidal de frequência *f*, que é fornecido por um gerador de voltagem. A outra extremidade da corda está conectada, através de uma roldana, a uma massa suspensa, que define a tensão *F* aplicada. É possível, assim, obter ondas estacionárias na corda com comprimentos de onda dependentes da tensão *F* aplicada, da frequência *f* e do comprimento *L* da corda.

Figura 0.3 - Dispositivo para a geração de ondas estacionárias em uma corda com os extremos presos. Na imagem é mostrada a excitação do modo fundamental *n*=1.

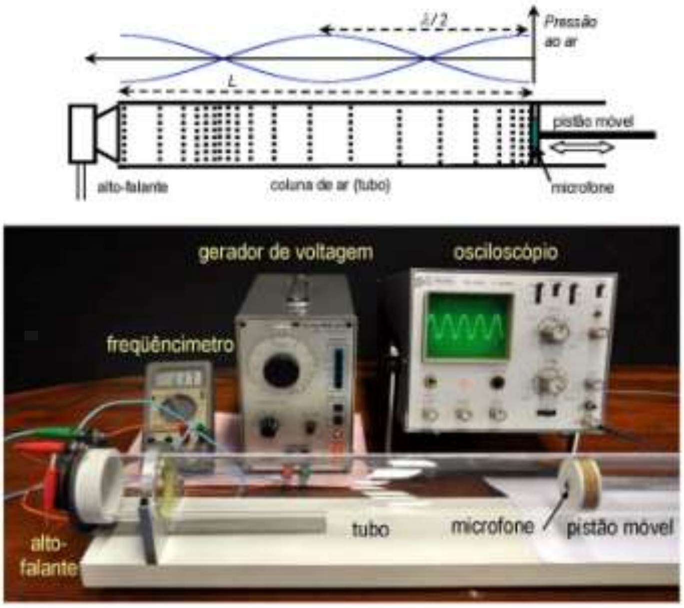
Fonte elaborada pelos compiladores.

O dispositivo utilizado para gerar ondas de som estacionárias está mostrado na Figura 1.4. O alto-falante é excitado através de um gerador de voltagem harmônico com frequência f. No extremo oposto, o tubo está fechado com um pistão móvel acoplado a um microfone. O sinal elétrico fornecido pelo microfone, proporcional à amplitude da pressão, é monitorado por meio de um osciloscópio (medidor de voltagem em função do tempo).

Deslocando o pistão, é possível controlar o comprimento L da coluna de ar. Quando uma condição de ressonância for atingida, será registrada, pelo microfone, a maior intensidade (máxima) da voltagem oscilante, devido ao aparecimento da máxima crista de pressão sobre a parede do tubo.

Questão: Como deve ser o sinal elétrico observado no osciloscópio? Ele representa o padrão de onda estacionária no tubo?

Figura 0.4 - Esquema do dispositivo para a geração de ondas de som estacionárias num tubo cilíndrico.



Fonte elaborada pelos compiladores.

1.4 Procedimento

As vídeo-aulas a serem utilizadas nas análises a serem realizadas podem ser encontradas no seguinte link: https://www.youtube.com/playlist?list=PLDre2jYH3njjMv8cYlDXmIZCO1qB5h9CU. Procure pelas videoaulas com os títulos mencionados abaixo.

1.4.1 Ondas estacionárias na corda

Vídeo-aula correspondente: Ondas em uma corda.

Nesta parte da prática serão gerados os diferentes harmônicos na corda, partindo desde o fundamental (n = 1), mantendo constantes L e F.

a) Nas primeiras medidas apresentadas na vídeo-aula varia-se a frequência do vibrador de modo a observar o aparecimento de ondas estacionarias através do monitoramento das amplitudes de oscilação.

b) Com os dados coletados no vídeo, Construa uma tabela registrando os valores do índice n do harmônico, o número de nós, λ_n e f_n. Determine a velocidade das ondas para cada harmônico. É constante? Do conjunto de dados, determine o valor de *v* com sua incerteza.

c) Usando a velocidade medida, determine o valor de μ. É consistente com a corda utilizada (dados também apresentados no vídeo)? Confira.

1.4.2 Ondas estacionárias de som: geração de harmônicos em função da frequência *f*

Vídeo-aula correspondente: Ondas sonoras.

Este experimento é análogo ao da parte (1.4.1), porém com ondas de som. O vídeo da aula apresenta a geração de diferentes harmônicos no tubo, partindo desde o modo fundamental (n = 1), para L fixo.

a) Desloca-se o pistão, com o comprimento L da coluna de ar da ordem de 0,11m. Muda-se a frequência do gerador até observar, no osciloscópio, as ondas de pressão com a maior intensidade. Essa condição corresponde a uma onda estacionaria. Registre os valores de f_n correspondentes aos sucessivos harmônicos. Construa uma tabela com os valores do índice n do harmônico e f_n.

b) Faça o gráfico de f_n versus $n/2L$. Que tipo de relação é observada? É coerente com as equações que definem a onda estacionária?

c) Analisando os dados de (b) com o método dos mínimos quadrados, determine a velocidade das ondas de som no ar. Compare com valores de referência sabendo que a temperatura da sala era de 25 ^{o}C.

d) Que valor deveria assumir o coeficiente linear? É coerente com o resultado do seu experimento?

e) Como poderia garantir que o primeiro harmônico observado corresponde a n=1? Qual seria a frequência esperada para o modo fundamental f_1 no tubo? Coincide com sua menor frequência da tabela? Explique.

1.4.3 Ondas estacionárias de som: geração de harmônicos em função do comprimento *L*

Vídeo-aula correspondente: Ondas sonoras.

No vídeo é apresentado um experimento onde a frequência de excitação f é fixa e os harmônicos serão gerados variando o comprimento L da coluna de ar. Observe que, agora, de acordo com a relação (2), se f está fixa, o comprimento de onda λ deve ser *constante*. Portanto, da equação (5), para obter uma onda estacionária, o comprimento do tubo somente poderá assumir valores L_n dados pela relação:

$$L_n = n\,\frac{\lambda}{2} \quad . \qquad (6)$$

Para maiores comprimentos do tubo, resultam harmônicos de ordem n maior.

a) A frequência f usada é da ordem de 2 kHz. Deslocando o pistão, observa-se que, em certas posições L_n, as ondas de pressão têm intensidades máximas, correspondendo a condições de onda estacionária.

b) Começa-se com o pistão, posicionado próximo do alto-falante, para ter certeza de detectar o modo fundamental, registra-se os valores de L_n correspondentes a sucessivos harmônicos n. Construa uma tabela com os valores do índice n do harmônico e L_n, e uma coluna com as diferenças entre valores sucessivos $L_{n+1} - L_n$. De acordo com (5), o que deveria acontecer com os valores dessas diferenças?

c) A partir dos dados obtidos, determine o valor mais provável de λ e sua incerteza.

f) Calcule a velocidade do som no ar, com sua incerteza. Compare com o resultado do experimento (2) e compare com valores de referência sabendo que a temperatura da sala era de 25 ^{o}C.

1.4.4 Ondas estacionárias de som em um gás nobre desconhecido.

Vídeo-aula correspondente: Ondas sonoras.

No vídeo é apresentado um experimento para medida da velocidade do som em um gás nobre desconhecido. A frequência de excitação f é fixa e o primeiro harmônico é gerado variando o comprimento L da coluna de gás. Portanto, a relação entre a velocidade do som no gás, a frequência do primeiro harmônico f_1 o comprimento L do tubo é $v = 2Lf_1$.

a) A frequência *f* usada é da ordem de 2 kHz. Determine a partir dos dados do vídeo qual é o comprimento da coluna de gás em que se forma o primeiro harmônico. Determine a velocidade do som neste gás e através de consulta à literatura sugira qual seria o gás inserido dentro do tubo.

1.4.5 Ondas estacionárias de som no tubo de Rubens

Vídeo-aula correspondente: Ondas sonoras.

Nesta parte da prática serão gerados os diferentes harmônicos em um tubo preenchido com GLP quente partindo desde o fundamental (n = 1) e mantendo o comprimento do tubo L constante.

a) Nas medidas apresentadas na vídeo-aula varia-se a frequência do alto-falante de modo a observar o aparecimento de ondas estacionárias através do monitoramento do perfil da chama.

b) Com os dados coletados no vídeo, Construa uma tabela registrando os valores do índice n do harmônico, o número de nós, λ_n e f_n.

c) Faça o gráfico de f_n versus $n/2L$. Que tipo de relação é observada? É coerente com as equações que definem a onda estacionária?

d) Obtenha a velocidade das ondas de som no gás a partir deste gráfico.

Bibliografia

TIPLER, P. A. **Física.** 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1999. v. 1.