



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Biológicas
Departamento de Física

Oscilações & Ondas

(Roteiros de experimentos)

JUNHO / 2002

Sumário

Apresentação	3
Regras de segurança	4
Resumo da teoria de erros	5
Experimentos	
1. Oscilações Mecânicas - Pêndulo	6
2. Oscilações Eletromagnéticas – Circuito RLC	9
3. Ondas Estacionárias – Velocidade do Som	13
4. Ondas Estacionárias – Corda Vibrante	17
5. Oscilações Mecânicas Forçadas – Ressonância	21
6. Interferência da Luz	24

Obs.: A parte de teoria de erros e os roteiros sobre Interferência da Luz foram gentilmente cedidos pelo Departamento de Física da UFMG

Apresentação

O presente caderno contém práticas de laboratório de Oscilações e Ondas – FIS213. Cada prática compreende (1) uma introdução, (2) um roteiro e (3) um questionário.

Na **introdução** é apresentado um resumo do tema a ser tratado. São ainda fornecidas as equações, bem como gráficos e ilustrações que possam auxiliar na compreensão dos fenômenos envolvidos. Referências bibliográficas básicas serão indicados para uma leitura complementar.

O **roteiro** compreende todos os passos para a realização do experimento. Aqui serão descritas as etapas de montagem do experimento, as instruções de operação dos aparelhos de medida, e o procedimento da coleta de dados experimentais. Um experimento bem sucedido depende de uma coleta de dados cautelosa, e portanto todas as informações contidas no roteiro, além de eventuais informações adicionais dadas pelo seu professor, devem ser observadas e obedecidas. O roteiro termina com um tratamento matemático dos dados experimentais, seguido de uma análise ou interpretação física dos resultados.

Finalmente, é proposto um **questionário** que testará a aprendizagem referente ao tema trabalhado. Com uma preparação prévia para a prática, como a leitura da introdução e das referências adicionais, e com uma participação ativa na realização de todos os itens do experimento, o questionário poderá ser respondido sem quaisquer problemas.

Comunicamos que, neste semestre estaremos trabalhando de forma diferente dos semestres anteriores em todos os laboratórios de Física.

O que é novo?

- (1) Os laboratórios foram adaptados para conter várias mesas de trabalho, sendo que em cada mesa um grupo de quatro a seis estudantes estará realizando uma prática diferente.
- (2) Os estudantes poderão fazer cópia via Internet, ou cópia xerox da apostila de práticas da sua disciplina, a ser usada no semestre inteiro.
- (3) Os estudantes, previamente informados da data e da prática com a qual trabalharão, realizarão a montagem do experimento sem a necessidade da ajuda do professor, que estará, por seu turno, monitorando até seis grupos distintos.

O que permanece?

- (1) O sistema de avaliação continua inalterado. O laboratório retém 25% dos pontos na avaliação global disciplina, a teoria, 75%.
- (2) A participação em laboratório, a realização do relatório e do questionário compreendem 60% na nota de laboratório. Os 40% restantes serão computados em forma de avaliações escritas.
- (3) Embora a realização das práticas seja em grupo, o relatório e o questionário devem ser respondidos individualmente.
- (4) Reiteramos que as datas marcadas para laboratórios devem ser seguidas pelos estudantes, e não serão toleradas mudanças de turma, tomadas espontaneamente por parte do aluno. Casos de doença ou outros acidentes serão analisados como excepcionalidades.



A T E N Ç Ã O !

Como todo trabalho experimental, neste também existem riscos de acidentes. Os equipamentos utilizados em nossas montagens oferecem baixo risco, mas é muito importante que certas regras sejam seguidas, a fim de garantir a sua segurança e a de seus colegas.

1. Deixe sobre a mesa apenas o material necessário ao seu trabalho. **Não coloque** mochilas, pastas, roupas ou qualquer outro **objeto que possa atrapalhar** seu trabalho ou aumentar os riscos existentes.
2. Em caso de **acidentes com equipamentos elétricos**, desligue-os através de chave adequada. Todo circuito do laboratório é protegido com disjuntores, que não permitirão a manutenção de corrente.
3. Caso haja produção de fumaça (curto ou queima de material) abra imediatamente as janelas e saia do ambiente. **Não tome atitudes que possam provocar pânico.**
4. **Em caso de acidentes com colegas**, ajude a removê-los da sala. Evite aglomeração. Em caso de acidente grave, ajude a isolar o local e não tente prestar primeiros socorros, a menos que você tenha treinamento adequado para este fim.
5. **Nunca ligue outros equipamentos elétricos no circuito destinado aos computadores.** Você pode provocar sérios danos à rede do ICEB.
6. **Evite a exposição direta dos olhos aos raios Laser.** Embora as fontes produzam feixes de baixa potência, essa radiação pode provocar sérios danos à retina .

Em cada roteiro foram colocados sinais de advertência, com a finalidade de chamar sua atenção para os riscos inerentes aos procedimentos experimentais. São os seguintes:

Radiação Laser



Choque elétrico



Resumo da teoria de erros

Erros sistemáticos

São aqueles associados a um determinado instrumento (e.g., erro de calibração) ou a uma técnica de medida (erro de projeto). Em geral, estes tipos de erros são difíceis de serem detectados.

Erros aleatórios

São devidos às variações das condições experimentais ou ao erro de apreciação de quem faz a medida. Por exemplo, na medida do tempo de queda de um corpo, deve-se observar o instante em que corpo é solto e o instante em que ele toca o chão. Dificilmente alguém conseguirá fazer duas medidas iguais. Portanto, para se obter o *melhor valor*, a medida deverá ser repetida várias vezes.

Sendo x_i um conjunto de N medidas realizadas, define-se o *valor mais provável* ou *valor médio* $\bar{x}$ e o *desvio padrão* s , respectivamente como

Supondo que a distribuição das medidas seja uma gaussiana, 68% das medidas estarão compreendidas entre $(\bar{x}-s)$ e $(\bar{x}+s)$

Erro de medida

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

O erro Δx na medida de x pode ser definido de várias formas, dependendo do número de medidas que se faz

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N} \quad \Delta x = \frac{s}{\sqrt{N}}$$

$$\Delta x = \frac{\sum |x - x_i|}{N}$$

Quando o número de medidas N for muito grande, todas as definições de Δx tendem para um mesmo valor (verifique!). Para um pequeno número de medidas a distribuição não é mais gaussiana e a definição para o erro passa a ser de gosto pessoal ou por comodidade. Como as calculadoras científicas normalmente fornecem o *valor médio* $\bar{x}$ e o *desvio padrão* s , sugere-se que se uma das duas últimas equações acima como o erro em x . Assim, a forma correta de se apresentar uma medida é

$$x = \bar{x} \pm \Delta x$$

Propagação de erros

Seja y uma função das variáveis $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, ou seja,

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

onde x_i é uma medida com um erro experimental Δx_i , ou seja

$$x_i = x_i \pm \Delta x_i$$

O erro Δy em y devido aos erros Δx_i das medidas de x_i pode ser obtido como:

$$\Delta y = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_3} \Delta x_3 \right| + \dots$$

Exemplo:

Para determinar o período de oscilação de um sistema massa-mola, um aluno mediu a constante elástica da mola e a massa do bloco, encontrando:

$$m = (100,36 \pm 0,03) \text{ g}$$

e

$$k = (200,4 \pm 0,7) \times 10^2 \text{ N/m}$$

O período de oscilação do sistema é

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 1,406 \times 10^{-2} \text{ s}$$

O erro ΔT no período será dado por

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial m} \Delta m \right| + \left| \frac{\partial T}{\partial k} \Delta k \right| = \frac{\pi}{\sqrt{mk}} \Delta m + \pi \sqrt{\frac{m}{k^3}} \Delta k$$

onde $\Delta m = 0,03 \times 10^{-3} \text{ kg}$ e

$$\Delta k = 0,7 \times 10^2 \text{ N/m}$$

Substituindo esses valores na equação, obtém-se

$$\Delta T = 2,66 \times 10^{-5} \text{ s} = 0,00266 \times 10^{-2} \text{ s}$$

Portanto:

$$T = (1,406 \pm 0,003) \times 10^{-2} \text{ s}$$

Observe que o erro é apresentado com apenas um algarismo significativo!



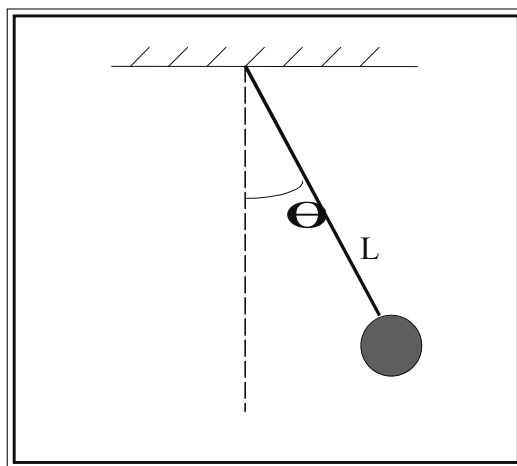
#1 Oscilações Mecânicas - Pêndulo

Introdução

Um sistema mecânico executa um movimento harmônico simples quando um corpo oscila com uma força restauradora do tipo $F = -kx$, ou seja, proporcional ao deslocamento do corpo. A constante (positiva) k depende apenas de características do sistema. Por exemplo, no sistema massa-mola, k é simplesmente a constante elástica da mola. Um segundo exemplo é o de um pêndulo simples, definido como uma sistema no qual um corpo de massa m é suspenso de um ponto O por um fio de massa desprezível e comprimento L . Nesse caso, k é uma relação entre a aceleração local da gravidade (g), o comprimento do fio e a massa do corpo.

Equação diferencial para o sistema massa mola: $m \frac{d^2x}{dt^2} = F = -kx$

Equação diferencial para o pêndulo simples:

$$m \frac{d^2\theta}{dt^2} = F = -\frac{mg}{L} \sin \theta$$


Comparando as equações acima, podemos ver que g/L tem o mesmo papel para o pêndulo simples que a constante elástica k para o sistema massa mola. Fisicamente eles se diferem apenas no tipo de movimento: enquanto no sistema massa-mola o corpo oscila entre dois pontos de extremos de deslocamento (x_m e $-x_m$), no pêndulo simples o corpo oscila entre dois ângulos máximos (θ_m e $-\theta_m$).

Voltemos agora à figura acima, onde o corpo está oscilando entre os pontos B e B'. Pela decomposição das forças que atuam no corpo numa posição genérica θ , vemos que o movimento deve-se à componente tangencial do peso da partícula. Admitimos aqui que as perdas energéticas devido a forças dissipativas, como a resistência do ar, é desprezível.

Pode-se mostrar que o período de oscilações (T) é dependente do comprimento do fio (L), da aceleração local da gravidade (g), e com a amplitude de oscilação máxima (θ_m) através da relação

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}\left[1 + \frac{1}{4}\sin^2\left(\frac{\theta_m}{2}\right) + \dots\right]$$

As reticências indicam que há mais termos na soma entre colchetes, porém, estes termos são funções seno de potência igual ou superior a quatro, e podem ser desprezados no procedimento experimental utilizado no presente experimento.

Objetivo

- Determinar o valor da aceleração do campo gravitacional a partir da oscilação de um pêndulo, considerando grandes amplitudes.

Material Utilizado

- esfera, fio rígido, cronômetro, régua e transferidor.

Procedimento

1. Utilizando um fio fino e uma pequena esfera maciça, construa um pêndulo simples e suspenda-o num suporte rígido;
2. Meça o comprimento do pêndulo do ponto de suspensão ao centro da esfera.
3. Desloque a esfera da posição de equilíbrio; mantendo o fio esticado. Meça o valor do ângulo θ entre o fio e a vertical. Registre na tabela.
4. Libere a esfera;
5. Utilize um cronômetro para medir o período. Para melhores resultados, meça o intervalo de tempo Δt necessário para N oscilações, e obtenha o período a partir da média simples

$$T = \bar{T} = \frac{\Delta t}{N};$$

6. Repita os itens 3, 4 e 5, para um ângulo igual a $-\theta$, ou seja, do lado oposto ao feito anteriormente;
7. Repita os procedimentos dos itens 3, 4 e 5 e 6, variando o ângulo e registre os resultados na tabela).
8. Complete a tabela com os cálculos indicados.
9. Faça um gráfico do período T em função de $\sin^2\left(\frac{\theta_m}{2}\right)$ (Indique as grandezas nos eixos coordenados).
10. Faça uma regressão linear a fim de obter a equação da reta que melhor se ajusta aos pontos experimentais: $y = A + Bx$. Esboce esta reta sobre o mesmo gráfico.
11. Determine o valor experimental da aceleração da gravidade (g) a partir dos dados do gráfico e comparação com a equação do período T .
sugestão: compare o valor da inclinação da reta (B) ou do coeficiente linear, obtido pela regressão linear, com os termos da equação do período.

FOLHA DE RESULTADOS : #1 Oscilações Mecânicas - Pêndulo

Nome: _____ Turma: ____ Grupo: ____ Data: _____

$$L = (\quad \pm \quad) \text{ m}$$

N	θ_m	T^+ (s)	T^- (s)	T (s) (médio)	$\text{sen}^2\left(\frac{\theta_m}{2}\right)$
1					
2					
3					
4					
5					

Análise dos resultados

Gráfico

Equação da reta

$$Y = (\quad) + (\quad)x$$

Cálculo da aceleração da gravidade

$$g = (\quad \pm \quad) \text{ m/s}^2$$

Responda às questões abaixo (se necessário, utilize o verso da folha de resultados)

1. Se a esfera for substituída por uma outra mais pesada, o que acontece com o período?
2. Se o fio for substituído por outro de comprimento quatro vezes maior, o que acontece com o período?
3. Em que ponto da trajetória da esfera a força restauradora é máxima? Em que ponto é mínima?
4. Se a força restauradora se anula no ponto mais baixo da trajetória, por que o pêndulo continua o movimento oscilatório?
5. Em que situações o período do pêndulo pode ser considerado como independente da amplitude máxima θ_m ?
6. Se pudermos considerar amplitudes de oscilações muito pequenas, que valor seus dados fornecem para g?
7. O que poderia ser feito para que o valor de g encontrado no experimento estivesse mais próximo do valor conhecido?
8. Podemos considerar que o pêndulo da experiência executa um movimento harmônico simples? Porquê?

#2 Oscilações Eletromagnéticas – Circuito RLC

Introdução



Um circuito elétrico contendo elementos resistivo (R), indutivo (L) e capacitivo (C) é uma aplicação importante de um oscilador harmônico, possibilitando uma discussão quantitativa acerca dos conceitos de oscilações forçadas (através de um gerador de tensão alternada) com amortecimento (energia dissipada por efeito Joule), resposta estacionária (corrente elétrica alternada no circuito), e ressonância (corrente elétrica máxima). A ilustração mais simples é a de um circuito RLC em série alimentado por um gerador de sinal periódico harmônico (frequência f).

Pela lei das malhas sabemos que a queda de tensão (d.d.p.) em cada um dos elementos de circuito é igual à tensão aplicada (força eletromotriz ε):

$$\varepsilon = V_R + V_L + V_C \quad (1)$$

onde

$$V_R = Ri(t) \quad V_L = L \frac{d}{dt}[i(t)] \quad V_C = \frac{q(t)}{C} \quad \varepsilon(t) = V_m \sin \omega t \quad (2)$$

A corrente elétrica $i(t)$ no circuito, e a carga $q(t)$ acumulada nas placas do capacitor estão relacionadas por:

$$i = \frac{d}{dt}[q(t)] \quad (3)$$

Portanto, a equação (1) pode ser vista como uma equação diferencial de segunda ordem para a corrente. A solução estacionária dessa equação é a corrente elétrica, também denominada de *resposta* do circuito à tensão aplicada. Conforme a propriedade geral de qualquer oscilador harmônico, dever-se-ão observar oscilações na mesma frequência aplicada, porém, com fase distinta:

$$(4) \quad \begin{aligned} i(t) &= i_m \sin(\omega t - \phi) & \text{onde } i_m : \text{amplitude de corrente} \\ \tan \phi &= (X_L - X_C)/R & \phi : \text{fase} \\ \omega &= 2\pi f & \omega : \text{frequência angular} \end{aligned}$$

A amplitude de corrente é função da frequência através de Z , a impedância do circuito:

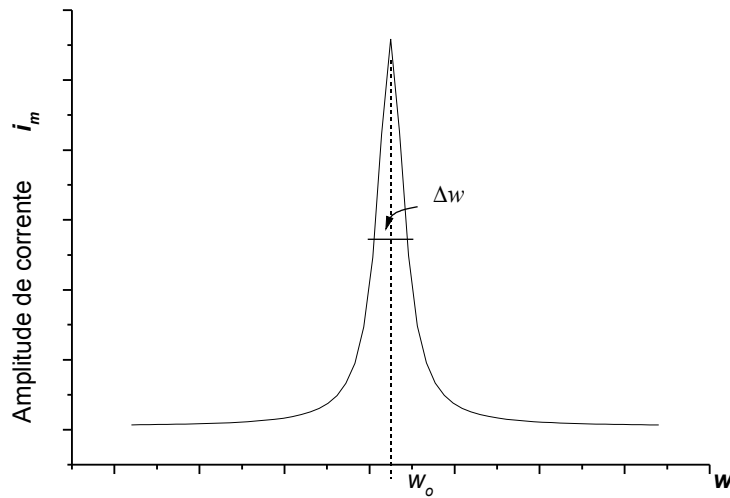
$$i_m(\omega) = \frac{V_m}{Z}; \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (5)$$

A impedância representa uma soma (não algébrica) de todos os fatores responsáveis pela atenuação ou pela defasagem da corrente, compreendendo, além da resistência R , a reatância indutiva $X_L = \omega L$, e a reatância capacitiva $X_C = 1/\omega C$.

Observe que a impedância é uma função bem comportada da frequência, tendo seu valor mínimo quando $X_L = X_C$. Esta é a chamada *condição de ressonância*. É fácil mostrar que isto ocorre com a condição de que $\omega = \omega_0$, onde $\omega_0^2 = 1/(LC)$. Assim, como em qualquer oscilador harmônico forçado, em condições de ressonância, o sistema deverá na sua frequência natural (ou característica) ω_0 e a amplitude das oscilações deverá atingir um valor máximo:

$$i_m(\omega_0) = \frac{V_m}{R} \quad (6)$$

Na ilustração abaixo é mostrada uma curva de ressonância para um circuito RLC específico.



$$R = 10 \, \Omega$$

$$L = 100 \, \text{mH}$$

$$C = 4 \, \text{nF}$$

$$\omega_0 = 50 \, \text{k rad/s}$$

$$V_m = 3 \, \text{V}$$

$$i_m(\omega_0) = 300 \, \text{mA}$$

$$\Delta\omega = 0,173 \, \text{k rad/s}$$

Observe que, para valores de frequência $\omega = \omega_0 \pm \frac{\Delta\omega}{2}$, a amplitude de corrente cai à metade do seu valor máximo $i_m(\omega_0)$. Assim, uma medida quantitativa da definição dessa curva é dada pela largura $\Delta\omega$ à meia altura do pico de ressonância. Pode-se ainda mostrar que a largura de linha é dada aproximadamente por

$$\Delta\omega \approx \sqrt{3} \frac{R}{L} \quad (7)$$

Objetivos

- Estudar o comportamento da resposta de um oscilador harmônico a uma oscilação forçada com amortecimento, através de um circuito elétrico RLC.
- Obter a curva de ressonância para o mesmo circuito.

Material Utilizado e Montagem Experimental

- Gerador de funções
- Indutor, capacitor, resistor
- Protoboard e cabos de conexões elétricas
- Multímetro: voltímetro, miliamperímetro, ohmímetro
- Inducímetro, capacímetro

Procedimento Experimental

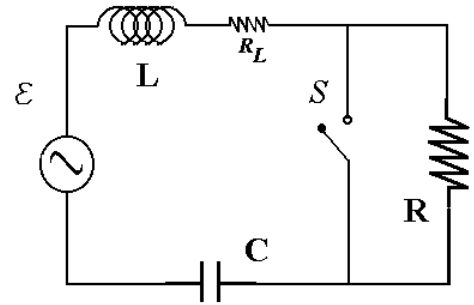
1. Registre os valores nominais da indutância L e da capacitância C a serem utilizados no experimento. Utilize o inducímeter e o capacímetro para obter medidas diretas destas grandezas. Coloque o multímetro na função “ohm” e meça a resistência do indutor (R_L).

Valores nominais $L=$ $C=$ $R_L=$

Valores medidos $L=$ $C=$ $R_L=$

2. Monte o circuito representado na figura ao lado. O gerador de funções, o voltímetro e o amperímetro devem estar inicialmente desligados. R é um reostato. A chave S deve estar ligada.

Certifique-se também de que a chave seletora de amplitude do gerador esteja na posição de mínimo. Insira o voltímetro em paralelo com o gerador e o miliamperímetro em série no circuito. Escolha os fundos de escala mais elevados para os medidores.



3. Solicite ao seu professor que confira a montagem do circuito antes de ligar qualquer dos aparelhos à rede.
4. Calcule e anote os valores teóricos para a frequência de ressonância f_0 e para a largura da curva de ressonância (Δf).
5. Coloque a chave seletora de sinais do gerador na opção funções senoidais. Ajuste a frequência para o valor calculado da frequência característica. Aumente gradativamente a amplitude da tensão no gerador até o voltímetro detectar ___ V. Durante todo o experimento a tensão deverá ser mantida neste valor. Anote o valor correspondente da amplitude de corrente detectada no amperímetro.
6. Varie a frequência no gerador, e observe a variação correspondente no miliamperímetro. Importante: é possível que a tensão se altere nesta etapa; neste caso, ajuste-a novamente para o valor inicial (item 5), antes de fazer a leitura no amperímetro.
7. Procure dois valores de frequência (um muito acima e outro muito abaixo da frequência característica) para os quais a amplitude de corrente diminuiu consideravelmente. Estes são os limites do intervalo de frequência no qual você deverá fazer a varredura, ou seja, a variação da frequência, registrando numa tabela os valores de frequência e de corrente lidos. Procure não subdividir em intervalos iguais, mas sim optando por fazer mais medições dentro da região $f_0 - \frac{\Delta f}{2} \leq f \leq f_0 + \frac{\Delta f}{2}$, que é o intervalo onde a variação da corrente é maior.

FOLHA DE RESULTADOS : #2 Oscilações Eletromagnéticas – Circuito RLC

Nome: _____ Turma: ____ Grupo: ____ Data: _____

Frequência angular característica calculada: $\omega_o =$
 Frequência característica calculada: $f_o =$
 Largura à meia altura calculada: $\Delta f =$

$f \text{ (Hz)}$												
$i_m \text{ (mA)}$												

$f \text{ (Hz)}$												
$i_m \text{ (mA)}$												

$f \text{ (Hz)}$												
$i_m \text{ (mA)}$												

Análise Gráfica

- Marque os pontos experimentais obtidos nos item anterior em um gráfico $i_m(f) \times f$.
- Indique as grandezas e as dimensões nos eixos coordenados
- Trace uma linha suave que se ajuste aproximadamente aos pontos do gráfico.
- Estime os valores da frequência de ressonância e da largura à meia altura e compare-os com os resultados correspondentes previstos nos cálculos (**Procedimento**: item 4).

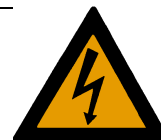
Responda às questões abaixo (se necessário, utilize o verso da folha de resultados)

1. Compare os valor da amplitude de corrente máxima com o valor esperado através do cálculo (eq. 6).
2. Ao ajustar o reostato R para um valor de aproximadamente 10 vezes maior que a resistência R_L do indutor, mantendo ainda a chave S desligada,
 - (a) o que ocorre com a amplitude de corrente máxima? Justifique.
 - (b) o que ocorrerá com a largura à meia altura? Justifique.
 - (c) Com base nesses valores, esboce a curva de ressonância no primeiro gráfico.

#3 Ondas Estacionárias – Velocidade do Som

Objetivo

Determinar a velocidade do som no ar.



Introdução

Ondas sonoras - São aquelas vibrações capazes de impressionar nosso sentido auditivo. Como vivemos em uma atmosfera de ar, as ondas sonoras são vibrações no ar. É razoável supor que estas vibrações se propaguem como as de uma mola devido à compressibilidade do ar; suporemos que as ondas sonoras são, pois, longitudinais. O ouvido é sensível a vibrações compreendidas no intervalo de 20 a 20.000 oscilações por segundo (20 a 20.000Hz).

A velocidade de propagação de uma onda mecânica depende da propriedade inercial e da elástica do meio no qual se propaga. Para uma onda sonora, a velocidade v de propagação é dada por

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}},$$

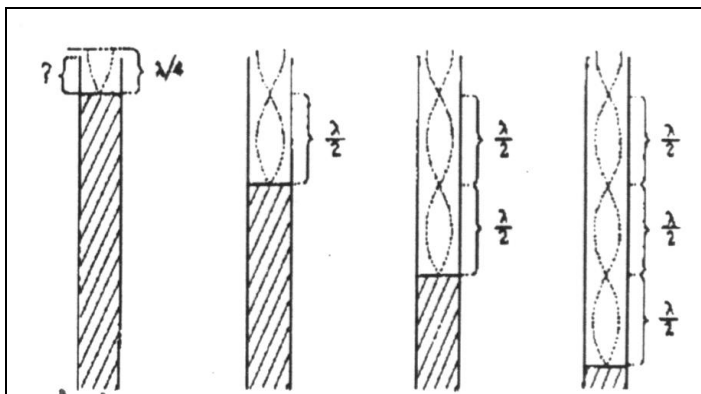
onde a propriedade inercial é a densidade ρ do meio e a propriedade elástica é o módulo de elasticidade volumar B .

Tabl.

Material	B (10^7 N/m ²)	ρ (Kg/m ³)	v (m/s)
Ar			
0° C, 1 atm	0,014	1,29	331
20° C, 1 atm	0,014	1,20	344
100° C, 1 atm	0,0090	0,598	386
Hélio, 0° C, 1 atm	0,017	0,178	965
Água destilada	$0,22 \times 10^3$	$1,000 \times 10^3$	1497
Alumínio	$7,0 \times 10^3$	$2,7 \times 10^3$	5104
Ferro	$\sim 20 \times 10^3$	$7,9 \times 10^3$	5130
Vidro pyrex	$6,2 \times 10^3$	$2,32 \times 10^3$	5170

A tabela 1 mostra os valores de B , da densidade ρ e da velocidade do som para diferentes materiais.

Um método simples de medida da velocidade do som no ar utiliza ondas estacionárias em um tubo. No tubo, com uma das extremidades aberta e outra fechada, as ondas sonoras que se propagam em seu interior são refletidas com defasagem de 180°. A interferência entre as ondas incidentes e refletidas dá origem às ondas estacionárias, que são os modos normais de vibração da coluna de ar contida no tubo.



A figura mostra graficamente os primeiros modos normais de vibração da coluna de ar no tubo. A distância entre dois nós consecutivos é igual a meio comprimento de onda ($\lambda/2$).

A onda estacionária deve ter um nó de deslocamento na extremidade fechada, já que, nesse lugar, o movimento do ar é impedido pela parede do tubo. A onda deve ter um anti-nó (ou ventre) de deslocamento em algum ponto próximo à extremidade aberta.

Próximo dessa extremidade, a pressão na região provocará um movimento do ar com objetivo de cancelar a variação de pressão. Assim, a atmosfera em volta do tubo se comporta como um *reservatório de pressão constante*. Portanto, próximo à extremidade aberta haverá um nó de pressão, que corresponde a um anti-nó de deslocamento. Na verdade, isto é apenas uma descrição aproximada, pois as ondas sonoras que são irradiadas da extremidade aberta produzem oscilações periódicas na pressão do ar ao seu redor. Desta forma, o nó de pressão não está localizado exatamente na extremidade aberta, mas próximo dela.

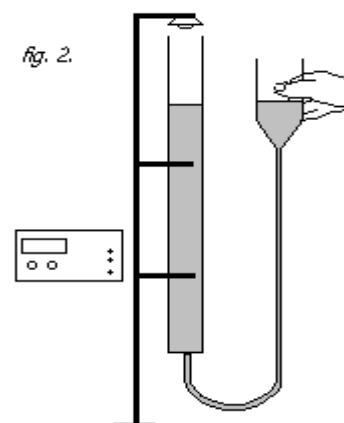
Produzindo-se uma onda sonora na extremidade aberta do tubo, haverá uma *ressonância* sempre que a *freqüência da onda coincidir com uma das freqüências naturais do tubo*. Na condição de ressonância a intensidade da onda sonora é máxima. Se a freqüência da onda sonora for mantida fixa e variarmos o comprimento do tubo, poderemos determinar os comprimentos de onda da onda nas situações de ressonância e conseqüentemente, a sua velocidade de propagação.

Material Utilizado

- Gerador de áudio;
- Um auto-falante;
- Um tubo cilíndrico contendo água.

Procedimento Experimental

A montagem experimental consiste de um tubo aberto numa extremidade e fechado em outra pela superfície da água. O comprimento da coluna de ar no tubo pode ser modificado variando a altura do reservatório d'água(fig.2).



1. Ajuste o gerador de áudio para produzir uma onda senoidal de freqüência acima de 800 Hz.
2. Mantendo o ouvido próximo à extremidade aberta, mova lentamente o recipiente de água. Quando você ouvir um som forte e característico, terá encontrado o comprimento da coluna de ar que satisfaz a condição de ressonância. Anote, na tabela abaixo, o valor do comprimento(ℓ_n) da coluna de ar usando a escala do tubo.
3. Mova novamente o recipiente e procure as sucessivas posições de ressonância, anote cada um deles na primeira tabela.
4. Calcule o valor da velocidade do som no ar, v , para cada λ medido.
5. Calcule o valor médio da velocidade e seu respectivo desvio médio Δv .

$$\text{Valor médio: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i x_i; \quad \text{Erros: } \Delta x = \frac{1}{n} \sum_i |\Delta x_i| \quad \text{sendo } \Delta x_1 = x_1 - \bar{x}, \Delta x_2 = x_2 - \bar{x}, \dots, \Delta x_n = x_n - \bar{x}.$$

6. Repita os procedimentos 1,2, 3, 4 e 5 e complete as tabelas seguintes.

FOLHA DE RESULTADOS : #3 Ondas Estacionárias – Velocidade do Som

Nome: _____ Turma: ____ Grupo: ____ Data: _____

F (Hz)=			
ℓ (m)	$\lambda/2$ (m)	λ (m)	$v = \lambda \cdot F$ (m/s)
	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXX
δ ($v \pm \Delta v$) =			

F (Hz)=			
ℓ (m)	$\lambda/2$ (m)	λ (m)	$v = \lambda \cdot F$ (m/s)
	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXX
δ ($v \pm \Delta v$) =			

F (Hz)=			
ℓ (m)	$\lambda/2$ (m)	λ (m)	$v = \lambda \cdot F$ (m/s)
	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXXXX
δ ($v \pm \Delta v$) =			

Nome: _____ Turma: ____ Grupo: ____ Data: _____

QUESTÕES

1. Pelo experimento, qual o valor médio da velocidade de propagação do som no ar?
2. Cite possíveis fontes de erros em nosso experimento.
3. Utilizando o esquema da figura 1, mostre que, para um tubo de comprimento l , os comprimentos de onda das ondas estacionárias são dados por $\lambda = \frac{4l_n}{n}$, sendo $n = 1, 3, 5, 7, \dots$
4. Mostre que as frequências correspondentes à equação acima são dadas por $f = n \frac{v}{4l_n}$.
5. Considerando as dimensões do tubo, o experimento poderia ser realizado para qualquer outro valor de frequência?
6. Observando a tabela 1, por que a velocidade do som em líquidos e sólidos é, geralmente, maior que em gases?

#4 Ondas Estacionárias – Corda Vibrante

Introdução

Considere uma corda de comprimento L , densidade linear de massa μ , submetida a uma tensão T . Pode-se demonstrar, a partir das leis de Newton, que a velocidade de

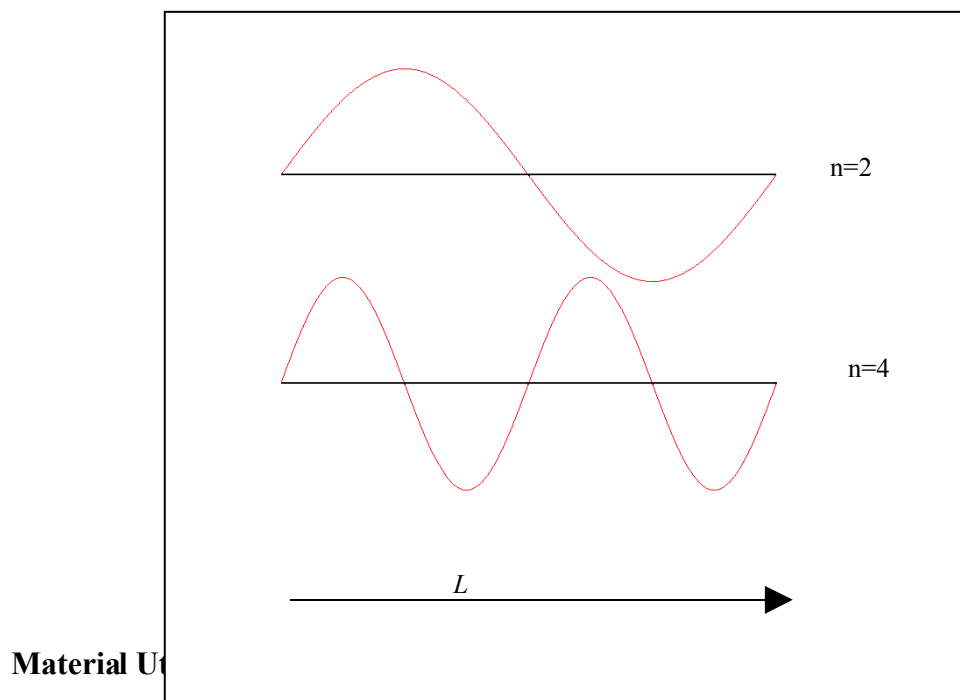
propagação de um pulso, ou de ondas transversais de pequena amplitude, nesta corda é dependente apenas da tensão aplicada à corda e da sua densidade linear de massa:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Podemos estabelecer ondas estacionárias numa corda, cujas extremidades são fixas, aplicando-lhe uma força externa periódica. As ondas introduzidas na corda devido à força externa são refletidas nas extremidades da mesma e somam-se às ondas que se propagam em direção às extremidades. Desta maneira, podemos ter situações de interferência construtiva e situações de interferência destrutiva. Quando uma condição de interferência construtiva é obtida, forma-se na corda uma onda estacionária.

A condição de contorno que determina a interferência construtiva é que os extremos da corda devem ser um nó do deslocamento. Portanto, teremos ondas estacionárias na corda quando o comprimento desta for um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda da onda gerada pela força externa. Matematicamente, esta condição é dada por:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

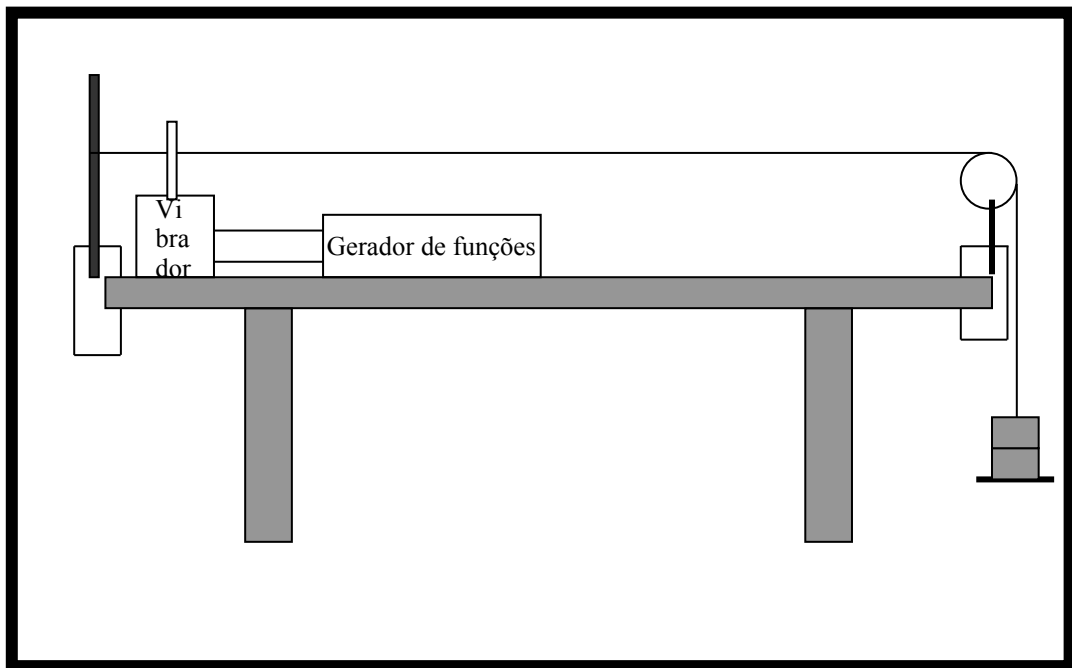


Material Utilizado:

- Um vibrador mecânico;
- Um gerador de funções com amplificador embutido (PASCO PI-9587C);
- Um estroboscópio (PASCO SF-9211);
- Uma corda (PASCO SE-9409);
- Duas garras de mesa;
- Uma polia;
- Uma haste (~50cm);
- Um conjunto de massa (~100g – 300g);

Uma balança.

Montagem Experimental



Procedimento Experimental

- 1) Trave o eixo do vibrador mecânico, colocando a chave na posição *LOCK*;
- 2) Introduza o adaptador banana para cordas no eixo do vibrador mecânico;
- 3) Meça a massa da corda. Registre este valor;
- 4) Meça o comprimento da corda. Registre este valor;
- 5) Amarre uma das extremidades da corda na haste;
- 6) Posicione a haste verticalmente num dos lados da bancada, utilizando para isto uma garra de mesa;
- 7) Prenda uma massa (~100g) a outra extremidade da corda;
- 8) Posicione a polia no lado oposto da bancada, utilizando a outra garra de mesa;
- 9) Passe a corda pela polia, de modo que a massa fique dependurada;
- 10) Coloque o vibrador o mais próximo possível da haste que segura a corda, passando a mesma pelo adaptador banana que está adaptado no seu eixo;
- 11) Confira a horizontalidade da corda, assim como o seu alinhamento entre a haste e a polia;
- 12) Meça o comprimento entre as extremidades presas da corda. Registre;
- 13) Conecte o vibrador mecânico à saída de baixa impedância do gerador de funções;
- 14) Verifique a tensão de operação do gerador e conecte-o à rede elétrica;
- 15) Confira a montagem com o seu professor;
- 16) Destrave o eixo do vibrador mecânico, posicionando a chave na posição *UNLOCK*;
- 17) Ligue a fonte e selecione a opção ondas senoidais e também amplitude mínima do sinal;
- 18) Inicialmente, escolha uma frequência de 10Hz;
- 19) Aumente a amplitude do sinal, tomando cuidado para que a amplitude de oscilação da corda no ponto de contato com o gerador não ultrapasse 1mm. Desta forma, você garante que tem neste ponto um nó;
- 20) Aumente a frequência do sinal até obter uma onda estacionária na corda. Registre a frequência e o número de meios comprimentos de onda estabelecidos na corda;
- 21) Neste ponto, utilize o estroboscópio para uma melhor visualização da onda estacionária, ajustando a sua frequência para a mesma frequência do gerador de sinais;
- 22) Repita os itens 20 e 21 do procedimento anterior até obter quatro ou cinco ondas estacionárias diferentes;
- 23) Minimize a amplitude do sinal e trave o eixo do gerador;
- 24) Troque a massa por outra de ~200g, destrave o eixo do gerador e repita os procedimentos 20 a 23 para obtenção de ondas estacionárias;
- 25) Troque novamente a massa por outra de ~300g e repita novamente o procedimento para obtenção de ondas estacionárias;
- 26) Encerre o seu experimento;
- 27) Faça numa mesma folha de papel milimetrado os gráficos da frequência em função do número de meios comprimentos de onda para cada série de medidas;
- 28) Determine a velocidade de propagação das ondas para cada curva. Compare com os valores obtidos com o valor teórico $v = (T/\mu)^{1/2}$.

FOLHA DE RESULTADOS : #4 Ondas Estacionárias – Corda Vibrante

Nome: _____ Turma: ____ Grupo: ____ Data: _____

A) Dados sobre a corda:

Comprimento total: L_0 = _____
 Comprimento entre extremos presos: L = _____
 Massa: m = _____
 Densidade linear de massa: μ = _____

B) Corda vibrante:

	M_1 =	M_2 =	M_3 =
Número de $\lambda/2$	T_1 =	T_2 =	T_3 =
n	Frequência(Hz)	Frequência(Hz)	Frequência(Hz)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

C) Análise gráfica:

Para cada coleção de medidas (cada coluna da tabela acima), obtenha a relação frequência em função de n, $f(n)$, que deve ser uma relação linear do tipo $f = Bn + A$, onde A e B são parâmetros determinados experimentalmente.

Considerando que $v = \lambda f$ e $L = n\lambda/2$, obtenha o valor da velocidade de propagação da onda para cada coleção de medidas.

v_1 = _____
 v_2 = _____
 v_3 = _____

Compare estes valores com a previsão teórica $v_T = (T/\mu)^{1/2}$, onde as tensões são

v_{T1} = _____
 v_{T2} = _____
 v_{T3} = _____

Responda às questões abaixo no verso da folha de resultados

1. Explique o que são ondas progressivas e ondas estacionárias.
2. O que é interferência construtiva? E destrutiva?
3. Como se relacionam o comprimento L de uma corda vibrante e o comprimento de onda λ de uma onda estacionária nesta corda? Ilustre.

#5 Oscilações Mecânicas Forçadas - Ressonância

Objetivos

Observar o fenômeno de ressonância em sistemas massa-mola e determinar constantes elásticas de molas pelo método dinâmico;

Introdução

Quando um sistema massa-mola sem atrito, composto por uma mola de constante elástica k e um bloco de massa m , é distendido de sua posição de equilíbrio, ele irá oscilar com sua frequência angular natural ω_0 , onde $\omega_0^2 = k/m$, e com amplitude de oscilação constante. Este movimento é chamado de oscilações livres.

Entretanto, quando o sistema está sujeito a forças externas que possam retirar ou ceder energia para o sistema, tanto a amplitude quanto a frequência de oscilação deverão variar. Forças dissipativas, como atritos, causam perdas de energia e, conseqüentemente, reduzem a frequência e a amplitude de oscilação; e forças externas harmônicas forçam o sistema a oscilar numa determinada frequência ω (em geral diferente de ω_0) além de alterarem sua amplitude. Neste caso os movimentos resultantes observados são chamados de oscilações forçadas.

Observa-se que o sistema irá oscilar com a frequência angular da força externa e com amplitude bem definida. A presença do amortecimento causado pelas forças dissipativas tende a reduzir a amplitude de oscilação, mas isto não ocorre porque a força externa fornece a energia necessária para manter a amplitude do movimento constante.

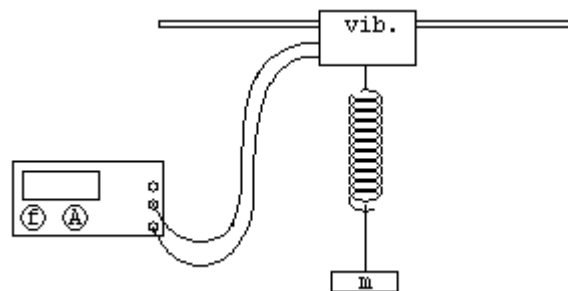
Em condições de ressonância, ou seja, quando a frequência da força externa é igual à frequência natural do sistema, a amplitude de oscilação é máxima e o valor da frequência de ressonância pode ser determinado por

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (m \text{ é a massa do sistema e } k \text{ é a constante elástica da mola}).$$

Isto ocorre porque a velocidade do bloco está em fase com a força externa, provocando uma absorção máxima de energia da força externa, e conseqüentemente, fazendo com que a amplitude de oscilação seja máxima.

Material Utilizado

- Molas e massas;
- Balança;
- Cronômetro;
- Vibrador;
- Gerador de frequência;
- Cabos de conexão elétrica.
- Suporte rígido vertical.



Montagem Experimental (segunda parte)

Procedimento Experimental

1. Pegue uma mola com respectivo suporte, coloque uma das massas no suporte e “pese” o conjunto (escolha de tal modo que o valor esteja compreendido no intervalo $20,0\text{g} < m < 95,0\text{g}$). Anote o valor na tabela.
2. Prenda a outra extremidade da mola em um suporte rígido vertical.
3. Determine a frequência natural esperada, f_{esperado} , de oscilação do sistema massa-mola. Para isto, basta fazer o sistema oscilar no sentido longitudinal da mola, medir o período (T) de oscilação com um cronômetro (*para melhor precisão conte o número de oscilações ocorridas em 30 ou 60 segundos*) e calcular a $f = 1/T$. Anote na tabela.
4. Agora, prenda o conjunto massa-mola no pino apropriado do vibrador.
5. Ligue o gerador de frequência, com o botão de amplitude no mínimo.
6. Escolha três valores quaisquer de frequência, aumente a amplitude do gerador e observe se há oscilação e ressonância para tais valores.
7. Escolha alguns valores de frequência próximos do f_{esperado} e observe a amplitude de oscilação do bloco;
8. Através do ajuste na frequência do gerador, e com passos de $0,001\text{Hz}$, anote no espaço da tabela, o valor para o qual lhe parece que ocorre ressonância (*cada integrante do grupo deverá “procurar” o valor no qual a amplitude de oscilação do bloco é máxima e a massa está em fase de movimento com o pino*).
9. Calcule o valor médio, $\bar{f}_o$, dos valores obtidos no item 8. Registre na tabela;
10. Repita todos os procedimentos anteriores para outras três massas diferentes (*As massas devem diferir de aproximadamente 20g para que o valor de $\bar{f}_o$ não seja repetido*).
11. Construa o gráfico $\bar{f}_o^2 \times \frac{1}{m}$ no espaço reservado abaixo e determine a equação da reta que se ajusta melhor aos pontos experimentais;
12. Comparando a equação da reta anterior com a fórmula para a frequência de ressonância, determine o valor experimental da constante elástica da mola, k .
13. Utilizando o programa ORIGIN do computador do laboratório construa o gráfico $\bar{f}_o^2 \times \frac{1}{m}$ (*O programa fornece a equação da reta com respectivos erros*).
14. Determine o valor de k com resultados do gráfico do programa.



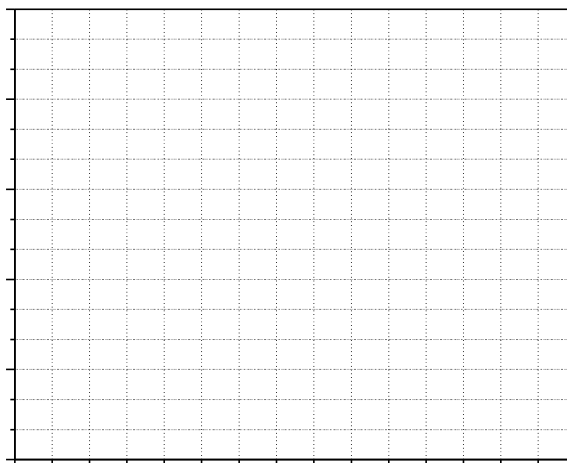
Nome: _____

Turma: _____

Grupo: _____

Data: _____

Massa do sistema Massa-Mola (kg)	Período T(s)	f_{esperado} (Hz)	f_o medido (Hz)					$\bar{f}_o$ (Hz)

Equação da reta: $y = Bx + A$ $y = (\quad)x + (\quad)$

Cálculo da constante elástica:

 $k = (\quad) \text{N/m}$

Cálculo da constante elástica pelo gráfico do programa

 $k = (\quad \pm \quad) \text{N/m}$ **Questão:** Podemos determinar o valor da constante k por outro experimento. Descreva-o.

#6 Interferência da Luz

Objetivo

Análise das propriedades ondulatórias da luz e sua utilização para medidas.



Introdução: A natureza ondulatória da luz

No ano de 1800, a teoria mais aceita da luz, era a teoria corpuscular que havia sido desenvolvida por Isaac Newton. Thomas Young foi um dos poucos cientistas que teve coragem suficiente para colocar em dúvida os ensinamentos de Newton. Young acreditava que a luz, como o som, devia consistir de ondas.

Podemos fazer uma analogia com ondas em água: na superfície de água, ondas produzidas por duas fontes cujas vibrações são sincronizadas passam uma sobre a outra formando interferências construtivas e destrutivas (os nós, onde a amplitude é zero).

Ocorre a interferência construtiva se a diferença de caminho das duas fontes a um dado ponto for de um número inteiro (N) de comprimento de onda (λ). Assim, as ondas reforçam-se e ocorrem máximos de intensidade.

$$D_2 - D_1 = N\lambda \quad (N=1,2,3\dots)$$

A interferência será destrutiva se a diferença de caminho for de frações do λ :

$$D_2 - D_1 = (N + 1/2)\lambda \quad (N=0,1,2,3\dots)$$

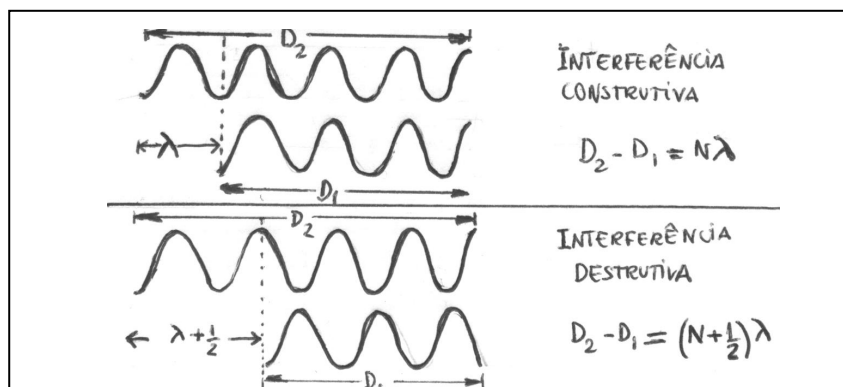


Fig.1

Young raciocinou que, se estivesse certo, seria capaz de produzir, **para a luz**, uma figura de interferência semelhante à das ondas aquáticas. Como fonte dupla de luz, ele usou duas fendas estreitas, iluminadas por uma única fonte. Pela teoria corpuscular, somente imagens das fendas sobre a tela deveriam ter sido observadas. Em 1803, muitos anos após a morte de Newton, Young obteve uma série de franjas de interferência sobre uma tela (anteparo). A assim chamada experiência de Young é representada nas esquematicamente nas figuras 2 e 3.

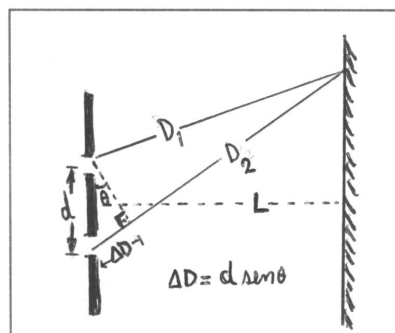


Fig.2

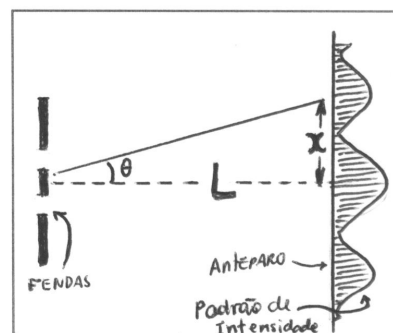


fig.3

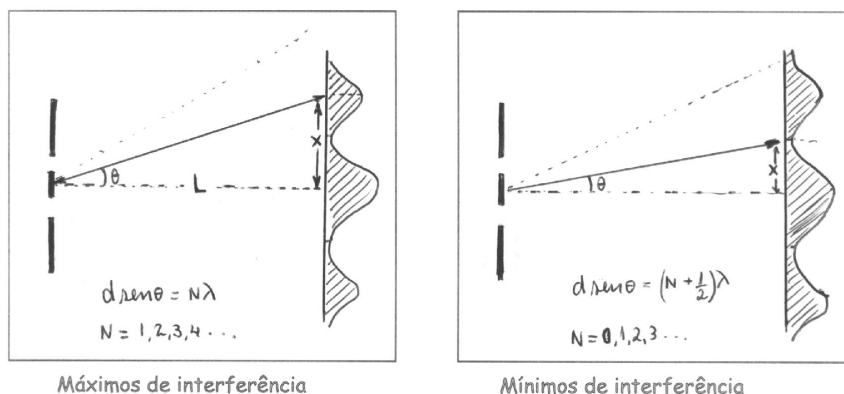
Os centros das franjas são máximos de intensidade correspondentes às diferenças de caminho $(D_1 - D_2) = \Delta D = N\lambda$. Esta diferença de caminho é o lado marcado ΔD do pequeno triângulo da figura e expressa a condição para o máximo de intensidade. De acordo com a definição do seno de um ângulo, o lado esquerdo da equação acima é o seno de θ no pequeno triângulo. Portanto a condição sobre θ para **os máximos** de interferência é

$$d \cdot \sin\theta = N \cdot \lambda \quad , \text{ com } N = 1, 2, 3, \dots$$

Observe que, para $N=1$, a distância X do máximo central ao primeiro máximo secundário é medida no anteparo; se θ é pequeno, para $N=2$ a distância X' do máximo central até o segundo máximo secundário dobra; e assim por diante.

Analogamente, Se medirmos a distância X entre o máximo central e **os mínimos** de interferência, a relação matemática a ser utilizada será

$$d \cdot \sin\theta = (N + 1/2) \lambda \quad , \text{ com } N = 0, 1, 2, \dots$$



A figura acima esquematiza o experimento de Young para fenda dupla.

OBS: A difração de cada fenda da experiência de Young pode ser compreendida em termos de interferência dos raios de luz provenientes de diferentes pontos da fenda. No caso de se utilizar uma **fenda única** de largura a (ou um objeto estreito, como por exemplo, **um fio de cabelo** de espessura a), podemos utilizar a seguinte relação matemática para os **mínimos de difração**:

$$a \cdot \sin\theta = N \cdot \lambda \quad , \text{ com } N = 1, 2, 3, \dots$$

Com todas as informações dadas acima, podemos, a partir de experimentos, medir as larguras de objetos extremamente estreitos, desde que o comprimento de onda da fonte de luz utilizada seja conhecido.

Material utilizado

Uma fonte laser ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$), fenda simples (diafragma), fenda dupla, trena e papel.

Procedimento Experimental

- 1- Meça a distância L das fendas ao anteparo (*à parede*). Anote na folha de respostas.
- 2- Coloque o diafragma diante do laser e projete as franjas no anteparo.
- 3- Observe o que acontece com as franjas de difração quando a luz passa por fendas cada vez mais estreitas (*comente com seus colegas de grupo*).
- 4- Escolha uma fenda dupla e coloque uma folha de papel no anteparo e reproduza a figura das franjas. (Sugestão: faça um traço horizontal a lápis sobre as franjas de interferência, marque o centro do anteparo, cada a posição de máximo e de mínimo, de forma que você possa indexá-los ao trabalhar com a folha de papel na mesa).
- 5- A partir da figura obtida, use uma régua milimetrada para medir as distâncias X entre o máximo central e o primeiro máximo secundário de interferência ($N=1$). Com o mesmo procedimento as posições X do segundo ($N=2$) e do terceiro ($N=3$) máximo secundário; complete a tabela 1.
Repita agora o procedimento para os mínimos de interferência ($N=0, 1, 2$) e complete a tabela 2.
- 6- A partir das equações anteriores, complete as tabelas 1 e 2 calculando a distância d entre as fendas.
- 7- Agora, use uma **fenda simples** (ou **um fio de cabelo**) e repita o procedimento anterior para identificar os mínimos de difração; a seguir, complete a tabela 3 e calcule sua espessura a .

FOLHA DE RESULTADOS : #6 Interferência da Luz

Nome: _____ Turma: ____ Grupo: ____ Data: _____

1 - Para a fenda dupla:

$L =$

Tab.1

N	X(m)	L(m)	$\text{sen}\theta \cong \text{tg}\theta$	d(mm)

Tab.2

N	X(m)	L(m)	$\text{sen}\theta \cong \text{tg}\theta$	d(mm)

Assim, o valor médio da distância entre as fendas é $d =$ mm.

2 - Para uma fenda simples (ou um fio de cabelo)

Tab.3

O fio de cabelo tem espessura $a =$ mm

N	X(m)	L(m)	$\text{sen}\theta \cong \text{tg}\theta$	d(mm)

Responda às questões abaixo (se necessário, utilize o verso da folha de resultados)

1. Apesar de termos feito analogias entre ondas sonoras e aquáticas com as ondas de luz, elas não são de mesma natureza. Qual é a diferença capital?
2. Por que e como foi feita a aproximação de $\text{sen}\theta \cong \text{tg}\theta$?
3. No experimento, o que acontece com as franjas quando aumentamos a abertura do diafragma?
4. Por que o experimento pode ser mais bem aplicado para medidas de fios cada vez mais finos?
5. Dê um argumento a favor da teoria ondulatória da luz.
6. Diga, considerando o caráter científico, o que você achou da atividade e porque.