introdução à física experimental

Tathiana Moreira Cotta
José Luiz Nunes de Mello

editora UEA
purandu

Introdução
à física
experimental

esta obra pertence à série

purandu

purandu é uma série da *editora*UEA dedicada à publicação de obras de caráter didático. O mesmo que “perguntar” em Nheengatu, língua geral amazônica, a palavra **purandu** invoca um aspecto indispensável para o processo de aprendizagem: a busca pelo saber.

Tathiana Moreira Cotta
José Luiz Nunes de Mello

Introdução à física experimental

editora UEA
purandu

André Yukio Tanaka
Erick Cundiff
Samara Nina
Silas Menezes
Projeto Gráfico

Silas Menezes
Diagramação

Isaque Gomes
Wesley Sá
Revisão

Esta edição foi revisada conforme as regras do Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade do Estado do Amazonas

C846i
2019 Cotta, Tathiana Moreira.
Introdução a física experimental / Tathiana Moreira Cotta e José Luiz Nunes de Mello. – Manaus (AM): Editora UEA, 2019.

84 p.: il., color; 21 cm.

ISBN: 978-65-80033-03-4

1. Física. 2.Física experimental. I. Mello, José Luiz Nunes de. I.Título.

CDU 1997 – 53

Editora afiliada:

Associação Brasileira das Editoras Universitárias

*editora*UEA

Av. Djalma Batista, 3578 – Flores | Manaus – AM – Brasil
CEP 69050-010 | +55 92 38784463
editora.uea.edu.br | editora@uea.edu.br

sumário

apresentação

Os cursos teóricos e conceituais de Física Básica possuem vários livros-texto, tanto de autores estrangeiros quanto brasileiros, como referência. Porém, para disciplinas de física ministradas em laboratório não existe uma padronização de experimentos a serem realizados durante o curso. Essa liberdade traz consigo certo desconforto, no sentido de que, sem um livro texto a ser seguido, tanto o ensino quanto o aprendizagem podem ficar comprometidos.

Esse livro possui o propósito de servir de guia para disciplinas de Física Experimental ofertadas nos cursos de graduação. Para tanto, foram selecionados alguns assuntos que normalmente são trabalhados nos cursos teóricos e carecem de demonstração experimental de modo que o conhecimento fique bem consolidado para os estudantes. Outros assuntos, porém, na maioria das vezes, não são abordados em sala de aula, entretanto por serem de baixa complexidade tornam sua aplicação viável a nível de graduação.

O primeiro capítulo dá uma introdução a respeito de como realizar medidas, calcular erro e apresentar os resultados experimentais. Discutimos teorias de cálculo de incertezas nas medidas para avaliar a precisão dos resultados encontrados. Outro ponto abordado no capítulo é o sistema de unidades adotado no Brasil, o Sistema Internacional de Unidades, SI. E ainda, é discutida a apresentação dos resultados das medidas em gráficos e tabelas, além de explicações de como redigir o relatório experimental. Um exemplo de relatório pode ser encontrado no Apêndice A.

No segundo capítulo do livro são abordados experimentos de Mecânica Clássica. Foram elaborados experimentos que tratam de Movimento Retilíneo Uniforme e Uniformemente Variável, Conservação de Energia, Coeficiente de Atrito e Momento de Inércia. Dessa forma, são trabalhados os principais conceitos abordados nas aulas teóricas de Mecânica Clássica de maneira a ilustrar e fundamentar o conhecimento aprendido.

Foram reunidos no terceiro capítulo experimentos de Termodinâmica, Hidrostática e Mecânica Ondulatória. Nesse capítulo são abordados assuntos tradicionalmente trabalhados em disciplinas teóricas como calor específico, capacidade térmica, ondas sonoras e peso aparente de objetos submersos em líquidos. Além disso, também são abordados outros assuntos normalmente não trabalhados em disciplinas teóricas como a equação de Newton para o resfriamento e os termopares. Apesar de termopares não serem abordados em disciplinas teóricas, possuem muitas aplicações práticas como termômetros digitais, de modo que seu estudo experimental se torna importante.

No quarto capítulo, são abordados experimentos envolvendo circuitos elétricos para o estudo das leis de Ohm e de Kirchhoff, além de um experimento a respeito de capacitor. Ainda nesse capítulo, é utilizado o gerador de Van der Graaff para estudar a rigidez dielétrica do ar e encontrar a quantidade de cargas acumuladas na cúpula do gerador, possibilitando assim a visualização do comportamento das cargas elétricas.

O capítulo cinco ficou reservado para os assuntos de Ótica e Física Moderna. Na primeira parte do capítulo são feitos experimentos utilizando prismas, espelhos e lentes para estudar o comportamento da luz através ótica geométrica. Posteriormente são feitos experimentos a respeito de análise espectral e efeito fotoelétrico. Esses dois assuntos ilustram a base da Física Moderna e possuem aplicações práticas como células fotoelétricas e sensores.

Assim, consideramos que os experimentos aqui apresentados compõem uma seleção ideal para introduzir a Física Experimental aos alunos de graduação. Isso porque, além de demostrar os efeitos práticos de assuntos abordados teoricamente também são abordados temas que possuem aplicações tecnológicas, dando aos alunos uma visão geral de como a física pode fazer parte do cotidiano.

unidade 1

introdução

[1.1] medição e incerteza

Ao estudar a parte teórica da física, encontra-se com um mundo aparentemente exato, no qual é realizado um cálculo e obtido um valor para uma determinada grandeza. Entrando em contato com a física experimental, é certo o aparecimento da incerteza nos valores desejados. Essa incerteza é intrínseca ao processo de medição. Aferir o valor de uma grandeza experimentalmente é comparar o objeto estudado a um padrão estabelecido. Durante este processo, são cometidos erros involuntários e, na maioria das vezes, inevitáveis.

Porém é possível minimizar a incerteza na medição através de equipamentos mais precisos e uma medição mais cuidadosa. Suponha, por exemplo, que seja necessário medir o comprimento de um objeto e, esteja disponível para esse fim, uma régua graduada em centímetros como mostra a parte B) da Figura 1.1. O valor obtido nesta medida deve estar entre 3 cm e 4 cm, mas é impossível saber ao certo. Por outro lado, se o mesmo objeto é medido com uma régua graduada em milímetros o valor encontrado será mais próximo do valor real já que, neste caso, a precisão do instrumento de medida é maior. Como mostra a parte B) da Figura 1.1, o melhor valor que pode ser atribuído a essa medição é de 3,6 cm.

É possível utilizar um instrumento de medida mais preciso do que uma régua, por exemplo um paquímetro, e obter um valor mais preciso para a medida do comprimento do bloco da Figura 1.1. Entretanto, não será possível saber o valor exato da medida e, um bom valor medido nem sempre é exatamente igual o valor real. A precisão adequada depende do interesse no estudo do objeto a ser medido. Desse modo, a escolha do instrumento de medida a ser utilizado, dependerá da necessidade de precisão em cada situação, ou em cada experimento.

Existem duas maneiras básicas de se obter um resultado experimental: fazendo medidas diretas ou fazendo medidas indiretas. Para medidas diretas, é necessário existir um instrumento de medida capaz de fazer a leitura do valor a ser medido diretamente do objeto de estudo, sem que seja necessário utilizar outros meios para chegar ao valor desejado. Nas medidas indiretas, ao contrário, não existe (ou não se possui) um instrumento capaz de realizar a medida diretamente, fazendo-se necessário medir outras variáveis e, posteriormente, calcular o valor da grandeza de interesse.

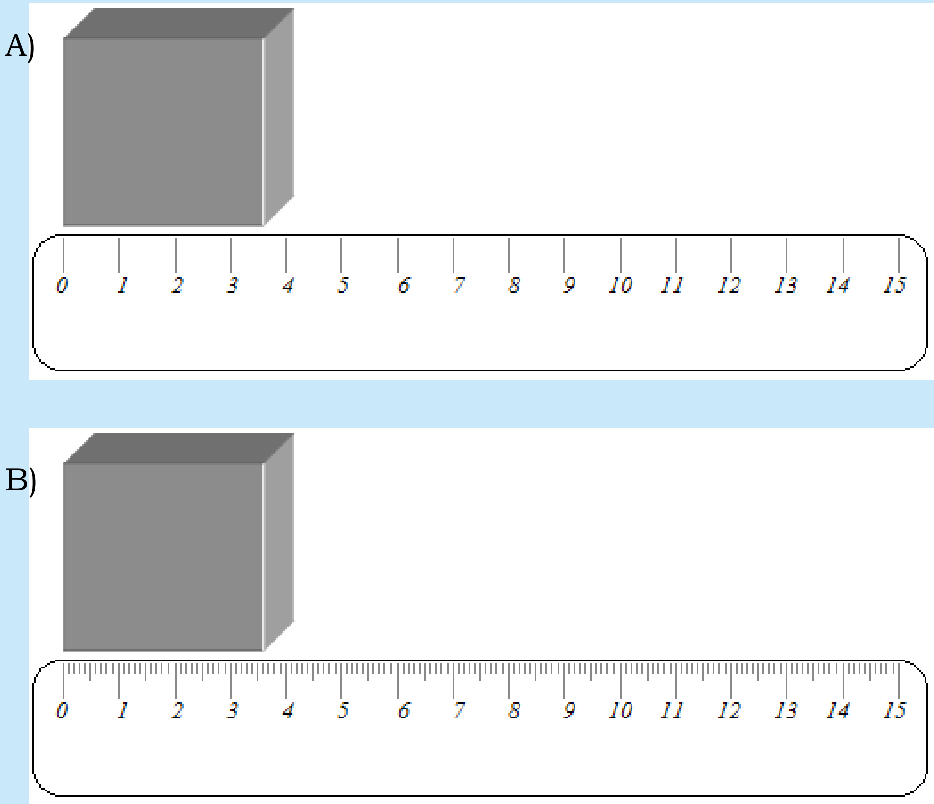

Figura 1.1: Esboço de um cubo metálico sendo medido por dois tipos de réguas diferentes. Em A) ela está graduada em centímetros e em B) está graduada em milímetros.

[1.2] como encontrar a incerteza nas medidas

O valor da incerteza de uma medição depende de como a medida foi feita e da precisão dos instrumentos utilizados no processo. Além disso, a incerteza possui unidade que será a mesma da grandeza medida. No caso de medidas diretas, algumas vezes, essa informação vem escrita no corpo do instrumento. Por exemplo, vem escrito em uma balança: desvio máximo 1 *g*, ou erro máximo 1 *g*. Esse é o valor que se deve atribuir à incerteza de todas as medidas feitas com essa balança.

Em casos de instrumentos que utilizam escala graduada, como réguas, transferidores, béqueres, termômetros, paquímetros, micrômetros, o valor da incerteza na medição será dado pela metade da menor divisão do instrumento. Por exemplo, a incerteza na medida do comprimento do objeto na parte A) da Figura 1.1 será 0,5 cm, já que a graduação da régua é feita a cada 1 *cm*. Mas, na parte B), a incerteza será de apenas 0,05 cm, pois a escala é graduada em milímetro.

A maneira de encontrar a incerteza pode ainda estar exposta no manual de instruções do equipamento de medida. Por exemplo, no manual de um multímetro vem escrito que medidas feitas utilizando-se a escala de 10 A, na função amperímetro, deve ser considerado um erro de 2%, do valor medido, mais 50 *mA*. Assim, se foi encontrado um valor de 1,5 A em uma medida utilizando esse aparelho, o erro associado a ela será de 2% de 1,5 A, que vale 0,03 A, somado a 50 mA (= 0,050 A) e resultando numa incerteza de 0,08 A.

Uma maneira de melhorar a precisão de uma medida é repetir o experimento nas mesmas condições por várias vezes, e utilizar o método estatístico para encontrar o melhor valor para a medida e, também, para a sua incerteza. O melhor valor que se pode atribuir à medida, nessa situação, é a média aritmética dos valores medidos nas repetições. Assim, se foi medida, n vezes, uma determinada grandeza x, o seu valor médio $\langle x \rangle$ será dado por:

(1.1)

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

Em que x_i representa cada um dos valores medidos durante a repetição do experimento. A incerteza associada a esse valor pelo método pode ser escrita como:

(1.2)

$$u(x) = \left[\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \langle x \rangle)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

Para exemplificar o método estatístico, considere o tempo de queda de um objeto que é abandonado a certa altura h. Esse experimento é repetido 10 vezes, tomando-se o cuidado de não haver alterações no valor de h. O resultado pode ser colocado em uma tabela, da seguinte maneira:

i	t_i (S)	i	t_i (S)
1	2,5	6	1,9
2	2,8	7	2,0
3	2,2	8	2,5
4	2,0	9	2,3
5	2,4	10	2,8

Tabela 1.1: Medidas do tempo de queda de um objeto abandonado dez vezes a uma altura h.

O valor atribuído à medida do tempo de queda será a média aritmética dada pela equação (1.1) e os valores contidos na Tabela 1.1, assim:

(1.3)

$$\langle t \rangle = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} t_i = \frac{2{,}5 + 2{,}8 + 2{,}2 + 2{,}0 + 2{,}4 + 1{,}9 + 2{,}0 + 2{,}5 + 2{,}3 + 2{,}8}{10}$$

$$\langle t \rangle = \frac{23{,}4}{10} = 2{,}34\ s$$

Para simplificar o cálculo da incerteza, pode-sepodem-se encontrar inicialmente os fatores $(t_i - \langle t \rangle)^2$ e posteriormente substituir na equação (1.2), a fim de encontrar o valor da incerteza. Os resultados dos fatores se encontram na tabela abaixo:

i	(ti – ⟨t⟩)2	i	(ti – ⟨t⟩)2
1	0,0256	6	0,1936
2	0,2116	7	0,1156
3	0,0196	8	0,0256
4	0,1156	9	0,0016
5	0,0036	10	0,2116
$\sum_{i=1}^{10}$(t_i-⟨t⟩)² =0,9140			

Tabela 1.2: Resultados encontrados para cada um dos fatores (ti – ⟨t⟩)², nos quais é subtraído o valor correspondente para cada um dos índices *i* da Tabela 1.1 o valor médio encontrado na equação (1.3), e eleva-se o resultado ao quadrado.

Substituindo os valores dados na Tabela 1.2 na equação (1.2), será obtido:

(1.4)

$$u(t) = \left[\frac{1}{10(10-1)}\sum_{i=1}^{10}(t_i - \langle t \rangle)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$u(t) = \left[\frac{0{,}9140}{10(10-1)}\right]^{\frac{1}{2}} = 0{,}101\ s$$

É necessário apresentar o resultado da medida de uma maneira adequada. Na seção 1.3 será visto como se deve apresentar o resultado de uma medida.

Ao fazer medidas indiretas, é necessário aferir o valor de outras grandezas diretamente e, em seguida, utilizar uma equação matemática para encontrar o valor da grandeza desejada. Cada um dos valores medidos carrega sua incerteza vinda do processo de medição e essa incerteza se propaga para o valor calculado. Considerando uma grandeza de interesse y, medida indiretamente, seja uma função de n variáveis x_i, medidas diretamente. Assim, é possível escrever y como uma função das variáveis x_i, ou matematicamente.

(1.5)

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

Assim, a propagação de incerteza será dada pela seguinte equação:

(1.6)

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$$

em que, u(x_i) é o valor da incerteza da grandeza x_i.

Por exemplo, pretende-se encontrar o valor da energia cinética K de um carro em movimento. A função dada na equação (1.5) será escrita para esse caso como:

$$K(m, v) = \frac{1}{2} m v^2 \tag{1.7}$$

Sendo os valores da massa m e da velocidade v são obtidos diretamente com algum processo de medida. De acordo com a equação (1.6), a incerteza no valor da energia será calculada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \Delta K(m, v) &= \left[\left(\frac{\partial K}{\partial m} \right)^2 u^2(m) + \left(\frac{\partial K}{\partial v} \right)^2 u^2(v) \right]^{\frac{1}{2}} \\ \Delta K(m, v) &= \left[\left(\frac{v^2}{2} \right)^2 u^2(m) + (m\ v)^2\, u^2(v) \right]^{\frac{1}{2}} \\ \Delta K(m, v) &= \left[\frac{v^4}{4} u^2(m) + m^2 v^2 u^2(v) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{1.8}$$

Com isso, devem-se substituir os valores medidos de m e v, além dos valores de suas respectivas incertezas *u(m)* e *u(v)*.

[1.3] algarismos significativos e apresentação dos resultados

Tão importante quanto realizar uma boa medida é a maneira com a qual o resultado é apresentado. Para expressar corretamente os resultados experimentais, é necessário levar em consideração os algarismos corretos e os algarismos duvidosos decorrentes da incerteza na medida. Considera-se que tenha significado todos os algarismos nos quais temos certeza que estão corretos no processo de medição. Assim, escrevemos o valor da medida com todos os algarismos corretos juntamente com o primeiro no qual se tem dúvidas. É importante também deixar claro o valor da incerteza na medição. Uma boa maneira de apresentar o resultado experimental é a seguinte:

(valor medido± valor da incerteza) unidade.

Retomando o exemplo da medição do bloco na parte A) da Figura 1.1, pode ser dito com certeza que o bloco mede mais que 3 *cm*. No entanto observando atentamente a parte A) da Figura 1.1 pode-se supor que o bloco tenha 3,5 *cm* de comprimento. Desse modo, algarismo 3 é então o valor correto da medida e o 5 é o algarismo duvidoso porque não se tem certeza se esse valor está correto, já que seria igualmente razoável dizer que o objeto mede 3,4 ou 3,6 *cm*. A incerteza de uma régua graduada em centímetro é de 0,5 *cm*, dessa forma, o valor da medida pode ser escrito como:

$$(3{,}5 \pm 0{,}5)\ cm.$$

É necessário observar o número de casas que compõem o valor medido e a sua incerteza. O valor medido deve terminar no primeiro algarismo duvidoso assim como o valor da incerteza deve possuir apenas um algarismo diferente de zero.

No exemplo da queda de um objeto a partir de uma altura h, foi encontrado o valor para a medida do tempo $\langle t \rangle$=2,34 s e o valor da sua incerteza $u(t)$=0,101 *s*. Para escrever corretamente o resultado do referido do experimento inicialmente é preciso observar as seguintes regras de arredondamento:

Se o número a ser arredondado vem antes de outro que seja menor do que 5, será apenas descartado.

Se o número a ser arredondado vem antes de outro que seja maior do que 5, será somado 1 ao algarismo a ser arredondado, e descartado o restante.

Se o número a ser arredondado vem antes de 5, é facultado a soma de 1 ao algarismo a ser arredondado.

Dessa forma, o valor da incerteza $u(t)$=0,101 s deve ser considerado até o primeiro algarismo diferente de zero, que é 1. O algarismo seguinte é 0 e, portanto, devemos observar a primeira parte da regra de arredondamento e assim será descartado juntamente com tudo que vier depois dele. Então o modo correto de escrever essa incerteza será $u(t)$=0,1 s. Isso definirá o número de casas utilizadas no valor da medida, já que a incerteza fica primeira casa decimal o primeiro algarismo depois da vírgula será o algarismo duvidoso da medida. Portanto, o valor medido deve ser utilizado também somente até a primeira casa depois da vírgula, sendo portanto $\langle t \rangle$=2,3 s de acordo com a regra de arredondamento. Assim, o resultado deverá ser apresentado como $\langle t \rangle$=(2,3±0,1) *s*.

Em casos nos quais a incerteza possui um valor maior que 9 unidades, é obrigatório o uso da notação científica, a fim de que a incerteza seja representada por apenas um algarismo significativo não nulo. A potência de dez não é considerada com algarismos significativos.

Constam na Tabela 1.3, exemplos de como apresentar o resultado de medidas. Observe que nas duas últimas linhas da tabela o resultado deve obrigatoriamente ser apresentado em notação científica, nos outros O correto seria "casos"? casa são é facultativos.

Valor medido	Incerteza	Resultado
2,419 s	0,182 s	(2, 4 ± 0, 2) s
287,96 m	5,20234 m	(288 ± 5) m
0,4062 J	0,0196 J	(0, 41± 0, 02) J
9,75 V	0,12 V	(9, 7 ± 0, 1) V ou (9, 8 ±0, 1) V
5, 0183 x10-3 A	36 × 10-5 A	(5, 0 ± 0, 4) × 10-3 A ou (5, 0 ± 0, 4) mA
2.250 g	590 g	(2, 2 ± 0, 6) × 103 g ou (2, 2 ± 0, 6) kg

Tabela 1.3: Exemplos de como escrever da forma correta os resultados de medidas.

É necessário salientar que zeros à esquerda do único algarismo não nulo na incerteza não são considerados significativos, porém zeros à direita são considerados significativos. Assim, está correto expressar a incerteza como u(t)=0,003 s, mas é incorreto expressa-la na forma u(t)=5,0 s. No primeiro caso, existem três zeros à esquerda do algarismo não nulo, os quais não serão considerados significativos. No segundo, o zero está à direita do algarismo duvidoso e, portanto será considerado como significativo, assim a representação fica incorreta devido à existência de dois algarismos significativos na incerteza. A mesma regra também é válida para o valor da medida.

Teste de compreensão

Escreva os valores das medidas abaixo de acordo com as regras de algarismos significativos e de apresentação de resultado.

a) medida: 2890,78 m; incerteza: 342,9 m

b) medida: 3,829 x 10−2 A; incerteza: 5,578 x 10−3

c) medida: 1308 J; incerteza: 4,001 x 102 J

d) medida: 6,9284 x 105 cm; incerteza: 2,8 m

e) medida: 246,5 g; incerteza: 7539,9 mg

[1.4] sistema internacional de unidades – SI

Outro item a ser considerado é a unidade de medida. A escolha adequada das unidades de medida facilita o entendimento de que está estudando as medidas feitas, além de evitar erros conceituais e uso de unidades incompatíveis. No Brasil é adotado o Sistema Internacional de Unidade, SI. Esse sistema foi criado em 1875 através do Bureau Internacional de Pesos e Medidas, BIPM, no intuito de facilitar as relações internacionais. Assim, foram definidas sete unidades básicas definidas da forma mais precisa possível e todas as outras são derivações dessas unidades básicas. Essas definições são substituídas ao longo do tempo a medida em que vão sendo descobertas novas formas de medição, além da invenção de equipamentos cada vez mais precisos. A tabela a seguir relaciona o nome e o símbolo que representa cada uma das unidades básicas que compõem o SI.

Todas as regras que regem o sistema internacional de unidades são definidas nos encontros da BIPM. O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, INMETRO, é o responsável por sua divulgação através da tradução dos documentos oficiais da BIPM, (veja a referência [1]). De acordo com esse documento, a definição mais recente da unidade de comprimento foi feita em 1984 através da velocidade da luz e ainda hoje é aceita como a mais precisa.

O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de 1/299.792.458 de segundo.

Grandeza	Nome	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Corrente elétrica	ampère	A
Temperatura termodinâmica	kelvin	K
Quantidade de substância	mol	mol
Intensidade luminosa	candela	cd

Por outro lado, a unidade de massa ainda não pode ser vinculada à uma constante física fundamental. E sua definição ainda é feita com base em um protótipo de platina e irídio mantido sob condições específicas. Todos os países que adotam o SI recebem réplicas desse protótipo para comparações que sejam necessárias. No Brasil o protótipo fica aos cuidados do INMETRO.

A unidade do quilograma é igual à massa do protótipo internacional.

A unidade de tempo mais famosa provavelmente é aquela baseada no tempo em que a Terra executa uma rotação em torno de seu eixo. Entretanto, com a evolução da tecnologia, é possível obter uma medida de tempo com precisão bem maior utilizando transições eletrônicas de átomos. Além disso, esses experimentos podem ser reproduzidos com igual rigor por cientistas em todo o mundo. Porém, para que o resultado seja exato é necessário manter certas condições tais como o átomo deve ser mantido em repouso e a uma temperatura de 0 K.

O segundo é a duração de 9.192.631.770 períodos de radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.

A quarta unidade a definir é o ampère que é a unidade de corrente. A definição a seguir é feita de modo que o valor da constante de permeabilidade do vácuo seja exatamente dado por $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{H}/m$.

Mudar a forma de apresentação. O ampère é a intensidade de uma corrente elétrica constante que, se mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível, e situados à distância de 1 metro entre si, no vácuo, produz entre estes condutores uma força igual a 2 ×10^{-7} newton por metro comprimento.

A unidade kelvin para temperatura termodinâmica é definida a partir do ponto triplo da água proveniente da reação das seguintes substâncias: 0,00015576 mol de 2H por mol de 1H com 0,0003799 mol de 17O por mol de 16O e 0,002052 mol de 18O por mol de 16O. A água proveniente dessa reação tem sua temperatura de ponto triplo exatamente igual à 273,16 K.

O kelvin, unidade de temperatura, é a fração 1/273,16 da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água.

Se fez necessário uma grandeza que fosse capaz de medir a quantidade de substância presente em uma amostra, ou seja, o número de entidades elementares que constituem a amostra estudada. Essas entidades elementares podem ser átomos, moléculas, íon, ou outras partículas elementares que deve ser especificado no estudo da amostra. Essa definição é feita de tal maneira que a constante física denominada número de Avogadro seja exatamente dada por N_A=6,02 × 1023 mol^{-1}. Para isso é necessário o uso de átomos de carbono 12 não ligados, mantidos em repouso e em seu estado fundamental.

O mol é a quantidade de substância de um sistema que contém tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 quilogramas de carbono 12.

Finalmente, a unidade da intensidade luminosa definida através de medições da radiação ótica (essa unidade não será utilizada nesse livro).

A candela é a intensidade luminosa, numa dada direção, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540 x 10 12 hertz e que tem uma intensidade radiante nessa direção de 1/683 watt por esferorradiano.

[1.5] tabelas, gráficos e tratamento dos dados experimentais

São chamados dados experimentais todos os resultados das medidas feitas em um experimento e eles devem ser apresentados em forma de tabela juntamente com sua respectiva incerteza. É necessário haver uma legenda contendo a numeração da tabela e a descrição dos dados nela inseridos, conforme demonstrado da Tabela 1.5.

A primeira linha da tabela deve conter as grandezas que foram medidas com suas unidades. Se a incerteza for a mesma para todas as medidas, também é possível incluí-la na primeira linha da tabela, como mostrado na primeira coluna da Tabela 1.5. Caso a incerteza seja diferente para cada uma das medidas, deve-se incluí-la na linha juntamente com o valor medido. É necessário levar em conta as regras de algarismos significativos e o modo de apresentação de resultados na apresentação dos dados na tabela.

Tensão (± 1) V	I (A)
5	0,11 ± 0,02
10	0,20 ± 0,02
15	0,29 ± 0,03
20	0,41 ± 0,03
25	0,49 ± 0,03
30	0,62 ± 0,04

Tabela 1.5: Medidas da tensão em função da corrente em um resistor com resistência desconhecida.

Muitas vezes, será preciso utilizar recursos gráficos para melhor visualização dos dados experimentais. Esse recurso também permite encontrar valores para medidas indiretas de grandezas com suas respectivas incertezas. Assim, através da Tabela 1.5 foi feito um gráfico de tensão por corrente, conforme representado na Figura 1.2. O gráfico deve ser feito através de programas de computador próprios para esse fim, e deve conter um título que indique o assunto tratado no experimento. Deve-se tomar o cuidado de colocar nomes nos eixos, indicando a unidade correspondente da grandeza medida de acordo com o SI. Desse modo, mesmo que a medida da corrente para a obtenção da Tabela 1.5 tivesse sido feita em miliamperes, esses dados devem ser colocados no programa em ampère para que se obtenha o resultado nas unidades do sistema internacional.

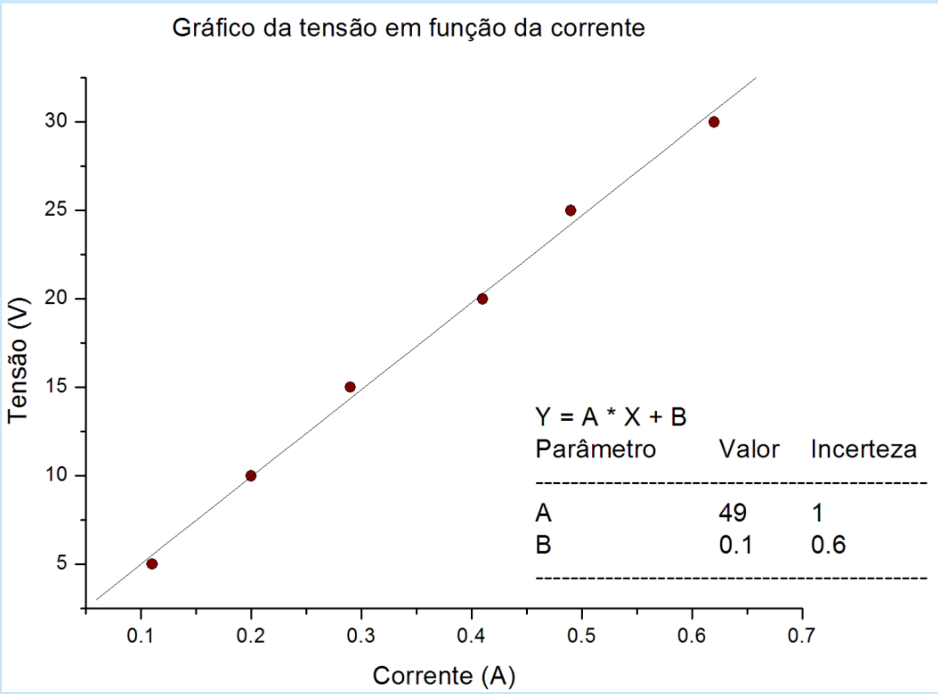

Figura 1.2: Gráfico da tensão em função da corrente medida em um resistor para a obtenção do valor de sua resistência.

Os pontos no gráfico representam os dados experimentais, e a linha, o ajuste feito pelo programa de computador para obtenção do melhor valor para o resultado da medição. Nesse caso específico, a disposição dos pontos sugere um comportamento linear dos dados. Com isso, deve-se fazer um ajuste de regressão linear disponível entre as funções do programa. Esse ajuste é feito procurando-se a melhor curva que se adéque aos dados experimentais. O resultado fornecido por esse ajuste, comumente, não obedece às regras de algarismos significativos e, por tanto, é necessária a adequação dos valores, seguindo essas regras.

Para se fazer uma regressão linear é utilizada uma equação de primeiro grau tipo $Y=A \cdot X+B$. O valor fornecido para a constante A pelo programa foi de 49,23961424 e o valor de sua incerteza foi de 1,55097632. Assim, para estar de acordo com as regras de algarismos significativos mencionadas nas seções anteriores, a incerteza deverá ser escrita com apenas um algarismo e, de acordo com as regras de arredondamento, é correto ajustar o valor tanto para 1 quanto para 2. Feito isso, deve-se ajustar o valor da grandeza A para 49, já que o resultado deve ser escrito até a casa das unidades nesse caso. O mesmo procedimento foi feito para ajustar os valores da constante B. O programa forneceu para seu valor 0,10200297 e para sua incerteza 0,61022591. Assim, o valor deve ser escrito como 0,1 e a incerteza como 0,6, conforme mostrado no gráfico.

A interpretação dos resultados deve ser feita a partir da teoria envolvida no tema do experimento, comparando-se à equação utilizada pelo programa para ajustar os pontos e a equação teórica referente ao assunto do experimento. No caso do gráfico de tensão por corrente, a teoria estudada é a lei de Ohm, que diz que a tensão V em um resistor com resistência R é diretamente proporcional à corrente i no circuito, ou seja, $V=Ri$.

Fazendo-se a comparação entre as equações teórica e experimental, é notável que a variável Y represente a tensão V, a X represente a corrente i. Da mesma forma, a constante A deve representar a resistência e a constante B deve ser nula. Então, nesse caso, o valor encontrado no gráfico da Figura 1.2, para a constante A representa o valor da resistência. A constante B possui um valor pequeno, menor inclusive do que sua incerteza, e portanto, está dentro do previsto teoricamente.

A apresentação do resultado obtido através do gráfico da Figura 1.2 deve ser feita da seguinte maneira $R=(49 \pm 1)\ \Omega$ e $B=(0{,}1 \pm 0{,}6)\ V$, incluindo a observação que o valor esperado para o B é zero e de que o resultado se encontra dentro do previsto. Na apresentação do resultado, todos os valores devem estar acompanhados de sua unidade do SI. Assim, se faz necessário encontrar as unidades referentes às constantes fornecidas no ajuste de curva feito pelo programa.

[1.6] como redigir o relatório

Todo experimento deve ser discutido e apresentado em forma de um relatório. Existem sete partes obrigatórias: título, autores, objetivo, introdução (ou parte teórica), parte experimental, conclusão e bibliografia. O título deve ser o mesmo constante no roteiro do experimento realizado para facilitar sua identificação. Nos autores deve ser colocado os nomes das pessoas que realizaram o experimento. O objetivo de cada prática vem escrito no roteiro e deve ser observado com cuidado, pois facilitará o entendimento do que foi feito e obtido com cada um dos experimentos.

A introdução é composta de toda a parte teórica necessária ao desenvolvimento de uma dada atividade experimental. Deve-se explicar a teoria, escrever e identificar apenas as fórmulas matemáticas que serão utilizadas no desenvolvimento dos cálculos experimentais. Através de uma numeração adequada das fórmulas, será possível apenas citar a equação no momento em que o cálculo é mostrado no relatório. É desejável que nessa parte também contenham figuras ou fotos que sejam relevantes e facilitem a explicação da teoria.

Na parte experimental, deve-se enumerar todos os equipamentos utilizados durante o experimento. Posteriormente, deve-se explicar o procedimento que foi realizado, entretanto essa parte **não é uma simples cópia do roteiro**, e consequentemente **não pode ser escrito com o verbo no imperativo**. Deve ser explicado o que foi feito, e não fazer um solicitação para a realização do experimento. Com o intuito de facilitar a explicação, pode-se colocar uma figura ou foto do equipamento utilizado na prática. Na sequência, são colocados os dados experimentais em tabelas e a apresentação dos gráficos, conforme descrito na Seção 1.5. Ainda é preciso colocar os resultados e fazer uma breve análise deles.

Na conclusão, é necessário ter em mente se o objetivo do experimento foi alcançado e se os resultados estão de acordo com o esperado. Finalmente, na bibliografia são colocadas referências de todo o material que foi consultado durante o procedimento, inclusive esse livro e os livros teóricos utilizados. No Apêndice A, encontra-se um modelo de relatório feito para o experimento da lei de Hooke.

[1.7] exercícios experimentais

Experimento 1: Tempo de queda de um objeto.

Material necessário: objeto pequeno (borracha, bolinha de papel, etc.), cronômetro e régua.

Estabeleça uma altura e deixe cair um pequeno objeto para se fazer medidas do tempo de queda. Repita o mesmo procedimento pelo menos dez vezes e utilize o método estatístico para encontrar a incerteza na medida do tempo. Coloque seus dados em uma tabela e apresente o resultado de maneira apropriada.

Experimento 2: Tempo de reação humana

Material necessário: régua.

Peça a um colega para posicionar os dedos indicador e polegar da mão direita a uma distância de 1 cm um do outro. Entre os dedos do colega coloque a régua na posição vertical com a marcação do zero da régua alinhada entre os dedos. Quando a régua for solta, seu colega deve tentar segurá-la apenas fechando os dedos. Dê um aviso para que seu colega saiba o instante em que a régua será solta. Verifique em que pondo da régua os dedos a seguram e anote a posição deles em relação ao zero da régua. Repita o experimento pelo menos dez vezes. Anote os dados em uma tabela e calcule o melhor valor para sua medida com sua respectiva incerteza. Através das equações da cinemática, calcule o tempo de queda da régua. O resultado será o tempo de reação humana do seu colega, que é o tempo gasto entre a percepção de um fato e a atitude de resposta.

unidade 2

mecânica clássica

[2.1] queda livre: determinar da aceleração da gravidade

objetivos

Interpretar o movimento de um objeto em queda livre e encontrar o valor da aceleração da gravidade.

material necessário

Cronômetro digital, esfera de metal e equipamento com dispositivo para largar a esfera.

pré-requisitos

Uma maneira de medir o módulo da aceleração da gravidade, g, é cronometrar o tempo de queda de um corpo que é largado e cai livremente a partir do repouso. Através da equação $y=y_0+v_0\, t+{}^1\!/_2\, gt^2$, é possível calcular o valor de g desde que o valor da velocidade seja conhecido para o ponto no qual a medida do tempo foi feita.

Na Figura 2.3, um objeto cai livremente do repouso a partir da origem do referencial, $y_0=0$. O tempo de queda é medido em cinco pontos entre o ponto de lançamento e a aterrissagem em y_1, y_2, y_3 e y_4. Em y_0 o cronômetro é acionado e por tanto $t_0=0$. Em cada um dos pontos de medida do tempo podemos utilizar a equação para o Movimento Retilíneo Uniformemente Variado comparando a medida i com a medida anterior i-1. Desse modo podemos escrever a equação de posição em função do tempo para o MRUV como:

2.1
$$y_i - y_{i-1} = v_{i-1}(t_i - t_{i-1}) + \frac{1}{2}g(t_i - t_{i-1})^2$$

Sendo que, y_i $y_{i-1}=\Delta y_{i,i-1})$ representam a distância percorrida entre as medidas sucessivas de tempo, ou seja, $\Delta y_{1,0}=y_1-y_0$, $\Delta y_{2,1}=y_2-y_1$, $\Delta y_{3,2}=y_3-y_2$ e $\Delta y_{4,3}=y_4-y_3$. Da mesma forma $t_i-t_{i-1}=\Delta t_{i,i-1}$ são as medidas sucessivas de tempo, ou seja, $\Delta t_{1,0}=t_1-t_0$, $\Delta t_{2,1}=t_2-t_1$, $\Delta t_{3,2}=t_3-t_2$ e$\Delta t_{4,3}=t_4-t_3$.

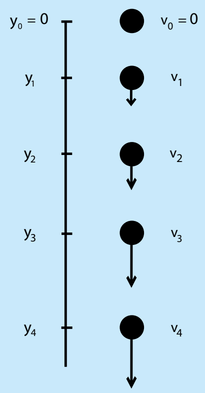

Figura 2.3: Representação de um objeto sendo solto em y_0=0 com velocidade inicial v_0=0.

Também é possível determinar a velocidade de queda em qualquer um dos pontos y_i através da relação:

2.2
$$v_i^2 = v_{i-1}^2 + 2g\Delta y_{i,i-1}$$

montagem e execução

- Peça ao professor instruções para utilizar o equipamento! Com o equipamento para estudo de queda livre ligado, identifique o ponto em que os sensores de movimento são acionados, disparando e travando o cronômetro. Para isso, utilize um lápis ou caneta. Identifique as posições no eixo y para as quais serão feitas as medidas do tempo utilizando a régua fixada no lançador. Verifique se a altura da bobina de lançamento permite que a esfera seja largada da posição $y_0 = 0$.
- Reinicie o cronômetro, pressione e segure o botão do acionador, coloque a esfera na bobina e solte o botão. A esfera cairá. O tempo de queda entre os sensores será mostrado no cronômetro. Repita o procedimento pelo menos 10 vezes e coloque os resultados em uma tabela.
- Calcule o intervalo de tempo médio $\langle \Delta t_{i,i-1} \rangle$ para cada intervalo entre os sensores $\Delta y_{i,i-1}$ e organize em uma tabela. Determine a incerteza de cada valor médio de tempo utilizando o método estatístico e também a incerteza em $\Delta y_{i,i-1}$.
- Monte um gráfico de $\Delta y_{i,i-1}$ por $\langle \Delta t_{i,i-1} \rangle$ e verifique se é possível ajustar uma função de segundo grau do tipo $Y(t) = A + Bt + Ct^2$. Dê a interpretação física para os parâmetros A, B e C com suas respectivas unidades e valores. Verifique se o resultado encontrado está dentro do esperado.

[2.2] lei de Hooke: constante elástica e associações série e paralelo de molas helicoidais

objetivos

Conhecer o procedimento de ajuste de uma curva aos dados experimentais, e aprender como calcular as incertezas através do método dos mínimos quadrados.

Verificar o comportamento de associações de molas em série e em paralelo e medir o valor da constante elástica resultante em cada um desses casos.

material necessário

Apoio de sustentação, duas molas com constantes elásticas conhecidas, gancho triplo, suporte para discos, seis discos de massa (50 ± 1) g e régua.

pré-requisitos

Existem muitos sistemas físicos que sob a ação de uma força sofrem uma deformação. O físico inglês Robert Hooke (1635–1703) foi quem primeiro observou uma relação de proporcionalidade entre a força aplicada, F, e a deformação do sistema, Δx. Em termos matemáticos escreve-se: $F=k\cdot\Delta x$, sendo k é a constante de proporcionalidade entre a força e a deformação do sistema. Essa equação ficou então conhecida como lei de Hooke.

Um exemplo comum de sistema físico que obedece a lei de Hooke é o sistema massa-mola. Como o próprio nome já diz, esse sistema é composto por uma mola e um corpo com massa suficiente para provocar deformações no comprimento original da mola. Para esse caso, o k é a constante elástica da mola. Para determinar seu valor experimentalmente, podem-se aplicar forças conhecidas e medir o alongamento provocado na mola. Com esses dados, é possível fazer um gráfico que terá a forma de uma reta e, assim, fazer uma regressão linear para obter o melhor valor para a constante.

Muitas vezes se faz necessário associar molas para obter uma combinação resultante desejada. As associações de molas podem ser feitas em série, colocando-se uma mola após a outra; ou em paralelo, colocando-se uma mola ao lado da outra, como mostra a Figura 2.1. O objetivo desse tipo de associação é conseguir um conjunto com constante elástica diferente das constantes das molas associadas.

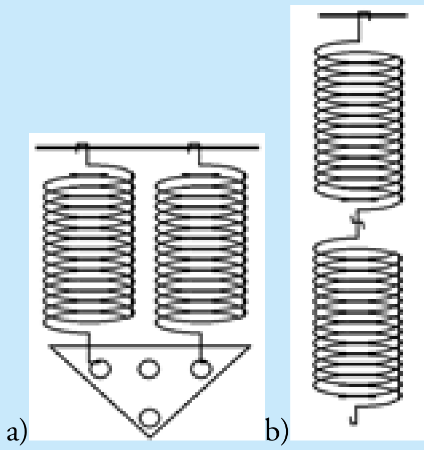

Figura 2.1: Representação de associações de molas. Em a), molas em paralelo e, em b), molas em série.

Na associação em paralelo, como mostrado a parte (a) Figura 2.1, nota-se que o alongamento será sempre o mesmo para as duas molas, $\Delta x_1=\Delta x_2=\Delta x$. O suporte que une as molas impede que cada uma se deforme independentemente da outra e, com isso, a força aplicada se distribui de acordo com a constante elástica de cada mola, k_i. Então, as molas com constantes maiores estarão sujeitas a uma força maior para que o alongamento seja o mesmo em ambas.

Na associação feita em série, como representado na parte (b) da Figura 2.1, as molas estarão sujeitas à mesma força, $F_1=F_2=F_{ap}$ pois cada uma sofrerá deformações proporcionais à sua constante elástica. Então, molas com constantes maiores sofrem deformações menores, podendo-se escrever a deformação do conjunto como a soma das deformações individuais das molas, $\Delta x_c=\sum_i \Delta x_i$.

montagem e execução

- Monte as duas molas no apoio de sustentação, conforme a parte (a) da Figura 2.1, indicando uma associação de molas em paralelo. Posicione o apoio de pesos, sem nenhum peso, no extremo inferior da mola, e marque a altura do mesmo na régua. Esta será a posição inicial do alongamento da mola.
- Comece a colocar os pesos 50 g na mola, um por vez, e verifique o alongamento que ocorre a partir da posição inicial. Anote, na tabela abaixo, os dados obtidos. Lembre das incertezas na leitura dos dados.
- Retire os pesos do apoio e verifique se o conjunto volta para a posição inicial. Se isto acontecer, a deformação foi elástica.
- Desmonte as molas e coloque uma seguida da outra, conforme mostrado na parte (b) da Figura 2.1, indicando uma associação em série das mesmas. Posicione no extremo o apoio de massas e estabeleça uma nova posição inicial na régua. Nivele o apoio de sustentação para que atinja uma altura maior, para facilitar o deslocamento das molas em conjunto. Um por vez, coloque coloque os pesos de 50 *g*, anotando os valores encontrados para o alongamento na tabela abaixo, com o cuidado de indicar a incerteza do mesmo.
- Neste ponto, substitua o conjunto de molas por somente uma delas, ficando esta denominada "mola 01". Após identificar a posição inicial da mola, coloque os pesos de 50 *g* um cada vez, verificando o alongamento à medida que os pesos são colocados sempre tendo como referência a posição inicial. Anote os valores na tabela abaixo.
- Agora, monte a outra mola, agora denominada "mola 02", no apoio de sustentação e repita o procedimento acima, verificando o alongamento à medida que os pesos são colocados. Anote os valores na tabela abaixo.
- Com os valores indicados na tabela, posicione os mesmos num único gráfico de folha A4, no qual será representada a variação da força com o alongamento. A escolha da escala no gráfico será importante para uma boa representação no mesmo. Utilize para força vinculada ao peso, a aceleração da gravidade g=(9,80±0,05) m/s^2 como sendo.
- Identifique, no gráfico, as curvas referentes a cada conjunto de molas da tabela acima. Visualmente, compare a inclinação das molas em série e paralelo com as molas, isoladamente. Explique como a inclinação da curva no gráfico varia com a associação em série e paralelo.
- No relatório, na parte teórica do mesmo, demonstre como deveriam ser os resultados associados às molas em série e em paralelo. Com isto, justifique porque, na associação em série, o conjunto ficou "mais macio" comparado ao momento em que as molas estão isoladas e "mais duraço" quando as molas estão em paralelo.
- Estando com as molas isoladas e os valores de constante da mola k_1 e k_2 conhecidos, identifique como será o valor final da expressão da constante da mola k_T associada quando em série e em paralelo.

- Comparativamente, quando associamos resistores ou capacitores, encontramos expressões semelhantes. Identifique com qual elemento, resistor ou capacitor, a associação de molas é mais semelhante quando feita em série ou paralelo.
- Utilizando os dados da tabela do experimento, procure obter o valor de k das molas, associando a variação linear da força elástica com o alongamento, utilizando a equação da reta $y(x)=ax+b$ e o método de regressão linear, por mínimos quadrados.

	Molas (paralelas)		Molas (em série)		Mola 01		Mola 02	
Medida	massa	Alongamento	massa	Alongamento	massa	Alongamento	massa	Alongamento
1	zero	zero	zero	zero	zero	zero	zero	zero
2								
3								
4								
5								
6								

[2.3] coeficiente de atrito estático e cinético

objetivos

Determinar o coeficiente de atrito estático entre duas superfícies e analisar a dependência dele em relação aos seguintes fatores: rugosidade, área da superfície de contato e força normal.

Determinar o coeficiente de atrito cinético entre duas superfícies.

material necessário

Plano inclinado, corpo de prova, transferidor e quatro pesos de (50 ± 1) g.

pré-requisitos

Sabemos que a força de atrito, f_e, é proporcional à força normal aplicada à superfície, N, de modo que $f_e \leq \mu_e$ N, em que o coeficiente de atrito estático, μ_e, é a constante de proporcionalidade. Essa equação é válida desde que as superfícies de contato estejam em repouso uma em relação à outra, ou seja, só podemos utilizá-la até que as superfícies comecem a se movimentar. No instante em que o movimento tende a começar considera-se $f_e=\mu_e$ N.

Ao ser colocado um corpo sobre um plano inclinado, como mostra a Figura 2.2, tem-se que a força peso P pode ser decomposta em duas componentes, uma paralela ao plano, chamada de P_x e outra perpendicular a primeira componente, chamada de P_y.

Utilizando as regras de decomposição de vetores pode-se escrever: P_x=P"sen" α e P_y=P"cos" α, em que α é o ângulo de inclinação do plano. P_x tende a fazer com que o bloco desça o plano, mas para que o objeto se mova, o seu módulo deve ser maior que o atrito.

Facilmente pode-se alterar o módulo de P_x mudando a inclinação do plano. No instante imediatamente antes do bloco iniciar o movimento de descida temos que $f_e=P_x$.

Além disso, P_y tem o mesmo módulo, a mesma direção e sentido oposto ao da força normal, assim $N=P_y$. Com isso:

2.3
$$f_e = \mu_e N \rightarrow P_x = \mu_e P_y$$

Substituindo as expressões de P_x e P_y na equação (2.3), obtém-se um modo de encontrar o valor de μ_e medindo o valor do ângulo de inclinação do plano imediatamente antes do objeto entrar em movimento.

2.4
$$\mu_e = tan\alpha$$

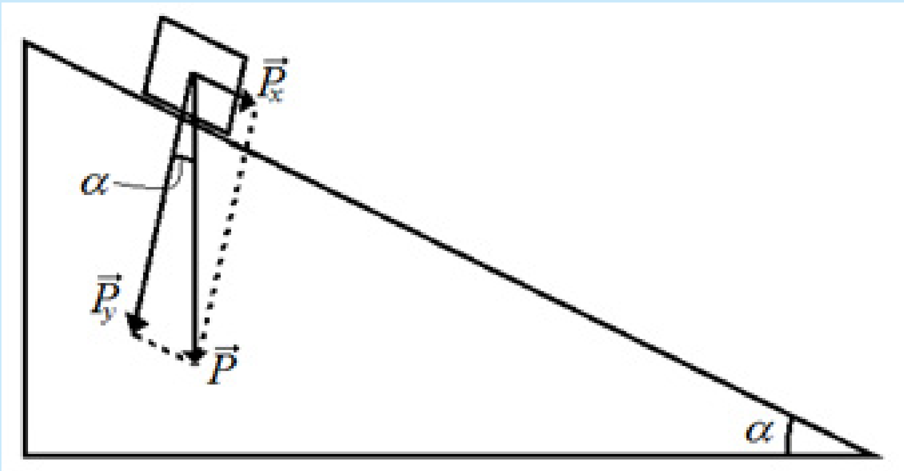

Figura 2.2: Corpo em um plano inclinado de ângulo α. $\vec{P}$ representa o peso do corpo, $\vec{P}_x$ a componente do peso paralela ao plano e $\vec{P}_x$ a componente perpendicular ao plano inclinado.

Por outro lado, a força de atrito cinético será $f_k=\mu_k$ N independente de como o objeto está se movendo. Entretanto, se o objeto se move com velocidade constante, pela segunda lei de Newton, a resultante de força é nula. Nesse caso a força necessária para manter o objeto em movimento será igual a força de atrito cinético.

montagem e execução

- Coloque o lado esponjoso do bloco sobre o plano na horizontal. Lentamente incline o plano até que o corpo comece a se mover para baixo. Meça o valor da inclinação, α, no transferidor fixado ao equipamento e anote seu valor. Repita esse procedimento por pelo menos mais nove vezes e coloque em uma tabela. Tenha bastante cuidado para não esbarrar no bloco ou no plano, e não utilize o parafuso do equipamento para erguer o plano, pois ele provoca muitas oscilações que atrapalham as medidas. Calcule o valor médio de α e seu erro através do método estatístico. Encontre o valor do coeficiente de atrito estático através da equação (2.4).

- Vire o bloco de forma que a esponja fique voltada para cima. Com o bloco nesta posição, repita o item (a) e encontre o coeficiente de atrito para esta situação. Vire novamente o bloco colocando o lado maior voltado para baixo e refaça o procedimento com o bloco nesta posição.
- Ainda com o lado maior voltado para baixo, coloque inicialmente dois pesos nos pinos fixados no bloco e repita o procedimento. Finalmente, acrescente mais dois pesos e realize novamente o procedimento.
- Analise a dependência de μ_e com a rugosidade, com a área de contato e com a força normal.
- Para encontrar o coeficiente de atrito cinético, posicione o bloco com o lado maior em contato com a superfície horizontal. Coloque um dinamômetro de forma a puxá-lo lentamente para iniciar um movimento com velocidade constante. Repita 10 vezes o procedimento obtendo o valor da força indicada no dinamômetro que.
- Determine o valor do coeficiente de atrito cinético μ_k.
- Compare com o maior valor encontrado para o μ_e e justifique qual deles deve ser o maior.

[2.4] movimento de projétil

objetivos

Identificar uma relação entre altura e distância para o lançamento oblíquo de uma esfera e verificar a variação do tempo da queda de uma esfera.

material necessário

Lançador de esferas, régua, cronômetro, esfera, fita adesiva, folha de papel e papel-carbono.

pré-requisitos

O movimento de um projétil pode ser decomposto em duas partes: o movimento horizontal e o movimento vertical. Observando a componente horizontal do movimento, nota-se que se não existir resistência do ar, não existe desaceleração. Nesse caso, pode-se valer da teoria que rege o movimento retilíneo uniforme. Já no movimento vertical, existe aceleração que é, de fato, a aceleração da gravidade e, com isso, utilizam-se as equações aplicáveis a um corpo em queda livre.

Para estudar a parte horizontal do movimento, tem-se que:

2.5
$$x - x_0 = v_{0x}$$

Sendo x a posição vertical da partícula, x_0 a posição vertical inicial, v_0x a componente da velocidade inicial no eixo x e t o tempo. Para o movimento vertical tem-se:

2.6
$$y - y_0 = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

em que y é a posição horizontal da partícula, y_0 é a posição inicial, v_0y é a componente da velocidade inicial no eixo y. Seja θ o ângulo de lançamento da partícula conforme mostrado na Figura 2.4. As componentes da velocidade inicial podem ser assim escritas:

2.7
$$v_{0x} = v_0 cos\theta$$
2.8
$$v_{0y} = v_0 sen\theta$$

em que v_0 é o módulo velocidade inicial de lançamento. Encontra-se a equação da trajetória da partícula manipulando algebricamente as equações (2.6), (2.7), (2.8) e (2.9). Para simplificar, a posição inicial é marcada na origem, ou seja, x_0=0 e y_0=0 e o resultado pode ser escrito como:

$$y = (tan\theta)x - \frac{gx^2}{2(v_0 cos\theta)^2}$$

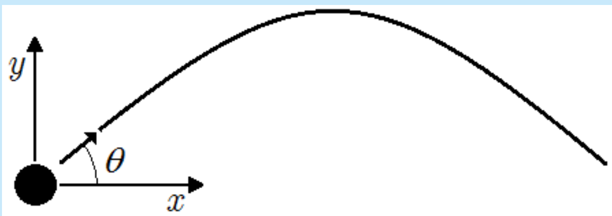

Figura 2.3: Representação de um objeto sendo lançado obliquamente, fazendo um ângulo θ com o eixo *x*.

montagem e execução

- Verifique se a rampa do lançador de esferas está na posição horizontal e regule sua altura para 10 cm acima da mesa. Essa altura deve ser medida a partir do ponto em que a esfera perde o contato com a rampa de lançamento. Fixe o papel na mesa, com ajuda da fita adesiva, numa posição imediatamente após o fim da rampa. Coloque sobre essa folha o papel carbono sem fixá-lo à mesa.
- Observe que na lateral da rampa de lançamento existem vários pontos marcados. Escolha um deles para a realização de todo o experimento. Para pontos mais elevados, a esfera

sairá com velocidades maiores, o que vai dificultar as medidas! Com o cronômetro meça o tempo de queda da esfera a partir do ponto no qual a esfera perde o contato com a rampa até atingir a mesa. O carbono deixará uma marca no lugar em que a esfera caiu, mas não permita que a bola quique para evitar confusão. Para minimizar erros de medida repita o procedimento por mais quatro vezes. Calcule o tempo médio e seu erro através do método estatístico.

- Com a ajuda de um lápis, estabeleça o menor círculo possível em torno de todos os pontos. Caso algum ponto esteja muito afastado dos demais, descarte-o e faça um novo lançamento. Meça a distância horizontal percorrida pela esfera, desde o lançamento até o ponto central do círculo que foi feito anteriormente. O raio do círculo corresponde ao erro nesta medida.
- Monte uma tabela com altura de lançamento, distância horizontal percorrida e tempo de queda. Aumente a altura de lançamento para 20 *cm* e repita o procedimento descrito nos itens (b) e (c). Coloque os dados na tabela e vá aumentando a altura de 10 em 10 *cm* até atingir 50 *cm*.
- Faça três gráficos: altura pela distância; altura pelo tempo e distância pelo tempo. Verifique o comportamento dos pontos.
- Explique qual tipo de curva melhor se ajusta aos pontos de cada um dos três gráficos e justifique.
- Faça o ajuste dos dados experimentais com o tipo de curva escolhida para cada um dos três gráficos, encontre os valores das constantes e seus respectivos erros. Dê interpretações físicas e identifique as unidades de cada uma das constantes encontradas para cada um dos gráficos.

[2.5] movimento harmônico simples

objetivos

Estudar o movimento harmônico simples e identificar a expressão analítica para o período de oscilação.

material necessário

Mola, apoio de sustentação, suporte para discos e seis discos de massa (50 ± 1) g.

pré-requisitos

Movimento harmônico ou movimento periódico é todo aquele que se repete em intervalos regulares. Se essa repetição, ou oscilação, ocorre de forma senoidal no tempo, então é chamada de movimento harmônico simples. Ao intervalo no qual ocorre uma oscilação completa é dado o nome de período, T, e, o número de oscilações completas por segundo, chama-se de frequência, $f \equiv 1/T$. Outra definição importante é a frequência angular, ω, que na verdade é uma oscilação completa (2π) dividida pelo período de oscilação, ou matematicamente $\omega \equiv 2\pi/T$.

Para ser possível conseguir um movimento harmônico simples é necessário que o sistema esteja sujeito a uma força restauradora, F, proporcional ao deslocamento, x, e que ambos tenham sentidos contrários. Um sistema físico comum no qual se pode obter esse movimento é o sistema massa-mola.

A lei de Hooke diz que a força elástica é proporcional ao deslocamento e possui sentido oposto a ele, ou seja, $F=-kx$, sendo k a constante da mola. Por outro lado, a segunda lei de Newton diz que a força é proporcional a aceleração: $F=ma$, em que m é a massa do corpo. Sabendo que a aceleração da partícula, quando sujeita a um movimento harmônico, é dada por $a=-\omega^2 x$, e substituindo essa equação na segunda lei de Newton obtêm-se: $F=-m\omega^2 x$. Igualando esta última equação com a lei Hooke, $-m\omega^2 x=-kx$, é notável que a constante elástica pode/possa ser escrita como $k = m\omega^2$ substituindo a definição da frequência angular nessa expressão e isolando o período, tem-se:

2.9

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

montagem e execução

- Pendure a mola no apoio de sustentação e posicione o suporte com apenas um disco no extremo inferior da mola. Provoque o movimento harmônico simples deslocando o sistema em 2 *cm* e soltando com cuidado para não provocar movimentos laterais na mola. Teste várias vezes até conseguir e depois meça o tempo para 10 oscilações consecutivas.
- Coloque mais um disco no suporte e repita o procedimento (a). Para cada valor de massa, utilize sempre a mesma amplitude de 2 cm. Prossiga aumentando gradativamente a massa no suporte até o valor de 250 g, variando 50 g por vez. Monte uma tabela relacionando a massa pelo tempo de dez oscilações.
- Através de suas medidas, encontre o período de oscilação para o sistema em cada uma das medias realizadas nos itens (a) e (b). Acrescente outra coluna em sua tabela e anote cada um dos valores obtidos para o período de oscilação.
- Com os valores indicados na tabela construa um gráfico do período em função da massa. Analise a forma do gráfico obtido e argumente o tipo de função que ele pode representar.
- Suponha que a relação entre período e massa pode ser dada na seguinte forma:

2.10

$$T = B \cdot m^a$$

- Compare as equações (2.9) e (2.10) e apresente uma interpretação para as constantes a e B. Ajuste a curva adequada e encontre os valores de a e B com suas respectivas unidades, se houver.

- Caso não seja possível fazer o ajuste de curva, deve-se linearizar a equação (2.10) e utilizar o método de regressão linear para encontrar as constantes. Isso pode ser feito aplicando-se o logaritmo natural em ambos os lados da equação (2.10). Para tanto, encontre uma expressão para "ln " T e monte um gráfico em função de "ln " m. Faça a regressão linear e ache os valores para as constantes a e B com seus respectivos erros. Não se esqueça de indicar suas unidades de medidas.

[2.6] momento de inércia

objetivos

Encontrar a constante multiplicativa para o momento de inércia de um aro e de uma esfera e compará-las com os valores conhecidos.

material necessário

Rampa, transferidor, esfera, aro, trena, cronômetro, bobina de lançamento e sensor de movimento.

pré-requisitos

Quando um corpo se encontra em rotação é possível definir equações semelhantes ao movimento de translação apenas redefinindo alguns conceitos. O momento de inércia, I, de um corpo em rotação é o que se pode chamar de análogo da massa, m, em movimentos de translação.

Porém, diferentemente da massa de um corpo o momento de inércia depende de alguns fatores importantes, que devem ser levados em consideração, tais como: o posicionamento do eixo de rotação, a simetria do corpo e a distribuição de massa. Mas, de modo geral, calcula-se o momento de inércia resolvendo a integral $I=\int r^2\, dm$,em quer é a distância perpendicular até o eixo de rotação. Porém nem sempre é factível resolver essa equação, no entanto, para corpos com alguns tipos de simetria a solução é simples. Particularmente, corpos com simetria esférica ou cilíndrica possuem momento de inércia dados da seguinte maneira:

2.11
$$I = \beta m r^2$$

Em que β é uma constante que depende da simetria do objeto e também da distribuição de massa em torno do eixo de rotação.

Para encontrar o fator β na equação (2.11), utiliza-se um corpo descendo um plano inclinado sem deslizar, isto é, rolando plano a baixo. Nessa situação, o movimento do corpo é separado em duas partes: rotação e translação. Esses movimentos são vinculados através da equação:

2.12
$$v_{cm} = \omega r$$

Sendo v_{cm} a velocidade do centro de massa do corpo, ω é a velocidade angular e r é o raio do corpo. Se o objeto é colocado no plano inclinado e solto com velocidade inicial nula, então haverá também a conservação de energia. No instante inicial, há apenas energia potencial e, no instante final, apenas energia cinética, considerando o zero de energia potencial no plano da mesa, então tem-sese tem que:

2.13
$$mgh = \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}mv_{cm}^2$$

Em que g é a aceleração da gravidade e h é a altura do plano inclinado. Sendo φ a inclinação do plano e x a distância percorrida pelo objeto, pode-se escrever a altura do plano como:

2.14
$$h = xsen\varphi$$

Substituindo as equações (2.11), (2.12) e (2.14) em (2.13) encontra-se:

$$\frac{1}{2}\beta v_{cm}^2 + \frac{1}{2}v_{cm}^2 = gxsen\varphi.$$

Isolando ${v^2}_{cm}$ a expressão será:

$$v_{cm}^2 = \frac{2gsen\varphi}{1+\beta}x$$

montagem e execução

- Peça ao professor instruções para utilizar o cronômetro. A bobina deve ser posicionada no início da rampa e o sensor de movimento no final de cada trajetória. Faça alguns testes preliminares. O cronômetro é capaz de fazer o cálculo da velocidade do objeto quando inserida a distância percorrida, portanto, pergunte como ajustar o equipamento para obter a leitura desse dado.
- Escolha, no transferidor, um ângulo de inclinação para a rampa entre 4° e 5° com a horizontal. Anote o valor escolhido. Gire lentamente o parafuso para fixar a rampa na posição desejada.
- Meça 1/5 do comprimento da rampa e posicione o sensor de movimento. Encoste a esfera na bobina de lançamento e solte 5 vezes anotando as velocidades. Calcule o valor da velocidade final média de descida e seu erro utilizando o método estatístico.
- Repita o procedimento anterior para mais 5 distâncias na rampa, sem alterar o ponto de lançamento. Calcule a velocidade final média para cada uma delas (com o erro!) e monte em uma tabela de velocidade por distância.

- Refaça o item (b), (c) e (d) para o aro.
- Com as tabelas em mãos, faça dois gráficos de velocidade ao quadrado, v^2, por distância, x, um para a esfera e o outro para o aro. Faça a regressão linear, compare o resultado com a equação (2.11) e encontre o valor de β para a esfera e para o aro.
- No apêndice C encontram-se os valores teóricos para a constante β de objetos simétricos. Com base nesse apêndice, explique se os valores encontrados foram satisfatórios.

[2.7] trilho de ar

objetivos

Verificar as equações de Newton no movimento de objetos. Calcular a força resultante de corpos acelerados por uma força constante.

material necessário

2 sensores fotoelétricos, trilho de ar com régua e um carro de trilho com antena, compressor, cronômetro, roldana de sustentação, 2 cilindros de massas diferentes e balança.

pré-requisitos

A segunda lei de Newton diz que a força resultante, $\vec{F}_R$, que atua sobre um corpo é igual ao produto de sua massa, *m*, pela sua aceleração, *a*. Em termos matemáticos: $\vec{F}_R = m \cdot \vec{a}$. Se todas as forças que atuam no corpo são conhecidas, então é possível encontrar a resultante das forças. Para saber a massa do corpo, é necessário apenas dispor de uma balança. Assim, pode-se calcular a aceleração que um determinado corpo vai adquirir quando submetido a uma força resultante conhecida.

Por outro lado, um corpo acelerado obedece às leis da cinemática de corpos rígidos e se movimenta de acordo com a equação:

2.15
$$x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2$$

Sendo x uma posição qualquer, x_0 a posição inicial, v_0 a velocidade inicial, a a aceleração e t o tempo gasto no percurso. Se um objeto inicia seu movimento do repouso e sua posição inicial é marcada na origem das coordenadas, a equação (2.15) se reduz a:

2.16
$$x = \tfrac{1}{2}at^2$$

Um procedimento para medir indiretamente a aceleração adquirida por um objeto, sujeito a uma força conhecida, consiste em marcar dois pontos da trajetória do corpo x_1 e x_2, e escrever a equação (2.16) para cada uma deles: $x_1 = ½\, at_1^2$ e $x_2 = ½\, at_2^2$. Posteriormente, pode-se isolar os tempos, t_1 e t_2, em cada uma dessas equações e encontrar uma expressão para a variação de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$ que pode ser dada por:

2.17

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2x_2}{a}} - \sqrt{\frac{2x_1}{a}}$$

Após algumas manipulações algébricas na equação (2.17), é possível encontrar uma expressão para calcular o valor da aceleração do objeto, que pode se escrita como:

2.18

$$a = \frac{2}{\Delta t^2}(\sqrt{x_2} - \sqrt{x_1})^2.$$

montagem e execução

- Verifique a massa dos cilindros e do carro com a balança. Determine o valor da incerteza vinculada à medida e anote os dados. Monte o experimento de acordo com a Figura 2.5 utilizando um dos cilindros no extremo da linha. Certifique-se que o fio utilizado seja extenso o suficiente para deixar o carro, posicionado antes do primeiro sensor, em repouso no trilho de ar.

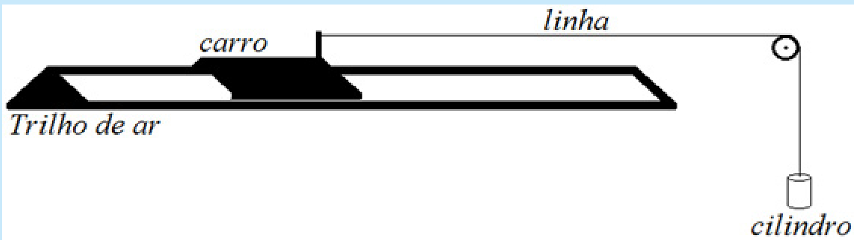

Figura 2.4: Representação simplificada do trilho de ar com o carro utilizado no experimento.

- Movendo lentamente o carro, determine a posição de disparo para cada sensor na régua. Escolha também a posição da régua na qual o carro será lançado. Essa posição deve ser marcada pela antena do carro que vai disparar os sensores. Identifique a incerteza para estas posições e anote os valores.
- Soltando o carro da posição inicial, determine a variação de tempo, Δt, gasto para percorrer a distância entre os sensores. Você deve repetir o procedimento várias vezes, a fim de obter um resultado mais preciso. Considere x_1 a distância entre a posição inicial x_0 e o primeiro sensor, e analogamente, x_2 a distância entre x_0 e o segundo sensor. Utilizando a cinemática com esses valores encontrados, determine a aceleração a do conjunto peso e carro através da equação (2.18).

- De acordo com a teoria relacionada à dinâmica de forças, determine a aceleração do conjunto e compare com o resultado acima (item d). Faça uma tabela comparativa com os resultados e analise se os dados se encontram dentro da faixa de erro esperada.
- Retire o cilindro utilizado no experimento e substitua pelo outro. Refaça os procedimentos (b), (c) e (d). Compare os resultados encontrados no doisnos dois casos.

unidade 3

termodinâmica e hidrostática e ondas sonoras

[3.1] capacidade térmica de um calorímetro

objetivos

Encontrar o valor da capacidade térmica de um calorímetro.

material necessário

Amperímetro, voltímetro, cronômetro, termômetro, béquer, recipiente isolado com resistência de aquecimento e fonte de corrente contínua.

pré-requisitos

A dissipação da energia elétrica sob a forma de energia térmica em condutores é chamada de efeito Joule. A energia dissipada, ΔE, em um aquecedor durante um intervalo de tempo Δt pode ser escrita como $\Delta E = IV\Delta t$, desde que tanto a corrente, I, quanto a tensão elétrica, V, sejam mantidas constantes.

Estando o aquecedor imerso em água, a energia transferida para ela provocará um aumento em sua temperatura. A quantidade de calor absorvida será $Q = C_S\,\Delta T$, sendo C_S a capacidade térmica do sistema. A capacidade térmica da água é dada por $C_a = m_a c_a$ em que m_a é a massa da água e c_a é o calor específico da água. A capacidade térmica do sistema será $C_S = C_C + C_a$ em que C_C é a capacidade térmica do calorímetro.

Após o aquecedor ficar ligado por certo período de tempo submerso na água a energia ΔE cedida pelo calorímetro será igual aà energia absorvida pela água Q. Essa transferência de energia resulta em um aumento da temperatura da água que pode ser encontrada fazendo ΔE=Q. Se o cronômetro for ligado no mesmo instante que o calorímetro então o tempo inicial será nulo, ou seja, Δt=t - 0. Assim, será encontrado que a temperatura da água varia da seguinte maneira:

3.1
$$T = T_0 + \frac{IV}{C_S}t$$

Em que T_0 é a temperatura inicial da água no momento em que o calorímetro é ligado e T é a temperatura da água no instante de tempo t. O calor específico da água é c_a=(4,18 ± 0,01) J/g °C.

montagem e execução

- Utilizando o béquer, coloque exatamente 150 ml de água no recipiente isolado. Introduza o termômetro no orifício central do recipiente e meça a temperatura inicial da água. Importante: Durante o processo de aquecimento, misture cuidadosamente a água para que sua temperatura permaneça uniforme.
- O equipamento deve estar montado conforme a Figura 3.1. Ligue a fonte e em seguida a chave de segurança do circuito. Não modifique a corrente do sistema e anote os valores

mostrados no amperímetro e no voltímetro. Obtenha valores da temperatura da água em função do tempo até que a temperatura esteja a cerca de 20 °C acima da temperatura inicial. Cada 2 °C de aumento na temperatura, faça a medida do tempo.

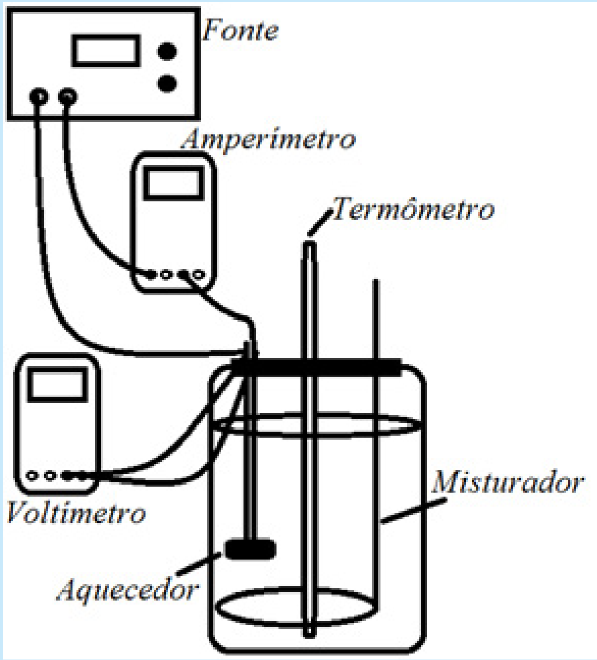

Figura 3.1: Representação esquemática do calorímetro ligado a uma fonte de tensão utilizada para aquecer água.

- Construa um gráfico da temperatura versus tempo. Utilize o processo de regressão linear para obter uma equação que melhor represente seus dados e identifique as constantes com suas unidades e erros.
- Tendo como base a equação (3.1) e sabendo que $C_S = C_C + C_a$, calcule a capacidade térmica do calorímetro juntamente com sua incerteza.

[3.2] calor específico de um sólido

objetivos

Encontrar o calor específico de um sólido.

material necessário

2 termômetros, calorímetro, aquecedor elétrico, béquer, balança e corpo de prova.

pré-requisitos

O calor específico, c, é uma propriedade que depende do material com o qual os corpos são feitos. Essencialmente, ele mede o quão termicamente insensível uma substância é ao aquecimento, e pode ser calculado através da seguinte equação:

3.2
$$c \equiv \frac{Q}{m\Delta T}$$

sendo Q a quantidade de calor recebido (ou cedido) pelo corpo, m a massa do objeto e ΔT a variação de temperatura a qual o corpo está sujeito.

Para medir essa propriedade de um determinado corpo, pode-se utilizar um sistema isolado, denominado calorímetro, no qual é colocado um objeto a uma temperatura elevada em contato com a água. Nessa situação, o corpo cede calor para a água até que o equilíbrio térmico seja atingido. Como o sistema não troca calor com o meio, a quantidade de calor cedida pelo corpo, Q_C, é exatamente igual à quantidade de calor recebida pela água, Q_R.

É possível determinar o calor recebido através da equação:

3.3
$$Q_R = [E(T_e - T_1) + mc(T_e - T_1)]$$

Sendo E o equivalente em água do calorímetro (veja o Apêndice D), m a massa de água, c o calor específico da água, T_1 a temperatura inicial da água e T_e a temperatura final de equilíbrio. Por outro lado, o calor cedido pode ser escrito como:

3.4
$$Q_C = -Mc_{cp}(T_e - T_2)$$

Em que M é a massa do corpo de prova, c_{cp} é o calor específico do corpo de prova, T_2 é a temperatura inicial do corpo e T_e a temperatura final de equilíbrio. Mas $Q_R = Q_C$, assim igualando as equações (3.3) e (3.4), o calor específico do corpo de prova encontrado pode ser expresso como:

3.5
$$c_{cp} = \frac{(E+mc)(T_e-T_2)}{-M(T_e-T_2)}$$

montagem e execução

- Utilizando o béquer, coloque exatamente 100 ml de água no recipiente isolado e tampe. Introduza o termômetro no orifício central e meça a temperatura inicial da água.
- Com uma balança, determine a massa do corpo de prova. Coloque o em outro calorímetro juntamente com uma quantidade água suficiente para cobri-lo. Ligue o aquecedor, deixe a temperatura aumentar até cerca de 70 °C e anote o valor dessa temperatura.
- Utilizando uma pinça, com muito cuidado para não se queimar, retire o corpo do calorímetro e coloque o mais rápido possível dentro do recipiente isolado preparado anteriormente. Tampe, use o agitador até a estabilização da temperatura e anote seu valor.

- Encontre o valor adequado para o equivalente em água de acordo com o Apêndice D. Calcule o calor específico através da equação (3.5).
- Repita todo o procedimento anterior por mais 4 quatro vezes, como uma forma de minimizar o erro, e encontre o valor médio para o calor específico.

[3.3] equação de Newton para o resfriamento

objetivos

Determinar a curva de resfriamento de um termômetro e verificar a validade da lei de Newton para o resfriamento.

material necessário

Amperímetro, voltímetro, cronômetro, termômetro, béquer, recipiente termicamente isolado com resistência de aquecimento, fonte de corrente contínua e suporte para o termômetro.

pré-requisitos

Quando dois objetos, com temperaturas diferentes, são colocados em contato térmico há transferência de calor do objeto mais quente para o mais frio até que ambos atinjam a mesma temperatura. Para um sólido em contato térmico com um fluido, a taxa de resfriamento é dada por:

3.6
$$\frac{d\Delta T}{dt} = -k\Delta T$$

Em que ΔT é a diferença de temperatura entre o objeto, T_{obj}, e a vizinhança, Tv. A constante k depende de vários fatores, tais como: densidade do fluido, se o seu estado é líquido ou gasoso, se a superfície de contato é plana ou curva, o calor específico e a condutividade térmica do fluido, entre outros.

A equação (3.6) é conhecida como equação de Newton para o resfriamento e para resolvê-la é necessário utilizar os métodos para resolução de equações diferenciais ordinárias. Fazendo isso é encontrada a seguinte solução

3.7
$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-kt}.$$

Nessa equação a diferença de temperatura entre a superfície do sólido e o fluido no instante de tempo inicial (t = 0) está representada por ΔT_0.

montagem e execução

- Meça a temperatura ambiente da sala com o termômetro e anote o valor encontrado. Introduza o termômetro no orifício central que existe na tampa do calorímetro de aquecimento de acordo com a Figura 3.1 e prenda a outra extremidade do termômetro no suporte. Utilizando 100 ml de água no recipiente isolado, ligue a fonte e a chave do circuito e aqueça a ponta do termômetro até uma temperatura aproximada de 60 °C. Importante: Durante o processo de aquecimento, misture cuidadosamente a água para que a temperatura se mantenha homogênea.
- Ao atingir a temperatura desejada desligue a chave do circuito, suspenda o suporte do termômetro e dispare o cronômetro. A medida do tempo deverá ser feita a cada 2 °C até que a temperatura esteja bem próxima da temperatura ambiente, medida anteriormente.
- Coloque água fria no béquer e meça a temperatura inicial da água. Repita o procedimento anterior, reaquecendo o termômetro no calorímetro. Posteriormente, coloque-o para esfriar na água do béquer. Faça medidas do tempo sempre que a temperatura cair 5 °C para este caso.
- Ajuste uma curva adequada à equação (3.7) e encontre o valor de k com seu respectivo erro ou faça o gráfico de "ln"(ΔT) pelo tempo e utilize o método de regressão linear por mínimos quadrados.

[3.4] termopares

objetivos

Medir a força eletromotriz induzida que surge em termopares.

material necessário

200 *ml* de água quente, 200 *ml* de água a temperatura ambiente, dois termômetros, um par de frascos térmicos, termopar, multímetro, dois cabos com ponteiras tipo banana e béquer.

pré-requisitos

O físico alemão Thomas Seebeck, em 1821, descobriu que diferenças de temperatura podem produzir uma força eletromotriz induzida em um tipo de fio metálico, que ficou conhecido posteriormente como termopar. Para construir um dispositivo desse tipo, é necessário utilizar três fios metálicos, sendo que um deles deve ser composto de um metal diferente dos demais. A união dos fios formará duas junções e deve ser feita de maneira intercalada, de modo que o fio metálico diferente fique entre os outros dois. Quando as duas junções do termopar são mantidas a temperaturas diferentes, surge uma força eletromotriz induzida.

O efeito só pode ser observado para algumas combinações de metais que compõem o termopar. Existem alguns tipos de termopares comerciais como o tipo J que é formado de ferro e constantan, também o tipo K, formado por cromo e alumínio e o tipo T, formado por cobre e constantan.

Uma aplicação imediata para esse efeito são os termômetros digitais. Esse tipo de termômetro é feito a partir de associações de termopares, na qual uma das junções é mantida a temperatura ambiente e a outra é mantida em contato com o corpo que se pretende descobrir a temperatura. Antes de utilizar o termopar como termômetro é necessário fazer sua calibração.

Para calibrar o termopar é necessário conhecer a corrente gerada em um determinado tipo de junções para uma diferença de temperatura conhecida. A diferença de temperatura entre as junções quente e fria, ΔT, e a força eletromotriz induzida, ε, são proporcionais se as temperaturas das junções quente e fria não são muito diferentes. A constante de proporcionalidade, α é chamada de coeficiente Seebeck e depende tanto dos materiais como de ΔT. Matematicamente, tem-se a seguinte relação:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \tag{3.8}$$

Conhecendo o valor de α para uma determinada temperatura de referência é possível determinar a temperatura da outra junção, e assim, utilizar o termopar como termômetro.

montagem e execução

- Identifique qual é o tipo de termopar a ser utilizado no experimento. Coloque 200 *ml* de água em temperatura ambiente no frasco de referência em que ficará a junção fria. Com muito cuidado para não se queimar coloque 200 *ml* água fervente no outro frasco. Tampe imediatamente os frascos, de modo que as mangueiras fiquem no interior do frasco com água quente, em seguida, coloque os termômetros nos orifícios com cuidado para não os quebrar. Conecte o multímetro nas duas entradas existentes em cima da tampa dos frascos.
- Seja T_1 a temperatura da água quente e T_2 a temperatura da água fria. Esta última será considerada a temperatura de referência e não deve haver alterações. Meça a temperatura da água quente de acordo com as variações da tensão observadas no multímetro. Anote pelo menos sete pares de tensão e temperatura e coloque os valores em uma tabela.
- Com base na equação (3.8) construa o gráfico de tensão por diferença de temperatura. Faça a regressão linear e identifique o valor do coeficiente de Seebeck com seu respectivo erro.

[3.5] densidade de um líquido

objetivos

Determinar a densidade de um líquido.

material necessário

Cilindro de plástico graduado, paquímetro, dinamômetro, suporte para o dinamômetro, béquer e 250 ml de um líquido (glicerina, óleo, álcool).

pré-requisitos

O empuxo, E, é uma força direcionada para cima que atua em um objeto submerso em um líquido. Essa força surge devido à diferença de pressão entre a parte de cima e a de baixo do objeto. De acordo com o princípio de Arquimedes, o módulo do empuxo é igual ao peso do líquido deslocado pelo objeto submerso, $P_{LD}=m_{LD}\,g$, sendo g a aceleração da gravidade. Escrevendo a massa do liquido deslocado em termos de sua densidade ρ_{LD} e volume V_{LD}, o empuxo pode ser escrito como $E=\rho_{\_LD}\,gV_{\_LD}$.

Por causa do empuxo, um objeto submerso aparenta ser mais leve do que, na realidade, ele é. Mergulhando um objeto pendurado em um dinamômetro em um líquido, é possível medir o quanto ele fica mais leve quando submerso, e, a esse valor, é dado o nome de peso aparente, *P'*. Assim, o peso aparente medido será igual à diferença entre o peso real do objeto, *P*, e o empuxo *E* sobre ele, matematicamente:

3.9
$$P' = P - \rho_{LD} g V_{LD}.$$

montagem e execução

- Com o paquímetro, meça as dimensões do cilindro para calcular o seu volume, com seu respectivo erro. Verifique a calibração do dinamômetro e pendure o cilindro para medir seu peso real e anote o valor encontrado com o erro correspondente.
- Mergulhe o cilindro gradativamente, identificando o valor do peso aparente P' à medida que o mesmo afunda. Faça uma leitura de 5 em 5 *ml* e anote o volume deslocado de água e o valor aferido no dinamômetro. Os valores de força devem ser registrados em Newton e o volume em mililitros (que equivale a cm^3). Seja meticuloso e encontre sempre a incerteza nas medidas.
- Repita todo o procedimento com álcool obtendo novamente o empuxo à medida que o volume for deslocado e posicionando os valores em sua tabela. Tente encontrar, para os mesmos volumes deslocados, qual o valor do peso aparente e do empuxo proporcionado pelo álcool. Novamente, determine a incerteza nas medidas realizadas.
- Com os valores indicados nas tabelas construa um gráfico da variação do empuxo com o volume deslocado. Compare as duas sequencias de pontos e explique o que caracteriza a diferença no empuxo da água e do álcool.

- Ajuste uma curva de regressão linear para quantificar a relação do empuxo com o volume deslocado de líquido. Interprete as constantes e determine o valor da densidade da água e do álcool.

[3.6] velocidade do som no ar

objetivos

Estudar os harmônicos do som em uma proveta com água, interpretar o fenômeno de interferência e encontrar a velocidade do som no ar.

material necessário

Duas 2 provetas sendo que pelo menos uma delas deve ser de 500 ml, água, 2 diapasões e régua.

pré-requisitos

Uma onda mecânica é uma perturbação periódica de um meio elástico que se propaga no temo e no espaço. Esse tipo de onda é dividido em dois tipos: transversais e longitudinais. As ondas transversais possuem a direção de vibração perpendicular a direção de propagação da onda. Já as longitudinais possuem a direção de vibração paralela aà direção de propagação da onda.

Para o estudo das ondas é importante identificar algumas grandezas básicas como período de oscilação T, frequência f, comprimento de onda λ, velocidade v, entre outras. O período é definido como o tempo necessário para completar uma oscilação e a frequência é o número de oscilações em uma unidade de tempo. De acordo com o SI o período é dado em segundos e a frequência em hertz. Já o comprimento de onda é uma medida do espaço ocupado por uma oscilação completa como marcado na (Figura 3.2), para ondas transversais n aparte Aa,) e para onda longitudinais na parte Bb)..

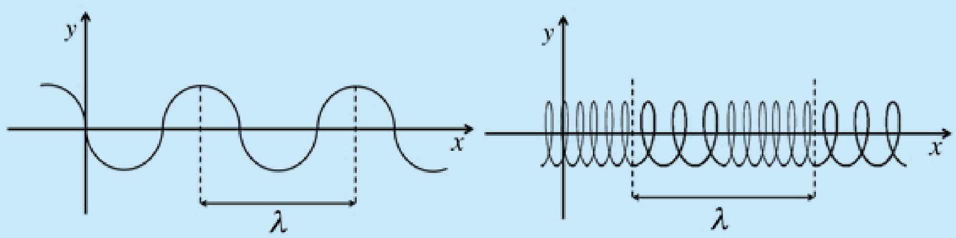

Figura 3.2: Representação esquemática de ondas transversais em a) e longitudinais em b) com a medida do comprimento de onda em cada uma das situações.

As ondas sonoras são transversais que se deslocam através da compressão e descompressão do ar. Nos tubos dos instrumentos musicais a onda é refletida em uma das extremidades e ocorre a superposição entre as ondas que entram e as que saem do tubo, formando ondas estacionárias. Como o nome sugere, esse tipo de onda não se propaga no espaço e apresenta pontos de máxima amplitude chamados de anti-nós e pontos de amplitude nula que são os nós, veja a parte a) Figura 3.3. Para os tubos de instrumentos musicais, por exemplo, as ondas podem ter números inteiros de comprimentos de ondas para o caso de tubos fechados ou números semi-inteiros de comprimentos de ondas para tubos abertos em apenas um dos lados.

Cada modo ressonante confinado dentro de um tubo é chamado de harmônico. O primeiro harmônico possui o maior comprimento de onda possível como mostrado no tubo de cima da parte b) da Figura 3.3. Nesse caso existirá apenas um ponto de nó e um ponto de anti-nó. O segundo harmônico deve apresentar dois anti-nós como mostrado no tubo do meio na parte b) da Figura 3.3. Por tanto, os harmônicos são numerados de acordo com o número de anti-nós que possuem e cada um possui uma frequência própria de ressonância. A velocidade de uma onda pode ser calculada através sua frequência e seu comprimento de onda:

$$\boxed{v = \lambda f}$$

Entretanto a velocidade de uma onda também pode depender de fatores como densidade e temperatura do meio de propagação.

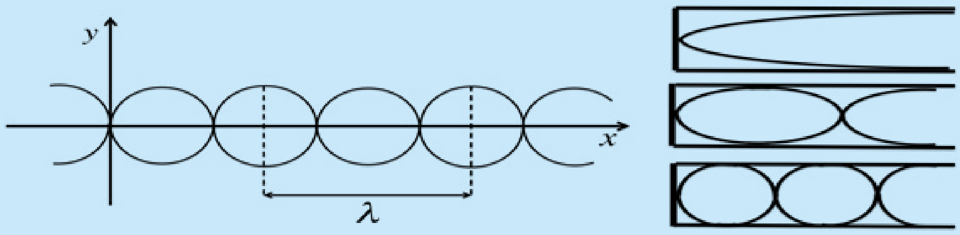

Figura 3.3: Representação esquemática de ondas estacionárias em a) e o três primeiros harmônicos em b).

montagem e execução

- Com a proveta de 500 ml vazia coloque o diapasão para vibrar sobre ela e veja se é possível ouvir um som forte. Vá colocando água na proveta até que o som fique ressonante e seja possível ouvir claramente.
- Determine a profundidade para a qual som se torna ressonante utilizando uma régua. Essa medida deverá ser feita a partir da posição superior da proveta até a superfície da água. Identifique a forma do primeiro harmônico e relacione o valor encontrado com o comprimento de onda.
- Sabendo que o diapasão vibra a uma frequência f=440 Hz determine a velocidade do som no ar dentro da proveta.
- Em um dia chuvoso ou muito quente o resultado obtido pode alterar? Explique.

- Para ouvir o próximo harmônico com a mesma proveta qual deveria ser a profundidade da água?
- Posicione dois diapasões vibrando sobre a proveta e verifique se existe diferença no som ouvido com somente um diapasão por vez. Explique o resultado.

unidade 4

eletrostática

[4.1] resistência

objetivos

Medir e calcular a resistência elétrica de resistores associados em série, em paralelo e de sistemas mistos.

material necessário

Painel para montagem eletrônica, quatro resistores diferentes e multímetro com cabo de medida.

pré-requisitos

Elementos resistivos são utilizados em circuitos com a função de introduzir uma determinada resistência elétrica. A unidade de resistência no sistema internacional é o ohm representado pelo símbolo Ω. O valor da resistência depende do material com o qual o resistor é feito e é etiquetado em seu corpo através do código de cores. Esse código está descrito em uma tabela no Apêndice E.

Em muitos casos se faz necessária a utilização de associações de resistores em um circuito. Essas associações podem ser feitas em série, em paralelo ou com uma mistura dessas duas. Quando os resistores estão associados em série, todos eles são atravessados pela mesma corrente, e a resistência equivalente do circuito será dada por:

4.1
$$R_{Eq} = \sum_i R_i$$

Quando a associação é feita em paralelo a diferença de potencial em todos os resistores é que permanecerá a mesma e assim a resistência equivalente pode ser escrita como:

4.2
$$\frac{1}{R_{Eq}} = \sum_i \frac{1}{R_i}$$

montagem e execução

- Identifique o valor da resistência de cada um dos resistores através da tabela de cores do Apêndice E. Meça cada uma das resistências com o multímetro na função ohmímetro com a escala apropriada para cada resistor. Compare os valores obtidos e identifique qual deles é o mais preciso.
- Conecte dois resistores em série e meça a resistência equivalente. De acordo com a equação (4.1), calcule o valor teórico para a resistência equivalente, utilizando os resultados encontrados na tabela de cores no item (a), com seu respectivo erro. Compare o valor medido com o valor calculado e justifique a diferença entre eles.

- Conecte dois resistores em paralelo e meça a resistência equivalente. De acordo com a equação (4.2), calcule o valor teórico para a resistência equivalente, utilizando os resultados encontrados na tabela de cores no item (a), com seu respectivo erro. Compare o valor medido com o valor calculado e justifique a diferença entre eles.
- Monte um circuito misto de modo que dois resistores estejam e série e dois em paralelo, meça a resistência equivalente. Calcule o valor teórico para a resistência equivalente do circuito misto e compare com o valor medido justificando a diferença encontrada.

[4.2] lei de ohm

objetivos

Estudar o comportamento de resistores ôhmicos.

material necessário

Painel para montagem eletrônica, resistor, dois multímetros, fonte variável de tensão contínua e cinco cabos.

pré-requisitos

Conforme a lei de Ohm, a tensão V aplicada a um dispositivo é proporcional à corrente I que o atravessa. A constante de proporcionalidade é a resistência R do dispositivo. Existem resistores que sempre obedecem à lei de Ohm e, por esse motivo, são classificados como resistores ôhmicos. Mas, a grande maioria dos dispositivos utilizados nos equipamentos eletrônicos atuais não possui essa propriedade e são classificados como dispositivos não ôhmicos. Para resistores que obedecem à lei de Ohm, é possível encontrar sua resistência através das medidas da tensão e da corrente, além da relação linear entre elas:

$$V = RI \tag{4.3}$$

montagem e execução

- Identifique através da tabela de cores do Apêndice E o valor da resistência do resistor com seu respectivo erro. Com o multímetro ajustado na função ohmímetro, meça a resistência dele. Anote os valores encontrados para comparação posterior.
- Monte o circuito de acordo com a Figura 4.1. **Peça ao professor para conferir o circuito montado antes de ligar a fonte!**
- Ligue a fonte, ajuste a tensão em *0,5 V* e anote o valor da corrente que aparece no amperímetro. Varie a tensão de *0,5* em *0,5 V* até o valor máximo de *5,0 V*. Não ultrapasse esse valor! Monte uma tabela com os valores medidos de tensão e corrente.
- Com base na equação (4.3), monte um gráfico de tensão por corrente e faça a regressão linear. Encontre o valor da resistência, compare com os valores obtidos anteriormente e justifique qual deles é o mais preciso.

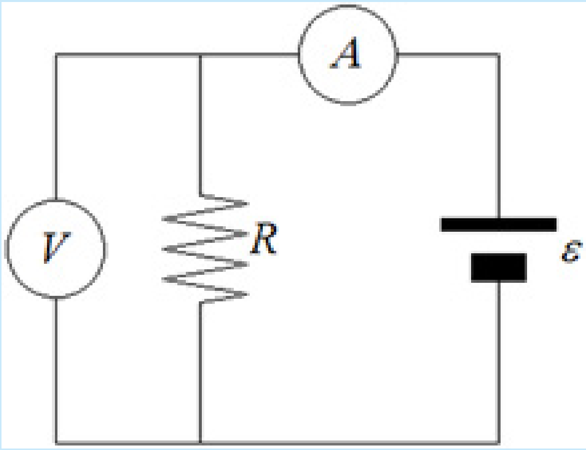

Figura 4.1: Circuito com uma fonte de tensão ε, um resistor R, um amperímetro A e um voltímetro V.

[4.3] resistores não ôhmicos

objetivos

Estudar o comportamento de resistores não ôhmicos e verificar a validade das equações para as associações em série e em paralelo de resistores.

material necessário

Painel para montagem eletrônica, duas lâmpadas, dois multímetros, fonte variável de tensão contínua e cinco cabos.

pré-requisitos

A resistência elétrica R fornecida por dispositivos eletrônicos é definida através da equação:

$$R = {}^{V}\!/_{I} \tag{4.4}$$

Em que V é a voltagem e I é a corrente. Mesmo que o dispositivo não obedeça à lei de Ohm, sua resistência ainda pode ser calculada através da equação (4.4). Porém, como a resistência varia com a diferença de potencial, para cada valor de V e I será encontrado um valor diferente para R. Além disso, as associações de resistores não ôhmicos também se comportam de acordo com as equações (4.1) e (4.2), referentes a associações em série e em paralelo.

montagem e execução

- Monte o circuito de acordo com a Figura 4.1 utilizando uma lâmpada no lugar do resistor. Peça ao professor para conferir o circuito montado antes de ligar a fonte!

- Ligue a fonte, ajuste a tensão para 1,0 V, meça o valor da corrente correspondente e anote os valores em uma tabela. Varie a tensão de 1,0 em 1,0 V até o valor máximo de 10,0 V e complete os dados da tabela. Não ultrapasse o valor máximo da corrente para não queimar a lâmpada!
- Repita o procedimento do item (a) para a outra lâmpada.
- Faça dois gráficos de tensão por corrente, um para cada lâmpada. Verifique o comportamento da curva e encontre a melhor função para ajustar os dados experimentais.
- Utilizando os dados das tabelas dos itens (b) e (c) e a definição de resistência dada na equação (4.4), encontre o valor da resistência de cada uma das lâmpadas quando a tensão na fonte marcava 10,0 V. Através das equações (4.1) e (4.2) encontre os valores das resistências para associações em série e em paralelo das duas lâmpadas, utilizando a tensão de 10,0 V.
- Monte o circuito com as duas lâmpadas em série. Peça ao professor para conferir o circuito montado antes de ligar a fonte! Ligue a fonte, ajuste a tensão para 10,0 V, observe o que acontece com a luminosidade das lâmpadas e justifique este comportamento. Meça a corrente e, através da equação (4.4), calcule o valor da resistência equivalente.
- Monte o circuito com as duas lâmpadas em paralelo. Peça ao professor para conferir o circuito montado antes de ligar a fonte! Ligue a fonte, ajuste a tensão para 10,0 V, observe o que acontece com a luminosidade das lâmpadas e justifique este comportamento. Meça a corrente e, através da equação (4.4), calcule o valor da resistência equivalente.
- Compare os valores obtidos nos item (e), (f) e (g), verificando a validade das equações (4.1) e (4.2) para resistores não ôhmicos.

[4.4] circuito com uma fonte de tensão

objetivos

Identificar o comportamento da corrente em circuitos resistivos através da lei dos nós de Kirchhoff.

material necessário

Multímetro, painel para montagem eletrônica, quatro resistores, oito fios com ponteira tipo banana e fonte de tensão contínua.

pré-requisitos

Um circuito elétrico pode ser definido como um caminho fechado para a passagem de corrente elétrica no qual são ligados dispositivos como: resistores, fontes, capacitores e indutores. Os circuitos podem ser compostos por vários caminhos fechados, interligados entre si, e cada um desses caminhos são denominados malhas.

Na Figura 4.2, o circuito mostrado possui uma pequena malha referente aos resistores ligados em paralelo, R_3 e o R_4 e uma malha externa que percorre a fonte, o resistor R_1, a pequena malha e o resistor R_2. Os pontos A e B unem mais de dois elementos do circuito e são denominados nós. A fonte de tensão fornece a diferença de potencial ε ao circuito, necessária ao surgimento da corrente I.

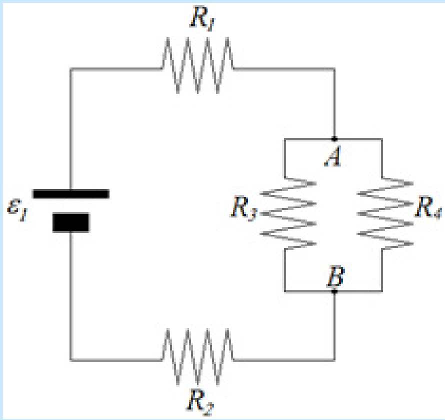

Figura 4.2: Circuito com uma fonte de tensão, ε, e quatro resistores R_1, R_2, R_3 e R_4.

As grandezas, ε, I, R_1, R_2, R_3 e R_4, são associadas através de algumas regras. Quando a corrente chega a um ponto de nó no circuito existem dois caminhos a serem seguidos e, portanto, a corrente se divide. Essa divisão depende da resistência encontrada em cada um dos caminhos disponíveis, mas, ao sair da malha por outro nó, a corrente será somada novamente. Assim, a corrente que chega ao ponto A da Figura 4.2 se divide para passar pelos resistores R_3 e R_4, e são novamente somadas ao saírem pelo ponto B. Essa regra é conhecida como lei dos nós de Kirchhoff.

montagem e execução

- Meça cada uma das resistências disponíveis e posteriormente monte o circuito conforme mostrado na Figura 4.3. Meça o valor da resistência equivalente entre os pontos 3 e 6, R_{36}, e responda se esses resistores se encontram em série ou em paralelo. Meça a resistência total do circuito entre os pontos 1 e 8, R_{18}.

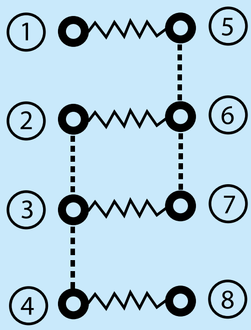

Figura 4.3: Representação do painel para montagem eletrônica com quatro resistores e suas conexões numeradas.

- Conecte o multímetro na função apropriada para medir corrente entre os pontos 5 e 6 de acordo com a Figura 4.3. Conecte a fonte de tensão contínua nos pontos 1 e 8. **Peça ao professor para conferir o circuito montado antes de ligar a fonte!** Ajuste a voltagem da fonte para 10 V e meça a corrente que entra no circuito, I_{56}. Utilizando os valores das resistências medidas no item (a) e a tensão de 10 V, calcule a corrente total no circuito através das equações (4.1), (4.2) e (4.3). Compare o resultado obtido com o valor medido e justifique se houver diferença.
- Posicione o multímetro entre os pontos 2 e 3. **Peça ao professor para conferir o circuito montado antes de ligar a fonte**! Meça a corrente I_{23} para uma tensão de 10 V. Calcule o valor teórico para a corrente nestas condições.
- Posicione o multímetro entre os pontos 3 e 4. **Peça ao professor para conferir o circuito montado antes de ligar a fonte**! Ligue a fonte com uma tensão de 10 V, meça a corrente I_{34} e encontre seu valor teórico nestas condições.
- Finalmente, posicione o multímetro entre os pontos 6 e 7. **Peça ao professor para conferir o circuito montado antes de ligar a fonte**! Meça a corrente I_{67}. A tensão deve ser mantida em 10 V e é necessário calcular o valor teórico para I_{67}.
- Monte uma tabela com todos os valores medidos e calculados, compare e justifique o resultado. De acordo com a teoria, as correntes I_{56} e I_{34} devem ser iguais. Além disso, a soma das correntes I_{23} e I_{67} deve ser igual ao valor da corrente I_{56}. Analise os resultados encontrados e explique se satisfazem a teoria.

[4.5] circuito com duas fontes de tensão

objetivos

Identificar o comportamento da corrente e da tensão em circuitos resistivos através da lei dos nós e da lei das malhas de Kirchhoff.

material necessário

Painel para montagem eletrônica, três resistores, dez cabos com ponteiras tipo banana, multímetro e fonte de alimentação ajustável com saída de tensão auxiliar fixa em 5 V e com saída de tensão variável.

pré-requisitos

Ao entrar em uma malha através de um nó a corrente se divide. Conforme a lei dos nós de Kirchhoff a soma das corrente que entram na malha é igual a soma das correntes que saem da malha pelo nó subsequente (veja os pré-requisitos do experimento 4.4). A lei das malhas, por sua vez, diz que quando a malha é percorrida por uma corrente, a soma das diferenças de potencial de todos os seus elementos é sempre nula. Para efetuar essa soma das tensões corretamente, é necessário tomar alguns cuidados e observar duas regras básicas.

A primeira é a regra dos resistores, segundo a qual quando o circuito é percorrido no mesmo sentido da corrente convencional e passa por um resistor, acontece uma queda na tensão e a diferença de potencial deve ser computada negativamente $-IR$. Por outro lado, se a passagem é feita no sentido contrário ao da corrente acontece um aumento de tensão e ela será computada positivamente $+IR$.

A segunda regra básica é das fontes, e diz que percorrendo o circuito, ao atravessar uma fonte do polo negativo para o positivo, a diferença de potencial aumenta e, portanto deve ser computada positivamente $+\varepsilon$. Caso contrário, passando do polo positivo para o negativo haverá uma queda de tensão e será computada negativamente $-\varepsilon$.

montagem e execução

- Meça a resistência de todos os resistores com o multímetro. Antes de montar o circuito, ligue a fonte, ajuste a saída variável da tensão em 2,5 V e confira os valores de tensão de ambas as saídas com o multímetro.
- Monte o circuito de acordo com a Figura 4.4, em que a diferença de potencial ε_1=2,5 V e ε_2=5,0 V. Peça ao professor para conferir as conexões antes de ligar a fonte!

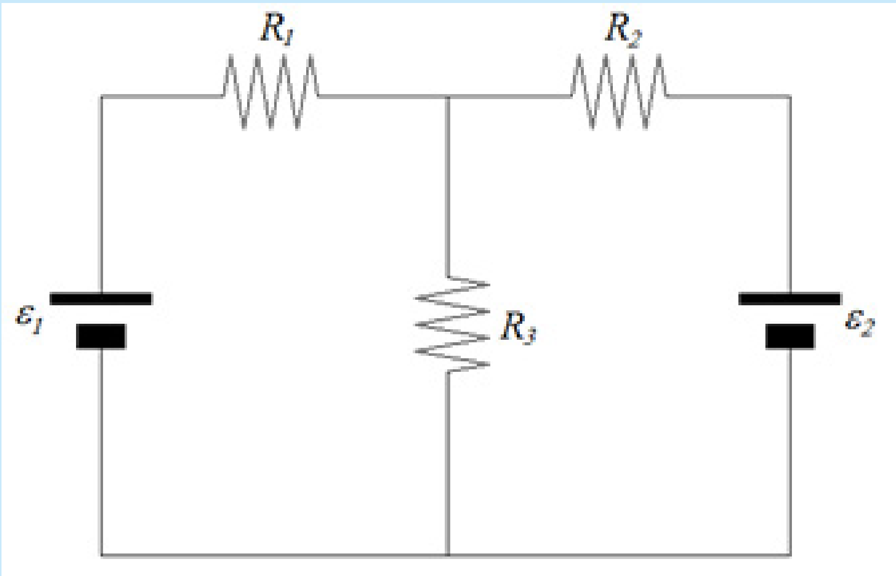

Figura 4.4: Circuito com duas fontes de tensão, ε_1 e ε_2, e três resistores R_1, R_2 e R_3.

- Meça o valor das correntes I_1, I_2 e I_3 e das tensões V_1, V_2 e V_3 em cada um dos resistores.
- Através das leis de Kirchhoff, encontre a equação que relaciona as correntes e a equação que relaciona as tensões desse circuito.
- Considerando os valores da diferença de potencial ε_1 = 2,5 V e ε_2= 5,0 V e os valores das resistências medidas no item (a), calcule os valores teóricos para as correntes e tensões em cada um dos resistores. Compare os valores medidos e calculados justificando possíveis diferenças entre eles.

[4.6] capacitor de placas paralelas

objetivos

Determinar a dependência da distância entre as placas de um capacitor e sua capacitância e calcular a permissividade de um dielétrico.

material necessário

Capacitor variável com escala milimétrica ajustável, dois cabos com terminais de jacaré, régua e multímetro com escala de 2000 pF na função de capacímetro.

pré-requisitos

Capacitores são dispositivos utilizados, em larga escala, nos equipamentos eletrônicos. Eles servem para armazenar cargas e possuem variadas formas, tamanhos e capacidades. Em uma capacitor de placas paralelas separadas por uma distância d, a diferença de potencial entre suas placas V pode ser escrita como $V = Ed$. Nessa equação, E representa o módulo do campo elétrico gerado no interior do capacitor, devido ao acúmulo de cargas opostas nas placas.

Destaca-se ainda que a carga armazenada no capacitor q é proporcional à V e que a constante de proporcionalidade é chamada de capacitância C de modo que $q = CV$. Assim é possível escrever a carga em função do campo como:

4.5
$$q = CEd.$$

O campo entre placas paralelas é constante e aproximadamente uniforme e pode ser escrito como $E = \sigma/\varepsilon$, em que ε é a permissividade do dielétrico situado entre as placas, $\sigma = q/A$ é a densidade superficial de cargas sendo A a área da placa. Substituindo essas expressões na equação (4.5), a carga será dada por $q=C(\sigma/\varepsilon)d=C(q/A)\ \ d/\varepsilon$. Dessa forma, é possível escrever a capacitância independentemente da carga, apenas em função de A e d da seguinte maneira:

4.6
$$C = \varepsilon\frac{A}{d}$$

montagem e execução

- Meça o diâmetro da placa do capacitor e calcule sua área. Identifique o dielétrico utilizado no experimento e o valor de sua permissividade elétrica de acordo com a literatura. Anote o valor para posterior comparação com o resultado medido.
- Conecte o capacitor ao multímetro através do cabo com pontas de jacaré e escolha a escala de 2000 pF para medir capacitância. Com o multímetro ligado, retire da base a

placa móvel do capacitor e observe o que acontece com o valor da capacitância. Este valor não se anula no aparelho, e recebe o nome de capacitância residual C_r. Anote o valor medido e justifique sua existência.

- Coloque a placa móvel a uma distância inicial de 1 mm da placa fixa e anote o valor da capacitância medida, C_m. Varie a distância entre as placas de 1 em 1 *mm*, meça os valores e faça uma tabela. O valor real da capacitância C será dado pela diferença entre o valor medido e a capacitância residual: $C = C_m - C_r$. Encontre o valor de C para cada uma de suas medidas e acrescente outra coluna em sua tabela.
- De acordo com a equação (4.6), a capacitância é inversamente proporcional a distância entre as placas, então construa um gráfico de capacitância por $1/d$ para obter uma reta e fazer a regressão linear. Identifique as constantes com seus respectivos erros.
- Conecte a placa maior ao capacitor e refaça todo o procedimento, do item (a) até o (d). Compare o comportamento da capacitância em relação à área das placas e à precisão da constante encontrada.

[4.7] rigidez dielétrica do ar

objetivos

Encontrar a quantidade de cargas acumuladas em um gerador de Van de Graaff.

material necessário

Gerador de Van de Graaff, fita métrica, bastão com esfera de descarga e cabo com ponteira tipo banana.

pré-requisitos

Em um condutor carregado, todas as cargas se acumulam em sua superfície. Quando o condutor possui alguma simetria, é possível calcular facilmente o campo elétrico através da lei de Gauss $\varepsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q$, em que ε_0 é a permissividade do vácuo, $\vec{E}$ é o campo elétrico, $d\vec{A}$ é o elemento de área e Q é a carga. Desse modo, para um ponto p localizado à uma distância x da superfície do condutor esférico de raio R, obtém-se o seguinte resultado para a lei de Gauss:

4.7
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{(R+x)^2}$$

$R + x$, então é à distância do ponto p até o centro do condutor.

Considere agora, dois condutores esféricos separados por uma distância d de modo que um deles esteja carregado e o outro esteja aterrado. Sendo V_i o potencial do condutor aterrado e V_f o potencial do condutor carregado, a diferença de potencial entre eles $V_f - V_i$ pode ser calculada através da relação:

4.8

$$V_f - V_i = -\int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s}.$$

$\vec{E} \cdot d\vec{s}$ é o produto escalar entre o campo elétrico $\vec{E}$ produzido pelo condutor carregado e o elemento de caminho que os separa $d\vec{s}$. Entretanto, o condutor aterrado possui potencial nulo $V_i = 0$ e assim a equação (4.8) fornecerá o potencial do condutor carregado. Para isso, será definido o caminho de integração do condutor aterrado (ponto inicial i) até o condutor carregado (ponto final f). E substituindo a equação (4.7) na (4.8) obtém-se para o potencial do condutor o seguinte resultado:

$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \frac{d}{R(R+d)}$$

Assim, a carga acumulada na superfície do condutor carregado pode ser escrita como:

4.9

$$Q = 4\pi\varepsilon_0 V \frac{R(R+x)}{d}.$$

O ar entre os condutores, como todo material isolante, somente consegue manter esta característica quando submetido a um campo elétrico de até 30 kV/cm, a partir desse valor a ar se torna um condutor. Quando isso acontece é dito que a rigidez dielétrica do ar foi rompida. Então, na situação proposta nesse experimento, se o potencial do condutor carregado é de 30 kV e o condutor aterrado é aproximado, haverá descarga elétrica quando a distância entre eles chegar a 1 cm. A foto da Figura 4.5 mostra o momento em que acontece a descarga elétrica em um gerador de Van de Graaff.

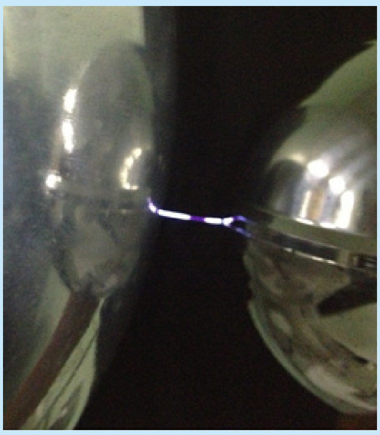

Figura 4.5: Descarga elétrica entre o gerador de Van de Graaff e a esfera de descarga.

montagem e execução

- Com a fita métrica, meça o perímetro da circunferência da esfera metálica do gerador. Essa medida deve ser feita em torno do equador da esfera. Encontre o raio da esfera.
- Coloque a fita métrica fixada na parede atrás do gerador. Alinhe o equador da esfera do gerador com o zero da fita métrica. Conecte a esfera de descarga no orifício próximo ao motor, ligue o gerador e aguarde alguns instantes. **Cuidado para não se aproximar demais do equipamento devido ao risco de choque elétrico.**
- Faça uma aproximação, lenta e cuidadosa, entre a esfera de descarga e a esfera do gerador, de modo a conseguir identificar na fita métrica a distância na qual a descarga se inicia. Refaça a medida pelo menos dez vezes, calcule a média dos valores encontrados e o erro do resultado.
- Sabendo que a cada centímetro o ar suporta uma tensão de 30 kV, estime o valor da diferença de potencial entre o gerador e a esfera de descarga. Utilizando o valor do raio, calculado no item (b) e da tensão estimada, calcule a carga total acumulada no gerador através da equação (4.9). Comente o resultado encontrado.

unidade 5

óptica e física moderna

[5.1] prisma

objetivos

Entender a lei de refração e a dispersão da luz ao incidir em um prisma.

material necessário

Lanterna de luz branca, dois conjuntos de cavaletes com lentes convergentes, suporte para lanterna e cavaletes, prisma com ângulos de 45° e 90°, chapa com uma fenda, cavalete para sustentação da chapa e base rotatória com transferidor.

pré-requisitos

Um raio luminoso ao mudar de meio de propagação pode sofrer um desvio no ângulo de incidência. Esse fenômeno é conhecido como refração e para acontecer é necessário que os índices de refração dos meios sejam diferentes, obedecendo à lei da refração:

5.1
$$n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2$$

Sendo n_1 o índice de refração do meio no qual se propaga a luz incidente, θ_1 o ângulo de incidência, n_2 o índice de refração do meio no qual se propaga a luz refratada e θ_2 o ângulo de refração.

Quando ondas luminosas se propagam dentro de um prisma, é possível observar a refração da luz. O índice de refração do prisma depende do material do qual é feito. Dois lados do prisma formam um ângulo designado por $\hat{A}$ e denominado ângulo do prisma, observe a Figura 5.1. Um feixe de luz atinge um dos lados do prisma com um ângulo de incidência $\hat{\imath}_1$ e sofre uma refração desviando o ângulo de incidência para $\hat{\imath}_2$.

Dependendo do valor de $\hat{\imath}_2$, a luz pode sofrer ainda uma nova refração dentro do prisma, causando um novo desvio. O desvio total sofrido pela luz incidente é representado pelo ângulo $\hat{D}$ mostrado na Figura 5.1. A lei da refração para um prisma triangular depende de $\hat{A}$ e também do valor mínimo do desvio total $\hat{D}_{mim}$, e pode ser escrita como:

5.2
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{sen\left(\frac{\hat{D}_{mim}+\hat{A}}{2}\right)}{sen\left(\frac{\hat{A}}{2}\right)}$$

Outro fenômeno observado em prismas é a dispersão da luz policromática incidente nas cores que a compõe. O primeiro físico a estudar a dispersão da luz foi Isaac Newton.

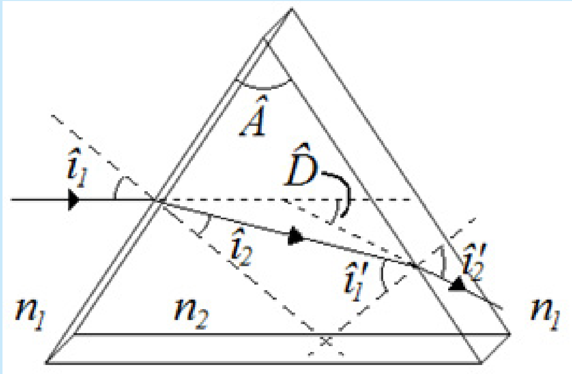

Figura 5.1: Prisma de ângulo Â no qual um feixe luminoso incide com ângulo $\hat{i}_1$. Ao entrar, a luz sofre refração desviando o ângulo de incidência, na parede externa, $\hat{i}_1$ fica desviado para $\hat{i}_2$. Ao sair do prisma, a luz sofre nova refração, e seu ângulo de incidência na parede interna, $\hat{i}'_1$ é desviado para $\hat{i}'_2$. O desvio total sofrido pelo feixe é dado por $\hat{D}$.

montagem e execução

- Posicione o prisma sobre o transferidor da base rotatória, de acordo com a Figura 5.2. Ligue a fonte luminosa **tomando cuidado para não se queimar, pois a fonte sofre um aquecimento muito forte**. Verifique se a luz incidente passa para dentro do prisma e reflete em uma das paredes.
- Gire levemente o transferidor no sentido anti-horário e verifique se, em algum ponto, a luz reflete completamente na parede interna do prisma. Retorne o transferidor à posição inicial, com a referência no 0°. Gire agora no sentido horário e verifique se surgirá uma refração do feixe de luz incidente na parede interna do prisma.

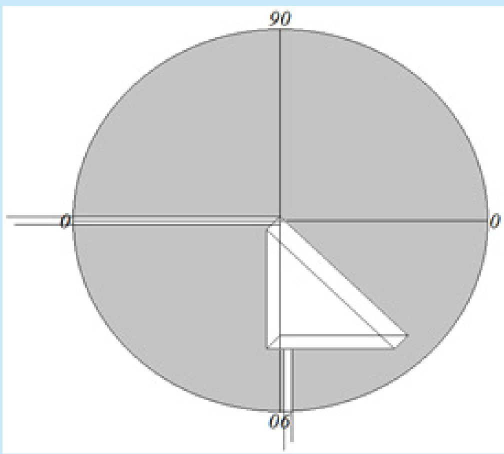

Figura 5.2: Representação de um feixe luminoso incidindo em um prisma e sofrendo refração de 90°.

- Por ser um feixe de luz policromático, ao passar por uma refração no prisma ele sofre o processo de dispersão. Gire o transferidor e identifique as posições dos feixes de luz refletidoas posições dos feixes de luz refletidos e refratado pelo lado interno do prisma. Identifique a sequência de cores que surge em cada um e explique a diferença entre os dois.
- O desvio total $\hat{D}$ do raio emergente pode ser encontrado a partir dos feixes incidente e refratado no prisma. O ângulo de incidência $\hat{\imath}_1$ pode ser medido diretamente no transferidor à medida que ele é girado. Porém, o desvio total será dado pela soma do valor lido no transferidor para o raio refratado e do valor de $\hat{\imath}_1$. Retorne à posição de referência. Gire o transferidor de 5° em 5° no sentido horário e faça uma tabela de $\hat{D}$ em função de $\hat{\imath}_1$.
- Faça um gráfico com os dados da tabela e analise o comportamento dos pontos, justificando-o. Estime o valor mínimo do desvio total, $\hat{D}_{mim}$, e utilize a equação (5.2) para encontrar o índice de refração do prisma.

[5.2] espelho e lente

objetivos

Interpretar as leis de reflexão e refração na óptica geométrica.

material necessário

Lanterna de luz branca, dois conjuntos de cavaletes com lentes convergentes, suporte para lanterna e cavaletes, espelho convergente, lente semicircular, chapa com uma fenda, cavalete para sustentação para chapa e base rotatória com transferidor.

pré-requisitos

Na óptica geométrica, a luz é interpretada como um conjunto de feixes de onda que se propagam como linhas retas. Desse modo, os processos de reflexão e refração provocam mudança no comportamento do feixe. Quando o feixe atinge um meio altamente reflexivo, como um espelho, acontece uma mudança de direção expressiva do feixe refletido. Se a incidência for perpendicular ao espelho o ângulo de reflexão pode chegar a 360°. Um exemplo desse fenômeno ocorre quando um objeto é colocado diante de um espelho e é possível ver sua imagem refletida. Uma imagem dessa natureza acontece com o ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão.

Nos prismas e nas lentes, a manifestação da reflexão é muito restrita, o que prevalece é a refração. Em uma lente, este fenômeno pode ser estudado a partir da lei da refração descrita na equação (5.1) do experimento 5.1. Leia os pré-requisitos desse experimento.

montagem e execução

- Posicione o espelho sobre o transferidor da base rotatória, de acordo com a Figura 5.3. Ligue a fonte luminosa tomando o cuidado para não se queimar, pois a fonte sofre um aquecimento muito forte. Gire o transferidor levemente no sentido anti-horário e verifique o comportamento do feixe. Retorne o transferidor à posição inicial, com a referência em 0°. Gire agora no sentido horário e verifique seu comportamento. Retorne o transferidor à posição de referência, tomando o cuidado de alinhar o feixe incidente e o feixe refletido conforme a Figura 5.3.

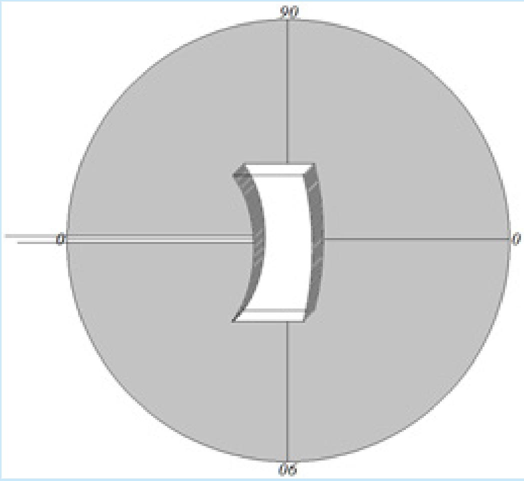

Figura 5.3: Representação de um feixe luminoso incidindo em um espelho e refletindo normalmente em relação a sua superfície.

- Gire o transferidor de 5° em 5° até atingir 50°, meça os ângulos de incidência e de reflexão e faça uma tabela com os valores medidos. Analise o comportamento dos pontos, argumentando se o resultado está dentro do esperado e justifique as diferenças entre os resultados medidos e esperados se houverem.
- Retire o espelho e coloque, em seu lugar, a lente semicircular como mostrado na Figura 5.4. Gire o transferidor a cada 5° até atingir 50°. Anote os valores dos ângulos de incidência e de refração da lente e monte uma tabela.

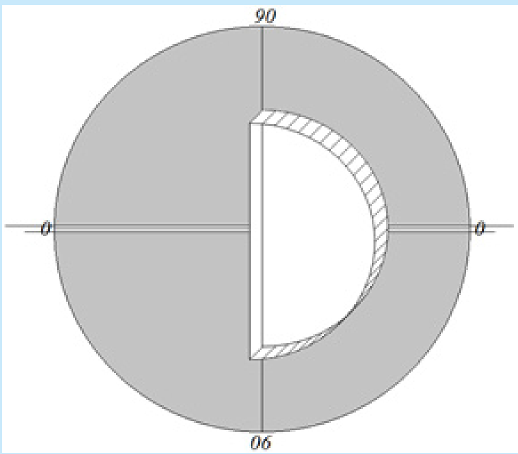

Figura 5.4: Representação de um feixe luminoso incidindo em uma lente semicircular.

- De acordo com a equação (5.1), monte um gráfico de *sen* θ_1 pelo sen θ_2 e faça a regressão linear. Encontre o índice de refração da lente com seu respectivo erro.

[5.3] lentes convergentes e divergentes

objetivos

Identificar as diferenças práticas entre lentes convergentes e lentes divergentes.

material necessário

Lanterna de luz branca, dois conjuntos de cavaletes com lentes convergentes, suporte para lanterna e cavaletes, lente biconvexa, lente plano-côncava, chapa com três fendas, cavalete para sustentação da chapa, base rotatória com transferidor e paquímetro.

pré-requisitos

Pode-se trabalhar, em geral, com dois tipos de lentes: as convergentes e as divergentes. Ao atravessar uma lente convergente a luz incidente é concentrada em um ponto chamado de foco. A distância entre esse ponto e o centro da lente é chamada de distância focal e representada por *f*. Para lentes divergentes são os prolongamentos da luz que convergem a um foco do mesmo lado de incidência, mas a distância focal ainda é definida da mesma maneira.

As lentes convergentes são caracterizadas pelas bordas finas em relação ao meio da lente, que é sua parte mais larga. Na Figura 5.5 tem-se alguns exemplos de lentes convergentes. Nestas lentes, a distância focal *f* é sempre positiva, ou seja, está no lado oposto ao da incidência da luz.

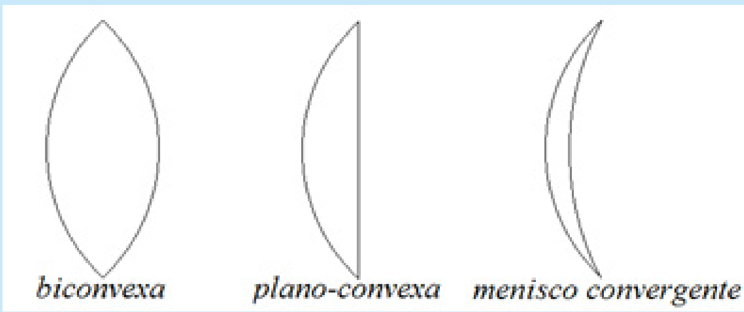

Figura 5.5: Modelos de lentes convergentes. Observe que as bordas finas em comparação ao meio da lente.

As lentes divergentes, ao contrário, possuem as bordas mais largas em relação ao centro de convergência da lente, que, nesse caso, é a parte mais estreita. A Figura 5.6 mostra alguns exemplos de lentes divergentes. Nessas lentes, a distância focal f está no mesmo lado da luz incidente, cujo valor será, portanto, sempre negativo.

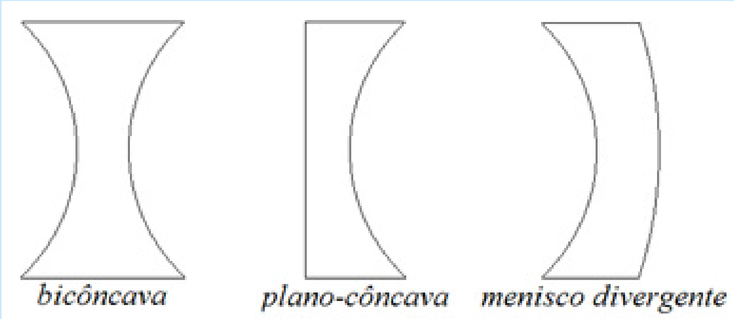

Figura 5.6: Modelos de lentes divergentes. Observe que as bordas são mais grossas em comparação ao meio da lente.

As lentes são construídas com um determinado grau ou dioptria *C*. O valor do grau da lente é calculado através do inverso da distância focal $C=1/f$. Outra forma de medir do grau de uma lente é considerá-la integrada a uma circunferência. Assim, podem ser definidos dois raios de curvaturas, R_1 e R_2, que definem o formato da lente em cada um dos lados, conforme indicado na Figura 5.7. Por convenção o raio R_1 é atribuído à curvatura da superfície da lente voltada para a fonte de luz e R_2 é o raio da outra superfície. Para lentes cuja largura da parte central não é muito diferente das bordas, existe uma equação, conhecida como equação do fabricante de lentes, que relaciona *f*, com R_1, R_2 e o índice de refração *n* da lente dada por:

5.3
$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right).$$

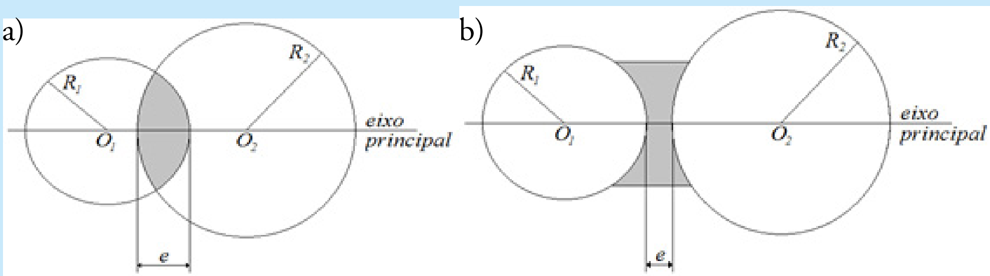

Figura 5.7: Os círculos representam as circunferências das lentes e definem os raios de curvatura R1 e R2 para lentes convergentes em a) e para lentes divergentes em b).

montagem e execução

- Coloque a lente convergente sobre o transferidor como mostrado na Figura 5.8. Ligue a fonte luminosa tomando o cuidado para não se queimar, pois a fonte sofre um aquecimento muito forte. Deverá aparecer três feixes de luz que devem ser alinhados com o centro, com o eixo 0° do transferidor e com o centro da lente, veja a Figura

5.8. Gire livremente o transferidor no sentido horário e anti-horário. Verifique como os feixes convergentes se comportam e se os feixes laterais estão se deslocando. Descreva suas observações e responda se o feixe central muda sua trajetória quando o transferidor está girando. Justifique sua resposta.

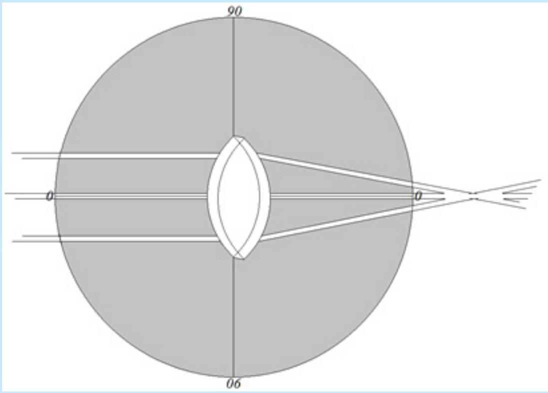

Figura 5.8: Representação de três feixes luminosos atravessando uma lente convergente e o ponto de convergência dos feixes.

- Agora, posicione a lente perpendicularmente ao feixe de luz incidente. A partir do centro da lente, identifique a distância da lente até o ponto em que os feixes se encontram, após passarem por ela. Verifique se o feixe de luz, após incidir sobre a lente, se torna disperso. Meça a posição do foco com seu respectivo erro e calcule o grau da lente. Explique o que pode acontecer com a distância focal medida se houver dispersão da luz. Identifique o sinal do grau da lente e qual o tipo de imagem formada por ela.
- Com um paquímetro, meça a altura $2h$ da lente e sua espessura $2e$. De acordo com a Figura 5.9, calcule o raio de curvatura R_1 da lente, através do teorema de Pitágoras. Observe se a curvatura da lente é a mesma em ambos os lados e encontre também o valor de R_2. Através equação (5.3) calcule o índice de refração da lente. Não se esqueça de encontrar o erro associado a ele.

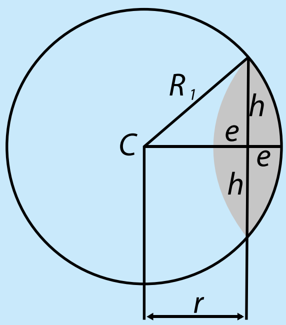

Figura 5.9: Representação de uma lente como parte de uma circunferência, sendo possível observar o triângulo retângulo formado pelo raio R_1, pela metade da altura da lente h e pela distância r entre o centro da circunferência e o meio da lente.

- Posicione a lente divergente no transferidor de acordo com a Figura 5.10. Posicione uma folha de papel entre o transferidor e a lente. Marque a posição da lente e de seu eixo central. Tome o cuidado de alinhar o centro da lente ao eixo de 90° e não o seu lado plano. Faça o desenho dos feixes com muito cuidado. Retire o papel, encontre a distância focal da lente com seu respectivo erro e calcule o grau da lente. Identifique o sinal do grau da lente e qual o tipo de imagem formada por ela.
- Com um paquímetro, meça a altura $2h$ da lente e sua espessura $2e$. De maneira análoga ao que foi feito para a lente convergente, encontre o raio R_1 do lado côncavo da lente divergente. Identifique o melhor valor para o raio de curvatura do lado plano e justifique sua resposta. Utilizando a equação (5.3), encontre o índice de refração da lente e o erro associado a ele.

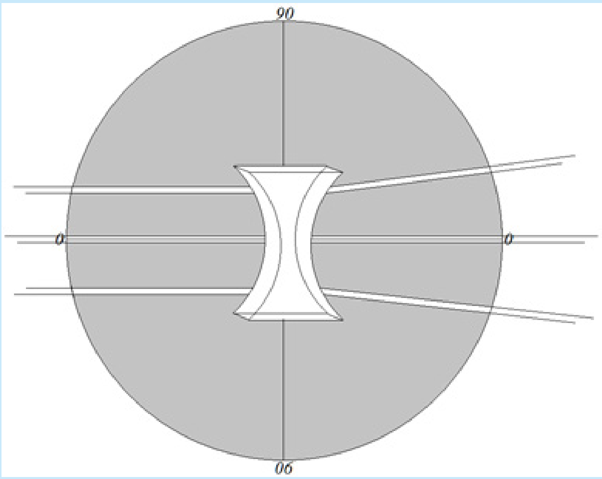

Figura 5.10: Representação de três feixes luminosos atravessando uma lente divergente.

[5.4] interferência e difração

objetivos

Encontrar a largura de um furo e de uma fenda simples marcados em uma lâmina, além da distância entre fendas numa lâmina com fenda dupla, bem com a espessura de um fio de cabelo.

material necessário

Laser de He-Ne, laser de diodo, trena, óculos de proteção, lâmina com furo circular, lâmina com fenda simples, lâmina com fenda dupla, fio de cabelo, três suportes para lâminas, suporte para fio de cabelo, anteparo e trena.

pré-requisitos

O fenômeno da interferência acontece quando duas ondas se encontram. Se ambas possuem a mesma fase, como mostrado na parte a) da Figura 5.11 a amplitude da onda resultante é a soma das outras duas, assim caracterizando uma interferência construtiva. Se, por outro lado, as ondas estiverem fora de fase como representado na parte b) da Figura 5.11, a interferência será destrutiva e o resultado é obtido pela a subtração das amplitudes das duas onda.

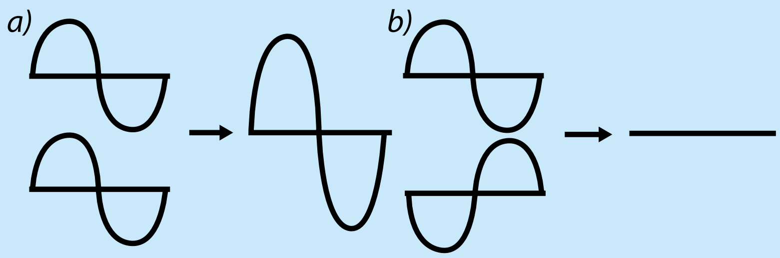

Figura 5.11: Representação de duas ondas sofrendo interferência sendo construtiva em a) e destrutiva em b).

A fim de observar esse fenômeno, pode-se fazer um feixe de laser passar por uma lâmina contendo fendas ou orifícios, ou ainda, ao incidir sobre um objeto tal como um fio de cabelo. Porém, somente é possível verificar o padrão de interferência se a luz incidia luz incidiu sob algo que tenha um tamanho com a mesma ordem de grandeza de seu comprimento de onda λ. Ao incidir um feixe de laser He-Ne em um fio de cabelo o padrão observado é composto por franjas claras e escuras que se intercalam, indicando, respectivamente, a interferência construtiva e destrutiva como mostra a parte a) da (Figura 5.12).

Entretanto, não é apenas a interferência que acontece nessa situação. Outro fenômeno importante para o estudo de padrões de interferência é a difração. Quando uma onda se propaga ao encontro de um orifício ou de um obstáculo, ocorre um alargamento da frente de onda, como mostrado na parte b) da (Figura 5.12). Observe que mesmo o laser incidindo sobre um fio de cabelo que é um objeto opaco, existe um máximo central na parte a) da (Figura 5.12). Esse comportamento só pode ser explicado em termos da difração da Luz.

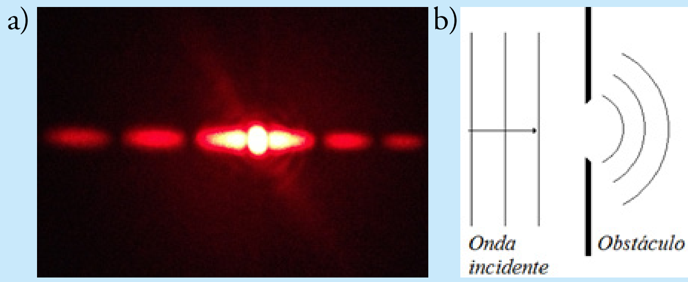

Figura 5.12: Foto de feixe de laser He-Ne após incidir em um fio de cabelo em a) e representação da difração da luz ao passar por um orifício com tamanho aproximado de seu comprimento de onda em b).

Ao fazer um feixe de laser passar por duas fendas separadas por uma distância d, a luz se divide em dois feixes e difrata. Com isso, os feixes resultantes provocarão interferência entre si, conforme mostrado esquematicamente na parte a) da (Figura 5.13). Note que onda que sai da fenda superior sofre interferência com a onda que sai da fenda inferior.

Como as ondas emergem do obstáculo com a mesma fase, para que a interferência aconteça, é necessário que elas percorram caminhos com tamanhos diferentes. Assim, se a diferença de caminho ΔL for igual a um número inteiro de λ, significa que as ondas continuaram em fase e, portanto a interferência será construtiva. Nesse caso, será observada uma franja clara no ponto P_1 da parte a) da (Figura 5.13). Por outro lado, se ΔL for igual à metade de λ então a interferência será destrutiva, e, no ponto P_1, será vista uma franja escura.

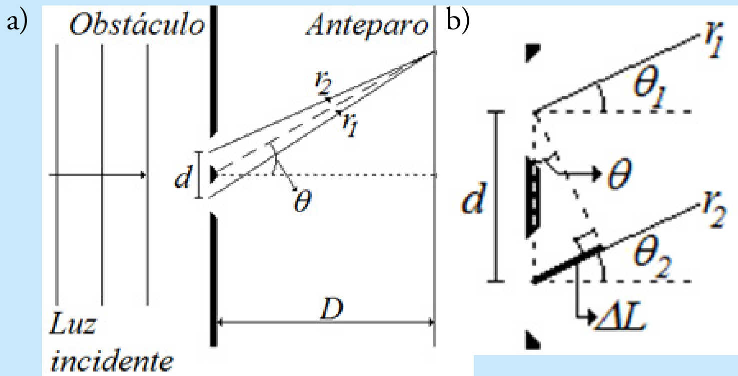

Figura 5.13: Na parte a), está representada a interferência sofrida pela luz ao passar por uma fenda dupla. Na parte b), ilustra-se a fenda aumentada para visualização dos ângulos e da diferença de caminho ΔL.

Quando a distância D entre o obstáculo e o anteparo é muito grande, ou seja, se $D \gg d$, então os ângulos θ_1 e θ_2 são aproximadamente iguais, já que, nestas condições, os feixes r_1 e r_2 na Figura 5.13 são quase paralelos. Assim, o valor de ΔL é determinado pelo triângulo retângulo na parte b da Figura 5.13. Através de relações trigonométricas simples, é possível mostrar que o ângulo θ no triângulo retângulo será igual a θ_2 e também que $\Delta L = d$ "*sen*" θ. Com isso, a posição das franjas dependerá da distância entre as fendas, e será dada por:

5.4
$$d \operatorname{sen} \theta = m\lambda$$

Sendo que m = 0, 1, 2, 3... numera as franjas claras já que a diferença de caminho é igual a um número inteiro de comprimentos do onda. E ainda,

5.5
$$d \operatorname{sen} \theta = \left(n + \tfrac{1}{2}\right)\lambda$$

em que n = 0,1,2,3... numera as franjas escuras, pois nesse caso a diferença de caminho é igual a um número semi-inteiro de comprimentos de onda.

A Figura 5.14 mostra o que ocorre no caso de uma fenda simples ou de um orifício de largura a. A luz difrata ao atravessar de forma que, uma parte sai do lado de cima da fenda, e outra sai pela parte central, ocorrendo a interferência entre elas, como se fosse uma fenda dupla "imaginária". Isso acontece porque o caminho percorrido é diferente, ainda que o obstáculo contenha somente uma fenda ou um orifício. Como, nesse caso, $\Delta L = (a/2)\ \text{sen}\ \theta$, então a posição dos mínimos pode ser escrita como:

5.6
$$a\,\text{sen}\,\theta = n\lambda$$

Em que n = 0,1,2,3... numera as franja escuras. Se ao invés de um orifício existir um obstáculo, a luz incidente se comportará de maneira análoga, desde que o largura seja da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz.

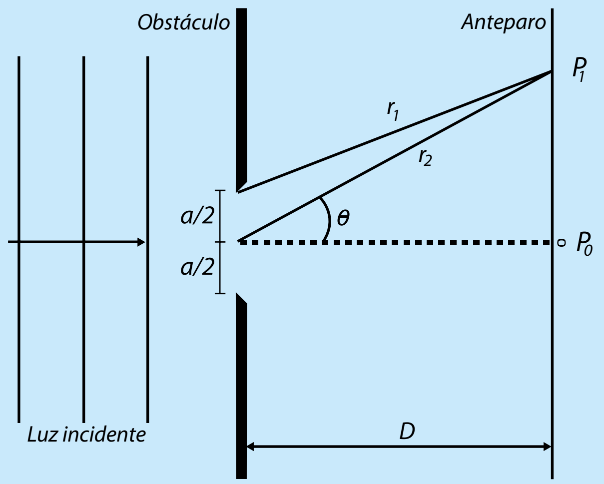

Figura 5.14: Representação da interferência sofrida por uma onda luminosa ao passar por uma fenda simples.

montagem e execução

- **Para realização de todo este experimento, é necessário o uso de óculos de proteção! Olhar diretamente para o laser danifica a retina!** Ligue o laser de diodo e verifique seu alinhamento com a lâmina que contém um furo circular. Verifique no anteparo se é possível ver a figura de difração. Prenda uma folha de papel no anteparo e copie a figura de difração, utilizando, de preferência, uma lapiseira com ponta bem fina.
- Com a trena, meça a distância entre a lâmina e o anteparo com muito cuidado para não desalinhar o equipamento. Para minimizar o erro, meça a distância entre do meio da primeira franja escura, localizada no lado esquerdo do máximo central, até o meio da primeira franja escura localizada no outro lado do máximo central. Divida essa distância

por 2 para obter a medida da separação entre o centro da figura e a primeira franja escura.

- De acordo com a parte b) da Figura 5.13, utilize o teorema de Pitágoras para calcular o valor de θ com os resultados obtidos no item (b). Através da equação (5.6), encontre a largura do furo e também o erro associado a esse resultado.
- Utilizando a lâmina com uma fenda simples refaça os procedimentos (a), (b) e (c) para encontrar a largura da fenda simples.
- Prenda um fio de cabelo no suporte, de modo que ele fique firme, mas não esticado. Ligue o laser de He-Ne e o alinhe com o fio até que seja possível ver a figura de difração como a mostrada na parte a)A da (Figura 5.12). Desenhe a figura em uma folha de papel e refaça os itens (b) e (c) para obter o valor da espessura do fio do seu cabelo.
- Para a lâmina com a fenda dupla, refaça os procedimentos (a) e (b). Para calcular a separação entre as fendas, encontre o valor de θ, de refazendo o procedimento feito no item (c). Porém, para encontrar a distância entre as fendas será necessário utilizar a equação (5.5). Não se esqueça de calcular o erro.

[5.5] análise espectral

objetivos

Estudar a emissão discreta de elementos químicos e calcular o comprimento de onda das primeiras emissões de uma lâmpada de Hg.

material necessário

Tubo emissor de luz com fenda e proteção UV, régua milimétrica com zero central, rede de difração com constante de rede $d=1.000\times10^{-6}$, apoio para a rede de difração e régua com pelo menos 50 *cm* de comprimento.

pré-requisitos

Quando a luz do Sol ou de uma lanterna de luz branca atravessa um prisma, ocorrem os efeitos da dispersão, ou seja, a luz decompõe-se em suas cores componentes. Nesses casos, os espectros de emissão são contínuos, já que não existem faixas escuras entre as cores e cada uma vai se transformando na seguinte continuamente. Porém, quando se trata da emissão de elementos químicos, o espectro se torna discreto, como pode ser observado esquematicamente na Figura 5.15. Cada elemento químico possui um espectro próprio de emissão e, através dele, é possível identificar os elementos que compõem o objeto emissor. Assim, é possível identificar, por exemplo, os gases dentro de uma lâmpada pela analise de seu espectro de emissão.

Quando as ondas luminosas incidem em uma rede de difração no pode ser observado um máximo de intensidade luminosa no ponto central P_0. Essa faixa clara central é seguida de largas faixas escuras e algumas claras, estreitas e coloridas. Nos locais em que aparecem faixas claras, a luz sofre interferência construtiva de acordo com a equação (5.4). A distância d entre as fendas, para o caso da rede de difração, será dada pela constante de rede. O ângulo θ

pode ser encontrado através de relações trigonométricas aplicadas ao triângulo retângulo na parte b) da (Figura 5.13).

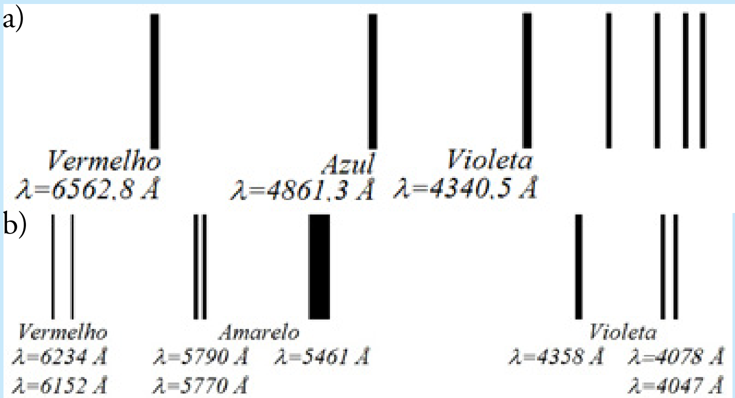

Figura 5.15: Representação esquemática do espectro de emissão do hidrogênio, na parte a), e do mercúrio, na parte b).

montagem e execução

- A partir do zero central da régua posicionada no tubo emissor, meça uma distância L = 50 cm e posicione o suporte com a rede de difração. Ligue a lâmpada e observe a luz emitida pelo tubo através da rede de difração. Para ver as raias espectrais, a sua observação do experimento deve ser feita pela direção diagonal, e não olhando diretamente para o tubo emissor, conforme a seta e a linha pontilhada indicada na Figura 5.16. Observe, através da rede de difração, a série de faixas luminosas verticais do espectro da luz emitida e identifique suas cores.

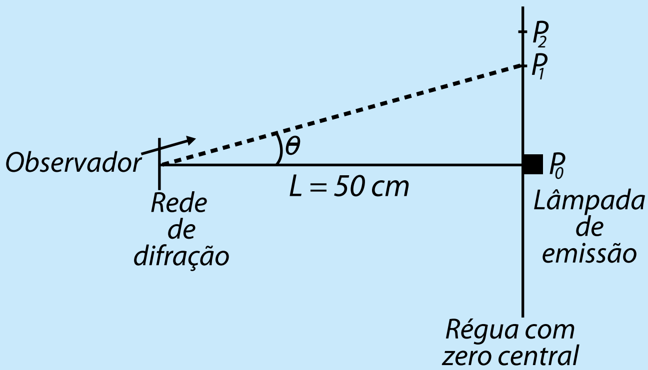

Figura 5.16: Esboço da montagem experimental. A seta indica a direção de observação, para que seja possível visualizar as faixas espectrais.

- Considere que a primeira faixa luminosa colorida esteja localizada no ponto P_1, de acordo com a Figura 5.16. Meça a distância entre P_0 e P_1 com ajuda da régua posicionada no tubo emissor. Através de relações trigonométricas encontre o ângulo θ mostrado na

Figura 5.16. Esse ângulo também é mostrado na Figura 5.13 e na equação (5.4). Com essas informações calcule o comprimento de onda λ_1 da primeira faixa do espectro.

- Refaça o procedimento para a segunda faixa espectral localizada no ponto P_2 conforme a Figura 5.14 e encontre λ_2.
- Compare seus resultados com os da Figura 5.15 e argumente a respeito da precisão de sua medida.

[5.6] efeito fotoelétrico

objetivos

Entender o que é o efeito fotoelétrico e como ele ocorre.

material necessário

Tubo emissor de luz ultravioleta, eletroscópio com placa de descarga plana e vertical, palha de aço, flanela, régua, lanterna de luz branca, cabo de aterramento com ponta de jacaré e gerador de Van de Graaff.

pré-requisitos

O efeito fotoelétrico foi explicado por Albert Einstein em 1905, através de uma visão inovadora para o comportamento da luz. Em conformidade com a teoria corpuscular das ondas eletromagnéticas de Planck, a teoria de Einstein utiliza "pacotes de ondas" que atualmente são chamados de fótons. Isso foi necessário pois a teoria da luz como uma onda eletromagnética não é capaz de explicar satisfatoriamente o efeito.

Ao incidir ondas eletromagnéticas sobre uma superfície metálica, os fótons são absorvidos pelos elétrons livres do metal. Se a energia do fóton for suficiente, então o elétron conseguirá se libertar da superfície e será ejetado para fora do metal.

A energia de cada pacote E é diretamente proporcional à sua frequência ν, ou seja, $E = h\nu$,em que h é a constante de Planck. Assim, não é possível retirar elétrons de um metal utilizando qualquer onda eletromagnética, ainda que se espere um tempo longo. Para conseguir energia suficiente é necessário que a luz esteja na faixa de frequência do ultravioleta, ou seja, incidindo luz branca comum é impossível a retirada dos elétrons.

montagem e execução

- Utilizando a palha de aço e a flanela, limpe com muito cuidado a placa de descarga do eletroscópio. A gordura dos dedos atrapalha o experimento, portanto depois de limpa evite tocar a placa de descarga.
- Ligue o gerador de Van de Graaff, em baixa rotação, e espere alguns instantes. **Com muito cuidado para não tomar choque elétrico**, aproxime o eletroscópio da esfera do gerador, sem encostá-los. Prenda o jacaré do cabo de aterramento na placa de descarga por alguns instantes e solte. Afaste-se e verifique se o eletroscópio está carregado.

- Depois de carregado, manipule o eletroscópio com muito cuidado para não o descarregar acidentalmente através de um esbarrão. Deixe-o em cima da bancada e acenda a lanterna fazendo incidir a luz branca diretamente sobre a placa de descarga. Observe o que acontece e explique se o resultado está dentro do esperado.
- Coloque o tubo emissor a uma distância de 15 *cm* do eletroscópio, de modo que a placa de descarga fique paralela ao orifício de saída da luz ultravioleta. **Não olhe diretamente para a luz que sai do orifício porque os raios ultravioleta danificam a retina!** Ligue a lâmpada e observe o que acontece. Justifique o resultado através do tipo de carga armazenada no eletroscópio.
- Com o eletroscópio descarregado, encoste-o no gerador de Van de Graaff, afaste-se e verifique se ficou carregado. Com o eletroscópio carregado, faça incidir sobre a placa de descarga a luz da lanterna. Observe, e explique se o resultado está de acordo com o esperado.
- Posicione o tubo emissor novamente a 15 *cm* de distância do eletroscópio. Ligue a lâmpada, observe o que acontece e justifique sua observação em função da carga armazenada no eletroscópio.

{ a } – modelo de relatório

Universidade do Estado do Amazonas – UEA
Escola Superior de Tecnologia – EST
Laboratório de Física

Aluno(a): ____ Número de matricula: _________

Experimento: Ajuste de curvas experimentais

Turma: T1

Objetivo

Conhecer o procedimento de ajuste de uma curva aos dados experimentais;
Verificar o coeficiente da elasticidade de uma mola a partir do gráfico;
Verificar experimentalmente a Lei de Hooke.

Fundamentação teórica

A força gravitacional F_g age sobre um corpo e o atrai na direção do centro da Terra, ou seja, verticalmente para baixo. O peso P de um corpo é o módulo da força necessária para impedir que o corpo caia livremente medida em relação ao solo. Para calcular o peso P, podemos utilizar a equação: $F_g = mg$, em quem é a massa em quilogramas [*kg*] e *g* é a aceleração da gravidade em metros por segundo ao quadrado [m/s²], cujo valor é 9,80665 ≈ 9,8 m/s². Calculada dessa forma a força gravitacional será dada em newtons [N].

A força elástica é exercida por uma mola. Conforme a Figura 1, temos uma das extremidades fixa, e um objeto preso na outra extremidade. Quando a mola está no estado relaxado, ela não esta sofrendo nenhuma força externa, ou seja, não esta sendo comprimida nem alongada. Quando colocamos um corpo na extremidade da mola, fazemos com que a mola sofra um alongamento. A força elástica F é proporcional ao alongamento $\vec{x}$ da extremidade livre a partir da posição que ocupa quando a mola está no estado relaxado, dessa forma a força elástica é dada por $\vec{F} = -k\vec{x}$, conhecida como a Lei de Hooke. O sinal negativo indica que o sentido da força elástica é sempre oposto ao sentido do alongamento da extremidade livre da mola. A constante k é chamada de constante elástica, e é uma medida da rigidez da mola, sua unidade no SI é o newton por metro [N/m].

Através da confecção de um gráfico de força por alongamento podemos obter resultados que descrevem o sistema por meio da regressão linear. Esse modelos matemáticos utilizados relacionam o comportamento de uma variável Y com outra X para analisar o caso em que a curva de ajuste é uma função linear. Assim é utilizada a equação da reta y_i=ax_i+b para modelar o problema.

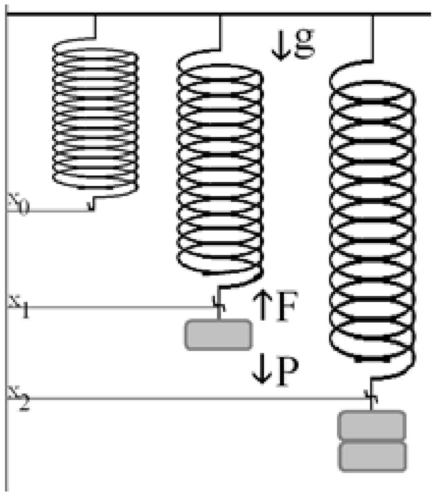

Figura 1. Sistema massa-mola na vertical

Procedimento experimental

Material necessário

Mola, apoio de sustentação, régua de 50 *cm*, suporte de pesos e seis pesos de (50 $\pm$1) g.

Experimento

No apoio de sustentação colocamos a mola com o suporte dos pesos (sem os pesos). Com auxilio da régua marcamos a altura que será a posição inicial do alongamento. A partir disso, começamos a colocar os pesos de 50 *g* no suporte, um por vez, e verificamos o alongamento que ocorre a partir da posição inicial. Assim, o alongamento da mola é calculado fazendo a subtração da posição marcada com um determinado peso e a posição inicial sem peso nenhum. Anotamos os dados obtidos na tabela abaixo:

Medida	**Massa (g)**	**Força (N)**	**Alongamento (mm)**
1	50 ± 1	0,49 ± 0,01	49,0 ± 0,5
2	100 ± 1	0,98 ± 0,01	100,0 ± 0,5
3	150 ± 1	1,47 ± 0,01	152,0 ± 0,5
4	200 ± 1	1,96 ± 0,01	202,0 ± 0,5
5	250 ± 1	2,45 ± 0,01	253,0 ± 0,5
6	300 ± 1	2,94 ± 0,01	307,0 ± 0,5

Tabela 1 – Dados experimentais

A força foi calculada a partir da peso, F=mg, em que g usado foi 9,8 m/s². Utilizando os dados da Tabela 1, procuramos obter o valor de *k* da mola, para isso fizemos o gráfico utilizando a lei de Hooke, $F(x)=kx$, em que x é o alongamento. Associamos a lei de Hooke com a equação da reta $y(x)=ax+b$ e assim podemos notar que a constante a representa o *k* da mola e a constante b dever ser nula. Utilizando o método da regressão linear, obtemos os valores da Tabela 2, em que o valor de a é (9,53 ± 0,05)N/*m* e *b* é (0,026 ± 0,009) N.

y(x)=ax+b		
	Valor	Erro
a	9,53	0,05
b	0,026	0,009

Tabela 2 – Resultado da regressão linear

Conclusão

Conclui com esse experimento, que a força elástica é diretamente proporcional ao alongamento provocado pelo peso que foi colocado na mola, em conformidade com a lei de Hooke. Dessa forma com os dados obtidos, foi possível obter o valor da constante elástica k=(9,50±0,06) N/*m*.

Os valores da regressão linear que fornecidos pelo método dos mínimos quadrados são apenas uma aproximação da realidade, mas esse método é um modo útil para indicar o comportamento dos dados.

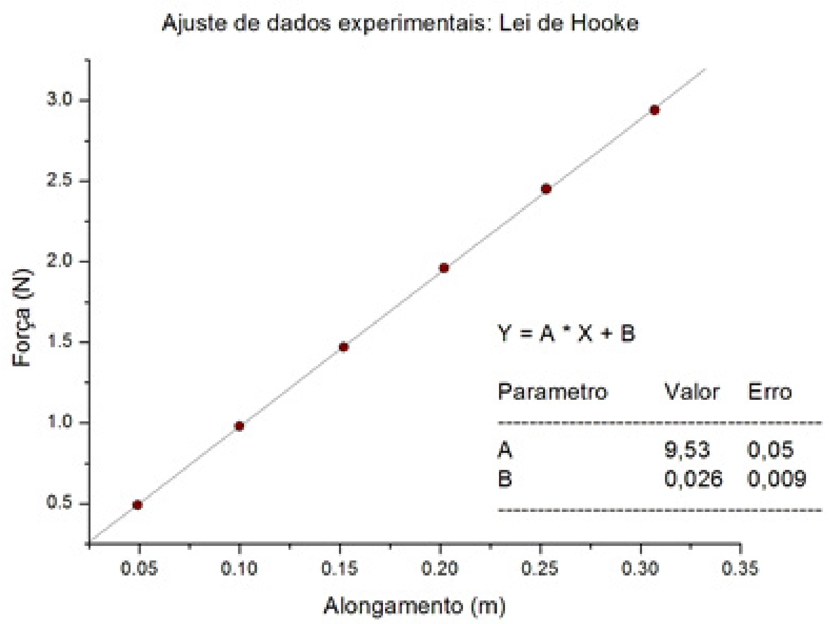

Gráfico 1 - Força por alongamento referente ao experimento da lei de Hooke.

Referência:

- Fundamentos de física, volume 1: mecânica / David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker – 8°ed – Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- Introdução à Física Experimental

{ b } – algumas Constantes Físicas e Fatores de conversão

Símbolo	Valor	Descrição
g	$(9,85 \pm 0,05)$ m/s2	aceleração da gravidade
ε_0	$8,854 \times 10-12$ F/m	permissividade elétrica do vácuo
μ_0	$1,257 \times 10-6$ H/m	permeabilidade magnética do vácuo
h	$6,626 \times 10-34$ J · s	constante de Planck
$c_{H_2O})$	(4186 ± 9) J/kgC°	calor específico da água

Tabela B.1: Constantes físicas usadas ao longo desse livro.

Descrição	Unidade no S.I.	Outra unidade
Comprimento	1 m	1×10−9 m
Volume	1 m3	1000 L
Energia	1 J	0,2389 cal
Campo magnético	1 T	104 Gauss
Calor específico	1 J/kgK	2,3889×10−4 cal/gC°

Tabela B.2: Fatores de conversão usados nesse livro.

{ c } – momento de inércia

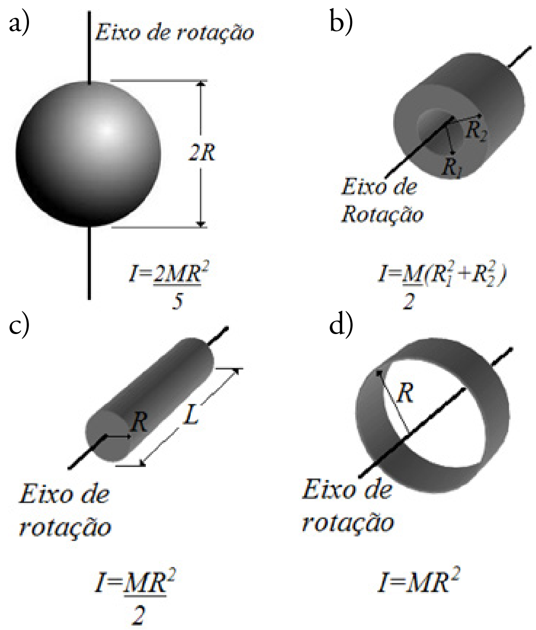

Figura C.1: Momento de inércia para objetos simétricos de massa M. Na parte a), há uma esfera maciça de raio R, na b), um cilindro oco com raio interno R_1 e raio externo R_2, na parte c), um cilindro maciço de raio R e, na d), aro fino de raio R.

{ d } – equivalente em água

O equivalente em água é definido como a quantidade de massa da água em razão da capacidade térmica de um objeto de comparação. Se um objeto possui capacidade térmica de 53 *cal*/C°, isso significa que, a cada 53 *cal* de energia térmica recebida, a temperatura dele subirá 1 °C.

Como, para cada 1 cal absorvida, 1 g de água aumenta sua temperatura em 1 °C, então para manter o aumento de 1 °C na temperatura da água e absorver 53 *cal*, são necessários 53 *g* de água. Como, para cada 1 *g* de água, a capacidade térmica é 1 *cal*/C°, então, o valor do equivalente em água será sempre igual ao valor da capacidade térmica do objeto de comparação. Veja a tabela a seguir:

Objeto	**massa (g)**	**C (cal/C°)**	**E (g)**
cilindro de aço	7	0,770	0,770
cilindro de alumínio	3	0,645	0,645
esfera de aço	14	1,540	1,540
esfera de ferro	14	1,484	1,484

Tabela D.1: Traz exemplos de como encontrar o equivalente em água, E, de alguns objetos, através da capacidade térmica, C, deste.

{ e } – tabela de cores de resistores

A leitura da resistência, *R*, deve ser feita com cuidado, através da tabela de cores, para se evitar erros, devendo ser, preferencialmente, feita com uso de uma lupa para facilitar a identificação das cores.

Primeiramente, deve-se identificar qual é a primeira e qual é a última faixa colorida impressa no resistor. O resistor deve ser posicionado conforme a Figura E.1 para que se faça a identificação da cor correspondente às faixas n_1, n_2, n_3 e n_4.

A última faixa, n_4, normalmente é dourada ou prateada e se refere à tolerância. Para a faixa dourada, a tolerância é de 5% do valor encontrado e, para a prateada, é de 10% do valor.

Após identificar as cores correspondentes a cada uma das faixas, deve-se associar, a elas, o valor correspondente na Tabela E.1. Para as faixas n_1 e n_2 são utilizados os valores dados na coluna indicada por n. Já para a faixa n_3, é utilizada a coluna de fator multiplicativo.

Por exemplo: se a faixa n_1 é marrom, o valor associado a ela é 1. Se a faixa n_2 é cinza, o valor correspondente é 8. Mas, sendo a faixa n_3 marrom, deve ser associado, a ela, o fator multiplicativo igual a 10. Assim o valor da resistência será dado na ordem n_1 $n_2 \times n_3 = 18 \times 10$ ou seja, ou seja, 180 Ω. Se a faixa de tolerância é dourada, então o seu valor é 5% de 180 Ω, ou seja, 9 Ω. O resultado deve ser apresentado de acordo com as regras de erros e medidas, na seguinte forma R = (180 ± 9) Ω.

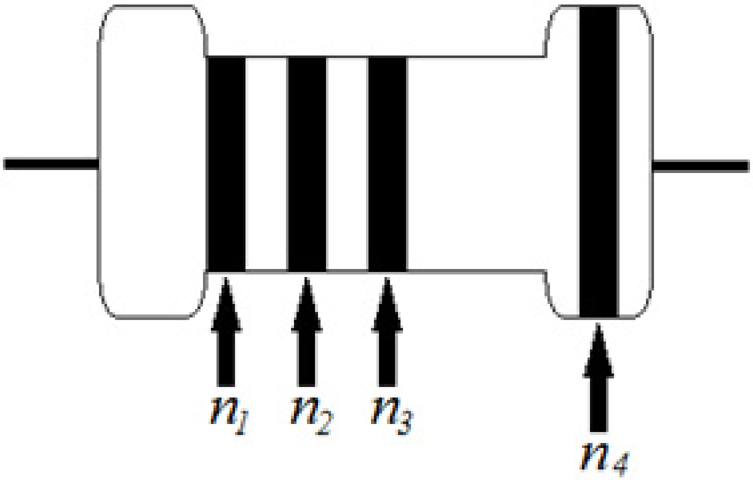

Figura E.1: Representação de um resistor e suas faixas coloridas.

Cor	N	Fator multiplicativo
Preto	0	1
Marrom	1	10
Vermelho	2	100
Laranja	3	1000
Amarelo	4	10000
Verde	5	100000
Azul	6	1000000
Violeta	7	-
Cinza	8	-
Branco	9	-

Tabela E.1: Tabela de cores de resistores.

bibliografia

INMETRO, *Sistema Internacional de Unidades:* SI, primeira edição, Duque de Caxias, RJ, 2012. ISBN 978-85-86920-11-0

D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física*, volume 1, 2, 3 e 4, oitava edição, Livros Técnicos e Científicos S. A., 2008.

A. Campos, E. S. Alves e N. L. Speziali, *Física experimental básica na universidade*, primeira edição, Editora UFMG, 2007.

R. Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica*, décima quarta tiragem, Editora Campus, 1979.

J. J. Piacentini, B. C. S. Grandi, M. P. Hofmann, F. R. R. de Lima e E. Zimmermann, *Introdução ao laboratório de física*, terceira edição, Editora UFSC, 2008 n.

Fevereiro de dois mil e dezenove, trezentos e trinta e dois anos da publicação do primeiro volume de *Philosophiae naturalis principia mathematica*, de Issac Newton.

editora **UEA**

para conhecer mais a *editora***UEA** e suas publicações acesse o site e nos siga nas redes sociais

editora.uea.edu.br

ueaeditora

mecânica clássica mecânica clássica

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

$$v_m = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{t} \quad a_m$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = [m/s]$$

termodinâmica e hidrostática
e ondas sonoras

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \quad /s$$

editora UEA

purandu

eletrostática eletrostática

eletrostática

óptica e física moderna

óptica e física moderna

GOVERNO DO ESTADO DO AMAZONAS

UEA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS