

Ciências Biológicas

Física para Ciências Biológicas

Emerson Mariano da Silva



Geografia



História



Educação Física



Química



Ciências Biológicas



Artes Plásticas



Computação



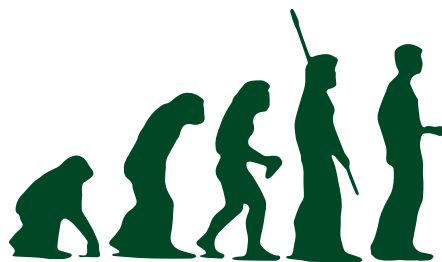
Física



Matemática



Pedagogia



Ciências Biológicas

Física para Ciências Biológicas

Emerson Mariano da Silva

3ª edição

Fortaleza - Ceará



2015



Geografia



História



Educação
Física



Química



Ciências
Biológicas



Artes
Plásticas



Computação



Física



Matemática



Pedagogia

Copyright © 2015. Todos os direitos reservados desta edição à UAB/UECE. Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada, por qualquer meio eletrônico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, dos autores.

Editora Filiada à



Presidenta da República

Dilma Vana Rousseff

Ministro da Educação

Renato Janine Ribeiro

Presidente da CAPES

Carlos Afonso Nobre

Diretor de Educação a Distância da CAPES

Jean Marc Georges Mutzig

Governador do Estado do Ceará

Camilo Sobreira de Santana

Reitor da Universidade Estadual do Ceará

José Jackson Coelho Sampaio

Vice-Reitor

Hidelbrando dos Santos Soares

Pró-Reitora de Graduação

Marcília Chagas Barreto

Coordenador da SATE e UAB/UECE

Francisco Fábio Castelo Branco

Coordenadora Adjunta UAB/UECE

Eloísa Maia Vidal

Diretora do CCS/UECE

Glaúcia Posso Lima

Coordenadora da Licenciatura em Ciências Biológicas

Germana Costa Paixão

Coordenadora de Tutoria e Docência em Ciências Biológicas

Roselita Maria de Souza Mendes

Editor da EdUECE

Erasmus Miessa Ruiz

Coordenadora Editorial

Rocylânia Isídio de Oliveira

Projeto Gráfico e Capa

Roberto Santos

Diagramador

Marcus Lafaiete da Silva Melo

Conselho Editorial

Antônio Luciano Pontes

Eduardo Diatahy Bezerra de Menezes

Emanuel Ângelo da Rocha Fragoso

Francisco Horácio da Silva Frota

Francisco Josênio Camelo Parente

Gisafran Nazareno Mota Jucá

José Ferreira Nunes

Liduína Farias Almeida da Costa

Lucili Grangeiro Cortez

Luiz Cruz Lima

Manfredo Ramos

Marcelo Gurgel Carlos da Silva

Marcony Silva Cunha

Maria do Socorro Ferreira Osterne

Maria Salete Bessa Jorge

Silvia Maria Nóbrega-Therrien

Conselho Consultivo

Antônio Torres Montenegro (UFPE)

Eliane P. Zamith Brito (FGV)

Homero Santiago (USP)

Ieda Maria Alves (USP)

Manuel Domingos Neto (UFF)

Maria do Socorro Silva Aragão (UFC)

Maria Lírida Callou de Araújo e Mendonça (UNIFOR)

Pierre Salama (Universidade de Paris VIII)

Romeu Gomes (FIOCRUZ)

Túlio Batista Franco (UFF)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Sistema de Bibliotecas

Biblioteca Central Prof. Antônio Martins Filho

Thelma Marylândia Silva de Melo – CRB-3 / 623

Bibliotecária

S586f Silva, Emerson Mariano da.
Física para ciências biológicas / Emerson Mariano da
Silva. 3. ed. – Fortaleza : EdUECE, 2015.
138 p. ; il. (Ciências Biológicas)

ISBN: 978-85-78263-48-5

1. Física. 2. Ciências Biológicas. I. Silva, Emerson
Mariano da. II. Título.

CDD: 530

Editora da Universidade Estadual do Ceará – EdUECE
Av. Dr. Silas Munguba, 1700 – Campus do Itaperi – Reitoria – Fortaleza – Ceará
CEP: 60714-903 – Fone: (85) 3101-9893
Internet: www.uece.br – E-mail: eduece@uece.br
Secretaria de Apoio às Tecnologias Educacionais
Fone: (85) 3101-9962

Sumário

Apresentação.....	5
Capítulo 1 – Noções de Movimento e Energia.....	7
1. Introdução	9
2. Trabalhando com unidades de medidas, dimensões e a matemática usada para a descrição das grandezas físicas	10
2.1. Padrões de medidas das grandezas físicas	10
2.2. Análise dimensional das grandezas físicas	11
2.3. O Sistema Internacional de Unidades (SI) e a conversão de unidades	13
2.4. Grandezas físicas escalares e vetoriais	15
2.5. Conhecendo um pouco da matemática dos vetores – álgebra vetorial	16
2.6. Valor médio, desvio padrão e algarismo significativo de uma grandeza física.....	22
3. Estudo sobre as leis de Newton do movimento	26
3.1. Conceitos de força e massa inercial: aspectos históricos pré e pós Newton.....	26
3.2. Aplicações da primeira lei de Newton – a lei da inércia.....	28
3.3. Aplicações da segunda lei de Newton – dinâmica.....	29
3.4. Aplicações da terceira lei de Newton – ação e reação.....	33
3.5. Peso, massa e o campo gravitacional	34
4. Conservação de energia: as definições de energia e trabalho	35
Capítulo 2 – Noções de Termodinâmica e Fluidos.....	43
1. Introdução	45
2. Temperatura e Calor.....	46
2.1. Temperatura e equilíbrio térmico	46
2.2. Termômetros e escalas termométricas	47
2.3. Dilatação térmica de sólidos e líquidos	50
2.4. O calor, a transferência de energia e a termodinâmica	53
2.5. Algumas noções sobre calor específico e capacidade térmica	54
2.6. Transformação de fase e o calor latente	56
2.7. Processos de transferência de calor	57
2.8. Noções de termodinâmica	61
3. Fluidos – estática e dinâmica.....	66

3.1. Noções sobre estática de fluidos	66
3.2. Noções de dinâmica de fluidos e o princípio de Bernoulli.....	73
Capítulo 3 – Noções de Eletricidade e Magnetismo	79
1. Introdução	81
2. As cargas, a força elétrica, o campo e potencial elétrico	82
2.1. Cargas e a lei de Coulomb	82
2.2. O campo elétrico e o movimento das cargas eletricamente carregadas	86
2.3. O movimento de partículas eletricamente carregadas	90
2.4. O potencial elétrico de cargas puntiformes	92
2.5. Capacitância e capacitores	98
3. Noções sobre o magnetismo.....	101
3.1. Um pouco de história	101
3.2. A força magnética e o campo magnético.....	102
Capítulo 4 – Noções de ondulatória e óptica.....	111
1. Introdução	113
2. Noções de ondulatória	114
2.1. O modelo e a natureza das ondas.....	114
2.2. Velocidade de propagação e taxa de transferência de energia das ondas em meios elásticos	118
2.3. Ondas sonoras e o efeito Doppler	122
3. Noções de óptica	125
3.1. A natureza da luz	125
3.2. O modelo de raio, a reflexão e refração da luz	126
Sobre o Autor.....	133

Apresentação

Nesse manual didático apresenta-se uma discussão geral da relação entre os conceitos encontrados nas teorias físicas e os sistemas biológicos, com objetivos de levar o aluno ao entendimento dos processos físicos que ocorrem nesses sistemas.

No Capítulo 1 tem-se uma discussão de alguns aspectos históricos, bem como é apresentado a teoria física da Mecânica Clássica. A unidade apresenta os conceitos de massa inercial, de ponto material e de sistemas de referência, as leis de Newton do movimento e aplicações dessas em modelos simplificados de sistemas biológicos, como na dispersão de sementes e no movimento de células.

Ao apresentar os conceitos de energia e trabalho, tem-se a conceituação das energias cinética e potencial, da conservação e transformação de energia, e uma discussão sobre a relação da lei de conservação de energia com o fluxo de energia na biosfera.

No Capítulo 2 apresenta-se a relação entre os conceitos físicos da Termodinâmica, Termodinâmica e Mecânica dos Fluidos com os sistemas biológicos, particularmente, com o corpo humano. São introduzidas noções de termodinâmica com aplicações da primeira e segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia, aplicadas a vida humana, com o exemplo das dietas calóricas.

Em relação aos conceitos da Mecânica dos Fluidos, se apresentam noções de estática e de dinâmica de fluidos, dos princípios de Pascal, de Arquimedes e de Bernoulli, com exemplos aplicados em escoamentos, tais como os encontrados nos rios, nas mangueiras domésticas e o corpo humano como sensor de variação de pressão atmosférica.

No Capítulo 3 são apresentadas noções de Eletricidade e Magnetismo, definições de força elétrica, de campo e potencial elétrico e de energia potencial elétrica, que servem de base para uma discussão sobre os fenômenos elétricos que ocorrem nas células, ou seja, o potencial de repouso encontrado numa membrana celular.

Apresenta-se, também, um breve histórico acerca das descobertas relativas ao Magnetismo e os conceitos de força e campo magnéticos, e uma discussão sobre a importância dos campos elétrico e magnético nos sistemas biológicos e suas aplicações.

No Capítulo 4 apresentam-se conceitos físicos encontrados na Ondulatória e Óptica, visando auxiliar no entendimento de sistemas biológicos, tais como, a fala e a audição humana e a visão dos insetos.

São descritos a natureza e as propriedades das ondas, bem como a velocidade de propagação e a taxa de transferência de energia das ondas em meios elásticos, além de mostra-se uma aplicação desses conceitos na descrição dos mecanismos da fala e da audição humana.

Tem-se, também, a apresentação de alguns conceitos relacionados a natureza da luz, primordiais para o entendimento de um dispositivo diotrópico, encontrado nos omatídios, ou seja, no dispositivo de visão dos insetos.

Além das teorias físicas e das discussões sobre a aplicação dessas teorias para entendimentos de alguns sistemas biológicos, esse manual também são encontrados uma série de exercícios propostos, bem como, de exercícios de avaliação a serem trabalhados ao longo da disciplina de Física para Ciências Biológicas.

Bons estudos!

Aos meus pais e à
minha filha Ana Clara.
Dedico.

Capítulo

1

Noções de Movimento e Energia

Objetivos

- Este capítulo tem como principais objetivos apresentar uma introdução aos conceitos físicos encontrados no estudo da mecânica clássica, mostrar as aplicações das leis de Newton do movimento e as formas de energia envolvidas nesses processos físicos, bem como apresentar o princípio de conservação da energia. Em adição, visa relacionar os conceitos físicos estudados com o cotidiano, para um futuro entendimento das aplicações dessas teorias físicas nos sistemas biológicos.

1. Introdução

A Física teórica é a primeira ciência a ser expressar matematicamente, pois os resultados de experimentos devem ser previstos ou interpretados mediante representações matemáticas. Conceitos físicos foram expressos matematicamente na Grécia há mais de 2.000 anos. Entretanto, os tempos áureos das representações matemáticas na Física tiveram início com as leis de Kepler para o movimento dos corpos celestes, que posteriormente foram deduzidas a partir das leis de Newton.

Em Física é comum o uso de conceitos abstratos para descrever fenômenos ou comportamentos na natureza. Um dos conceitos mais utilizados nos estudos da Mecânica Clássica é o conceito de ponto material. Isso acontece porque não são raras as situações em que se pretende descrever o movimento de um objeto cujo tamanho é muito pequeno em relação às distâncias consideradas no problema.

As leis de Kepler, por exemplo, descrevem a Terra como um ponto material orbitando em torno do Sol, sem que haja necessidade de se considerar o real tamanho do planeta, ou sua real forma. Em Física, essa é uma boa aproximação, desde que se esteja interessado primariamente em descrever a trajetória realizada pela Terra em torno do Sol.

Para biólogos essa talvez pareça uma aproximação injustificada, entretanto não é difícil imaginar um exemplo suficientemente convincente. Considere que se deseja estudar todos os aspectos do voo de uma determinada ave migratória. Do ponto de vista de sua trajetória durante a migração, há pouca ou talvez nenhuma justificativa para se deter em detalhes como envergadura das asas, ângulo máximo de abertura entre o úmero e o conjunto

cúbito e rádio. Nessa situação pode-se perfeitamente tratar a ave como um ponto material que se desloca durante a migração, ao longo de uma determinada trajetória.

Entretanto, se o objetivo do estudo for entender as forças aplicadas pelos músculos aos ossos da asa durante vôo, muito provavelmente a informação a respeito das dimensões da ave e de suas partes constituintes deve ser levada em consideração, não podendo ser aproximada por um ponto material.

Sendo o foco deste capítulo a descrição, à luz da Física, de sistemas biológicos, no contexto da Mecânica Clássica, há particular interesse no estudo do movimento. Assim, serão tratados com especial atenção temas relacionados aos seguintes tópicos: locomoção; movimento de órgãos; movimento de fluidos em torno de corpos, como no vôo e na natação; movimento de fluidos dentro de órgãos, como o ar pelas vias aéreas ou a circulação sanguínea; além de outros temas igualmente relevantes em biologia.

2. Trabalhando com unidades de medidas, dimensões e a matemática usada para a descrição das grandezas físicas

2.1. Padrões de medidas das grandezas físicas

Para auxiliar na medição em laboratório e apresentação das comparações entre os valores medidos das grandezas físicas é usado um conjunto padrão de unidades. Dessa forma, certa grandeza física sempre será expressa associada a sua respectiva unidade padrão de medida.

O padrão definido para a unidade de medida do comprimento é o metro. Assim, se o comprimento entre dois pontos de uma determinada bancada de laboratório mede 8,5 metros, significa que o valor medido é 8,5 vezes maior que o valor padrão definido.

É importante mencionar que na prática esse padrão de medida de comprimento serve de base para expressar medidas de distância e alturas entre pontos previamente estabelecidos, como os citados no exemplo anterior.

Faça você mesmo! Com o auxílio de uma trena ou de qualquer um instrumento de medição de comprimento faça medidas dos objetos em seu redor, catalogue-os e compare-os com o padrão de unidades de medidas adotado.

A unidade padrão de medida de tempo é o segundo, que é definido como sendo a duração de 9.192.631.770 vibrações da radiação em um determinado comprimento de onda emitido por um isótopo do átomo de Césio.

Na prática, esse padrão de medida do tempo, juntamente com seus múltiplos e submúltiplos, que estudaremos a seguir, nos auxiliam em medições entre dois pontos previamente determinados no tempo, como por exemplo, a medida do tempo entre o início e o final da aula, entre a partida e a chegada, ou entre o nascer e o pôr do Sol.

Faça você mesmo! Para auxiliar no entendimento desse padrão de medida pesquise (livros e/ou internet) sobre alguns valores de medidas de tempo, monte uma tabela e compare-os.

O padrão de medida de massa foi estabelecido pela Agência Internacional de Pesos e Medidas como sendo a massa de um quilograma de um cilindro de platina-irídio. Dessa forma pode se conhecer a massa de um objeto ou corpo qualquer, comparando-se diretamente com a massa do quilograma padrão.

É importante mencionar que no caso da massa, além desse padrão citado acima, existe outro padrão de medida adotado internacionalmente para a escala atômica, ou seja, para comparação das massas dos átomos usa-se o padrão de medida da massa do átomo de carbono (^{12}C). Esse padrão é necessário devido a uma maior precisão que é exigida na comparação das massas atômicas e que não pode ser conseguida através da comparação com o quilograma.

Faça você mesmo! Pesquise (livros e/ou internet) sobre alguns valores de medidas de massas, incluindo as massas moleculares, monte uma tabela e compare-os.

Após a familiarização com os padrões internacionais de medidas de comprimento, de tempo e de massa, é importante saber que esses padrões são exemplo de grandezas físicas fundamentais e que os mesmos servem de base para as grandezas físicas derivadas, como por exemplos, a velocidade, a aceleração e a força, que serão abordadas mais a diante.

2.2. Análise dimensional das grandezas físicas

As grandezas físicas além de serem expressas juntamente com suas respectivas unidades de medidas, que podem ser as unidades padrões, seus múltiplos e submúltiplos, ainda estão associadas a dimensões. Dessa forma, é importante saber que a unidade em que são expressas as grandezas físicas não afetam suas dimensões.

Assim, a distância entre as cidades de Fortaleza e Juazeiro do Norte, no Estado do Ceará, pode ser expressa em quilômetros (km) ou metros (m), no entanto, sua dimensão continua sendo expressa em forma de comprimento, ou seja, não muda. Dessa forma, assim como foi definido anteriormente as unidades padrões de medidas das grandezas físicas fundamentais - comprimento, tempo e massa - pode-se definir as dimensões fundamentais associadas a essas grandezas:

- A dimensão de comprimento é L;
- A dimensão de massa é M;
- A dimensão de tempo é T.

Para entender-se como funcionam as operações com as dimensões das grandezas físicas, chamadas de análise dimensional, analise o exemplo de um ônibus que percorre o percurso entre as cidades de Fortaleza e Juazeiro do Norte, no Ceará. Sabendo-se que a dimensão de comprimento é L, e a de tempo é T. Então, a dimensão da velocidade média do ônibus, medida entre o percurso das duas cidades, será:
$$\left[\bar{v} \right] = \frac{L}{T}.$$

Veja que a velocidade média é uma grandeza física derivada de duas grandezas físicas fundamentais, o comprimento e o tempo, assim, sua unidade de medida poderá ser expressa como $\frac{m}{s}$ (metros por segundo) ou por seus respectivos múltiplos/submúltiplos, como é o caso da velocidade média do ônibus que é expressa em $\frac{Km}{h}$ (quilômetros por hora).

A análise dimensional é uma ferramenta útil para a validação e confirmação da consistência das equações matemáticas associadas às representações de modelos das grandezas e fenômenos físicos. Por exemplo, fazendo uma análise dimensional de uma das equações clássicas da cinemática unidimensional, $v = v_0 + at$, que relaciona a velocidade, com a velocidade inicial (v_0), a aceleração (a) e o tempo (t), tem-se:
$$[v] = \left[\frac{L}{T} \right] + \left[\frac{L}{T^2} x T \right].$$

Simplificando as dimensões de tempo no segundo termo do lado direito da equação, obtém a dimensão da velocidade $\left(\frac{L}{T}\right)$:

$$[v] = \left[\frac{L}{T}\right] + \left[\frac{L}{T}\right] = \left[\frac{L}{T}\right] \text{ ou } \left[\frac{L}{T}\right] = \left[\frac{L}{T}\right],$$

Veja com esse exemplo que se podem tratar as dimensões como grandezas algébricas e assim realizarem-se operações matemáticas de soma, subtração, multiplicação e divisão. No entanto, ressalta-se que isso só será possível se as grandezas possuírem as mesmas dimensões.

Outro fato a se atentar é que, apesar de podermos realizar operações matemáticas com as dimensões das grandezas físicas, o resultado dessas operações deve nos retornar dimensões e não números. Como por exemplo, $L + L = L$, ou seja, quando se somam dimensões de comprimento, obtém como resultado, também, uma dimensão de comprimento e não duas vezes a dimensão de comprimento. Assim, chama-se atenção para o fato de que em análise dimensional um número é adimensional.

Para entender melhor o que isso significa, veja o exemplo da análise da dimensão da grandeza física chamada de frequência.

Por definição, a frequência (f) é a quantidade de repetição de uma determinada onda, ou fenômeno ondulatório, por segundo. Sua dimensão é $[f] = \frac{1}{[tempo]}$.

Assim, $[f] = \frac{1}{T}$ ou $[f] = T^{-1}$. Onde, deve-se expressar a unidade de medida da frequência por s^{-1} , que também é chamada de Hertz (Hz).

Faça você mesmo! A partir das dimensões fundamentais de comprimento, de tempo e de massa, obtenha as dimensões das grandezas físicas derivadas: área, volume, velocidade, aceleração e densidade.

2.3. O Sistema Internacional de Unidades (SI) e a conversão de unidades

O SI como é chamado o Sistema Internacional de Unidades é um conjunto composto por grandezas físicas, mostradas na tabela 1.1, que são usadas como unidades bases. Observe que, dentre essas grandezas estão os padrões de comprimento, de tempo e de massa, apresentados anteriormente.

Tabela 1.1

Unidades bases de medidas do Sistema Internacional de Unidades (SI)		
Grandeza física	Unidade padrão de medida	Símbolo
Tempo	segundo	s
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Quantidade de substância	mol	mol
Temperatura	Kelvin	K
Corrente elétrica	Ampère	A
Intensidade Luminosa	Candela	Cd

Chama-se atenção para o fato de que os exemplos e exercícios que serão apresentados, trazem as grandezas físicas, fundamentais ou derivadas, expressas em unidades do SI, como por exemplos, a velocidade, que no SI é expressa em metros por segundo $\left(\frac{m}{s}\right)$, a aceleração, que é expressa em metros por segundo ao quadrado $\left(\frac{m}{s^2}\right)$, a massa, que é expressa em quilogramas (kg) e força, que no SI é expressa em Newton (N). Onde $1N = 1kg \times \frac{m}{s^2}$.

Apesar do uso do sistema internacional de medidas como base para nossos estudos é importante saber que existem outros sistemas de medidas que podem ser adotados para essa tarefa. Como é o caso o sistema gaussiano e o sistema inglês, muito adotado nos Estados Unidos (EUA).

Faça você mesmo! Pesquise em livros e/ou na internet sobre as unidades básicas em que as grandezas físicas são expressas nos sistemas, gaussiano e inglês, compare-as com as unidades usadas no SI.

Dessa forma, a conversão de unidades é fundamental para unificar as unidades das grandezas físicas usadas em todo mundo. Por exemplo, no sistema inglês a velocidade é expressa em pés (ft) por segundo (s), ou seja, $\left(\frac{ft}{s}\right)$. Assim, é importante saber que 1 ft é aproximadamente igual a 0,304 metros para realizarmos a devida conversão dos valores de velocidades obtidas no sistema inglês para o SI. Outro exemplo nessa linha de raciocínio é que uma milha (mi), medida de distância nos EUA, equivale a aproximadamente 1.609 metros (m) ou 1,609 quilômetros (km). Assim, pode-se fazer a conversão da velocidade de um móvel medida em $\left(\frac{mi}{h}\right)$ para $\left(\frac{km}{h}\right)$ e vice-versa.

Faça você mesmo! Faça uma pesquisa (livros e/ou internet) sobre os fatores de conversão e monte tabelas com fatores de conversão para as grandezas físicas: comprimento, área, massa, volume, tempo, velocidade, força, pressão e potência.

2.4. Grandezas físicas escalares e vetoriais

Na Física encontram-se grandezas físicas que podem ser classificadas como grandezas escalares ou como grandezas vetoriais. A temperatura e o volume são exemplos de grandezas escalares. Assim, quando se ouve cotidianamente que a temperatura do ar em um determinado local é de 36°C (Leia-se: trinta e seis graus Celsius) tem-se a especificação completa da informação, não necessitando de informações adicionais, tais como em que direção e/ou em que sentido está essa temperatura. Da mesma forma, com a informação que o volume de uma caixa d'água é de 1.000 litros, não se precisa mais de nenhuma informação para caracterizarmos o volume de água da caixa.

Então, verifica-se que nesses dois exemplos têm-se grandezas escalares, ou seja, grandezas físicas que podem ser representadas apenas por um número, um valor numérico positivo ou negativo, com suas respectivas unidades de medida. Nesse caso, é importante ressaltar que, por serem as grandezas escalares representadas somente por valores numéricos e suas unidades de medidas, não necessitando de outras especificações, como por exemplo, a direção para onde está apontando a grandeza. A manipulação matemática dessas grandezas é simples e se dá através das quatro operações básicas da matemática: adição e subtração, multiplicação e divisão.

No caso das grandezas vetoriais, para representá-las tem-se a necessidade de especificarmos além dos valores numéricos, a direção e sentido para onde aponta a grandeza e suas respectivas unidades de medidas. Exemplo clássico de grandeza vetorial é a força. Observe que, para se descrever completamente uma força, além de seu valor numérico, que se denota de módulo, é necessária a especificação de sua direção e sentido.

Faça você mesmo! Faça uma pesquisa (livros e/ou internet) e monte uma tabela com exemplos de grandezas físicas escalares e vetoriais. Compare-as e tente diferenciá-las.

Voltamos ao exemplo do ônibus, que viaja entre Fortaleza e Juazeiro do Norte. Note que a distância percorrida pelo ônibus representa o comprimento de sua trajetória, assim, necessita somente de um valor numérico para ser caracterizada; já o deslocamento do ônibus, que é definido como a mudança de sua posição, depende além do valor numérico, do conhecimento das coordenadas inicial e final da sua trajetória.

Agora veja no mapa da figura 1.1 a posição geográfica aproximada dessas duas cidades. A linha reta traçada entre as cidades representa o deslocamento do ônibus, cujo módulo é o comprimento da reta e a seta na ponta da reta representa a direção dessa grandeza física. Assim, de agora em diante chamaremos essa reta de vetor, ou seja, nesse caso é o vetor deslocamento do ônibus.

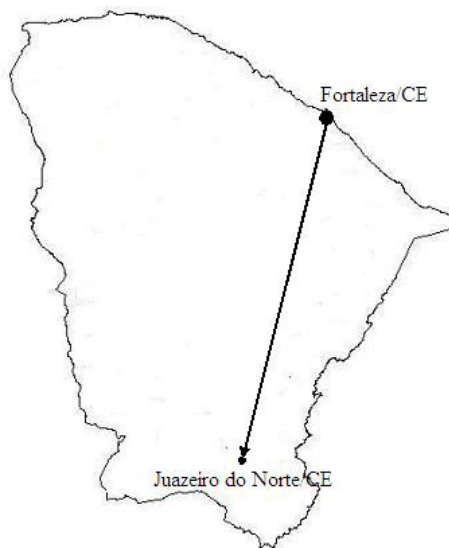


Figura 1.1 – Mapa do Estado do Ceará com as localizações geográficas aproximadas das cidades de Fortaleza e Juazeiro do Norte e a representação do vetor deslocamento do ônibus entre essas cidades.

2.5. Conhecendo um pouco da matemática dos vetores – álgebra vetorial

Dos exemplos mostrados anteriormente é possível definir que um vetor é um ente matemático que possui módulo (valor numérico) e direção e sentido, diferente das grandezas escalares que apresentam somente valores numéricos. Assim, é importante saber que existem propriedades matemáticas próprias para expressar as grandezas vetoriais e usada para a manipulação desses que difere da usada para manipular as grandezas escalares. É a chamada álgebra vetorial.

Para representação de um vetor ou de vetores, no espaço, como por exemplo, em mapas, diagramas e sistemas de coordenadas, deve-se traçar uma reta unindo dois pontos - inicial e final - denominados de origem e extremidade, respectivamente, com uma seta na extremidade que vai indicar a direção e sentido do mesmo. O comprimento dessa reta nos dá o módulo ou a intensidade desse vetor.

Para melhor entendimento dessa representação deve-se voltar ao exemplo do mapa mostrado na figura 1.1. Veja que a reta que une o ponto inicial, cidade de Fortaleza e o ponto final, cidade de Juazeiro do Norte representa o vetor deslocamento do ônibus que viaja entre as duas cidades, com direção e sentido a Juazeiro do Norte.

É importante notar que se o ônibus agora viaja em direção a Fortaleza, apesar da reta que representa o vetor deslocamento nesse caso ser semelhante a do caso anterior, a direção e sentido do vetor são diferentes. Nesse caso, temos outro vetor, com mesmo módulo e direção, porém com sentido diferente. Para melhor ilustrar essa situação veja o mapa da figura 1.2.

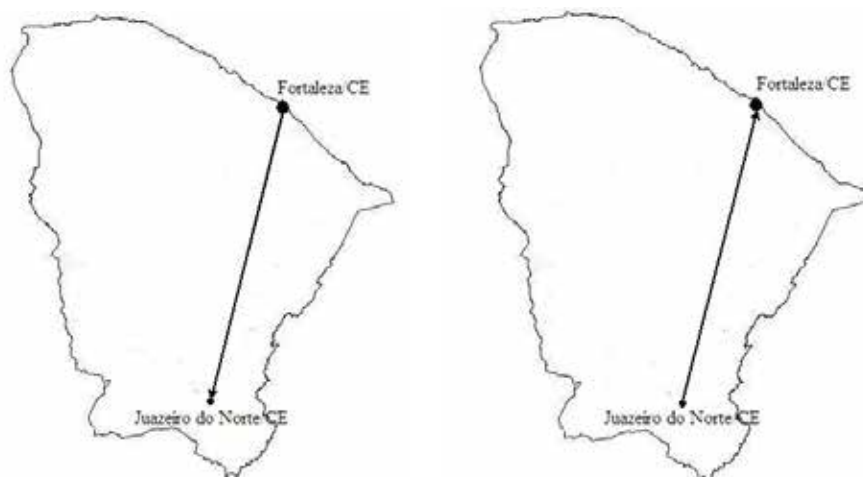


Figura 1.2 – Mapa do Estado do Ceará com as localizações geográficas aproximadas das cidades de Fortaleza e Juazeiro do Norte e as representações dos vetores deslocamentos do ônibus entre essas cidades.

Faça você mesmo! Determine a distância percorrida e o deslocamento (módulo e direção) de uma viagem de férias entre sua cidade e a cidade de Fortaleza. Dica! Use a ajuda dos mapas encontrados na internet para determinar o vetor deslocamento.

Então, denotando-se de $\vec{a}$ o vetor deslocamento de Fortaleza a Juazeiro do Norte e de $\vec{b}$ o outro vetor, afirma-se que $\vec{b} = -\vec{a}$. O módulo do vetor $\vec{a}$ é denominado de a (um escalar) e o módulo do vetor $\vec{b}$ de b (outro escalar).

Para a soma de dois vetores, geometricamente, como por exemplo, os mostrados no mapa da figura 3, que representam deslocamentos entre a cidade de Viçosa do Ceará e Fortaleza ($\vec{a}$) e, entre Fortaleza e Juazeiro do Norte ($\vec{b}$), respectivamente, deve-se unir o origem do vetor $\vec{a}$, a extremidade do vetor $\vec{b}$, como mostrado na figura 1.3. Assim, tem-se um novo vetor, chamado

na figura 1.3 de vetor $\vec{c}$, que representa a soma de $\vec{a}$ e $\vec{b}$, ou seja, $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$. Esse método é conhecido como método triangular de adição.

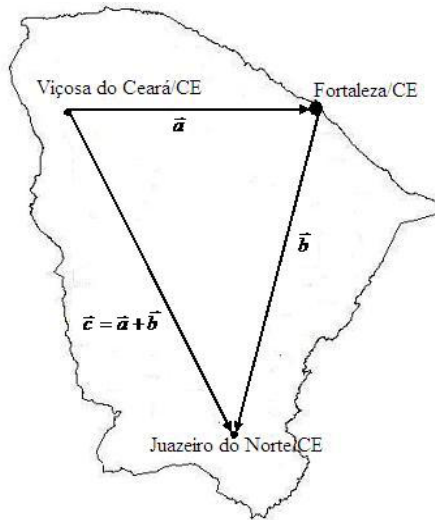


Figura 1.3 – Mapa do Estado do Ceará com as localizações geográficas aproximadas das cidades de Fortaleza, Juazeiro do Norte e Viçosa do Ceará juntamente com as representações dos vetores deslocamentos do ônibus entre essas cidades a representação do vetor deslocamento total, que é o vetor soma $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$.

Para entender a subtração de vetores, também usando a geometria, volte ao exemplo da figura 1.2, que mostra dois vetores deslocamento de mesmo módulo e direção e de sentidos contrários. Observe que o vetor $\vec{a}$ representa o deslocamento de Fortaleza a Juazeiro do Norte e o vetor $\vec{b}$ ($\vec{b} = -\vec{a}$), representa o deslocamento inverso. Dessa forma, $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ pode ser escrito como $\vec{c} = \vec{a} + (-\vec{a})$, que nesse caso resulta em zero.

Atente para o fato que a distância percorrida pelo ônibus nesse exemplo não é zero, é duas vezes a distância de Fortaleza a Juazeiro do Norte, no entanto, o vetor deslocamento total, que representa a soma entre os vetores $\vec{a}$ e $\vec{b}$ é nulo.

Agora, para entender melhor como funciona a soma e subtração de vetores, observe a figura 1.4 que mostra soma e subtração envolvendo vetores no espaço. Do lado direito tem-se a aplicação do método do paralelogramo. Observe que nesse caso, usa-se esse método quando as origens dos vetores $\vec{a}$ e $\vec{b}$ coincidem, assim, o vetor soma, ou vetor resultante $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ é a diagonal do paralelogramo formado pelos vetores $\vec{a}$ e $\vec{b}$. Do lado esquerdo, tem-se a subtração dos vetores $\vec{a}$ e $\vec{b}$.

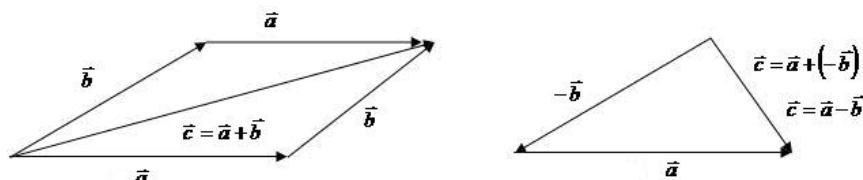


Figura 1.4 – Diagrama esquemático da soma e subtração de vetores através do método geométrico.

Faça você mesmo! Com o auxílio de régua e papel milimetrado construa vetores e realize somas e subtrações usando os métodos geométricos, do paralelogramo e triangular de adição.

Outra forma de se manipular os vetores é através de suas projeções. Para aplicação dessa técnica é preciso entender um pouco sobre as componentes de um vetor, e sobre o vetor unitário.

Veja a figura 1.5 e observe que o vetor $\vec{a}$, que está no plano xy , faz um ângulo θ com o eixo x . Assim, a projeção do vetor $\vec{a}$, no eixo x será o vetor $\vec{a}_x$, da mesma forma a projeção $\vec{a}$ no eixo y é o vetor $\vec{a}_y$. O módulo das componentes dos vetores $\vec{a}_x$ e $\vec{a}_y$ são dados, respectivamente, por $a_x = a \cos \theta$ e $a_y = a \sin \theta$.

Em relação à direção desses vetores, $\vec{a}_x$ segue a direção do eixo x e $\vec{a}_y$ a do eixo y , no entanto, a garantia desse fato se dá através da multiplicação das componentes a_x e a_y pelos vetores unitários $\hat{i}$ e $\hat{j}$ nas direções x e y , respectivamente.

Nesse caso, ainda pode-se escrever o vetor $\vec{a}$ em função de suas componentes $\vec{a}_x$ e $\vec{a}_y$, e dos vetores unitários nas direções x e y , na forma: $\vec{a} = a_x \hat{i} + a_y \hat{j}$.

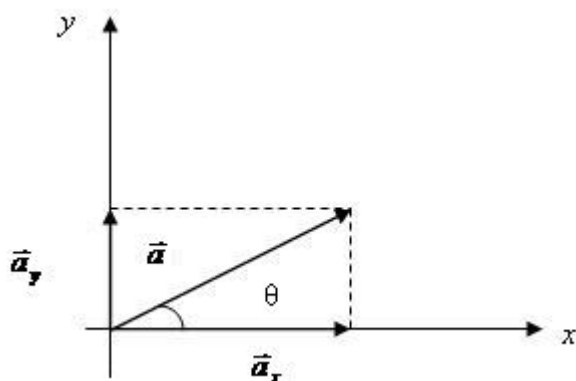


Figura 1.5 – Representação do vetor $\vec{a}$ e de suas componentes, os vetores $\vec{a}_x$ e $\vec{a}_y$, no plano cartesiano xy .

Agora, usando-se do Teorema de Pitágoras e a definição da tangente de um ângulo, podem-se obter o módulo e a direção de um vetor $\vec{a}$ desconhecido, através de suas componentes $\vec{a}_x$ e $\vec{a}_y$. Assim, o módulo do vetor $\vec{a}$ é dado por $\sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ e a tangente do ângulo θ por $\operatorname{tg} \theta = \frac{a_y}{a_x}$.

Faça você mesmo! Com o auxílio de papel milimetrado, régua e um transferidor, construa o vetor deslocamento e suas respectivas componentes nas direções leste (eixo x) e norte (eixo y) de uma caminhada (em linha reta) entre as cidades de Canindé e Fortaleza. Determine o módulo das componentes e calcule o módulo e a direção do vetor deslocamento. Dica! Use um mapa e através da indicação da escala do mesmo e determine o módulo das componentes do vetor deslocamento.

Sabendo-se que um vetor $\vec{a}$ pode se escrito como a soma de suas componentes nas direções x e y , como mostrado, fica evidente que se pode realizar soma e subtração algébrica de vetores. No entanto, é importante mencionar que para a realização dessas operações com vetores, ou componentes de vetores, estes devem estar na mesma direção.

Por exemplo, somando-se algebricamente os vetores $\vec{a}$ ($\vec{a} = a_x \hat{i} + a_y \hat{j}$) e $\vec{b}$ ($\vec{b} = b_x \hat{i} + b_y \hat{j}$), tem-se que $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$, ou seja, $\vec{c} = (a_x + b_x) \hat{i} + (a_y + b_y) \hat{j}$.

Veja que $\vec{c}$ pode ser escrito em função de suas componentes, na forma $\vec{c} = c_x \hat{i} + c_y \hat{j}$, então, os módulos das componentes do vetor $\vec{c}$ serão $c_x = a_x + b_x$ e $c_y = a_y + b_y$, respectivamente.

Faça você mesmo! Com o auxílio de papel milimetrado, régua e um transferidor, construa os vetores deslocamento e suas respectivas componentes nas direções leste (eixo x) e norte (eixo y) de uma caminhada (em linha reta) de Canindé a Redenção e de Redenção a Fortaleza. Determine o módulo do vetor deslocamento total através da soma algébrica das componentes dos vetores deslocamento. Dica! Use um mapa e através da indicação da escala do mesmo determine o módulo das componentes dos vetores deslocamento.

A multiplicação de vetores pode ser realizada de duas formas: primeiro, um vetor multiplicado por um número escalar, segundo, um vetor multiplicado por outro. Por exemplo, se multiplicarmos o vetor $\vec{a}$ que chamamos de deslocamento do ônibus de Fortaleza a Juazeiro do Norte, mostrado no mapa da figura 1.1 por 3, o resultado será outro vetor ($\vec{b}$) de módulo três vezes maior do que o primeiro, com mesmo direção e sentido do primeiro, ou seja, $b = 3a$.

Chama-se atenção quando o escalar for negativo. Por exemplo, se multiplicarmos o mesmo vetor $\vec{a}$ por um escalar -5 , o resultado da multiplicação será outro vetor ($\vec{c}$), cujo módulo é cinco vezes maior que o módulo do vetor $\vec{a}$, no entanto, o sentido de $\vec{c}$ é oposto ao de $\vec{a}$. Esse fato se dá em consequência do sinal negativo do escalar.

É importante mencionar que para a divisão de vetores usa-se o artifício matemático da multiplicação pelo inverso de um número, que acaba sendo a multiplicação por um escalar. Por exemplo, no caso acima se multiplicou um vetor $\vec{a}$ por 3 obtendo um vetor $\vec{b} = 3\vec{a}$. Assim, para a divisão também por 3, o resultado seria um vetor $\vec{d} = \frac{1}{3}\vec{a}$.

Uma das propriedades da multiplicação de um vetor por outro é o produto escalar, em que o resultado da multiplicação de dois vetores é um escalar. O produto escalar entre dois vetores $\vec{a}$ e $\vec{b}$, também chamado de produto interno, é definido pela multiplicação dos módulos dos dois vetores vezes o cosseno do ângulo entre eles, como mostrado na figura 1.6.

Por definição o produto interno de $\vec{a}$ e $\vec{b}$ é $a \cdot b = ab \cos \theta$, mostrado graficamente no lado esquerdo da figura 1.6. Observe que, quando se têm dois vetores perpendiculares, como mostrados na figura 1.6 (centro), o ângulo entre eles é de 90° (noventa graus). Então, se lembrarmos da trigonometria, o cosseno do ângulo de 90° é igual a 0, dessa forma, o produto interno entre dois vetores será nulo, e quando esses estão em paralelo, o ângulo entre eles vale 0° , o produto interno é simplificado e igual ao produto dos módulos dos vetores, ou seja, $a \cdot b = ab$.

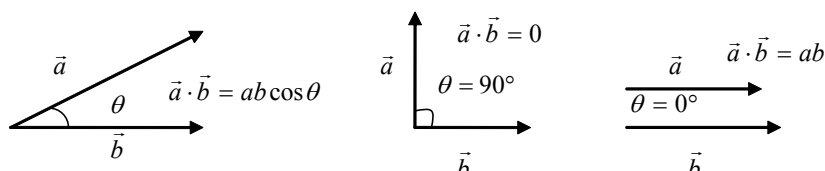


Figura 1.6 – Representação esquemática da multiplicação de vetores, produto interno.

Faça você mesmo! Calcule o produto interno dos vetores deslocamentos entre Canindé e Fortaleza e entre Canindé e Redenção. Dica! Use papel milimetrado, régua e transferidor, além do mapa rodoviário para obtenção dos valores dos módulos dos vetores deslocamento e do ângulo formado entre eles.

2.6. Valor médio, desvio padrão e algarismo significativo de uma grandeza física

Os padrões de comportamento das séries de medidas das grandezas físicas são obtidos através de uma ciência chamada de Estatística. É através de métodos e técnicas estatísticas e de gráficos que se podem realizar análises e interpretar numericamente as grandezas físicas, e assim, ressaltar as características mais importantes dessas grandezas para que se possa apresentá-las de forma conveniente.

Para entender a representação, através de um único valor numérico, das informações em uma amostra de medidas de uma grandeza física, são usados os conceitos de medidas de tendência de valor central advindos da Estatística. A mais difundida medida usada para expressar uma medida de valor central é a média aritmética e que daqui para frente se adotará apenas o termo média, para simplificar o entendimento.

Da definição tem-se que a média de uma grandeza física é a soma de todos os valores numéricos da amostra de medidas dessa grandeza dividida pelo número total de medidas. Para evidenciar o uso dessa medida de tendência de valor central analise os dados mensais dos casos de dengue na cidade de Fortaleza, para os anos de 2006 e 2007 mostrados na tabela 1.2.

Tabela 1.2

Descrição do número de casos mensais confirmados de dengue em Fortaleza durante os anos de 2006 e 2007		
Número de casos		
Meses	2006	2007
Jan	820	743
Fev	874	1.217
Mar	1.511	2.227
Abr	2.298	4.013
Mai	5.242	4.811
Jun	5.477	4.249
Jul	4.276	2.765
Ago	2.458	1.715
Set	972	1.003
Out	642	916
Nov	768	757
Dez	231	610
Média	2.131	2.086

Fonte: Secretaria da Saúde do Estado do Ceará (www.saude.ce.gov.ce).

Veja na tabela que a média anual dos casos de dengue observados na cidade de Fortaleza é dada pela soma dos valores em cada mês, dividido por 12, que é o número de meses do ano. Assim, calculando-se a média dos casos de dengue para o ano de 2006 obtêm-se 2.131 casos confirmados e

para o ano de 2007 tem-se 2.086 casos confirmados na cidade de Fortaleza. Nesse caso, pode-se comparar tanto as médias anuais, como a média de cada ano com os respectivos valores mensais observados naquele ano.

Como por exemplo, para o ano de 2007, os valores observados nos meses de janeiro e de fevereiro, bem como os valores dos meses de agosto a dezembro estão abaixo da média, já os valores dos meses de março a julho estão acima da média para esse ano.

A formulação matemática para cálculo da média de uma amostra de medidas de uma determinada grandeza física é: $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$,

onde, no exemplo prático visto, $x_1, x_2, \dots, x_n$ são os valores dos casos de dengue observados em cada um dos doze meses vistos na tabela 1.2 e n é o número total de meses.

Faça você mesmo! Mostre numericamente que os valores apresentados para a média dos casos de dengue observados nos anos de 2006 e 2007 na cidade de Fortaleza estão corretos.

Agora pense! Quando foram comparados os valores médios dos casos de dengue observados no ano de 2007 em Fortaleza, com os valores mensais desse ano se constata que os valores mensais estão acima ou abaixo da média, o que mostra que essa variável física tem uma variação em torno de seu valor médio, ou seja, apresenta uma variabilidade ou dispersão, em torno do valor médio.

Nesse contexto, para medir a variabilidade dessa grandeza usa-se uma medida de dispersão, chamada de desvio da média, que é definida como sendo o valor obtido da variável menos o valor médio. Matematicamente tem-se que $d = x - \bar{x}$. A tabela 1.3 mostra os desvios mensais em relação à média anual para os casos confirmados de dengue nos anos de 2006 e 2007 em Fortaleza.

Tabela 3

Número de casos mensais confirmados de dengue nos anos de 2006 e 2007 em Fortaleza e seus respectivos desvios em relação à média anual				
Número de casos			Desvio da média	
Meses	2006	2007	2006	2007
Jan	820	743	-1.311	-1.343
Fev	874	1.217	-1.257	-869
Mar	1.511	2.227	-620	142
Abr	2.298	4.013	167	1.928
Mai	5.242	4.811	3.111	2.726
Jun	5.477	4.249	3.346	2.164
Jul	4.276	2.765	2.145	680
Ago	2.458	1.715	327	-371
Set	972	1.003	-1.159	-1.083
Out	642	916	-1.489	-1.170
Nov	768	757	-1.363	-1.329
Dez	231	610	-1.900	-1.476
Média	2.131	2.086	-	-

Fonte: Secretaria da Saúde do Estado do Ceará (www.saude.ce.gov.br).

Faça você mesmo! Mostre numericamente que os valores apresentados para os desvios mensais em relação à média anual dos casos de dengue observados nos anos de 2006 e 2007 na cidade de Fortaleza estão corretos e, que a soma deles é zero.

Por definição diz-se quando os valores dos desvios são relativamente pequenos em relação à média, que a medida apresenta baixa dispersão, e vice-versa, se os valores dos desvios são relativamente grandes, a medida apresenta alta dispersão em relação à média. É correto afirmar que a soma dos desvios em relação à média é zero, ou seja, a soma dos desvios positivos e negativos, que representam valores acima e abaixo da média, respectivamente, se anula.

Assim, estabeleceu-se outra medida de dispersão para caracterizar a variabilidade das medidas das grandezas físicas, o desvio-padrão, que está relacionado com a precisão das medidas das grandezas físicas. Na definição de sua formulação matemática usa-se o artifício matemático de que toda soma dos quadrados é positiva e no mínimo nula se todos os elementos da soma sejam também nulos.

Dessa forma, o desvio padrão da medida de uma grandeza física é dado

por: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$. Note que ao calcular o desvio-padrão de uma grande-

za física o resultado estará na mesma unidade de medida dessa grandeza e que se pode descrevê-la em relação à média e ao desvio-padrão, na forma: $x = \bar{x} \pm \sigma$.

Agora, veja na tabela 1.4 um exemplo de como se calcula o desvio padrão dos casos de dengue observados na cidade de Fortaleza para os anos de 2006 e 2007 usando uma planilha eletrônica.

Tabela 1.4

Número de casos mensais confirmados de dengue nos anos de 2006 e 2007 em Fortaleza e seus respectivos desvios em relação à média anual e desvio padrão						
Meses	Número de casos		Desvios absolutos		Desvios ao quadrado	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007
Jan	820	743	-1.311	-1.343	1.718.066	1.802.306
Fev	874	1.217	-1.257	-869	1.579.421	754.292
Mar	1.511	2.227	-620	142	384.090	20.022
Abr	2.298	4.013	167	1.928	27.973	3.715.256
Mai	5.242	4.811	3.111	2.726	9.679.877	7.428.350
Jun	5.477	4.249	3.346	2.164	11.197.389	4.680.732
Jul	4.276	2.765	2.145	680	4.602.098	461.720
Ago	2.458	1.715	327	-371	107.093	137.270
Set	972	1.003	-1.159	-1.083	1.342.702	1.171.806
Out	642	916	-1.489	-1.170	2.216.377	1.367.730
Nov	768	757	-1.363	-1.329	1.857.088	1.764.912
Dez	231	610	-1.900	-1.476	3.609.050	2.177.100
Desvio padrão					1.866	1.522

Em relação aos exemplos estudados note que quando se realizaram os cálculos das médias, desvios em relação à média e desvio padrão, nos resultados apareceram sempre casas decimais. No entanto, o importante para quem vai analisar os casos de dengue são os números inteiros, daí, os resultados terem sido aproximados para um inteiro.

No caso dos resultados obtidos em alguns experimentos físicos tem-se a necessidade da representação das grandezas físicas através de números com casas decimais, ou seja, com algarismos significativos que vão reduzir a incerteza experimental e mostrar qualidade da precisão dos resultados.

Faça você mesmo! Pesquise em livros e/ou internet e faça um texto sobre precisão e algarismos significativos das grandezas físicas.

3. Estudo sobre as leis de Newton do movimento

Na Mecânica Clássica há particular interesse no estudo do movimento e da energia envolvida nos fenômenos físicos. Assim, para a descrição, de sistemas biológicos à luz da Física e para o entendimento dos fenômenos físicos relacionados a esses, além da introdução sobre as grandezas físicas, apresenta acima, incluindo as ferramentas matemáticas, serão enfatizados conceitos de força, de massa inercial, energia, conservação de energia entre outros.

3.1. Conceitos de força e massa inercial: aspectos históricos pré e pós Newton

Do ponto de vista histórico, a formalização do conceito de força nos remete ao antigo universo grego. Nessa época, essa formalização teve grande contribuição de Aristóteles, filósofo grego que viveu no século IV a. C. De acordo com sua descrição, o universo era organizado em esferas, todas concêntricas, sendo a Terra uma esfera imóvel e situada no centro. Para os corpos situados acima da esfera da Lua, ou seja, os planetas visíveis à época, somente o movimento circular ininterrupto era possível. Já para os corpos terrestres, situados abaixo da esfera lunar, espontaneamente era possível um único movimento: o retilíneo.

Os movimentos desses corpos eram determinados pelas suas naturezas específicas, que tinham relação com suas composições. Essas composições eram definidas em termos de quatro elementos constituintes - terra, água, ar e fogo - e cada um deles se movimentava de modo a procurar seu lugar natural no universo. Assim, corpos feitos de terra caem para a Terra, chuva cai do céu e se desloca pelos caminhos hidrográficos até desembocar no mar, seu lugar natural.

Em termos mecânicos, a proposição fundamental a respeito do movimento era *força = resistência × velocidade*. Assim, um corpo que deixasse de experimentar força teria sua velocidade anulada, como o senso comum deixa transparecer, e um corpo é movido sempre pela ação de uma força.

Note que essa forma de descrever o movimento não contempla o conceito atual de meio dissipativo. Veja a diferença entre essa e a abordagem atualmente aceita. O ar, onde os objetos do nosso dia a dia estão mergulhados, dissipa, ou seja, retira energia de movimento dos objetos que se deslocam. Não havendo força atuando no objeto para transferir-lhe energia, o movimento cessa.

Um dos críticos de Aristóteles, Hiparco acreditava que um corpo lançado, por exemplo, absorveria a força no início do lançamento e a consumiria à medida que o corpo se move no meio resistente ao movimento. Essa seria uma força impressa ou ímpeto interno, um conceito que foi retomado no sexto

século d. C. por Philoponus, e no século XIV, por Buridan. Este último desenvolveu e popularizou a teoria do ímpeto. Sobre o ímpeto, Buridan afirmava que:

- Tinha caráter eterno e só podia ser dissipado por influências externas (gravidade, resistência do meio, etc.).
- Era proporcional à quantidade de matéria e à velocidade do corpo. Um misto entre o que a mecânica de Newton chama de força e o que chama de quantidade de movimento ou momento linear. Note também que já é presente a idéia de quantidade de matéria.

Note que, pela primeira propriedade, não havendo resistência o corpo se moveria indefinidamente. Essa teoria pavimentou o caminho para a dinâmica de Galileu e para o famoso princípio da inércia de Isaac Newton. Fazendo uso de uma série de experimentos, entre os quais, experimentos envolvendo planos inclinados, Galileu descreve a queda dos corpos como tendo velocidades proporcionais ao tempo de queda e espaços percorridos proporcionais ao quadrado do tempo.

Em um manuscrito, o *De Gravitatione*, produzido 15 anos antes dos *Principia*, Newton faz considerações novas e essenciais. Para ele, a matéria é dotada de uma força interna ou inata (*vis insita*) que resiste à alteração do estado de movimento sendo que esta alteração de estado somente se dá pela ação de uma força externa (*vis impressa*).

Em seu livro I dos *Principia*, a grandeza massa é definida e relacionada ao conceito inércia de um corpo. Essa relação estabelece que a massa de um corpo é uma medida da sua inércia, ou, *vis inertiae*. Nesse livro Newton comenta sobre a *vis insita*:

Essa força é sempre proporcional ao corpo ao qual ele pertence, e em nada difere da inatividade da massa, a não ser pela nossa maneira de concebê-la. (...) um corpo não tem seu estado de repouso ou movimento facilmente alterado. Sob esse ponto de vista, essa *vis insita* (inata) pode ser chamada, mais significativamente, de inércia (*vis inertiae*) ou força de inatividade.

Após suas *Definitiones*, Newton estabelece os seus famosos três axiomas ou leis para o movimento dos corpos. Na segunda lei, o termo que mede a proporcionalidade entre a força aplicada e a alteração de seu estado de movimento (aceleração) é chamado de massa inercial. Esses conceitos serão discutidos a seguir.

3.2. Aplicações da primeira lei de Newton – a lei da inércia

A primeira lei de Newton diz que todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja

forçado a mudar esse estado pela ação de forças aplicadas a ele. Analisemos essa lei em situações de interesse da Biologia.

Para um animal em movimento fazer uma curva rápida, primeiro deve haver uma mudança na direção de seu centro de massa e o giro de seu corpo em torno do centro de massa. A habilidade de indivíduos realizarem essas duas tarefas rapidamente tem impacto direto, por exemplo, na relação de competição presa/predador. Um dos aspectos mais determinantes para essa habilidade diz respeito à inércia do animal. Animais com maiores massas têm potencialmente maior dificuldade de manobras bruscas que animais com menor massa.

Entender como sementes são dispersas pela ação do vento, em particular a longas distâncias, é importante no gerenciamento de populações e comunidades, especialmente em cenários de mudanças climáticas como o que vivemos em nossos dias.

Estudos utilizando técnicas avançadas de Ciências Atmosféricas (*Forest Large Eddy Simulation – RAFLES baseado no Regional Atmospheric Modelling System – RAMS*) são utilizados para melhor compreender os aspectos físicos associados a esse transporte de material biológico. Note que esses estudos possibilitam também a previsão de potenciais impactos ecológicos advindos de mudanças climáticas. Nesses estudos verifica-se que sementes em que a inércia pouco contribui (sementes com pouca massa) têm distância média de dispersão em torno de 15% maior que sementes com grande massa e maior inércia.

Faça você mesmo! Pesquise em livros e/ou internet e elabore um texto, baseado na primeira lei de Newton do movimento, a lei da inércia, para responder as seguintes perguntas: Por que, quando se está em pé e solto dentro de um ônibus e o mesmo é acelerado tem-se a tendência de ir para trás e quando o mesmo freia tem-se a tendência de ir para frente?

3.3 Aplicações da segunda lei de Newton – dinâmica

A segunda lei de Newton afirma que a força é proporcional à aceleração do corpo, sendo que a constante de proporcionalidade é a massa do corpo. Em linguagem matemática tem-se que,

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a},$$

onde $\vec{F}$ é a força total atuando no corpo, m é a massa e $\vec{a}$ representa a aceleração do corpo, que é uma medida da variação da velocidade. No Sistema Internacional de Unidades a massa é medida em quilograma (kg), a aceleração em metros por segundo ao quadrado (m/s^2) e a força em Newton (N).

Por essa equação pode-se facilmente ver que, para uma dada massa, quanto maior a aceleração apresentada pelo corpo maior a força aplicada causadora dessa variação na velocidade. Por outro lado, para imprimir ao corpo uma dada aceleração, maior será a força se maior for sua massa.

Note a estreita relação entre a segunda lei e a primeira. Também é fácil perceber que, se a força total atuando no corpo for nula, o lado direito da igualdade é zero, ou seja, a aceleração também deve ser nula. Como aceleração mede a variação na velocidade, esta variação ser nula significa que a velocidade não varia, é constante. Novamente temos forte semelhança com o enunciado da lei da inércia.

O mecanismo de locomoção celular que orienta os corpos em movimento em direção ao gradiente de uma dada substância química é outro exemplo. A descrição mecânica do movimento de migração de células em meio aquoso é feita a partir da aplicação da segunda lei de Newton a esses corpos.

Para que chegue a aplicações sofisticadas da segunda lei de Newton é necessário que se compreenda bem seus fundamentos e se desenvolvam habilidades na resolução de problemas mais simplificados. Para isso, mostra-se uma análise detalhada do problema da dispersão de sementes pela ação do vento. Nessa discussão faz-se um estudo de uma versão extremamente simplificada do fenômeno.

Inicialmente supõe-se que o vento imprima uma velocidade inicial à semente na direção horizontal. Atenção especial deve ser dada à direção dessa velocidade inicial. Supõe-se também que os efeitos da resistência do ar não são grandes o suficiente para serem levados em consideração. Isso permite utilizar a aproximação de que a semente sofre unicamente a ação da força peso, direcionada verticalmente para baixo.

Para melhor entendermos o papel da velocidade do vento na determinação da distância que a semente viaja, vamos supor árvores de duas alturas distintas, h e H . Nessas circunstâncias, uma representação do problema é apresentada na figura 1.7.

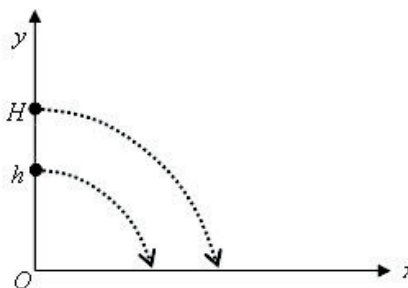


Figura 1.7 - Duas árvores da mesma espécie e de alturas diferentes, com detalhe da trajetória das sementes (lado direito) e diagrama esquemático da situação proposta (lado esquerdo)

De acordo com a figura 1.7, deve-se utilizar para localizar o corpo em queda um sistema de referência composto pelos eixos x e y , de modo que a posição do corpo em um dado instante é representada simplesmente pela posição de um ponto de coordenadas (x, y) .

Note que na construção do diagrama esquemático representam-se apenas os elementos do problema que realmente importam para sua descrição do ponto de vista do movimento das sementes: foram omitidos nessa representação elementos como caule e folhagem da árvore; o solo (água) passou a ser representado apenas por um nível de altura, medido com o auxílio do eixo y ; foram desprezadas as medidas das sementes, como seu volume ou área, tratando-as apenas como pontos materiais.

A figura 1.8 detalha as condições em que a semente se encontra no instante em que se inicia a queda, focando não mais em aspectos de localização, mas sim na representação da(s) força(s) que atua(m) na semente e na velocidade inicial.

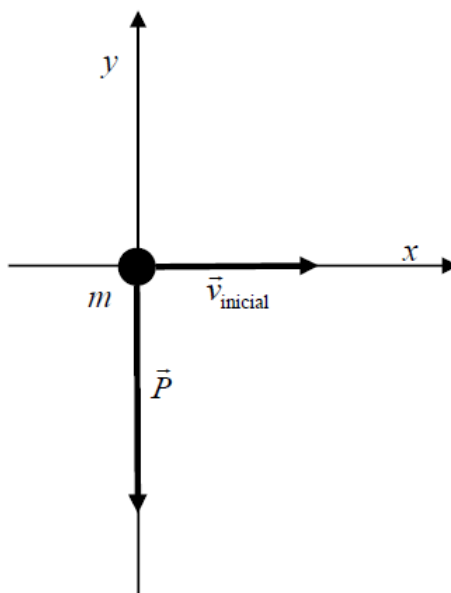


Figura 1.8 - Diagrama de forças em uma semente e o sistema de referência adotado para descrever os vetores força peso e velocidade.

Note que ambas as grandezas - força peso e velocidade inicial - são vetores e têm em suas representações geométricas as propriedades direção e sentido explicitadas na figura. É bom lembrar que, sendo a força peso uma grandeza de natureza diferente da velocidade, não faz sentido comparar os tamanhos dos segmentos de reta que representam esses dois vetores.

A aplicação da segunda lei exige que se conheça a força atuante na semente. Como será visto posteriormente, essa força tem módulo dado por: $P = m \cdot g$, onde g é o módulo da aceleração da gravidade, aproximadamente 10 m/s^2 .

Adotando-se o sistema de referência descrito na figura 1.8, a força peso na semente é dada por

$$\vec{P} = -m \cdot g \cdot \hat{j}$$

Substituindo na segunda lei ($\vec{F} = m \cdot \vec{a}$) o valor da força dado na igualdade acima, tem-se que,

$$\begin{aligned}\vec{P} &= m \cdot \vec{a} \\ -m \cdot g \cdot \hat{j} &= m \cdot \vec{a}\end{aligned}$$

Da última igualdade pode-se ver que $\vec{a} = -g \cdot \hat{j}$.

Com o uso das equações da cinemática e tendo calculado a aceleração, pode-se facilmente encontrar o vetor posição e o vetor velocidade da semente para qualquer instante de tempo t após o início da queda. As equações que relacionam essas quantidades com a aceleração e o tempo são dadas a seguir.

O vetor velocidade é dado por

$$\underbrace{\vec{v}}_{v_x \cdot \hat{i} + v_y \cdot \hat{j}} = \underbrace{\vec{v}_{\text{inicial}}}_{v_{\text{inicial } x} \cdot \hat{i} + v_{\text{inicial } y} \cdot \hat{j}} + \underbrace{\vec{a}}_{(-g \cdot \hat{j})} \cdot t$$

Agrupando os termos da equação acima nas direções dos vetores unitários $\hat{i}$ e $\hat{j}$, chegamos às equações para as componentes x e y do vetor velocidade:

$$\left. \begin{aligned}v_x &= v_{\text{inicial } x} \\ v_y &= v_{\text{inicial } y} - g \cdot t\end{aligned} \right\}$$

De forma semelhante, o vetor posição é dado por

$$\underbrace{\vec{r}}_{x \cdot \hat{i} + y \cdot \hat{j}} = \underbrace{\vec{r}_{\text{inicial}}}_{x_{\text{inicial}} \cdot \hat{i} + y_{\text{inicial}} \cdot \hat{j}} + \underbrace{\vec{v}_{\text{inicial}}}_{v_{\text{inicial } x} \cdot \hat{i} + v_{\text{inicial } y} \cdot \hat{j}} \cdot t + \frac{1}{2} \underbrace{\vec{a}}_{(-g \cdot \hat{j})} \cdot t^2$$

Após agrupar os termos de modo semelhante ao que foi feito com o vetor velocidade, chegamos às equações para as coordenadas x e y , que são as componentes do vetor posição:

$$\left. \begin{aligned}x &= x_{\text{inicial}} + v_{\text{inicial } x} \cdot t \\ y &= y_{\text{inicial}} + v_{\text{inicial } y} \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2\end{aligned} \right\}$$

Veja pelas equações que ao simplificarmos o problema desprezando a resistência do ar, a massa m não aparece. Assim, o efeito da inércia das sementes não contribui para o movimento, diferentemente do que foi comentado ao se falar dos estudos relacionados à dispersão pelo vento. Dessa forma, pode-se agora, determinar o tempo de queda e o alcance máximo das sementes através das coordenadas x e y obtidas com a resolução desse conjunto de equações.

Faça você mesmo! No litoral cearense, particularmente na região de Acaraú, o vento no período de janeiro pode chegar a rajadas de $10,0 \frac{m}{s}$. Assim, no exemplo da figura 1.8, considere $h = 5,0$ metros e $H = 8,0$ metros encontre o tempo de queda das sementes e o alcance máximo em que elas podem cair, para os dois casos. Compare-os.

3.4. Aplicações da terceira lei de Newton – ação e reação

A terceira lei de Newton pode ser enunciada da seguinte forma: havendo dois corpos interagindo, de modo que um faça força no outro, para toda força aplicada a um deles surge outra força de mesma intensidade, mesmo sentido e direção oposta, mas aplicada no outro corpo.

A aplicação dessa lei a sistemas biológicos, quando se objetiva uma descrição mecânica, é muito vasta. Para exemplificar, cita-se o problema da migração de células. O movimento individual ou coletivo de células é um componente importante em muitos processos biológicos, dentre os quais se pode mencionar: morfogênese e o desenvolvimento embrionário; respostas imunológicas; cicatrização; angiogênese, e metástase em câncer.

Nesses processos as células individualmente detectam sinais químicos e mecânicos presentes no meio extracelular e alteram seus padrões de movimento em resposta a esses sinais. No sistema imunológico, por exemplo, os leucócitos se locomovem individualmente pelo meio extracelular, enquanto que no desenvolvimento embrionário de vertebrados a reorganização de tecidos ocorre com o movimento coletivo de células, com interação mecânica forte entre elas. É importante lembrar que essas interações mecânicas têm ação direta da rede de filamentos de actina e miosina.

Examinando o movimento de leucócitos de um ponto de vista bem simplificado, pode-se imediatamente aplicar a terceira lei de Newton: a célula aplica uma força no meio extracelular (ação) e o meio aplica uma força de reação de mesma intensidade, mesma direção e sentido contrário no leucócito, fazendo com que se desloque. No caso de movimentos coletivos ou teciduais,

as células fazem forças umas nas outras, e nessa interação há o aparecimento desses pares ação-reação, sempre uma força atuando em cada célula.

Para migrar, uma célula promove a adesão de parte de sua superfície ao meio extracelular, e posteriormente aplica nesse meio as forças geradas pelo seu citoesqueleto. Além dessas forças, há também atuando na célula uma força de resistência ao movimento devida ao atrito entre membrana celular e o meio externo. Essa força é sempre com sentido contrário ao do movimento migratório. Uma representação bastante simplificada dessas forças atuando na célula e no meio extracelular pode ser vista na figura 1.9.

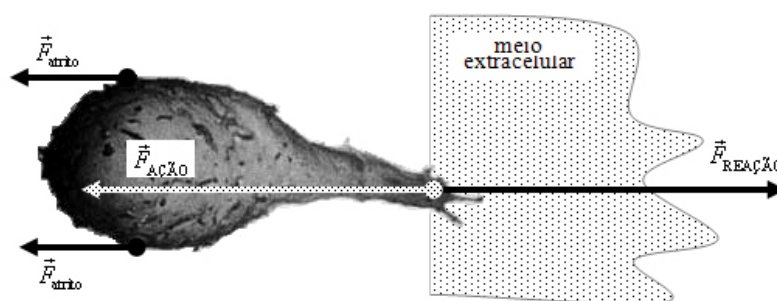


Figura 1.9 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de um leucócito em movimento de diapedese, com detalhe de um pseudópodo. À direita o diagrama esquemático do que seria o meio extracelular aderido à célula. Imagem adaptada de www.fo.usp.br/lido/patoartegeral/images/exs4A.jpg

Faça você mesmo! Monte um experimento com um balão de aniversário, barbante, canudo e fita adesiva. Entre duas cadeiras, separadas de pelo menos 1,5 metros, estique o barbante, com um pedaço do canudo dentro e, depois fixe o balão com fita adesiva. Encha o balão de ar e depois o solte. Faça um relatório explicando através das três leis de Newton do movimento o resultado de seu experimento.

3.5. Peso, massa e o campo gravitacional

Usou-se nos exemplos uma grandeza física chamada de aceleração gravitacional ligada ao conceito de campo e, consequente de força gravitacional. Veja que é um pouco difícil aceitar o conceito de uma força que um corpo pode exercer sobre outro corpo sem ter contato entre eles, no caso do exemplo a Terra que exerce sobre a semente.

Uma explicação simplória, porém, eficiente, para esse fenômeno físico, é considerar que a interação gravitacional se dá através de um campo gravitacional gerado por um corpo (chamado de massa fonte) em todo o espaço

em seu redor. Daí, quando um segundo corpo (massa teste) é colocado na presença desse campo gravitacional fica sob a ação de uma força ligada a esse campo, a força gravitacional.

Dessa forma, a força gravitacional exercida sobre uma massa teste depende da própria massa teste. Assim, $\vec{F}_g = m\vec{g}$, mostrando que se $\vec{g}$ é conhecido em algum ponto do espaço, como é o caso do exemplo da figura 8, a partícula (semente) fica sob a ação de uma força gravitacional $\vec{F}_g$, que é direcionada para o centro da Terra. Esse modelo também será usado nos próximos estudos, como por exemplo, nos estudos com força e campo elétrico.

4. Conservação de energia: as definições de energia e trabalho

A energia está presente no universo de várias formas, podendo-se mesmo afirmar que em todo processo físico no universo se tem a presença de pelo menos uma forma de energia, seja ela, energia mecânica, térmica, química, elétrica, entre outras.

Dessa forma, o conhecimento do conceito de físico de energia juntamente com o de conservação de energia e de eficiência da conversão de energia é extremamente importante para a compreensão dos fenômenos físicos que ocorrem nas transformações de energia na biosfera, na respiração, na fotossíntese e no corpo humano.

A definição do princípio da conservação de energia mostra que é possível a transformação de uma forma de energia em outra, ou seja, sempre que ocorrer a diminuição de uma quantidade de uma determinada forma de energia, haverá aumento de mesma quantidade de energia em outra forma, de modo que a energia total do sistema, que pode ser o universo, se mantém constante.

Alguns exemplos clássicos de transformação e conservação de energia encontrados no cotidiano são: a transformação de energia cinética do vento em energia elétrica, chamado de energia eólica; a transformação da energia potencial armazenado na água em energia elétrica, processo que ocorre numa usina hidroelétrica através da queda d'água; a transformação de energia química em energia elétrica, processo que ocorre nas diversas baterias de uso doméstico e industrial; a transformação de energia retirada dos alimentos em energia mecânica, processo que ocorre nos seres humanos através da ingestão de alimentos que fornecem energia para a realização das tarefas diárias.

Note que o conceito de energia além de ser muito importante é abstrato. Assim, uma maneira de se definir a energia em um determinado processo físico é através da sua capacidade de realizar trabalho. O conceito

físico de trabalho envolve a relação entre uma força exercida enquanto um ponto material se move a uma determinada distância. Por exemplo, na limpeza semanal de uma casa empurra-se móveis, como sofá e cama. Quando esses móveis são deslocados, realizou-se trabalho sobre os mesmos, ou seja, transferiu-se energia cinética para esses móveis enquanto eles eram deslocados.

Outra forma de exemplificar a realização de trabalho, agora envolvendo uma forma de energia chamada de energia potencial, é quando uma pessoa levanta uma caixa, ou um objeto qualquer que contenha massa, cujo esquema está mostrado na figura 1.10.

Durante o deslocamento de levantamento da caixa, indicado pela letra (A) na figura 1.10, a pessoa realiza a força $\vec{F}$, considere-se que esta força é constante e para cima, na mesma direção do deslocamento da caixa, e assim realiza trabalho sobre a caixa, e essa adquire energia potencial.

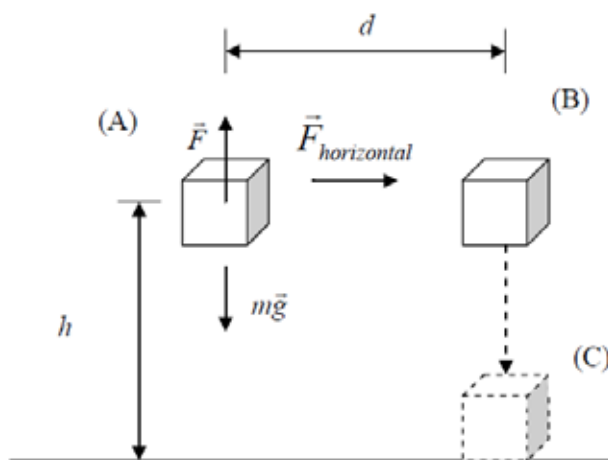


Figura 1.10 – Representação esquemática do modelo descrito no exemplo de uma caixa levantada por uma pessoa (A) após o deslocamento (B) e quando é solta em queda livre (C).

Agora, se essa pessoa passa a andar com a caixa nos braços, ou seja, se deslocar com a caixa parada a um determinado nível de altura, situação representada entre (A) e (B) no esquema da figura 1.10, o trabalho que ela faz sobre a caixa é nulo, pois a força vertical ($\vec{F}$) que ela faz para segurar a caixa é perpendicular ao movimento horizontal, representado por $\vec{F}_{horizontal}$ na figura 1.10.

Note que nesse exemplo quando a caixa está no chão, em repouso, sua quantidade de energia potencial é nula, pois está na superfície de referência, a superfície terrestre, e sua quantidade de energia cinética também é nula, pois a mesma está em repouso. Quando a caixa começa a subir, se inicia o movi-

mento e a variação de altura em relação ao solo, adquirindo energia cinética e energia potencial, respectivamente.

Atente para o fato de que ao se aproximar da altura da cintura da pessoa, representada por h na figura 1.10, a caixa vai parando, ou seja, vai perdendo energia cinética, no entanto, sua altura está aumentando, de zero até h , ou seja, está ganhando energia potencial. Assim, segundo o princípio da conservação da energia, que diz que a energia desse sistema deve permanecer constante, tem-se uma transformação de energia cinética em energia potencial.

Caso a pessoa largue a caixa em queda livre, mostrado em (C) na figura 1.10, na descida observa-se o mesmo processo físico de transformação e conservação de energia, ou seja, a medida em que a caixa desce, começa a perder energia potencial e a ganhar energia cinética, até chegar ao chão, onde toda essa energia será dissipada, principalmente na forma de energia sonora.

Note que a grandeza física chamada de trabalho é uma grandeza escalar, pois não depende de direção e sentido, expressa em unidades de energia, Joules (J), no entanto, sua forma matemática baseia-se na propriedade do produto escalar entre dois vetores, o vetor força é o vetor deslocamento ($W = \vec{F} \cdot \vec{d} = Fd \cos \theta$). Por isso que só existe trabalho realizado pela força que está na direção do movimento (deslocamento).

Assim, na descida da caixa, mostrado na figura 1.10 (C), a força do campo gravitacional ou força gravitacional ($\vec{F}_g = m\vec{g}$) realiza trabalho sobre a caixa, que é dados por $W_{F_g} = mgh$, já que a força ($\vec{F}_g$) é o deslocamento (h) estão na mesma direção.

Faça você mesmo! Faça uma pesquisa (livros e internet) e elabore um texto sobre o Teorema do Trabalho e da Energia Cinética e, com isso explique ca quanto é o trabalho resultante feito por todas as forças sobre a caixa do esquema mostrado na figura 1.10.

Física do dia a dia: fluxo de energia na biosfera

Uma teia alimentar é composta de produtores, consumidores e decompositores. Os produtores geralmente usam a luz solar, energia radiante do Sol ou radiação solar, como fonte de energia para a realização de fotossíntese e, assim, produzem alimentos para os consumidores. Nessa tarefa, esses organismos usam a energia para realizar trabalho biológico. Esse trabalho é realizado principalmente através da contração celular, no transporte de nutrientes e de sais minerais.

É importante ressaltar que durante a realização de trabalho biológico, assim como na realização de trabalho mecânico, mostrada no exemplo da figura 1.10 e, apesar do enunciado da lei de conservação de energia indicar que a energia do sistema é constante, a transferência de energia ou a conversão de energia de uma forma em outra, não é totalmente eficiente, ocorrendo dissipação de energia, que nesse caso é em forma de calor e para o meio externo, a atmosfera terrestre, como mostrado na figura 1.11.

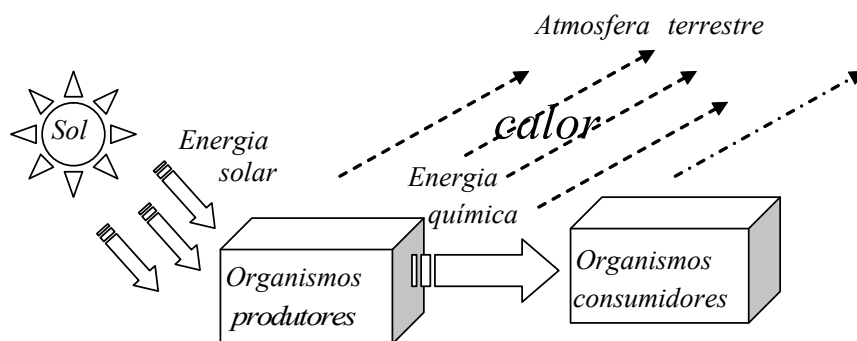


Figura 1.11 – Esquema simplificado do fluxo de energia na biosfera. Adaptado de Okuno et al. (1982).

Síntese do Capítulo



Esse capítulo apresenta uma discussão dos aspectos históricos e da teoria física da mecânica clássica, com objetivos de levar o aluno ao entendimento dos processos físicos que ocorrem nos sistemas biológicos.

Nesse contexto, a unidade inicia apresentando o Sistema Internacional de Medidas (SI), seus padrões, suas unidades fundamentais e dimensões, inclusive com análise dimensional das grandezas físicas. Traz também a diferenciação entre grandeza física escalar e vetorial, com uma breve introdução à álgebra vetorial e à estatística, com apresentação de medidas de valor central (média) e medidas de dispersão (desvio médio, desvio padrão), além de uma discussão sobre algarismos significativos.

Em relação aos conceitos físicos encontrados na mecânica clássica, a unidade apresenta os conceitos de massa inercial, de ponto material e de sistemas de referência. Apresenta ainda, as leis de Newton do movimento e aplicações dessas em modelos simplificados de sistemas biológicos, como na dispersão de sementes e no movimento de células.

Na parte relativa aos conceitos de energia e trabalho, a unidade além de apresentar uma breve introdução sobre as formas de energia, apresenta os conceitos de energia cinética e potencial, fazendo uma discussão sobre a conservação e transformação de energia, no caso de um indivíduo que levanta uma caixa até a altura de sua cintura e depois caminha com a mesma. Por fim, mostra-se na unidade a relação da lei de conservação de energia com o fluxo de energia na biosfera.

Atividades de avaliação



1. Suponha que se deseja mudar o padrão de medida de tempo no Sistema Internacional de Medidas (SI). Quais fenômenos naturais você indicaria para a substituição desse padrão?
2. Por que se têm a necessidade de se ter dois padrões de massa?
3. Meça sua altura e mostre o valor nos diversos sistemas de medidas, explicitando os fatores de conversão usados.
4. Mostre através de análise dimensional que a equação da cinemática unidimensional $x = x_{inicial} + v_{inicial} \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$ está correta.
5. Na ausência de uma força é possível haver movimento? Explique usando um dos conceitos das três leis de Newton do movimento.
6. Considere um ponto material, representando uma massa de ar, próximo ao litoral, que está sob a ação da força do gradiente de pressão atmosférica orientada na direção do leste. Essa massa de ar vai se mover nessa direção? Use a segunda lei de Newton do movimento para explicar sua resposta.
7. Cite exemplos nos quais uma força que é exercida sobre um corpo realiza trabalho sobre o mesmo e exemplos em que esta não realiza trabalho sobre o mesmo.
8. A energia cinética e a energia potencial podem ser negativas? Por quê?
9. Um projétil é atirado de um revólver ao mesmo tempo em que outro, com o dobro de sua massa, é atirado de uma espingarda, ambos com mesma velocidade. Explique qual deles terá maior energia cinética, calcule a razão das energias cinética das duas balas e compare-as.
10. Explique, usando o conceito da lei da conservação de energia, porque num sistema biológico toda a energia solar absorvida não é totalmente transformada em energia produtiva (energia química).
11. Um peregrino percorre no primeiro dia a distância de 30 Km, fazendo um ângulo de 30° com seu ponto referencial de partida e alcança o acampa-

mento de descanso. No segundo dia, ele percorre mais 36 Km, na direção norte em relação ao acampamento. Faça um desenho representando os vetores deslocamento do andarilho no primeiro e segundo dia. Determine o módulo das componentes, nas direções x e y, dos vetores deslocamento para esses dias e do vetor deslocamento total. Em seguida, determine o módulo e a direção do vetor deslocamento total do peregrino.

12. A tabela mostrada a seguir apresenta dados de velocidade média do vento em superfície para o mês de janeiro, no período de 1991 a 2000, observados e obtidos através de simulações numéricas com o modelo regional RSM e global ECHAM, para a cidade de Acaraú. Esses são resultados dos estudos desenvolvidos no Laboratório de Pesquisas Avançadas em Energia Eólica (EOLUS) da Universidade Estadual do Ceará (UECE). Calcule a média e desvio padrão para cada conjunto de dados e depois compare os resultados obtidos.

Tabela com os dados de velocidade média do vento, em $\frac{m}{s}$, para o mês de janeiro, no período entre 1991 e 2000, para a cidade de Acaraú.

Velocidade média (m/s)			
Ano	Observada	RSM	ECHAM
1991	3,75	5,08	6,01
1992	4,52	5,26	6,79
1993	4,91	5,45	6,80
1994	3,13	4,63	4,92
1995	4,14	5,34	6,53
1996	3,83	5,10	7,12
1997	4,50	4,93	6,69
1998	3,76	5,18	6,62
1999	4,37	4,93	6,87
2000	4,14	4,99	6,47

13. Considere um rapaz realizando uma corrida numa pista plana e esboce um diagrama de forças para mostrar as forças que estão atuando sobre ele (considere o corredor como um ponto material).
14. Usando a expressão matemática da segunda lei de Newton ($\vec{F} = m \cdot \vec{a}$), faça uma análise dimensional e mostre a que a dimensão da massa é M.
15. Considere que quando você vai ao supermercado, em média, empurra o carrinho com uma força de 40 N, que faz um ângulo de 20° abaixo do horizonte, dessa forma, calcule o trabalho que você realiza quando percorre um corredor de compras que tem aproximadamente 30 metros.

16. Elabore um texto, com suas palavras, para explicar o conceito físico de energia. Cite exemplos em que um corpo possui energia cinética e/ou energia potencial e analise, através da lei de conservação de energia, as devidas transformações de energia que possam ocorrer nesses exemplos.

Referências



HENEINE, I. F. **Biofísica básica**. São Paulo: Atheneu, 1999.

OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: HARBRA, 1982.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física 1**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. **Princípios de física**. André Koch Torres Assis. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. v.1

TREFIL, J.; HAZEN, R. M. **Física viva**. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v.1

Capítulo

2

Noções de Termodinâmica e Fluidos

Objetivos

- Introduzir os conceitos da termologia: temperatura, equilíbrio térmico, calor e os processos físicos de transferência de energia (condução, convecção e radiação).
- Apresentar aplicações das leis da termodinâmica e noções de estática e dinâmica de fluidos, por meio dos princípios de Pascal, de Arquimedes e de Bernoulli.
- Mostrar a existência de relações entre os conceitos físicos e o funcionamento do corpo humano, através de exemplos qualitativos.

1. Introdução

Nesse capítulo serão abordados conceitos físicos aplicados da termologia, na Termodinâmica e na Mecânica de Fluidos, procurando mostrar a relação desses conceitos com os sistemas biológicos, particularmente, o funcionamento do corpo humano.

O conceito físico de temperatura apresentado está relacionado com o conceito físico de equilíbrio térmico e o fenômeno físico de dilatação térmica. Nesse contexto é apresentada a construção e o funcionamento dos termômetros, as escalas termométricas, bem como o funcionamento do corpo humano como sensor de temperatura.

A natureza do calor é explorada juntamente com os conceitos físicos de trabalho, visto no Capítulo 1, através da relação do equivalente mecânico do calor e da energia interna de um sistema. Dessa forma, apresentam-se aplicações da primeira lei da termodinâmica, mostrando sua relação com a perda de calorias através da realização de exercícios físicos, ou seja, através da realização de trabalho mecânico.

Os processos físicos de transferência de calor - condução, convecção e radiação - juntamente com o conceito físico de condutividade térmica, são apresentados e usados para explicar o saldo de energia, proveniente do Sol e disponível na superfície terrestre, através do balanço de energia na superfície, bem como para o entendimento da distribuição da energia, produzida no organismo humano.

O conceito de entropia é apresentado com o auxílio da segunda lei da termodinâmica visando introduzir o leitor ao entendimento de processos irreversíveis e reversíveis.

Por fim, se aplicam os conceitos físicos encontrados na Mecânica de Fluidos, ou seja, conceitos de estática e na dinâmica de fluidos. Os conceitos de pressão, densidade, viscosidade e força de empuxo, juntamente os princípios de Pascal, de Arquimedes e de Bernoulli, procurando encontrar relações matemáticas, como a equação de continuidade para fluidos e a equação de Bernoulli visando auxiliar o leitor no entendimento, qualitativo e quantitativo, dos processos físicos existentes numa doação de sangue, num mergulho numa piscina e no deslocamento até uma região serrana.

2. Temperatura e Calor

2.1. Temperatura e equilíbrio térmico

A grandeza física temperatura, que muitas vezes é associada de forma errada com o grau de calor, é umas das mais familiares entre nós. No cotidiano é comum se ter notícias de medição de temperatura do ar, nos dias quentes ou frios, ou a temperatura corporal que pode indicar o estado febril de um indivíduo. Outro exemplo é a preparação dos alimentos, quando ajustamos a temperatura do fogão ou do forno de cozinha para que os mesmos atinjam o ponto de cozimento adequado.

A temperatura é uma grandeza escalar e seu conceito está associado à lei zero da termodinâmica, que estabelece que a temperatura é uma propriedade dos sistemas termodinâmicos em equilíbrio. Além disso, a temperatura de um corpo está diretamente relacionada à agitação dos átomos e moléculas deste, ou seja, diretamente relacionada com a velocidade com que os átomos e moléculas de um corpo estão se movendo.

Para se entender o que significa sistemas termodinâmicos em equilíbrio e consequentemente, o conceito de temperatura, é preciso ter noção do que seja o equilíbrio térmico. O equilíbrio térmico é o estado em que dois corpos em contato térmico deixam de trocar energia, e assim, estão na mesma temperatura.

Na prática, é comum afirmar que o corpo humano, através do tato, é um sensor de temperatura. Porém é importante ter clareza que os sentidos do corpo humano nos dão indicações qualitativas sobre as grandezas físicas e muitas vezes podem nos enganar. Isso não é diferente com a temperatura. Por exemplo, quando são retirados dois recipientes do congelador de uma geladeira, um de alumínio e outro de plástico, tem-se a falsa impressão que o de alumínio está mais frio que o de plástico, apesar deles estarem na mesma temperatura no interior do congelador.

Isso acontece, pelo fato das propriedades do alumínio serem diferentes da do plástico, e assim, tem-se uma transferência de energia, pelo calor, mais rápido entre sua pele e o recipiente de alumínio. Dessa forma, é possível perceber que a pele, através do tato, é sensível a taxa de variação de energia, que por outro lado, está associada a diferença de temperatura dos corpos.

Para isso, veja a figura 2.1 e considere que os dois corpos *a* e *b* não estejam em contato térmico, ou seja, estão isolados um do outro e de suas vizinhanças, por paredes feitas de um material isolante térmico, como o isopor, ditas adiabáticas, que impedem a troca de energia e de matéria entre os corpos.

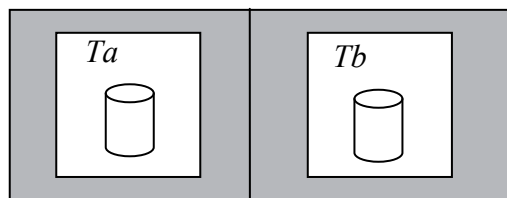


Figura 2.1 – Esquema representativo de um sistema isolado em que os corpos *a* e *b* estão separados por uma parede adiabática, ou seja, estão isolados um do outro e de suas vizinhanças. As siglas *Ta* e *Tb* representam as temperaturas dos dois corpos *a* e *b*, respectivamente.

Assim, na impossibilidade de colocarmos *a* e *b* em contato térmico, para testar se os corpos estão em equilíbrio térmico, pode-se usar um terceiro corpo (*c*) para essa função. Basta colocar *c* em contato com *a* e *b*, separadamente, e assim determinar, através dos equilíbrios entre *a* e *c* e entre *b* e *c*, se *a* e *b* estão em estado de equilíbrio térmico, mesmo sem estarem em contato direto.

Esse terceiro corpo *c* será o termômetro, um dispositivo de medição de temperatura dos corpos. Dessa forma, o termômetro vai entrar em equilíbrio térmico com *a* e medir a temperatura do corpo *a*, depois com *b* e medir a temperatura do corpo *b* e, se as medições de temperaturas são iguais, significa que os corpos estão em equilíbrio térmico. Se as medições são diferentes, eles não estão em estado de equilíbrio térmico.

Agora é possível entender um postulado chamado de lei zero da termodinâmica expresso como: *se os corpos a e b estão em equilíbrio térmico separadamente com outro corpo c, isto significa que a e b estão em equilíbrio térmico entre si.*

2.2. Termômetros e escalas termométricas

Para se entender a ideia da construção dos termômetros é preciso recorrer à definição da lei zero da termodinâmica, mostrada no exemplo da figura 2.1. Ou seja, o terceiro corpo, imaginário, chamado de *c* será o termômetro

ou o dispositivo de medição de temperatura dos outros dois corpos. Dessa forma, através do equilíbrio térmico com os outros dois corpos, separadamente, é possível obter as medições de temperaturas desses.

A fotografia apresentada na figura 2.2 mostra um termômetro comercial, usado para medir a temperatura corporal. Esses também são usados por meteorologistas para medir a temperatura do ar nas estações meteorológicas de superfície.

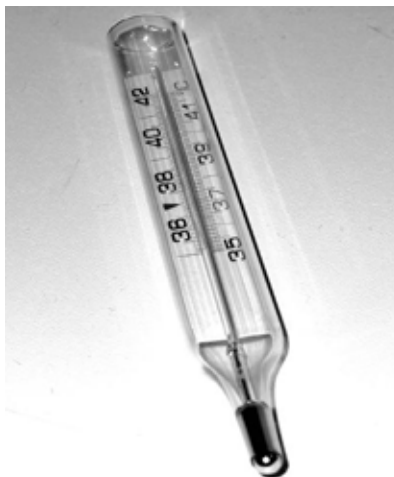


Figura 2.2 – Foto de um termômetro.

Observando a fotografia mostrada na figura 2.2 é possível verificar que um termômetro é composto por um tubo capilar de vidro, com escala graduada gravada e, dentro desse tudo existe um reservatório com um líquido, que geralmente é álcool ou mercúrio. A coluna desse líquido varia quando o mesmo é submetido a variações de temperatura, ou seja, o volume desse fluido muda quando se tem mudança de temperatura.

O termômetro mostrado usa a escala Celsius de temperatura. Nessa escala, o ponto de gelo ou de congelamento da água, na pressão atmosférica, é 0°C (zero grau Celsius) e o ponto de vapor ou ponto de ebulição da água, na pressão atmosférica, é 100°C (cem graus Celsius).

Veja que se definiram dois pontos que representam as extremidades da coluna de fluido nos termômetros que usam essa escala termométrica. Dessa forma, dividindo a distância entre as extremidades da coluna de fluido em 100 (cem) segmentos iguais, cada um desses vai representar uma mudança de temperatura de 1°C (um grau Celsius).

Além da escala Celsius, adotada comercialmente em alguns lugares do mundo, existem outras escalas termométricas. As escalas Kelvin e Fahrenheit são menos usadas comercialmente, no entanto, elas também obedecem aos padrões de calibração através dos pontos de congelamento e ebulição da água.

A escala Kelvin é universalmente adotada pela Física e pelos cientistas, por ser a escala que considera existir um limite de quão baixa pode ser a temperatura de um corpo, chamado de zero absoluto de temperatura. Assim, nas equações fundamentais da Física a temperatura aparece como temperatura absoluta medida na escala Kelvin. A escala Fahrenheit, mais usada comercialmente nos Estados Unidos, define o ponto de congelamento como sendo em 32°F (trinta e dois graus Fahrenheit) e a temperatura de ebulição da água em 212°F (duzentos e doze graus Fahrenheit).

A figura 2.3 mostra um esquema de associação das três escalas termométricas, explicitando os pontos de zero absoluto de temperatura, de temperatura normal do corpo humano e o ponto de ebulição da água.

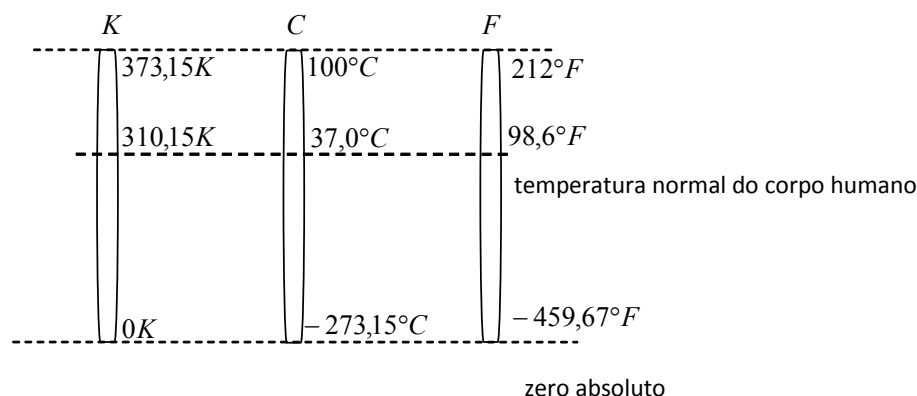


Figura 2.3 – Esquema comparativo das três escalas termométricas (Kelvin, Celsius e Fahrenheit), para os pontos temperatura absoluta, de temperatura normal do corpo humano e de ebulição da água.

Através desse esquema da figura 2.3 é possível estabelecer uma relação matemática para transformação dos valores medidos de temperatura dos corpos para qualquer uma das três escalas vistas anteriormente. Assim, tem-se que:

$$\left. \begin{aligned} T_C &= T - 273,15 \\ T_F &= \frac{9}{5}T_C + 32 \end{aligned} \right\},$$

Onde T_C é a temperatura na escala Celsius, T é a temperatura na escala Kelvin e T_F é a temperatura na escala Fahrenheit.

Faça você mesmo! Em um dia de verão, na cidade de Fortaleza, a temperatura média do ar pode alcançar os $37,5^{\circ}\text{C}$. Obtenha o valor da temperatura nas escalas Kelvin e Fahrenheit.

2.3. Dilatação térmica de sólidos e líquidos

Quando se usa um termômetro para a medição de temperatura dos corpos sólidos ou de fluidos, como é o caso do ar, se observa que, quando há variação na temperatura se tem também, variação da altura da coluna do elemento sensível de medição do termômetro, que, como se viu anteriormente, pode ser álcool ou mercúrio. Em outras palavras, quando se tem aumento da temperatura o volume da substância, elemento sensível do termômetro, aumenta. Daí, se diz que houve uma dilatação térmica. Esse fenômeno é consequência da relação existente entre a temperatura dos corpos e o movimento de seus átomos.

Outro exemplo prático da aplicação desse conceito físico de dilatação térmica pode ser encontrado em pontes de concreto, existentes nas estradas, onde geralmente existem as chamadas juntas de dilatação entre as placas de concreto. Essas juntas têm a função de permitirem variações no comprimento relacionadas a variação de temperatura diárias observadas.

Dessa forma, é correto afirmar que quando um material é aquecido varia suas dimensões e, em relação à variação no comprimento, de qualquer um dos seus lados, esta será proporcional ao comprimento antigo e a diferença de temperatura ao qual o mesmo foi submetido.

Esse fenômeno físico no qual se tem variação nas dimensões do sólido em qualquer uma de suas dimensões é chamado de dilatação linear. Através de sua definição é possível escrever uma equação matemática para quantificação desse fenômeno, assim,

$$\Delta L = \alpha L_i \Delta T,$$

onde ΔL é a variação observada no comprimento do material, α é o coeficiente de dilatação linear, que, por exemplo, para o chumbo α vale $29 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ e ΔT é a variação de temperatura.

Sabendo-se que ΔL pode ser escrito como $L_f - L_i$, ou seja, comprimento final menos o comprimento inicial e ΔT como a temperatura final menos a temperatura inicial ($T_f - T_i$), é possível reescrever a equação apresentada como,

$$L_f - L_i = \alpha L_i (T_f - T_i),$$

onde L_f é o comprimento final e L_i é o comprimento inicial do material, T_f a temperatura final e T_i a temperatura inicial.

Faça você mesmo! Pesquise (livros e internet) e monte uma tabela com os valores médios do coeficiente de dilatação linear e suas respectivas faixas de temperatura para o alumínio, latão, cobre, aço, concreto, madeira, vidro, álcool, gasolina e gelo. Compare-os.

Voltando a equação matemática da dilatação térmica linear, se observa que, conhecendo o comprimento inicial e final de um determinado sólido, em qualquer uma de suas dimensões e a variação de temperatura ao qual o mesmo está submetido, é possível encontrar um coeficiente de dilatação térmica linear para o mesmo, através da relação matemática, extraída da equação anterior. Assim, se tem que,

$$\alpha = \frac{\Delta L/L}{\Delta T},$$

Dessa forma, é correto afirmar que, fisicamente α representa uma fração da variação do comprimento do sólido por grau de variação de temperatura ao qual esse foi submetido.

Faça você mesmo! Mostre, usando análise dimensional que a expressão para a obtenção do coeficiente de dilatação linear (α) está correta.

Agora, voltando ao exemplo prático da ponte de concreto, considerarmos que ela está localizada na BR116, próxima ao município de Limoeiro do Norte, e que em condições de temperatura média anual do ar, que é de 25°C , mede 120,0 metros de comprimento. Num dia de verão, com temperatura média diária de 34°C (com α para o concreto de $12 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$) o comprimento médio dessa ponte nesse dia, será:

$$\left. \begin{aligned} L_f - 120,0m &= \frac{12 \times 10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} \cdot 120,0m \cdot (34^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \\ L_f &= 120,0m + \frac{12 \times 10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} \cdot 120,0m \cdot (34^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \\ L_f &= 120,0m + \left[1 + \frac{12 \times 10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} (34^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \right] \\ L_f &= 120,0m + \left[1 + \frac{12 \times 10^{-6}}{^{\circ}\text{C}} \cdot (9^{\circ}\text{C}) \right] \\ L_f &= 120,0m + (0,000108) \\ L_f &= 120,000108 \cdot \text{metros} \end{aligned} \right\}$$

Para fixar esse conceito de dilatação ou expansão térmica de sólidos se pode fazer analogia com uma ampliação fotográfica. Atente para o fato que, apesar de se tratar, no exemplo anterior, de expansão em apenas uma direção, os sólidos apresentam mesmo percentual de variação do comprimento em todas as suas direções.

Veja na figura 2.4 a representação da dilatação de uma placa de zinco e considere que as dimensões da placa aumentam de comprimento conforme a razão α .

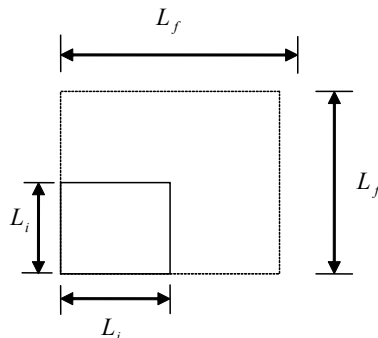


Figura 2.4 – Esquema representativo da dilatação térmica de uma placa de zinco.

Então, tanto a ampliação de área de uma fotografia, quanto à variação fracionária da área de uma placa de zinco, mencionada no exemplo da figura 2.4, por grau de temperatura, pode ser quantificada como:

$$A_f = L_f^2,$$

Como se sabe que $L_f = L_i + \alpha L_i \Delta T$. Então,

$$A_f = (L_i + \alpha L_i \Delta T)^2,$$

Note que a expressão matemática mostrada acima é chamada de quadrado perfeito, definido como sendo o quadrado do primeiro termo, mais duas vezes o primeiro termo vezes o segundo termo, mais o quadrado do segundo termo: $L_i^2 + 2\alpha L_i^2 \Delta T + \alpha^2 L_i^2 (\Delta T)^2$.

A variação da área da placa de zinco é da por,

$$\Delta A = A_f - A_i,$$

onde $A_i = L_i^2$.

Então:

$$\Delta A = L_i^2 (1 + 2\alpha \Delta T + \alpha^2 \Delta T^2) - L_i^2,$$

Lembre-se que α é uma quantidade muito pequena, da ordem de 10^{-3} a 10^{-6} . Daí, quando α é elevado ao quadrado, tem-se valores ainda menores, que mesmo sendo multiplicados pela variação de temperatura ΔT^2 , ainda são bem pequenos. Dessa forma, é possível obter uma aproximação para a expressão matemática mostrada, eliminando-se o termo $\alpha^2 \Delta T^2$ e, assim, chegar a uma expressão matemática simplificada para calcular a variação da área da placa de zinco,

$$\Delta A = 2\alpha A_i \Delta T.$$

Assume-se que $\gamma = 2\alpha$, chamado de coeficiente de dilatação de área ou ainda coeficiente de expansão de área.

Faça você mesmo! Usando um procedimento análogo ao usado para se chegar a variação fracionária de área por grau de variação de temperatura de um sólido, determine uma expressão matemática para a variação fracionária volumétrica ($\Delta V/V$) de um sólido por grau de variação de temperatura e uma expressão matemática para o coeficiente de dilatação volumétrica β .

2.4. O calor, a transferência de energia e a termodinâmica

Nas seções anteriores foram apresentados os conceitos físicos de temperatura e equilíbrio térmico, mostrando que em contato térmico a temperatura dos corpos tende a se igualar, ou seja, entra em equilíbrio térmico.

Na prática, se pode observar que uma xícara de chá quente quando deixada no ambiente tende a se resfriar com o tempo, ou um copo com água gelada, em mesmas condições, tende a esquentar com o tempo. Ou seja, nos dois casos as temperaturas finais, da xícara e do copo, tendem a se igualar a temperatura ambiente, em outras palavras, atinge o estado de equilíbrio térmico com o meio ambiente.

Note que nesses casos, por causa da diferença de temperatura entre os corpos, se tem transferência de uma quantidade de energia cinética das moléculas dos corpos para o ambiente, isso é o que se chama de calor, que é uma grandeza escalar, freqüentemente medido em calorias.

Existe ainda uma relação entre as unidades caloria (cal) e Joule (J), chamada de equivalente mecânico do calor, onde:

$$1\text{cal} \cong 4,186\text{J} ,$$

Uma informação prática e importante é que a caloria usada para mensurar a quantidade de energia contida nos alimentos é igual a quilocaloria, ou seja:

$$1\text{Cal} = 1\text{Kcal} \text{ ou } 1\text{Cal} = 1000\text{cal}$$

Dessa forma, imagine uma pessoa que adota uma dieta de referência de 2000 Calorias por dia e pretende gastar essa energia adquirida com exercícios de musculação numa academia de ginástica levantando pesos de 50 Kg a uma altura média de 1,50 metros. Quantos exercícios e quanto tempo ela deveria ficar se exercitando na academia?

Fazendo as contas, tem-se que,

$$2000\text{Cal} = 2000 \times 1000\text{cal} = 2,0 \times 10^6 \text{cal}.$$

transformando essa energia em trabalho a ser realizado por essa pessoa, através da relação de equivalência mecânica do calor, encontra-se:

$$1\text{cal} = 4,186\text{J}$$

$$W = 2,0 \times 10^6 \text{ cal} \cdot 4,186 \frac{\text{J}}{\text{cal}}$$

$$W = 8,37 \times 10^6 \text{ J}$$

Como se estudou na Unidade 1, o trabalho realizado para levantar objetos é igual a mgh . Onde m é a massa do objeto, g é o módulo da aceleração da gravidade e h é a altura de levantamento do objeto.

Assim, se a pessoa levanta o objeto n vezes, o trabalho resultante será,

$$n \cdot mgh,$$

essa quantidade deve ser igual a quantidade de energia adquirida pela pessoa na dieta. Daí,

$$W = n \cdot mgh$$

Procura-se n , que representa quantas repetições de exercícios são necessárias para gastar a energia adquirida na dieta. Assim,

$$n = \frac{W}{mgh} = \frac{8,37 \times 10^6 \text{ J}}{(50,0 \text{ kg})(9,80 \text{ m/s}^2)(1,5 \text{ m})} = 11388$$

Levando em conta que a pessoa deve levantar 11388 vezes o objeto, o que significa que ela deve fazer 570 séries de 20 repetições. Caso consiga realizar uma série de 20 levantamentos a cada 2 minutos, levará 19 horas para consumir a energia adquirida na dieta. Com isso, chega-se a conclusão que essa não é a maneira mais indicada de gastar a energia adquirida diariamente através dos alimentos.

Faça você mesmo! Faça uma estimativa de quantas calorias você ingere num dia normal e calcule para uma dada modalidade de exercício quanto tempo levaria para gastar essa quantidade de energia. Dica! Para escolher a modalidade de exercício pesquise e encontre o gasto de energia ao praticá-la por um determinado tempo.

2.5. Algumas noções sobre calor específico e capacidade térmica

O calor específico de uma substância expressa uma medida de sua capacidade de absorver calor. Dessa forma, esse é definido como sendo a quantidade de calor por unidade de massa necessária para aumentar de 1°C a temperatura de uma substância. Importante destacar que cada substância requer uma quantidade única de energia por unidade de massa para mudar 1°C a sua temperatura.

A expressão matemática do calor específico é:

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

expresso em $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$.

Por exemplo, o calor específico do alumínio é de $900 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ ou de $0,215 \frac{Cal}{g \cdot ^\circ C}$.

Faça você mesmo! Pesquise e monte uma tabela com valores de calores específicos de algumas substâncias como o alumínio, o cobre, ouro, ferro, chumbo, prata, bronze, madeira, vidro, álcool, mercúrio, água e areia. Compare-os.

Da definição de calor específico pode-se quantificar a energia transferida entre os corpos ou sistemas físicos e suas vizinhanças como,

$$Q = mc\Delta T,$$

sabendo-se que a variação de temperatura é escrita em sua forma matemática como,

$$\Delta T = T_f - T_i,$$

é possível reescrever a equação matemática da energia transferida, assim,

$$Q = mc(T_f - T_i).$$

Note que Q é função da capacidade de absorção de calor do corpo, do calor específico, da massa do corpo e da variação de temperatura que o corpo será submetido.

Outro aspecto físico importante observado nessa relação da energia transferida como a temperatura do corpo é que quando a temperatura final do corpo aumenta, ou seja, $T_f > T_i$ a quantidade de energia é positiva ($Q > 0$) e, quando a temperatura final diminui $T_f < T_i$, a quantidade de energia é negativa ($Q < 0$), ou seja, flui para fora do sistema.

Veja um exemplo numérico: a quantidade de energia transferida para elevar em $6,0^\circ C$ a temperatura de 5 Kg de água pela radiação solar é:

$$Q = mc\Delta T$$

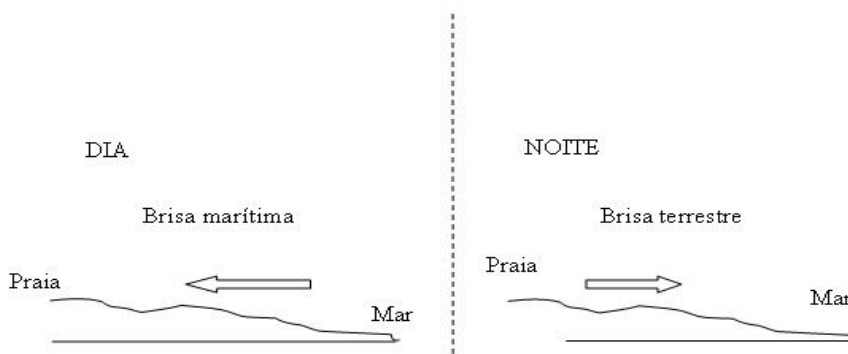
Sabendo-se que, o calor específico da água vale $c = 4186 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$, se encontra que,

$$Q = (5kg) \left(4186 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right) (6,0^\circ C) = 125.580,0 \text{ Joules}$$

Física do dia-a-dia: brisa marítima e brisa terrestre

Veja na figura 2.5 os padrões de escoamento do ar associados as brisas marítimas e terrestres.

Num dia de sol quando você está na praia, é mais agradável ficar na areia ou dentro do mar? Essa simples questão pode ser respondida pelo fato do calor específico da água ser maior do que o da areia. Assim, durante o dia, o Sol transfere quantidades aproximadamente iguais de energia para a areia e para a água, porém, $c_{\text{água}}$ é maior que c_{areia} , dessa forma, tem-se que a areia alcança maior temperatura que a água, sendo mais agradável ficar dentro d'água durante o dia.



Por esse fato, o ar acima da superfície se aquece mais do que o ar próximo a superfície do Oceano, causando diferenças de pressão atmosférica nessas duas áreas e assim, formando uma circulação local, chamada de brisa marítima, cujo esquema é mostrado na figura 2.5 (lado esquerdo).

Durante a noite, se tem a situação inversa, ou seja, a areia se resfria mais rapidamente que a água, em consequência se tem uma inversão no padrão de circulação, chamado de brisa terrestre, mostrado na figura 2.5 (lado direito). Nesse caso é mais agradável ficar dentro da água, pois ela é morna.

Faça você mesmo! Pesquise (livros e internet) e escreva um resumo analisando, em termos de aquecimento e do calor específico das áreas, sobre o padrão de circulação da brisa no vale e na montanha.

2.6. Transformação de fase e o calor latente

Quando ocorre transferência de energia de um corpo ou sistema para sua vizinhança e não se observa mudança na temperatura, mas se constata mu-

danças nas características físicas da substância, se tem a chamada transferência de fase.

Na prática, pode ocorrer a transformação ou mudança de fase de sólido para líquido, chamada de fusão, de líquido para gás, denominada vaporização. Dessa forma, a energia que entra na substância, quer seja no processo de fusão ou de vaporização é usada para aumentar a energia intermolecular potencial, em vez de ser usada para o aumento do movimento aleatório das moléculas.

A quantidade de calor necessária para romper as ligações moleculares em um quilograma de uma substância do estado sólido para o estado líquido é chamada de calor latente de fusão. A expressão matemática que fornece a quantidade de energia necessária para a mudança de fase numa quantidade de massa m de uma determinada substância pura é:

$$Q = \pm mL \quad ,$$

em que L é chamado de calor latente da substância, o sinal + ou – representa a direção do fluxo de energia.

Chama-se de calor latente de vaporização (L_v) quando na mudança de fase ocorre vaporização ou condensação. Por exemplo, se tem que à pressão atmosférica, o ponto de fusão da água é 0°C (zero grau Celsius) com calor latente de fusão de $5,23 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$, já no ponto de ebulição 100°C o

calor de vaporização vale $2,26 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

Faça você mesmo! Pesquise e monte uma tabela com valores de calores latentes de fusão e de vaporização, compare-os e escreva suas conclusões.

2.7. Processos de transferência de calor

No momento em que dois corpos entram em contato térmico e não estão em equilíbrio térmico ocorre uma transferência de energia, através do calor, do corpo com temperatura maior para o de temperatura menor, ou seja, do mais quente para o mais frio. Esse fenômeno é chamado de processo de transferência de calor, no qual o calor passa de um lugar para o outro.

Existem três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. O processo de condução, também chamado de condução térmica se dá através de transferência de energia cinética entre as moléculas e átomos. A transferência de energia é causada pela colisão de moléculas mais energéticas com as menos energéticas.

2.7.1. A condução térmica

Note que ao segurar uma panela no fogo, depois de algum tempo vai sentir as suas extremidades aquecidas. Isso pode ser explicado pelo fenômeno de condução térmica. No momento em que se leva a panela ao fogo, os átomos das extremidades da mesma começam a se mover mais rápido.

Assim, à medida que a temperatura aumenta a energia dessas moléculas também aumenta e passam a vibrar mais rapidamente colidindo com os átomos mais afastados da fonte de calor, transferindo energia para os mesmos, que também passam a vibrar. Dessa maneira, se tem uma sequência de colisões em que a energia é transferida dos pontos mais quente para os mais frios.

Através de experimentos foi possível determinar que o mecanismo de condução de calor é proporcional a diferença de temperatura e depende do meio condutor, estabelecendo-se uma expressão matemática para a taxa de transferência de energia pelo calor (H) dada por:

$$H = \frac{Q}{\Delta T} \propto \frac{A\Delta T}{\Delta x},$$

que pode ser escrita em forma de igualdade, como,

$$H = KA \frac{\Delta T}{\Delta x},$$

em que K , é a condutividade térmica, expressa em $\frac{W}{m \cdot K}$ (Watts por metro e kelvin) ou em $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ (Watts por metro e grau Celsius).

A equação $H = KA \frac{\Delta T}{\Delta x}$ pode ser escrita na forma de derivada ou taxa de variação, como:

$$H = KA \left(\frac{dT}{dx} \right),$$

em que $\left(\frac{dT}{dx} \right) = \frac{T_2 - T_1}{L}$, é o gradiente de temperatura e L é um comprimento.

A condutividade térmica indica o quanto uma substância é boa condutora de calor. Assim, quanto maior o valor de K melhor condutora de calor é a substância. O contrário também é válido, quanto menor for K , mais isolante será a substância.

Faça você mesmo! Pesquise e monte uma tabela com valores de condutividade térmica de algumas substâncias como o alumínio, cobre, ouro, ferro, chumbo, prata, o ar, hidrogênio, oxigênio. Compare os valores e escreva suas conclusões. Depois, faça uma análise dimensional, para provar que H é expresso no SI, em Watts.

2.7.2. A convecção

Para se entender o mecanismo de transferência de energia chamado de convecção, se imagine próximo a uma fogueira (típica da época dos festejos juninos), levando as mãos acima das chamas, na direção vertical, para se aquecer.

A explicação para esse fenômeno físico é simples. A parcela de ar, próximo a fogueira, é diretamente aquecida pelas chamas desta, se expande e depois sobe. Por ter sua densidade diminuída, a parcela de ar transfere energia para as mãos à medida que flui entre elas. Dessa forma, o fenômeno físico acontece por meio de transferência de matéria, fazendo com que a energia se propague com a parcela de ar aquecida. Assim acontece um processo de transferência de calor pelo movimento de um fluido, que é chamado de convecção.

No exemplo citado se tem como consequência do aquecimento a diferença de densidade que resulta em movimento, o que se chama de convecção natural. Desse modo, o exemplo das brisas marítima e terrestre, usado anteriormente, bem como, os padrões de circulação locais são exemplos desse mecanismo de convecção natural.

A convecção também pode ser forçada e isso ocorre quando o fluido é forçado a se mover, como por exemplo, por uma bomba nos casos de sistemas de ar condicionado.

Faça você mesmo! Pesquise e elabore dois textos para explicar que, sem as correntes de convecção seria muito difícil ferver uma porção de água dentro de uma panela, e seria muito difícil resfriar uma sala através do condicionamento de ar.

2.7.3. O mecanismo da radiação

O mecanismo de transferência de energia que está diretamente relacionado com as variações de temperatura de corpos é chamado de radiação eletromagnética. Fisicamente, se tem que todos os corpos irradiam energia continuamente na forma de ondas eletromagnéticas, que são resultado da aceleração de cargas elétricas contidas nas moléculas aceleradas quando se tem aumento da temperatura. Assim, essa energia irradiada é chamada de radiação térmica.

Um exemplo prático desse mecanismo físico de transferência de energia é o balanço de energia usado pelos meteorologistas, mostrado na figura 2.6.

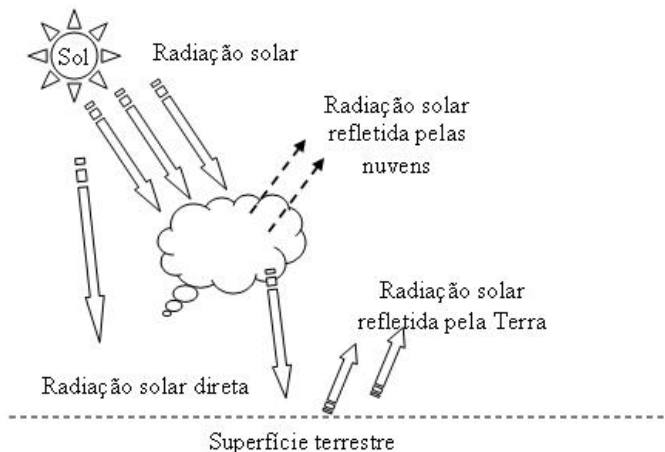


Figura 2.6 – Representação simplificada do balanço de radiação na superfície terrestre.

A energia irradiada pelo Sol ou radiação solar atinge por meio da radiação eletromagnética a superfície terrestre. Uma parte dessa energia é refletida à atmosfera, ainda nas nuvens; a outra parte, que atravessa as nuvens, mais o que chega direto do Sol na superfície terrestre, é chamado de radiação solar direta. Uma porção dessa radiação solar direta é refletida de volta para o espaço e uma parte é absorvida pela superfície. Ela é usada no aquecimento natural do ar e do solo durante o dia, no processo de fotossíntese e também capturada, por exemplo, através de células fotovoltaicas para geração de energia elétrica com fins de uso doméstico e comercial.

Faça você mesmo! Pesquise sobre a quantificação de emissão de energia por irradiação térmica (lei de Stefan).

Agora conhecendo os três mecanismos de transferência de energia, através do calor - condução, convecção e radiação – se pode juntar os conceitos em exemplos práticos do dia-a-dia, como o calor gerado pelo corpo humano, que é transmitido por convecção pelo sangue (nesse caso convecção forçada, onde a bomba é o coração), por condução a estrutura óssea e os dentes e por radiação para a atmosfera.

No exemplo da panela com água no fogo, o calor por condução é transmitido para as partes da panela, por convecção da porção de água do fundo para a superfície e por radiação das paredes da panela e da superfície da água a atmosfera.

2.8. Noções de termodinâmica

2.8.1. A primeira lei da termodinâmica e suas aplicações

O conceito de energia é amplo e muito utilizado em todas as áreas das ciências - Física, Química e Biologia. A energia, na Biologia, é fator determinante para o funcionamento dos organismos dos seres vivos e de como eles interagem entre si e com o meio ambiente. No dia-a-dia se observa que os sistemas convertem a energia contida na radiação solar em outras formas de energia.

Veja o exemplo das plantas, que absorvem radiação eletromagnética e radiação solar e transformam essa energia em energia química, que é armazenada em suas células para a própria sobrevivência e para sobrevivência de outros seres vivos, através da produção de alimentos, que serão consumidos e transformados em energia cinética dos músculos, que por sua vez, se transforma em outras formas de energia à medida que se realiza as tarefas diárias.

Deste modo, fica evidente, que a energia e suas transformações são importantes para a própria vida. Assim é aplicado o conceito da lei da conservação da energia à vida humana e, através dessa aplicação se chega a primeira lei da termodinâmica.

Para compreender o sentido físico da primeira lei da termodinâmica é necessário entender a relação entre calor, trabalho e energia interna de um sistema termodinâmico fechado. Esses conceitos físicos já foram vistos. No sentido de revisar é importante frisar que calor é uma transferência de energia para dentro ou para fora de um sistema termodinâmico e trabalho é a medida da energia gasta pelo movimento de parte ou do sistema termodinâmico como um todo, causado por uma força externa a esse. Assim o trabalho pode ser realizado pelo sistema termodinâmico ou sobre o mesmo.

Notas:

- Um sistema termodinâmico pode ser imaginado como uma caixa com matéria e energia para posterior análise. Exemplos: uma panela com água, uma floresta, a atmosfera ou um planeta.
- Os sistemas podem ser abertos, como no caso da água na panela em ebulição, em que o conteúdo vai diminuindo gradativamente, trocando energia e matéria com o meio ambiente; ou fechados, em que o sistema troca energia mas não troca matéria com o ambiente, como no caso de uma panela de pressão.
- Existem também os sistemas isolados em que não existe troca de energia e de matéria com o ambiente, como no caso de um isopor cheio de gelo e bem fechado.

Vejam os exemplos a seguir, esses visam fornecer um melhor entendimento da primeira lei da termodinâmica.

Física do dia-a-dia: enchendo pneu

Ao encher um pneu, o ar na bomba é empurrado. Como o processo acontece de forma rápida, praticamente nenhuma energia é transferida pelo calor, no entanto, se realiza trabalho sobre o sistema. Este trabalho é denominado positivo, logo a energia interna do sistema também será positiva.

Note que, segundo a descrição do exemplo citado se tem uma relação entre calor, trabalho e energia. Essa relação é expressa através da primeira lei da termodinâmica, ou seja, num sistema fechado a diferença entre o calor fornecido e o trabalho realizado pelo sistema será a sua própria variação da energia interna.

Assim, é possível escrever uma expressão matemática para a primeira lei da termodinâmica,

$$\Delta U = Q - W,$$

Em que ΔU é a variação da energia interna ($\Delta U = U_f - U_i$), Q é a quantidade de calor fornecida ao sistema e W o trabalho realizado pelo ou sobre o sistema termodinâmico.

É importante mencionar que quando o sistema termodinâmico sofre variações infinitesimais em sua quantidade de energia dQ e no trabalho dW , a energia interna também sofre pequenas variações dE_{int} . Então, a expressão matemática da primeira lei da termodinâmica deve ser escrita em sua forma diferencial,

$$dE_{\text{int}} = dQ + dW.$$

Física do dia-dia: dietas calóricas

A procura do corpo perfeito através das dietas de baixas calorias e dos exercícios está virando uma verdadeira obsessão entre as pessoas. Através da primeira lei da termodinâmica é possível analisar tal obsessão.

É fato que os seres humanos retiram energia dos alimentos para sua sobrevivência, assim, considerando-se o corpo como um sistema termodinâmico fechado, pela primeira lei da termodinâmica, essa energia adquirida deve ser usada para realizar trabalho e gerar calor, o que acontece na realização das tarefas diárias e/ou exercícios e no armazenamento de energia interna para manter a temperatura corporal.

É evidente que, quando se tem um saldo de energia, ou seja, quando se gasta menos energia do que se adquire, o excesso é armazenado na forma de

gordura. O contrário também é válido, ou seja, quando se gasta mais energia do que se adquire, tem-se o consumo de parte da gordura armazenada no corpo.

Dessa forma, considerando que, em condições normais, o corpo deve utilizar cerca de 30 calorias por dia para manter um quilograma de peso, uma pessoa com 80 Kg deve consumir cerca de:

$$80\text{kg} \cdot 30 \frac{\text{Cal}}{\text{kg} \cdot \text{dia}} = 2400 \frac{\text{Cal}}{\text{dia}},$$

Sabendo que se deve consumir ou gastar 7000 calorias para ganhar ou perder 1,0 Kg de peso, para perder 1,0 Kg por semana a pessoa terá que consumir diariamente,

$$\frac{7000\text{Cal}}{7\text{dias}} = 1000 \text{ calorias por dia.}$$

Aplicando o conceito da primeira lei da termodinâmica se encontra que esse consumo de energia pode ser efetivado através da realização de trabalho, ou seja, de exercícios físicos. Dessa forma, sabendo que ao subir uma escada uma pessoa realiza trabalho ($Q = W$), ou seja, consome energia, é possível determinar a altura da escada que se deve subir para gastar essa quantidade de energia.

Lembre-se que o trabalho para subir uma escada é semelhante ao de levantar uma massa numa determinada altura, dado por mgh . Assim,

$$Q = mgh,$$

onde, m é massa da pessoa, g é o módulo da aceleração gravitacional e se pode achar h que é a altura da escada. Assim,

$$h = \frac{Q}{mg}.$$

Transformando a energia Q , dada em Caloria (Cal), em equivalente mecânico, ou seja, Joules (J), se tem que,

$$Q = 1000\text{kcal} \cdot \left(\frac{4186\text{J}}{1\text{kcal}} \right) = 4,186 \cdot 10^6 \text{ J}.$$

Substituindo esse valor para encontrar a altura da escada, se encontra que,

$$h = \frac{4,186 \cdot 10^6 \text{ J}}{(80\text{kg}) \cdot (9,8 \text{ m/s}^2)} \cong 5539 \text{ metros,}$$

Assim, se chega a conclusão de que para perder peso é melhor comer menos, ao invés de ingerir altas doses de calorias e tentar consumi-las através de exercícios.

Faça você mesmo! Pesquise os valores calóricos dos alimentos e a quantidade de calorias consumidas nos exercícios. Monte tabelas e calcule a redução de peso de uma dieta, baseada na baixa ingestão de energia, através dos alimentos e combinada com exercícios físicos.

2.8.2. Entropia – segunda lei da termodinâmica

Para auxiliar no entendimento do conceito de entropia se deve pensar em alguns processos naturais que são denominados de irreversíveis. Eles ocorrem em apenas um sentido e nunca, por meios naturais, são conduzidos em sentido contrário. Na prática, ao deixar uma xícara de chá quente sobre a mesa ela esfria e depois não irá se aquecer sozinha; quando se solta uma pedra de cima de uma ponte, ela cai até alcançar o solo e depois fica em repouso, porém, nunca, por meios naturais, ela voltará para cima da ponte. Esses processos são chamados de irreversíveis.

Nesses casos e em outros tantos na natureza, não é a energia que controla o sentido dos processos, e sim, uma propriedade chamada de entropia, que diferentemente da energia não obedece a uma lei de conservação. A entropia é uma propriedade de estado de um sistema termodinâmico fechado. Seu princípio estabelece que num processo irreversível que ocorre num sistema termodinâmico fechado a entropia desse sistema sempre aumenta, dessa forma, é comum se encontrar na literatura que a entropia é uma medida da desordem aos quais os sistemas físicos tendem.

Por outro alado, num processo reversível, a entropia do sistema termodinâmico permanece constante e depende de seus estados inicial e final, sendo que a variação da entropia nesses casos é zero ($\Delta S = 0$).

Assim, para calcular a variação da entropia num processo reversível pode-se usar o fato de que a temperatura não é constante e que dQ_{rev} é o calor transferido (variação infinitesimal) numa determinada temperatura T . Dessa forma, por definição, a variação de entropia é:

$$\Delta S = \int_i^f dS = \int_i^f \frac{dQ_{rev}}{T} ,$$

Para processos reversíveis, se deve levar em consideração a dependência dessa variação com as propriedades dos estados inicial e final do processo. Lembre que um processo genuinamente reversível é um modelo ideal e simples, que será utilizado para auxiliar na análise de futuros processos reais e mais complexos. Dessa forma, se o processo for considerado isotérmico, ou seja, com temperatura constante, $\Delta S = \frac{Q}{T}$, expresso em J/K .

Note que, nesse caso, como a temperatura é expressa em graus Kelvin e sempre positiva, o sinal de ΔS será o mesmo de Q , dessa forma, se o calor é cedido ($Q > 0$) ao sistema a entropia aumenta ($\Delta S > 0$)

Considere uma panela com 2,0 Kg de água estando a temperatura ambiente, 26°C . Depois, essa é colocada no fogo e a temperatura será elevada até 100°C , ponto de ebulição da água. Assim, calculando a variação de entropia desse processo, se tem que:

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T}.$$

Nesse caso, a temperatura varia de $T_i = 26^\circ\text{C}$ a $T_f = 100^\circ\text{C}$ e a energia térmica necessária nesse aumento de temperatura é $Q = mc\Delta T$. Pode-se, como visto anteriormente, escrever Q em sua forma diferencial $dQ = mc dT$. Então,

$$\Delta S = \int_i^f mc \frac{dT}{T}.$$

Lembrando que, do cálculo diferencial e integral, constantes devem sair da integração. Assim,

$$\Delta S = mci \int_i^f \frac{dT}{T}.$$

Da tabela de integrais, se tem que $\int_a^b \frac{dx}{x} = \ln x \Big|_a^b = \ln b - \ln a$. Então,

$$\Delta S = mci \ln \frac{T_f}{T_i}$$

Substituindo os valores dados no exemplo, se encontra que,

$$\Delta S = (2,0\text{kg}) \left(4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \ln \left(\frac{273,15 + 100}{273,15 + 20} \right),$$

Fazendo os cálculos,

$$\Delta S \cong 20224 \frac{\text{J}}{\text{K}}.$$

Assim, concordando com o que foi visto anteriormente, se constata que, quando o calor é transmitido para o sistema, no caso a água, a temperatura aumenta e a variação de entropia é positiva.

Faça você mesmo! Pesquise e elabore um texto sobre o cálculo da variação de entropia para processos irreversíveis e o rendimento de máquinas.

3. Fluidos - estática e dinâmica

3.1. Noções sobre estática de fluidos

É comum se classificar a matéria em estados: sólido, líquido ou gasoso. Por exemplo, sólido, é um paralelepípedo cujo volume e forma são bem definidos. Essas características, principalmente a de forma difere os sólidos dos líquidos. Assim, é possível afirmar que num líquido se tem volume definido, porém nenhuma forma definida. Na prática, se observa que um litro de leite tem seu volume definido, no entanto, sua forma se adéqua ao recipiente no qual o leite será colocado.

No entanto, é importante ressaltar que essa característica de forma observada nos materiais depende da escala de tempo. Por exemplo, plástico e vidro são comumente classificados como sólidos, porém, numa escala de tempo grande, ou seja, para longos períodos, esses tendem a fluir como os líquidos.

Assim como o tempo nesse processo de mudança de forma das substâncias também são importantes a temperatura e a pressão. Nesse contexto, é possível afirmar que os líquidos e os gases são classificados como fluidos, que formalmente são definidos como um arranjo de moléculas juntas por forças intermoleculares, que se moldam a forma dos recipientes por forças exercidas pelas paredes dos mesmos.

Para compreender o conceito físico de pressão se utiliza um modelo simplificado que considera o fluido como não viscoso, ou seja, sem nenhum atrito entre suas camadas adjacentes. Isso significa levar em conta que as únicas forças que vão existir, atuando no fluido, sejam perpendiculares as superfícies do mesmo, como mostrado na figura 2.7.

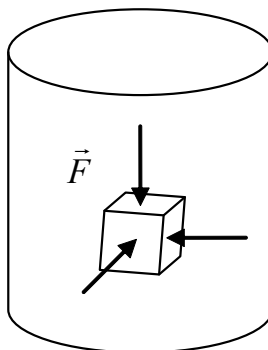


Figura 2.7 – Representação esquemática da força de um fluido sobre um corpo submerso no mesmo, considerando que a força é perpendicular as paredes do corpo em todos os seus pontos.

A pressão P do fluido em qualquer uma das faces do corpo (paralelepípedo mostrado na figura 2.7) no nível que está submerso pode ser definida como a razão da força exercida pelo fluido pela a área do lado do paralelepípedo. Dessa forma, se pode escrever uma expressão matemática para quantificar essa grandeza física, denominada de pressão da seguinte forma:

$$P = \frac{F}{A}.$$

Veja que a pressão é definida em termos de força por unidade de área. Desse modo, recorrendo a análise dimensional vista no início do estudo da Física, se tem que a unidade associada à pressão será a unidade de força sobre a unidade de área, que no SI é $\frac{N}{m^2}$, chamada de Pascal. Assim:

$$1Pa = 1 \frac{N}{m^2}.$$

É importante mencionar que, apesar da pressão ser obtida em função da força, elas são grandezas físicas de natureza diferentes e, que por se ter a área envolvida em sua quantificação, é possível obter altos valores de pressão a partir de pequenos valores de forças.

Física do dia-a-dia: doando sangue

A doação de sangue é um gesto de grande valor humano. O processo de retirada do sangue pode ser explicado através dos conceitos físicos de força e pressão. Note que, quando se vai doar sangue, a área da ponta da agulha usada para perfurar a pele e chegar até a veia é bem pequena, e assim com uma força relativamente pequena aplicada, se consegue uma pressão relativamente grande capaz de fazer com que a agulha perfure a pele e a veia, chegando até o sangue a ser coletado.

Física do dia-a-dia: mergulho na água

Quando se mergulha uma pessoa na água, como numa piscina, lagoa ou no mar, a pressão exercida pela água no corpo aumenta à medida que a profundidade aumenta, causando, assim, uma sensação de desconforto, que é sentida, principalmente, nos ouvidos, através da compressão dos tímpanos pela pressão exercida pela água.

Voltando ao exemplo da figura 2.7, é importante mencionar que a quantificação da pressão exercida pelo fluido no corpo depende da profundidade e da densidade ou massa específica do mesmo.

Física do dia-a-dia: subindo uma serra

Subir uma serra é outro exemplo de desconforto sentido pelo corpo humano, no caso através da descompressão dos tímpanos nos ouvidos pela diminuição da pressão atmosférica à medida que se aumenta a altura em relação ao solo. Isso ocorre porque a pressão atmosférica diminui com a altitude, assim, a pressão do ar nos tímpanos também diminui causando uma sensação de desconforto e, quanto mais rápido se sobe, maior será a variação na pressão atmosférica e, conseqüentemente, maior será a sensação de desconforto sentida nos ouvidos.

Essas variações na pressão em um fluido podem ser quantificadas através de expressões matemáticas. Para isso, se deve usar um modelo em que se considera uma pequena amostra de um fluido qualquer em repouso, com área de seção transversal A , dentro da piscina, como mostrado na figura 2.8.

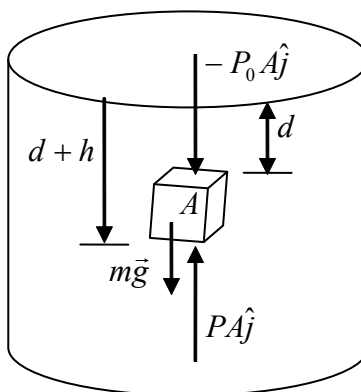


Figura 2.8 – Representação de uma parcela de um fluido (de densidade ρ), com área de seção transversal A , em repouso, e das forças atuantes (na direção vertical) nessa parcela.

Recorrendo a segunda lei de Newton do movimento, se tem que para a parcela de fluido permanecer em repouso, o somatório das forças atuantes deve ser igual a zero. Assim, matematicamente, se tem que,

$$PA - P_0 A - mg = 0,$$

Note que os sinais atribuídos as componentes das forças, mostradas na figura 2.8 têm relação com o referencial adotado na análise do problema, que é o fundo da recipiente.

A massa da parcela pode ser obtida em função da densidade do fluido, através da relação matemática,

$$\rho = \frac{m}{V},$$

então,

$$m = \rho \cdot V ,$$

e o volume da amostra pode ser escrito em função da área e do comprimento da mesma, como sendo,

$$V = A \cdot h ,$$

Assim, se pode reescrever $PA - P_0A - mg = 0$, como sendo,

$$PA = P_0A + \rho gAh.$$

Eliminando o termo A nessa equação, mostrada se tem que:

$$P = P_0 + \rho gh ,$$

onde P representa a pressão na profundidade $d + h$.

Faça você mesmo! Recorrendo a análise dimensional mostre que ρgh tem dimensão de pressão, por isso é possível a soma dos termos da equação $P = P_0 + \rho gh$.

É importante notar na figura 2.8, que se $d = 0$ a pressão atuante na parte superior da amostra de fluido é a pressão atmosférica. Outra conclusão importante que se pode obter dessa relação matemática é que para fluidos com densidade aproximadamente constante, chamados de incompressíveis, a pressão depende somente da profundidade, e assim, tem o mesmo valor em todos os pontos que estão numa mesma profundidade e, qualquer aumento observado na parte superior do fluido (aumento em P_0) deve ser transmitido a todos os pontos de mesmo. Essas afirmações podem ser encontradas nas diversas formas dos enunciados do princípio de Pascal.

Faça você mesmo! Pesquise alguns enunciados diferentes encontrados para o princípio de Pascal, compare-os e tire suas conclusões acerca da variação da pressão com a profundidade nos fluidos.

O exemplo mais explorado nos livros didáticos de física para exemplificar o princípio de Pascal é o do elevador hidráulico ou elevador de carros, encontrados nas oficinas automotivas. Veja na figura 2.9 um esquema de um desses elevadores juntamente com um diagrama das forças existentes no elevador hidráulico.

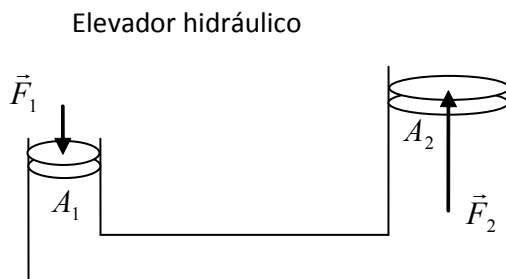


Figura 2.9 – Diagrama esquemático de forças encontrado num elevador hidráulico.

Quando se aplica uma força $\vec{F}_1$ em um pequeno pistão de área A_1 (lado esquerdo da figura 2.9), obedecendo ao princípio de Pascal a pressão é transmitida até A_2 (lado direito da figura 2.9), através de um fluido, exercendo a força $\vec{F}_2$ sobre outro pistão. Assim, a pressão apesar de ser a mesma nos dois pistões, como a área do pistão 2 é maior que a do pistão 1, a força $\vec{F}_2$ será maior que a força $\vec{F}_1$, obedecendo em fator de $\frac{A_2}{A_1}$.

Faça você mesmo! Vá até uma oficina mecânica, pesquise sobre o fluido contido em seus elevadores hidráulicos e estime o módulo das forças F_1 e F_2 , e a pressão exercida pelo fluido para produzir F_2 mostradas no esquema da figura 2.9. Meça a área dos pistões dos elevadores hidráulicos e use o fator $\frac{A_2}{A_1}$, mostrado acima.

Física no dia-a-dia: aplicação do princípio de Pascal e variação da pressão atmosférica

Voltando ao exemplo do desconforto sentido através dos tímpanos nos ouvidos humanos pela variação de pressão atmosférica quando subimos a grandes alturas, como por exemplo, em serras, é possível calcular a pressão ou a variação de pressão atmosférica nesses casos, através da relação matemática do princípio de Pascal.

Para isso se deve considerar, como aproximação, que o ar seja um fluido incompressível. Dessa forma, se o indivíduo está em Fortaleza, mais ou menos ao nível médio do mar, onde a pressão atmosférica é de aproximadamente $P_0 = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ e resolve se deslocar até a serra de Guaramiranga que tem aproximadamente 865 metros acima do nível médio do mar, então a pressão sentida em cima da serra, será:

$$P_s = P_0 - \rho g h_s .$$

Veja que, nesse caso, o sinal da equação será negativo, o que indica que a pressão atmosférica diminui com a altura; ao contrário da pressão

no fundo do mar, que aumenta com a profundidade. Assim, assumindo-se $\rho = 1,2 \text{ kg} / \text{m}^3$ (densidade média do ar atmosférico), o módulo da aceleração gravitacional $g = 9,8 \text{ m} / \text{s}^2$ e h_s a altura da serra. Tem-se que:

$$P_s = (1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}) - (1,2 \text{ kg} / \text{m}^3)(9,8 \text{ m} / \text{s}^2)(865 \text{ m})$$

$$P_s = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} - 0,102 \cdot 10^5 \text{ Pa},$$

$$P_s = 0,911 \cdot 10^5 \text{ Pa}.$$

Dessa forma, se constata que a pressão na serra é menor que em Fortaleza, fato que causa desconforto quando se sobe a mesma, sentido através dos tímpanos no ouvido humano.

Faça você mesmo! Faça uma pesquisa e escreva um pequeno texto sobre medições de pressão, explicitando a relação entre a variação de pressão atmosférica e a variação na altura de uma coluna de mercúrio, comumente usada nos barômetros.

Agora, voltando ao exemplo dos corpos dentro de recipientes cheios d'água, é importante mencionar que nesses casos também se tem a aplicação de outro princípio bem conhecido na literatura, o de princípio de Arquimedes. Nos livros didáticos de física se encontram, como em outras leis e princípios, inúmeros enunciados desse princípio, que trata da força chamada de empuxo, que é exercida para cima pelo fluido sobre o corpo.

Faça você mesmo! Pesquise sobre os diversos enunciados do princípio de Arquimedes, compare-os e escreva suas próprias conclusões sobre o mesmo.

A aplicação do princípio de Arquimedes pode ser encontrado na flutuação e navegação dos barcos ou mesmo quando se tenta levantar algum peso dentro e fora d'água. Nesse caso, se nota que dentro d'água é bem mais fácil fazer essa tarefa.

Para encontrar uma expressão matemática que quantifica a força de flutuação chamada de empuxo, é preciso voltar ao exemplo anterior, da figura 2.8 e substituir o elemento de fluido por um elemento de uma substância qualquer diferente do fluido, como por exemplo, o chumbo.

Note que, com isso, existe uma variação de pressão da parte de baixo para a parte de cima do cubo ΔP ($\Delta P \cdot A = \rho_f g h \cdot A$) e que a pressão na parte de baixo, pelo princípio de Pascal, é maior que na parte de cima. Dessen modo, a força para cima é maior que a força para baixo. Onde ρ_f representa a densidade do fluido.

Sabendo que a força da diferença de pressão do fluido na parte superior e inferior do cubo vale,

$$F_e = \Delta P \cdot A.$$

Então, F_e pode ser escrita em função da variação de pressão entre o fundo (P_F) e o topo (P_{topo}) do cubo, na forma, $F_e = P_F \cdot A - P_{topo} \cdot A$. Sabendo que $\Delta P \cdot A = \rho_f g h \cdot A$, é possível substituir e encontrar uma formulação matemática para F_e . Assim,

$$F_e = \rho_f \cdot g \cdot V,$$

em que V é o volume do cubo, e pode ser expresso com $V = \frac{m}{\rho}$. Assim $F_e = mg$, que representa o peso do fluido deslocado pelo cubo.

Sabendo que o valor da força de empuxo é igual ao peso do fluido deslocado, pode-se fazer análises de casos em que se encontram corpos totalmente submersos ou parcialmente submersos, flutuando num fluido.

No primeiro caso, o valor do empuxo é $F_e = \rho_f g V_c$ (V_c é o volume do corpo). Lembre-se que, como o corpo está totalmente submerso seu volume é igual ao volume de fluido deslocado por ele ($V = V_c$). Assim, considerando a diferença de densidade entre o corpo e o fluido, se encontra que a força resultante sobre o corpo será a diferença entre o empuxo e a força peso do corpo. Desse modo,

$$F_R = F_e - F_P = \rho_f \cdot V \cdot g - \rho_c \cdot V_c \cdot g,$$

como se considerou $V = V_c$, é possível reescrever essa relação matemática como,

$$F_R = (\rho_f - \rho_c) \cdot V_c \cdot g,$$

onde se conclui que se a densidade do corpo for menor que a densidade do fluido a força resultante é positiva e assim o corpo é acelerado para cima e caso contrário, o corpo afunda.

No caso do corpo parcialmente submerso se tem o volume do fluido deslocado correspondente a porção do volume do corpo que se encontra submerso no fluido. E mais! Como o corpo está em equilíbrio, se pode concluir que o empuxo está sendo equilibrado pela força gravitacional exercida no corpo. Assim, é possível escrever uma expressão matemática da forma,

$$\rho_f \cdot g \cdot V = \rho_c \cdot V_c \cdot g,$$

então,

$$\frac{\rho_c}{\rho_f} = \frac{V}{V_c}.$$

Donde se pode concluir que a fração do volume do corpo sob a superfície é igual a razão numérica entre as densidades do fluido e do corpo.

Faça você mesmo! Pegue um recipiente com água e alguns elementos aproximadamente cúbicos de aço, chumbo, isopor, papelão. Faça a experiência de mergulhá-los, observe o que acontece e escreva suas conclusões qualitativas. Depois, com os valores das densidades dessas substâncias e com uma aproximação calculada dos volumes dos cubos, calcule o módulo da força resultante da água sobre eles e indique a direção dessa força. Junte todas essas informações e elabore um relatório de sua experiência.

3.2. Noções de dinâmica de fluidos e o princípio de Bernoulli

3.2.1. Noções de dinâmica de fluidos e o princípio de Bernoulli

Os casos mostrados anteriormente são relativos à Estática dos Fluidos, ou seja, em todos os exemplos analisados considerou-se o fluido em repouso. Na sequência realizar-se-ão estudos e análises dos fluidos em movimento, que se chamam de Dinâmica de Fluidos. Nessas análises se faz uma descrição do fluido como um todo. Nesse contexto, o movimento de um fluido também chamado de escoamento, é dito constante ou laminar quando a velocidade em qualquer ponto do mesmo permanece constante com o tempo. Dessa forma, se o escoamento é irregular, com região de pequenos redemoinhos, se diz que o escoamento é turbulento. Esse tipo de escoamento é considerado por ter velocidade acima de um valor crítico, chamada de velocidade crítica.

Física do dia-a-dia: o escoamento nos rios

Analisando o escoamento da água nos rios se observa que nas regiões centrais o escoamento é constante com o tempo, ou seja, laminar, e nas regiões em que se encontram obstáculos, a velocidade varia com o tempo, tornando o escoamento turbulento e, conseqüentemente, se observa o aparecimento de redemoinhos. Outra propriedade importante na dinâmica de fluidos é a viscosidade do mesmo. Essa propriedade indica o grau de atrito interno do fluido e, conseqüentemente, a resistência encontrada entre duas camadas adjacentes ao movimento.

Os estudos quantitativos de Dinâmica dos Fluidos exigem teorias matemáticas complexas, requerendo modelos simplificados, que caracterizam o comportamento de um fluido ideal e assim, se obtém aproximações que representem as quantificações nesses modelos. Nesse contexto, é comum considerar que o fluido ideal é não viscoso, ou seja, a força de atrito interno é desprezada, incompressível, o que significa que sua densidade é constante.

Em relação ao escoamento nesse modelo simplificado, se considera o fluido laminar e assim, sem turbulência. Como consequência disso se tem um fluido irrotacional.

Com essas suposições, é possível chegar à descrição da equação matemática da continuidade para os fluidos: “o resultado da multiplicidade entre a velocidade do fluido e a área de seção reta em todos os pontos ao longo de um tubo será uma constante e chamada de vazão”.

Física do dia-a-dia: o escoamento d’água numa mangueira

A figura 2.10 mostra um esquema do que acontece quando se necessita que a água de uma mangueira curta alcance uma maior distância para se alcançar todo o jardim.

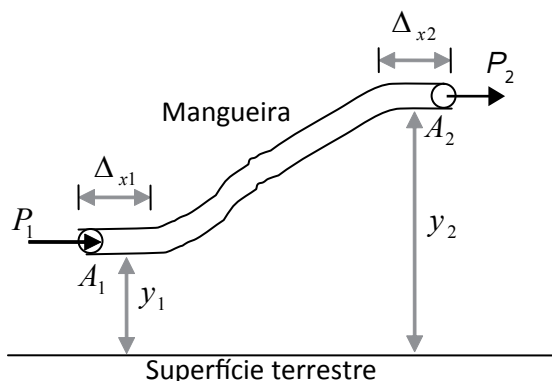


Figura 2.10 – Representação esquemática de uma mangueira.

No ponto 2 (P_2), o volume do fluido que sai do sistema é $A_2 \Delta x_2$ e o que entra, no ponto 1 (P_1) é $A_1 \Delta x_1$. Com as considerações do fluido ideal, se pode afirmar que o volume será uma grandeza conservada, assim,

$$A_1 \Delta x_1 = A_2 \Delta x_2$$

Considerando o intervalo de tempo em que se usam água para regar um determinado jardim, se tem que,

$$\frac{A_1 \Delta x_1}{\Delta t} = \frac{A_2 \Delta x_2}{\Delta t},$$

Assim, se chega na forma matemática da equação da continuidade para fluidos,

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2.$$

que representa o produto da velocidade instantânea pela área da seção reta (vazão) nos pontos 1 e 2, respectivamente. Assim, a partir dessa relação matemática, é possível concluir que quando se diminui a área da seção reta

no ponto 2, onde a água sai do sistema, aumenta sua velocidade e, conseqüentemente, se pode projetar a água a distância maiores.

Faça você mesmo! Use a relação chamada de equação da continuidade para fluidos para calcular o alcance da água projetada horizontalmente de um ponto a 1,20 metros de altura do solo que sai de uma mangueira com bico na ponta, que tem um diâmetro de 0,5 cm.

Dicas para solucionar este problema! Meça o diâmetro de uma mangueira comercial e calcule a área da seção transversal da mesma. Meça também a vazão da mesma, sem o bico, enchendo um recipiente e anotando a capacidade do mesmo e o tempo que levou pra enchê-lo. Depois, obtenha a velocidade do escoamento na mangueira, e com isso, através da equação de continuidade para fluidos, encontre a velocidade na saída do bico. Por fim, use as equações da cinemática unidimensional para obter a solução do problema ($x_f = x_i + v_x \cdot t$ e $y_f = y_i + v_{yi} \cdot t - \frac{1}{2}gt^2$)

Analisando-se a forma matemática da equação da continuidade, constata-se que somente é possível encontrar uma relação da velocidade com a área da seção reta da mangueira, no entanto, para esse problema, se pode fazer uma análise da relação entre a velocidade e a altura do fluido com a pressão exercida por ele. Para isso, é necessário recorrer ao chamado de princípio de Bernoulli.

A forma matemática do princípio de Bernoulli ou equação de Bernoulli mostra que o resultado da soma da pressão, da energia cinética por unidade de volume e da energia potencial por unidade de volume é uma constante em qualquer ponto do escoamento do fluido. Assim, traduzindo para linguagem matemática e aplicando ao fluido ideal, mencionado se tem,

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gy = cte \text{ (cte é a abreviatura de constante),}$$

onde, P é a pressão, $\frac{1}{2}\rho v^2$ é a energia cinética por unidade de volume e $\frac{1}{2}\rho v^2$ é a energia potencial gravitacional por unidade de volume, ρ é a densidade do fluido, v é a velocidade do escoamento e y é a altura do ponto onde está o fluido em relação a superfície terrestre, como mostrado no esquema da figura 2.10.

Dessa forma, aplicando a equação de Bernoulli no exemplo da figura 2.10 para os dois pontos indicados, se tem que:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2.$$

Note que, quando o fluido está em repouso, $v_1 = v_2$, assim a expressão matemática acima pode ser reescrita, como,

$$P_1 - P_2 = \rho g (y_1 - y_2),$$

Passando P_2 para o lado direito da igualdade, chega-se a,

$$P_1 = P_2 + \rho g h,$$

Donde se conclui que através da aplicação do princípio de Bernoulli nesse exemplo, também se pode chegar à equação que representa a variação de pressão no fluido com a profundidade.

Faça você mesmo! Pesquise (livros e internet) e escreva um texto sobre aplicações da dinâmica de fluidos.

Síntese do Capítulo



Nesse capítulo se apresenta a relação entre os conceitos físicos da termodinâmica, termodinâmica e mecânica de fluidos com os sistemas biológicos, particularmente, com o corpo humano. Apresenta os conceitos de temperatura e equilíbrio térmico juntamente com a descrição do termômetro, das escalas termométricas (Celsius, Kelvin e Fahrenheit) e a relação matemática para conversão de valores de temperatura entre as escalas, da lei zero da termodinâmica, com o exemplo do corpo humano como sensor de temperatura.

Na sequência, apresenta-se a quantificação do fenômeno físico da dilatação térmica de sólidos e líquidos e, uma definição dos conceitos físicos de calor, transferência de energia e equivalente mecânico do calor, mostrando a relação desses conceitos com a perda de energia pelo corpo humano através da realização de trabalho mecânico. Apresenta-se ainda, as definições de calor específico e de calor latente de uma substância e os processos físicos de transferência de calor (condução, convecção e radiação), juntamente com o conceito de condutividade térmica. Procura-se também fazer uma relação desses conceitos físicos com o balanço de radiação solar na superfície terrestre e o corpo humano em sua distribuição de energia produzida pelo organismo.

São introduzidas noções de termodinâmica com aplicações da primeira

e segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia, aplicadas a vida humana, com o exemplo das dietas calóricas. Em relação aos conceitos da mecânica de fluidos, se apresentam noções de estática e de dinâmica de fluidos, as grandezas físicas pressão e densidade, viscosidade, bem como a força de empuxo e a expressão matemática da equação da continuidade para fluidos, através da apresentação dos princípios de Pascal, de Arquimedes e de Bernoulli, com exemplos aplicados em escoamentos, tais como os encontrados nos rios, nas mangueiras domésticas e o corpo humano como sensor de variação de pressão atmosférica.

Atividades de avaliação



1. Explique a transpiração humana evidenciando a função do calor latente de vaporização nesse processo.
2. Quando um paciente está com febre se usa um pano com álcool para abaixar a temperatura do seu corpo. Explique porque tal procedimento é adotado.
3. Explique o fenômeno de dilatação térmica dos líquidos e gases, explicitando o comportamento da dilatação volumétrica da água.
4. Elabore um pequeno resumo explicando o que acontece nos tímpanos, dentro do ouvido humano, quando se desce uma serra.
5. Explique, usando o princípio de Arquimedes, por que os peixes tem a capacidade de se manter em repouso em diversas profundidades dentro dos corpos d'água.
6. Pesquise sobre o efeito da postura na pressão sanguínea
7. Para uma viagem de férias, bem no início da manhã, quando a temperatura do ar estava em 22°C , o proprietário de um veículo popular encheu o tanque do mesmo, até a tampa, com 50 litros de gasolina. Por motivos pessoais, o mesmo não pôde sair na hora do abastecimento e teve que deixar o veículo estacionado no asfalto até por volta do meio dia, quando a temperatura no local próximo a altura do tanque de combustível do carro, era de 36°C . Caso a expansão do tanque de gasolina fosse desprezada, quanta gasolina o proprietário do veículo perderia em consequência da dilatação térmica? E porque na prática não se observa a gasolina transbordar do tanque?
8. Durante uma experiência com um bloco de 5 Kg de gelo, se observa que

sua temperatura mudou de $-30,0^{\circ}\text{C}$ para $0,0^{\circ}\text{C}$. Logo em seguida, a mistura gelo mais água se mantém até que o gelo derreteu totalmente se transformado em água a $0,0^{\circ}\text{C}$. Calcule a quantidade de energia adicionada ao gelo e a energia necessária para derreter totalmente o gelo a $0,0^{\circ}\text{C}$ (

$$c_{\text{gelo}} = \frac{2090\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}).$$

9. Numa sala fechada com condicionador de ar, existe uma janela envidraçada que mede 1,20 m de largura por 1,60 m de altura, com vidro de 10 mm de espessura. Num dia ensolarado de verão, a temperatura do ar dentro da sala é de 21°C . Pergunta-se: quanta energia é transferida através da janela para dentro da sala durante o dia, que tem duração aproximadamente de 12 horas nessa época do ano?
10. Estima-se que a perda de energia durante uma caminhada é de 3,0 Calorias por minuto, assim, quanto tempo uma pessoa teria que caminhar para gastar a energia adquirida numa refeição (almoço) de 650 Calorias?
11. Use a relação chamada de equação da continuidade para fluidos para calcular o alcance da água projetada horizontalmente de um ponto a 1,20 metros de altura do solo que sai de uma mangueira com bico na ponta, que tem um diâmetro de 0,5 cm.

Referências



HENEINE, I. F. **Biofísica básica**. São Paulo: Atheneu, 1999.

OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: HARBRA, 1982.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física 2**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. **Princípios de física**. Volume 2. André Koch Torres Assis. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. v. 2.

TREFIL, J.; HAZEN, R. M. **Física viva**. Rio de Janeiro: LTC. 2006. v. 1 e 2.

Capítulo

3

Noções de Eletricidade e Magnetismo

Objetivos

- Introduzir alguns conceitos físicos encontrados no estudo da eletricidade, tais como: campo elétrico, energia potencial elétrica, potencial elétrico e capacitância.
- Apresentar os métodos de quantificação dessas grandezas físicas, através da lei de Coulomb, do princípio da superposição, da lei de conservação da carga elétrica e dos processos de eletrização.
- Esclarecer a relação desses conceitos físicos com o funcionamento dos sistemas biológicos, em particular, do potencial de repouso e da densidade superficial de carga, encontrados nas membranas celulares.
- Apresentar os conceitos de força e campo magnético e relacionar os campos elétrico e magnético com os sistemas biológicos e suas aplicações.

1. Introdução

Inicialmente, essa unidade apresenta os conceitos físicos ligados aos fenômenos da eletricidade. Sabe-se hoje que os corpos são constituídos de átomos e que existem duas cargas elétricas - positiva e negativa - chamadas de elétron e de próton, respectivamente. Isso é comprovado ao ser observado que objetos quando eletrizados, se atraem ou se repelem. Ou seja, cargas com sinais iguais se repelem e cargas com sinais diferentes se atraem.

Através de processos de eletrização, tais como, o atrito ou a indução elétrica, os elétrons que se encontram nas órbitas mais afastadas do núcleo dos átomos são atraídos e se movem livremente até alcançarem núcleos positivos de outros átomos. Dessa forma, quando um material, que é constituído de átomos, perde elétrons, se diz que o mesmo ficou com excesso de cargas positivas, ou positivamente carregado. O contrário também é válido, ou seja, quando um material recebe os elétrons livres, diz-se que está com excesso de cargas negativas ou negativamente carregado.

Na natureza é fácil identificar alguns fenômenos em que se tem a comprovação desses processos físicos de transferência de partículas eletricamente carregadas. É o caso das descargas atmosféricas, onde a superfície terrestre, positivamente carregada, atrai os elétrons que estão dentro das nuvens e, assim, surge o aparecimento dos relâmpagos. Outro exemplo é

quando se observa em sistemas biológicos movimentos de íons (átomos que possuem elétrons a mais ou menos) nos processos vitais que ocorrem dentro das células, como por exemplo, o movimento de íons positivos de potássio e de sódio que atravessam as membranas das células do nervo ótico levando sinais até o cérebro.

Além desses fenômenos elétricos apresenta-se outro fenômeno físico, chamado de magnetismo. A literatura mostra que os primeiros estudos e descobertas relativas ao magnetismo datam do século XIII embora alguns historiadores da ciência acreditem que na China e na Grécia antigas já se usavam os conhecimentos relativos a esse fenômeno físico, através da construção de bússolas para navegação.

A descoberta das relações entre o campo elétrico e o campo magnético no início do século XIX foi fundamental e, atualmente, são inúmeras as aplicações tecnológicas que utilizam esses conceitos físicos. Por exemplo, os eletroímãs que são usados na indústria para levantar cargas muito pesadas de ferro-velho; os imãs que são usados em medidores domésticos de eletricidade, em motores e em equipamentos de som, como os alto-falantes e as fitas magnéticas, que são muito utilizadas nos equipamentos de informática (discos rígidos e memórias de computadores) para gravação e armazenamento de dados.

Nos sistemas biológicos o campo magnético pode ser encontrado nas estruturas das moléculas, tais como, hemoglobina e a ferredoxina, e é usado na investigação das propriedades magnéticas desses sistemas através das técnicas de ressonância magnética.

2. As cargas, a força elétrica, o campo e potencial elétrico

2.1. Cargas e a lei de Coulomb

Efeitos como o que acontece quando uma pessoa se penteia rapidamente e observa que os cabelos ficam arrepiados, ou que o pente atrai certos objetos como papéis que estão próximos, são causados pela eletricidade estática. Dessa forma, quando se observam que alguns objetos se atraem ou se repelem, é possível afirmar que os mesmos estão carregados, ou seja, possuem carga elétrica.

Assim, a força com que esses objetos se atraem ou se repelem é chamada de força elétrica e como a carga elétrica não se move nesses objetos é chamada de eletricidade estática. A literatura aponta que os primeiros estudos e descobertas sobre a eletricidade datam do século XVIII e creditados a um grupo de cientistas dos Estados Unidos e da Europa conhecidos por *eletricistas*.

Faça você mesmo! Pique pedaços de papel e com um pente, depois de passado rapidamente e com movimentos firmes no cabelo, aproxime-os. Veja o que acontece. Descreva em algumas palavras sua experiência.

As cargas elétricas induzidas em objetos, como por exemplo, no pente da experiência citada, podem ser positivas ou negativas. Nesse contexto, também se pode observar que as cargas iguais se repelem e cargas diferentes se atraem, ou seja, se o pente atrai os pedaços de papéis picados, significa que eles estão eletricamente carregados com cargas opostas.

Analisando o resultado das experiências, se conclui que quando dois corpos, inicialmente neutros são atritados, adquirem carga elétrica, ou seja, passam a ficar eletricamente carregados. No entanto, como a quantidade de carga adquirida não é criada, mas transferência de um corpo para o outro, através do movimento dos elétrons, também se tem conservação, ou seja, nesse caso, o princípio da conservação da carga elétrica.

Na interação descrita, um corpo negativamente carregado adquire carga elétrica negativa devido à transferência dos elétrons para ele, e o outro corpo deve ficar positivamente carregado devido à perda pela transferência dos elétrons. Na prática, no mesmo mecanismo associado à transferência de elétrons que acontece na experiência do pente e do cabelo, se tem o pente negativamente carregado, ou seja, há uma transferência de elétrons do cabelo para o pente e, assim, o cabelo perde elétrons, ficando positivamente carregado.

Esse mesmo mecanismo pode ser observado numa descarga elétrica, representada no esquema da figura 3.1. Quando uma nuvem, que geralmente está com excesso de cargas negativas, encontra um ponto na superfície terrestre que, via de regra, é mais elevado do que sua vizinhança, como por exemplo, uma árvore, acontece uma atração das cargas contidas no solo e nas nuvens - positiva e negativa - respectivamente e tem o que se chama de descargas elétricas ou popularmente de relâmpago.

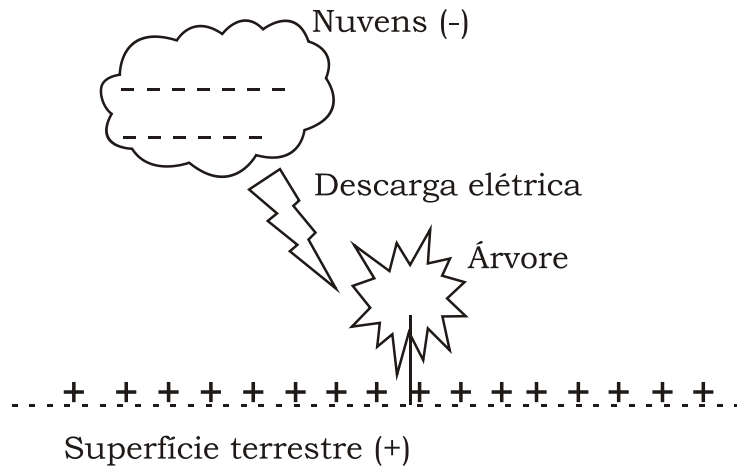


Figura 3.1 – Representação do modelo simplificado das descargas elétricas, cargas positivas na superfície terrestre (+) e negativas nas nuvens (-).

Resumindo, se pode afirmar que os corpos apresentam a propriedade de adquirir cargas elétricas através de atrito entre eles, ou através de indução, processo em que os corpos ganham carga, positiva ou negativa, sem entrar em contato com outros corpos eletricamente carregados, chamado de indução elétrica. Porém, é importante ressaltar que nesses processos de transferência mostrados nos exemplos (pente e cabelo, nuvem e superfície), que são considerados sistemas fechados, a quantidade total de cargas elétricas no sistema é conservada devido ao conceito da lei de conservação da carga elétrica.

Faça você mesmo! Pesquise e elabore um texto descrevendo algumas aplicações tecnológicas que atualmente usam o princípio da eletricidade estática.

Nesse contexto, é possível afirmar que os materiais em que se tem o deslocamento relativamente livre das cargas elétricas são chamados de condutores elétricos, ou simplesmente condutores. O inverso, ou seja, os materiais em que não se observam movimentos (livres) das cargas elétricas são chamados de isolantes.

Segundo a literatura existente foi Charles Augustin Coulomb por volta de 1787 que através de uma sucessão de experimentos com corpos eletricamente carregados concluiu que existia uma força, que ele chamou de força elétrica, que é diretamente proporcional ao produto das cargas dos corpos, expressa em Coulomb (C), e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separam, dada em metros (m), ao qual se chama de lei de Coulomb. Matematicamente, essa lei é escrita, como:

$$F_e = K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2},$$

onde, F_e é o módulo da força elétrica entre as cargas, q_1 e q_2 são os valores das cargas dos corpos, expressos em Coulomb (C), e d é a distância entre os corpos, medida em metros.

Note que nessa equação encontra-se uma constante (K), chamada de constante de Coulomb, ou também de constante eletrostática, que vale $9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$.

Faça você mesmo! Recorrendo a análise dimensional mostre que a unidade da constante de Coulomb (K) no SI é $\frac{N \cdot m^2}{C^2}$.

Para exemplificar a quantificação da força elétrica sobre uma ou mais cargas elétricas, vamos recorrer a um exemplo clássico encontrado em diversos livros de física, mostrado na figura 3.2, em que se podem observar as forças elétricas associadas às duas cargas elétricas q_1 e q_2 , separadas por uma distância d .

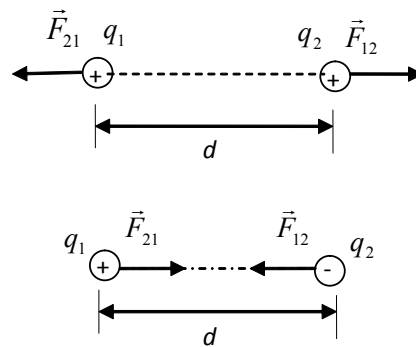


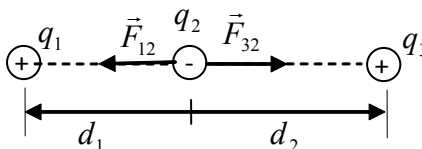
Figura 3.2 – Esquema de forças encontrado num arranjo de duas cargas pontuais q_1 e q_2 , separadas por uma distancia d , que exercem força elétrica entre si (a) cargas com sinais iguais e (b) cargas com sinais contrários.

Note que, quando as cargas q_1 e q_2 possuem valores iguais, com sinais iguais, podendo ser positivos ou negativos, como é mostrado na situação (a) da figura 3.2, o módulo da força sobre a carga q_1 é $F_{21} = K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$ e sobre a carga q_2 é $F_{12} = K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$, ou seja, o módulo da força $\vec{F}_{21}$ é igual ao módulo da força $\vec{F}_{12}$, e essas forças são chamadas de forças de repulsão.

Dessa forma, se os valores das cargas q_1 e q_2 são iguais, e o sinal das cargas é diferente, se obtém o módulo de $\vec{F}_{21}$ igual ao módulo da força $\vec{F}_{12}$ ($F_{21} = F_{12} = K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$), no entanto, a força será de atração, como mostrado na situação (b) da figura 3.2.

É importante saber que, quando se tem várias cargas no espaço, como mostrado no exemplo da figura 3.3, a força resultante em qualquer uma delas será a soma vetorial das forças devido a todas as outras cargas. Isto é chamado de princípio da superposição. Por exemplo, com três partículas a força resultante sobre a carga q_2 será a soma vetorial das forças devido às demais cargas, assim,

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{32}.$$



Faça você mesmo! Para o exemplo mostrado na figura 3.3, monte um diagrama esquemático das forças para cada uma das três cargas, identificando-as como de atração ou de repulsão. Aponte a região onde a força resultante sobre uma partícula negativamente carregada pode ser nula e ache essa distância. Dica! Para resolução dos problemas numéricos envolvendo a lei de Coulomb e o princípio da superposição, faça uma revisão na álgebra vetorial, encontrada na unidade 1.

2.2. O campo elétrico e o movimento das cargas eletricamente carregadas

Na seção anterior tratou-se das forças de atração e/ou de repulsão entre as cargas elétricas sem levar em conta o movimento de atração ou repulsão dessas cargas, que de acordo com a segunda lei de Newton do movimento acontece porque existe uma força externa, ou seja, nesse caso o somatório da(s) força(s) elétrica(s) exercida numa carga é diferente de zero.

No entanto, quando se trata de força elétrica sempre surge uma pergunta: como é possível uma carga, num ponto qualquer do espaço, ter a influência de força(s) elétrica(s) geradas por uma ou mais cargas que estão separadas fisicamente dessa carga, como mostrado nos exemplos das figuras 3.2 e 3.3.

A resposta para essa pergunta é: isso é possível porque toda partícula eletricamente carregada gera um campo elétrico em seu redor, como mostra-

do na representação esquemática da figura 3.4, em que se tem a representação das linhas de campo elétrico para cargas positivas e negativas. Convenção-se que para cargas positivas as linhas de campo elétrico ($\vec{E}$) apontam para fora da carga e nas negativas (elétrons) apontam para dentro da carga, como mostrado na figura 3.4.

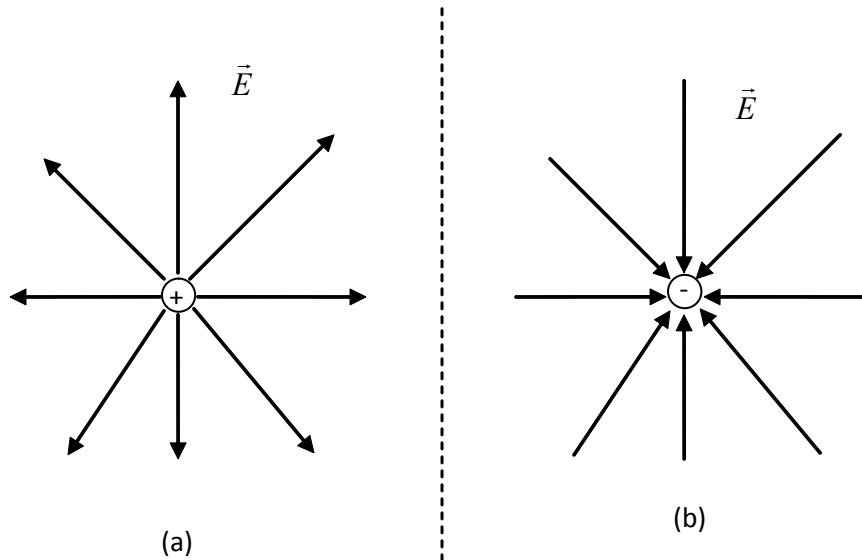


Figura 3.4 – Representação das linhas de campo elétrico para uma carga pontual positiva, que tem sentido saindo da carga (a), e para uma carga pontual negativa, que tem sentido entrando na carga (b).

Por definição, o campo elétrico $\vec{E}$ gerado por uma carga num ponto é igual à força elétrica a que seria submetida uma partícula de prova (carga igual a +1 Coulomb) se essa fosse colocada nesse ponto, dividido pelo valor da própria partícula de prova. Dessa forma, a expressão matemática para quantificação do campo elétrico gerado num ponto por uma carga pode ser escrita como,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0},$$

Note que, a força é uma grandeza vetorial; assim o campo elétrico também é uma grandeza vetorial. Dessa forma, o módulo do campo elétrico pode ser obtido reescrevendo-se a equação matemática acima,

$$E = \frac{1}{q_0} K \frac{q \cdot q_0}{d^2},$$

simplificando a expressão acima e eliminando q_0 , temos:

$$E = K \frac{q}{d^2},$$

onde q é o módulo da carga em que se deseja encontrar o valor do campo elétrico gerado e E é expresso no SI em N/C .

Dessa forma, destaca-se que para a quantificação do campo elétrico gerado por uma carga puntiforme é necessário conhecer o valor da carga e a distância da mesma até o ponto em que se deseja obter o valor do campo elétrico associado a ela, não sendo necessário o conhecimento do valor da carga de prova.

No entanto, só é possível comprovar a existência do campo elétrico num ponto quando se coloca uma partícula de prova carregada e em repouso nesse ponto, e assim, se observa que esta experimenta os efeitos de uma força elétrica associado ao campo elétrico existente.

Faça você mesmo! Use análise dimensional para demonstrar que o campo elétrico $\vec{E}$ é expresso em unidade de N/C .

Para provar que a conversão da direção do campo elétrico gerado em cargas puntiformes (mostrado na figura 3.4) é válida, vamos usar um exemplo clássico de duas cargas dispostas na direção do eixo x , como mostrado na figura 3.5. Nesse exemplo, o campo elétrico gerado pela carga q_1 , por definição será $\vec{E}_{q1} = -\frac{\vec{F}_{12}}{q_2}$, onde a carga q_2 é a carga de prova. Então, como o sinal de q_2 é negativo, o campo elétrico $\vec{E}$ é um vetor com mesma direção, porém, com sentido oposto ao da força $\vec{F}_{12}$. Assim, se observa que o vetor campo elétrico $\vec{E}_{q1}$ tem direção que é toda a região do espaço, apontando para fora da carga q_1 , concordando com o mostrado na figura 3.4.

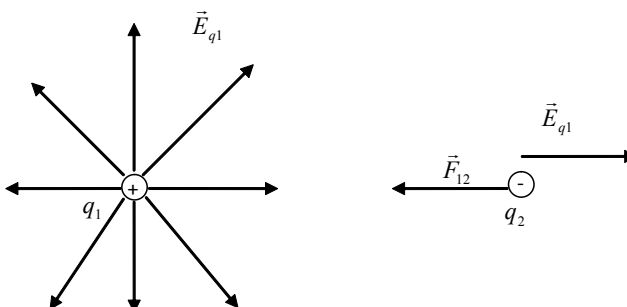


Figura 3.5 – Representação do vetor campo elétrico $\vec{E}_{q1}$ associado à carga q_1 , nas regiões próximas da carga fonte q_1 e da carga de prova q_2 .

Faça você mesmo! Faça a análise vetorial e indique numa figura a direção e o sentido do vetor campo elétrico produzido pela carga q_2 no ponto em que está situada a carga q_1 .

Se num ponto qualquer o campo elétrico for gerado devido à presença de várias cargas pontuais, se define que o campo elétrico resultante nesse ponto é a soma vetorial dos campos elétricos gerados por cada uma das cargas. Assim, veja o exemplo da figura 3.6, em que os valores das cargas são iguais, ou seja, $q_1 = q_2$.

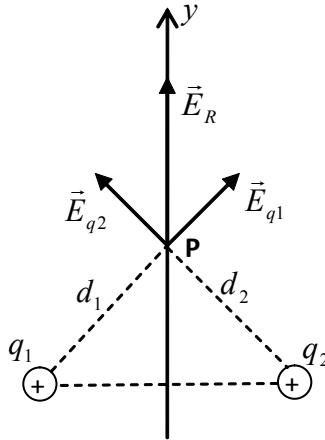


Figura 3.6 – Representação dos vetores campos elétricos $\vec{E}_{q_1}$ e $\vec{E}_{q_2}$ gerados pelas cargas puntiformes $q_1 = q_2$, respectivamente, e do campo elétrico resultante ($\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$) no ponto P.

O campo elétrico gerado no ponto **P**, mostrado na figura 3.6, é o campo elétrico resultante da soma vetorial dos campos $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ ($\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$). Pode-se chegar ao módulo de $\vec{E}_R$ usando álgebra simples. Veja!

O módulo de $\vec{E}_1$ é dado por,

$$E_1 = K \frac{q_1}{d_1^2},$$

em que d_1 é distância entre a carga q_1 e ponto **P**.

O módulo de $\vec{E}_2$ é,

$$E_2 = K \frac{q_2}{d_2^2},$$

em que a distância entre q_2 e **P** é dado por d_2 . Assim, o módulo do vetor campo elétrico resultante pode ser escrito como,

$$E_R = E_1 + E_2 \Rightarrow E_R = K \frac{q_1}{d_1^2} + K \frac{q_2}{d_2^2}.$$

Note que q_1 , q_2 e **P** formam um triângulo equilátero. Assim, se tem que d_1 que representa a distância entre q_1 e **P** e, d_2 a distância entre q_2 e **P**, são iguais a d . Podemos reescrever a equação anterior na forma,

$$E_R = K \frac{q_1}{d_1^2} + K \frac{q_2}{d_2^2} \Rightarrow E_R = K \frac{(q_1 + q_2)}{d^2}.$$

Como se considerou $q_1 = q_2$, ou seja, as cargas com o mesmo valor q de carga elétrica a equação matemática do campo elétrico resultante no ponto **P** será:

$$E_R = \frac{K}{d^2}(q + q) \Rightarrow E_R = \frac{2Kq}{d^2}.$$

Faça você mesmo! Use o mesmo arranjo de cargas, mostrado na figura 3.6, troque o sinal da carga q_2 para negativo. Com isso terá um arranjo chamado de dipolo elétrico. Desenhe os novos vetores campo elétrico para as cargas q_1 e q_2 e o novo vetor campo elétrico resultante. Depois, assuma as cargas $q_1 = 6\mu C$ e $q_2 = -2\mu C$, e a distância do ponto **P** até o centro da reta que une as cargas q_1 e q_2 de 2,0 metros e, assim, calcule um valor para o módulo do novo vetor campo elétrico. Dica! $\mu = 10^{-6}$, então, $6\mu C = 6 \cdot 10^{-6} C$.

Física do dia-a-dia: as descargas elétricas nas nuvens

No início do estudo das cargas elétricas, quando se tratou da transferência de cargas entre os corpos, foi citado como exemplo as descargas atmosféricas. Note que, no modelo simplificado desse exemplo se considerou as nuvens com cargas elétricas negativas, sem levar em conta processos físicos atmosféricos mais complexos. Dessa forma, se pode afirmar que a superfície terrestre fica negativamente carregada. Estudos mostram que essa carga seria da ordem de 500.000 C, distribuída por toda a superfície aproximadamente esférica da terra. Dessa forma, é correto afirmar que a atmosfera próxima a superfície terrestre ficará negativamente carregada pelo processo de indução elétrica (visto anteriormente) e assim, o campo elétrico resultante aponta para baixo, na direção da superfície da terra.

2.3. O movimento de partículas eletricamente carregadas

Observe que nos exemplos da seção anterior, por várias vezes se tratou da força elétrica exercida sobre uma carga de prova colocada num determinado ponto no espaço, ou seja, da força resultante experimentada pela carga elétrica de prova devido à presença de um campo elétrico naquele ponto. Nesse caso, recorrendo a segunda lei de Newton do movimento, é possível concluir que a força elétrica resultante, associada ao campo elétrico num ponto do espaço, experimentada pela partícula de prova, faz com que essa seja acelerada.

Então, se define o módulo e a direção dessa aceleração através da aplicação da expressão matemática da segunda lei de Newton ($\vec{F} = m\vec{a}$).

Sabendo-se que,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0},$$

pode se obter uma expressão para a força elétrica resultante que age sob a partícula de prova, partindo da expressão definida para o campo elétrico. Dessa forma:

$$\vec{F} = q_0 \cdot \vec{E} = m\vec{a}$$

Note que é possível usar essa igualdade para obter uma expressão matemática para a aceleração em função do campo elétrico resultante num ponto. Assim,

$$\vec{a} = \frac{q_0}{m} \cdot \vec{E}$$

Novamente se tem uma expressão vetorial e em relação à direção e o sentido do vetor aceleração, se conclui que, se o sinal de q_0 for positivo, ou seja, $q_0 > 0$, o vetor $\vec{a}$ terá a mesma direção e sentido do vetor campo elétrico ($\vec{E}$), já que a massa é uma grandeza escalar e essencialmente positiva. O contrário também é verdadeiro, se o sinal da carga (q_0) for negativo, ou seja, $q_0 < 0$, o vetor $\vec{a}$ tem mesma direção, porém, sentido oposto ao sentido do vetor campo elétrico ($\vec{E}$).

Para ilustrar esse fenômeno físico de forma acessível ao entendimento de todos, vamos usar um exemplo clássico encontrado nos livros didáticos de física: o que analisa o movimento de uma carga pontual positiva liberada do repouso em um campo elétrico uniforme como mostrado na figura 3.7.

Note que, nesse problema há uma partícula que se desloca sobre o eixo x , ou seja, um movimento unidimensional, partindo do repouso e com aceleração constante ($\vec{a}$), já que se considerou o campo elétrico como uniforme ou constante com o tempo. Dessa forma, para encontrar a velocidade final da partícula ao chegar ao lado de carga negativa, se pode usar uma das equações da cinemática unidimensional, como a conhecida equação de Torricelli: $v_f = v_i^2 + 2a(x_f - x_i)$.

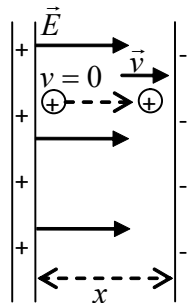


Figura 3.7 – Representação de uma carga de prova, de sinal positivo, liberada do repouso, num campo elétrico uniforme (constante).

Substituindo as condições encontradas no exemplo, mostrado na figura 3.7, na equação de Torricelli, que são: velocidade inicial igual a zero, espaço percorrido x e módulo do vetor aceleração $a = \frac{qE}{m}$, tem-se que,

$$v_f = 0^2 + 2 \cdot \left(\frac{q \cdot E}{m} \right) \cdot x$$

Simplificando, se encontra uma equação matemática para obtenção da velocidade final da partícula dentro do campo elétrico gerado pelas cargas do exemplo mostrado na figura 3.7,

$$v_f = \left(2 \frac{qE}{m} \right) \cdot x,$$

onde, v_f é expresso em m/s^2 .

Lembre-se que, apesar da aceleração ter sido posta como função da carga da partícula de prova, ou seja, da massa da carga de prova e do módulo do campo elétrico, está deve ser expressa em m/s^2 .

Faça você mesmo! Use a análise dimensional e mostre que no caso do exemplo visto que a velocidade final encontrada realmente tem dimensões de velocidade e no SI é expressa em metro por segundo m/s .

2.4. O potencial elétrico de cargas puntiformes

Na seção anterior foi estudado o movimento de uma partícula carregada, concluindo que, quando esta é solta, do repouso, num campo elétrico uniforme, a mesma é acelerada e, com isso, realiza um movimento. Se a partícula realiza movimento, com certeza a força elétrica realiza trabalho e houve uma quantidade de energia envolvida nesse processo físico.

Assim, conhecendo que no estado da eletricidade existe energia envolvida e, sabendo que a força eletrostática é uma grandeza conservativa, também se pode descrever os fenômenos eletrostáticos em termos de energia potencial, que nesse caso chama-se de energia potencial elétrica. É possível chegar na definição de outra grandeza física, chamada de potencial elétrico, ou simplesmente potencial.

A variação da energia potencial elétrica está ligada ao trabalho realizado pelo campo elétrico para deslocar uma partícula carregada numa dada distância. Desse modo, para quantificar a energia potencial elétrica nesse deslocamento, deve-se integrar, para um deslocamento infinitesimal da partícula, o trabalho realizado pelo campo elétrico. Assim, se pode escrever uma expressão matemática que represente esse fenômeno físico,

$$\Delta U = U_B - U_A = -q_0 \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s},$$

onde os pontos A e B representam os pontos inicial e final da trajetória e, U_A e U_B são a energia potencial elétrica nos pontos A e B, respectivamente.

Definindo que o potencial elétrico (V) é a energia potencial elétrica por unidade de carga, chega-se a uma equação matemática para o mesmo expressa por,

$$V = \frac{U}{q_0}$$

Em relação a unidade que o potencial elétrico é expresso se chega até ela fazendo uma análise dimensional da expressão matemática definida para o potencial elétrico. Veja!

$$[V] = \frac{[U]}{[q_0]},$$

Então, no SI, a grandeza física potencial elétrico é expressa em Joules por Coulomb ($\frac{J}{C}$), que se chama de Volt (V).

Voltando a equação da energia potencial elétrica, agora é possível reescrevê-la, como:

$$\Delta V = \Delta \left(\frac{U}{q_0} \right) = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Aplicando esse resultado ao exemplo anterior, de uma partícula que se move num campo elétrico uniforme, se pode obter uma expressão matemática para a quantificação da diferença de potencial do campo elétrico.

Note que para o exemplo $\vec{E} \cdot d\vec{s} = E \cdot ds$, ou seja, como o vetor campo elétrico ($\vec{E}$) é paralelo ao vetor deslocamento ($d\vec{s}$), o cosseno do ângulo entre eles é 1 ($\cos 0^\circ = 1$). Assim,

$$\Delta V = \Delta \frac{U}{q_0} = - \int_A^B E ds$$

Atente para o fato de ter considerado o campo elétrico ($\vec{E}$) uniforme e constante. Assim, é possível retirar E , módulo de $\vec{E}$, de dentro da integral. Com isso,

$$\Delta V = V_B - V_A = -E \int_A^B ds$$

Agora, veja que ds representa o deslocamento infinitesimal e a integral representa o somatório de todos esses deslocamentos. Assim obtém como resultado a distância percorrida pela partícula, que para o exemplo é x . Pode generalizar essa distância e chamar de d , e a expressão a seguir será válida para qualquer direção.

$$\Delta V = V_B - V_A = -Ed,$$

ou,

$$\Delta U = -q_0 Ed$$

É possível chegar a uma expressão para a quantificação da variação do potencial elétrico gerado por cargas pontuais. No entanto, deseja-se achar uma expressão para quantificar o potencial elétrico num ponto qualquer gerado por uma carga puntiforme. Para isso, é comum usar o artifício matemático que a distância do ponto B ao centro da carga é próximo do infinito e, como consequência física disso, se obtém o potencial de referência aproximadamente zero, assim,

$$V = E \cdot d,$$

Substituindo-se a expressão de $E = K \cdot \frac{q}{d^2}$, tem-se que:

$$V = K \cdot \frac{q}{d^2} \cdot d,$$

simplificando,

$$V = K \frac{q}{d},$$

expresso em volts (V).

Aplicando essa expressão do potencial elétrico para uma carga pontual, como mostrada na figura 3.8, d representa a distância radial do centro da carga até um ponto A (r_a), assim todos os pontos que estão a essa mesma distância r_a do centro da carga estão com o mesmo potencial elétrico $\left(V_a = K \frac{q}{r_a} \right)$. Denomina-se essa superfície de superfície equipotencial,

mostrada na figura 3.8.

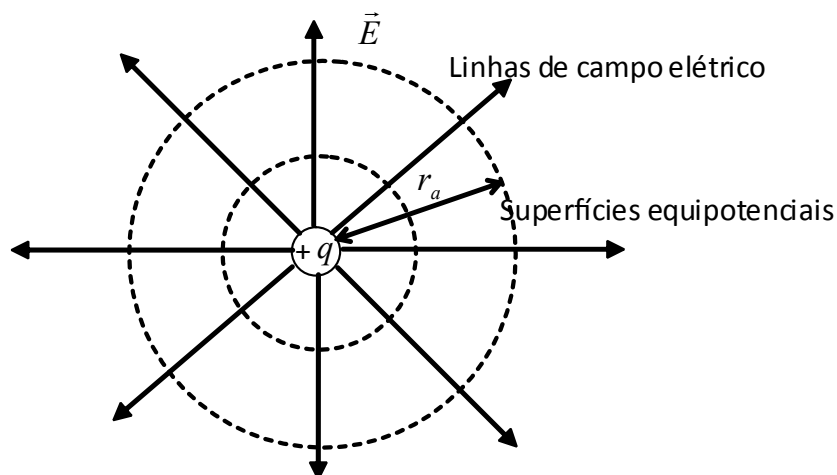


Figura 3.8 – Representação das linhas de campo elétrico ($\vec{E}$) associadas a carga positiva ($+q$) e as superfícies equipotenciais (linhas tracejadas).

Para obter o potencial elétrico num ponto gerado por mais de uma carga, se deve usar o princípio da superposição. Assim, a expressão matemática para o potencial elétrico será:

$$V = \sum_i^n V_i ,$$

substituindo a expressão do potencial elétrico gerado pela i -ésima carga puntiforme, temos que,

$$V = \sum_i^n K \frac{q_i}{r_i} ,$$

sabendo que K é uma constante, se pode retirar do somatório, assim,

$$V = K \sum_i^n \frac{q_i}{r_i}$$

Aplicando esse resultado para duas cargas, como mostrado na figura 3.9, se tem que,

$$V_p = V_{q_1} + V_{q_2} = K \left(\frac{q_1}{d_1} + \frac{q_2}{d_2} \right) .$$

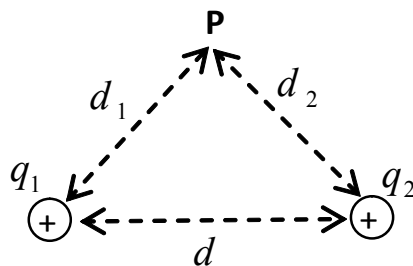


Figura 3.9 – Localização do ponto P no qual se deseja encontrar o potencial elétrico gerado pelas duas cargas puntiformes positiva.

Então,

$$V_p = K \frac{q_1}{d_1} + K \frac{q_2}{d_2}$$

Como se obtém um triângulo equilátero formado pelas distâncias entre q_1 , q_2 e **P**, então, $d_1 = d_2 = d$ e considerando $q_1 = q_2 = q$, pode-se reescrever a equação acima, como:

$$V_p = K \frac{q}{d} + K \frac{q}{d},$$

ou,

$$V_p = 2K \frac{q}{d} \text{ (Volts)}$$

Ou seja, os potenciais elétricos devido às duas cargas, no ponto **P**, são iguais. Efetuando a soma se chega ao potencial elétrico total (V_p) gerado no ponto **P**, que é duas vezes o potencial gerado por uma das cargas.

Física do dia-a-dia: aplicações na biologia (fenômenos elétricos nas células)

A figura 3.10 mostra a representação de um experimento para observar e quantificar fenômenos elétricos no interior das células. Nessa tarefa, geralmente, usam como auxílio, um líquido chamado de solução, que pode ser, por exemplo, cloreto de potássio (KCl) e um instrumento chamado de multímetro acoplado com microeletrodos.

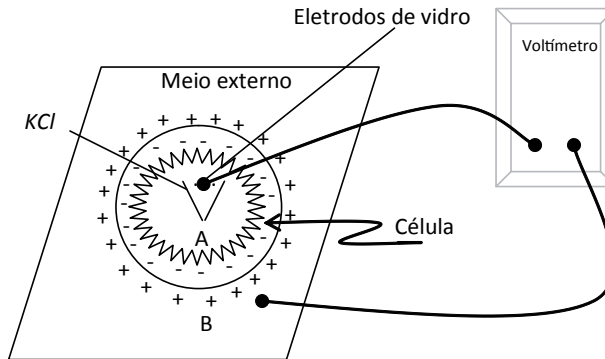


Figura 3.10 – Representação da montagem do experimento para a medida do potencial elétrico de uma célula (adaptado de Okuno et al., 1982).

O processo é relativamente simples, ligando-se pólos do multímetro no interior da célula, com auxílio do microeletrodo e da solução condutora (solução de KCl). Para facilitar o entendimento, considera-se o potencial elétrico observado no meio externo igual a zero; dessa forma, pode-se escrever $V_{ext} = 0$. Assim, é possível obter uma expressão matemática que representa a diferença de potencial entre o interior da célula e o meio externo,

$$\Delta V = V_{int} - V_{ext},$$

então, se $V_{ext} = 0$,

$$\Delta V = V_{int},$$

expresso em volts (V).

Atente para o fato de que, ao chegar ao interior da célula, o microeletrodo deve passar pela membrana intracelular. Nessa região, relatos de experimentos apontam que o multímetro começa a registrar uma diferença de potencial, e que sem influências interna esse potencial permanece inalterado e é chamado de potencial de repouso. Pesquisas mostram que a ordem de valores desses potenciais é de milivolts (mV), como por exemplo, os encontrados nas fibras musculares de animais de sangue quente, que estão entre $-55,0 mV$ e $-100 mV$ (OKUMO et. al., 1982).

A partir da expressão matemática que relaciona campo e potencial elétrico, pode-se quantificar o campo elétrico nas membranas, no interior e no exterior das células. Assim, considerando o campo elétrico uniforme ($\vec{E}$), tem-se que no interior da membrana celular a diferença de potencial pode ser escrita como:

$$\Delta V = -Ed, \text{ mas } \Delta V = V_{int}$$

Então, $E = \frac{-V_{\text{int}}}{d}$ (expresso em N/C), onde, d é a espessura da membrana celular.

Agora, com o valor do campo elétrico para a membrana celular e usando a expressão matemática que relaciona campo e força elétrica, pode-se calcular a força elétrica exercida sobre um íon (numa quebra ou ligação iônica) no interior dessa membrana.

Assim,

$$E = \frac{F}{q} \text{ (onde } q \text{ é a carga do íon),}$$

então, $F = qE$.

Para exemplificar numericamente as quantidades descritas, considere que o potencial de repouso encontrado numa célula das fibras musculares de um coelho foi de $-77,5mV$ (o ponto médio da faixa característica). Assim, o módulo do campo elétrico nesse caso será:

$$E = -\frac{(-77,5mV)}{80\text{\AA}},$$

fazendo as contas, obtém que:

$$E = \frac{77,5 \cdot 10^{-3}V}{80 \cdot 10^{-10}m} = 9,69 \cdot 10^6 N/C,$$

assim, a força elétrica sobre o íon será:

$$F = qE,$$

onde a carga é igual a carga de um elétron ($q = 1e = 1,6 \cdot 10^{-19}C$). Dessa forma:

$$F = (1,6 \cdot 10^{-19}C) \cdot (9,69 \cdot 10^6 N/C) = 1,59 \cdot 10^{-12}N$$

2.5. Capacitância e capacitores

Um capacitor consiste da composição de dois condutores de qualquer formato, com uma diferença de potencial entre eles, sendo que a diferença de potencial é proporcional a carga do capacitor (Q). Dessa forma,

$$\Delta V \propto Q,$$

assim, quando se passa da proporcionalidade para uma igualdade define-se uma expressão matemática da grandeza física chamada de capacitância, ou seja,

$$\Delta V = C \cdot Q,$$

então,

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

Note que C é uma constante de proporcionalidade, ou seja, por definição a capacitância é uma grandeza positiva e representa a medida da quantidade de carga que pode ser armazenada para uma dada diferença de potencial.

A figura 3.11 mostra um capacitor de placas planas e paralelas de área A . Observe na figura que as placas são separadas por uma distância d e que possuem carga de Q e $-Q$, respectivamente. Assim, o campo elétrico resultante está orientado no sentido que vai da carga positiva para a carga negativa.

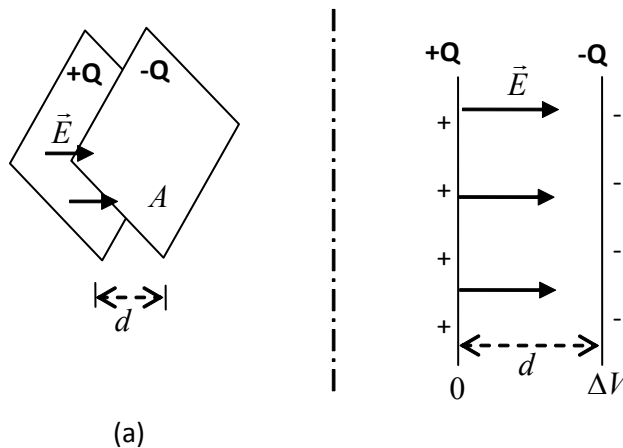


Figura 3.11 – Representação de um capacitor de placas planas (a) e do campo elétrico encontrado no interior do mesmo (b).

Outra definição encontrada é que o módulo da carga por unidade de área em qualquer das placas vale $\sigma = \frac{Q}{A}$. Considerando que as placas estão dispostas bem próximas uma da outra, pode-se afirmar que o campo elétrico entre elas é constante e utilizar a equação matemática obtida para a diferença de potencial elétrico (seção 2.4) para encontrar uma expressão que quantifique a capacidade de armazenamento de carga desse capacitor, chamada de capacitância.

Assim,

$$\Delta V = Ed$$

Note que, nesse caso, o campo elétrico é gerado entre as placas do capacitor, que tem área A , o que difere das situações de campo elétrico gerado por cargas puntiformes. Assim, para resolução desse problema, usa-se a equação matemática para quantificar o campo elétrico entre placas planas,

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0},$$

em que, σ é a densidade de carga elétrica, ou seja, a quantidade de carga elétrica por unidade de área e ϵ_0 é a constante de permissividade do vácuo, usada no cálculo da constante de Coulomb (K), que vale $8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$.

Dessa forma, tem-se que,

$$\Delta V = \frac{Q \cdot d}{\epsilon_0 \cdot A},$$

Substituindo esse resultado na equação para encontrar a capacitância, chegamos a,

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{Q}{\frac{Qd}{\epsilon_0 A}},$$

Assim,

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$

Ou seja, num capacitor de placas planas e paralelas a capacitância é proporcional a área de suas placas e inversamente proporcional a distância que as separa.

Faça você mesmo! Calcule a capacitância de um capacitor de placas paralelas e planas, quadradas, cujos lados medem 2,0 centímetros cada uma e estão separadas uma da outra de 3,0 milímetros.

Física do dia-dia: o potencial de repouso e a densidade de carga de uma membrana celular

Como se viu anteriormente, no modelo simplificado da obtenção do potencial de repouso, mostrado no exemplo da figura 3.10, numa membrana celular existe um potencial de repouso. Assim, é possível considerar essa membrana como um capacitor em que as cargas que provocam a formação do potencial de repouso estão localizadas em torno da mesma, como o mostrado na figura 3.11.

Supondo que a célula fosse cúbica e que a espessura da membrana fosse $75 \text{ \AA}$ e assumindo que para a membrana $\epsilon = 10 \cdot \epsilon_0$, é possível calcular a capacitância elétrica por unidade de área para essa membrana, como,

$$\frac{C}{A} = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{8,8554 \cdot 10^{-11} (C^2 / N \cdot m^2)}{75 \cdot 10^{-10} m} \cong 1,2 \cdot 10^{-2} \frac{F}{m^2}$$

A diferença de potencial V encontrada entre as superfícies, interna e externa, da membrana pode ser determinada combinando as equações

$$C = \frac{Q}{\Delta V}, \sigma = \frac{Q}{A} \text{ e } \frac{C}{A} = \frac{\varepsilon}{d}. \text{ Dessa forma,}$$

$$\frac{C}{A} = \frac{\sigma}{\Delta V},$$

daí, considerando-se que o potencial de repouso medido nas membranas é de $-77,5mV$ (o ponto médio da faixa característica), calcula-se o módulo da densidade superficial de carga da mesma, que será: $\sigma = \frac{C}{A} \cdot \Delta V$.

$$\text{Então,}$$

$$\sigma = 1,2 \cdot 10^{-2} \frac{F}{m^2} (77,5 \cdot 10^{-3} V) = 9,3^{-4} \frac{C}{m^2}$$

3. Noções sobre o magnetismo

3.1. Um pouco de história

Os primeiros estudos e descobertas sobre o magnetismo datam do século XIII, mesmo que alguns historiadores da ciência acreditem que na China e na Grécia antigas já se usavam os conhecimentos relativos a esse fenômeno físico, através da construção de bússolas para navegação.

As pesquisas desenvolvidas no século XIII chegaram a conclusão que todo ímã, independente de sua forma, apresenta dois pólos, denominados de norte e sul. Adicionalmente, ainda se descobriu que esses pólos exercem forças entre si, de maneira semelhante à força elétrica, encontrada nos corpos eletricamente carregados, ou seja, pólos iguais se repelem e pólos diferentes se atraem.

Percebendo semelhança com os fenômenos elétricos avançaram-se nas pesquisas e outros resultados foram publicados em meados do século XVIII. Nessa época, foi provado que, além dos pólos magnéticos exercerem forças atrativas e repulsivas entre si, essas forças eram inversamente proporcionais ao quadrado da distância de separação entre eles, mostrando mais uma vez semelhança entre os fenômenos magnéticos e fenômenos elétricos.

No entanto, é importante mencionar que, apesar das semelhanças encontradas entre os fenômenos elétricos e magnéticos, existe uma diferença física fundamental entre as cargas elétricas (elétrons e prótons) e os pólos

magnéticos, ou seja, as cargas elétricas podem ser isoladas, o que não acontece com os pólos magnéticos, que não podem ser isolados. Na natureza os pólos magnéticos sempre aparecem aos pares.

Mais tarde, no início do século XIX, foi descoberta a relação entre o campo elétrico e o campo magnético, ou seja, que o movimento de partículas eletricamente carregadas (corrente elétrica) produzia um campo magnético e, o inverso também era verdadeiro, ou seja, uma corrente elétrica podia ser produzida num circuito elétrico pelo movimento de um ímã próximo ao circuito. Essas descobertas foram fundamentais e levaram a invenção do eletroímã, um dispositivo composto de várias espiras de fio condutor, que produz um campo magnético quando é percorrido por uma corrente elétrica.

Atualmente, são inúmeras as aplicações tecnológicas que utilizam os conceitos de eletricidade e magnetismo. Por exemplo, os eletroímãs são usados na indústria para levantar cargas muito pesadas de ferro-velho; os ímãs, em geral, são usados em medidores domésticos de eletricidade, em motores e em equipamentos de som, como os alto-falantes. As fitas magnéticas são muito utilizadas nos equipamentos de informática (discos rígidos de computadores), principalmente, para gravação e armazenamento de dados, como áudio e vídeo.

Faça você mesmo! Faça uma pesquisa e elabore um texto sobre os campos magnéticos encontrados na natureza.

3.2. A força magnética e o campo magnético

A figura 3.12 mostra a representação das linhas de campo magnético encontradas num ímã. Note que, o sentido das linhas do campo magnético $\vec{B}$, em qualquer região que circunda o ímã, vai do pólo norte (N) para o pólo sul (S). Esse fato pode ser comprovado observando a agulha de uma bússola nessa localização.

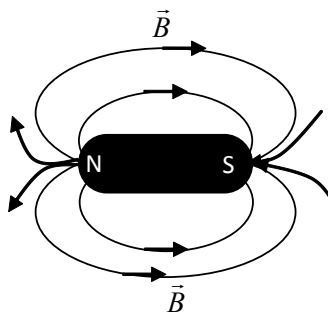


Figura 3.12 – Representação das linhas de campo magnético ($\vec{B}$) encontradas num material com magnetismo permanente, como por exemplo, um ímã. As letras N e S representam os pólos norte e sul, respectivamente.

Faça você mesmo! Com ajuda de uma bússola defina o sentido das linhas de campo magnético de um ímã, depois com limalha de ferro nas vizinhanças do ímã observe o comportamento dessas linhas.

O método usado para determinação do módulo do campo magnético ($\vec{B}$) num ponto é similar ao usado para quantificar o campo elétrico num ponto, ou seja, através da medição de uma força. Nesse caso, a força magnética ($\vec{F}_B$) exercida numa partícula de prova, colocada nesse ponto.

Dessa forma, nos experimentos mencionados na seção anterior, constata-se que a força magnética depende da carga (q) e da velocidade (v) da partícula de prova e que sua direção é perpendicular a velocidade e a ao campo magnético ($\vec{B}$). Assim, chega-se a conclusão de que apesar das semelhanças entre os fenômenos elétricos e magnéticos, a força magnética tem um comportamento um pouco mais complexo do que a força elétrica e sua formulação matemática é baseada no produto vetorial (multiplicação de vetores) dos vetores velocidade e campo magnético. Dessa forma, pode-se escrever a força magnética como:

$$\vec{F}_B = q \cdot \vec{v} \times \vec{B},$$

assim, a magnitude (módulo) do vetor força magnética é dado por,

$$F_B = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta,$$

onde, $|q|$ é o módulo do valor da carga q , v e B são os módulos dos vetores velocidade e campo magnético, respectivamente, e θ é o ângulo entre os vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$.

Quando os vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$ são paralelos ($\theta = 0^\circ$) e quando eles são antiparalelos ($\theta = 180^\circ$), o termo $\sin \theta$ é igual a zero e assim o módulo da força magnética (F_B) também é igual a zero. Caso $\theta = 90^\circ$, o módulo do vetor força magnética (F_B) é máximo: $F_B = |q| \cdot v \cdot B$.

Sabendo que no SI a força magnética é dada em Newton (N) e a velocidade em $\frac{m}{s}$, é possível usar análise dimensional e determinar a unidade do campo magnético. Assim,

$$N = C \cdot \frac{m}{s} \cdot [B],$$

então,

$$[B] = \frac{N \cdot s}{C \cdot m} = T \text{ (tesla)}$$

A direção do vetor força magnética ($\vec{F}_B$), por definição, é perpendicular tanto ao vetor velocidade ($\vec{v}$) quanto ao vetor campo magnético ($\vec{B}$), como mostrado as duas situações da figura 3.13.

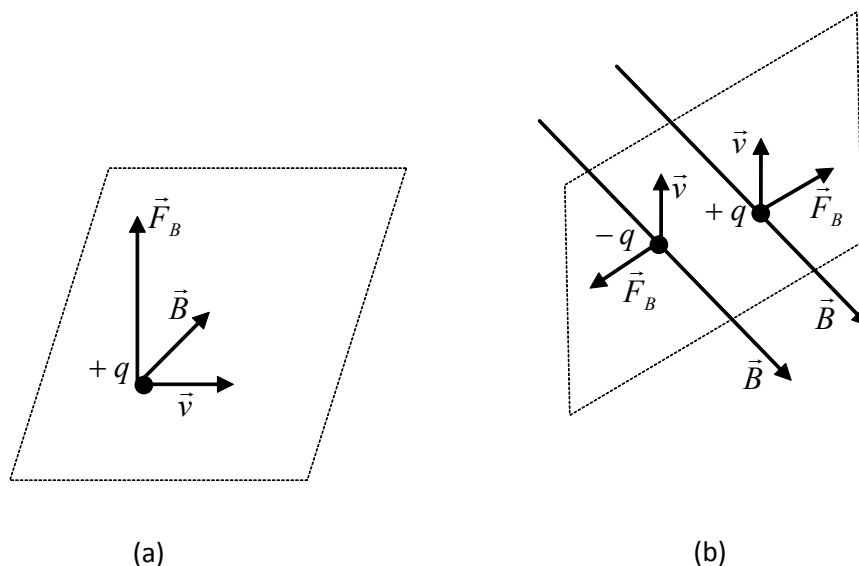


Figura 3.13 – Representação da força magnética sobre uma partícula carregada ($+q$), que se desloca com velocidade $\vec{v}$ num campo magnético (a) e das forças magnéticas exercidas em duas partículas ($+q$ e $-q$) que desloca com a mesma velocidade $\vec{v}$ na presença de um campo magnético ($\vec{B}$).

Para a determinação da direção e sentido da força magnética, mostrada nas situações da figura 3.13, usa-se a regra da mão direita. Aponte os dedos de sua mão direita na direção do vetor velocidade ($\vec{v}$), depois os curve até que encontrem a direção do vetor campo magnético ($\vec{B}$). Pronto! Seu polegar da mão direita mostra a direção e o sentido de vetor resultante do produto vetorial $\vec{v} \times \vec{B}$ e, assim, se a carga for positiva ($+q$) o vetor força magnética ($\vec{F}_B$) vai estar na mesma direção e sentido de $\vec{v} \times \vec{B}$, e se a carga for negativa ($-q$) o vetor $\vec{F}_B$ terá sentido oposto, como mostrado nos dois casos da representação na figura 13 (b).

Veja na figura 3.14, a representação do movimento de um elétron no interior de um campo magnético, como o encontrado nos tubos de imagem dos aparelhos de televisão. Nesses dispositivos eletrônicos, se encontra um tubo envolvido por uma bobina de fios de cobre que gera um campo magnético. Considerando nesse exemplo, que o módulo do vetor campo magnético ($\vec{B}$) seja de $3,0 \cdot 10^{-3}$ teslas (T) e que $\vec{B}$ faz um ângulo θ de 60° com o vetor velocidade ($\vec{v}$), que por sua vez tem módulo de $9,5 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$, pode-se determinar a aceleração a que esse elétron é submetido no interior do tubo de imagem, mostrado na figura 3.14.

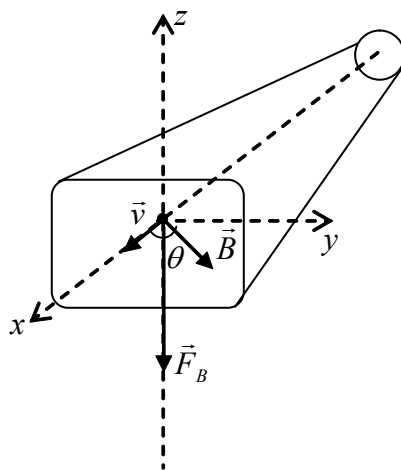


Figura 3.14 – Representação do movimento de um elétron dentro de um tubo de imagem. A força magnética ($\vec{F}_B$) está direcionada no sentido negativo do eixo x e os vetores velocidade e campo magnético estão no plano xy , que é perpendicular ao eixo x .

Para se calcular a aceleração do elétron, se utiliza a equação matemática para a quantificação do módulo da força magnética ($\vec{F}_B$) combinada com a equação da segunda lei de Newton aplicada ao problema. Então, o módulo da força $\vec{F}_B$ é dado por:

$$F_B = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta,$$

e, a equação da segunda lei de Newton aplicada a esse problema será:

$$F_B = m_e \cdot a,$$

em que m_e é a massa do elétron.

Assim, substituindo as igualdades, tem-se que:

$$m_e \cdot a = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta,$$

dessa forma,

$$a = \frac{|q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta}{m_e}$$

Aplicando os valores dados no exemplo e, sabendo que a carga e a massa do elétron valem $1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ e $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, respectivamente, tem-se que:

$$a = \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (9,5 \cdot 10^6 \text{ m/s}) \cdot (3,0 \cdot 10^{-3} \text{ T}) \cdot (\sin 60^\circ)}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}},$$

assim, a aceleração será:

$$a \cong 4,33 \cdot 10^{15} \frac{m}{s^2}$$

Lembre que, segundo a regra da mão direita, o vetor força magnética ($\vec{F}_B$) tem direção perpendicular aos vetores velocidade ($\vec{v}$) e campo magnético ($\vec{B}$). No entanto, se a carga for negativa, o sentido desse vetor $\vec{F}_B$ é oposto ao sentido do vetor resultante da multiplicação entre os vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$ (produto vetorial - $\vec{v} \times \vec{B}$). Por isso $\vec{F}_B$ está no sentido negativo do eixo z, na figura 14.

Assim a aceleração do elétron é uma grandeza vetorial e é resultado da multiplicação de um escalar positivo (massa do elétron), por um vetor, o vetor força magnética $\vec{F}_B$. O resultado é que $\vec{a}$ apresenta mesma direção e sentido que $\vec{F}_B$, ou seja, direção negativa do eixo z.

Faça você mesmo! Prove por meio de análise dimensional que a unidade encontrada para a aceleração do elétron, mostrado no exemplo da figura 3.14 está correta.

Física do dia-dia: a importância dos campos elétricos e magnéticos nos sistemas biológicos

Os sistemas biológicos encontrados nos seres vivos estão diretamente ligados aos campos elétricos e magnéticos e, ainda produzem um terceiro campo, que é a combinação desses dois, chamado de campo eletromagnético.

As células do corpo humano, como apresentado em exemplos anteriores dessa unidade, produzem campo elétrico, que se propaga pelo corpo e pode ser medido através dos exames como o eletrocardiograma e eletroencefalograma. Esses exames auxiliam no diagnóstico do funcionamento dos sistemas biológicos e, conseqüentemente ajudam a detectar doenças relacionadas ao coração e ao cérebro, respectivamente. O campo elétrico também é responsável pela manutenção das ligações entre as moléculas e átomos nos sistemas biológicos e está relacionado com a energia liberada nas reações bioquímicas desses sistemas.

Isso é possível porque o impulso nervoso gera uma corrente elétrica, que é definida, de forma simplória, como sendo o movimento de cargas elétricas no tempo, ou formalmente, como a taxa de variação (derivada) da quantidade de carga com o tempo $i = \frac{dQ}{dt}$. Daí, como foi discutido nessa seção, havendo a presença de uma corrente elétrica existirá a produção de um campo magnético nos sistemas biológicos.

Nos sistemas biológicos o campo magnético pode ser encontrado nas estruturas das moléculas, tais como, hemoglobina e a ferredoxina, e é usado na investigação das propriedades magnéticas desses sistemas através das técnicas de ressonância magnética.

A combinação desses dois campos, ou seja, o campo eletromagnético (que será mostrado na unidade seguinte) pode ser encontrado nos sistemas biológicos (seres vivos), principalmente, sob a forma de energia (calor). Dessa forma, o campo eletromagnético é identificado em fenômenos tais como a visão e a fotossíntese.

Na visão a luz que incide sobre o globo ocular através de ondas eletromagnéticas forma uma imagem que é transformada em impulso elétrico e enviada a uma parte do cérebro para seu reconhecimento. Na fotossíntese, a energia da luz é absorvida pelas plantas e transformada em alimento, através da produção de seiva e sais minerais.

Faça você mesmo! Pesquise sobre o funcionamento dos aparelhos de eletrocardiograma, eletroencefalograma e de ressonância magnética.

Síntese do Capítulo



Nesse capítulo foram apresentados conceitos de eletricidade e magnetismo, duas áreas da física, visando auxiliar na identificação de relações desses conceitos com os sistemas biológicos. Inicia-se discutindo o conceito de carga elétrica e os fenômenos da eletricidade estática, juntamente com os processos de eletrização e a lei da conservação da carga elétrica.

Introduz-se também, o conceito de força elétrica e sua quantificação, através da lei de Coulomb, o princípio da superposição e a relação entre força elétrica e campo elétrico, gerado por cargas puntiformes, como o gerado por um dipolo elétrico e o movimento de partículas carregadas no interior de um campo elétrico, concluindo com o exemplo das descargas atmosféricas.

Na sequência se discute o conceito de energia potencial elétrica, a quantificação do potencial elétrico gerado por cargas puntiformes, as superfícies equipotenciais e aplicações na biologia, através da apresentação dos fenômenos elétricos nas células, particularmente, o potencial de repouso encontrado numa membrana celular.

Finalmente se apresenta o conceito de capacitância, mostrando o exemplo dos capacitores de placas planas e paralelas e, se faz uma discus-

são sobre o potencial de repouso e a densidade superficial de cargas elétricas encontradas numa membrana celular. Apresenta-se também um rápido histórico acerca das descobertas relativas ao magnetismo e os conceitos de força e campo magnéticos, encerrando a unidade com uma discussão sobre a importância dos campos elétrico e magnético, nos sistemas biológicos e suas aplicações.

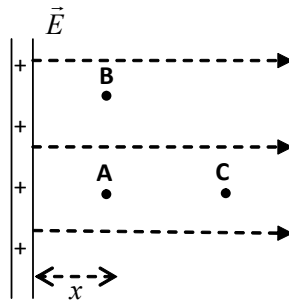
Atividades de avaliação



1. Sabendo-se que a constante de Coulomb (K) é igual a $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ e que ϵ_0 representa a permissividade do vácuo, mostre que K vale $9,0 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$. Use análise dimensional e prove que a unidade em que K é expresso está correta.
2. Para verificar novamente o efeito da eletricidade estática num dia de céu claro, encha um balão e atrite-o com um pedaço de lã de algodão ou com seu cabelo. Solte perto de uma parede e observe o que acontece. Descreva o que você observou com sua experiência.
3. Procure um laboratório didático de Física e com o gerador de cargas elétricas, chamado de gerador de Van der Graff, um recipiente de plástico (raso) com uma camada de aproximadamente 1 cm de óleo comestível e pó de esponja de aço, faça o experimento para observar as linhas de campo elétrico em vários pontos ao longo do recipiente. Tente desenhar as situações observadas e escreva um relatório de sua experiência.
4. Pesquise e elabore um texto sobre o funcionamento do tubo de raios catódicos.
5. Faça uma pesquisa e escreva um texto sobre o campo elétrico atmosférico.
6. Usando a definição de potencial elétrico e o princípio da superposição mostre que nas vizinhanças de um ponto onde o potencial elétrico é zero existem cargas elétricas.
7. Pesquise e explique o porquê do pólo norte geográfico da Terra atrair o pólo norte magnético de um ímã.
8. Considere que num átomo de Hidrogênio, um elétron e um próton se encontram separados de uma distância de aproximadamente $6,4 \text{ \AA}$. Calcule o módulo da força elétrica existente e faça uma figura mostrando a repre-

sentação dos vetores força elétrica, para as duas cargas, classificando-as de atração ou repulsão. Calcule também o módulo do campo elétrico na carga negativa e desenhe na figura a direção e o sentido do vetor campo elétrico nesse ponto.

9. Considere que no *canhão de elétrons* de um tubo de raios catódicos se tem a geração de um campo elétrico uniforme, com módulo igual a $700 \cdot 10^6 \frac{N}{C}$. Calcule a força elétrica no qual um elétron colocado nesse canhão é submetido, a aceleração alcançada pelo elétron e a velocidade final após um tempo de $20 \mu s$, considerando que este foi solto do repouso, a distância percorrido nesse tempo e por fim, a energia cinética do elétron e o trabalho do campo elétrico para deslocar o elétron a distância encontrada.
10. Obtenha a diferença de potencial elétrico nos pontos **A**, **B** e **C**, mostrados na figura abaixo. Considere o campo elétrico uniforme, com intensidade de $8,0 \cdot 10^6 \frac{N}{C}$, os pontos **A** e **B** eqüidistantes da superfície infinita carregada (positiva), a distância entre **A** e **B** de $2,0 \text{ \AA}$ e a distância entre **A** e **C** de $5,0 \text{ \AA}$.



11. O campo elétrico numa membrana celular vale $6,5 \cdot 10^6 \frac{N}{C}$. Sabendo que sua espessura é de $85 \text{ \AA}$, calcule o potencial de repouso observado nessa membrana e a força elétrica exercida por esse campo elétrico sobre um íon Cl^- (considere a carga de Cl^- igual a carga de um elétron).
12. Um experimento realizado com um axônio que tem a espessura de sua membrana igual a $9,0 \cdot 10^{-10}$ metros, mostrou um potencial de repouso de -85 mV . Sabendo que sua permissividade elétrica é $\epsilon = 8\epsilon_0$ calcule a intensidade do campo elétrico na membrana, a força exercida por esse campo elétrico em íon KCl , e a partir de capacitância por unidade de área, que é de $2,5 \frac{F}{m^2}$, calcule sua densidade superficial de carga.

13. Calcule o módulo e indique a direção e sentido do campo magnético necessário para equilibrar o peso de próton e mantê-lo em movimento horizontal numa situação em que seu vetor velocidade, que tem módulo de $4,0 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$ é perpendicular ao vetor campo magnético, ou seja, faz um ângulo reto com o vetor campo magnético.

Referências



- HENEINE, I. F. **Biofísica básica**. São Paulo: Atheneu, 1999.
- OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: HARBRA, 1982.
- RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física 3**. 5a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. **Princípios de física**. André Koch Torres Assis. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. v. 3.
- TREFIL, J.; HAZEN, R. M. **Física viva**. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v. 2 e 3.

Capítulo

4

Noções de ondulatória e óptica

Objetivos

- Apresentar conceitos físicos ligados ao estudo da ondulatória e à óptica.
- Introduzir os conceitos de onda e suas propriedades (amplitude, frequência, comprimento de onda, entre outras), velocidade de propagação e taxa de transferência de energia das ondas em meios elásticos, ondas sonoras e efeito Doppler.
- Analisar aspectos relativos a natureza da luz e o modelo de raio, a reflexão e refração da luz e a lei de Snell.
- Estabelecer relações entre os conceitos físicos estudados e funcionamento do mecanismo da fala e da audição humana e da visão dos insetos.

1. Introdução

Nesse capítulo serão trabalhados os conceitos físicos ligados a ondulatória e a óptica visando fornecer subsídios para que se possa entender a relação desses com os mecanismos da fala e da audição humana e a visão dos insetos. Analisa-se, inicialmente, a essência do movimento ondulatório, particularmente as ondas mecânicas, que são perturbações ondulatórias que se propagam através de um meio, tais como, as ondas produzidas em cordas e as ondas sonoras.

As ondas mecânicas são subdivididas em ondas transversais, como as produzidas em cordas, em que as partículas do meio se movimentam perpendicularmente a direção de propagação da onda; e em longitudinais, como as ondas sonoras, em que as partículas ou elementos do meio, se propagam paralelamente a velocidade de propagação da onda.

Um modelo matemático da onda senoidal é explorado e são introduzidas grandezas físicas, tais como; amplitude, comprimento de onda, frequência, período, frequência angular, número de onda angular, que servem de base para uma análise da taxa de transferência de energia das ondas em meios elásticos e do efeito Doppler. Adicionalmente, apresenta uma relação desses conceitos físicos através do exemplo de um modelo simplificado do mecanismo da voz e da audição humanas.

Em relação aos conceitos físicos encontrados na óptica, destaca-se a natureza da luz e o modelo de raio, juntamente com as leis de reflexão e de refração

e a lei de Snell, exemplificando a aplicação desses conceitos físicos através da representação da formação de imagens de objetos pelos dispositivos diotrópicos, encontrados nos omatídeos, ou seja, o dispositivo de visão dos insetos.

2. Noções de ondulatória

2.1. O modelo e a natureza das ondas

As ondas, ao contrário das partículas, não transportam massa, transportam energia, e sua classificação leva em conta a necessidade de um meio de propagação. Caso a onda necessite de um meio de propagação é classificada de onda mecânica, caso contrário, é classificada como onda eletromagnética, ou seja, têm a propriedade de se propagar no vácuo. São exemplos de ondas mecânicas, as ondas sonoras, as ondas produzidas em cordas e as ondas observadas nos corpos d'água, como as ondas do mar; e de ondas eletromagnéticas, a luz e a radiação solar.

A figura 4.1 mostra o perfil de uma onda que se chama de senoidal. Ela pode ser definida através de alguns parâmetros, tais como, crista, vale ou depressão, comprimento de onda, frequência, velocidade e amplitude da onda.

O ponto com maior deslocamento da onda é chamado de crista da onda, assim como o ponto mais baixo é chamado de vale ou depressão. Note que a crista e o vale de uma onda movem-se, fazendo com que um determinado ponto da onda se mova e alterne entre as posições de crista e de vale. Dessa forma, diz-se que numa onda ou num movimento ondulatório, uma partícula descreve um movimento harmônico simples em torno de sua posição de equilíbrio, como mostrado na figura 4.1.

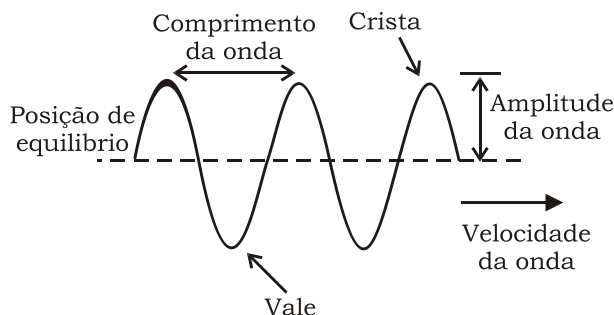


Figura 4.1 – Perfil de uma senoidal, com a indicação de sua posição de equilíbrio, cristas, vales, amplitude, comprimento e direção da velocidade.

O comprimento de onda (λ) é determinado pela distância entre dois pontos idênticos da onda, ou seja, é a distância entre duas cristas ou dois vales (veja figura 4.1). A frequência da onda (f) é inversamente proporcional ao pe-

ríodo da onda (T), que por sua vez, é definido como sendo o tempo em que uma partícula realiza uma oscilação completa, ou seja, o tempo em que partícula gasta para se deslocar entre duas cristas ou dois vales consecutivos.

Dessa forma, a equação matemática que representa a frequência da onda é:

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

em que o tempo é dado em segundo e a unidade da frequência é expressa em Hertz ($1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}$).

A amplitude (A) de uma onda é definida como sendo o deslocamento máximo de uma partícula em relação a sua posição de equilíbrio, como mostrado na figura 4.1.

A figura 4.2 mostra a representação de um modelo de onda progressiva, uma onda senoidal que se desloca com velocidade ($\vec{v}$) para a direita.

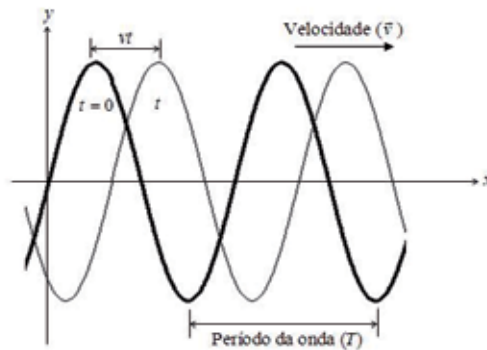


Figura 4.2 Representação de uma onda senoidal progressiva deslocando-se para a direita com velocidade ($\vec{v}$) nos instantes $t = 0$ (curva que cruza a origem do plano xy) e t .

No instante $t = 0$ a curva que representa a onda pode ser matematicamente escrita como:

$$y = A \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right),$$

em que A é a amplitude e λ é o comprimento da onda.

Observe que a onda se desloca para a direita, com velocidade $\vec{v}$ e no instante t percorre uma distância x que é equivalente a vt . Assim, se define que uma onda que se desloca para direita tem a função de onda na forma $f(x - vt)$ e para a esquerda, terá sua função de onda $f(x + vt)$. Dessa forma:

$$y = A \cdot \text{sen}\left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot (x - vt)\right]$$

O tempo que a onda leva para se deslocar um comprimento de onda, ou seja, a distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos, como mostrado na figura 4.2, é o período da onda (T). Dessa forma, é possível identificar uma expressão matemática para a velocidade da onda em função de período (T) e do comprimento de onda (λ). Assim,

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Dessa forma, pode-se reescrever a expressão matemática que representa o modelo de onda, mostrada acima como:

$$y = A \cdot \text{sen} \left[2\pi \cdot \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right],$$

e a função de onda, agora, pode ser escrita relacionada com as novas grandezas: o número de onda (k) e frequência angular (w). Isto é,

$$y = A \cdot \text{sen}(kx - wt),$$

onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ e $w = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$. Dados em $\frac{\text{rad}}{\text{cm}}$ e $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$, respectivamente.

Analisando a equação matemática da onda senoidal mostrada acima, pode-se constatar que $y = 0$ quando $t = 0$ e $x = 0$, concordando com o mostrado na curva da representação da onda da figura 4.2. No entanto, para escrever uma equação matemática genérica, em que não necessariamente a curva da onda tem deslocamento $y = 0$ quando $t = 0$ e $x = 0$, utiliza-se uma variável chamada de constante de fase (ϕ). Assim,

$$y = A \cdot \text{sen}(kx - wt + \phi)$$

Analise o exemplo da figura 4.3 em que uma onda senoidal se desloca no sentido positivo do eixo x , com 40 repetições por segundo e que em no instante $t = 0$ as coordenadas de um ponto sejam $x = 0$, $y = 15,0$ centímetros.

Note que de acordo com a figura 4.3 o comprimento de onda é de 60,0 centímetros. Dessa forma, pode-se calcular o número (k) de onda. Então,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{60,0\text{cm}} \cong 0,033 \frac{\text{rad}}{\text{cm}}$$

Sabendo que a onda apresenta frequência de 40 repetições por segundo, pode-se obter a frequência da onda e calcular o período e a frequência angular da mesma. Assim,

$$f = \frac{40}{\text{s}} = 40\text{s}^{-1} = 40\text{Hz}$$

e o período (T) será:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40s^{-1}} \cong 0,025s ,$$

e a frequência angular (w) pode ser obtida por,

$$w = 2\pi f = 2\pi \cdot 40s^{-1} \cong 251,30 \frac{rad}{s}$$

A velocidade (v) pode ser obtida pela relação matemática $v = \frac{\lambda}{T}$. Assim,

$$v = \frac{60cm}{0,033s} = 2,0 \frac{cm}{s}$$

Dessa forma, a equação matemática que representa a onda mostrada na figura 4.3, será:

$$y = 15,0 \cdot \text{sen}(0,033x - 251,30t + \phi)$$

Daí, a constante de fase (ϕ) pode ser obtida substituindo a condição dada na equação anterior, que no instante $t = 0$ as coordenadas de um ponto sejam $x = 0$, $y = 15,0$ centímetros. Dessa forma,

$$15,0 = 15,0 \cdot \text{sen}\phi ,$$

assim,

$$\text{sen}\phi = 1 \text{ ou } \phi = \frac{\pi}{2}$$

Agora, a expressão matemática que representa a onda pode ser reescrita na forma:

$$y = 15,0 \cdot \text{sen}\left(0,033x - 251,30t + \frac{\pi}{2}\right) ,$$

ou,

$$y = 15,0 \cdot \cos(0,033x - 251,30t)$$

Note que uma onda senoidal que é defasada de $\frac{\pi}{2}$ ou de 90° , pode ser representada por uma função cosseno, e assim,

$$y = A \cdot \cos(kx - wt)$$

é chamada de onda cossenoidal.

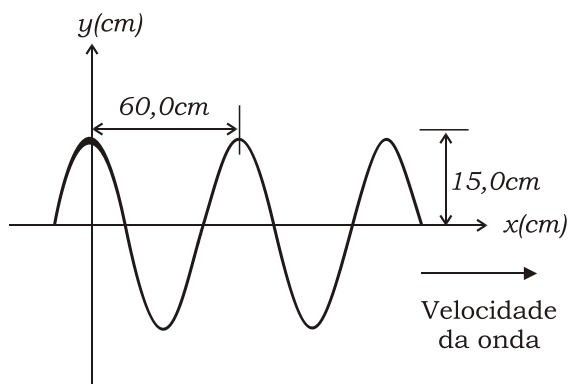


Figura 4.3 Representação de uma onda senoidal que se desloca para a direita no eixo x com a frequência de 30 repetições por segundo (Hz).

2.2. Velocidade de propagação e taxa de transferência de energia das ondas em meios elásticos

A figura 4.4 mostra a representação de uma onda produzida numa corda, um meio elástico. Por definição, para ondas mecânicas, como as produzidas em cordas, mostradas na figura 4.4, em que a amplitude é relativamente pequena em relação ao comprimento de onda, a velocidade da onda depende do meio em que ela se propaga e da tensão que é aplicada na corda. Assim, a equação matemática, mostrada a seguir, é válida para a quantificação da velocidade dessa onda,

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

em que T é a tensão aplicada na corda e μ é a massa por unidade de comprimento da corda, dado em $\frac{kg}{m}$. A massa da corda pode ser determinada por $m = \mu \cdot \Delta S$, onde ΔS é o comprimento da corda.

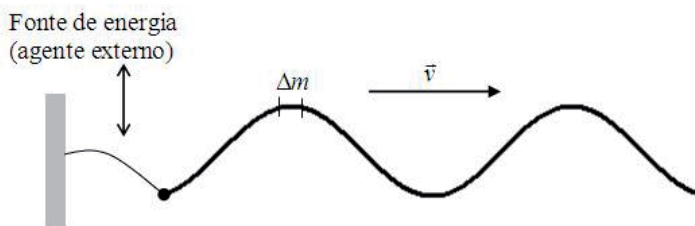


Figura 4.4 Representação de uma onda senoidal produzida numa corda, que se desloca para a direita. Do lado esquerdo a fonte de energia, ou seja, o agente externo que faz com que a onda seja produzida. (Δm) é um elemento de massa que se propaga na corda.

Na propagação das ondas mecânicas como as produzidas em cordas, mostrada na figura 4.4, há transporte de energia e essa energia ao chegar à extremidade do meio, que no exemplo é uma corda, é transferida. Note que do lado esquerdo da figura 4.4 tem-se um agente externo, que fornece energia para que a onda seja produzida, que pode ser uma pessoa que aplica uma força de tensão na extremidade da corda para a produção de uma onda. Assim, é correto afirmar que esse agente externo realiza trabalho mecânico para produzir as oscilações, como foi visto na unidade 1. Na realização de trabalho pelo agente externo há uma transferência de energia para a corda, que se propaga ao longo do seu comprimento até alcançar sua outra extremidade.

Dessa forma, considerando um elemento de massa (Δm) da corda, que se move na direção vertical com velocidade (v_y) ao longo de todo o seu comprimento, a energia cinética associada a esse elemento, será:

$$\Delta K = \frac{1}{2}(\Delta m)v_y^2$$

Note que um elemento de massa (Δm) dessa corda, move-se somente na vertical, enquanto que o movimento da onda ocorre na direção horizontal, ou seja, na medida em que o pulso da onda se propaga horizontalmente, cada elemento de massa da corda, que representa segmentos da corda, é perturbado e se move na direção vertical, perpendicular a direção de propagação da onda. Assim, a posição do elemento Δm varia no eixo y para cada coordenada x constante.

Sabendo que a equação matemática que representa esse tipo de onda no instante $t = 0$ é:

$$y = A \cdot \text{sen}(kx - \omega t),$$

é possível determinar a velocidade na direção y , derivando a expressão matemática que representa a posição de um elemento de massa da corda na direção y , mostrada acima. Daí,

$$v_y = \left. \frac{dy}{dt} \right|_{x=\text{constante}} = \frac{\partial y}{\partial t},$$

então, derivando a equação matemática de y (posição) em relação a t , para x constante tem-se que:

$$v_y = -\omega \cdot A \cdot \cos(kx - \omega t)$$

Agora, substituindo esse resultado na equação da energia cinética [$\Delta K = \frac{1}{2}(\Delta m)v_y^2$], tem-se que:

$$\Delta K = \frac{1}{2}(\Delta m) \cdot [-\omega \cdot A \cdot \cos(kx - \omega t)]^2$$

Note que o elemento de massa (Δm) tem um comprimento Δx , assim, Δm pode ser escrito como função de μ , que representa a massa por unidade de comprimento, e de Δx , na forma:

$$\Delta m = \mu \cdot \Delta x$$

Então, a equação para energia cinética do elemento de massa (Δm) será:

$$\Delta K = \frac{1}{2}(\mu \cdot \Delta x) \cdot [-w \cdot A \cdot \cos(kx - wt)]^2$$

Note que a medida que se diminui o comprimento do elemento de massa da corda, fazendo com que tenda para zero, a equação acima pode ser escrita em sua forma diferencial, assim,

$$dK = \frac{1}{2}(\mu) \cdot [-w \cdot A \cdot \cos(kx - wt)]^2 \cdot dx,$$

Daí,

$$dK = \frac{1}{2}(\mu \cdot w^2 \cdot A^2) \cdot \cos^2(kx - wt) \cdot dx,$$

e, considerando um instantâneo no tempo $t = 0$, tem-se que:

$$dK = \frac{1}{2}(\mu \cdot w^2 \cdot A^2) \cdot \cos^2(kx) \cdot dx$$

Agora, integrando para todos os elementos da corda, para um determinado comprimento de onda constante, tem-se a energia cinética total nesse comprimento de onda. Então,

$$\left. \begin{aligned} K_\lambda &= \int_0^\lambda \frac{1}{2}(\mu \cdot w^2 \cdot A^2) \cdot \cos^2(kx) \cdot dx \\ &= \frac{1}{2}(\mu \cdot w^2 \cdot A^2) \int_0^\lambda \cos^2(kx) \cdot dx \\ &= \frac{1}{2}(\mu \cdot w^2 \cdot A^2) \cdot \left[\frac{1}{2}x + \frac{1}{4k} \cdot \text{sen}(2kx) \right]_0^\lambda \\ &= \frac{1}{2}(\mu \cdot w^2 \cdot A^2) \cdot \left(\frac{1}{2}\lambda \right) \\ K_\lambda &= \frac{1}{4}(\mu \cdot w^2 \cdot A^2 \cdot \lambda) \end{aligned} \right\}$$

Lembre que quando uma partícula está numa posição acima de um nível de referência, esta apresenta energia potencial e, nesse caso será energia potencial para um dado comprimento de onda (U_λ). Fazendo uma análise matemática semelhante a realizada para energia cinética, aonde $\Delta U = \Delta m \cdot g \cdot y$, com $y = A \cdot \text{sen}(kx - wt)$ em $t = 0$ e $\Delta m = \mu \cdot \Delta x$, chega-se a:

$$U_\lambda = \frac{1}{4}(\mu \cdot w^2 \cdot A^2 \cdot \lambda),$$

e aplicando o conceito da lei da conservação da energia, visto na unidade 1, a energia total para um determinado comprimento de onda é dado pela soma das energias cinética e potencial do elemento de massa da corda, na forma:

$$E_{\lambda} = K_{\lambda} + U_{\lambda} = \frac{1}{2} \mu \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \lambda$$

A taxa de energia que é transferida para um determinado ponto, elemento de massa da corda, quando a onda se propaga, durante todo um comprimento de onda, representa a potencia associada à onda, ou seja, a taxa de transferência de energia no intervalo de tempo (Δt), que associado ao comprimento de onda, é igual ao período da onda (T). Assim:

$$P = \frac{E_{\lambda}}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \mu \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \lambda}{T} = \frac{1}{2} \mu \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{T} \right),$$

e concluímos que,

$$P = \mu \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot v,$$

O que demonstra que a taxa de transferência de energia numa onda senoidal, produzida numa corda, como mostrado na figura 4.4, é proporcional ao quadrado da frequência angular e da amplitude, a velocidade da onda e a densidade de massa linear (μ), que representa a massa por unidade de comprimento da mesma.

Veja o exemplo em que uma onda que tem densidade de massa linear $\mu = 3,0 \cdot 10^{-2} \frac{kg}{m}$ é submetida a uma força de tensão de 30,0 N. Então, para a produção de ondas senoidais numa frequência de 50,0 Hz com amplitude de 5,0 cm, deve ter uma transferência de potencia de:

$$P = \mu \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot v,$$

sendo que, a velocidade da onda pode ser encontrada usando-se a relação $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ e a frequência angular, usando-se $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$. Assim, substituindo essas relações matemáticas na equação da potência, mostrada acima, tem-se que:

$$P = \mu \cdot (2\pi f)^2 \cdot A^2 \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Dessa forma, substituindo os valores numéricos apresentados acima, chega-se a:

$$P = \frac{1}{2} \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} \frac{kg}{m} \cdot (2\pi \cdot 50,0 s^{-1})^2 \cdot (5,0 \cdot 10^{-2} m)^2 \cdot \sqrt{\frac{27,0 N}{3,0 \cdot 10^{-2} \frac{kg}{m}}},$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot (2\pi \cdot 50,0 \text{ s}^{-1})^2 \cdot (5,0 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2 \cdot \left(30,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right),$$

$$P \cong 111,0 \text{ Watts (W)}$$

Faça você mesmo! Use análise dimensional e prove que a unidade em que se expressa a taxa de transferência de energia numa onda senoidal num intervalo de tempo (potencia) está correta.

2.3. Ondas sonoras e o efeito Doppler

As ondas sonoras são consideradas ondas mecânicas e longitudinais. Nesse tipo de onda as partículas de que o meio é constituído se deslocam paralelo ao sentido de deslocamento da onda. A voz de uma pessoa chega aos ouvidos de outra por causa da propagação de uma onda sonora no ar. Outro exemplo desse tipo de onda são as ondas sonoras geradas em som automotivo, em que o diafragma dos alto falantes, quando oscila no ar, faz com que ocorram pequenos deslocamentos longitudinais das partículas do ar, como mostrado na figura 4.5.

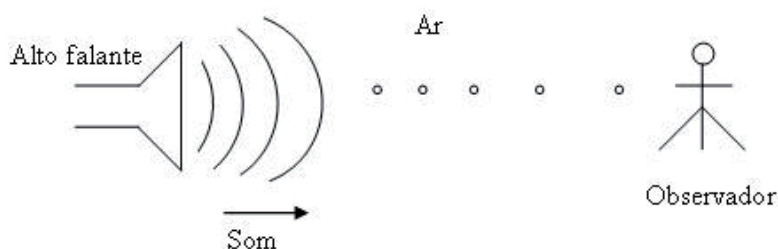


Figura 4.5 Representação de uma onda sonora produzida pela oscilação de um alto falante que se propaga no ar e chega até um observador que está distante da fonte sonora.

Essas ondas são produzidas por compressões e rarefações do fluido, que no caso dos exemplos citados é o ar, ou seja, por aumento e diminuição da pressão do ar em torno de sua posição de equilíbrio. Assim, a oscilação cria uma onda que se propaga no ar com a velocidade do som.

Faça você mesmo! Pesquise e monte uma tabela com a velocidade do som em diferentes meios. Compare-as e retire suas conclusões.

Como nas ondas longitudinais a propagação das partículas é paralelo, a direção de propagação das ondas é difícil de representar através de uma figura. No entanto, pela discussão do exemplo dado, fica claro que se tem uma oscilação entre as regiões de baixa e alta pressão, como por exemplo, as criadas pelo diafragma de um alto falante. Dessa forma, para essas ondas, o comprimento de onda é dado pela distância entre duas compressões ou duas rarefações, sucessivas.

Considerando que essas oscilações podem ser representadas por um movimento harmônico simples e fazendo uma analogia com o desenvolvimento matemático visto na seção anterior, o deslocamento de uma partícula em relação ao seu ponto de equilíbrio pode ser escrito matematicamente, como:

$$s(x, t) = s_{\text{máximo}} \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$$

em que $s_{\text{máximo}}$ é o deslocamento da partícula no meio em relação ao seu ponto de equilíbrio, equivalente a amplitude vista na seção anterior, k é o número de onda e ω é a frequência angular da onda.

Atente para o fato de a onda sonora ser produzida por oscilações de regiões de alta e de baixa pressão em relação ao seu ponto de equilíbrio. Assim, essa onda pode ser também considerada uma onda de pressão, que leva ao tímpano, no ouvido humano, ao sentido da audição.

Essa diferença de pressão (ΔP) também pode ser representada por uma onda senoidal e matematicamente pode ser escrita como:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{máximo}} \cdot \cos(kx - \omega t).$$

Por definição, encontra-se que a variação de pressão é proporcional a amplitude do deslocamento ($s_{\text{máximo}}$), a densidade do meio de propagação (ρ), a velocidade da onda (v) e a velocidade longitudinal máxima de uma partícula no meio ($\omega \cdot s_{\text{máximo}}$). Assim, $\Delta P_{\text{máximo}}$ pode ser escrito, como:

$$\Delta P_{\text{máximo}} = \rho \cdot v \cdot \omega \cdot s_{\text{máximo}}$$

Note que nessa representação matemática considera-se que a onda de pressão e a onda de deslocamento associadas a onda sonora estão defasadas de 90° , ou seja, uma é representada por uma onda senoidal e outra por uma onda cossenoidal.

Faça você mesmo! Determine expressões matemáticas e faça os gráficos das funções que representam a onda de deslocamento e a onda de variação de pressão de uma onda sonora que se propaga no ar, sabendo que o comprimento dessa onda é de 0,15 metros e sua variação máxima de pressão é de $0,35 \frac{N}{m^2}$. Considere que a densidade do ar é de $1,20 \frac{kg}{m^3}$ e a velocidade do som no ar é de $343 \frac{m}{s}$.

Note que nas considerações sobre as ondas sonoras, tais como nos exemplos da fala e das ondas produzidas em alto falantes, se tem uma fonte e um observador fixos. Ou seja, a onda produzida na fonte chega até a um observador que se encontra a uma distância da fonte sonora; nesses casos não é observado o efeito Doppler. O efeito Doppler é observado sempre quando se tem um movimento do observador em relação à fonte de produção da onda sonora.

O efeito Doppler explica porque no movimento da fonte em direção ao observador ou do observador em direção da fonte, o observador escuta o som numa frequência mais alta do que a frequência do som produzida pela fonte. No contrário, quando o observador e fonte se afastam, o observador escuta o som numa frequência mais baixa que a frequência do som produzido na fonte. Essa frequência, que é diferente da frequência original do som produzida na fonte, é chamada de frequência aparente do som.

Para entender esse fenômeno, imagine que você está parado(a) numa certa distância de uma ambulância, cuja sirene produz um som numa frequência (f) de 200 Hz. Dessa forma, o som leva o tempo $T = \frac{1}{f}$ para chegar até você.

Agora, imagine que você caminhe em direção a ambulância com velocidade (v_0), então, o som leva menos tempo para alcançá-lo(a). Assim, a frequência escutada será maior do que a frequência produzida pela fonte, já que $f = \frac{1}{T}$. Caso você se movimente afastando-se da ambulância, o som levará mais tempo para alcançá-lo(a), então a frequência que você vai escutar é menor que a frequência do som produzida na ambulância.

Faça você mesmo! Explique, usando o conceito de efeito Doppler, o que acontece com a frequência aparente do som que você escuta, quando uma pessoa correndo e gritando numa frequência constante, se aproxima, passa por você e depois se afasta.

Física do dia-a-dia: aplicação na biologia – a fala e a audição

Num modelo simplificado, a voz humana pode ser definida como o efeito da corrente de ar proveniente dos pulmões que atravessa a laringe, sofrendo vibrações das cordas vocais, e chega até a boca. Dessa forma, o ar que sai dos pulmões aumenta pressão nas regiões imediatamente abaixo das cordas vocais, que se afastam para permitir a passagem do fluxo de ar e, consequentemente, causam uma diminuição da pressão nessa região.

Esse mecanismo é repetido, causando uma sequência de oscilações, ou seja, uma série de pulsos sonoros, cujas frequências do som produzido

dependem da intensidade da contração dos músculos situados nas regiões das cordas vocais. Assim, a voz produzida por uma pessoa, através desse mecanismo, é propagada no ar até chegar aos ouvidos de outras pessoas e, dependendo da aproximação ou do afastamento dessas pessoas, pode-se escutar o som da voz em frequências diferentes da frequência original produzida, por causa do efeito Doppler.

A audição é um processo que estimula as células receptoras do som (células ciliadas), através de um potencial de ação, para converter uma onda mecânica que se propaga no ar em estímulos nervosos, que são transportados até o córtex auditivo, e assim, decodificados e interpretados como voz humana. Nessa tarefa tem-se o envolvimento da orelha e do ouvido que entram nesse processo para auxiliar as ondas sonoras a convergirem na direção do canal auditivo e para auxiliar na conversão do som em pulso elétrico, que depois é transportado até a região do córtex auditivo.

Encontram-se na literatura que a frequência da voz humana audível está num intervalo de 20 a 20.000 Hz, no entanto, o ouvido de uma pessoa jovem é mais sensível ao som produzido nas frequências que variam entre 2.000 e 5.000 Hz e de pessoas que estão na faixa etária dos 50 anos, na faixa de 12.000 Hz. Isso acontece por causa da perda de elasticidade dos tecidos encontrados no ouvido ou pela exposição contínua a ondas sonoras de alta intensidade, que podem causar lesões nesses tecidos.

3. Noções de óptica

3.1. A natureza da luz

Isaac Newton propôs um modelo em que a luz era considerada como um fluxo de partículas emitido por uma fonte. Imaginava-se que a luz, ao entrar no olho, estimulava o sentido da visão humana. Esse modelo ficou conhecido como modelo corpuscular e ajudou os cientistas da época a desenvolverem as leis de reflexão e de refração da luz. Christian Hygens propôs o modelo ondulatório, em que a luz é considerada como uma onda e pode se curvar em torno das bordas dos corpos, causando o fenômeno conhecido como difração da luz.

Vários cientistas da época trabalharam no sentido de provar a natureza ondulatória das ondas e, adicionalmente, desenvolver um modelo matemático que representasse a mesma. Mas, foi Heinrich Hertz, por volta de 1888, quem primeiro gerou e detectou a luz em forma de ondas eletromagnéticas e, assim, além de fornecer a confirmação experimental da teoria matemática de James Clerk Maxwell, mostrou que essas ondas obedeciam às leis de reflexão e refração e todas as características estabelecidas para as ondas. Hertz ainda descobriu que o experimento do efeito fotoelétrico, que consiste na emissão

de elétrons por uma superfície de um metal quando é exposta a luz, não podia ser explicado pelo modelo ondulatório da luz.

Em decorrência disso, deve-se considerar que a luz apresenta uma natureza dupla, ou seja, em alguns casos se comporta como uma onda, em outros, como partícula.

3.2. O modelo de raio, a reflexão e refração da luz

Para auxiliar na compreensão dos conceitos encontrados na óptica utiliza-se um modelo simplificado de raio, que consiste em uma linha reta traçada no sentido de propagação da onda de luz. Assim, para ondas planas, um conjunto de ondas luminosas pode ser representado por uma frente de onda. Isso requer que um feixe de raios seja perpendicular a frente de onda em cada posição do espaço, como mostrado na figura 4.6.

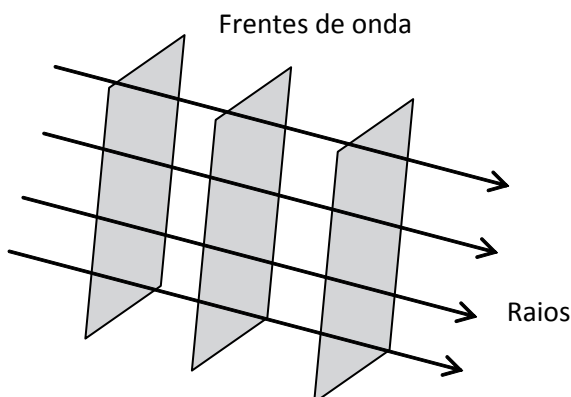


Figura 4.6 Representação de onda plana que se propaga para o lado direito. Os raios, na direção do movimento, perpendiculares a representação das frentes de onda.

Agora, é possível imaginar que essa onda plana encontra uma barreira que contém uma abertura, como mostrado na figura 4.7, onde em (a) o comprimento da abertura (d) é maior que o comprimento de onda (λ), em (b) o comprimento da abertura é aproximadamente igual ao comprimento de onda e em (c) o comprimento de onda é maior que o comprimento da abertura.

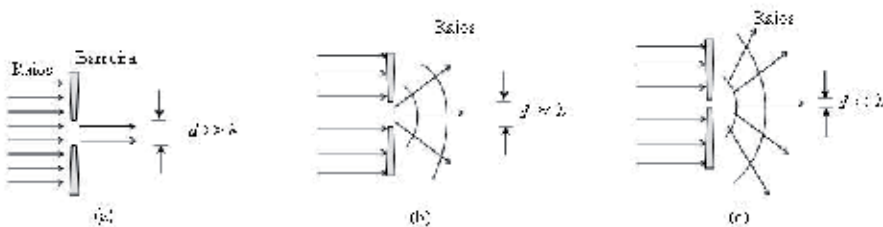


Figura 4.7 – Representação de uma onda plana que incide sobre uma barreira, (a) quando a abertura apresenta comprimento maior que o comprimento de onda (λ), (b) com abertura com comprimento aproximadamente igual ao comprimento de onda e (c) com comprimento da abertura menor que o comprimento de onda.

Observe que na situação em que o comprimento de onda é menor que o comprimento da abertura da barreira, figura 4.7 (a), as ondas continuam a se deslocar em linha reta, confirmando a aproximação retilínea, mencionada no modelo de raios. Quando o comprimento da abertura é aproximadamente igual ao comprimento de onda como na figura 4.7 (b), as ondas espalham-se em todas as direções, sofrendo difração e, quando se tem o comprimento de onda maior que o comprimento da abertura, a onda também sofre difração, sendo que mais forte que na situação anterior e, assim, essa abertura pode ser considerada uma fonte puntiforme de ondas luminosas.

A figura 4.8 mostra um feixe de raios de luz incidindo numa superfície. Note que, se a superfície é plana, ou polida, como mostra a figura 4.8 (a), os raios refletidos são paralelos, e essa reflexão é chamada de reflexão especular ou somente reflexão. Caso a superfície seja áspera, como na figura 4.8 (b) os raios serão refletidos em todas as direções. Dessa forma, essa reflexão é conhecida como reflexão difusa.

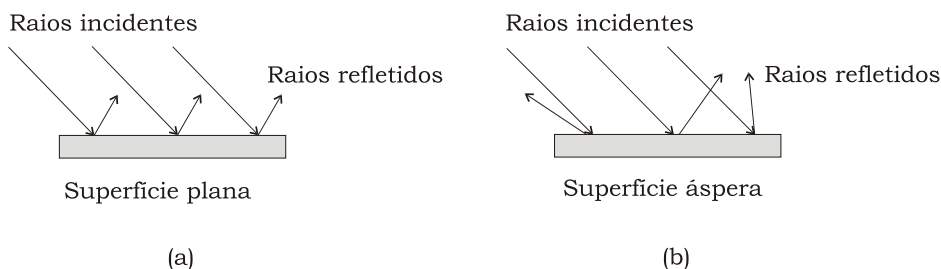


Figura 4.8 Representação (a) da reflexão especular e (b) da reflexão difusa.

Note na figura 4.8 (a) e (b) que o feixe de raios incidente faz um ângulo (θ) e o de raios refletidos apresenta um ângulo (θ') com uma linha normal à superfície no ponto em que os raios atingem, mostrados na representação da figura 4.9. Segundo a lei da reflexão conclui-se matematicamente que $\theta = \theta'$.

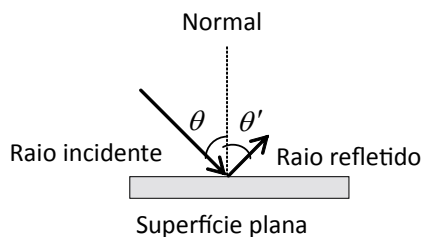


Figura 4.9 Representação dos ângulos de incidência (θ) e de reflexão (θ'), que de acordo com a lei da reflexão estão todos no mesmo plano e $\theta = \theta'$.

Um fato importante nesse fenômeno físico é que, mesmo na reflexão difusa a lei da reflexão é obedecida, só que o ângulo de reflexão será medido em relação à normal local, que apresenta significativa variação pelo fato da superfície ser áspera.

Faça você mesmo! Um raio incide num espelho plano com ângulo de 55° em relação à normal. Depois é refletido em direção a outro espelho plano que faz um ângulo de 100° com o primeiro. Encontre a direção do raio depois que é refletido pelo segundo espelho. Dica! Use a lei da reflexão.

Veja na figura 4.10, que do raio incidente na superfície da interface ar-vidro, parte é refletido com velocidade v_1 , e parte é refratado, ou seja, se propaga com velocidade v_2 para o segundo meio, que nesse caso é o vidro. Importante destacar também que, nesse caso, o ângulo de refração (θ_2) é diferente de ângulo de incidência (θ_1), e que esse depende tanto do ângulo de incidência como das propriedades dos meios.

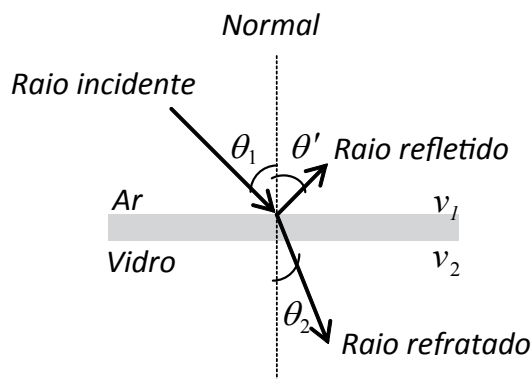


Figura 4.10 Representação de raio que incide sobre a interface ar-vidro, com ângulo θ , e dos raios refletido, com ângulo θ' , e refratado, com ângulo θ_2 , com as respectivas velocidades v_1 e v_2 .

Assim, a expressão matemática para modelar esse fenômeno físico, que é conhecida como a lei de Snell é escrita como,

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \text{constante},$$

em que, v é a velocidade da luz no meio 1, que nesse exemplo é o ar, v_2 é a velocidade da luz no meio 2, que nesse caso é o vidro.

A lei de Snell mostra que, quando um raio se propaga numa interface entre dois meios, em que a velocidade no meio 1 (v_1) é maior que a velocidade no meio 2 (v_2), o ângulo de refração (θ_2) é menor que o ângulo de incidência (θ_1), ou seja, se $v_1 > v_2$ então, $\theta_1 > \theta_2$. Daí, o raio refratado tende a ir em direção a normal, como mostrado na figura 4.10. O contrário, ou seja, se o raio é refletido com velocidade menor que a refratada, ou seja, a velocidade no meio 2 é maior que a velocidade no meio 1 ($v_2 > v_1$), tem-se que o ângulo de refração é maior que o ângulo de incidência ($\theta_2 > \theta_1$), assim, o raio refratado se afastará da normal.

Faça você mesmo! Faça uma representação dos raios incidente, com ângulo θ refletido, com ângulo θ_1 e refratado com ângulo θ_2 , com as respectivas velocidades v_1 e v_2 , para uma interface vidro-ar.

A relação matemática entre as velocidades da luz no vácuo e no meio é chamada de índice de refração (n), que é escrito matematicamente, como:

$$n = \frac{c}{v},$$

onde, c é a velocidade da luz no vácuo e v é a velocidade da luz no meio.

A frequência de uma onda luminosa (f) que passa de um meio para o outro não muda, ou seja, é constante, de tal forma que $v = f \cdot \lambda$ para o meio 1 $v_1 = f \cdot \lambda_1$ e $v_2 = f \cdot \lambda_2$ para o meio 2, onde λ representa o comprimento de onda e v a velocidade da onda. Então, pode-se deduzir a relação matemática:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Dessa relação matemática, é possível concluir que: $\lambda_1 \cdot n_1 = \lambda_2 \cdot n_2$. Assim, se chega a conclusão que o índice de refração de qualquer meio pode ser obtido como a razão dos comprimentos de onda da luz no vácuo (λ_0) e o comprimento de onda da luz no meio (λ_n), que matematicamente é escrito como:

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_n}$$

Desse modo, chega-se à outra formulação matemática para expressar a lei de Snell, que é mais usada para a resolução dos problemas encontrados na óptica. Assim,

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

Veja o exemplo a seguir, em que um feixe de luz para passar de um lado da atmosfera para o interior de uma sala deve atravessar uma telha que é feita de uma placa espessa de acrílico, com índice de refração $n_{\text{acrílico}}$, como mostrado na figura 4.11.

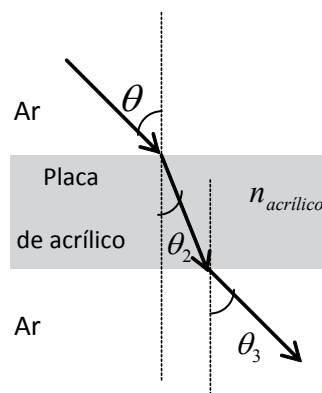


Figura 4.11 Representação de um feixe de luz atravessando uma placa de acrílico.

Aplicando a lei de Snell na porção superior, ou seja, da atmosfera para o interior da placa de acrílico tem-se que,

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{n}{n_{\text{acrílico}}} \cdot \text{sen}\theta,$$

onde, n é o índice de refração do ar.

Na parte inferior, segundo a lei de Snell, tem-se que:

$$\text{sen}\theta_3 = \frac{n_{\text{acrílico}}}{n_1} \cdot \text{sen}\theta_2$$

Substituindo, vamos encontrar que:

$$\text{sen}\theta_3 = \frac{n_{\text{acrílico}}}{n} \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{acrílico}}} \cdot \text{sen}\theta \right),$$

assim,

$$\text{sen}\theta_3 = \text{sen}\theta,$$

então, $\theta_3 = \theta$. Donde se conclui que a placa não muda a direção do feixe de luz.

Física do dia a dia: Aplicações na biologia – A visão dos insetos

A figura 4.12 mostra representação da formação das imagens dos objetos nos dispositivos diotrópicos, encontrados nos omatídios (insetos). A literatura informa que, nos insetos em geral, a curvatura da lente dos olhos é fixa, levando-os a foco fixo, ou seja, possuem no dispositivo de visão uma distância focal fixa, como mostrado na figura. Assim, enxergam bem em pequenas distâncias, da ordem de milímetros, como por exemplo, uma abelha dentro de uma flor.

Nesses casos tem-se o índice de refração é maior que 1. Aplicando a lei de Snell é possível provar que θ é menor que θ_i , como mostrado na figura 4.12. Matematicamente, tem-se que:

$$\text{sen}\theta_i \cdot n_i = \text{sen}\theta \cdot n,$$

da lei de Snell,

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta} = \frac{n}{n_i} > 1,$$

assim,

$$\text{sen}\theta_i > \text{sen}\theta.$$

O que leva a conclusão que $\theta_i > \theta$, para ângulos de incidência até 90° . Dessa forma,

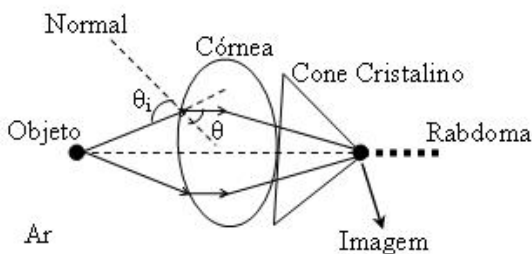


Figura 4.12 Representação da formação da imagem de um objeto pelo dispositivo diotrópico encontrado nos omatídios. Adaptado de Okuno et al. (1982).

Síntese do Capítulo



Nesse capítulo apresentam-se conceitos físicos de ondulatória e óptica, visando auxiliar no entendimento de sistemas biológicos, tais como, a fala e a audição humana e a visão dos insetos. Inicialmente, são descritos a natureza e as propriedades das ondas, apresentando as ondas senoidais juntamente com suas propriedades: crista, vale, amplitude, comprimento de onda, frequência e período.

Depois, uma dedução da equação da onda e apresentação da mesma em função da frequência angular, do número de onda angular e do ângulo de fase. Apresenta-se também, a velocidade de propagação e a taxa de transferência de energia das ondas em meios elásticos, as ondas sonoras e o efeito Doppler.

Por fim, é feita uma aplicação desses conceitos na descrição dos mecanismos da fala e da audição humana. Em relação às noções sobre óptica, apresentam-se a uma introdução a natureza da luz, o modelo de raio, as frentes de onda, a reflexão e a refração da luz e a lei de Snell, exemplificando com uma aplicação desses conceitos para entendimento de um dispositivo diotrópico, encontrado nos omatídeos, ou seja, no dispositivo de visão dos insetos.

Atividades de avaliação



1. Para uma dada velocidade de propagação, mostre o que acontece com o comprimento de onda quando a frequência de uma onda é triplicada?
2. Pesquise e explique, usando os conceitos encontrados na ondulatória, os fenômenos do trovão e das ondas sísmicas.
3. Explique, usando o conceito de efeito Doppler, o que acontece com a frequência aparente do som, quando você joga do alto de um prédio um rádio ligado e sintonizado numa determinada estação cuja frequência de transmissão é constante.
4. Use os conceitos apresentados nas noções sobre ótica e explique o que acontece com o comprimento de onda, a frequência e a velocidade, quando a luz é propagada do vácuo ($n = 1$) para o vidro ($n > 1$).
5. Um feixe de luz que se propaga no ar e apresenta comprimento de onda de $0,6 \mu\text{m}$ incide numa placa de material transparente, com um ângulo de 30° em relação à superfície da placa. O feixe refratado apresenta ângulo de 65° em relação à normal. Faça um desenho mostrando essa representação e depois determine o índice de refração desse material.
6. Determine a velocidade e a equação de uma onda cuja amplitude é de 20,0 centímetro, a frequência é de 3,0 Hz e o comprimento é de 40,0 centímetros. Considere que em $x = 0$ e $t = 0$, $y = -20,0 \text{ cm}$.
7. Considere a função $y = 0,40 \cdot \text{sen}\left(20\pi t - 4\pi x + \frac{\pi}{4}\right)$ que representa uma onda senoidal produzida numa corda. Qual é a velocidade, a frequência, o comprimento de onda, a amplitude, o número de onda, a frequência angular e a constante de fase da onda? Em $x = 0$ e $t = 0$, quanto vale $y(x, t)$?

8. Calcule a tensão (T) realizada numa corda de 4,0 metros de comprimento que pesa 2,0 kg, para produzir um pulso ondulatório que se propaga numa velocidade de $0,75 \frac{m}{s}$.
9. Um feixe de luz de comprimento de onda $0,55 \mu m$ no vácuo incide da atmosfera numa superfície plana de água com um ângulo de 65° . Determine o ângulo de refração e o comprimento de onda do feixe de luz na água.
10. Na representação da figura abaixo, o ângulo entre o feixe de luz e a normal no interior do bloco de gelo é de 30° . Determine o ângulo de incidência e de refração na água desse feixe de luz. Dica! Pesquise sobre os valores dos índices de refração da luz no gelo e na água.

Referências



- HENEINE, I. F. **Biofísica básica**. São Paulo: Atheneu, 1999.
- OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: HARBRA, 1982.
- RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. S. **Física 4**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. **Princípios de física**. André Koch Torres Assis. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. v. 3 e 4.
- TREFIL, J.; HAZEN, R. M. **Física viva**. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v. 3.

Sobre o Autor

Emerson Mariano da Silva possui graduação em Meteorologia pela Universidade Federal da Paraíba (1999), Mestrado em Meteorologia pela Universidade Federal da Paraíba (2001) e Doutorado em Engenharia Civil (Área de concentração: Recursos Hídricos - Linha de Pesquisa: Climatologia do Nordeste) pela Universidade Federal do Ceará (2007). Atualmente é professor adjunto do Curso de Física da Universidade Estadual do Ceará (UECE) e coordena o Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas (MACFA) e o Curso de Especialização em Ensino de Física desta universidade.



A não ser que indicado ao contrário a obra **Física para Ciências Biológicas**, disponível em: <http://educapes.capes.gov.br>, está licenciada com uma licença **Creative Commons Atribuição-Compartilha Igual 4.0 Internacional (CC BY-SA 4.0)**. Mais informações em: http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.pt_BR. Qualquer parte ou a totalidade do conteúdo desta publicação pode ser reproduzida ou compartilhada. Obra sem fins lucrativos e com distribuição gratuita. O conteúdo do livro publicado é de inteira responsabilidade de seus autores, não representando a posição oficial da EdUECE.



Ciências Biológicas

Fiel a sua missão de interiorizar o ensino superior no estado Ceará, a UECE, como uma instituição que participa do Sistema Universidade Aberta do Brasil, vem ampliando a oferta de cursos de graduação e pós-graduação na modalidade de educação a distância, e gerando experiências e possibilidades inovadoras com uso das novas plataformas tecnológicas decorrentes da popularização da internet, funcionamento do cinturão digital e massificação dos computadores pessoais.

Comprometida com a formação de professores em todos os níveis e a qualificação dos servidores públicos para bem servir ao Estado, os cursos da UAB/UECE atendem aos padrões de qualidade estabelecidos pelos normativos legais do Governo Federal e se articulam com as demandas de desenvolvimento das regiões do Ceará.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ



C A P E S

