

FÍSICA I

PAULA GIMENEZ DE SOUZA
LUÍS GUILHERME GIMENEZ DE SOUZA

SOBRE OS AUTORES

Paula Gimenez de Souza

Mestre em Engenharia de Alimentos na área de Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos pela UFSC - SC.
Especialista em Gestão para Segurança de Alimentos pelo SENAI - SC

Mestre e engenheira de alimentos pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com atuação na área de desenvolvimento de processos para secagem de frutas e hortaliças com foco no estudo dos mecanismos de transferência de calor e de massa para produção - com custo reduzido - de alimentos estáveis e com elevada qualidade sensorial e nutricional. Possui MBA na área de Segurança de Alimentos pelo SENAI/SC - Chapecó.

Luís Guilherme Gimenez de Souza

Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas Eletrônicos com ênfase em Instrumentação Eletrônica pela UEL - PR.

Mestre e engenheiro eletricitista pela Universidade Estadual de Londrina (UEL), com atuação na área de desenvolvimento de sistemas eletrônicos embarcados, aquisição de sinais e placas de circuito impresso. Participou de projetos vinculados à Agência Espacial Brasileira (AEB) e trabalha no desenvolvimento de soluções personalizadas e produtos para empresas de diversos setores, além de ministrar aulas nos cursos de graduação em engenharia elétrica, mecânica, civil e da computação.

Introdução

Caro(a) aluno(a), o estudo dos conceitos de física nos permite entender as leis gerais que regem a natureza e o universo, ao descrever os seus fenômenos, inter-relações e propriedades. O conteúdo disponibilizado neste livro possibilita uma análise do mundo e contribui para a formação do conhecimento humano utilizado na compreensão do mundo que nos cerca ou em situações diárias.

A Unidade I (Mecânica) aborda a natureza da física e a solução de problemas, sendo necessário o desenvolvimento de conceitos matemáticos de vetores, soma e produto vetorial, componentes e vetores unitários. Com tal conhecimento básico, é possível desenvolver o estudo do movimento uniforme variado que aborda conceitos escalares e vetoriais de deslocamento, tempo, velocidades e acelerações, queda livre, movimento de projétil e circular, além de velocidade relativa. Ainda nessa unidade, são abordadas as três Leis de Newton e os conceitos necessários para a sua compreensão.

A Unidade II (Leis de Conservação) apresenta a definição e a classificação de energias, interna ou externa, assim como conteúdo sobre trabalho e troca de energia relacionada ao calor latente e sensível. A primeira Lei da Termodinâmica e aplicações para sistemas e processos, experimento de Joule, calor específico, entalpia e mecanismos de transferência de calor também são abordados. Definição de movimento de rotação, coordenada, velocidade e aceleração angulares, relação entre movimentos linear e angular, momento de inércia e Teorema dos eixos paralelos são estudados antes de abordar o tema gravitação universal. Nesse último tópico, são observados itens como o enunciado da lei da gravitação universal, velocidade de escape, teorema das cascas, Leis de Kepler e buraco negro.

A Unidade III (Propriedades da Matéria) tem como objetivo abordar a natureza química e os estados de agregação associados à matéria, assim como a Segunda Lei da Termodinâmica, as máquinas térmicas e a Entropia. Para tal, também são estudados tópicos de temperatura, calor e dilatação, mudança de fases aplicados para substâncias puras e misturas, finalizando com as energias livres de Helmholtz e de Gibbs.

Para finalizar, a Unidade IV (Eletromagnetismo) tem como objetivo desenvolver a concepção de cargas elétricas (fluxos, resistência, potencial), a caracterização dos materiais em relação à condução da eletricidade (condutores, isolantes, semicondutores, supercondutores), a Lei de Coulomb e de Gauss e os conceitos relacionados aos campos elétricos e magnéticos.

UNIDADE I

Mecânica

Paula Gimenez de Souza

Luís Guilherme Gimenez de Souza

Caro(a) aluno(a), você já deve ter se perguntado para que exatamente existe a Física. De uma maneira básica, podemos falar que ela é a matéria responsável por estudar e buscar explicações para o acontecimento dos fenômenos naturais.

Você já ouviu falar que a Terra gira tanto ao redor do Sol quanto em torno de si mesma? Então, a Física consegue explicar matematicamente porque isso acontece e também proporcionar grandezas e unidades para medir a velocidade e a intensidade desses movimentos.

Ao final desta unidade, nós seremos capazes analisar as grandezas físicas relacionadas aos movimentos naturais e teremos conhecimento sobre algumas Leis da Física que descrevem como e por que esses movimentos acontecem.

Sobre Ciência

Então a Física serve somente para explicar os movimentos naturais? Não. A física da natureza está presente em diversas áreas do conhecimento. Nas áreas de estudo da química, você sabe quem explica a estrutura das moléculas de qualquer elemento natural? A Física, a partir da análise das forças que atraem as partículas, consegue estabelecer uma explicação para isso. Além disso, a Física está presente também em todas as construções de engenharia, pois o engenheiro, ao projetar a estrutura, deve entender os princípios físicos presentes em sua construção.

A seguir, nós aprenderemos e veremos alguns exemplos de como algumas teorias físicas foram criadas, ou seja, vamos observar qual é a natureza das teorias e grandezas físicas.

Natureza da Física

Caro(a) aluno(a), você já ouviu alguém comentando sobre a famosa história de que Isaac Newton, que, quando estava sentado à sombra de uma árvore, viu uma maçã caindo e pensou: "Por que a maçã está caindo, ao invés de flutuar?". A partir disso, ele desenvolveu inúmeros cálculos e teorias para explicar o porquê de a maçã ter caído.

Essa e diversas outras histórias mostram que a física é uma ciência experimental, ou seja, através da observação de fenômenos naturais, busca explicação para fatos cotidianos, sejam eles simples como o cair de um objeto ou complexos como o movimento dos planetas.

Porém, se desejarmos desenvolver uma teoria física, alguns passos precisam ser bem definidos: primeiro devemos formular perguntas específicas sobre o fenômeno que estamos observando, para então sermos capazes de criar experimentos que nos auxiliem na busca das respostas, assim, finalmente seremos capazes de chegar às conclusões pertinentes aos resultados obtidos.

Um exemplo clássico de montagem de experimentos para validação de teorias é o caso de Galileu (Galileo Galilei - 1564-1642). O filósofo queria comprovar a afirmação de Aristóteles (384 a.C. - 322 a.C.), que dizia que se duas pedras, uma mais pesada do que a outra, fossem jogadas ao mesmo tempo de uma certa altura, a mais pesada cairia primeiro. Galileu então subiu na Torre de Pisa e, ao mesmo tempo, abandonou duas esferas com pesos diferentes, observando que as duas levavam o mesmo tempo para atingir o solo. Esse experimento então serviu para invalidar a teoria de Aristóteles.

Outro experimento foi abandonar objetos bastante diferentes e com pesos muito distintos, observou então que o mais pesado atingia o solo primeiro. A partir dessa observação, ele criou uma hipótese de que a força exercida pelo ar era a responsável por retardar a queda do objeto mais leve.

Anos mais tarde, de posse de uma tecnologia mais avançada, cientistas puderam comprovar a hipótese de Galileu e ainda verificaram que, quando os corpos são abandonados de uma mesma altura no vácuo, eles demoram exatamente o mesmo tempo para cair. Isso mostra que realmente o ar era o responsável pela diferença no tempo de queda dos objetos, pois, em um ambiente com completo vácuo, não há ar nenhum exercendo forças contra os corpos.

Com esse exemplo, podemos observar que a física é originada da natureza, ou seja, ela está presente em nosso dia a dia e nas mais variadas ocasiões.

Solução de problemas de física

Provavelmente, ao estudar algum tópico de física, você deve ter se feito a seguinte pergunta: "Por que eu consigo entender os conceitos, mas não consigo aplicá-los na resolução de problemas?". Como vimos anteriormente, a física é uma ciência experimental, então, nós só **saberemos** e **entenderemos** física se formos capazes de **fazer** física. Mas como assim? Para fazer física, nós estudaremos a seguir alguns métodos, por exemplo, a criação de modelos que ilustram nosso problema e o seu cenário de aplicação.

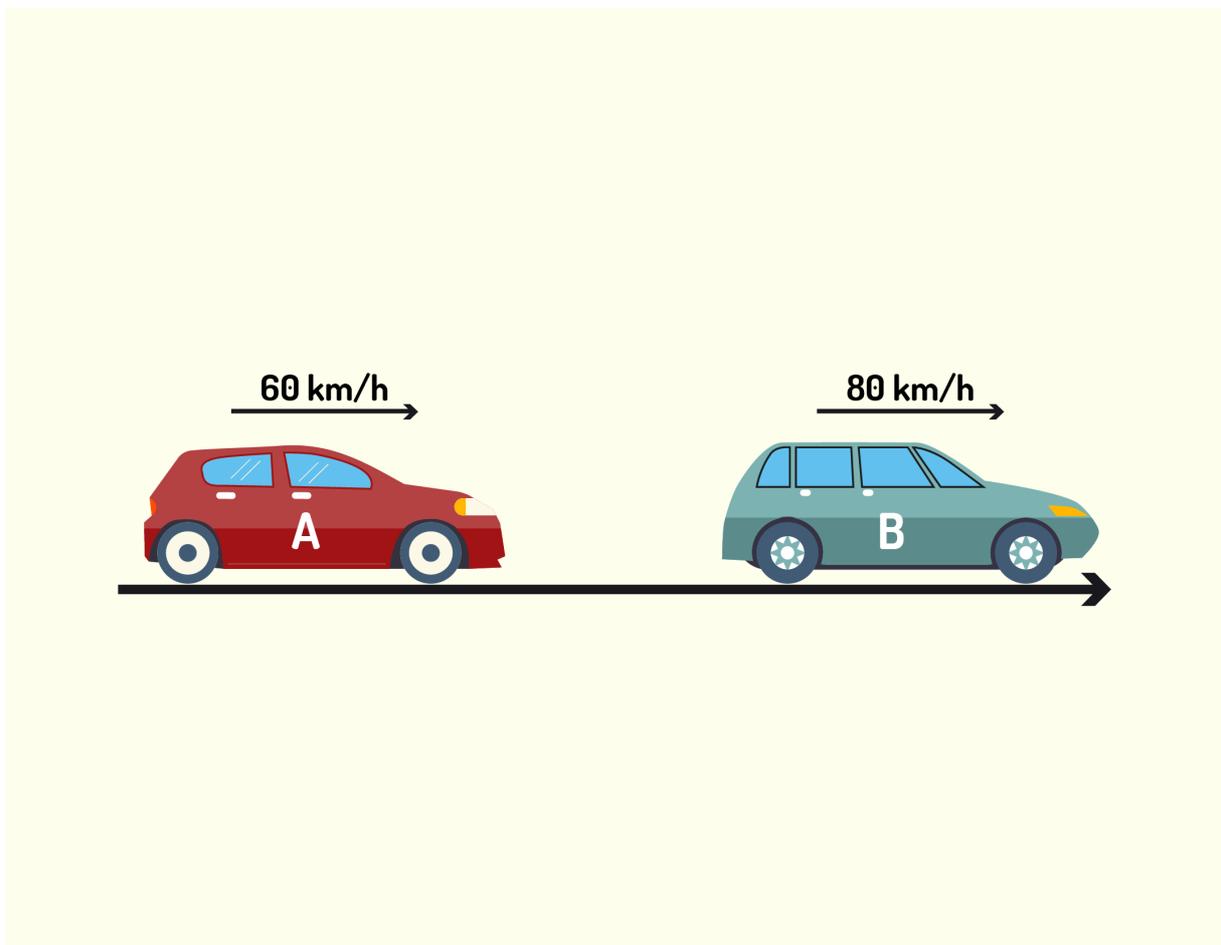
Uma estratégia bastante eficiente é a *identificação de conceitos e variáveis relevantes*. Ao fazer essa análise, você pode não precisar fazer nenhum cálculo, porém essa tarefa pode ser bastante desafiadora. Primeiramente, você deve conseguir identificar claramente a **variável-**

alvo do seu problema. Por exemplo: eu quero saber qual a velocidade de uma bola de futebol que é chutada em uma cobrança de pênalti, ou então a força do soco de um lutador de boxe. Após isso, é aconselhável que você siga alguns outros passos:

- **Preparação do problema:** a partir da identificação feita, aconselhamos que você escolha as equações que considera mais úteis para a resolução e tente representar graficamente o problema.
- **Execução:** nessa etapa, você vai precisar colocar em prática todas suas habilidades com números. A partir das equações escolhidas, vamos observar quais são as variáveis conhecidas e utilizar as equações para encontrar as desconhecidas, chegando então à resposta final.
- **Avaliação da resposta:** com o valor encontrado, você deve observar suas grandezas, unidades. Pergunte-se também: "esse resultado faz sentido?". Se você queria saber qual a velocidade com que a tartaruga anda, sua resposta não pode ser 150km/h, por exemplo.

Vamos então estudar um exemplo: considere dois carros lado a lado, um a 60km/h e outro a 80km/h, sendo que o carro da frente está mais rápido do que o de trás. Qual será a distância entre eles após uma hora de movimento?

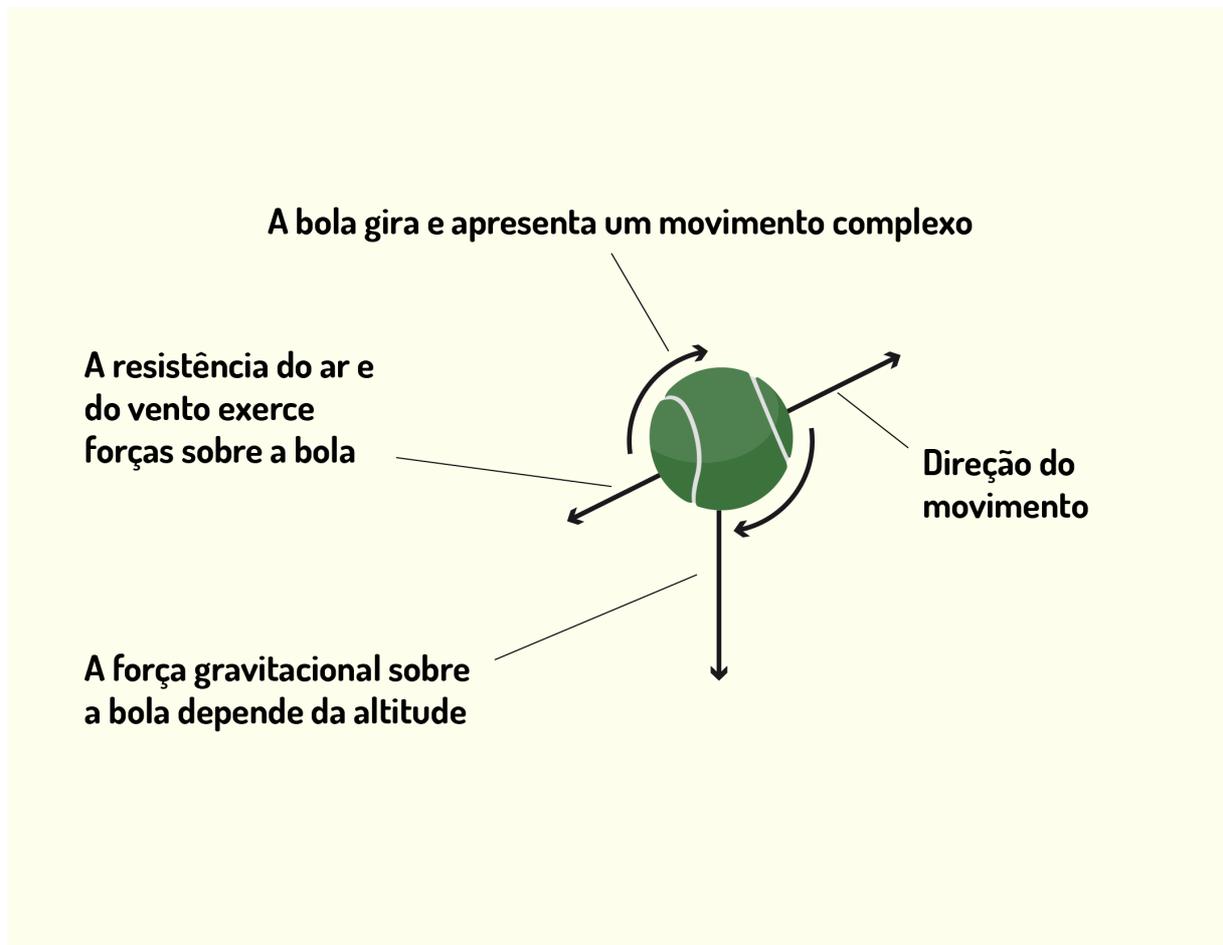
Como vimos, primeiramente, devemos identificar a **variável-alvo**. Nesse caso, queremos encontrar a distância (dada em metros). Como **preparação**, você poderá fazer um esquema semelhante ao apresentado na Figura 1, em que desenhamos o carro e escrevemos a velocidade de cada um deles.



1FIGURA 1.37 - Representação da etapa de preparação de um problema FONTE: os autores.

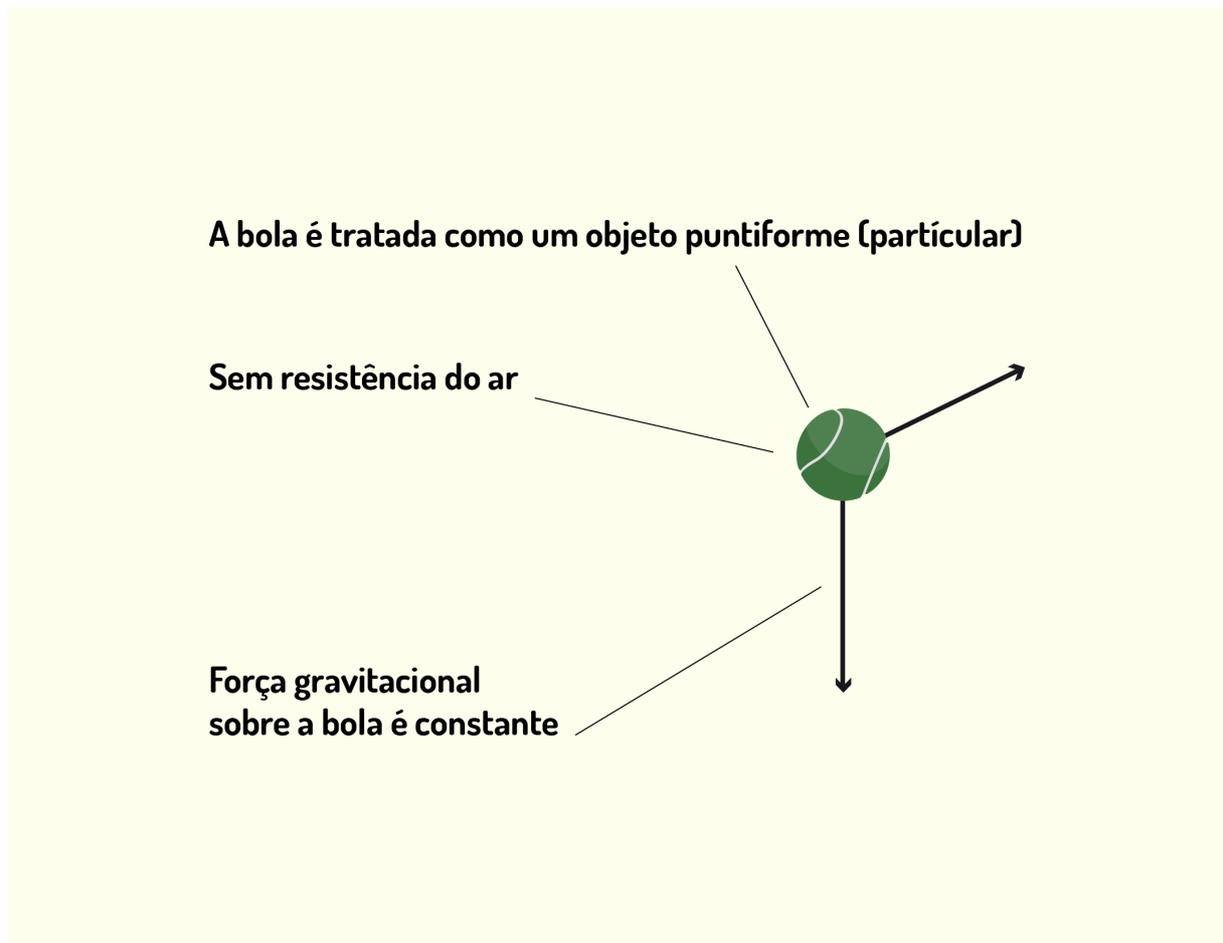
Após isso, você deve escolher as equações aplicáveis a esse caso, analisar a velocidade relativa entre os veículos e depois chegar à resposta da distância percorrida ao longo de uma hora (considerando a velocidade relativa encontrada). Como resposta, você deveria encontrar 20km. A etapa de **validação** serve para você observar a realidade do problema. Se, por um acaso, você encontrar 2000km como resposta, pode pensar que é um resultado não realístico e, então, deve rever as contas feitas.

Uma outra estratégia é a *criação de modelos*, em que você deve tentar criar uma versão simplificada de um cenário ou sistema físico que, se observado por completo ou como é na realidade, seria complicado demais. Imagine uma bola de beisebol em movimento no ar (Figura 1.2). Isso é um sistema complicado? Na verdade, sim. A bola não é uma esfera perfeita, possui rugosidades e gira quando está no ar. A resistência do ar influencia em seu movimento e também existe a força do peso da bola. Todos esses fatores podem tornar o problema bastante complicado de ser analisado.



1FIGURA 2.37 - Possíveis forças atuantes em um arremesso real de uma bola de beisebol. FONTE: Young e Freedman (2010, p. 03).

Se você for capaz de simplificar algumas interferências, é possível criar um modelo bastante simples para o movimento dessa bola. Lembra do experimento de Galileu? Então, suponha que a bola esteja no vácuo e despreze o tamanho e peso da bola, como ilustrado na Figura 1.3. Isso sim é uma versão bem mais simplificada e fácil de ser analisada.



1FIGURA 3.37 - Modelização do problema do movimento de uma bola de beisebol FONTE: Young e Freedman (2010, p. 03).

Portanto, caro(a) aluno(a), se você deseja criar um modelo para seu problema, lembre-se de que será necessário fazer algumas considerações, desprezar certas forças e interferências. Porém, não podemos ser exagerados na hora de desprezar as coisas, caso contrário nosso modelo será muito distante da realidade que queremos representar.

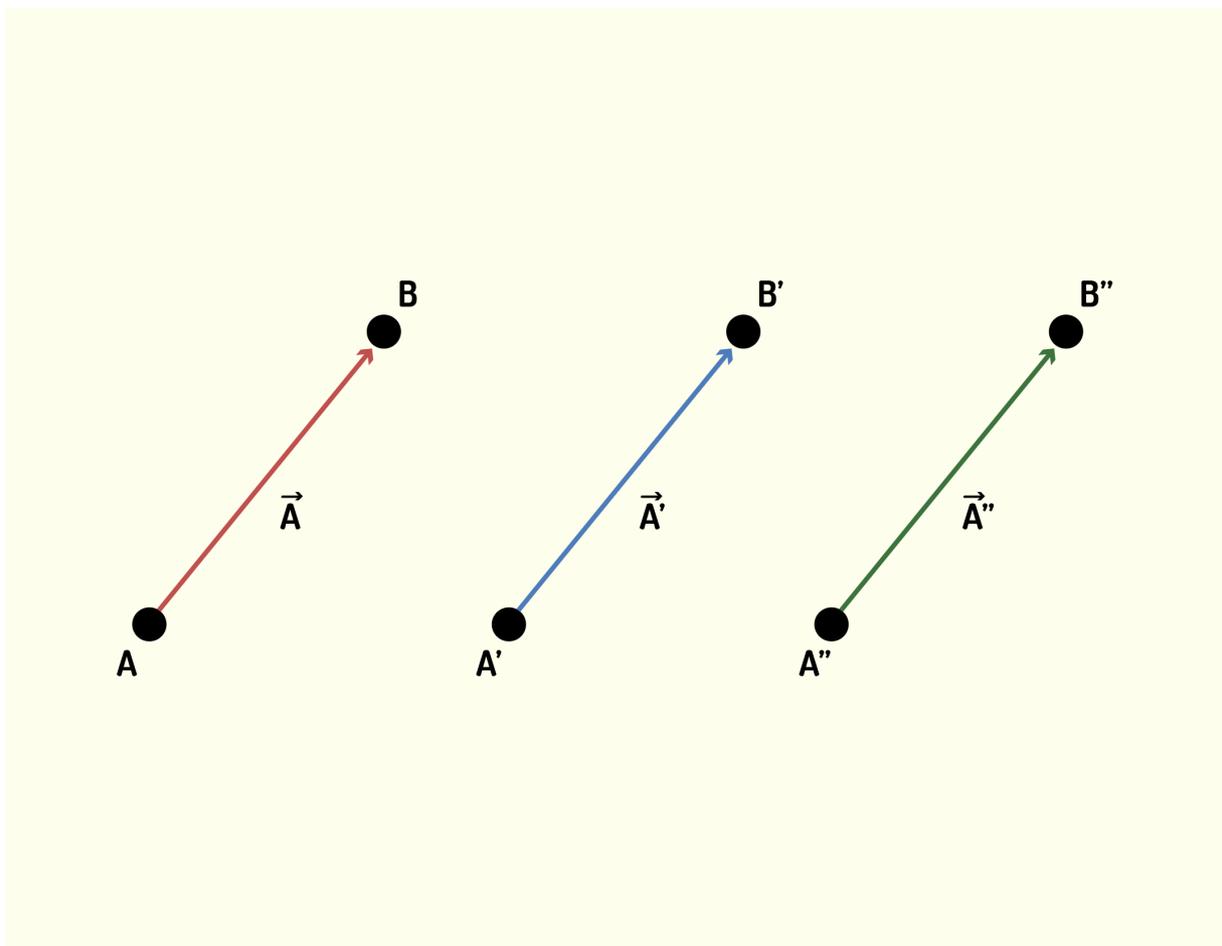
Vetores e suas representações

Como você representa a temperatura de um forno? Podemos simplesmente falar a quantos graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ele está. Mas como você representa o movimento de um avião? Não podemos simplesmente falar a quantos quilômetros por hora ele voa. Devemos especificar

também em qual direção e sentido ele está indo. Para essa segunda representação, nós utilizamos os vetores, que possuem módulo, direção e sentido.

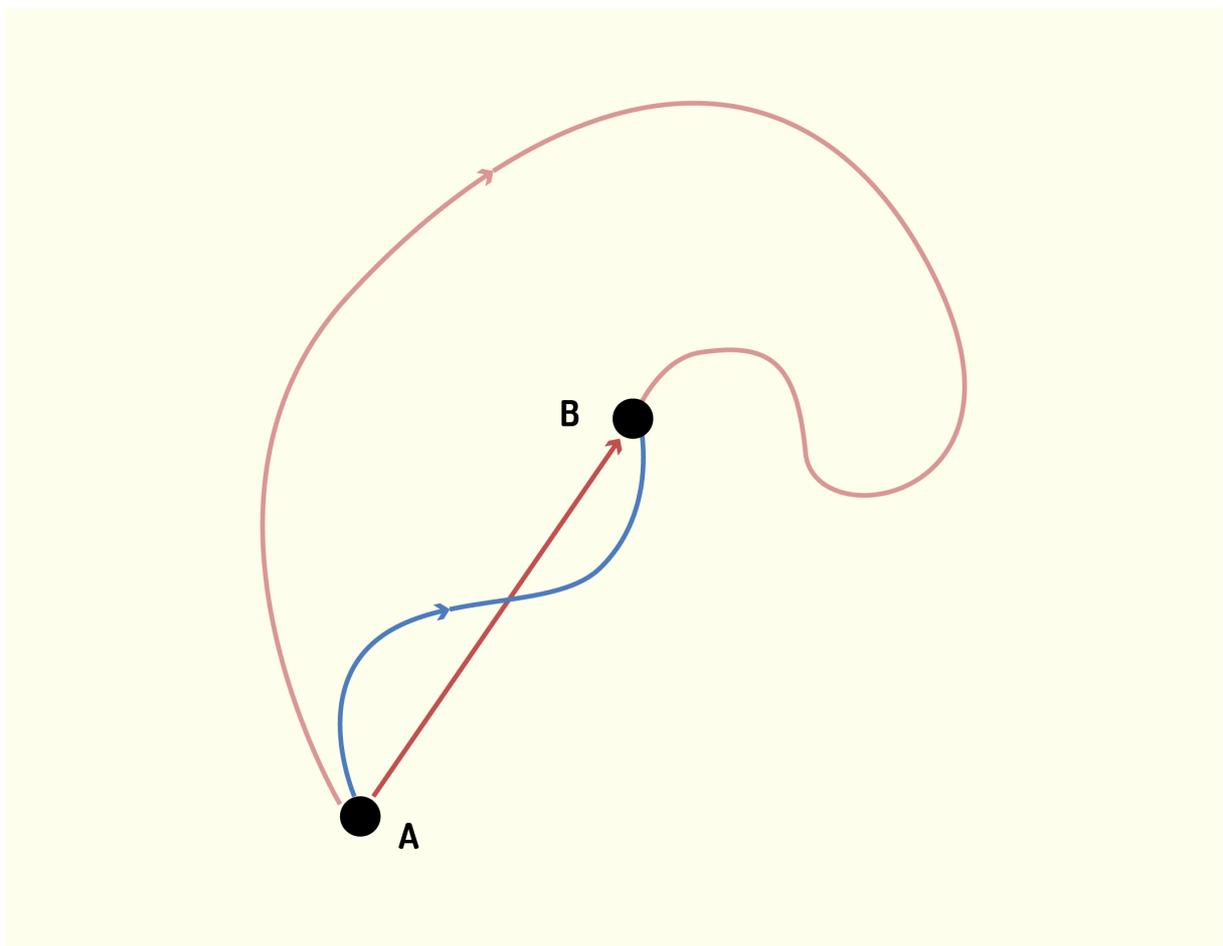
Os cálculos feitos com grandezas escalares utilizam as operações básicas que aprendemos em matemática (soma, subtração, divisão e multiplicação). Porém, quando observamos uma grandeza vetorial, é necessário utilizar cálculos específicos.

Então, como caracterizamos uma mudança de posição? É através do chamado **vetor deslocamento**. Observando a Figura 1.4, podemos identificar uma partícula que se moveu do ponto A para B . A seta entre os pontos é a representação gráfica do deslocamento, que é o vetor deslocamento \vec{A} . Você pode observar também outros dois vetores \vec{A}' e \vec{A}'' que possuem mesmo módulo e orientação e, portanto, representam a mesma variação de posição da partícula. Com isso, você já pode verificar que, na representação gráfica do vetor, o tamanho da seta indica seu módulo. Além disso, a partir de agora, um vetor será representado por uma letra em itálico e negrito com uma seta em cima.



1FIGURA 4.37 - Representação gráfica de três vetores com mesmo módulo, direção e sentido FONTE: os autores.

Mas o que aconteceu com a partícula durante o caminho feito entre os dois pontos? Boa pergunta. Isso nós não podemos representar apenas desenhando a flecha indicativa do vetor. Se observarmos a Figura 1.5, podemos verificar que há inúmeras alternativas para descrever a trajetória feita pela partícula.



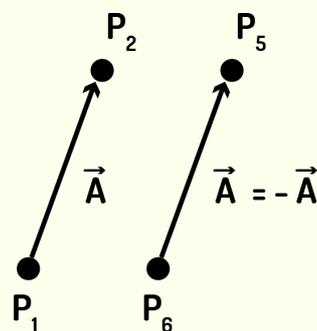
1FIGURA 5.37 - Representação gráfica de possíveis trajetórias para deslocamento entre dois pontos. FONTE: Halliday e Resnick (2012, p. 40).

E quando os vetores estão em sentidos opostos? Neste caso, você pode dizer que um vetor é negativo (ou contrário ao outro). A Figura 1.6 ilustra esse caso, em que o vetor \vec{B} possui o mesmo módulo, porém sentido contrário ao vetor \vec{A} . Matematicamente, podemos expressar

esses vetores como $\vec{A} = -\vec{B}$.

E se os vetores tiverem sentido contrário e módulos diferentes? Neste caso, quando dois vetores \vec{A} e \vec{C} possuem mesma direção, sentidos contrários e módulos diferentes, você dirá que eles são vetores **antiparalelos**.

Você pode estar se perguntando o que é esse "módulo" do vetor que nós tanto estamos discutindo. Basicamente é a representação da intensidade de um vetor. Sendo assim, é uma grandeza escalar sempre positiva. Matematicamente, nós representamos o módulo pela mesma letra em itálico (sem negrito) de seu respectivo vetor ou pela notação de barras verticais laterais: (*Módulo de \vec{A}*) = $A = |\vec{A}|$.

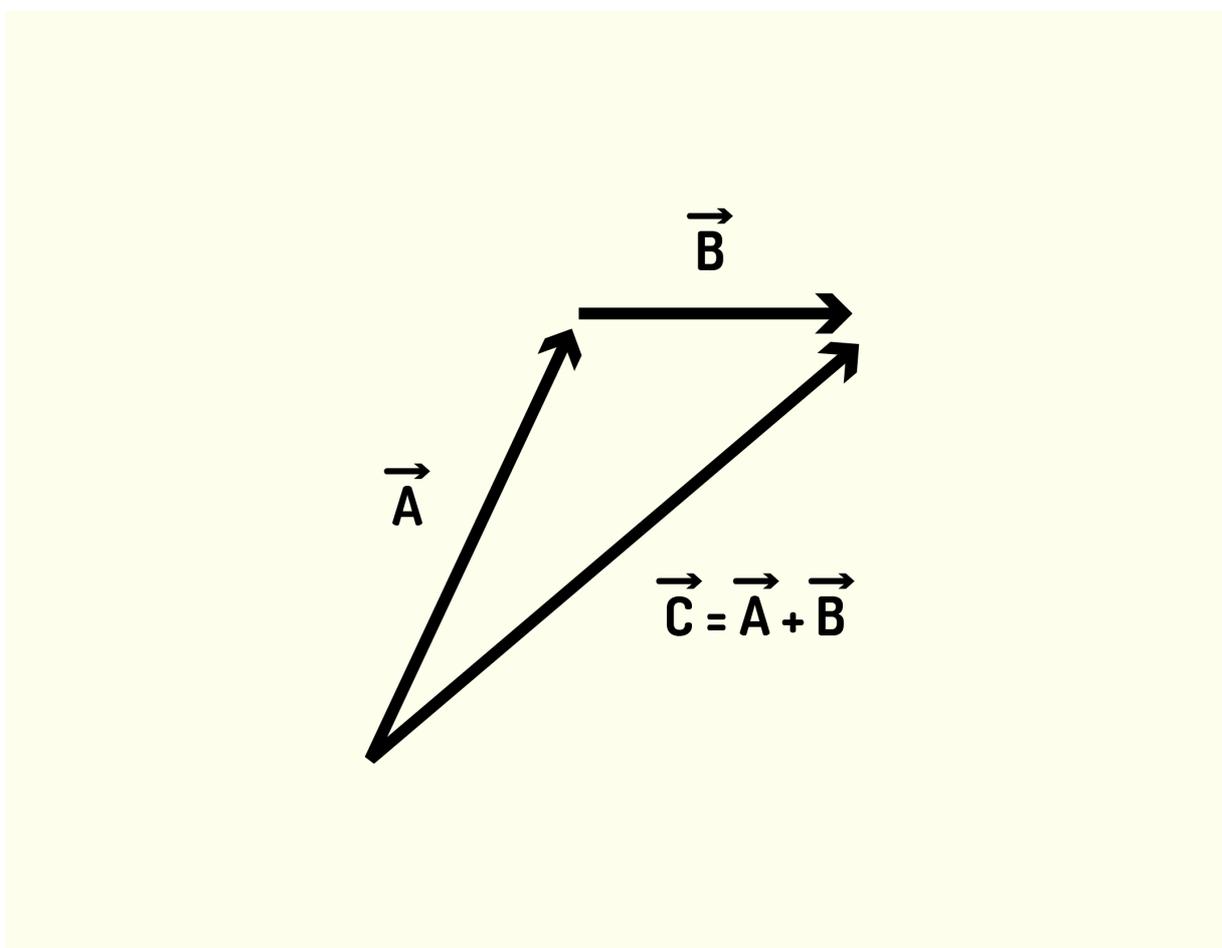


O deslocamento \vec{B} possui o mesmo módulo de \vec{A} , mas direção oposta: \vec{B} é o negativo de \vec{A}

1FIGURA 6.37 - Representação gráfica de vetores negativos. FONTE: Young e Freedman (2010, p. 11).

Soma vetorial

E como representamos um deslocamento com mais de um caminho? Suponha que uma partícula faça dois deslocamentos: passe de A para B e depois para C. Como ilustrado na Figura 1.7, a representação gráfica é da mesma forma que já vimos: você deve desenhar uma seta ligando os pontos A e B e outra ligando B e C, de modo que o início da segunda seta coincida com o final da primeira, representando assim os dois deslocamentos feitos pela partícula. O deslocamento total resultante será o vetor que liga os pontos A e C.



1FIGURA 7.37 - Representação gráfica da soma de vetores, desenhando a extremidade de um com o início de outro.

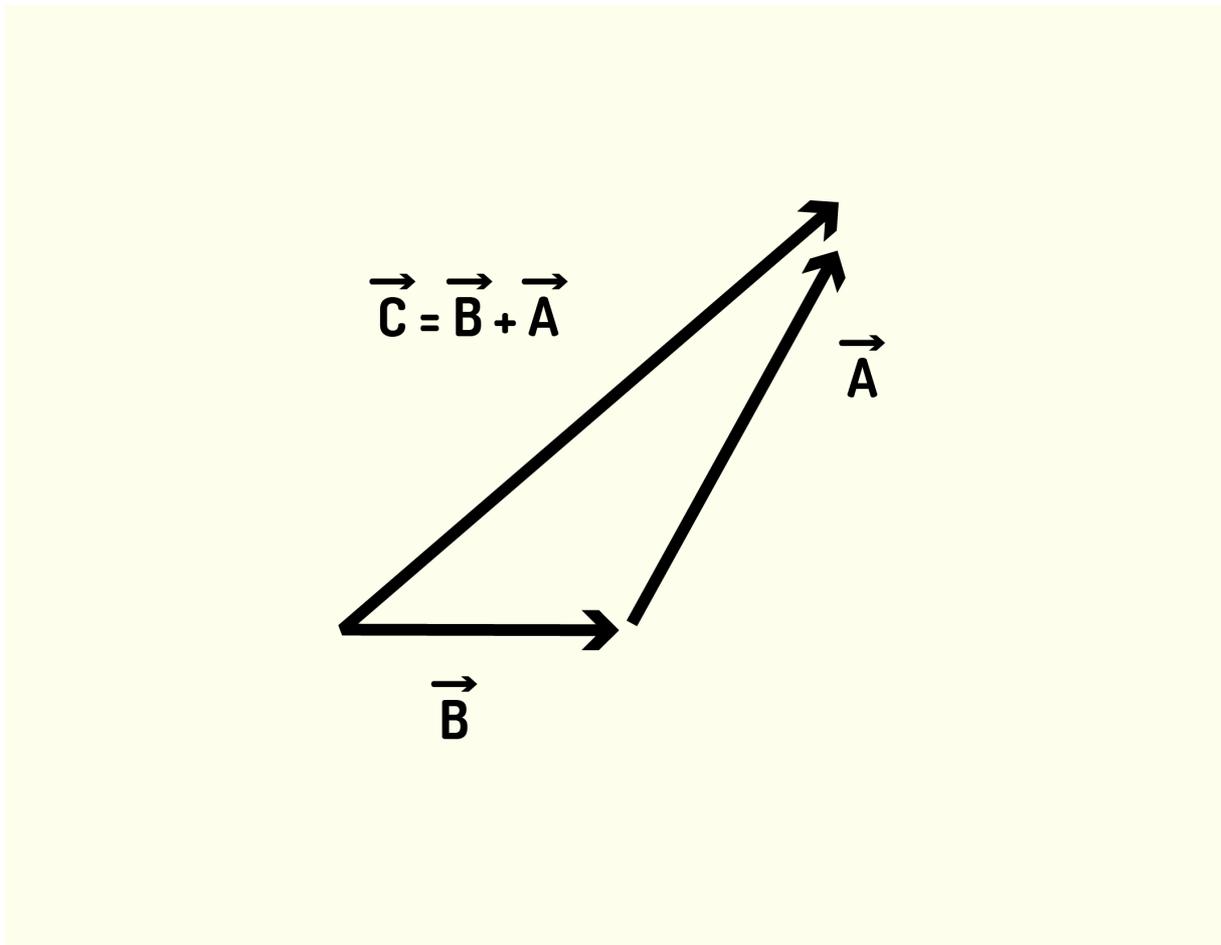
FONTE: Young e Freedman (2010, p.12).

Mas como eu posso escrever matematicamente essa relação? Essa ligação é a soma vetorial expressa da seguinte forma:

$$\vec{C} = \vec{A} + \vec{B} \quad (1.1)$$

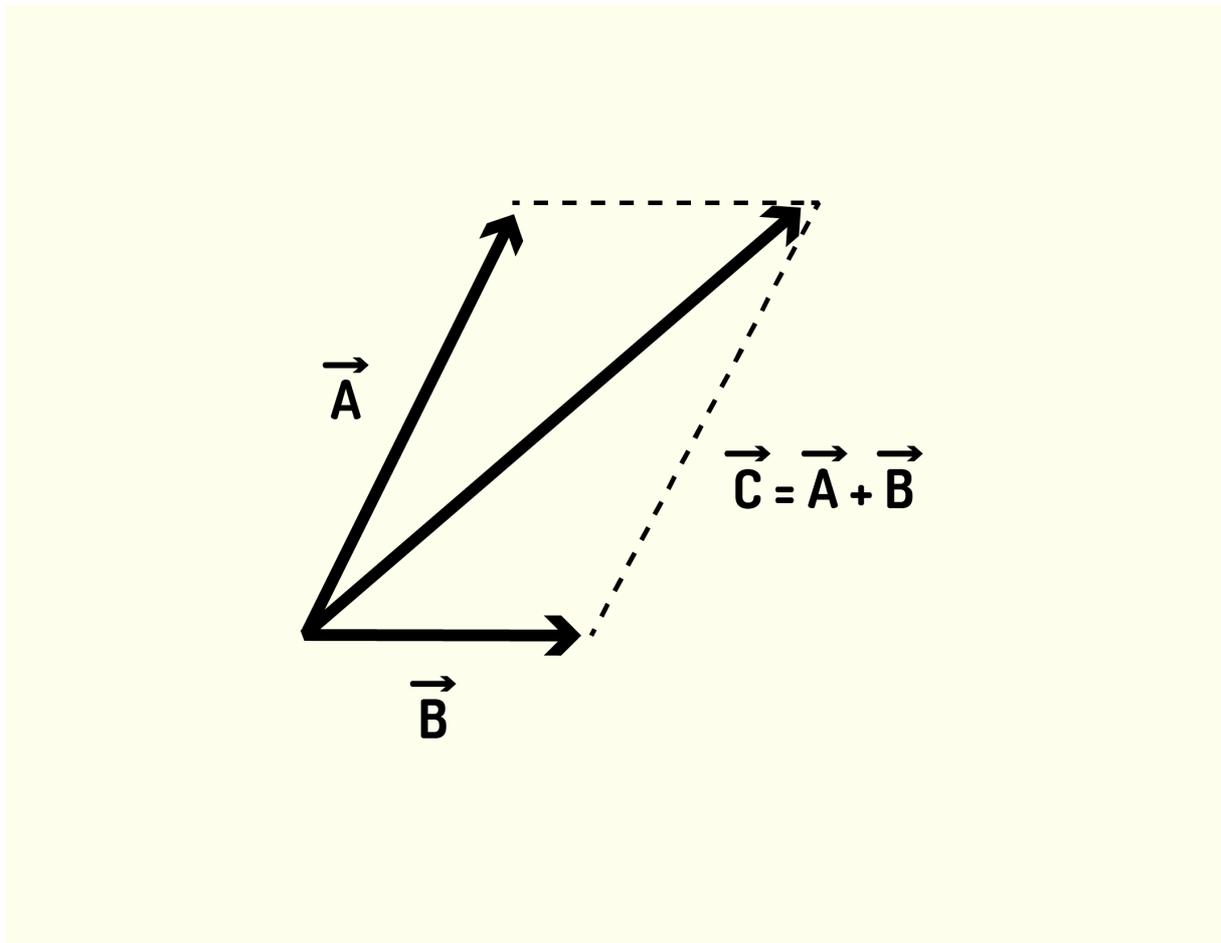
Você pode estar neste momento se perguntando se, na soma vetorial, podemos também inverter a ordem dos operandos. Se observarmos a Figura 1.8, veremos que isso é permitido, ou seja, a ordem da soma vetorial não importa. Isso é uma propriedade básica da soma vetorial, que é a **comutatividade**. Matematicamente, podemos então escrever:

$$\vec{C} = \vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A} \quad (1.2)$$



1.FIGURA 8.37 - Representação gráfica comutatividade na soma de vetores FONTE: Young e Freedman (2010, p.12).

Ou então podemos fazer a soma de uma terceira forma: desenhamos uma projeção do vetor \vec{A} no início de \vec{B} e fazemos o mesmo para o vetor \vec{B} , formando assim um paralelogramo. O vetor \vec{C} resultante é a ligação do ponto de origem até a extremidade oposta do paralelogramo, assim como ilustrado na Figura 1.9.

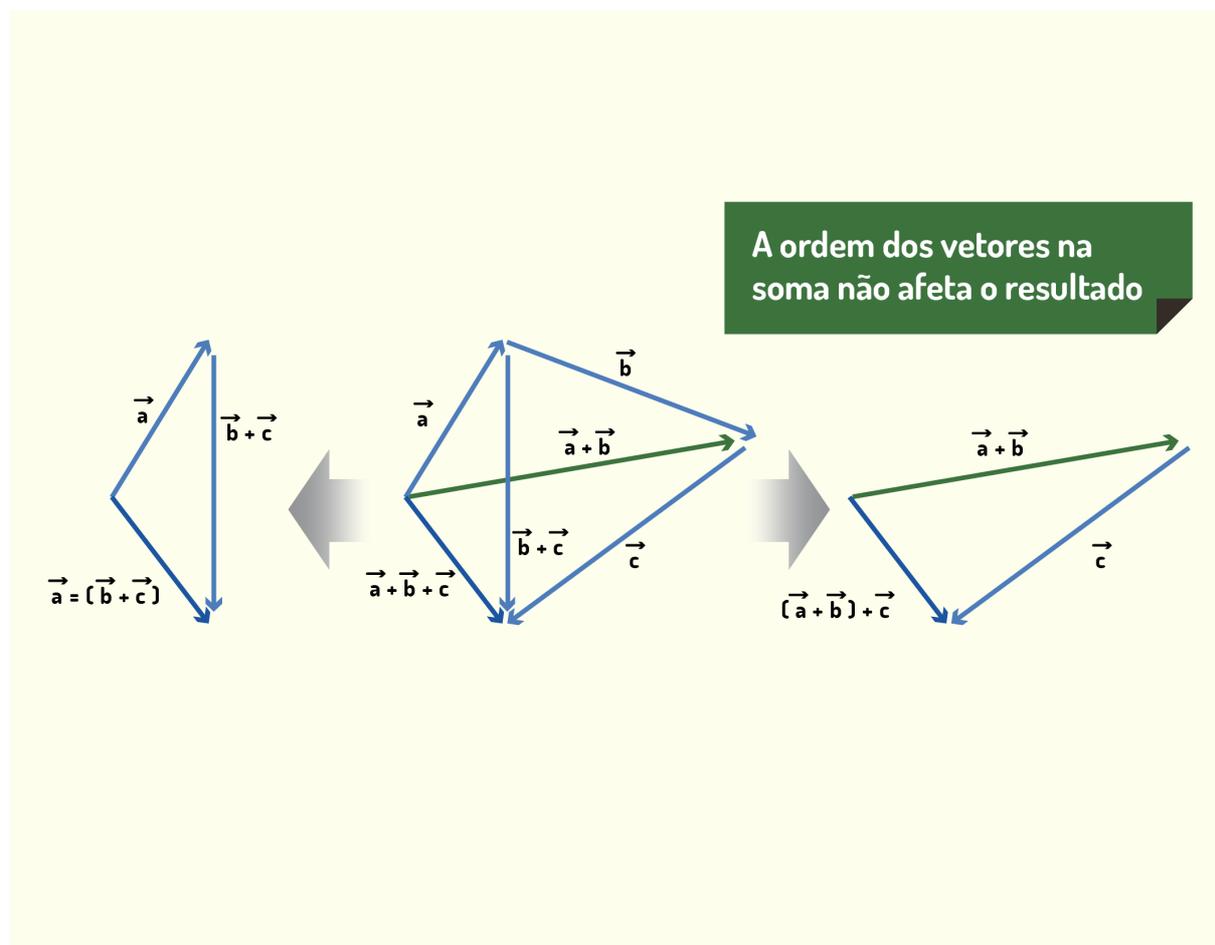


1FIGURA 9.37 - Representação gráfica da soma de vetores, desenhando-se um paralelogramo FONTE: Young e Freedman (2010, p.12).

E se quisermos somar mais do que dois vetores? Primeiramente, devido à lei associativa, podemos associar a soma de qualquer forma que desejarmos, assim como descrito na Equação (1.3).

$$(\vec{A} + \vec{B}) + \vec{C} = \vec{A} + (\vec{B} + \vec{C}) \quad (1.3)$$

Sendo que a correspondência gráfica para a Equação (1.3) é que nós podemos agrupar os vetores (coincidindo o início de um com o final de outro) de qualquer forma e o resultado será o mesmo, assim como ilustrado na Figura 1.10.

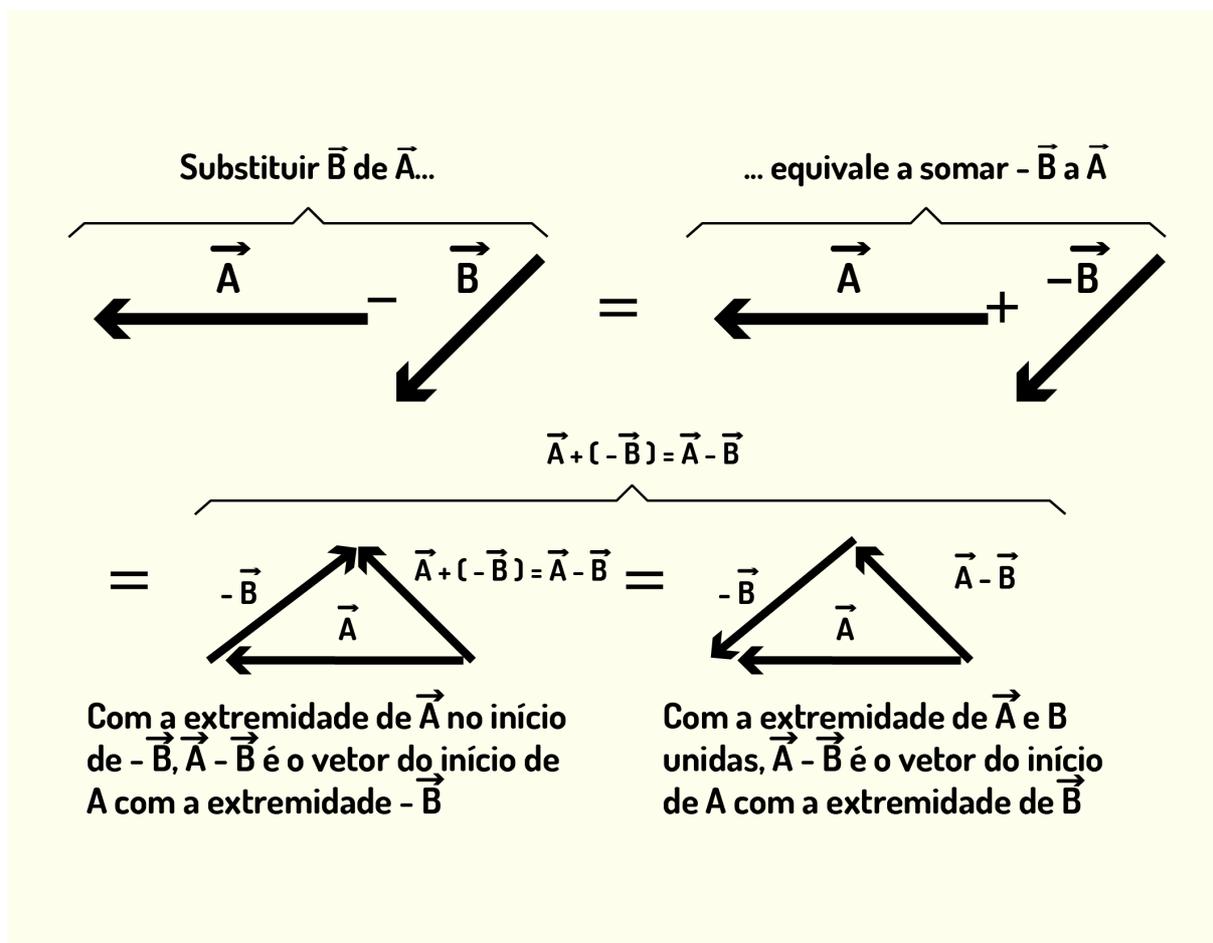


1FIGURA 10.37 - Representação gráfica da soma de três vetores FONTE: Halliday e Resnick (2012, p.41).

Da mesma forma que você aprendeu a fazer soma de vetores, podemos também executar operações de subtração. Por exemplo, se desejarmos fazer $\vec{A} - \vec{B}$, podemos utilizar as propriedades aprendidas para manipular a operação da seguinte forma:

$$\vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B}) \quad (1.4)$$

Sendo $-\vec{B}$ o vetor negativo de \vec{B} , que, graficamente, podemos representar como descrito na Figura 1.11.



1FIGURA 11.37 - Representação gráfica da subtração de dois vetores FONTE: Young e Freedman (2012, p.13).

Componentes de vetores

Caro(a) aluno(a), na seção anterior você aprendeu como fazer operações com vetores de forma gráfica. Porém, essa pode não ser a maneira mais prática e precisa, pois seria sempre necessário ter consigo régua e esquadros para auxiliarem no desenho. Uma forma mais simples é o uso de uma representação dos vetores em um sistema de coordenadas

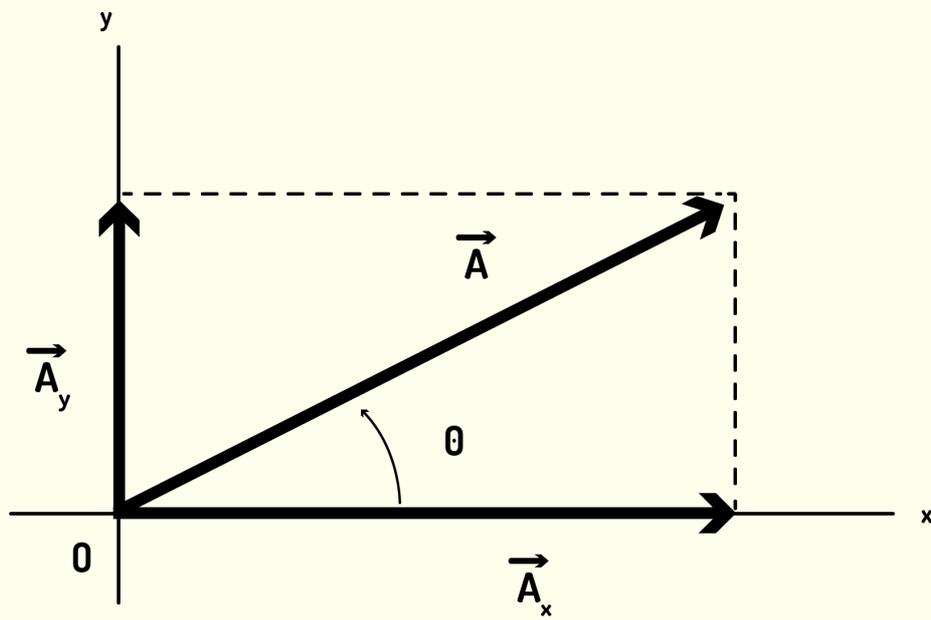
retangulares (cartesianas). Os eixos desse sistema de coordenadas são chamados de eixos O_x e O_y , sendo O a origem desse sistema. Para o caso de vetores tridimensionais ainda existirá o eixo O_z , mas, para simplificar, trabalharemos somente com o sistema bidimensional.

A ideia é que qualquer vetor no plano xy pode ser representado como a soma de dois vetores, sendo um vetor \vec{A}_x paralelo ao eixo O_x , e outro \vec{A}_y , paralelo ao eixo O_y . Esses vetores paralelos são chamados de **vetores componentes** do vetor \vec{A} , que pode ser escrito como:

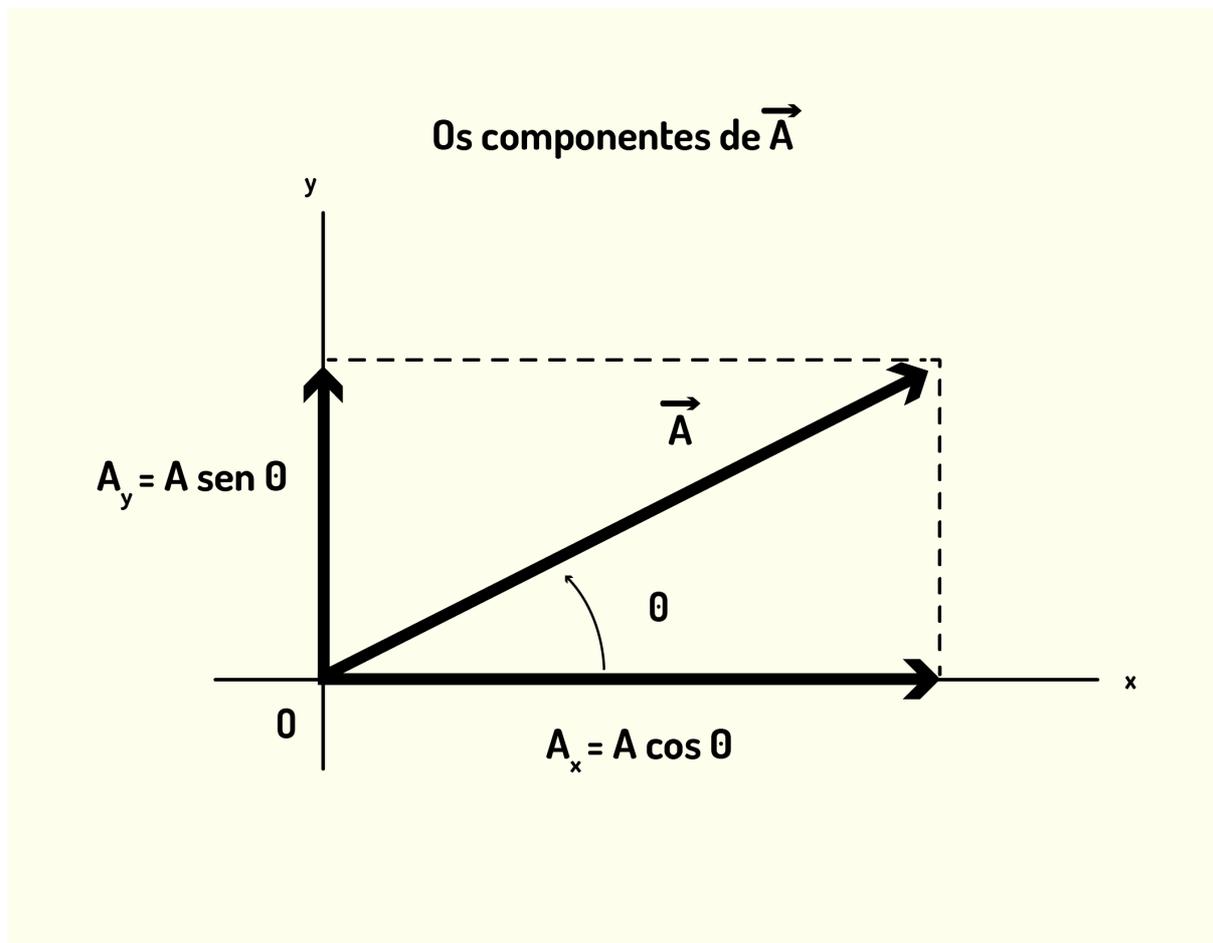
$$\vec{A} = \vec{A}_x + \vec{A}_y \quad (1.4)$$

O módulo de cada vetor componente é chamado de **componente** (falamos componente A_x para o vetor \vec{A}_x e componente A_y para o vetor \vec{A}_y), e é um número escalar que pode ser positivo ou negativo, dependendo do sentido do vetor componente. Na Figura 1.12, podemos identificar a localização dos vetores componentes, que são a projeção do vetor principal \vec{A} em cada um dos eixos do sistema de coordenadas. Já na Figura 1.13, observamos como relacionar os componentes do vetor com o vetor \vec{A} . Essa relação é feita se estabelecendo um ângulo entre esse vetor e alguma referência (na figura, a referência é o eixo O_x)

Os vetores componentes de \vec{A}



1FIGURA 12.37 - Representação do vetor \vec{A} em vetores componentes \vec{A}_x e \vec{A}_y FONTE: Young e Freedman (2012, p.15).



1FIGURA 13.37 - Representação do vetor \vec{A} em componentes A_x e A_y FONTE: Young e Freedman (2012, p.15).

O cálculo das componentes, como citado acima e ilustrado na Figura 1.13, é feito a partir da identificação do ângulo θ formado entre o vetor e uma determinada referências, do cálculo das funções seno e cosseno ($\text{sen}(\theta)$ e $\text{cos}(\theta)$ respectivamente) e do conhecimento do módulo do vetor principal:

$$\frac{A_x}{A} = \text{cos } \theta \text{ e } \frac{A_y}{A} = \text{sen } \theta \text{ (1.5)}$$

Caro(a) aluno(a), é importante notar que as relações na Equação (1.5) são válidas somente quando o ângulo θ for medido quando consideramos uma rotação no sentido $+O_x$.

Sabia que podemos também obter as informações de um vetor a partir de suas componentes? Sim, isso é possível. Se aplicarmos o teorema de Pitágoras no triângulo da Figura 1.13, em que o módulo de \vec{A} é obtido da seguinte forma:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \quad (1.6)$$

Podemos também encontrar o valor do ângulo θ a partir da seguinte análise trigonométrica:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{A_y}{A_x} \text{ e } \theta = \operatorname{arctg} \frac{A_y}{A_x} \quad (1.7)$$

Sendo que "arctg" representa a função inversa da tangente, ou seja, o ângulo cuja tangente possui valor $\frac{A_y}{A_x}$.

Multiplicação de uma grandeza escalar por uma vetorial

Caso você encontre alguma ocasião em que há um número escalar multiplicando um vetor, esse escalar positivo irá apenas multiplicar o módulo do vetor. Caso o valor seja negativo, seu modo será multiplicado e seu sentido será invertido. Porém, podemos também utilizar a propriedade distributiva da multiplicação por escalar para calcular essa multiplicação através do uso das componentes do vetor:

$$\vec{D} = c(\vec{A}) = c\left(\vec{A}_x + \vec{A}_y\right) = c\vec{A}_x + c\vec{A}_y = \vec{D}_x + \vec{D}_y \quad (1.8)$$

Soma vetorial através do uso das componentes

De uma forma bem simples, podemos falar que o cálculo do vetor resultante é a soma das componentes de cada eixo de todos os vetores a serem somados. Sendo que o componente O_x de um vetor só pode ser somado com os componentes O_x dos outros vetores, e o mesmo vale para componentes referentes a outros eixos. Ou seja, se desejamos encontrar o vetor \vec{R} resultante da soma entre três vetores \vec{A} , \vec{B} e \vec{C} , é necessário fazer as seguintes operações:

$$R_x = A_x + B_x + C_x \text{ e } R_y = A_y + B_y + C_y \text{ (1.9)}$$

Extensão para vetores tridimensionais

Caso você deseje trabalhar com vetores tridimensionais, o cálculo do seu módulo é facilmente obtido através da inserção da componente O_z na Equação (1.6) da seguinte forma:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \text{ (1.10)}$$

E se for necessário somar dois ou mais vetores tridimensionais, faz-se a soma dos componentes O_z de forma similar ao procedido com os componentes dos outros eixos:

$$R_x = A_x + B_x + C_x \text{ e } R_y = A_y + B_y + C_y \text{ e } R_z = A_z + B_z + C_z \text{ (1.11)}$$

Vetores unitários

Os vetores unitários são aqueles que possuem módulo igual a 1 (um), cujo objetivo principal é apontar a direção e o sentido dos eixos das coordenadas. Os vetores unitários possuem sinal positivo e apontam no mesmo sentido dos eixos O_x , O_y e O_z . Por definição, o vetor unitário \hat{i} aponta para o sentido positivo de O_x , \hat{j} aponta para $+O_y$, e o vetor unitário \hat{k} representa o sentido positivo do eixo O_z .

Além de apontar o sentido positivo, os vetores unitários também são úteis na representação matemática dos vetores, auxiliando também na escrita das operações com vetores:

$$\vec{A} = A_x \hat{i} + A_y \hat{j}$$

$$\vec{B} = B_x \hat{i} + B_y \hat{j}$$

$$\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$$

$$= (A_x \hat{i} + A_y \hat{j}) + (B_x \hat{i} + B_y \hat{j}) \text{ (1.12)}$$

$$= (A_x + B_x) \hat{i} + (A_y + B_y) \hat{j}$$

$$= R_x \hat{i} + R_y \hat{j}$$

Produtos de vetores

Neste momento, você já deve estar apto para executar somas de vetores através de vários métodos, além de saber representá-los gráfica e matematicamente. Porém, ainda precisamos aprender a lidar com produtos de vetores. Lembra-se de que um vetor é completamente de um escalar? Sendo assim, o produto comum não pode ser aplicado. Existem dois tipos de produtos de vetores: i) *produto escalar* terá como resultado uma grandeza escalar, ao passo que o ii) *produto vetorial* irá gerar uma grandeza vetorial.

Produto escalar

O produto escalar entre dois vetores \vec{A} e \vec{B} , cuja notação é $(\vec{A}\vec{B})$, está relacionado ao ângulo ϕ , que é o menor ângulo formado entre esses dois vetores, assim como ilustrado na Figura 1.14, e é obtido matematicamente através da seguinte relação matemática:

$$(\vec{A}\vec{B}) = AB \cos\phi \quad (1.13)$$

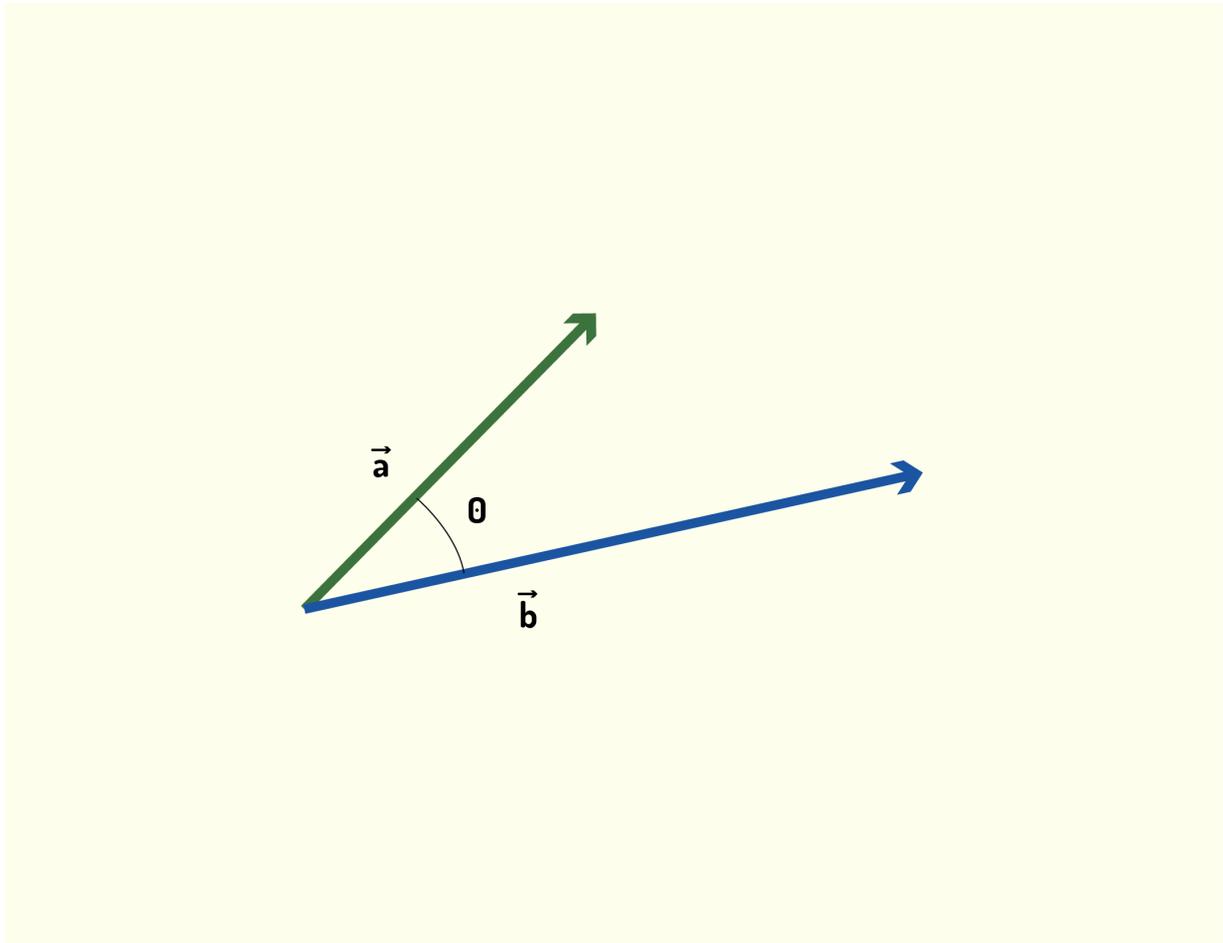
Ou então, quando você estiver trabalhando com a notação de vetores unitários, poderá calcular o produto escalar da seguinte forma:

$$(\vec{A}\vec{B}) = (A_x \hat{i} + A_y \hat{j}) (B_x \hat{i} + B_y \hat{j}) = A_x B_x + A_y B_y \quad (1.14)$$

Sendo que, para chegar à Equação (1.14), foi preciso utilizar a propriedade distributiva e também a Equação (1.13) para calcular o produto escalar entre os vetores unitários:

$$\hat{i}\hat{i} = \hat{j}\hat{j} = (1)(1)\cos 0^\circ = 1$$

$$\hat{i}\hat{j} = (1)(1)\cos 90^\circ = 0 \quad (1.15)$$



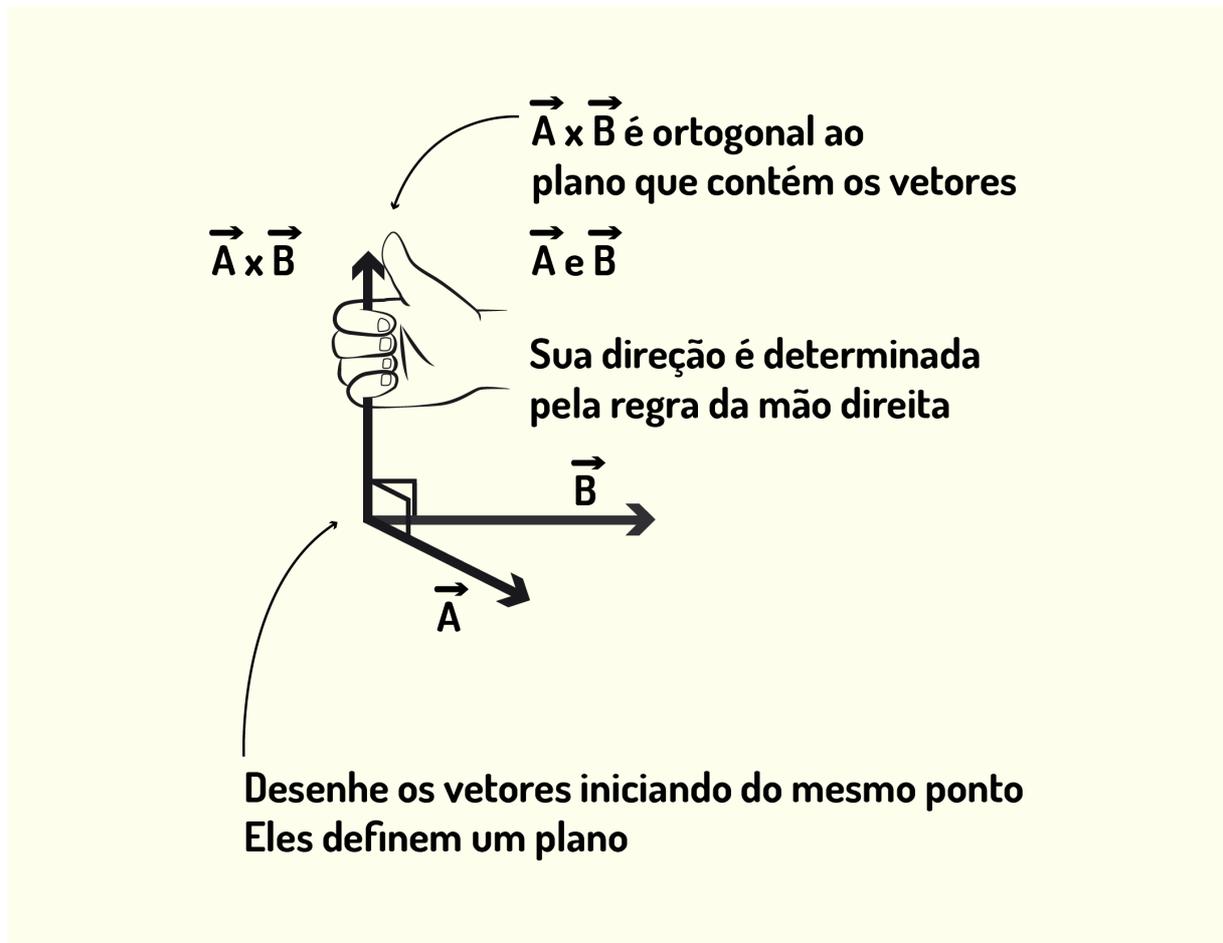
1FIGURA 14.37 - Representação gráfica do produto escalar entre dois vetores FONTE: Halliday e Resnick (2012, p.50).

Produto vetorial

Como você leu anteriormente que o resultado do produto vetorial entre dois vetores \vec{A} e \vec{B} , que é escrito como $\vec{C} = \vec{A} \times \vec{B}$, é também um vetor. O módulo desse vetor resultante é dado por:

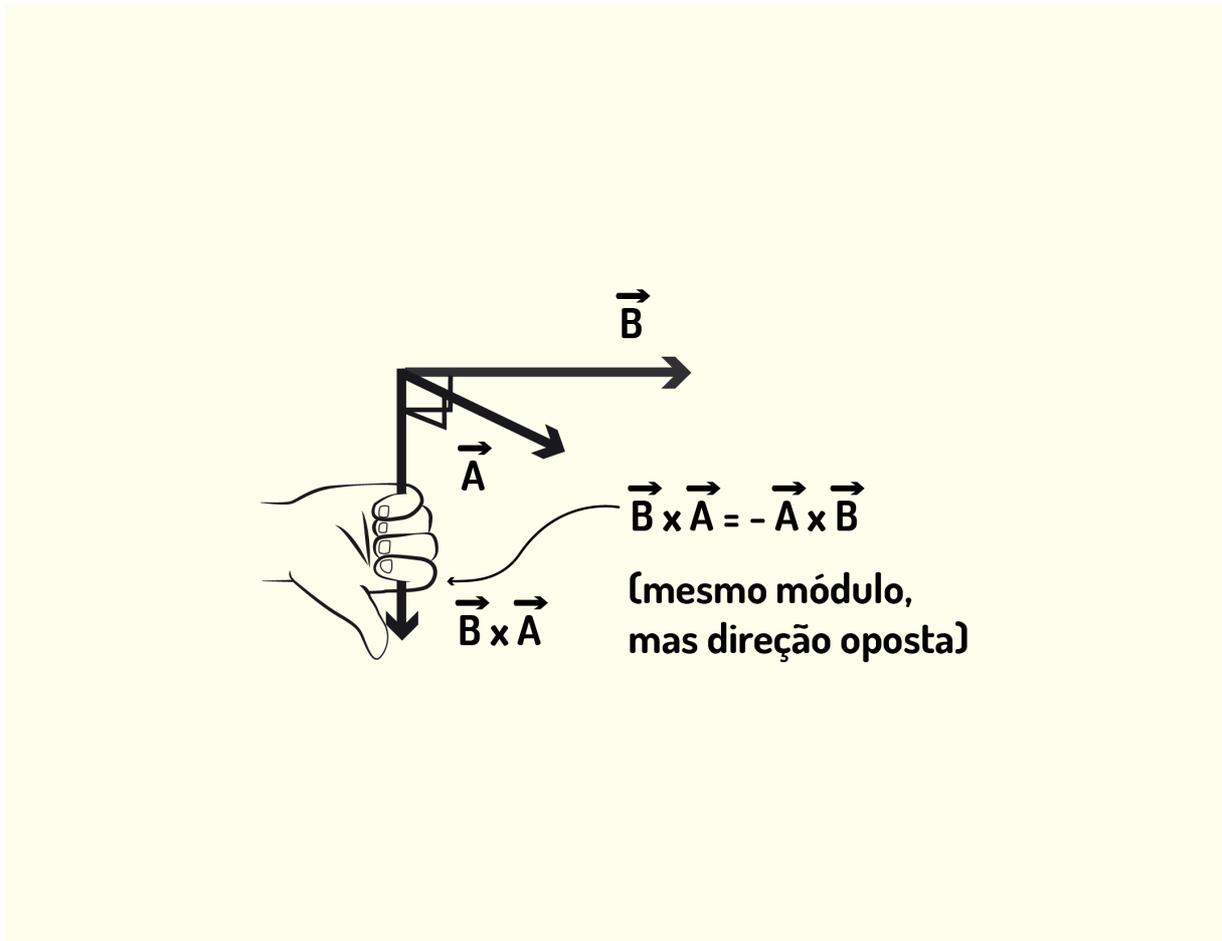
$$C = |\vec{A} \times \vec{B}| = AB \cos\phi \quad (1.16)$$

A direção do produto vetorial é sempre ortogonal ao plano que contém os vetores \vec{A} e \vec{B} . Porém, sempre existirá dois sentidos para essa direção ortogonal. Para saber qual o sentido certo, devemos utilizar a **regra da mão direita**. Imagine os dois vetores no mesmo plano e que o vetor \vec{A} deve girar no sentido do menor ângulo entre os dois vetores. Essa regra diz que, se os quatro dedos da sua mão direita estiverem apontando no mesmo sentido do movimento desse giro, o seu polegar estará apontando para o sentido da resultante do produto vetorial. Para entendermos melhor, observe as ilustrações das Figuras 1.15 e 1.16.



1FIGURA 15.37 - Regra da mão direita para $\vec{C} = \vec{A} \times \vec{B}$ FONTE: Young e Freedman (2012, p.23).

Analogamente, podemos verificar que $\vec{C} = \vec{B} \times \vec{A} = -\vec{A} \times \vec{B}$ se observarmos a regra da mão direita ilustrada na Figura 1.16.



1FIGURA 16.37 - Regra da mão direita para $\vec{C} = \vec{B} \times \vec{A} = -\vec{A} \times \vec{B}$ FONTE: Young e Freedman (2010, p.23).

Porém, caro(a) aluno(a), se você está preferindo trabalhar com as componentes dos vetores, vamos agora entender como encontrar o resultado do produto vetorial a partir da notação de vetores unitários. Primeiramente, vamos analisar a multiplicação vetorial entre cada um dos vetores unitários para o caso tridimensional. Como o ângulo entre um vetor consigo mesmo é zero, podemos afirmar que o produto vetorial dele com ele mesmo também é zero:

$$\hat{i} \times \hat{i} = \hat{j} \times \hat{j} = \hat{k} \times \hat{k} = 0 \quad (1.17)$$

Utilizando a Equação (1.17) e a regra da mão direita, o produto vetorial entre os outros vetores unitários pode ser encontrado:

$$\hat{i} \times \hat{j} = -\hat{j} \times \hat{i} = \hat{k}$$

$$\hat{j} \times \hat{k} = -\hat{k} \times \hat{j} = \hat{i} \quad (1.18)$$

$$\hat{k} \times \hat{i} = -\hat{i} \times \hat{k} = \hat{j}$$

Aplicando então a propriedade distributiva no produto vetorial escrito com suas componentes e vetores unitários, podemos chegar à solução simplificada (é interessante que você tente expandir a equação e chegar ao resultado a seguir):

$$\vec{A} \times \vec{B} = (A_y B_z - A_z B_y) \hat{i} + (A_z B_x - A_x A_z) \hat{j} + (A_x B_y - A_y B_x) \hat{k} \quad (1.19)$$

Como você viu, na parte introdutória desta unidade, a Física é uma ciência experimental. Sendo assim, que tal exercitarmos o conhecimento adquirido até agora com um pequeno exercício?

Os deslocamentos que nós fazemos quando viajamos de uma cidade para outra podem também ser representados por vetores. Quando queremos apenas mostrar as distâncias percorridas, é mais conveniente utilizarmos vetores bidimensionais, mesmo que a viagem seja feita de avião. Para você entender melhor como isso é feito, vamos analisar o caso de um avião que precisou fazer um pouso de emergência.

Grandezas básicas: deslocamento, velocidade e aceleração

Você já se perguntou como e por que uma bola, ao ser jogada para cima, atinge uma determinada altura e depois começa a cair? Ou então, quando você deixa um objeto cair de sua mão, qual o tempo que você tem para recuperá-lo antes dele chegar ao solo? Essas e diversas outras situações são explicadas pela cinética, que é a parte da física mecânica que estuda os diversos tipos de movimentos.

Portanto, caro(a) aluno(a), agora nós aprenderemos as características de um dos tipos mais simples de movimento, que é o de uma partícula que se move em linha reta, possuindo ou não algum tipo de aceleração. Então você deve estar se perguntando por que no tópico anterior você estudou os vetores? É que tanto a velocidade quanto a aceleração são grandezas vetoriais.

Estudaremos também casos em que a aceleração do objeto não é constante. Um exemplo clássico é a queda livre de uma bola de boliche. Ao soltarmos essa bola de uma determinada altura, a força de seu peso fará com que, gradativamente, a aceleração do corpo aumente. Para você conseguir estudar esse tipo de movimento, será necessário utilizar todo o seu conhecimento de cálculo e integração.

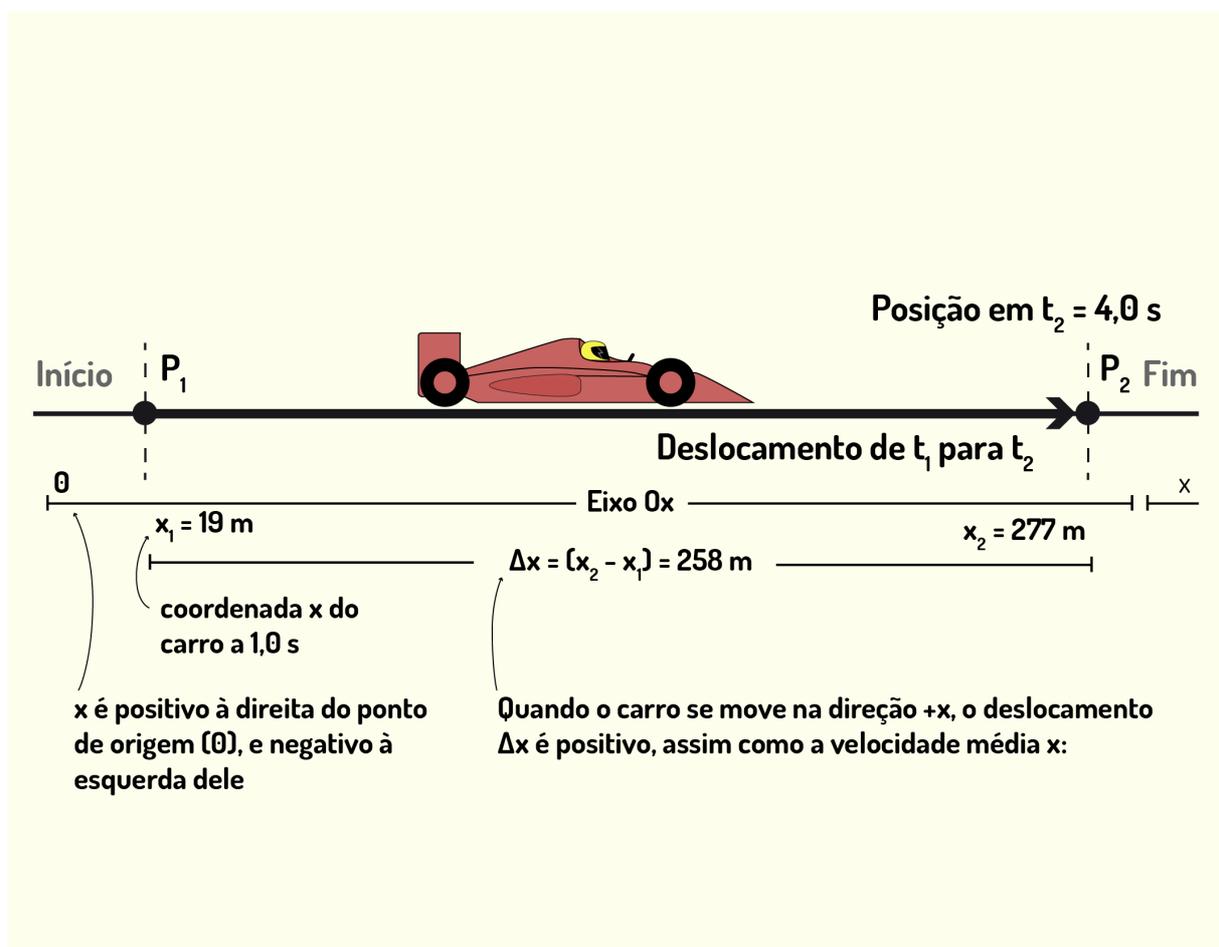
Deslocamento, tempo e velocidade média

Imagine o simples movimento de um carro em uma pista reta. Para podermos descrever esse movimento, o primeiro passo é estabelecer um sistema de coordenadas que possa nos orientar. Para isso, vamos escolher o eixo Ox . A posição do carro é descrita em função do tempo, ou seja, em cada instante (dependendo de sua velocidade e aceleração), o carro estará em um ponto. Se considerarmos sempre onde a extremidade dianteira do carro está, poderemos reduzir a representação do carro a uma simples partícula.

Para facilitar o entendimento, vamos observar a Figura 1.17. Considere que inicialmente a dianteira do carro estava na origem e , após 1 segundo, o carro percorreu 19 metros (ponto P_1) e, após 4s de movimento, a partícula já tenha chegado ao ponto P_2 , que fica a 277m da origem. Portanto, o carro sofreu um certo deslocamento em um intervalo de tempo específico. O deslocamento do carro entre P_1 e P_2 foi de $(277 - 19) = 258\text{m}$ em um intervalo de tempo

$(t_2 - t_1) = 4 - 1 = 3$ segundos. Com isso, você já é capaz de calcular a **velocidade média** em relação ao x (v_{mx}) da partícula nesse período, que é a variação de distância (Δx) dividida pelo intervalo de tempo (Δt):

$$v_{mx} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{277 - 19}{4 - 1} = \frac{258 \text{ m}}{3,0 \text{ s}} = 86 \text{ m/s} \quad (1.19)$$



1FIGURA 17.37 - Posição, deslocamento e velocidade média de um carro. FONTE: Young e Freedman (2010, p.36).

Nesse caso, a velocidade média é positiva, significando que, durante o intervalo de tempo em questão, o valor da posição do carro no eixo x cresce (movimento da esquerda para a direita na Figura 1.17). Então, quando a velocidade média será negativa? Velocidade média

negativa não significa que estamos perdendo velocidade. Como a velocidade é uma grandeza vetorial, o caso em que ela é negativa representa um movimento no sentido $-O_x$, que é quando o valor de x se torna cada vez menor (ou mais negativo).

Por isso, é muito importante que você tenha cuidado ao analisar as posições e observe a orientação e a origem do sistema de coordenadas adotado. Por exemplo, no caso do carro, escolhamos a origem à esquerda da figura, e o carro se movimentou para a direita. Porém, se a origem fosse admitida como sendo na extremidade direita, o sentido positivo de x seria da direita para a esquerda e, conseqüentemente, a velocidade média do móvel seria negativa. Agora você viu como é importante prestar atenção na origem do sistema de coordenadas, não é mesmo?!

Velocidade instantânea

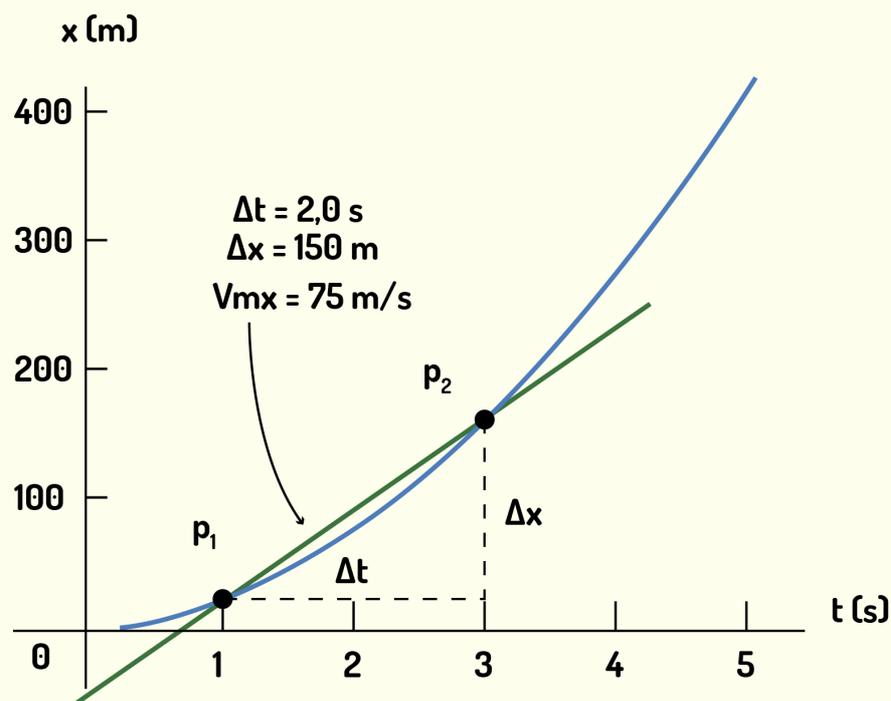
Como vimos anteriormente, a velocidade média relaciona um determinado deslocamento a um intervalo de tempo. E como encontramos a velocidade de uma partícula em um tempo específico? Para isso, devemos analisar a fórmula da velocidade média quando o intervalo de tempo tende a zero, ou seja:

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (1.20)$$

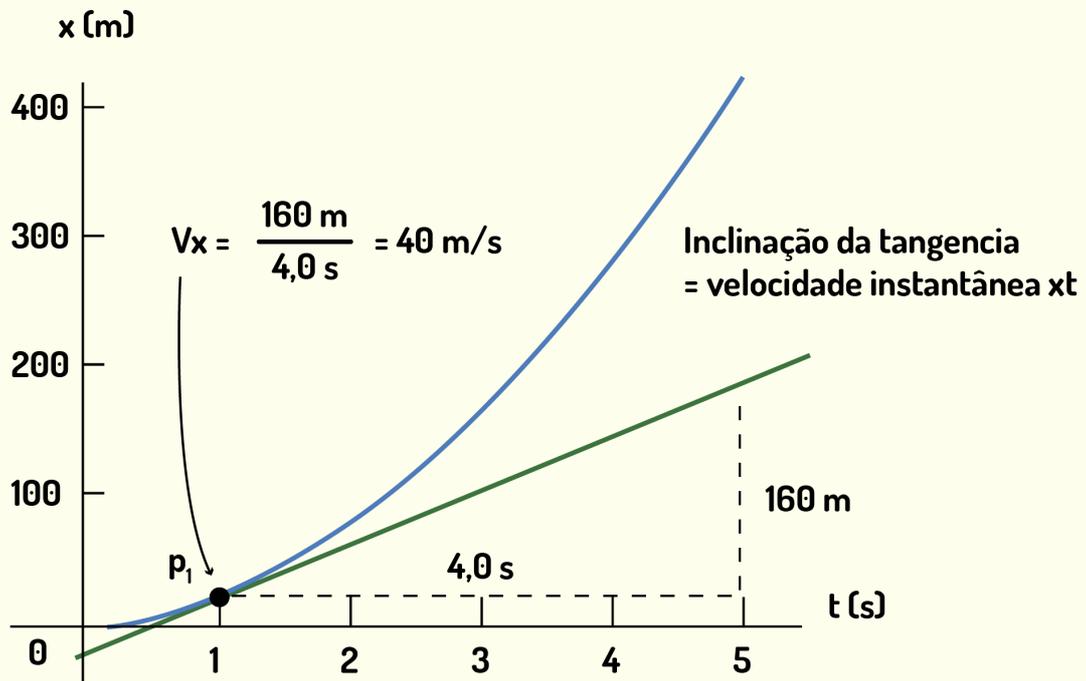
Conseguiu observar que a velocidade instantânea v_x é a taxa na qual a posição da partícula varia em um instante de tempo específico? Assim como v_{mx} , a velocidade instantânea é também um vetor. Sendo assim, você pode também querer encontrar a **velocidade escalar instantânea**, ou somente **velocidade escalar**, que é o módulo de v_x . Note que a velocidade escalar de dois objetos pode ser a mesma, embora eles estejam com velocidades bastante diferentes. Por exemplo, a velocidade escalar de duas pessoas correndo a $+5m/s$ e $-5m/s$ é a mesma, embora elas estejam em direções opostas.

Você sabe dizer qual tipo de velocidade está sendo marcada no velocímetro do seu carro? É a velocidade escalar, pois ele não indica o sentido nem a direção para onde você está indo.

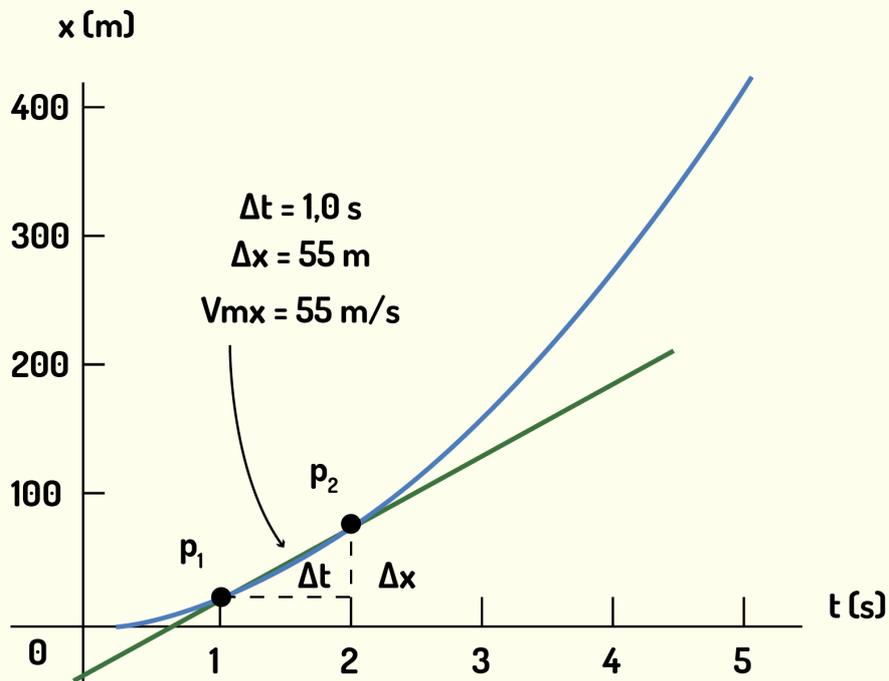
Na física, é extremamente importante que você saiba interpretar os diversos tipos de gráficos. Então, por que não utilizarmos agora um exemplo de como calcular velocidades média e instantânea a partir de gráficos? Considere as figuras de 1.18 a 1.20, nas quais temos um gráfico da posição de um objeto em função do tempo. Considere a Figura 1.18 a em que calculamos a velocidade média do móvel entre os instantes 1s e 3s. Agora, a partir do momento em que começamos a diminuir o intervalo de tempo (Figura 1.19) avaliado em v_{mx} , seu valor tende para a velocidade instantânea, até que Δt se torna tão pequeno ao ponto de representar a inclinação da tangente da curva de deslocamento, representando então a velocidade instantânea v_x (Figura 1.20).



1FIGURA 18.37 - Uso do gráfico de deslocamento em função de tempo para o cálculo da velocidade média FONTE: Young e Freedman [2010, p.41].



1FIGURA 19.37 - Diminuição do intervalo de tempo para o cálculo da velocidade média FONTE: Young e Freedman (2010, p.41).



1FIGURA 20.37 - Velocidade instantânea do móvel. FONTE: Young e Freedman (2010, p.41).

Aceleração instantânea e aceleração média

Vimos que a velocidade média descreve a taxa de variação de posição em função de um intervalo de tempo. Similarmente, a **aceleração média** descreve uma taxa de variação de velocidade em um determinado intervalo de tempo.

Vamos observar mais uma vez um objeto que se move ao longo do eixo Ox . Além disso, considere que, no instante t_1 , ela apresenta uma velocidade instantânea v_{1x} e que, no instante t_2 , sua velocidade é v_{2x} . Portanto, você pode agora calcular a variação de velocidade $\Delta v_x = v_{2x} - v_{1x}$ que ocorreu no intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$. Sendo assim, a aceleração média a_{mx} é definida como:

$$a_{mx} = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{v_{2x} - v_{1x}}{t_2 - t_1} \quad (1.21)$$

E como definimos a unidade de aceleração? A forma mais comum é quando relacionamos as velocidades em m/s e o tempo em segundos, obtendo então: $m/s/s = m/s^2$ (metros por segundo ao quadrado).

Agora, através do mesmo raciocínio utilizado para definir a velocidade instantânea, vamos encontrar a aceleração instantânea calculando o limite da variação de velocidade quando o intervalo de tempo considerado tende a zero (um intervalo Δt infinitesimal):

$$a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dt} \quad (1.22)$$

Ou ainda, se você preferir, pode encontrar a aceleração instantânea através da variação de posição. Basta substituir a Equação (1.20) em (1.21):

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1.22)$$

Vetores posição, velocidade e aceleração

Agora, nós conhecemos todos os conceitos básicos para estudar o movimento de uma partícula. Porém, você consegue descrever o movimento feito por uma bola que foi lançada da janela de um prédio? Para responder a essa pergunta, é necessário saber unir os conceitos vetoriais aprendidos na Seção 1 à descrição cinemática estudada até aqui. Para isso, passaremos a representar a posição das partículas também no sistema tridimensional de coordenadas, onde utilizamos os eixos x , y e z .

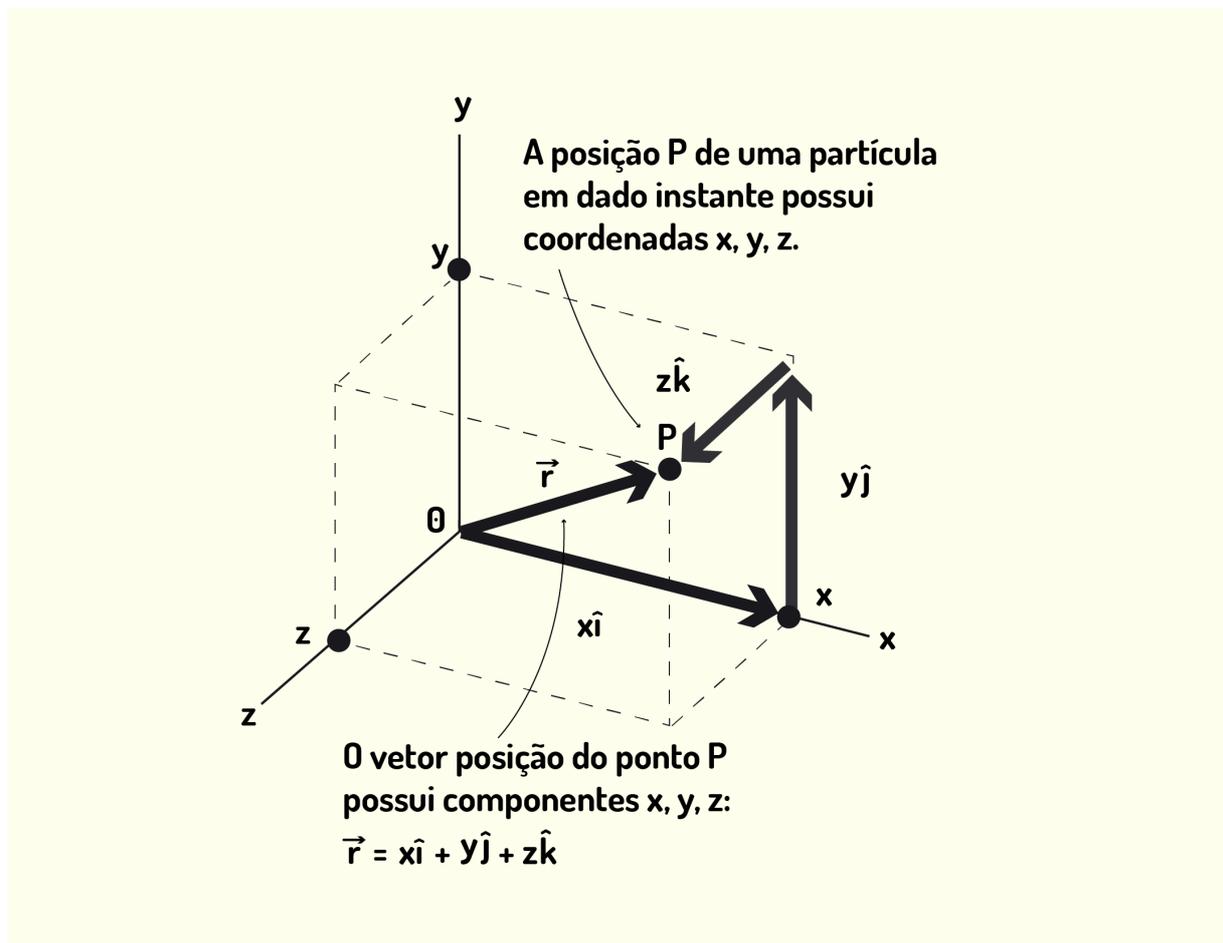
Vetores posição e velocidade

Imagine que há uma partícula em um ponto P e em um determinado instante. Como representamos a posição dela? Isso é feito através de um **vetor posição** \vec{r} que começa na origem do sistema de coordenadas e termina no ponto P (Figura 1.21). Esse vetor terá sua representação utilizando os vetores unitários dos três eixos:

$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \quad (1.31)$$

Quando a partícula se mover de uma posição P_1 para P_2 , cujos vetores posição que representam esses pontos são respectivamente \vec{r}_1 e \vec{r}_2 , haverá então um vetor deslocamento resultante, dado por $\Delta\vec{r}$:

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = (x_2 - x_1)\hat{i} + (y_2 - y_1)\hat{j} + (z_2 - z_1)\hat{k} \quad (1.32)$$



Nesse caso, como houve um deslocamento, podemos também definir uma **velocidade média** vetorial \vec{v}_m de forma similar ao que foi feito no movimento retilíneo, ou seja:

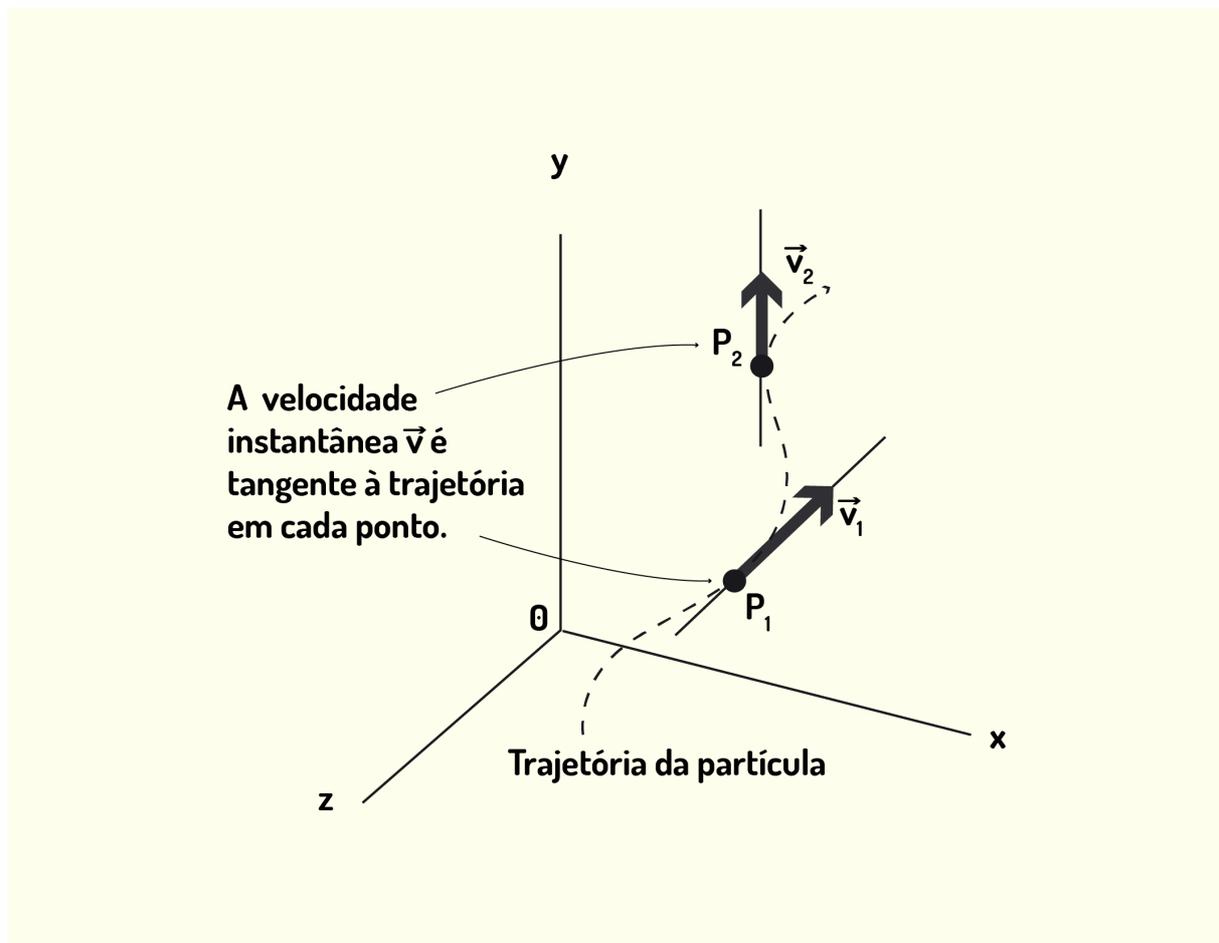
$$\vec{v}_m = v_{mx}\hat{i} + v_{my}\hat{j} + v_{mz}\hat{k} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{t_2 - t_1} \quad (1.33)$$

Observe que $v_{mx} = (x_2 - x_1) / (t_2 - t_1) = \Delta x / \Delta t$ é o mesmo apresentado na Equação (1.19), ou seja, podemos falar que, em cada uma das dimensões, ocorre um movimento retilíneo acelerado unidimensional.

Mais uma vez, assim como você já fez anteriormente, podemos encontrar a velocidade instantânea apenas aplicando o limite quando o intervalo de tempo tende a zero. A diferença essencial é que agora o deslocamento é vetorial, o que vai gerar uma velocidade instantânea também vetorial:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\hat{i} + \frac{dy}{dt}\hat{j} + \frac{dz}{dt}\hat{k} = v_x\hat{i} + v_y\hat{j} + v_z\hat{k} \quad (1.34)$$

O vetor $\Delta\vec{r}$ representa o deslocamento entre dois pontos P_1 e P_2 que são coincidentes. Logo, a velocidade instantânea assumirá a mesma direção e sentido de $\Delta\vec{r}$. Nesse limite, o vetor $\Delta\vec{r}$ é tangente à trajetória feita pela partícula. Logo, podemos afirmar que a velocidade instantânea de uma partícula é tangente à trajetória em todo e qualquer ponto percorrido. Para melhor entender como isso acontece, a Figura 1.22 ilustra uma trajetória qualquer e dois vetores de velocidade instantânea tangentes à trajetória.



1FIGURA 22.37 - Vetores de velocidade instantânea \vec{v}_1 e \vec{v}_2 tangentes à trajetória nos pontos P_1 e P_2 FONTE: Young e Freedman (2010, p.70).

Vetores de aceleração média e instantânea

Da mesma forma que a velocidade de uma partícula podia variar quando estudamos o movimento retilíneo com aceleração constante, ela pode variar também no caso com posição e velocidade vetoriais. Portanto, imagine que a velocidade de um objeto está variando de \vec{v}_1 para \vec{v}_2 ao longo de um intervalo de tempo Δt . Assim como calculado em (1.21), para encontrar a aceleração média, você deve dividir a variação de velocidade pelo intervalo de tempo em que essa variação ocorreu:

$$\vec{a}_m = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (1.35)$$

E como você já deve ter decorado, para encontrarmos a aceleração instantânea, é necessário fazer o intervalo Δt em (1.35) tender a zero:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt} \hat{i} + \frac{dv_y}{dt} \hat{j} + \frac{dv_z}{dt} \hat{k} = a_x \hat{i} + a_y \hat{j} + a_z \hat{k} \quad (1.36)$$

Ou seja, os componentes escalares de \vec{a} são obtidos através da derivada dos componentes escalares de \vec{v} em relação ao tempo. Ou ainda, utilizando o fato de que os componentes escalares de \vec{v} são os derivados dos componentes escalares de \vec{r} , podemos escrever:

$$\vec{a} = \frac{d^2x}{dt^2} \hat{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \hat{j} + \frac{d^2z}{dt^2} \hat{k} \quad (1.37)$$

Movimento uniforme variado

Movimento com aceleração constante

Existem vários tipos de movimentos com aceleração. Como, por exemplo, um carro de fórmula 1, que fica constantemente acelerando e desacelerando, ou então movimentos em que há uma aceleração inicial e, ao atingir-se uma velocidade determinada, para-se de acelerar. Nesta seção, vamos estudar o movimento retilíneo acelerado constante, que pode ser considerado o mais simples dos movimentos acelerados.

Quando falamos que a aceleração é constante, podemos inferir que a aceleração instantânea, em qualquer instante, é a mesma. Consequentemente, a aceleração média torna-se igual à aceleração instantânea. A partir dessa constatação, você vai ser capaz de deduzir as equações básicas do movimento com aceleração constante.

Como dissemos, $a_{mx} = a_x = \frac{v-v_0}{t-t_0}$. Assumindo que v_0 é a velocidade no instante $t = 0$, podemos rearranjar os termos e encontrar a equação da velocidade em um determinado instante de tempo t :

$$v = v_0 + a_x t \quad (1.23)$$

Para confirmar a validade de (1.23), você pode calcular a derivada da velocidade, que deve ser igual à aceleração: $\frac{dv}{dt} = a_x$.

Lembra-se da equação (1.19) que definia a velocidade média? Fazendo de forma similar a (1.23), podemos chegar a $v_{mx} = \frac{x-x_0}{t-t_0}$ e, rearranjando a expressão, você chegará na equação para a posição do objeto em um determinado instante de tempo:

$$x = x_0 + v_{mx} t \quad (1.24)$$

Você deve saber também que, como v_{mx} é a velocidade média, podemos encontrá-la através da média aritmética entre a velocidade inicial v_0 e a velocidade final v :

$$v_{mx} = \frac{1}{2}(v_0 + v) \quad (1.25)$$

E, substituindo (1.23) em (1.25), pode-se chegar a:

$$v_{mx} = v_0 + \frac{1}{2}a_x t \quad (1.26)$$

Finalmente, substituindo (1.26) em (1.24) e manipulando os termos, obtemos:

$$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2}a_x t^2 \quad (1.27)$$

Essas são as principais equações para o movimento retilíneo com aceleração constante. Porém, algumas outras podem também ser úteis na resolução de problemas. Elas serão apresentadas aqui, mas fica como DESAFIO para você deduzi-las. Isso pode ser feito apenas com a substituição das equações básicas, assim como acabamos de fazer.

$$v^2 = v_0^2 + 2a_x(x - x_0) \quad (1.28)$$

$$x - x_0 = \frac{1}{2}(v_0 + v)t \quad (1.29)$$

$$x - x_0 = vt - \frac{1}{2}at^2 \quad (1.30)$$

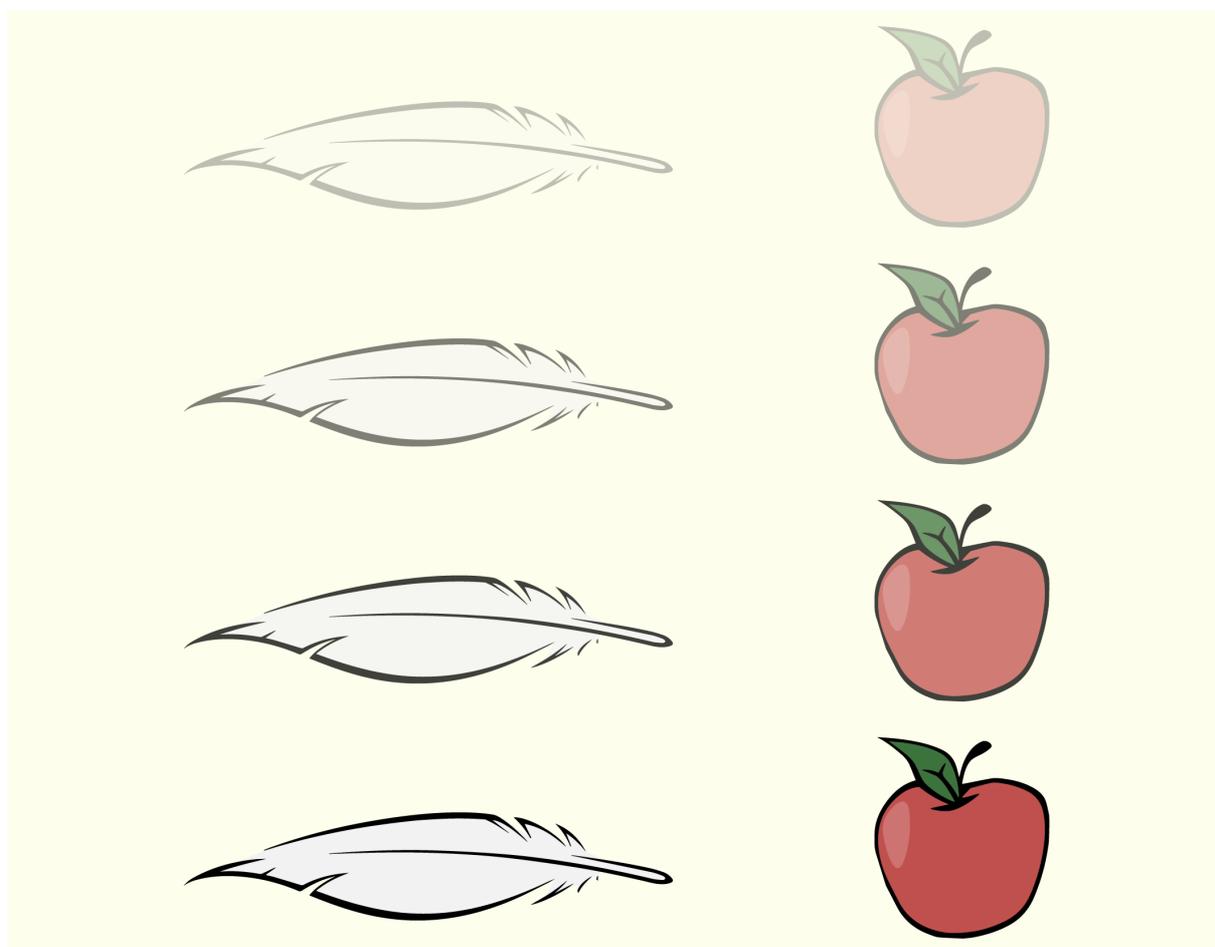
Queda livre

E quando que o movimento retilíneo com aceleração constante acontece? Provavelmente, o exemplo mais clássico e que está presente em inúmeras situações de seu cotidiano é a queda livre dos corpos. Quando qualquer objeto é abandonado no ar, além da resistência do ar (que pode ser desprezada quando criamos um modelo), temos a força da gravidade. E o que seria essa força? É basicamente uma força exercida pela Terra para atrair os objetos para seu centro (caso contrário, os objetos poderiam sair flutuando).

Essa força faz com que, quando os objetos são abandonados, haja uma aceleração constante, cujo módulo é popularmente representado pela letra g . Perto da superfície da Terra, temos que $g = 9,8m/s^2$ é a aceleração em queda livre. Sendo assim, todas as equações que você deduziu na seção anterior valem também para o movimento de queda livre, sendo que $a_x = -g = -9,8m/s^2$.

Porém, há uma diferença grande nos eixos de referência: i) por convenção, o movimento de queda livre acontece ao longo do eixo y (vertical), e não no eixo x como estávamos estudando, sendo que o sentido crescente (movimento positivo) é para cima no eixo y ; ii) a aceleração no movimento de queda livre acontece em direção ao centro da Terra, que é para baixo no eixo y , portanto a aceleração é negativa e, nas equações, deve ser substituída por $-g$.

Para ilustrar esse movimento, observe a Figura 1.23, em que dois objetos (uma maçã e uma pena) estão em queda livre em um ambiente com completo vácuo (não há resistência do ar) para que a única força presente seja a gravidade. Observe que, no início, o deslocamento é pequeno, mas à medida que o tempo passa, a velocidade aumenta e a distância percorrida em um mesmo espaço de tempo também (isso acontece porque há uma aceleração de $g = -9,8m/s^2$ agindo sobre ambos os corpos).



1FIGURA 23.37 - Queda livre de dois objetos no vácuo FONTE: Halliday e Resnick (2012, p.26).

Movimento de um projétil

O que é um projétil? No contexto de física, não é somente a munição de uma arma de fogo. Um projétil pode ser qualquer objeto lançado e que irá, ao longo de seu percurso, sofrer ação determinada somente pela força gravitacional e pela resistência do ar. O lance de uma bola de basquete, uma pedra arremessada pela janela e um pacote largado de um avião são alguns exemplos do que chamamos de projétil. Note que a curva feita pelo objeto (projétil) é chamada de trajetória.

A análise do movimento de um projétil é bastante facilitada quando você conseguir tratar as coordenadas x e y isoladamente (isso para o caso bidimensional). Como dito anteriormente, a única aceleração agindo sobre o projétil é a da gravidade. Portanto, se você isolar os dois eixos, o componente x da aceleração será nulo, pois, como já estudamos, a gravidade atua somente no eixo y e é constante igual a $-g$.

Assim, caso a velocidade e a aceleração sejam corretamente decompostas em x e y , você poderá dizer que um projétil se movimenta verticalmente com aceleração constante igual a $-g$ e horizontalmente com velocidade constante. Ou seja, você pode escrever a seguinte relação:

$$\vec{a} = a_x \hat{i} + a_y \hat{j} = 0 - g \hat{j} \quad (1.38)$$

A partir de (1.38) (que nos mostra como os componentes a_x e a_y são constantes), você pode usar as equações obtidas anteriormente, pois todas elas também lidam com movimentos com aceleração constante. Por exemplo, considerando o movimento em x , sabendo que $a_x = 0$, as equações (1.23) e (1.27) são reduzidas a:

$$v_x = v_{0x} \quad (1.39)$$

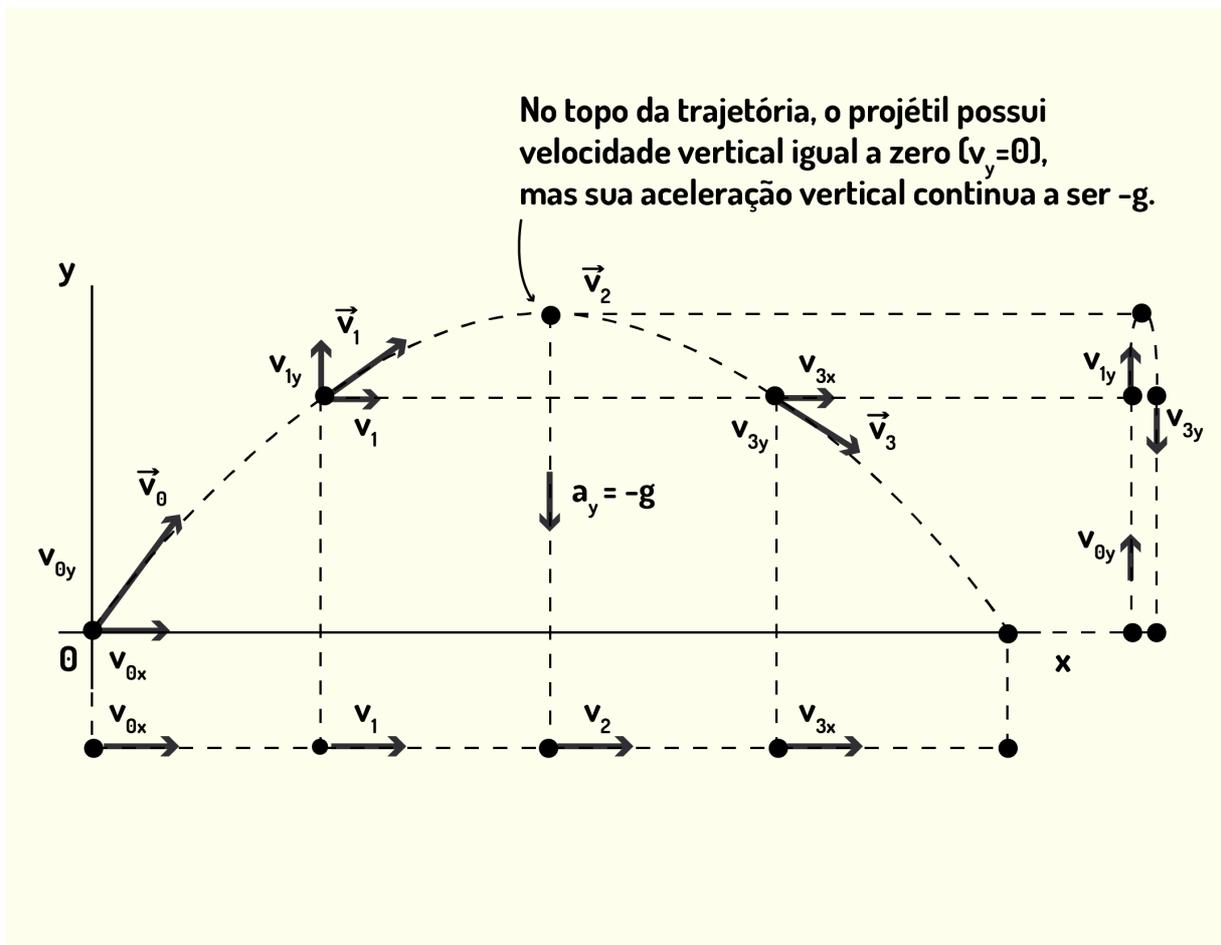
$$x = x_0 + v_{0x}t \quad (1.40)$$

Já o movimento em y , por possuir aceleração constante $a_y = -g$, pode ser descrito como:

$$v_y = v_{0y} - gt \quad (1.41)$$

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (1.42)$$

A Figura 1.24 apresenta a trajetória de um projétil que começou seu movimento na origem. Em diversos pontos, a velocidade é decomposta nos planos x e y , assim como orientamos para você. Um ponto importante que você deve conhecer é o topo da trajetória do projétil, pois é onde a velocidade vertical v_y é nula. Porém, a aceleração gravitacional ainda continua agindo, somente a velocidade vertical é igual a zero.



1FIGURA 24.37 - Trajetória de um projétil com \vec{v} em alguns pontos importantes FONTE: Young e Freedman (2010, p.78).

Movimento circular uniforme

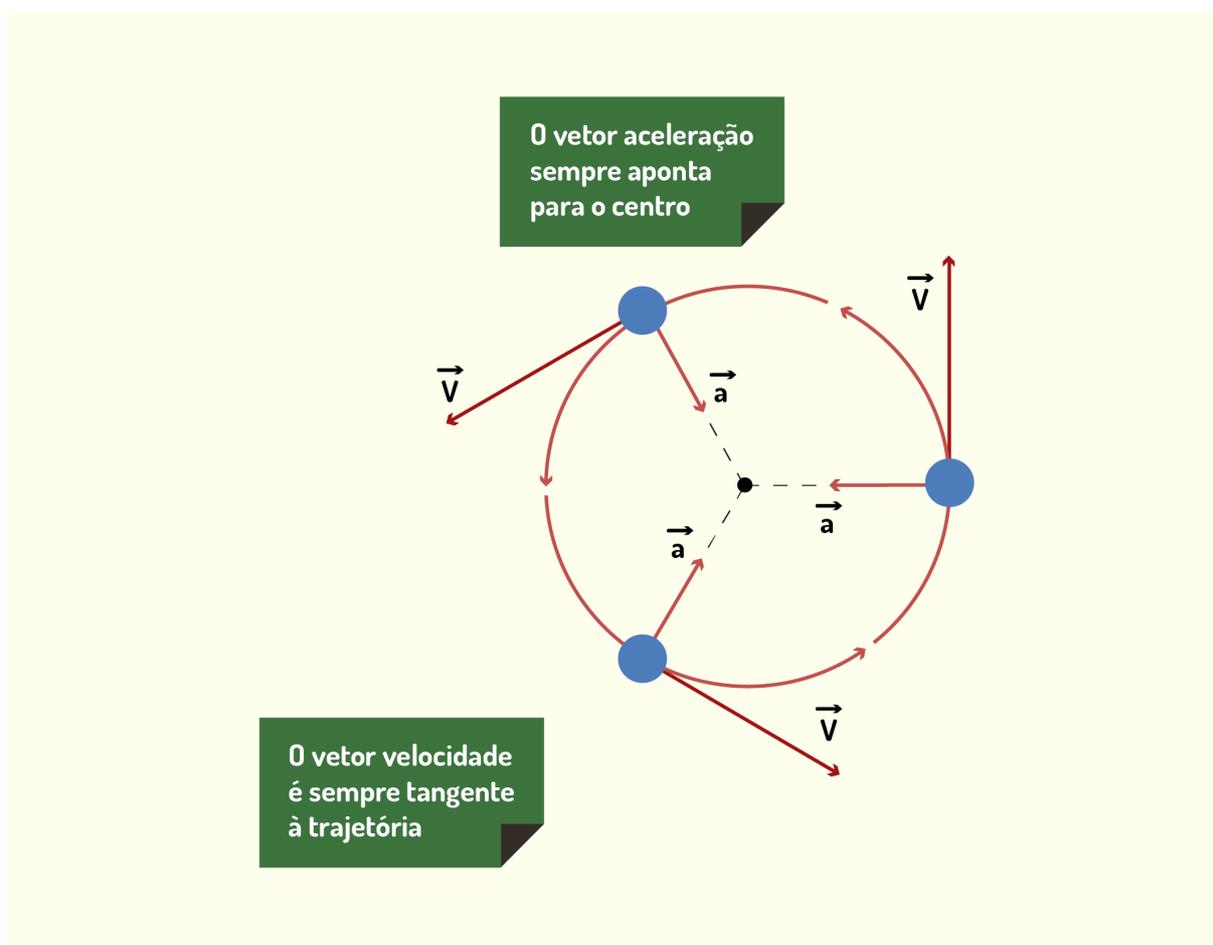
O próprio nome já diz bastante sobre esse tipo de movimento, não é mesmo? Quando uma partícula está em movimento circular uniforme, ela percorre uma trajetória em formato de circunferência com uma velocidade escalar constante, por isso o movimento é chamado uniforme.

Se você observar a Figura 1.25, poderá notar que o vetor de velocidade é sempre tangente à circunferência de trajetória da partícula, além de possuir o mesmo módulo ao longo de todo o percurso. Porém, você deve ter observado que há um vetor de aceleração. Mas o movimento não é uniforme com velocidade constante? Sim. Esse vetor de aceleração é um pouco diferente, por isso está apontando para o centro da circunferência. Essa aceleração é chamada **centrípeta** e é resultante da força exercida sobre a partícula quando ela tenta manter o movimento circular.

O módulo dessa aceleração centrípeta está relacionado ao módulo da velocidade do objeto e ao raio da circunferência pela seguinte equação:

$$a_{rad} = \frac{v^2}{r} \quad (1.43)$$

Caro(a) aluno(a), é interessante, para você estudar como fizemos para deduzir a Equação (1.48):



1FIGURA 25.37 - Ilustração dos vetores velocidade e aceleração centrípeta em um movimento circular uniforme
 FONTE: Halliday e Resnick (2012, p.73).

Além disso, seria interessante se você aprendesse como expressar o módulo dessa aceleração em termos de T , que é o período que o corpo leva para dar uma volta completa na circunferência de raio r . Lembrando que o perímetro de uma circunferência é dado por $p = 2\pi r$, podemos afirmar que é essa a distância percorrida durante o período T . Logo, a velocidade pode ser definida como:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (1.44)$$

Se você substituir (1.44) em (1.43), chegará ao seguinte resultado para a aceleração centrípeta:

$$a_{rad} = \frac{4\pi r^2}{T^2} \quad (1.45)$$

Velocidade relativa

Você certamente já deve ter se deparado com uma situação em que, ao tentar ultrapassar um carro na estrada, ficou em dúvida se o tempo seria suficiente. Você sabe por que essa dúvida existe? Devido à velocidade relativa entre os dois veículos. Isso acontece porque, quando há dois corpos em movimentos (estejam eles na mesma direção ou em sentidos opostos), a velocidade observada por um dos corpos é diferente da sua própria velocidade.

Se há uma pessoa no interior de um trem caminhando para ir ao banheiro a uma velocidade de 2m/s, sendo que o trem está andando a 5m/s, qual é a velocidade da pessoa? Essa pergunta não possui apenas uma resposta, pois não especificamos qual o ponto de referência para medição da velocidade. A velocidade da pessoa, em relação a outro passageiro, é 2m/s; porém, se há uma terceira pessoa parada fora do trem, então a velocidade relativa entre o passageiro do trem e a pessoa parada ao lado de fora é $2+5=7$ m/s.

Que tal se nós definirmos matematicamente o que acabamos de falar? Vamos assumir que o ciclista parado do lado de fora do trem é a referência A , e o trem é o sistema B de referência, assim como descrito na Figura 1.26. Se você desejar descrever a posição de um ponto P em relação ao sistema B , deve escrever $x_{P|B}$. Da mesma forma, $x_{B|A}$ é a distância entre a origem do sistema A e a origem de B . Portanto, se você observar a Figura 1.26, vai ser capaz de deduzir que:

$$x_{P|A} = x_{P|B} + x_{B|A} \quad (1.46)$$

Agora, você vai poder entender mais facilmente a velocidade relativa. Lembra-se de que a velocidade é encontrada a partir da derivada do deslocamento em relação ao tempo? Então, podemos derivar $x_{P|A}$ para encontrar $v_{P|A}$. Derivando (1.46):

$$\frac{dx_{P|A}}{dt} = \frac{dx_{P|B}}{dt} + \frac{dx_{B|A}}{dt} \text{ ou}$$

$$v_{P|Ax} = v_{P|Bx} + v_{B|Ax} \quad (1.47)$$

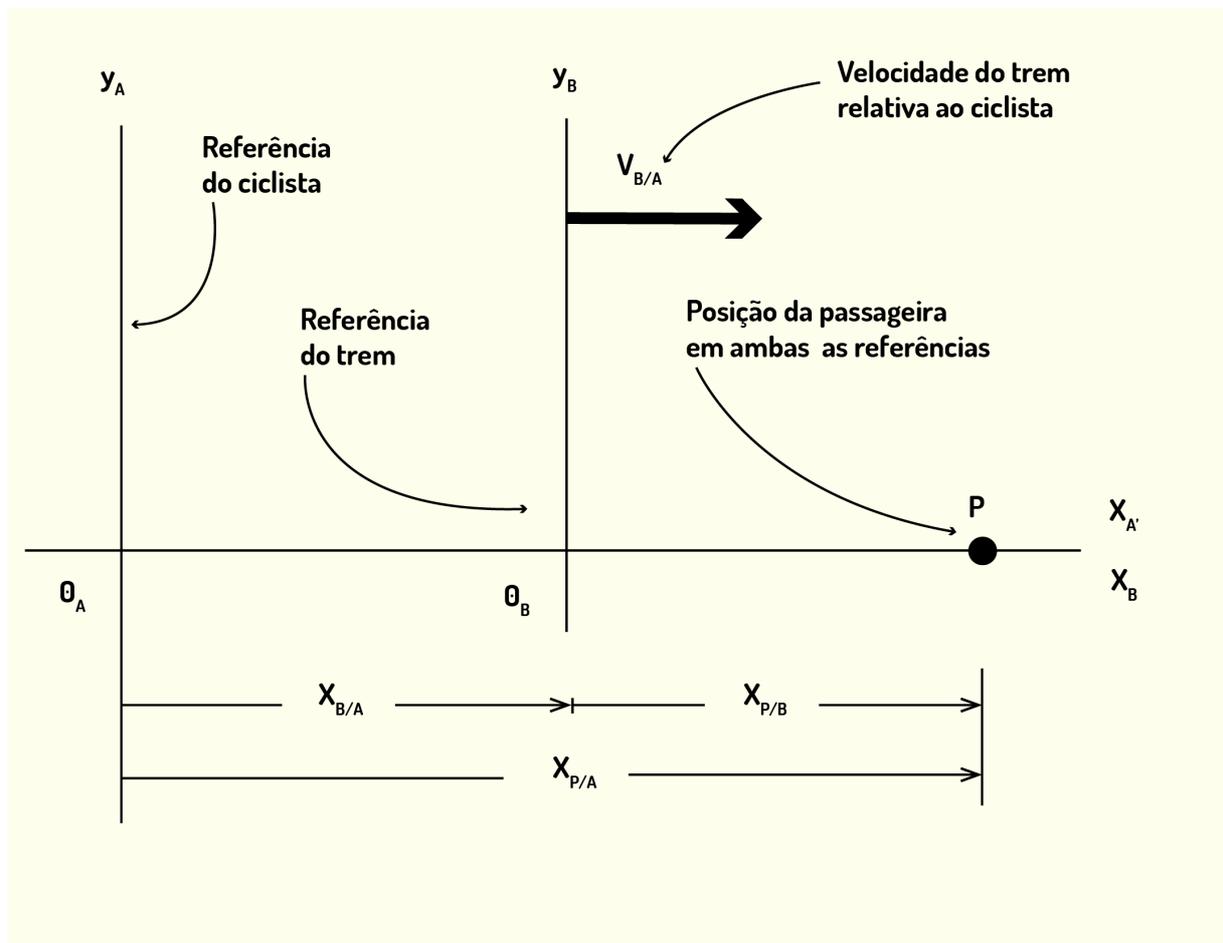
Vamos, então, voltar ao exemplo do passageiro no trem. Usando a notação anterior e o sistema de referências admitido na Figura 1.26, podemos escrever:

$$v_{P|Bx} = +2,0 \text{ m/s} \quad v_{B|Ax} = +5,0 \text{ m/s}$$

E através de (1.47), a velocidade do passageiro relativa ao observador externo $v_{P|Ax}$ é escrita como:

$$v_{P|Ax} = +2,0 + 5,0 = 7 \text{ m/s}$$

Observe também que, caso o passageiro olhe através da janela do trem, ele verá o ciclista se movendo para trás com velocidade $v_{A|Px}$, que é igual e contrária a $v_{P|Ax}$.



1FIGURA 26.37 - Sistema de referências adotado para expressar as velocidades e deslocamentos relativos no exemplo do passageiro caminhando no trem FONTE: Young e Freedman (2010, p.89).

Como você deve ter percebido, neste capítulo, nós aprendemos diversos tópicos diferentes, por isso, é recomendável que você procure aprofundar seu conhecimento em cada um dos temas através da literatura de referência que é apresentada ao final da unidade. Agora nós teremos somente um exercício para ser resolvido, no qual você precisará recapitular o aprendizado sobre vetores, velocidade e aceleração.

Leis de Newton

Você já tentou entender qual o motivo de um objeto se movimentar quando alguém o empurra? Ou então por que é mais difícil controlar um carro sobre uma pista de gelo do que sobre uma estrada? As respostas para essas indagações devem ser baseadas na análise das forças que estão agindo sobre os corpos para produzir movimentos.

Para que você consiga ser capaz de responder a essas e outras perguntas, será preciso entender bem os conceitos de *força* e *massa*, que faremos neste capítulo. As relações entre força, massa e movimento foram teorizadas primeiramente por Isaac Newton (1642-1727) em sua obra "**Princípios Matemáticos da Filosofia Natural**" (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*) e são denominadas **Leis de Newton do movimento**. Como dito no início da matéria, a física é uma ciência experimental. Logo, essas Leis não são simplesmente deduções matemáticas; elas são uma síntese, normatização e fundamentação do que diversos físicos vinham observando.

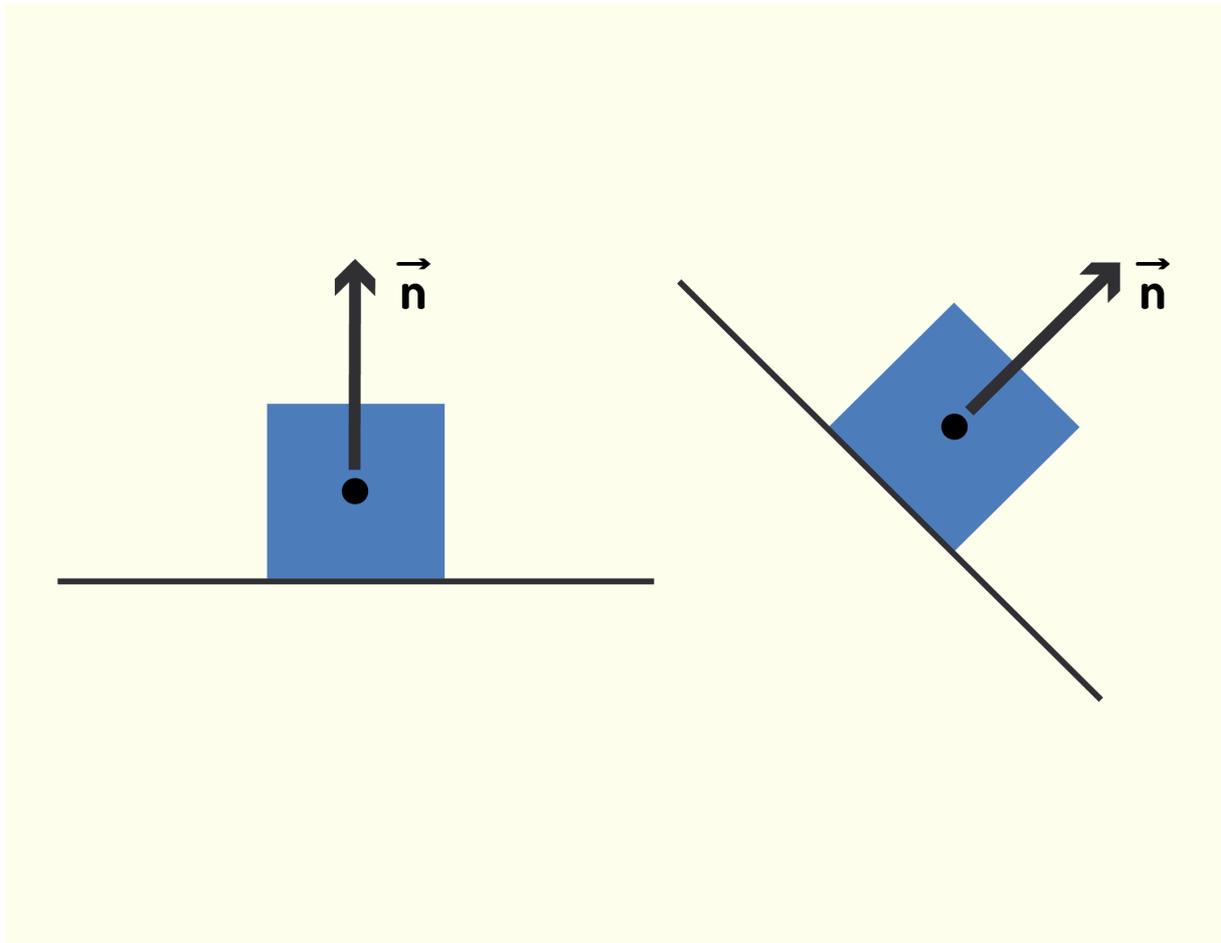
As Leis de Newton, embora sejam bastante simples, são fundamentais para o entendimento da dinâmica do movimento dos corpos. Porém, em seu dia a dia, você deve já ter criado um pensamento sobre como o movimento ocorre, por exemplo, quando você empurra ou puxa uma caixa. Por isso, em alguns momentos, teremos que deixar nosso senso comum de lado e tentar entender o que a física está querendo nos dizer.

Força e interações

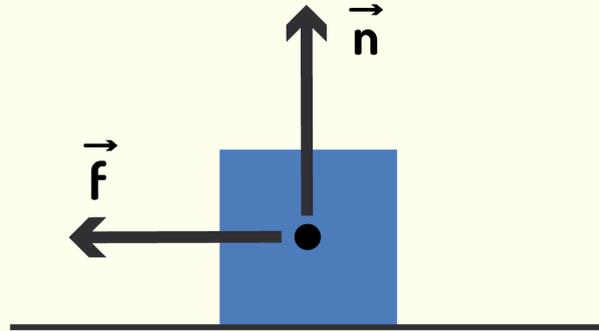
Quando falamos em força, você provavelmente pensa em quão forte uma pessoa é, ou então em quanta força é preciso fazer para levantar uma pedra, por exemplo. Uma definição mais precisa para força é a interação entre dois objetos/corpos ou entre o ambiente e um corpo inserido nele. Quando você empurra um sofá, está exercendo uma força sobre ele; uma viga de concreto exerce uma força sobre a estrutura que está sendo sustentada.

Das Figura 1.27 a 1.30 estão exemplificados quatro tipos de força para mostrar que uma força é uma grandeza vetorial. Algumas forças típicas presentes em diversas ocasiões do nosso cotidiano estão também ilustradas. Você pode observar a **força normal** \vec{n} na Figura 1.27, que é a força perpendicular à superfície sobre a qual o objeto repousa (daí vem o nome

normal), e está presente em todo corpo que está sobre alguma superfície. A força de atrito \vec{f} (Figura 1.28) é *paralela* à superfície sobre a qual o objeto se movimenta e possui direção oposta ao deslizamento



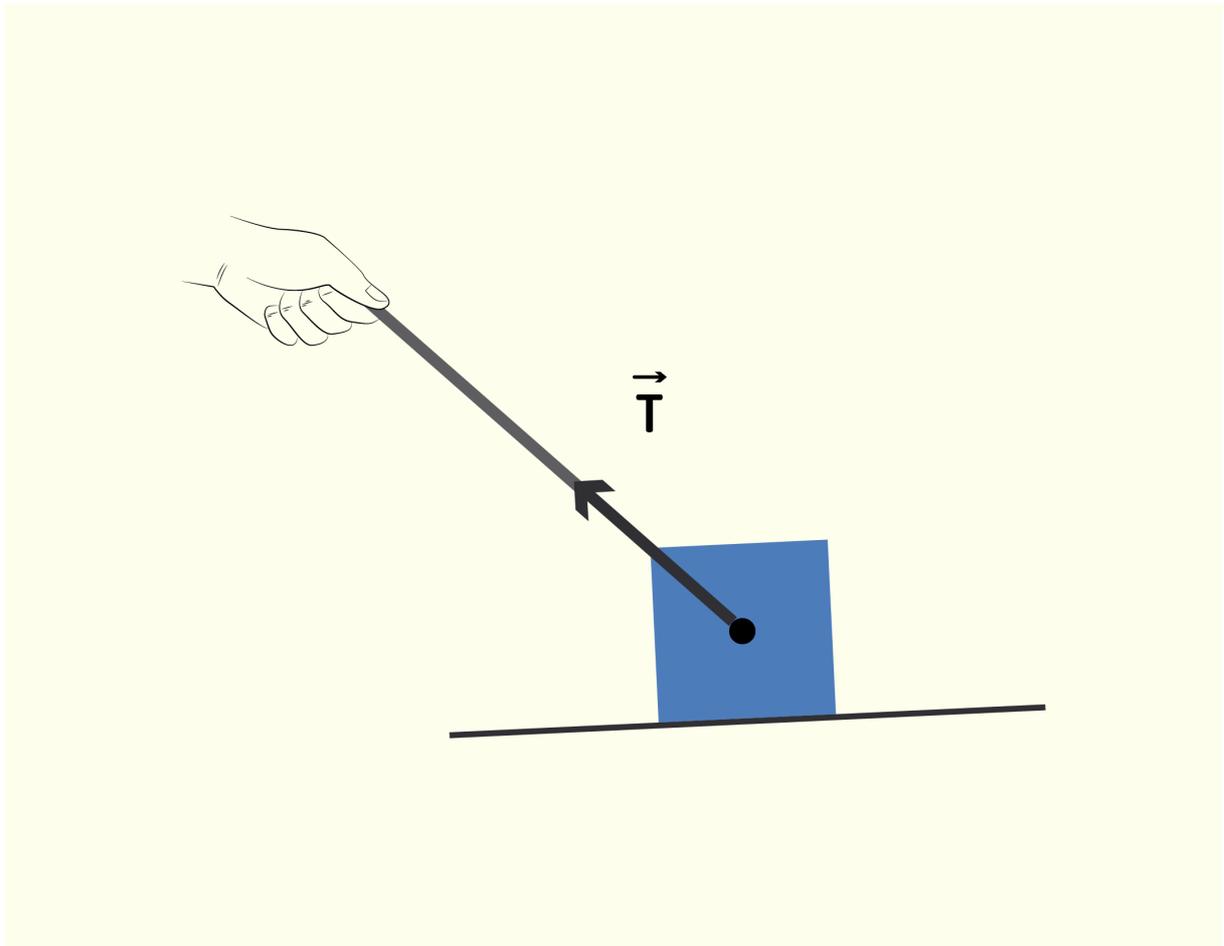
1FIGURA 27.37 - Força normal \vec{n} é sempre perpendicular à superfície FONTE: Young e Freedman (2010, p.106).



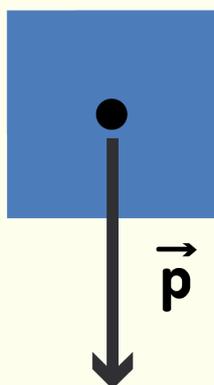
1FIGURA 28.37 - Forças normal \vec{n} de atrito \vec{f} FONTE: Young e Freedman (2010, p.106).

Quando puxamos um objeto através de uma corda esticada, cabo ou haste, há a **força de tensão** \vec{T} (Figura 1.29), que possui a mesma direção do cabo que está esticado. Um exemplo comum ocorre quando você vai passear com seu cachorro e o puxa pela coleira. A **força peso** \vec{p} (Figura 1.30) é exercida pela atração gravitacional da Terra (mesmo que a Terra e o objeto não estejam em contato) e está sempre direcionada a puxar o objeto para o centro da Terra.

Por definição, a unidade de força é o newton (N) e 1 N (um newton) é a força produzida que gera uma aceleração de 1m/s^2 em um objeto de um quilograma (1kg).



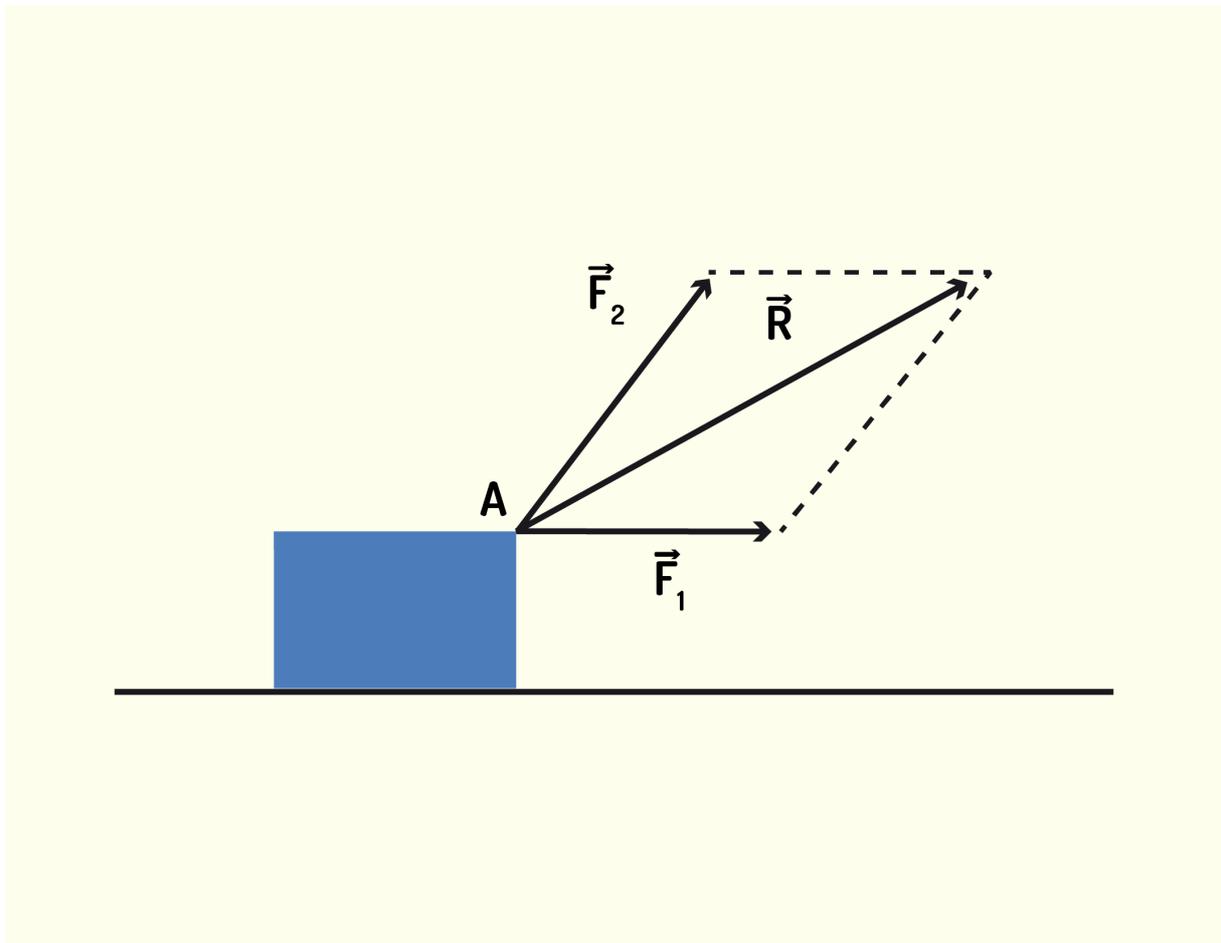
1FIGURA 29.37 - Força de tensão \vec{T} FONTE: Young e Freedman (2010, p.106).



1FIGURA 30.37 - Força peso \vec{p} FONTE: Young e Freedman (2010, p.106).

A partir disso, você consegue perceber que, em um único corpo em movimento, pode haver mais de uma força agindo ao mesmo tempo? É por isso que, para resolver um problema, será preciso encontrar o vetor resultante de todas as forças que atuam no movimento do objeto. Para isso, usaremos a letra grega Σ , que corresponde à operação de soma. Por exemplo, se em um corpo há duas forças \vec{F}_1 e \vec{F}_2 , como mostra a Figura 1.31, então a força resultante é:

$$\vec{R} = \Sigma \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad (1.48)$$



1FIGURA 31.37 - Duas forças agindo sobre um objeto e sua respectiva força resultante FONTE: Young e Freedman (2010, p.107).

Lembre-se de que toda a matemática vetorial, assim como decomposição em componentes, soma, módulo e ângulo estão valendo e deverão ser utilizadas para manipular as forças e encontrar a resultante.

Primeira Lei de Newton

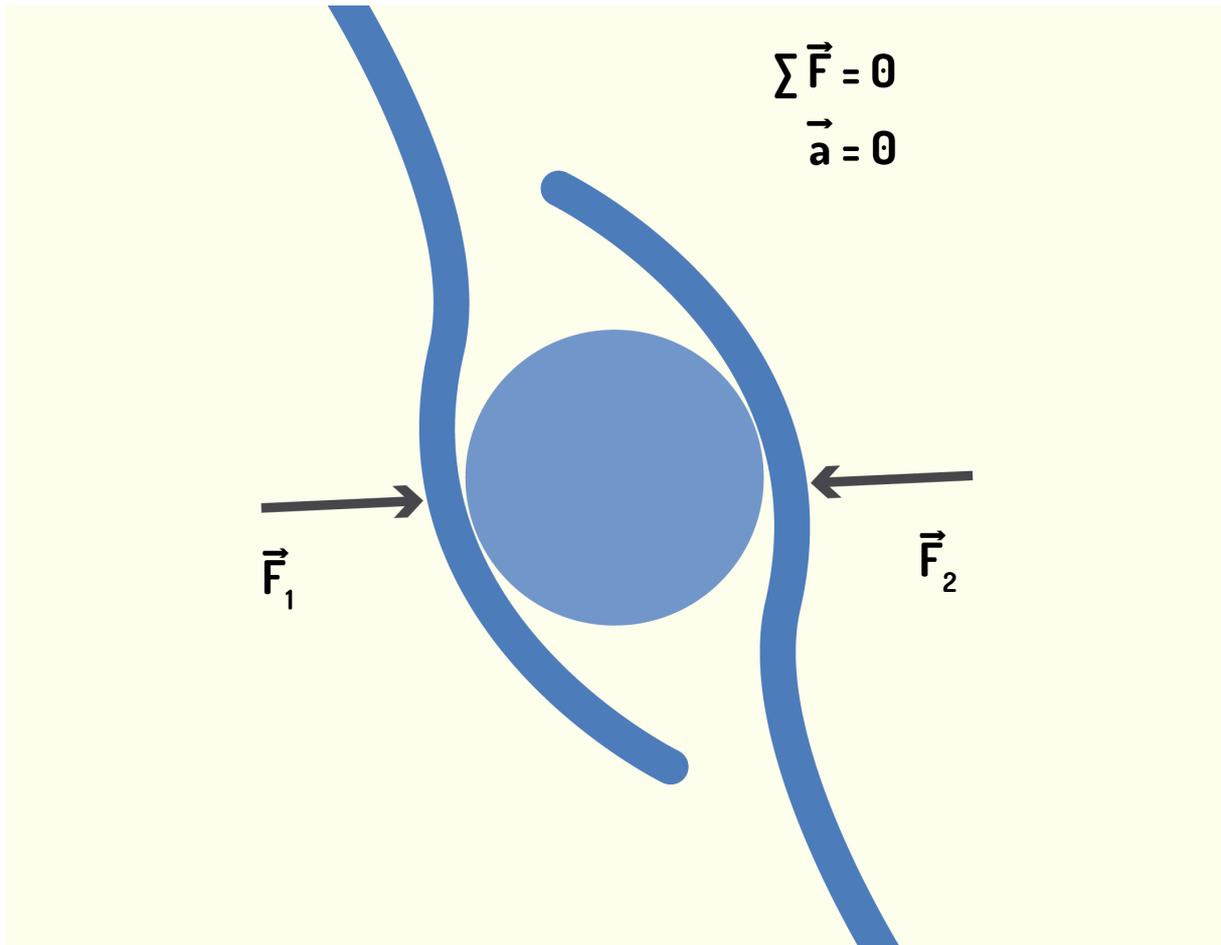
Vamos pensar em um exemplo bastante simples: imagine um disco de hóquei que, ao invés de estar sendo usado em uma pista de gelo, foi lançado sobre uma mesa de madeira. Ao fazer isso, quando lançamos o disco, ele rapidamente vai parar. Se utilizarmos o mesmo disco em uma quadra de hóquei (pista de gelo), ele conseguirá percorrer uma distância bem maior antes de parar completamente. Você sabe explicar por que isso acontece? A resposta é

simples. Na mesa de madeira, o atrito que a superfície exerce sobre o disco é muito grande, o que provoca uma rápida parada. Já na pista de gelo, o atrito é muito menor, ou seja, a força que tenta fazer o disco parar é muito pequena.

O que vai acontecer com o disco se ele for lançado em um local sem atrito? Se isso for possível, ao empurrarmos o disco, ele vai entrar em movimento e nunca mais irá parar.

É a partir dessa observação que podemos extrair a Primeira Lei de Newton: *Se não há nenhuma força sendo exercida sobre um corpo, sua velocidade não irá mudar, ou seja, o corpo não vai sofrer aceleração.* De uma maneira mais simples, podemos dizer que, se um corpo está em repouso, ele vai continuar repousado; se ele está se movendo, irá continuar com o exato mesmo movimento (velocidade com mesmo módulo e orientação). Essa tendência de o corpo permanecer com o mesmo movimento é denominada **inércia**.

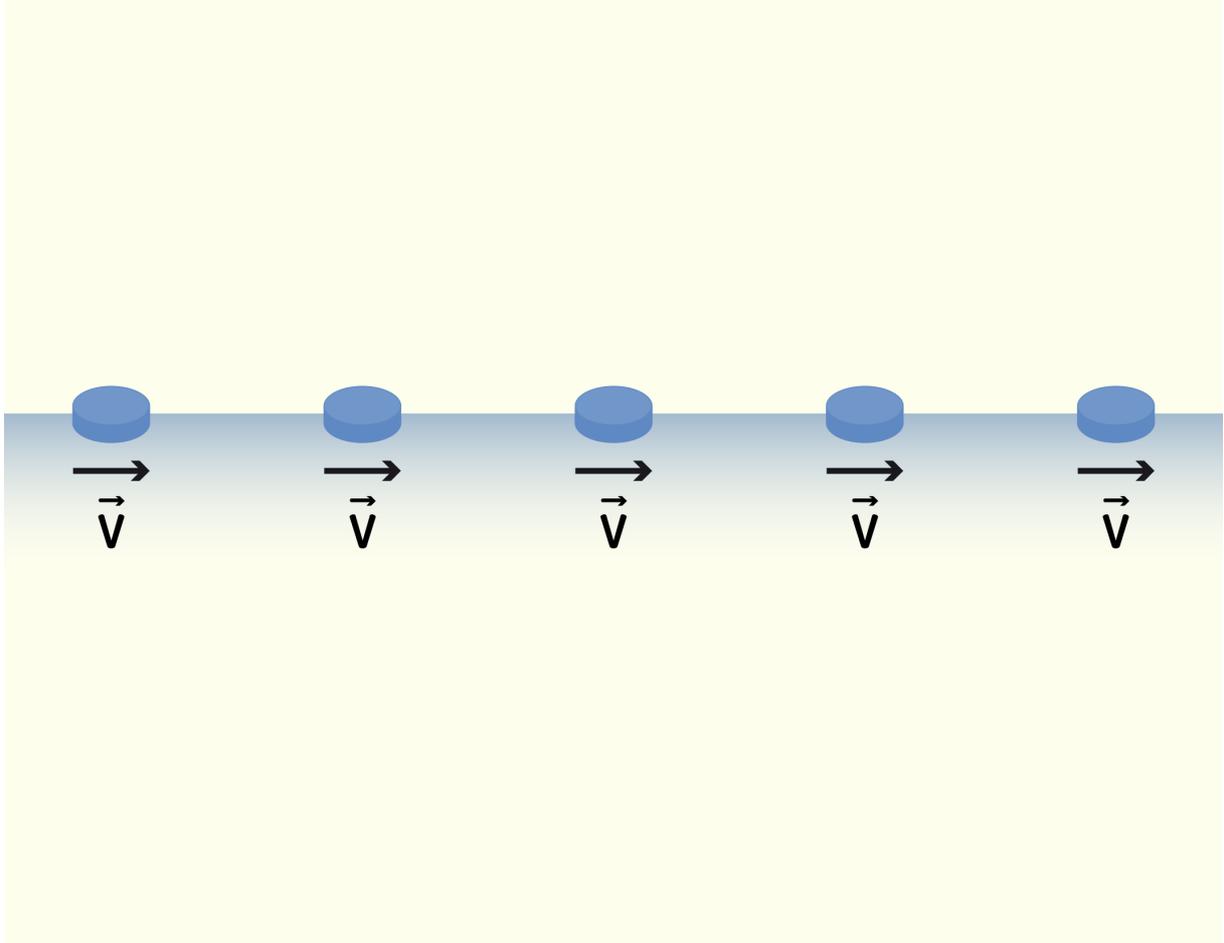
Por isso que, para estudar e aplicar essa lei, você deve saber calcular corretamente a força resultante que age sobre o corpo. Por exemplo, se em um mesmo objeto há duas forças antiparalelas e de mesmo módulo (Figura 1.32), ou seja, $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, a resultante é nula, pois $\sum \vec{F} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2 = 0$. Nesse caso, dizemos também que o corpo está em **equilíbrio** (a soma de todas as forças que atuam sobre ele é nula).



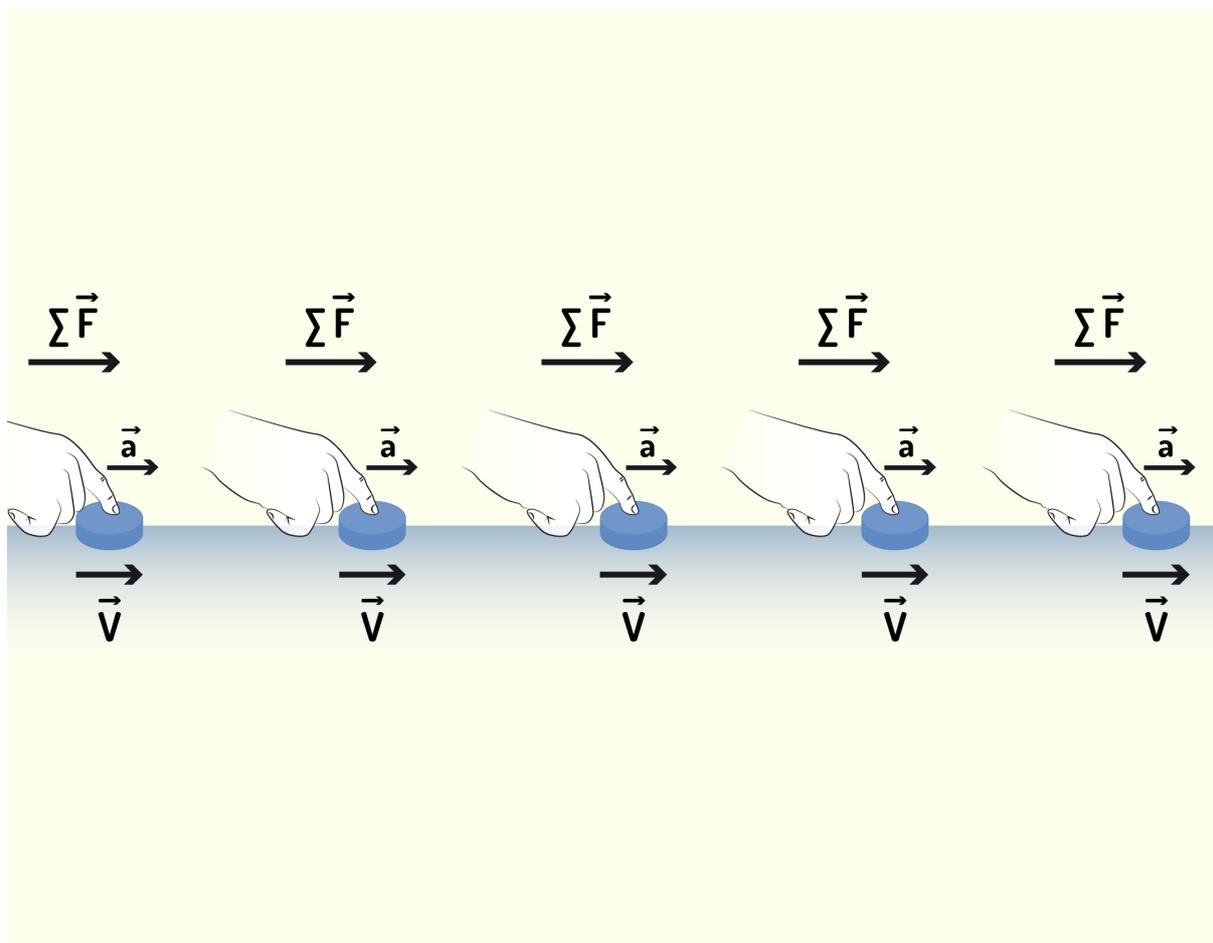
1FIGURA 32.37 - Corpo em equilíbrio, em que a soma das forças que agem sobre ele é nula, ou seja, $\Sigma \vec{F} = 0$ FONTE: Young e Freedman (2010, p.111).

Segunda Lei de Newton

A Primeira Lei de Newton nos mostrou o que acontece quando a resultante das forças atuantes em um corpo é nula. Mas e quando isso não acontece? E quando a resultante aponta para alguma direção? As Figuras de 1.33 a 1.35 nos mostram três casos possível de resultante das forças. O caso da Figura 1.33 é o mesmo estudado anteriormente, em que a resultante é nula. Já na Figura 1.34, a resultante não é nula e provoca uma aceleração constante no mesmo sentido do movimento do disco, veja que a intensidade do vetor \vec{v} está gradativamente aumentando.

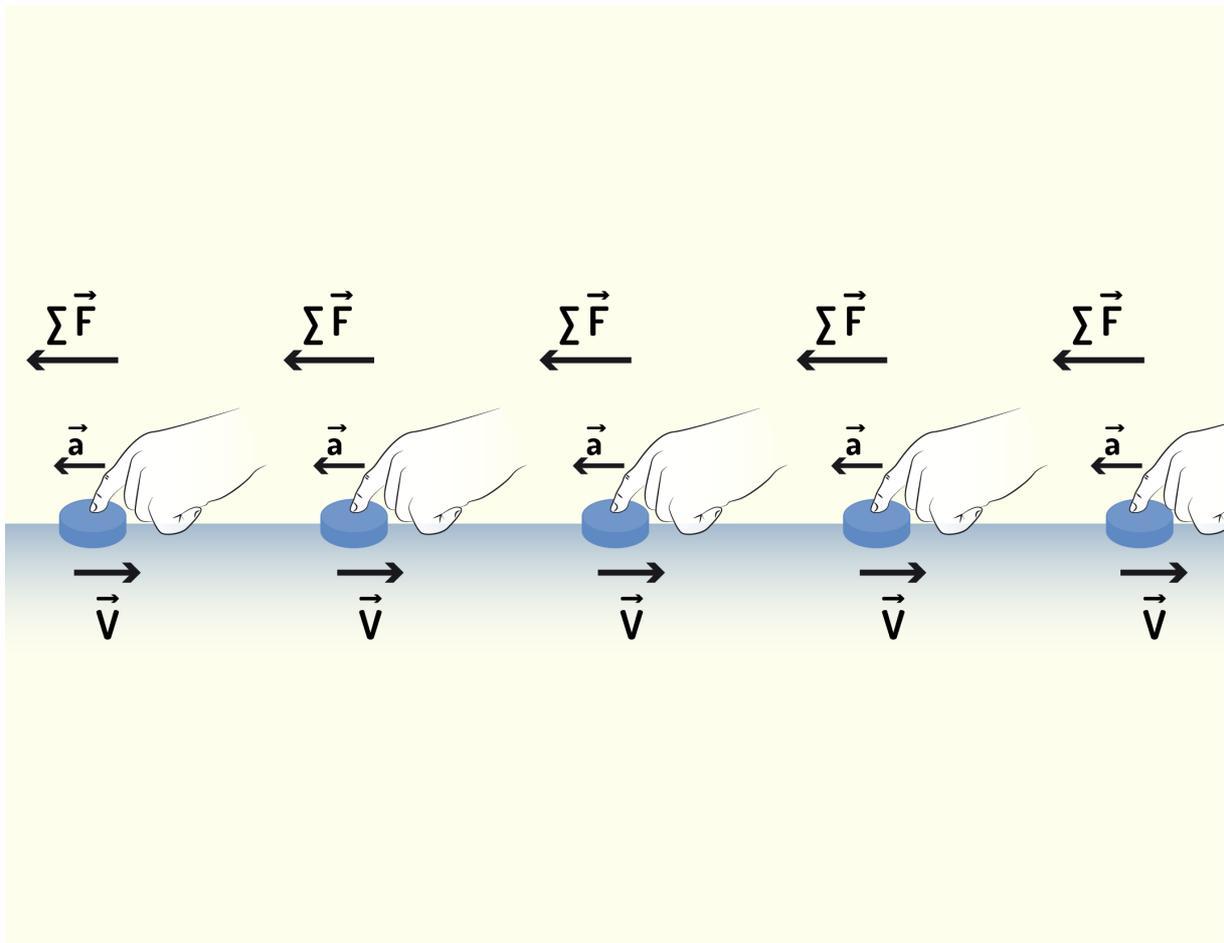


1FIGURA 33.37 - Disco de hóquei em velocidade constante, ou seja, $\vec{R} = \sum \vec{F} = 0$; $\vec{a} = \vec{0}$ FONTE: Young e Freedman (2010, p.114).



1FIGURA 34.37 - Força resultante no mesmo sentido do movimento provoca aceleração constante no mesmo sentido
FONTE: Young e Freedman (2010, p.114).

A Figura 1.35 mostra o caso oposto, em que a resultante das forças causa uma aceleração na direção oposta ao movimento do disco, fazendo com que o módulo de \vec{v} diminua e, caso o movimento continue, \vec{v} acabará mudando de sentido.



1FIGURA 35.37 - Força resultante no sentido oposto do movimento provoca aceleração constante no sentido da força resultante FONTE: Young e Freedman (2010, p.114).

A Segunda Lei de Newton relaciona essa força resultante à massa e à aceleração do corpo pela seguinte equação:

$$\vec{R} = \sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (1.49)$$

Sendo m a massa do corpo e \vec{a} a aceleração resultante.

Apesar de (1.49) ser bastante simples, você deve tomar bastante cuidado como e onde usá-la. Primeiramente você deve definir em qual corpo a equação será aplicada. Par então poder analisar todas as forças atuantes sobre ele. Somente assim será possível calcular a resultante e utilizar a segunda Lei de Newton.

Assim como todos os outros cálculos vetoriais, também existe a **independência dos componentes** para a resultante vetorial. Logo, pode-se analisar três diferentes equações, uma em cada eixo do sistema de coordenadas xyz :

$$R_x = ma_x; \quad R_y = ma_y; \quad R_z = ma_z \quad (1.50)$$

A partir da definição na segunda Lei de Newton, você pode também observar a dimensão das unidades de força, relacionando a massa e a aceleração dos corpos:

$$1 \text{ N} = (1\text{kg}) (1\text{m/s}^2) = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (1.51)$$

A análise de sistemas com mais de um corpo pode se tornar um pouco mais complexa, por isso não serão consideradas neste momento. Porém, caso esses diversos corpos estejam rigidamente ligados, de modo que as forças exercidas não alterem a posição e características dos corpos, então o sistema poderá ser tratado como um único corpo. Um exemplo é o sistema formado por uma locomotiva e um vagão. Caso a locomotiva estrague e necessite ser rebocada, o reboque irá puxar a locomotiva, porém a força exercida pelo reboque atuará sobre o sistema, puxando também o vagão. Sendo assim, quando os corpos estiverem rigidamente ligados, você poderá considerar todas as forças externas atuantes no sistema para encontrar a força resultante e aplicar a segunda Lei de Newton.

Massa e peso

Os termos *massa* e *peso* são comumente confundidos ou utilizados como sinônimos. A massa de um objeto é a responsável por caracterizar sua inércia. Pense em um exemplo famoso: o ato de puxar uma toalha muito rapidamente para que a louça continue praticamente parada sobre a mesa. É a massa da louça que tenta mantê-la parada no lugar. Pensando na segunda Lei de Newton, $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$, podemos verificar que quanto maior a massa do corpo, maior a força necessária para produzir uma certa aceleração

Viu só como muitas vezes nós confundimos o peso com a massa? Na verdade, o peso é a força que a Terra exerce para tentar atrair os corpos para ela. Massa e peso são relacionados, mas não são sinônimos. Quanto maior a massa, maior o peso.

Para entender melhor, você deve pensar no exemplo da queda livre de um corpo. Quando um corpo com massa igual a 1kg cai próximo à superfície da Terra, com aceleração da gravidade $g = 9,8\text{m/s}^2$, a força resultante é

$$F = ma = (1\text{kg})(9,8\text{m/s}^2) = 9,8\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9,8\text{N} \quad (1.52)$$

Em outras palavras, podemos dizer que a força que faz um corpo acelerar em direção ao centro da Terra é o peso. Então, qualquer objeto com massa m possui um peso p dado por:

$$p = mg \quad (1.53)$$

Sendo que, para as proximidades da Terra, já vimos que $g = 9,8\text{m/s}^2$. Porém, se você um dia resolver ir para a Lua, irá se deparar com uma aceleração gravitacional bem diferente, pois lá $g = 1,62\text{m/s}^2$.

Terceira lei de Newton

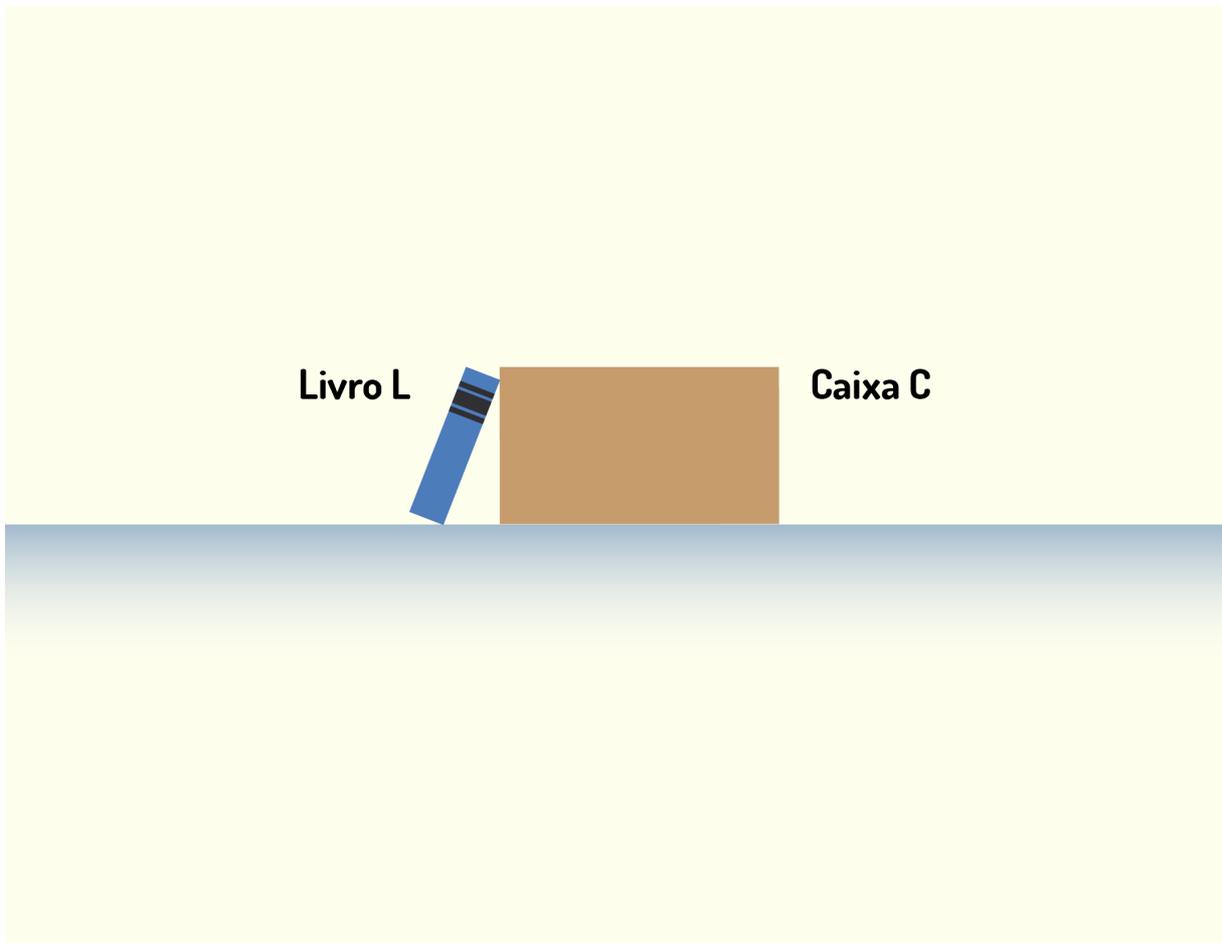
Você provavelmente já deve ter ouvido o ditado que toda ação tem uma reação. Sabia que isso é baseado na terceira lei de Newton? Quando você chuta uma bola de futebol, além dela mover-se para frente, você também sente a força exercida pela bola em seu pé. Ou quando você bate em um saco de areia e sente sua mão dolorida, isso é causado pela força de reação que foi exercida em sua mão.

Mais formalmente, a terceira lei de Newton diz que, quando um determinado corpo A exerce uma força sobre um corpo B , então, o corpo B também exerce uma força sobre A (o corpo A praticou uma "ação" e B reagiu). Essas duas forças têm a mesma intensidade

(mesmo módulo), sentidos contrários e atuam em corpos diferentes. Ou seja, matematicamente, você pode definir essa lei como sendo:

$$\vec{F}_{A \text{ em } B} = -\vec{F}_{B \text{ em } A}$$

Note que não importa a natureza do corpo, ele exercerá uma força mesmo sendo inanimado (como o saco de pancadas). Vamos observar um exemplo. Considere um livro encostado em uma caixa, como ilustrado na Figura 1.36. Como o livro está um pouco tombado e apoiado na caixa, ele está exercendo uma força \vec{F}_{LC} sobre a caixa. Porém, como dissemos, a caixa tem uma reação e exerce uma força \vec{F}_{CL} no livro. A Figura 1.37 mostra essas duas forças e suas direções contrárias, sendo elas $\vec{F}_{LC} = -\vec{F}_{CL}$, que estão sendo aplicadas em corpos distintos.



1FIGURA 36.37 - Ilustração de como o livro está apoiado na caixa FONTE: Halliday e Resnick (2012, p.102).



1FIGURA 37.37 - Esquema das forças \vec{F}_{LC} e \vec{F}_{CL} no livro apoiado na caixa FONTE: Halliday e Resnick (2012, p.102).

Agora você já deve estar bem preparado para resolver problemas envolvendo corpos em movimentos. Portanto, para verificar se você realmente aprendeu os conceitos básicos sobre as leis de Newton e as relações entre peso e massa, vamos responder a uma questão conceitual!

Querido(a) aluno(a), creio que agora você tenha entendido um pouco mais que as Leis de Newton estão presentes em praticamente todas as nossas atividades diárias. Desde o simples digitar em um teclado, em que você aplica uma força e o teclado reage com uma força

aplicada em seu dedo, até as estrelas em órbita ao redor da Terra, que são atraídas para o centro a fim de não saírem flutuando pelo espaço. Agora, para que você possa pensar mais um pouco sobre, vamos observar uma questão mais ampla e refletir sobre sua resposta.

Reflita

Você, com certeza, já deve ter assistido a filmes que contenham algum tipo de batida de carro. Então já viu exemplo clássico usado para análise das leis de Newton. Sabia que os equipamentos de proteção (cinto de segurança e *airbag*) estão lá para tentar aliviar o efeito da primeira lei de Newton?

Fique por dentro

Você sabia que o efeito das marés é causado por uma das forças que estudamos nesta unidade? Exatamente. A força responsável por isso é a força da gravidade. A aceleração gravitacional provoca uma atração entre a Terra e a Lua (chegando até a modificar a geometria esférica da Terra). Essa atração age sobre todos os pontos da Terra, inclusive os oceanos e rios. A atração não ocorre somente entre Terra e Lua. Ela acontece também entre a Terra e o Sol. Sendo assim, quando a direção das duas atrações está alinhada, o mar é atraído mais fortemente, provocando as marés altas. Quando as duas forças de atração são ortogonais, a resultante é drasticamente reduzida, provocando as marés baixas.

FONTE Explicações mais detalhadas e dinâmicas estão [www.youtube.com](https://www.youtube.com/watch?v=k6Gqmkcosm0)
<<https://www.youtube.com/watch?v=k6Gqmkcosm0>>.

UNIDADE II

Leis de Conservação

Paula Gimenez de Souza

Luís Guilherme Gimenez de Souza

Querido(a) aluno(a), sabe aquele momento em que você está tão cansado a ponto de se sentir sem energia para estudar, sair ou mesmo se exercitar? Ou quando, antes de sair, deve parar no posto de combustível para abastecer? Ou então quando a energia simplesmente acaba antes de você salvar o trabalho que estava fazendo ou ainda quando dizem que o celular “morreu” por falta de bateria? Você já pensou por que devemos estar sempre próximos a uma fonte de energia ou o motivo da expressão “a energia é o que nos move”? A energia solar, elétrica, eólica, entre tantas outras, estão diretamente relacionadas com a nossa vida, tanto no sentido de mantê-la como no de facilitar as atividades de rotina. Devido a sua importância, vamos entender fisicamente, nesta unidade, sobre os conceitos que envolvem a energia.

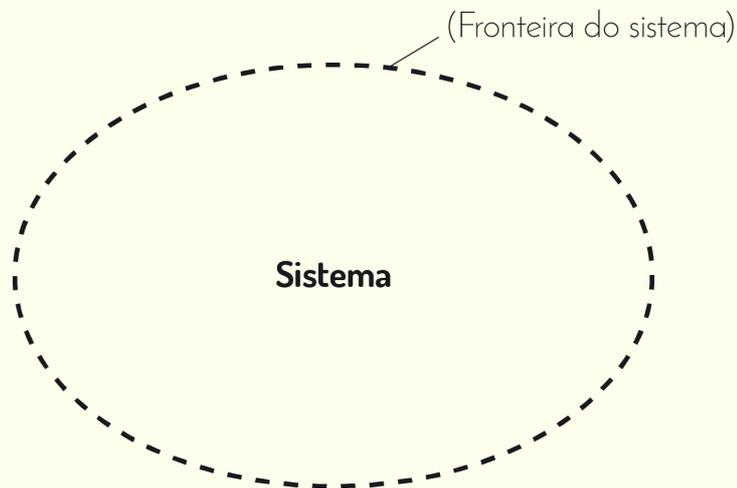
Classificação das energias

Normalmente, quando pensamos em energia, diferentes exemplos surgem em nossa mente, como a eólica, a térmica, a solar, a química, a nuclear, entre outras. Mas e conceitualmente, como você definiria o termo energia? Caso tenha dificuldades para se expressar, fique tranquilo. A ciência também não definiu exatamente o que ela representa. Sabe-se que a energia é uma propriedade associada ao estado de um ou mais corpos e por isso pode ser quantificada ou calculada. Para que ocorra essa determinação, devemos entender quais são os tipos de energia associados ao sistema em questão.

Mas o que é um sistema? Sistema é qualquer região delimitada que pode trocar massa e/ou energia através das fronteiras estabelecidas com a vizinhança (Figura 2.1). Assim, o sistema que está sendo analisado juntamente com a vizinhança que compõe o ambiente em que o sistema está inserido forma o que denominamos de universo. É classificado em:

- Sistema aberto: permite a transferência de massa e de energia com a vizinhança. Exemplo: evaporação da água dentro de uma panela aquecida.
- Sistema fechado: permite apenas a transferência de energia com a vizinhança. Exemplo: resfriamento de uma lata de refrigerante.
- Sistema isolado: não permite a transferência nem de massa e nem de energia com a vizinhança. Exemplo: garrafa térmica ideal.

Vizinhança



2FIGURA 1.24 - Representação esquemática dos componentes de um sistema FONTE: o autor, 2017.

Agora que definimos sistema, devemos avaliar quais são os tipos de energia e como ela pode ser transferida. A energia está associada a uma quantidade de matéria e pode apresentar as seguintes classificações: interna ou externa.

Energia Interna (U)

Imagine dois copos iguais com água na sua frente. O primeiro encontra-se na temperatura de 25 °C, enquanto que o segundo é mantido a 75 °C. Em sua opinião, a água nos dois copos apresentam energias iguais ou diferentes? Se forem diferentes, qual deles você acredita que

teria maior energia? Intuitivamente, sabemos que quanto maior a temperatura de um corpo, maior será seu nível de energia quando comparado a outro que apresente as mesmas características, mas com temperatura inferior. Por que isso acontece?

Relembrando rapidamente os conceitos de química, todas as moléculas acima da temperatura de zero Kelvin - que é considerado o zero absoluto e corresponde à temperatura de $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ - apresentam diferentes níveis de agitação. Então, quanto maior a temperatura aplicada, maior será o grau de agitação dessas moléculas e, conseqüentemente, maior a probabilidade de as moléculas colidirem umas com as outras, e assim maior será o nível energético dessas partículas.

Para gravarmos esse conceito, podemos imaginar uma sala de aula em um dia de inverno rigoroso. Inicialmente, todos os alunos bem agasalhados chegam e se alocam em seus devidos lugares. Normalmente, nesses dias, tendemos a permanecer mais quietos para evitarmos o gasto de energia desnecessário e mantermos mais facilmente nossa temperatura corporal, não é mesmo?! Agora, imagine que seu professor resolva ligar o sistema de aquecimento na potência máxima. O que irá acontecer? Com o aumento da temperatura, você notará que seus colegas passarão a retirar as camadas de agasalhos, e uma agitação na sala começa a ser percebida. Isso ocorre em função do aumento de temperatura. Nesse exemplo, você e seus colegas são como os átomos e moléculas, a sala de aula é como a matéria na qual os átomos estão inseridos, e o sistema de aquecimento corresponde à temperatura à qual a matéria está submetida.

Assim, temos que a energia associada com a temperatura de um corpo, independentemente da sua velocidade ou posição, é a energia interna ou também denominada de energia térmica, representada pela letra U. Essa energia é composta pelas energias cinética e potencial moleculares relacionadas ao movimento aleatório translacional, rotacional e vibracional dos átomos e moléculas (energia cinética molecular) que compõem a matéria e da energia de ligação inter e intramolecular (energia potencial molecular), e conseqüentemente é função diretamente proporcional à temperatura em que ela está submetida. Além disso, não pode ser medida diretamente através das grandezas físicas.

A partir disso, você pode se perguntar: então, a energia interna é a mesma coisa que calor? Fisicamente, esses dois conceitos se diferem. Por isso fique atento(a) que traremos a definição de calor no decorrer desta unidade.

Energia externa

A energia externa, também denominada de energia mecânica, está associada à velocidade e posição de um corpo, sendo classificada em cinética e potencial, respectivamente.

A energia cinética (E_c) está relacionada com a velocidade do sistema, ou seja, com a energia necessária para tirar um objeto do estado de repouso ou então para conduzir um objeto em movimento para o repouso. Fisicamente, segundo Young e Freedman (2008, p. 190), "**a energia cinética de uma partícula é igual ao trabalho total realizado para acelerá-la a partir do repouso até sua velocidade presente**". De forma geral, a energia cinética é a energia associada com o movimento (velocidade e deslocamento) e é representada pela Equação 1:

$$E_C = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

em que E_c é a energia cinética (J), m é a massa (kg) e v é a velocidade ($m s^{-1}$) do objeto.

Um exemplo de energia cinética pode ser observado quando um jogador de boliche arremessa a bola que estava em repouso em direção aos pinos com o objetivo de derrubá-los. Quanto maior a força exercida na bola, maior será a distância que ela irá percorrer em direção aos pinos, devido à maior energia cinética da bola.

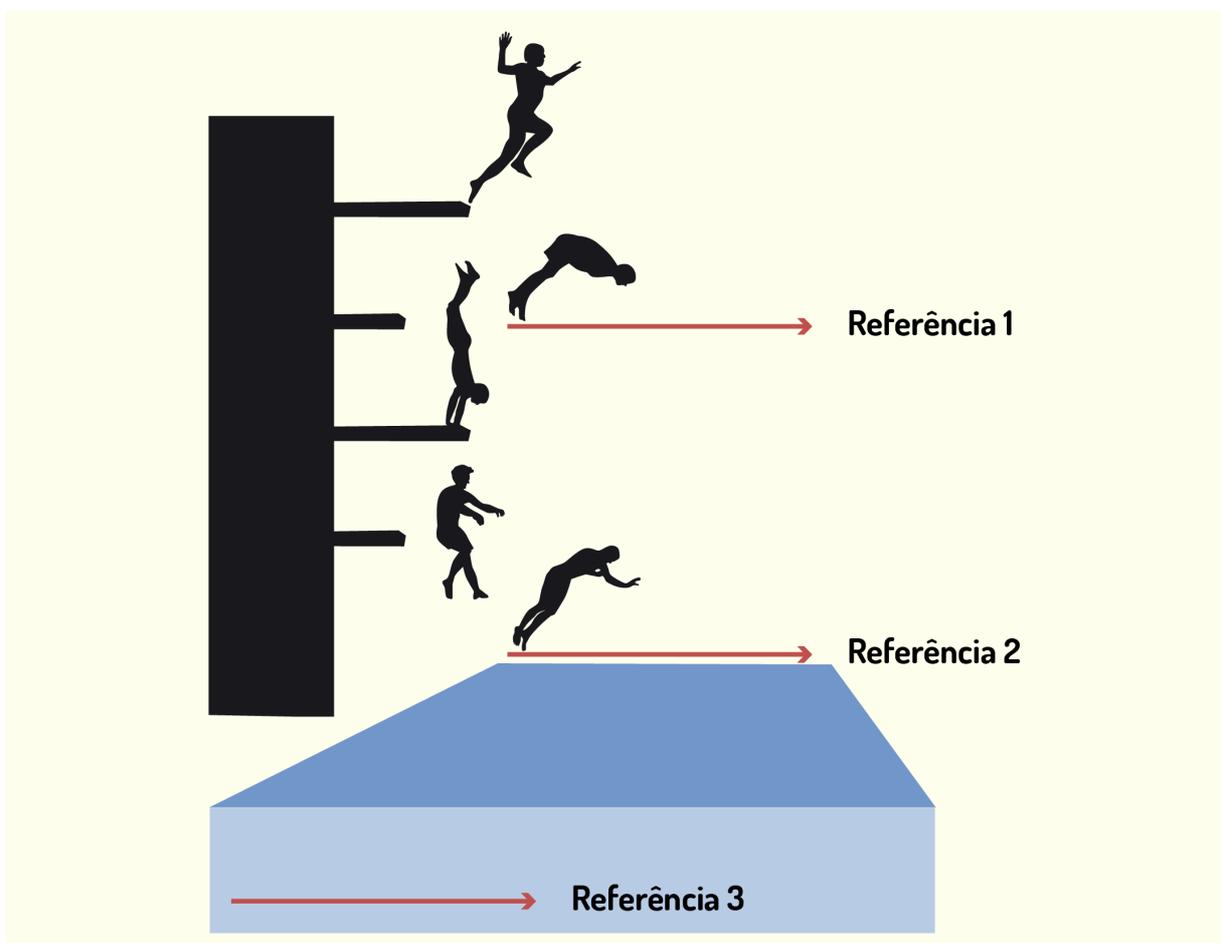
A energia potencial (E_p), por sua vez, é a energia associada à posição da partícula, ou mais especificamente, segundo Meireles e Pereira (2013, p. 21), "**à posição do centro de massa do sistema sujeito a um potencial externo**". De forma geral, a energia potencial está relacionada com a configuração do sistema e pode ser dividida em gravitacional e elástica.

A energia potencial gravitacional compreende a interação de um sistema composto por dois ou mais corpos sujeitos à força da gravidade e é representada pela Equação 2:

$$E_{Pg} = m g h \quad (2)$$

em que E_{Pg} é a energia potencial gravitacional (J), m é a massa (kg) do objeto, h é a altura (m) em que o objeto se encontra em relação à referência adotada, e g é a aceleração da gravidade do local ($9,81 \text{ m s}^{-2}$ no planeta Terra).

Ao analisar a energia potencial gravitacional, você pode se perguntar: por que devemos considerar uma referência? É simples: pelo fato desse tipo de energia envolver a posição entre dois ou mais corpos, devemos arbitrar qual será nosso ponto de referência para desenvolvermos os cálculos. Vamos clarear a ideia com mais um exemplo apresentado na Figura 2.2: um atleta olímpico de salto ornamental realizou sua melhor apresentação com um salto do trampolim de 5 metros. Em sua opinião, a altura do salto foi grande? Depende, não é mesmo? Se considerarmos o ponto de referência como sendo o trampolim de 3 metros que se encontra logo abaixo (referência 1), a borda da piscina (referência 2) ou o fundo da piscina de 20 metros de profundidade (referência 3), haverá diferença, certo?! Ou seja, para se determinar qual é a influência da gravidade para determinado corpo, devemos avaliar qual é a altura ou distância que ele se encontra de um ponto de referência



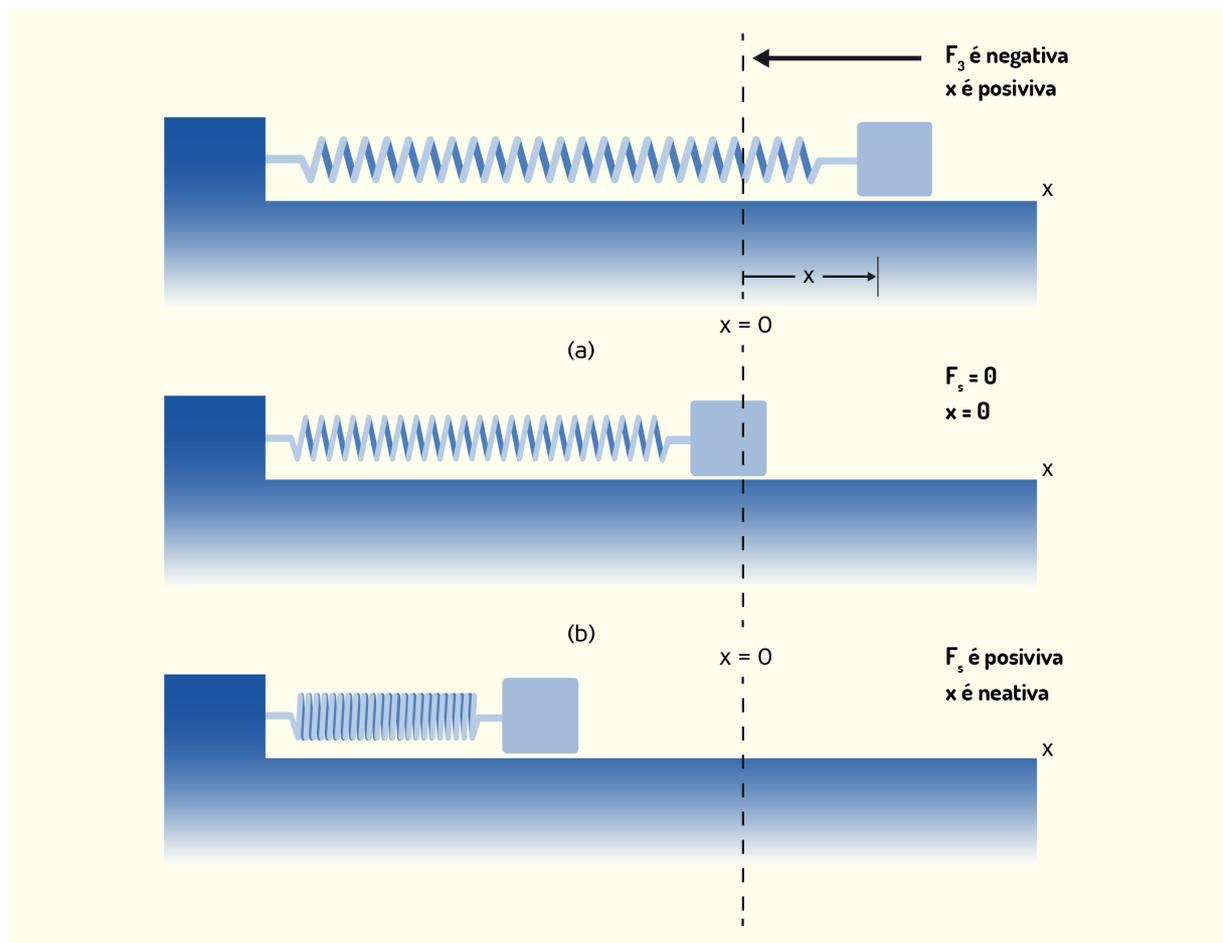
2FIGURA 2.24 - Possibilidades de definição de diferentes pontos de referência para problemas que envolvam energia potencial gravitacional FONTE: adaptada de Bradic, 123RF.

E a energia potencial elástica? Você acredita que ela se refira ao que exatamente? Intuitivamente, imaginamos que pode esta relacionada com algo que se deforme e retorne ao seu estado inicial, não é mesmo? E é exatamente isso. Fisicamente temos que a energia potencial elástica é a energia que está associada à compressão e distensão de um corpo, sendo representada pela Equação 3:

$$E_{Pel} = \frac{1}{2} k x^2 \quad (3)$$

em que E_{Pel} é a energia potencial elástica (J), k é a constante de força ($N\ m^{-1}$) - também denominada de constante elástica ou constante de rigidez -, e x é o deslocamento (m) ao que o corpo foi submetido.

O exemplo mais difundido a respeito da energia potencial elástica é o de molas que podem ser contraídas ou esticadas sem que haja a ruptura da estrutura, como apresentado na Figura 2.3. Ao se estabelecer uma posição zero ($x = 0$), considerando que a mola se encontra no estado de repouso (Figura 2.3 - b), quando você exercer uma força no sentido de esticar a mola (Figura 2.3 - a), o deslocamento será positivo ($x > 0$), mas a mola tenderá a voltar ao seu estado inicial e assim o sentido da força será contrário ao eixo estabelecido de referência e por isso será negativa. No entanto, caso você comprima a mola (Figura 2.3 - c), o deslocamento será negativo ($x < 0$) e, como a mola também tenderá a retornar ao seu estado inicial, a força será positiva por estar a favor do eixo de referência.



2FIGURA 3.24 - Representação de uma mola estendida (a), no estado de repouso (b) e comprimida (c) FONTE: Serway e Jewett Jr. (2011, p. 188)

Visto quais são as diferentes componentes de energia que podem estar presentes nos sistemas, podemos facilmente calcular a sua energia total (E) pela Equação 4.

$$E = U + E_C + E_P \quad (4)$$

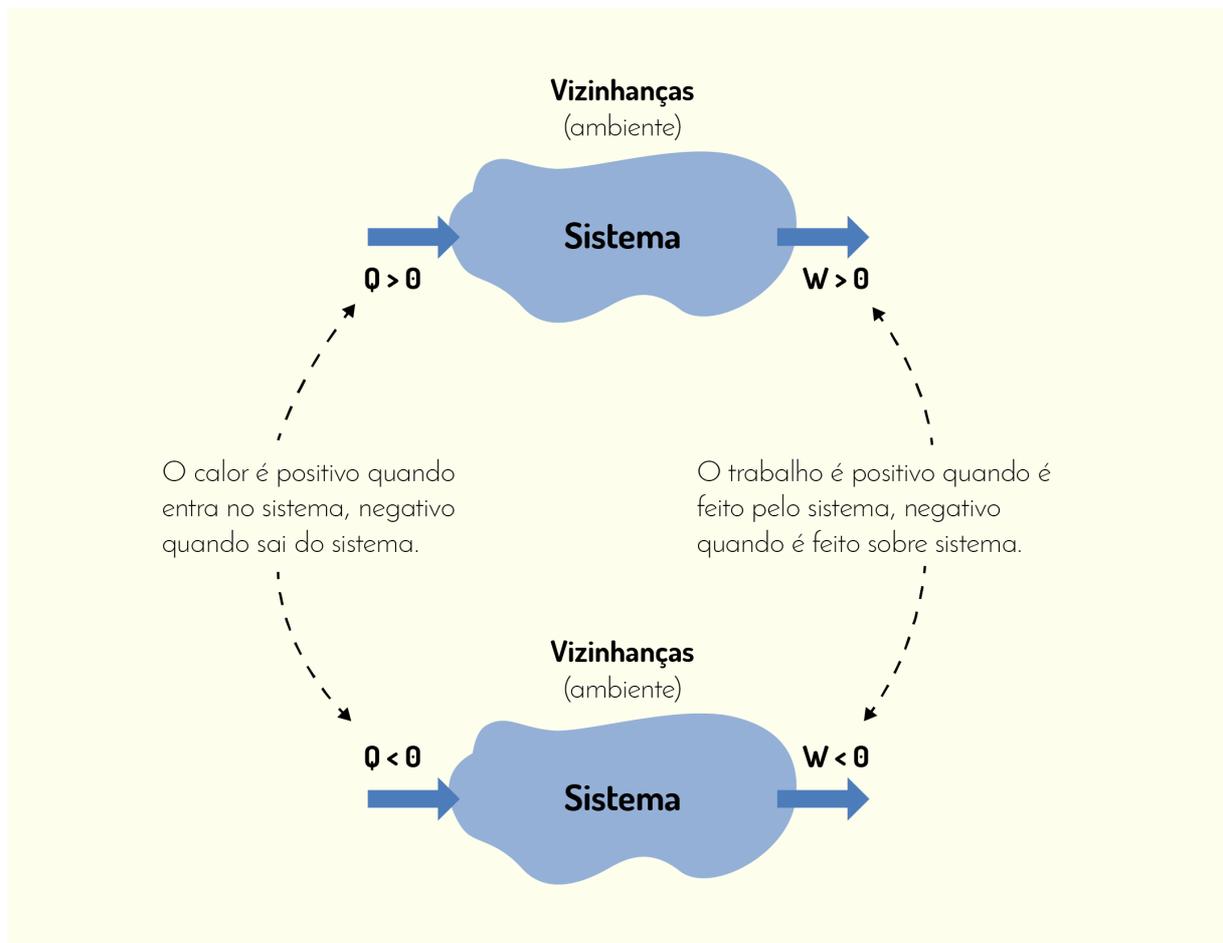
Após o estudo sobre como os elementos que compõem a energia são classificados, vamos avaliar quais são os modos que a energia utiliza para se deslocar. Por exemplo, caso você encoste sua mão em uma panela aquecida, por que ela queima? Ou então, caso você comprima uma mola, como ela retorna ao seu estado inicial sozinha? Isso ocorre basicamente, porque a energia se transfere em direção ao meio ou estado menos energético visando atingir o equilíbrio. Mas, em sua opinião, quais são as formas dela se transferir?

Troca de energia

As duas formas de troca de energia são denominadas de calor (Q) e trabalho (W). Ambas não são associadas a uma quantidade de matéria, isto é, não pertencem ao corpo avaliado e ocorrem apenas quando existe um desequilíbrio que atue como força motriz. A troca pelo calor ocorre quando há um gradiente de temperatura entre o sistema e a vizinhança, enquanto que o trabalho ocorre quando há variação de volume do sistema.

Visando facilitar o entendimento do conteúdo ao longo da unidade, vamos convencionar os sinais de calor e trabalho da seguinte forma (Figura 2.4):

- Calor positivo: quando for cedido pela vizinhança para o sistema, ou seja, entrar no sistema (processos endotérmicos).
- Calor negativo: quando for fornecido para vizinhança, ou seja, sair do sistema (processos exotérmicos).
- Trabalho positivo: quando é realizado pelo sistema sobre a vizinhança, ou seja, quando há aumento do volume do sistema (expansão).
- Trabalho negativo: quando é realizado sobre o sistema pela vizinhança, ou seja, quando há redução do volume do sistema (compressão).



2FIGURA 4.24 - Convenção de sinais para a troca de calor entre o sistema e a vizinhança na forma de calor e trabalho.
 FONTE: Young e Freedman (2008, p. 253).

Assim, quando a vizinhança e o sistema estão em equilíbrio, não haverá a troca de energia. Por exemplo: um copo com água à temperatura ambiente não irá receber ou perder calor para a vizinhança e também não irá sofrer uma expansão ou contração de seu volume, certo? Mesmo sabendo que a água tem uma energia interna associada aos movimentos e ligações de seus átomos e moléculas, ela não será transferida pela ausência de uma força motriz.

O calor pode ser dividido em calor latente e calor sensível. Possivelmente você já aprendeu esses conceitos no ensino médio, mas vamos lembrá-los. Calor latente é aquele em que ocorre a mudança de fase de um sistema, ou seja, é a quantidade de calor necessário que o sistema recebe ou cede para que a substância sofra fusão/solidificação, vaporização/condensação ou sublimação/cristalização. Esse calor está associado à entalpia

que será um conceito abordado no decorrer da unidade e pode ser representado pela Equação 5. O calor sensível, no entanto, está relacionado apenas a questões de aquecimento e resfriamento do corpo e está representado na Equação 6.

$$Q_l = m \Delta \hat{H} \quad (5)$$

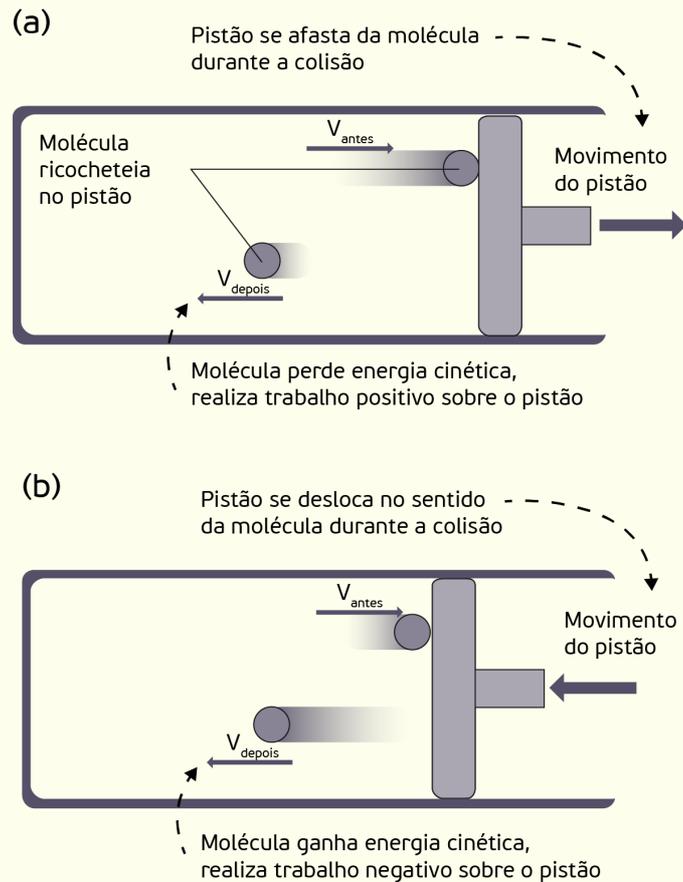
em que Q_l é o calor latente (J), m é a massa do sistema (kg) e $\Delta \hat{H}$ é a variação de entalpia específica do sistema (J kg^{-1}).

$$Q_s = m C_p \Delta T \quad (6)$$

em que Q_s é o calor sensível (J), m é a massa do sistema (kg), C_p é o calor específico do sistema ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) e ΔT é a variação de temperatura (K).

Diferentemente do calor, o conceito de trabalho envolve algumas questões que devem ser aprofundadas para um melhor entendimento. Estudamos que o trabalho envolve variação de volume, certo? Vamos então ao exemplo clássico para discutirmos os conceitos que envolvem essa forma de troca de energia: um pistão. O pistão é uma peça que realiza trabalho mecânico a partir de combustão de gases muito utilizada em motores. Considerando que o gás dentro do pistão é o seu sistema, podemos descrever seu funcionamento - simplificadamente - da seguinte forma (Figura 2.5):

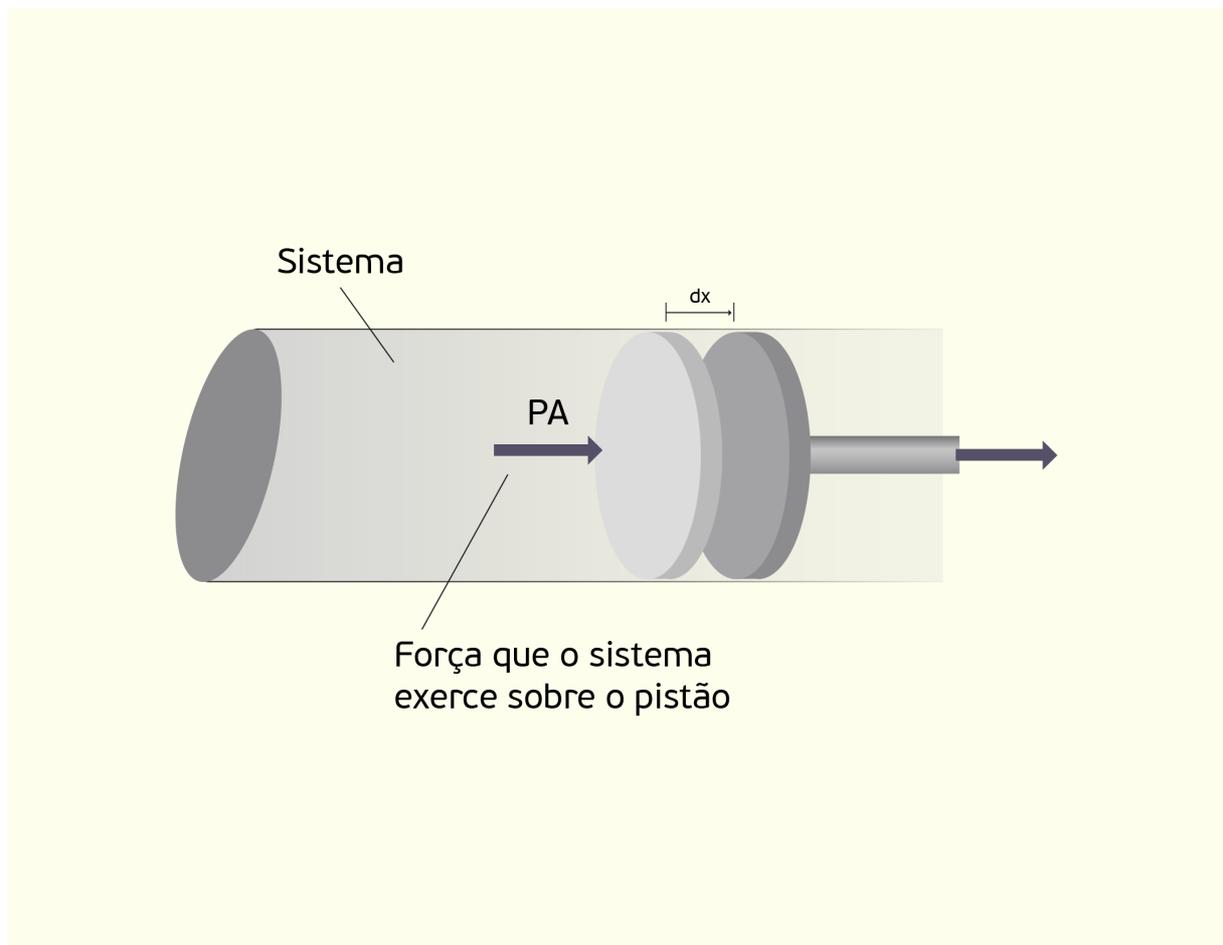
- i. A expansão do gás dentro do pistão devido à combustão, força o êmbolo da peça no sentido de aumentar o volume ocupado pelo gás, ou seja, o sistema realiza trabalho. Isso ocorre porque as moléculas do gás transferem sua energia cinética ao colidirem com o êmbolo, gerando uma força que movimenta o pistão no sentido positivo ($W > 0$) (Figura 2.5 - a).
- ii. Em seguida, o êmbolo da peça é forçado mecanicamente no sentido de comprimir o gás que é transferido para um reservatório, isto é, a vizinhança realiza trabalho sobre o sistema. Com a redução do volume ($W < 0$) devido à compressão do gás pelo êmbolo, ocorre um aumento da energia cinética das moléculas (Figura 2.5 - b).



2FIGURA 5.24 - Representação esquemática do funcionamento de um pistão FONTE: Young e Freedman (2008, p. 253)

Caso tenha interesse, utilize o seguinte link para visualizar o funcionamento de um pistão: [www.youtube.com <https://www.youtube.com/watch?v=MdIEwKIPqLk>](https://www.youtube.com/watch?v=MdIEwKIPqLk).

Conceitualmente sabemos que trabalho (W) é a força (F) utilizada para realizar um determinado deslocamento (x), como apresentado na Figura 2.6, certo?



2FIGURA 6.24 - Trabalho realizado durante uma expansão FONTE: Young e Freedman (2008, p. 254).

Logo, matematicamente, podemos entendê-lo da seguinte forma:

$$W = F x$$

Considerando um deslocamento infinitesimal, a equação pode ser então ser reescrita como:

$$dW = F dx$$

Sabendo que força (F) é igual a pressão (P) exercida sobre uma determinada área (A), teremos:

$$dW = P A dx$$

Como a área (A) multiplicada pelo deslocamento infinitesimal (dx) compreende um volume infinitesimal, tem-se que o trabalho pode ser calculado pela Equação 7:

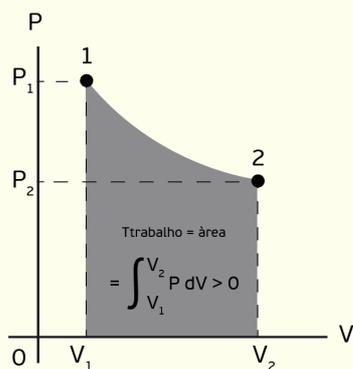
$$dW = P dV \quad (7)$$

Assim, para uma variação finita de um volume inicial (V_1) até um volume final (V_2), podemos reescrever a Equação 7, como:

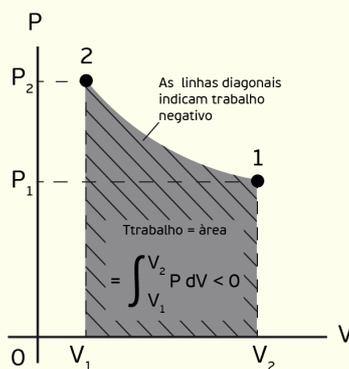
$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV \quad (8)$$

Para determinação do trabalho a partir da Equação 8, devemos avaliar diagramas de pressão versus volume - como exemplificado na Figura 2.7 - para identificar se a pressão do sistema diminui (a), aumenta (b) ou permanece constante (c), durante a troca de energia.

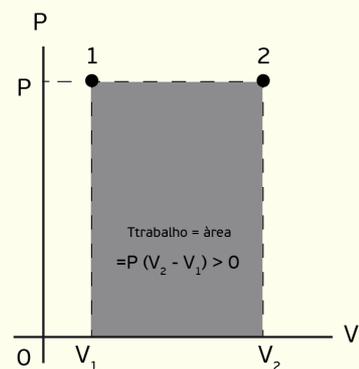
(a) Diagrama PV de um sistema passado por uma expansão a pressão variável



(b) Diagrama PV de um sistema passado por uma compressão a pressão variável



(c) Diagrama PV de um sistema passado por uma expansão sob pressão constante



2FIGURA 7.24 - Representação esquemática de diagramas PV para (a) expansão; (b) compressão à pressão variável; e (c) para pressão constante FONTE: Young e Freedman (2008, p. 254).

Uma observação importante é que a definição de trabalho abordada até esse ponto do estudo está associada à força necessária para que haja um deslocamento, ou seja, existe a deformação dos limites previamente estabelecidos. No entanto, existe também o trabalho de eixo (W_s) que converte outras fontes de energia em energia mecânica sem que ocorra deformação dos limites do sistema, sendo muito comum em agitadores, bombas, compressores e turbinas.

O conhecimento é construído por meio da leitura e realização de atividades, então que tal darmos uma pausa no conteúdo e fixarmos esses primeiros conceitos aprendidos por meio de uma atividade?

Primeira Lei da Termodinâmica

Caro(a) aluno(a), após o estudo sobre os tipos de energia e as formas de troca térmica, nos deparamos com o conceito de termodinâmica. Analisando a semântica da palavra, o que você diria que ela pode representar? Se você pensou em algo associado à temperatura, e consequentemente, energia, acertou. A termodinâmica relaciona os tipos de energia (interna, cinética e potencial) com os modos de troca térmica (calor e trabalho), e por isso a temperatura encontra-se como um dos pilares desse conceito.

A Primeira Lei da Termodinâmica afirma, conceitualmente, que a variação da energia interna de um sistema é igual à energia recebida na forma de calor menos o trabalho realizado através das suas fronteiras, sendo representada pela Equação 9.

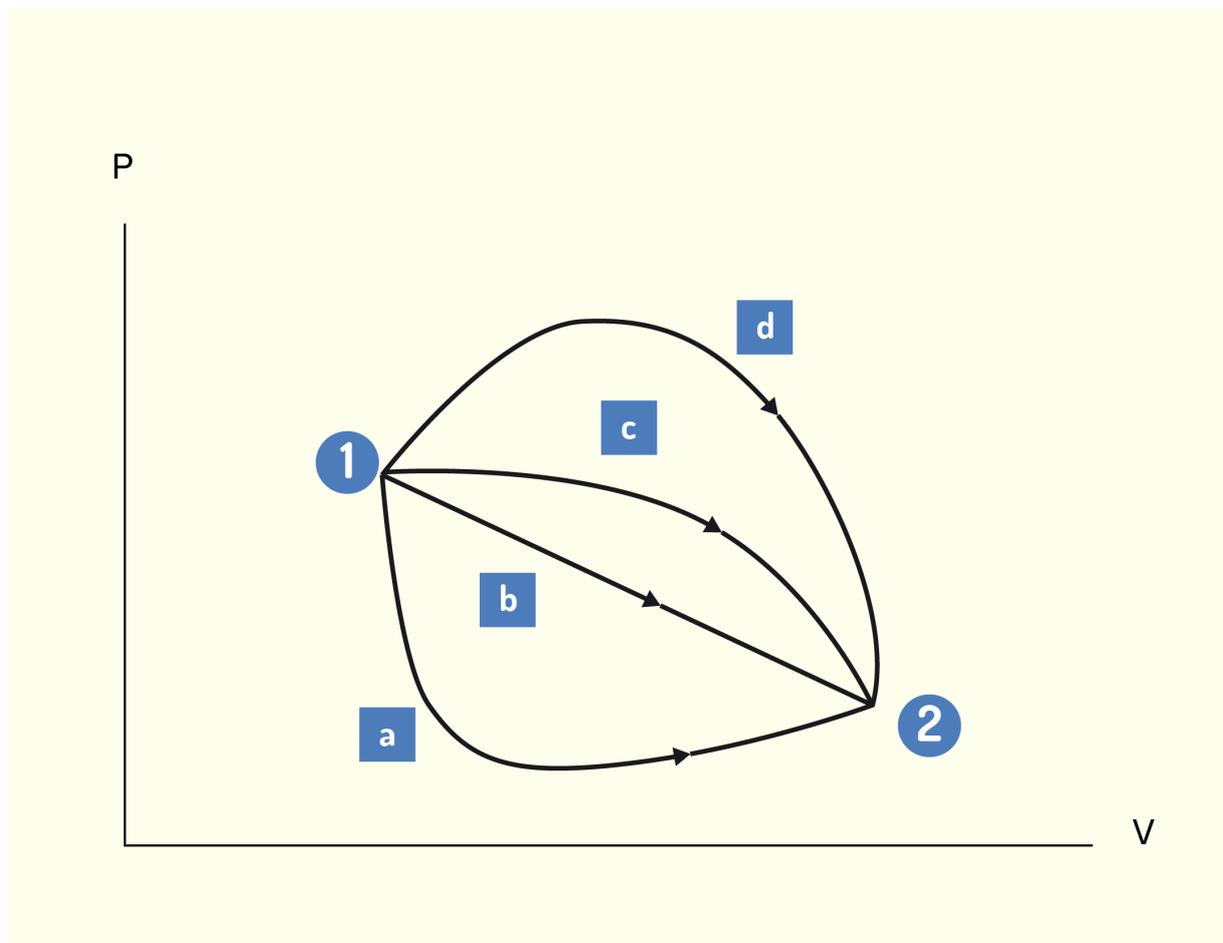
$$\Delta U = Q - W \quad (9)$$

Considerando que a mudança de estado pode ser infinitesimal, podemos reescrever a Equação 9, como:

$$dU = dQ - dW$$

É importante lembrar que, nesse caso, os sinais estão de acordo com a convenção estabelecida anteriormente. Caso queira mudar a convenção de sinais, pode-se utilizar a Primeira Lei da Termodinâmica como $\Delta U = Q + W$, em que os valores de Q e W devem ser apresentados em módulo e os sinais avaliados, ou seja, verifica-se se o sistema recebeu ou cedeu calor e se realizou ou foi realizado trabalho sobre ele.

A vantagem principal da Primeira Lei da Termodinâmica é permitir a determinação da variação da energia interna de um sistema através de grandezas físicas que podemos medir diretamente (Q e W). Além disso, essa variação de energia interna independe das etapas intermediárias ou dos caminhos a que o sistema pode ter se submetido, isto é, é função apenas do estado inicial e final do sistema, como representado na Figura 2.8.



2FIGURA 8.24 - Exemplos de diferentes caminhos que podem ser utilizados para atingir o mesmo estado final partindo de um estado inicial único, o que não altera a variação de energia interna do sistema FONTE: Halliday e Resnick (2009, p. 197).

A partir das especificidades dos diferentes tipos de sistemas estudados, podemos avaliar como a Primeira Lei da Termodinâmica se aplica a cada uma delas.

Sistemas isolados e Processos cíclicos

Como visto na seção 1 desta unidade, os sistemas isolados são aqueles que não permitem a troca de energia com a vizinhança e por isso:

$$Q = W = 0$$

Dessa forma, tem-se:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0$$

Nos processos cíclicos, por sua vez, os estados final e inicial do sistema são iguais, por isso:

$$U_2 = U_1 \rightarrow \Delta U = 0$$

E dessa forma, tem-se:

$$Q = W$$

Processos adiabáticos

Os processos adiabáticos são aqueles que não permitem a troca de energia na forma de calor, por exemplo, materiais revestidos com isolantes. Nesse caso:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = -W$$

Isto é, quando um processo se expande adiabaticamente, empurrando o êmbolo do pistão, por exemplo, o sistema reduz sua energia interna ($\Delta U < 0$) para realizar o trabalho sobre a vizinhança ($W > 0$). Caso a vizinhança realize uma compressão sobre o sistema ($W < 0$), haverá transferência de energia para o sistema e assim a energia interna será aumentada ($\Delta U > 0$).

Processos isocóricos

Os processos isocóricos são aqueles que ocorrem a volume constante, ou seja, não realiza trabalho e toda a energia fornecida na forma de calor é utilizada para o aumento da energia interna do sistema. Nesse caso, tem-se:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q$$

Processos isobáricos

Os processos isobáricos são aqueles em que ocorrem a pressão constante. Nesse caso, podemos utilizar a Equação 8 da seguinte forma e realizar os demais cálculos normalmente:

$$W = P (V_2 - V_1)$$

Processos isotérmicos

Os processos isotérmicos são aqueles que ocorrem à temperatura constante. Nesse caso, podemos dividir os processos de duas maneiras distintas: os sistemas que se comportam como gases ideais e os que não se comportam de tal forma. Então, que tal analisarmos mais de perto cada um deles?

Primeiramente, em sua opinião, o que caracteriza um sistema para que ele possa ser considerado um gás ideal? Relembrando alguns conceitos antigos, temos que o gás ideal consiste em um modelo idealizado de sistemas que são bem descritos pela Equação 10 em todas as pressões e temperaturas consideradas.

$$P V = n R T \quad (10)$$

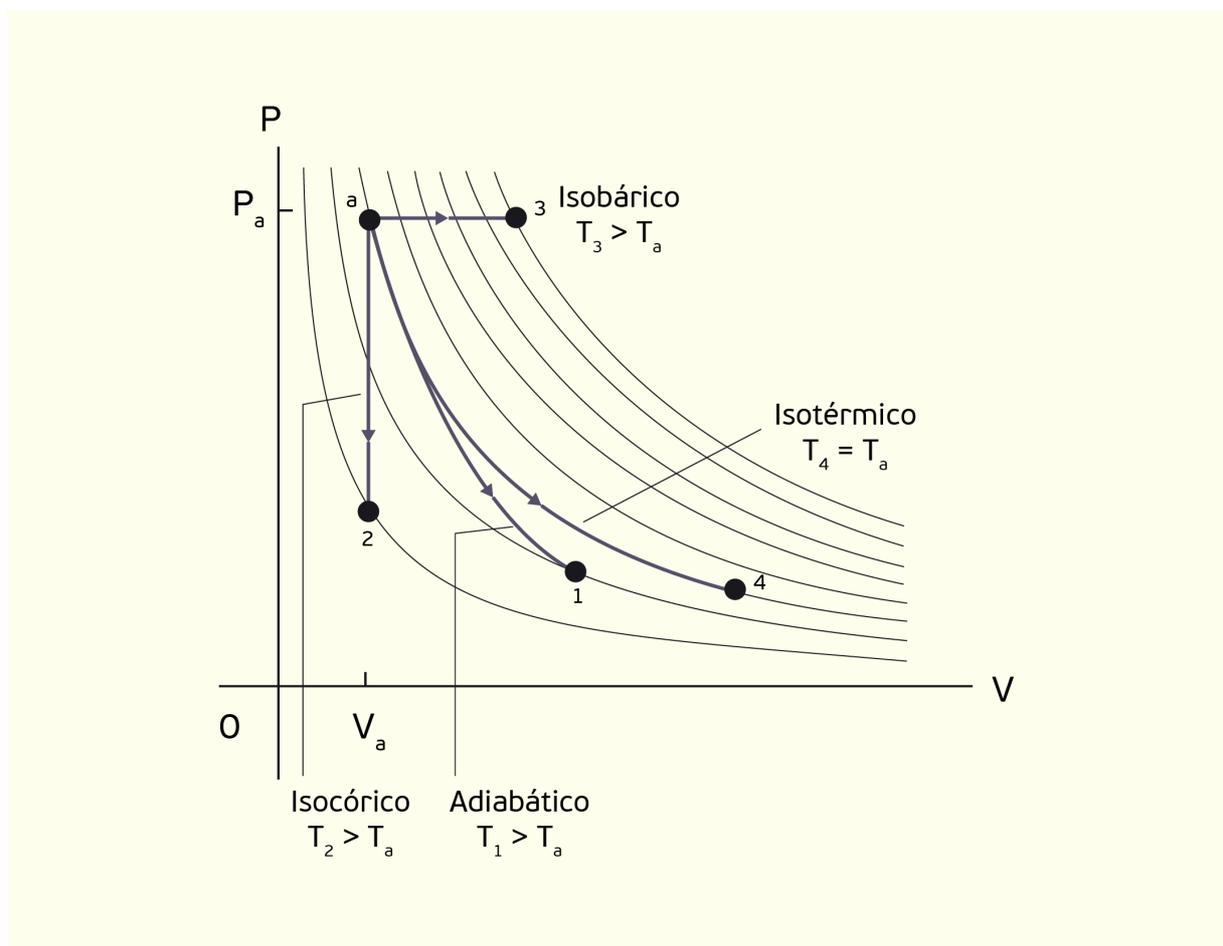
Em que P é a pressão (Pa), V é o volume (m^3), n é o número de mols, R é a constante dos gases ideais ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e T é a temperatura (K). O número de mols pode ser substituído por $n = m/M$, em que m é a massa total e M é a massa molar.

Normalmente, esse conceito é bem aplicado para pressões moderadas (até algumas atmosferas) e elevadas temperaturas (acima da temperatura em que o gás se liquefaz). Isso pode ser explicado pelo fato de o gás ideal considerar que as moléculas encontram-se afastadas infinitamente uma das outras, de forma que o volume dessas moléculas torna-se desprezível e as forças intermoleculares tendam a zero. Ou seja, funciona como se as

moléculas não sentissem a presença das demais. Por isso, quando utilizamos o modelo de gás ideal para um sistema, estamos afirmando que a sua energia interna depende apenas da sua temperatura, isto é, independe da pressão ou volume.

No caso de sistemas que não se comportam como gás ideal, a energia interna depende do volume e da pressão, pelo fato de a distância entre as moléculas interferir em como elas interagem, mesmo que o sistema permaneça com a temperatura constante.

Agora que estudamos os casos específicos, podemos observar na Figura 2.9 como seria um diagrama PVT para cada um dos processos.



2FIGURA 9.24 - Representação das principais classificações de processos no diagrama PVT FONTE: Young e Freedman (2008, p.263).

Com base no estudo realizado até o presente momento, você acredita que a temperatura de um material pode ser elevada apenas com o fornecimento de energia térmica? Para ficar mais simples, vamos a um exemplo prático. Considere hipoteticamente que suas mãos estejam em equilíbrio térmico com o ar ambiente, ou seja, não existe gradiente de temperatura entre o ar ambiente e sua pele. Qual seria a forma mais simples para aquecê-las? Em dias de inverno é comum você ver pessoas friccionando uma mão contra a outra na tentativa de aquecê-las, não é mesmo?! Mas como isso pode ser explicado? É muito simples, quando as mãos são friccionadas, as forças de atrito entre elas realizam um trabalho mecânico que se transforma em energia térmica, aumentando então a temperatura do sistema.

O conceito de que o trabalho mecânico pode aumentar a temperatura de um sistema foi descrito por Sir James Joule entre os séculos XVIII e XIX e comprovado por meio do experimento apresentado na Figura 2.10.



2FIGURA 10.24 - Experimento de Joule FONTE: Young e Freedman (2008, p. 190).

De forma simplificada, Joule observou que a agitação vigorosa de um recipiente com água poderia aquecê-lo de modo análogo ao seu aquecimento direto. Isso foi justificado pelo fato de os agitadores realizarem trabalho de eixo sobre a água (sistema), transferindo então energia capaz de aumentar sua temperatura de forma proporcional ao trabalho realizado. A partir dessa constatação, foi inserido o conceito de calor específico.

Calor específico

O calor específico pode ser definido como a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa (kg) de uma substância em 1 °C, como definido pela Equação 11:

$$C \equiv \frac{Q}{m \Delta T} \quad (11)$$

em que C é o calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), m é a massa do sistema (kg) e ΔT é a variação de uma unidade de temperatura ($^\circ\text{C}$).

O calor específico é função da substância e da temperatura em que se encontra, como pode ser observado por meio de alguns exemplos apresentados na Tabela 2.1.

SUBSTÂNCIA	C (J KG ⁻¹ °C ⁻¹)	SUBSTÂNCIA	C (J KG ⁻¹ °C ⁻¹)
Alumínio	900	Madeira	1700
Cobre	387	Vidro	837
Ouro	129	Mármore	860
Ferro	448	Álcool etílico	2400
Chumbo	128	Mercúrio	140
Prata	234	Gelo (-5 °C)	2090
Bronze	380	Água (15 °C)	4186

2QUADRO 1.2 - Calores específicos de substâncias a 25 °C e 1 atm. FONTE: Serway e Jewett Jr (2011).

Ao observar os valores da Tabela 2.1, em sua opinião, caso você possua 1 kg de alumínio, 1 kg de ferro e 1 kg de ouro na temperatura de 25 °C e forneça a cada um deles 250 J, qual dos compostos apresentará a maior e a menor temperatura, respectivamente? Para resolver essa questão, basta observar os valores de calor específico para identificar que o ouro e o alumínio apresentarão a maior e a menor temperatura respectivamente. Isso pode ser justificado pelos valores de calor específico para esses três componentes seguirem a seguinte ordem $C_{\text{alumínio}} < C_{\text{ferro}} < C_{\text{ouro}}$, que indica que o ouro necessita de uma menor quantidade de energia para aumentar a sua temperatura em 1 °C.

Além disso, o calor específico é dividido em duas grandezas específicas que podem ser conceitualmente estabelecidas a partir da Primeira Lei da Termodinâmica. Vamos então estudá-las separadamente para que possamos entender como são estabelecidas.

Calor específico a volume constante (C_v):

Para darmos início ao raciocínio, iremos resgatar a Equação 9, que representa a Primeira Lei da Termodinâmica:

$$\Delta U = Q - W \quad (9)$$

Considerando uma mudança de estado infinitesimal, tem-se:

$$dU = dQ - dW$$

Para sistemas em que há recebimento de calor na forma de calor sensível, podemos substituir $dQ = m C dT$ (Equação 6), obtendo:

$$dU = m C dT - dW$$

Além disso, como apresentado anteriormente $dW = P dV$ (Equação 7), logo:

$$dU = m C dT - P dV$$

Lembrando que dU é a variação da energia interna total do sistema, podemos utilizar a seguinte relação $dU = m d\hat{U}$, em que dU é a variação da energia interna total (J), m é a massa do sistema (kg) e $d\hat{U}$ é a variação da energia interna específica (J kg⁻¹). Substituindo, tem-se:

$$m d\hat{U} = m C dT - P dV$$

Para sistemas em que o volume é constante, $dV = 0$, portanto:

$$m d\hat{U} = m C dT$$

Assim, podemos cancelar as massas por estarem dos dois lados da equação e obtemos a definição do calor específico a volume constante (C_V), como apresentado na Equação 12:

$$C_V = \left(\frac{d\hat{U}}{dT} \right)_V \quad (12)$$

Calor específico a pressão constante (C_p):

Novamente, partiremos da Equação 9, que representa o enunciado da Primeira Lei da Termodinâmica:

$$\Delta U = Q - W \quad (9)$$

Para sistemas à pressão constante (isobáricos), podemos utilizar a seguinte relação $W = P(V_2 - V_1) = P V_2 - P V_1$, obtendo:

$$\Delta U = Q - (P V_2 - P V_1)$$

Como $\Delta U = U_2 - U_1$, tem-se:

$$U_2 - U_1 = Q - (PV_2 - PV_1)$$

Rearranjando a equação anterior, por meio do agrupamento dos termos relativos ao estado inicial (1) e final (2), teremos:

$$(U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1) = Q$$

Conceitualmente, a entalpia (H) é definida segundo a Equação 13:

$$H = U + PV \text{ (13)}$$

Utilizando, então, a definição de entalpia (Equação 13), teremos:

$$H_2 - H_1 = Q$$

Como $Q = m C \Delta T$ (Equação 6), podemos reescrevê-la da seguinte forma:

$$\Delta H = m C \Delta T$$

Considerando que a variação de estado ocorra em um nível infinitesimal, teremos:

$$dH = m C dT$$

Assim como dU é a variação da energia interna total do sistema, dH é a variação total de entalpia do sistema e por isso podemos utilizar a seguinte relação $dH = m d\hat{H}$, em que dH é a variação da entalpia total (J), m é a massa do sistema (kg) e $d\hat{H}$ é a variação da entalpia específica (J kg⁻¹). Substituindo, tem-se:

$$m d\hat{H} = m C dT$$

Assim, novamente podemos cancelar as massas por estarem dos dois lados da equação, e obtemos a definição do calor específico à pressão constante (C_p) como apresentado na Equação 14:

$$C_p = \left(\frac{d}{dT} \right)_p \quad (14)$$

O calor específico a volume constante (Equação 12) e a pressão constante (Equação 14) podem ser relacionadas para processos que envolvam gases ideais como será apresentado a seguir.

Partindo da definição de entalpia (Equação 13), tem-se:

$$H = U + PV$$

Sabendo que H , U e V estão associados com a massa total do sistema, podemos reescrevê-los em termos de massa molar como:

$$n\hat{H} = n\hat{U} + P n \hat{V}$$

em que n é o número de mols do sistema e \hat{H} , \hat{U} e \hat{V} correspondem à entalpia específica (J mol^{-1}), energia interna específica (J mol^{-1}) e volume específico ($\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$), respectivamente.

Os mols podem se cancelar por estarem presentes em todos os termos da equação, obtendo:

$$\hat{H} = \hat{U} + P \hat{V}$$

Utilizando a equação para gases ideais (Equação 10), temos que $PV = nRT$, ou seja, $P\hat{V} = RT$. Substituindo essa relação na equação, teremos:

$$\hat{H} = \hat{U} + RT$$

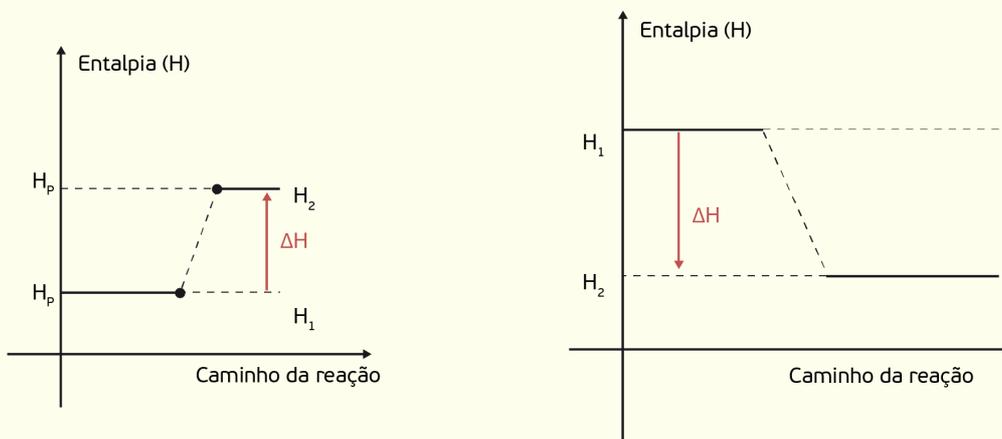
A partir das definições de calor específico a volume constante (Equação 12) e à pressão constante (Equação 14) para uma mudança de estado infinitesimal, tem-se:

$$C_p dT = C_v dT + R dT$$

Podemos, então, cancelar dT por multiplicar todos os termos da equação, obtendo a relação entre os calores específicos à pressão e a volume constantes para gases ideais como apresentado na Equação 15.

$$C_p = C_v + R \quad (15)$$

Observamos, ao longo das deduções, o surgimento do termo entalpia. Você saberia explicar o que ele significa fisicamente ou qual sua utilidade? Podemos iniciar o desenvolvimento da ideia com a seguinte dica: $\Delta H = Q$ (como apresentado nas Equações 5, 6 e 14). Ou seja, a entalpia está associada a uma quantidade de energia térmica trocada entre o sistema e a vizinhança tanto para que ocorra um aquecimento/resfriamento como para que exista uma mudança de fase. Portanto, a entalpia pode ser definida como a quantidade de energia necessária para que ocorra uma reação. Por isso, como pode ser observado na Figura 2.11, para as reações endotérmicas, $\Delta H > 0$, pois o sistema precisa receber energia da vizinhança para que a reação ocorra; enquanto que, para reações exotérmicas, $\Delta H < 0$, pois o sistema está liberando calor para a vizinhança.



2FIGURA 11.24 - Variação de entalpia de um estado inicial (1) para um estado final (2) em uma reação (a) endotérmica e (b) exotérmica FONTE: Quevedo (on-line).

Assim como a energia interna, a entalpia é uma função de estado, isto é, independe do caminho percorrido pelo sistema, sendo necessário o conhecimento apenas dos estados inicial e final em que o sistema se encontra. Além disso, também não é possível medi-la diretamente por meio do uso de grandezas físicas, e por isso o que permite a sua determinação é justamente sua associação com o calor.

Você deve ter notado que o calor tem papel fundamental na termodinâmica por ser um dos responsáveis pelo trânsito de energia entre o sistema e a vizinhança, não é mesmo?! Então, que tal avaliarmos quais são os mecanismos de transferência de calor?!

Mecanismos de transferência de calor

Imagine que, em um dia quente de verão, você resolva ir para a piscina. Antes de entrar na água, porém, você resolve se hidratar e pega uma garrafa de água gelada que estava armazenada em uma bolsa térmica. Em seguida, entra na piscina, onde permanece por um determinado tempo e decide se secar ao sol antes de ir embora. Você concorda que a sensação física que temos é similar, ou seja, você sente a temperatura fria e a quente? Mas você saberia identificar e caracterizar quais são os mecanismos de transferência de calor ao i) segurar a garrafa de água gelada, ii) entrar em contato com a água da piscina e iii) secar ao sol?

Primeiramente, é importante lembrarmos que a transferência de energia térmica ocorre apenas quando há gradiente de temperatura (força motriz) e que sempre ocorre de um local de maior energia para um local de menor energia associado. Os três mecanismos de transferência de calor são condução, convecção e radiação. Que tal analisarmos brevemente cada um deles então?!

A condução térmica é o fenômeno que está associado à transferência de calor pela vibração das moléculas presentes no material. Isso pode ser explicado da seguinte forma: as moléculas vibram devido a sua energia interna, quando isso acontece, ocorrem colisões entre elas e a molécula com maior nível de energia transmite parte de sua energia para a molécula adjacente que apresenta um menor grau de agitação, e assim sucessivamente. Por isso, na condução térmica, dizemos que a energia é transmitida de molécula para molécula ocorrendo em nível atômico e/ou molecular. Assim, esse mecanismo pode ocorrer nos três estados físicos da matéria, ou seja, em sólidos, em líquidos e em gases. A condução segue a lei de Fourier, que está apresentada de modo simplificado na Equação 16.

$$q_{cond} = -k A \frac{dT}{dx} \quad (16)$$

onde q_{cond} é a taxa de transferência de calor (W), k é a condutividade térmica do material ($W m^{-1} K^{-1}$), A é a área normal a superfície em que ocorre a condução (m^2), dT/dx é o gradiente de temperatura na direção avaliada ($K m^{-1}$). A equação 16 é a representação da lei de Fourier simplificada para um sistema de coordenadas cartesianas e unidimensional na direção x .

A convecção térmica, por sua vez, está associada com a transferência de energia por meio de uma movimentação de um fluido (gás ou líquido). É composta por dois mecanismos distintos: pelo movimento molecular aleatório (microscópico) e pelo movimento global de fluido (macroscópico). Além disso, pode ser classificada em convecção natural (ou livre), quando o movimento está associado à diferença de densidade do fluido, por exemplo, correntes de ar quente e de ar frio; e em convecção forçada, quando o movimento do fluido ocorre devido a um equipamento externo como um ventilador, uma bomba ou um compressor. A convecção segue a lei de Newton de resfriamento que é representada pela Equação 17:

$$q_{conv} = h A (T_s - T_{\infty}) \quad (17)$$

em que q_{conv} é a taxa de transferência de calor por convecção (W), h é o coeficiente convectivo ($W m^{-2} K^{-1}$), A é a área normal à superfície em que ocorre a convecção (m^2), T_s e T_{∞} são as temperaturas (K) da superfície e do fluido, respectivamente.

Já a radiação térmica é a energia irradiada através de ondas eletromagnéticas resultantes da movimentação molecular. Todos os materiais que apresentam uma temperatura superior ao zero absoluto (0 K) emitem radiação, no entanto vale lembrar que normalmente parte da radiação produzida fica retida no próprio corpo. A radiação segue a lei de Stefan-Boltzmann, apresentada pela Equação 18.

$$q_{rad} = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (18)$$

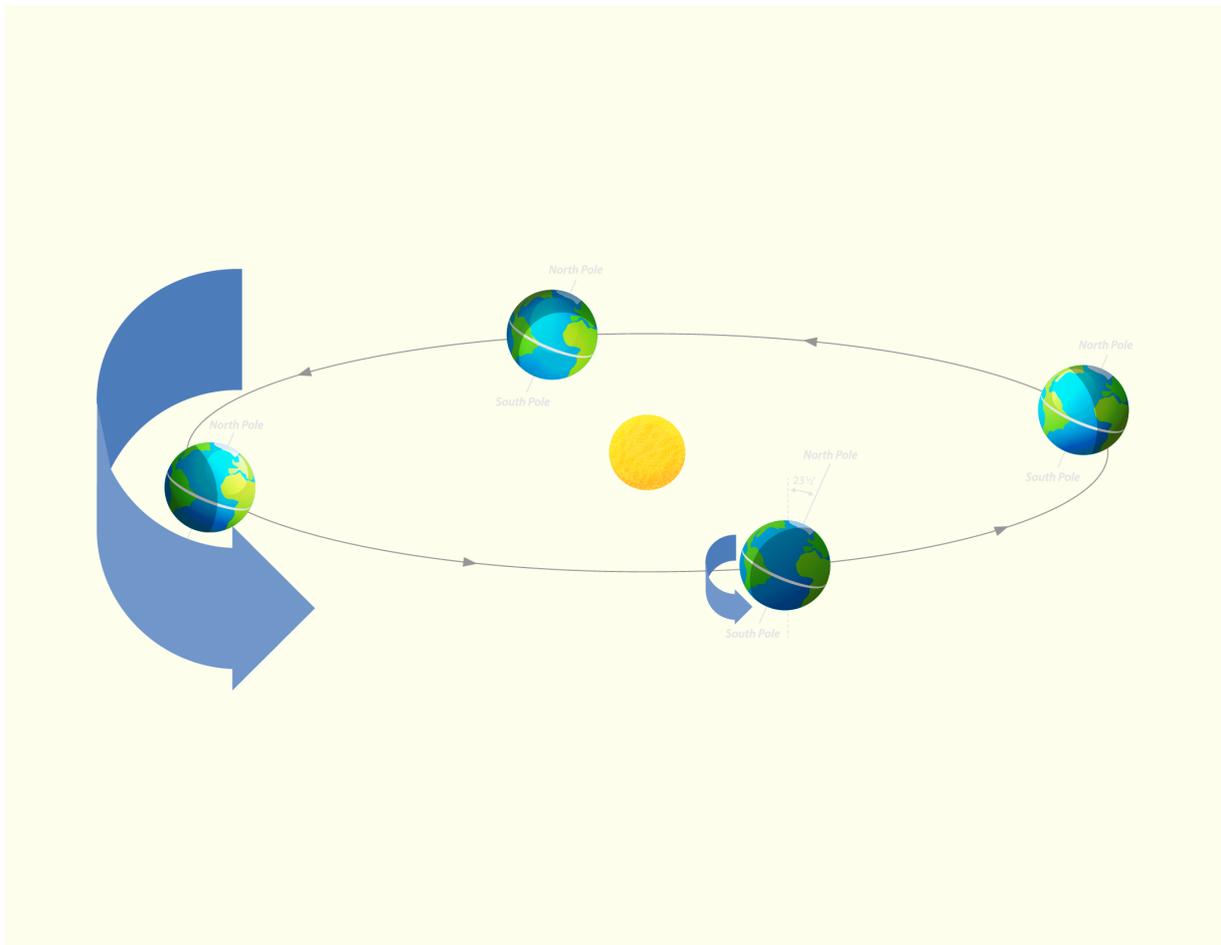
em que q_{rad} é a taxa de transferência de calor por radiação (W), ε é a emissividade do material, A é a área normal à superfície em que ocorre a radiação (m^2), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$), T_s e T_{viz} são as temperaturas (K) da superfície e da vizinhança, respectivamente.

Agora que estudamos a Primeira Lei da Termodinâmica juntamente com suas especificidades e com os diferentes conceitos associados, vamos realizar um exercício para fixarmos o conteúdo.

Movimento de rotação

Querido(a) aluno(a), você se lembra de quando descrevemos, no tópico anterior, o experimento de Joule, em que um agitador realizou trabalho de eixo sobre determinada quantidade de água, gerando um aumento na energia interna do sistema?! Pois então, imagine agora o movimento de um ventilador ou de uma roda gigante. Em sua opinião, o que esses três sistemas têm em comum? A resposta é simples: todos eles giram ao redor de um eixo fixo, não é mesmo?

O movimento de rotação descreve justamente o movimento dos objetos que giram. No entanto, esse movimento não deve ser confundido com o movimento de translação. Segundo Keller, Gettys e Skove (1997), **“um objeto rígido sofre um movimento de rotação quando cada partícula do mesmo descreve um círculo (com exceção das partículas que estão sobre o eixo de rotação)”**, enquanto que “um objeto rígido sofre um movimento de translação quando cada partícula do objeto tem o mesmo deslocamento no mesmo intervalo de tempo”. Para facilitar o entendimento desses dois conceitos, observe a Figura 2.1 2.



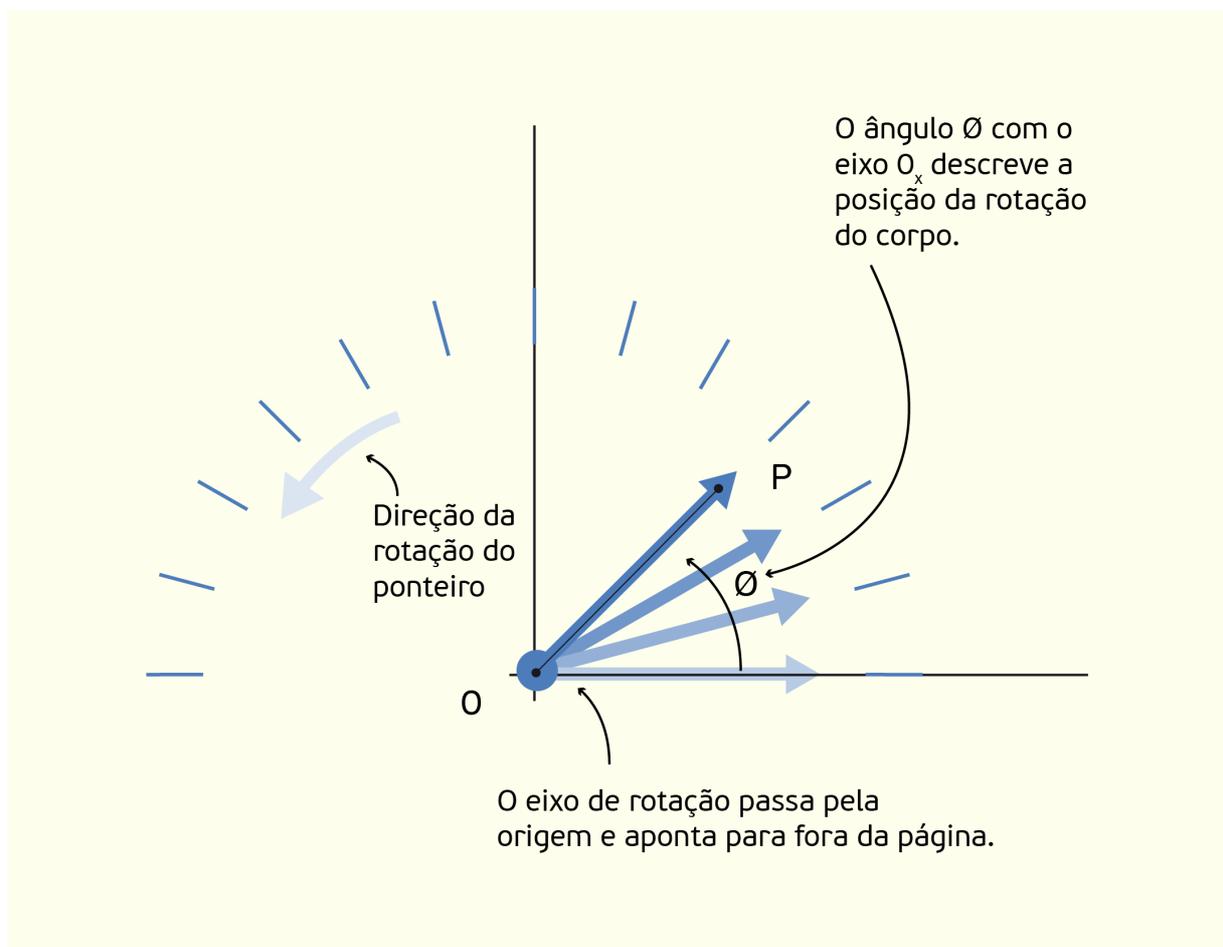
2FIGURA 12.24 - Movimento de rotação e translação da Terra FONTE: adaptada de Alekseeva, 123RF.

O movimento de translação da Terra em torno do Sol tem uma duração aproximada de 365 dias e é responsável pelas estações do ano. Já o movimento de rotação da Terra em torno do seu próprio eixo central tem uma duração de 24 horas e é responsável pelos dias e pelas noites.

Pode-se observar que, nas definições apresentadas por Keller, Gettys e Skove (1997), surgiram os termos objeto rígido e eixo de rotação. Em sua opinião, o que isso quer dizer? Assim como o gás ideal, podemos utilizar o termo corpo rígido como um modelo idealizado que desconsidera possíveis deformações em sua forma para simplificar o entendimento e os equacionamentos sobre o movimento de rotação. E eixo de rotação, segundo a definição de Young e Freedman (2008, p. 286), consiste **"em um eixo fixo que permanece em repouso em relação a algum referencial inercial e que não muda de direção em relação a esse eixo"**.

Coordenada angular

A forma mais simples para determinarmos a posição em que o sistema se encontra durante o movimento de rotação é a utilização da coordenada angular. Para encontrá-la, trace um plano xy perpendicularmente à origem do seu eixo de rotação (eixo z) de forma que o ponto zero do plano xy coincida com a origem do eixo fixo (O). Em seguida, estabeleça um ponto (P) sobre a superfície do corpo que rotaciona em volta do próprio eixo. O ângulo (θ) formado entre a linha OP em relação ao eixo Ox é sua coordenada angular, como apresentado na Figura 2.13.



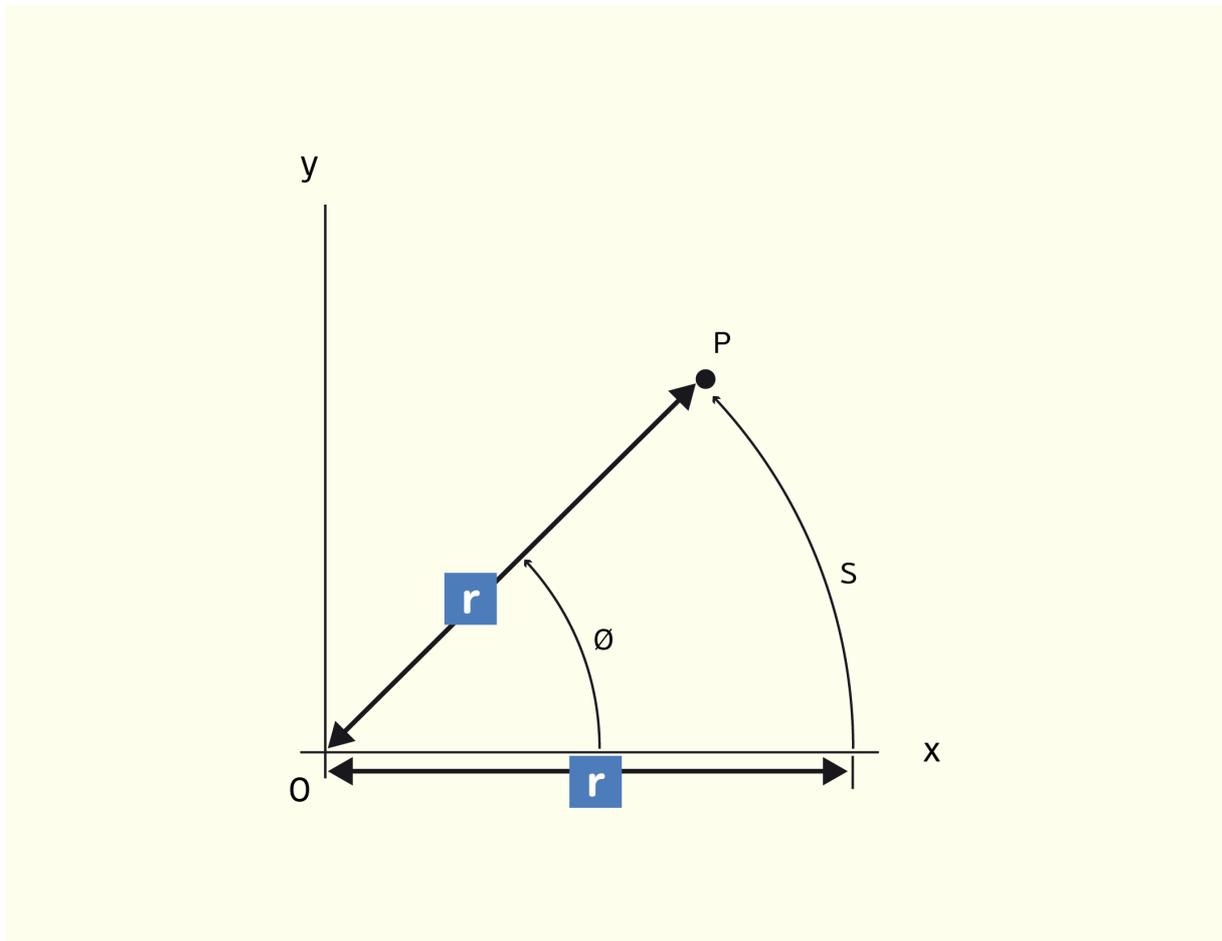
2FIGURA 13.24 - Representação da determinação da posição angular FONTE: Young e Freedman (2008, p.287).

Um detalhe importante é a convenção de sinais para o ângulo θ . Normalmente são estabelecidos valores positivos de θ para ângulos medidos no sentido anti-horário, e valores negativos de θ para os medidos no sentido horário.

Além disso, o ângulo deve ser medido em radianos e pode ser obtido pela Equação 19.

$$\theta = \frac{s}{r} \quad (19)$$

em que θ é a coordenada angular (rad), s é o comprimento do arco (m) e r é o raio da circunferência (m). Como o ângulo θ se dá função de dois comprimentos, deveria ser apresentado na forma adimensional, no entanto, é comum a utilização da unidade de radianos para diferenciá-lo dos ângulos apresentados em graus ou revoluções. A Figura 2.14 permite uma melhor compreensão da Equação 19.



2FIGURA 14.24 - Coordenada angular entre o eixo x e o segmento OP (θ), comprimento do arco (s) e raio da circunferência;
* FONTE: Keller, Gettys e Skove (1997, p. 312).

Velocidade angular

Como o objeto rígido está rotacionando, para cada instante de tempo t , ele se encontrará em uma posição e , conseqüentemente, com uma angulação θ diferente. A partir disso, é possível calcular a velocidade angular média (ω_{mz}) entre os dois instantes por meio da Equação 20.

$$\omega_{mz} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (20)$$

em que ω_{mz} é a velocidade angular média (rad s^{-1}), $\Delta\theta$ é o deslocamento angular (rad) e Δt é o intervalo de tempo (s).

A velocidade angular instantânea (ω_z) - também denominada de velocidade angular -, por sua vez, pode ser obtida pela aplicação do conceito de limite da função quando o intervalo de tempo tende a zero, como apresentado pela Equação 21.

$$\omega_z = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (21)$$

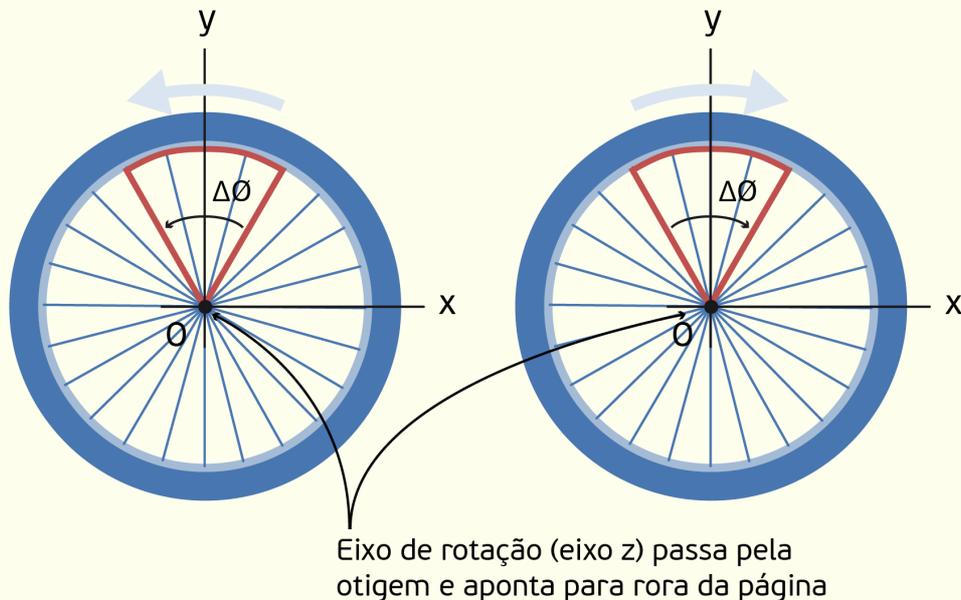
Como o sinal da velocidade angular depende da direção em que o corpo rígido gira, como pode ser observado na Figura 2.15, surgiu a denominação velocidade escalar angular (ω) que, é igual ao módulo da velocidade angular.

Rotação no sentido anti-horário positiva:

$$\Delta\theta > 0, \text{ logo}$$
$$\omega_{mz} = \Delta\theta/\Delta_t > 0$$

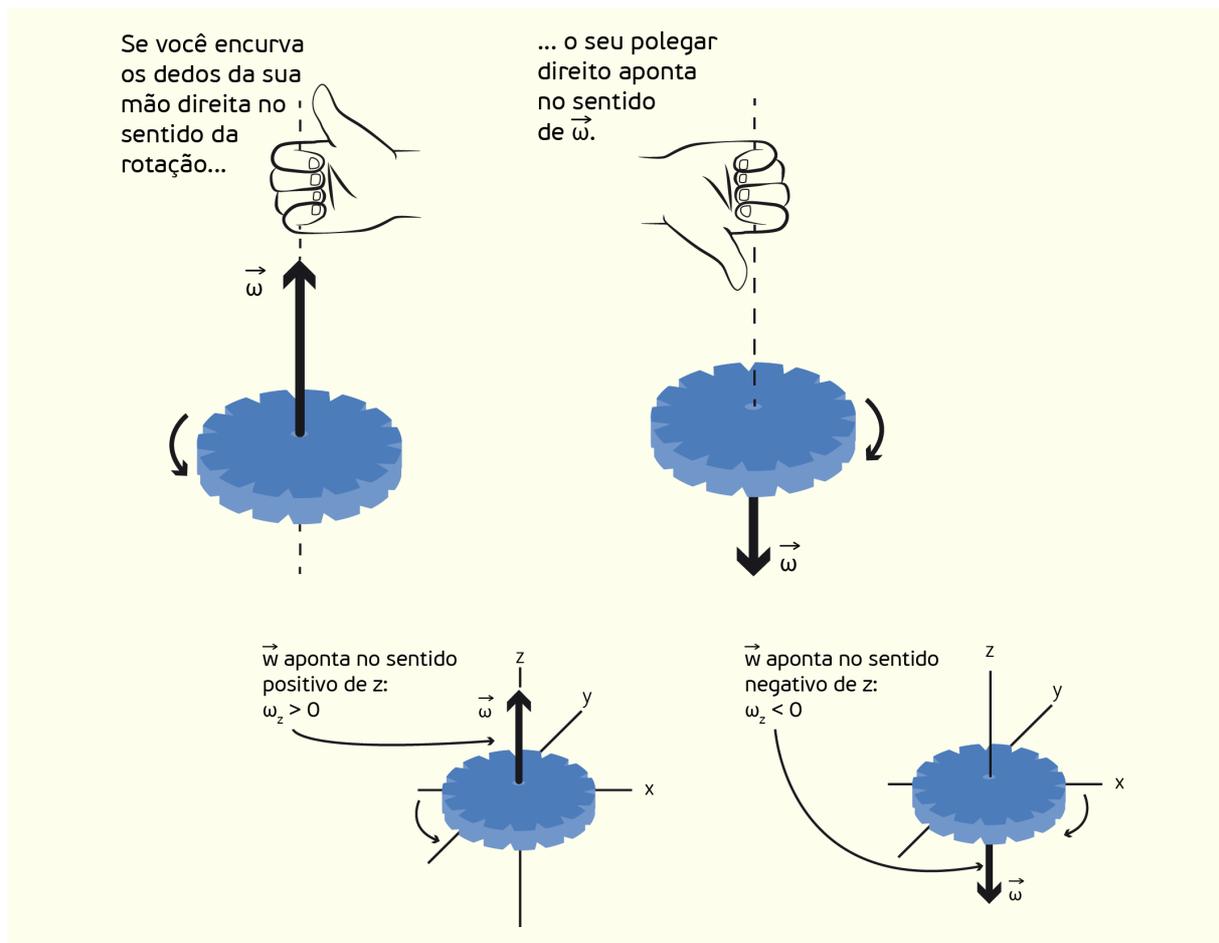
Rotação no sentido horário negativa:

$$\Delta\theta < 0, \text{ logo}$$
$$\omega_{mz} = \Delta\theta/\Delta_t < 0$$



2FIGURA 15.24 - Convenção de sinais para a velocidade angular média e a velocidade angular em função da direção em que o corpo rígido rotaciona FONTE: Young e Freedman (2008, p. 288).

Em casos em que o eixo de rotação do sistema varia, pode ser necessária a utilização do conceito de velocidade angular como um vetor (ω_{\rightarrow}) que segue a regra da mão direita como apresentado na Figura 2.16.



2FIGURA 16.24 - Regra da mão direita para estabelecer o sentido da coordenada e da velocidade angular FONTE: Young e Freedman (2008, p. 289).

Aceleração angular

Para sistemas em que existe a variação da velocidade angular, podemos determinar a aceleração angular média (\mathbf{a}_{mz}) ou instantânea (\mathbf{a}_z) pelas Equações 22 e 23, respectivamente.

$$\alpha_{mz} = \frac{\omega_{z2} - \omega_{z1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\omega_z}{\Delta t} \quad (22)$$

em que \mathbf{a}_{mz} é a aceleração angular média (rad s^{-2}), $\Delta\omega_z$ é a variação da velocidade angular (rad s^{-1}) e Δt é o intervalo de tempo considerado (s).

$$\alpha_z = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega_z}{\Delta t} = \frac{d\omega_z}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{d\theta}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (23)$$

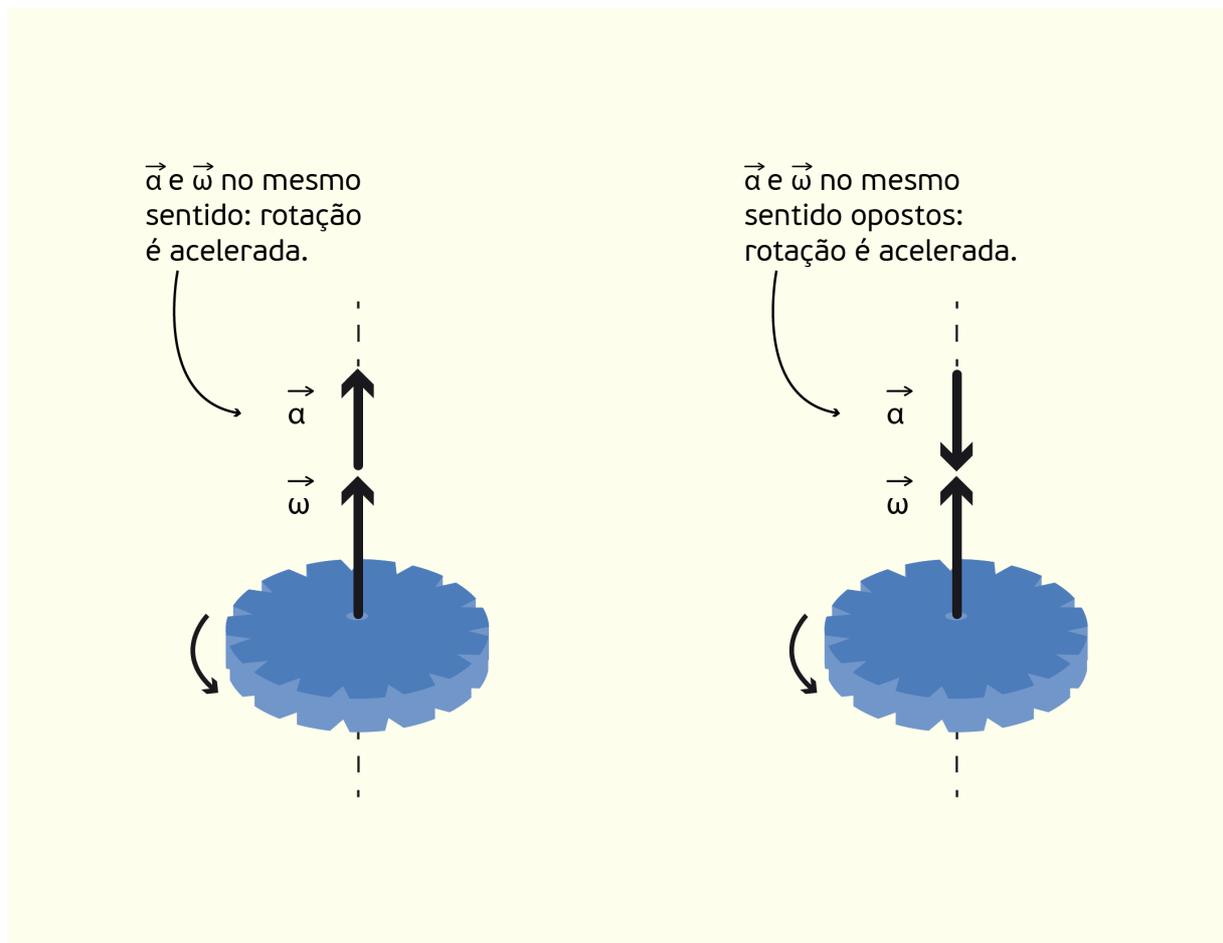
Lembre-se de que a aceleração angular instantânea também pode ser denominada de aceleração angular. Para aceleração angular positiva, ocorre um aumento da velocidade angular, enquanto que aceleração angular negativa representa uma redução da velocidade angular.

Para identificar se o movimento de rotação é acelerado ou retardado, podemos observar a Quadro 2.1.

SINAL Ω_z	SINAL A_z	MOVIMENTO
Positivo (+)	Positivo (+)	Acelerado
Negativo (-)	Negativo (-)	Acelerado
Positivo (+)	Negativo (-)	Retardado
Negativo (-)	Positivo (+)	Retardado

2FIGURA 1.1 - Determinação da classificação do movimento angular em acelerado ou retardado com base nos sinais da velocidade e da aceleração angulares FONTE: O autor.

Assim como a velocidade angular, a aceleração angular também pode ser utilizada em sua forma vetorial ($\vec{\alpha}$), como apresentado na Figura 2.17.



2FIGURA 17.24 - Velocidade angular e aceleração angular como vetores ao longo do eixo de rotação FONTE: Young e Freedman (2008, p. 289).

Em situações em que a aceleração angular for constante, podemos estabelecer as seguintes relações:

- Aceleração angular em função da velocidade angular (Equação 24):

$$\omega_z = \omega_{z0} + \alpha_z t \quad (24)$$

- Velocidade angular média em função do deslocamento (Equação 25):

$$\omega_{mz} = \frac{\omega_z - \omega_{z0}}{2} = \frac{\theta - \theta_0}{t - t_0} \quad (25)$$

- Posição em função do tempo (Equação 26):

$$\theta = \theta_0 + \omega_{z0} t + \frac{1}{2} \alpha_z t^2 \quad (26)$$

- Posição em função da velocidade angular (Equação 27):

$$\omega_z^2 = \omega_{z0}^2 + 2 \alpha_z (\theta - \theta_0) \quad (27)$$

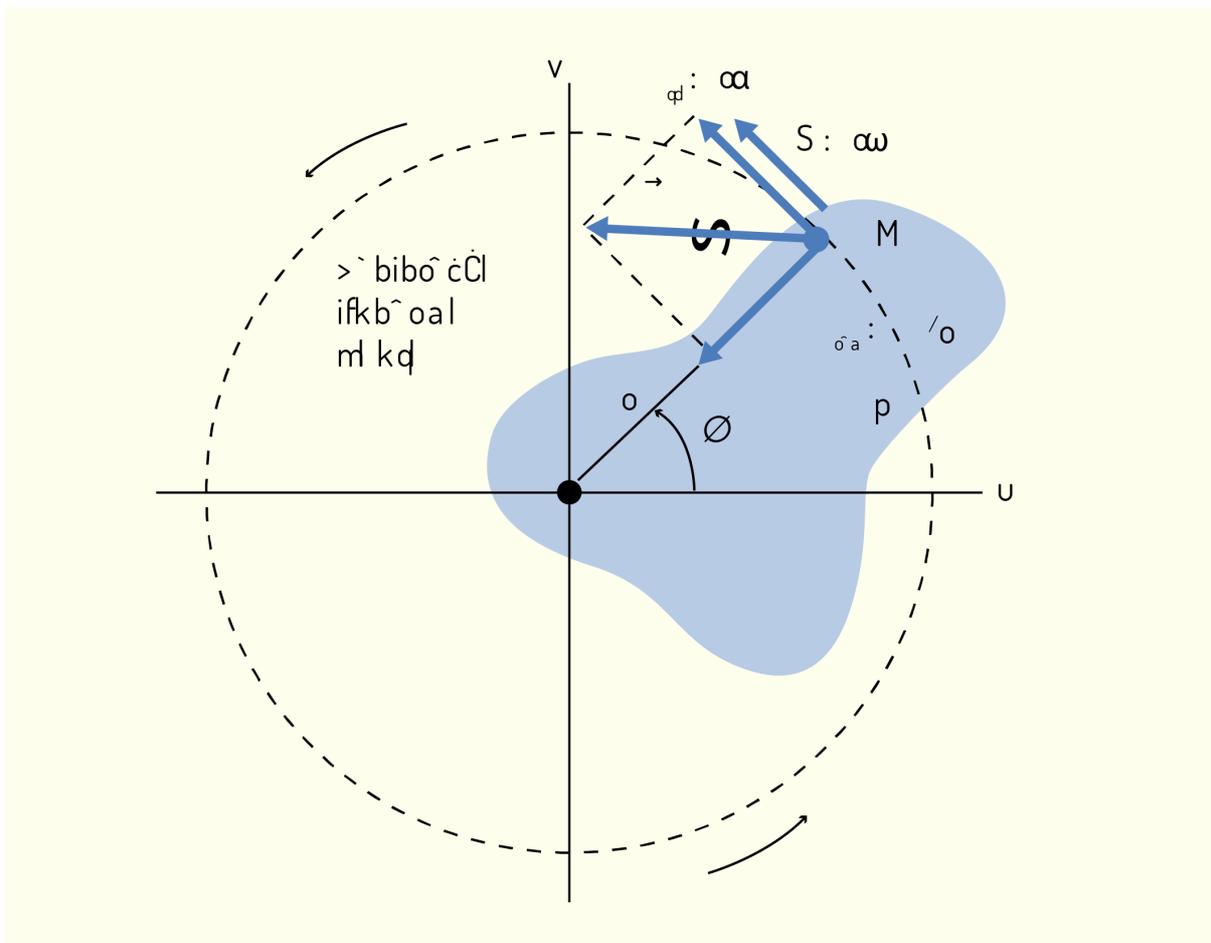
- Posição em função da velocidade angular e do tempo (Equação 28):

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{2} (\omega_{z0} + \omega_z) t \quad (28)$$

Relações entre os movimentos linear e angular

Como estudado na seção 1 desta unidade, corpos em movimento apresentam energia cinética associada ao movimento, não é mesmo?! Mas, como podemos determiná-la se a velocidade calculada em movimentos de rotação é a angular? Para resolver esse tipo de impasse, existem relações desenvolvidas para a determinação de variáveis lineares a partir das angulares.

Um exemplo de corpo rígido (P) rotacionando ao redor de um eixo de rotação fixo com suas componentes angulares e lineares pode ser observado na Figura 2.18.



2FIGURA 18.24 - Componentes de velocidade e aceleração de um corpo rígido em um movimento de rotação acelerado
 FONTE: Young e Freedman (2008, p. 293).

Como apresentado anteriormente pela Equação 19, temos que:

$$s = r \theta$$

Considerando que esse deslocamento seja avaliado em um intervalo de tempo infinitesimal (lembre-se de que o raio da circunferência é constante) e aplicando o módulo dos dois lados da Equação 19 para avaliarmos apenas a magnitude do deslocamento, teremos:

$$\left| \frac{ds}{dt} \right| = r \left| \frac{d\theta}{dt} \right|$$

em que $\left| \frac{ds}{dt} \right|$ e $\left| \frac{d\theta}{dt} \right|$ são os valores absolutos da velocidade linear (v) e da velocidade angular (ω), respectivamente. Assim, a relação entre as velocidades linear e angular é apresentada na Equação 29.

$$v = r \omega \quad (29)$$

A aceleração angular pode ser dividida nas componentes tangencial (a_{tg}) - direção de fuga da partícula do movimento de rotação - e centrípeta (a_{rad}) - direcionado para o eixo de rotação. A aceleração tangencial pode ser obtida através da derivação da Equação 29:

$$\frac{dv}{dt} = r \frac{d\omega}{dt}$$

em que dv/dt e $d\omega/dt$ correspondem às acelerações linear e angular escalares, respectivamente. Assim, por meio da Equação 30, temos que:

$$a_{tg} = r \alpha \quad (30)$$

A componente centrípeta da aceleração, por sua vez, pode ser determinada pela Equação 31.

$$a_{rad} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 r \quad (31)$$

Portanto, a aceleração linear (a^{\rightarrow}) e o módulo do vetor aceleração (a) de um corpo rígido podem ser obtidos através das Equações 32 e 33, respectivamente.

$$a^{\rightarrow} = a_{tg} + a_{rad} \quad (32)$$

$$a = \sqrt{a_{tg}^2 + a_{rad}^2} \quad (33)$$

Momento de inércia

Querido(a) aluno(a), que tal iniciarmos esta discussão partindo do significado do termo “momento de inércia” ou “inércia rotacional”, como também pode ser chamado? Como visto anteriormente, inércia está relacionada à condição em que um corpo tende a permanecer caso não haja nenhuma força resultante atuando sobre ele, ou seja, caso esteja em repouso, tende a permanecer em repouso e, se estiver se movendo com uma velocidade constante, não irá acelerar e nem parar. Assim, podemos supor que o “momento de inércia” deve estar relacionado com a tendência de um corpo permanecer com uma velocidade constante de rotação, não é mesmo? É exatamente esse o caminho. Segundo Keller, Gettys e Skove (1997, p. 321) o **“momento de inércia de um objeto em relação a um eixo é a propriedade do objeto que o faz resistir a uma variação em sua velocidade vetorial angular em relação àquele eixo”**.

Como um corpo rígido rotacionando é formado por diversas partículas com diferentes massas, velocidades lineares e distribuídas em diferentes posições em relação ao eixo de rotação (diferentes valores de r), podemos dizer que a energia cinética total do corpo pode ser determinada pela Equação 34:

$$E_C = \frac{1}{2} \sum m_i v_i^2 = \frac{1}{2} (\sum m_i r_i^2) \omega^2 \quad (34)$$

em que o subíndice i está relacionado com o número de partículas que formam o corpo rígido. É fundamental observar que a velocidade angular de todas as partículas é a mesma, por se tratar de um corpo rígido.

Logo, como o momento de inércia é uma resistência à variação da velocidade angular, ela pode ser calculada por meio da Equação 35.

$$I = \sum m_i r_i^2 \quad (35)$$

em que I é o momento de inércia (kg m^2), sendo uma função da massa (m_i) e de como essa massa está distribuída no corpo rígido (r_i).

Assim, temos que a energia cinética de rotação pode ser calculada pela Equação 36:

$$E_{cr} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (36)$$

em que E_{cr} é a energia cinética de rotação (J), I é o momento de inércia (kg m^2) e ω é a velocidade angular (rad s^{-1}).

Para corpos rígidos que apresentam uma distribuição contínua de sua massa - por exemplo, sólidos maciços -, a Equação 36 pode ser reescrita na seguinte forma:

$$I = \int r^2 dm$$

em que dm representa um elemento infinitesimal de massa do sólido. Ao considerar que a massa específica do material (ρ) é uniforme e lembrando que $\rho = dm/dV$, podemos determinar o momento de inércia para sólidos contínuos através da Equação 37.

$$I = \rho \int r^2 dV \quad (37)$$

Teorema dos eixos paralelos

O teorema dos eixos paralelos relaciona dois momentos de inércia: o primeiro em relação a um eixo de rotação que passa através de um ponto arbitrário (I_P) e o outro (I_{cm}) em relação ao eixo - paralelo ao primeiro - que passa através do centro de massa do corpo rígido. Essa relação pode ser expressa matematicamente pela Equação 38.

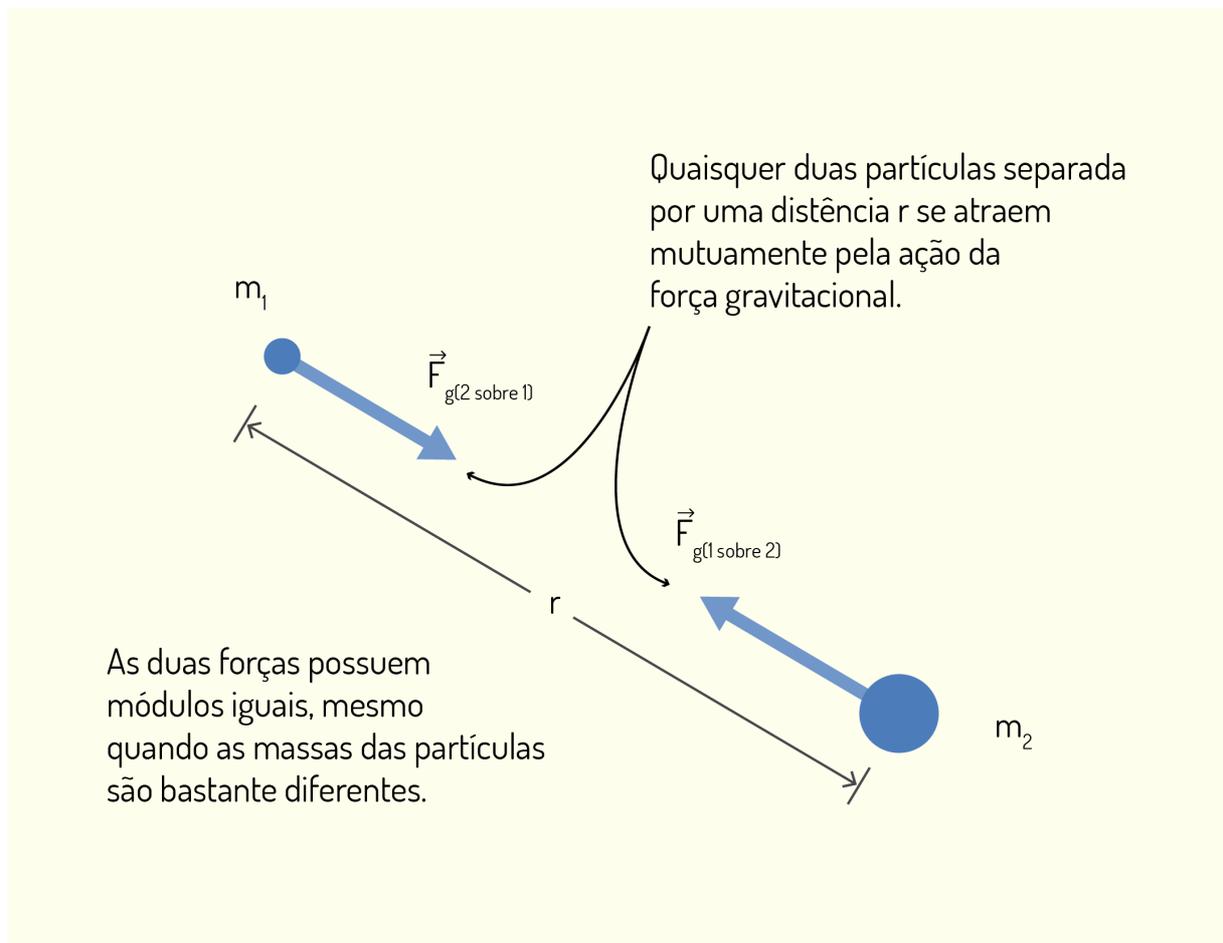
$$I_P = I_{cm} + M d^2 \quad (38)$$

em que M é a massa do corpo rígido (kg) e d é a distância entre os eixos de rotação paralelos considerados (arbitrário e do centro de massa).

Sua cabeça parece estar girando com tantas informações sobre o movimento de rotação? Então, que tal um exercício para confirmarmos o entendimento do conteúdo?!

Gravitação Universal

Como citado no tópico anterior, a Terra apresenta movimento de translação ao redor do Sol, assim como Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, que também compõem o sistema solar, juntamente com suas luas, cometas e demais corpos celestes. Mas você consegue imaginar por que o Sol se mantém no centro do sistema e os demais corpos se movimentam ao redor dele? Isso pode ser explicado pela lei da gravitação universal de Newton, que afirma que **"cada partícula (m_1) do universo atrai qualquer outra partícula (m_2) com uma força diretamente proporcional ao produto das respectivas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância (r) entre as partículas"** (YOUNG; FREEDMAN, 2008, p. 1), e que pode ser visualizada na Figura 2.19 e escrita matematicamente como apresentado na Equação 39.



2FIGURA 19.24 - Lei de Newton da gravitação entre duas partículas FONTE: Young e Freedman (2008, p.2).

$$F_g = \frac{G m_1 m_2}{r^2} \quad (39)$$

em que F_g é a força da gravidade em módulo (N), G é a constante gravitacional ($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$), m é a massa de cada partícula (kg) e r é a distância (m) entre as partículas consideradas.

Por se tratar de forças de ação e reação, a força que a partícula 1 exerce sobre a partícula 2 é igual, em módulo, à força que a partícula 2 exerce sobre a 1. No entanto, pelo fato de as partículas se atraírem, as forças apresentam sentidos opostos.

Princípio da superposição

Como um sistema é normalmente composto por várias partículas, para a determinação da força gravitacional, pode-se escolher uma das partículas e utilizar o princípio da superposição, que calcula a força resultante das forças de atração entre as partículas que compõem o sistema pela Equação 40.

$$F_{1,res}^{\rightarrow} = \sum_{i=2}^n F_{1,i}^{\rightarrow} \quad (40)$$

em que $F_{1,res}^{\rightarrow}$ é a força gravitacional resultante sobre a partícula 1 (N) exercida pelas demais partículas do sistema.

Um exemplo conhecido de força resultante é a força peso (P), que pode ser definida como "**a força gravitacional resultante exercida por todos os corpos do universo sobre o corpo**" (YOUNG; FREEDMAN, 2008, p. 5). Nos casos em que a massa pontual encontra-se na superfície de um planeta ou muito próximo a ela, a influência da força gravitacional desse planeta será muito superior às demais forças gravitacionais oriundas dos demais corpos, estas, portanto, podem ser desprezadas. Nesse sentido, o peso (P) de um corpo na superfície da Terra pode ser expresso pela Equação 41.

$$P = F_g = \frac{G m_T m}{R_T^2} \quad (41)$$

em que P é a força peso (N), m_T é a massa da Terra (kg), m é a massa do corpo presente na superfície terrestre (kg) e R_T é o raio da Terra (m). Substituindo $P = m g$ (segunda Lei de Newton), podemos determinar uma expressão para a aceleração da gravidade (g) através da Equação 42.

$$g = \frac{G m_T}{R_T^2} \quad (42)$$

Nesse sentido, a força peso e a lei da gravitação (Equação 39), aplicadas para a Terra (m_T) em relação à uma partícula (m) esférica presente em seu exterior a uma distância r (m) entre o centro da Terra e o centro da partícula, podem ser calculadas pela Equação 43:

$$P = F_g = \frac{G m_T m}{r^2} \quad (43)$$

em que r é a distância entre o corpo considerado e o centro da Terra (m).

Apesar de a força da gravidade ser considerada constante no planeta Terra (aproximadamente $9,81 \text{ m s}^{-2}$), existem pequenas variações dependendo da localidade do indivíduo no globo como pode ser observado na Tabela 2.2.

LOCAL	LATITUDE NORTE	ALTITUDE (M)	G (M S ⁻²)
Jamaica	18°	0	9,78591
Bermuda	32°	0	9,79806
Denver, Co	40°	1638	9,79609
Groelândia	70°	0	9,82534

2QUADRO 2.2 - Aceleração da gravidade para diferentes localidades da Terra FONTE: Young e Freedman (2008, p. 21).

Isso acontece porque a Terra apresenta o movimento de rotação em torno de seu eixo, o que faz com que os corpos rotacionem juntamente com a superfície e assim não permaneçam em equilíbrio. Por isso, podemos dividir o conceito de força peso em: peso real e peso aparente.

O peso real (P) é definido como a força gravitacional que um planeta exerce sobre um corpo e que está demonstrado matematicamente pelas Equações 41 e 43 para os casos em que o corpo encontra-se na superfície ou em um ponto próximo à superfície, respectivamente. O peso aparente (P_{ap}), por sua vez, considera a velocidade que o corpo apresenta em função da sua rotação, o que altera a sua força resultante como apresentado através da Equação 44.

$$P_{ap} = P - m (\omega^2 R_T) \quad (44)$$

em que P_{ap} e P são as forças peso aparente e real, respectivamente, m é a massa do corpo, ω é a velocidade angular e R_T é o raio da Terra. Ou seja, a aceleração centrípeta dirigida para o centro da Terra reduz a força gravitacional aplicada sobre o corpo.

Nesse sentido, a aceleração em queda livre de um corpo considerando a rotação é expressa pela Equação 45.

$$g_{ap} = g - \omega^2 R_T \quad (45)$$

em que g_{ap} é a aceleração em queda livre de um corpo, g é a aceleração da gravidade e $\omega^2 R_T$ é a aceleração centrípeta.

Apesar da possibilidade de determinação do peso aparente e da aceleração para os corpos não inerciais de acordo com a sua localidade na Terra, usualmente desconsidera-se essa variação em relação ao referencial inercial pelo fato de a diferença máxima entre g e g_{ap} ser de $0,0339 \text{ m s}^{-2}$.

Apesar de a força gravitacional exercer uma atração entre pares de partículas, é possível "romper essa força" de forma a retirar um corpo da órbita de um planeta, por exemplo. Para isso, é necessário que a partícula atinja a velocidade de escape (v_e), que consiste na velocidade mínima para que um corpo celeste deixe de sofrer a influência da força gravitacional de um astro esférico de massa M e raio R . Essa velocidade é determinada pela Equação 46.

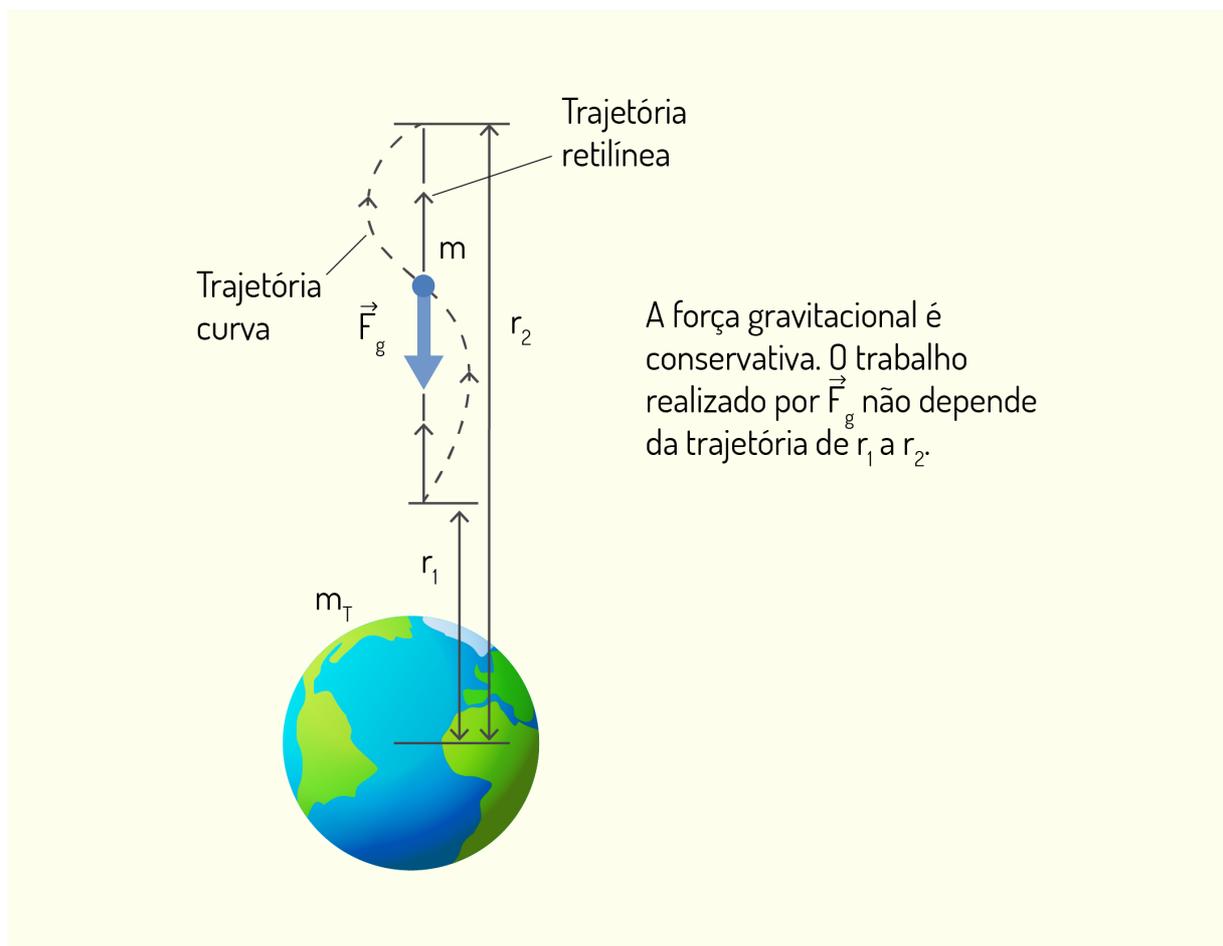
$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (46)$$

Energia potencial gravitacional

Na seção "Classificação das energias" desta unidade, foi determinada a energia potencial gravitacional (E_p), que considera constante a força da gravidade sobre um corpo, devido à variação de r ser desprezível. Isso ocorre porque o raio de um planeta (Terra $\approx 6300 \text{ km}$) é muito maior que qualquer posição em que o corpo se encontre em relação à sua superfície,

ou seja, independentemente do referencial, possivelmente essa distância será infinitamente menor que a distância até o centro do planeta em questão, e por isso poderia ser desprezada e a força ser considerada constante. Por exemplo, a força gravitacional entre o centro da Terra e uma pessoa no nível do mar pode ser considerada a mesma que entre o centro da Terra e a mesma pessoa no pico de uma montanha. Apesar de existir uma energia potencial associada ao movimento desse indivíduo ao subir a montanha, a força entre ele e a Terra pode ser considerada constante, já que um acréscimo de 10000 m não irá influenciar significativamente a distância entre os corpos considerados.

No entanto, quando se trata de sistemas com grandes quantidades de massa como os planetas e estrelas, a variação de distância entre eles não pode ser desprezada. Por isso, o trabalho associado à força gravitacional quando um corpo se desloca em linha reta - entre os pontos 1 e 2 - em relação ao centro da Terra, como apresentado na Figura 2.20, pode ser calculado pela Equação 47.



2FIGURA 20.24 - Trabalho realizado pela força gravitacional quando um corpo se aproxima ou se distancia em relação ao centro da Terra FONTE: Young e Freedman (2008, p. 8).

$$W_{grav} = \int_{r_1}^{r_2} F_g dr \quad (47)$$

Substituindo a Equação (43) na (47) e sabendo que a força gravitacional realiza um trabalho sobre a Terra (sinal negativo), obtemos a seguinte relação apresentada pela Equação 48:

$$W_{grav} = -G m_T m \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{G m_T m}{r_2} - \frac{G m_T m}{r_1} \quad (48)$$

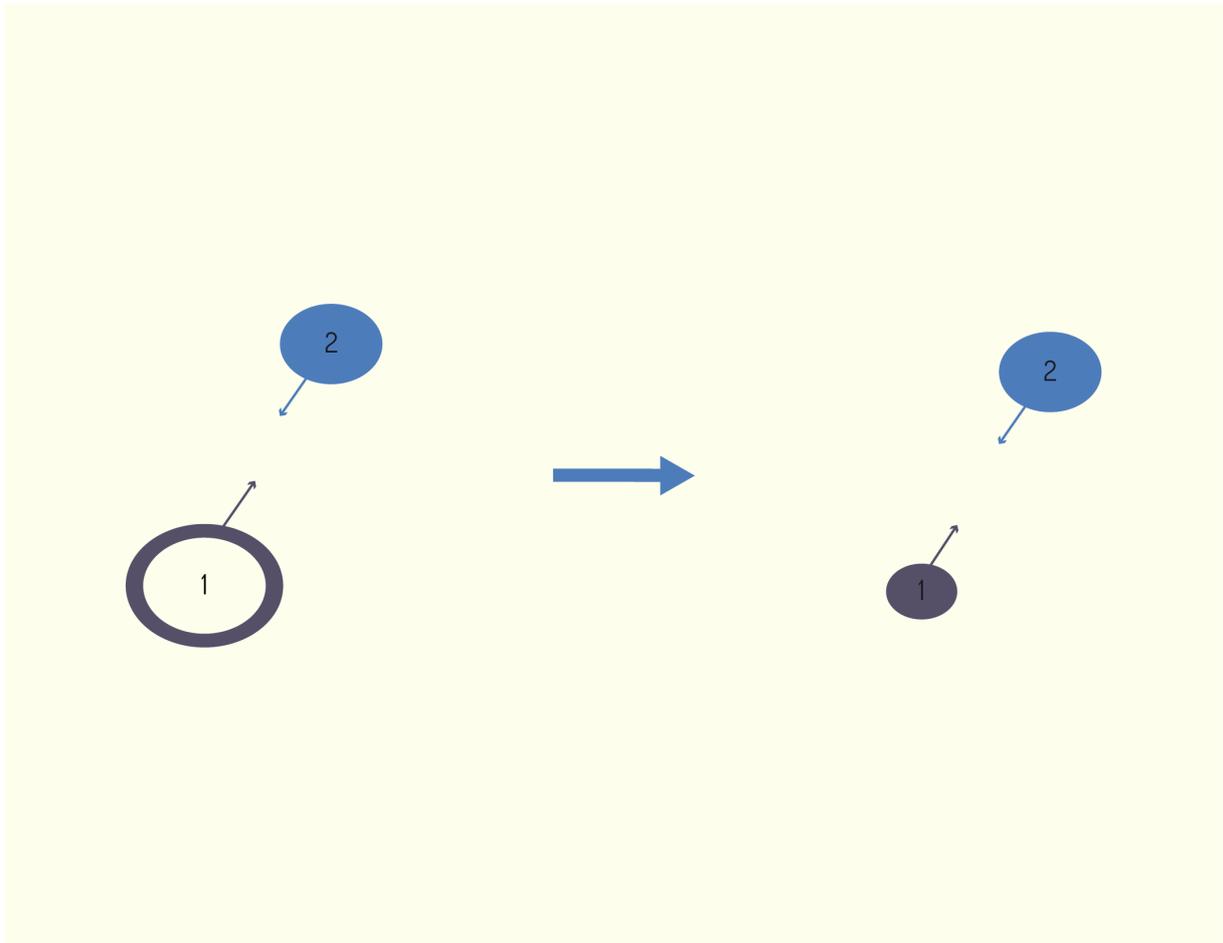
A energia potencial gravitacional (E_{Pg}) pode ser calculada matematicamente pela Equação 49:

$$E_{Pg} = - \frac{G m_T m}{r} \quad (49)$$

Assim, podemos reescrever a Equação (48) como (Equação 50):

$$W_{grav} = E_{Pg1} - E_{Pg2} = \Delta E_{Pg} \quad (50)$$

Para sistemas não contínuos, como, por exemplo, uma casca esférica, Newton desenvolveu o "teorema das cascas", que afirma que a força gravitacional que essa partícula exerce sobre outra presente em seu exterior corresponde a de uma partícula com a mesma massa da casca, mas concentrada no seu centro, como representado na Figura 2.21.



2FIGURA 21.24 - Teorema das cascas de Newton. FONTE: Elaborada pelos autores.

Nesse caso, para uma partícula pontual de massa m no exterior de uma casca esférica de massa M , separadas por uma distância r , podemos determinar a energia potencial gravitacional por meio da Equação 51.

$$E_{Pg} = - \frac{G M m}{r} \quad (51)$$

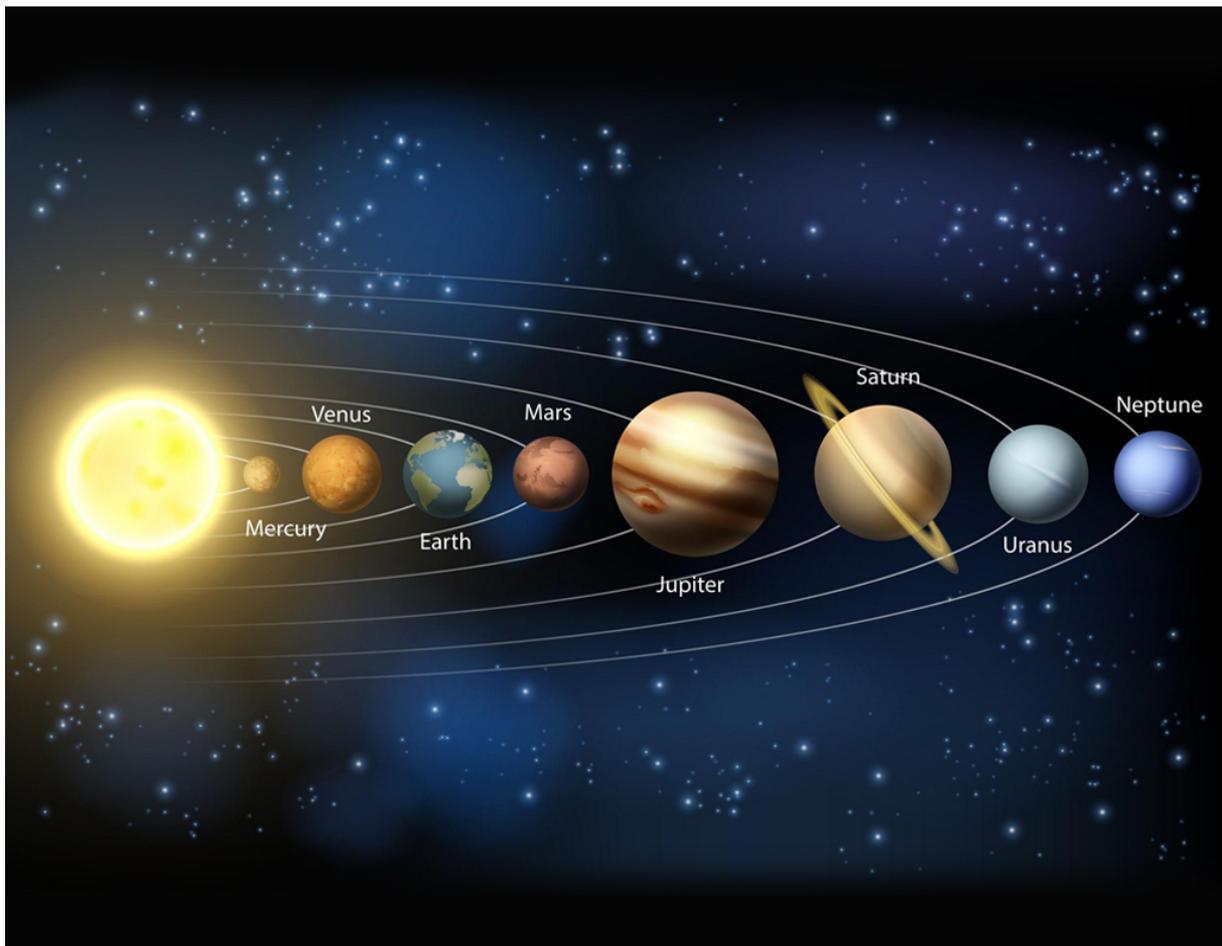
Para sistemas em que a massa pontual encontra-se no interior da casca esférica, por sua vez, temos que (Equação 52):

$$E_{Pg} = - \frac{G M m}{R} \quad (52)$$

em que M é a massa da casca esférica (kg), m é a massa pontual da partícula (kg) e R é o raio (m) do sistema esférico oco. Ou seja, nos casos em que a partícula encontra-se no interior do sistema descontínuo, a energia potencial gravitacional depende apenas do raio da casca esférica.

Leis de Kepler

Assim como apresentado no início do estudo sobre gravitação universal, o sistema solar é composto por diversos planetas que realizam a translação ao redor do Sol, como é apresentado na Figura 2.22.



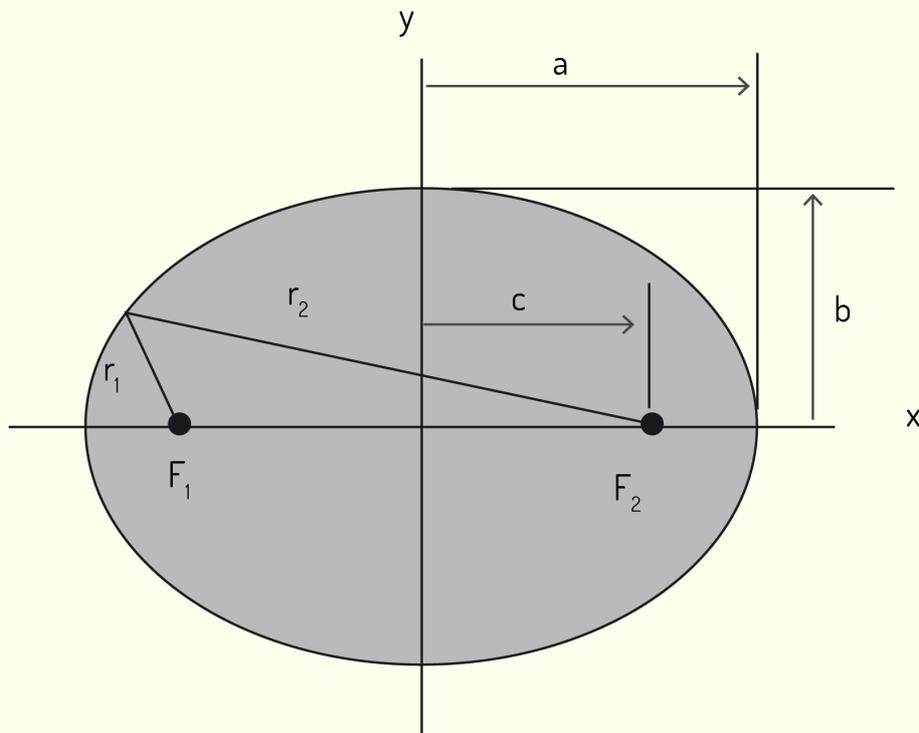
2FIGURA 22.24 - Sistema solar FONTE: Georghiou, 123RF.

Como a força gravitacional depende das massas e da distância entre os planetas, conclui-se que o Sol exerce uma força de atração diferente para cada um deles e, conseqüentemente, a aceleração da gravidade também varia. Isso justifica a necessidade de instituições como a NASA submeterem os astronautas a testes em diferentes gravidades antes de serem enviados a expedições além da órbita terrestre, pois é fundamental que o astronauta se adapte às atividades cotidianas sob outra condição. Além disso, a determinação da força gravitacional é essencial, pois, dependendo da magnitude dessa força, o corpo do astronauta poderia ser esmagado ou então flutuar sobre o solo de outros planetas.

Os estudos sobre os movimentos dos planetas datam de períodos anteriores ao século XVI. Um dos maiores avanços na área da astronomia ocorreu, no entanto, entre os séculos XVI e XVII, quando a Terra foi definida como um planeta, afirmou-se que todos os planetas realizavam órbitas ao redor do Sol e que era possível determinar suas órbitas com base nos movimentos aparentes observados a partir da superfície terrestre.

A princípio, acreditava-se que essas órbitas eram circulares, mas, entre 1601-1619, Johannes Kepler - baseado em observações - apresentou três afirmações a respeito do movimento dos planetas que foram denominadas de Leis de Kepler e que foram deduzidas mais tarde por Newton.

A primeira Lei de Kepler afirma que os planetas realizam um movimento de translação ao redor do Sol descrito por uma órbita elíptica com o Sol posicionado em um dos seus focos. A geometria e as componentes de uma elipse podem ser observadas na Figura 2.23.



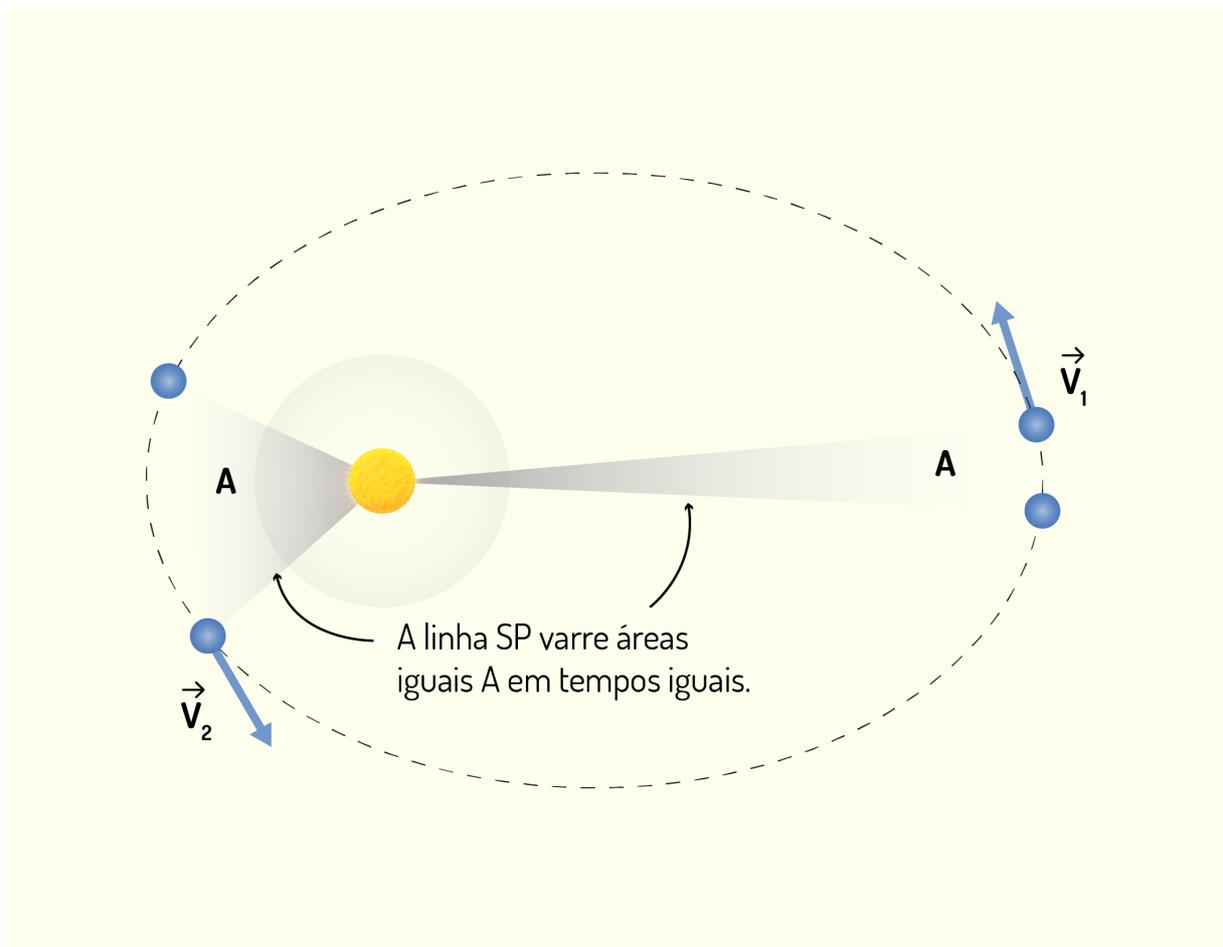
2FIGURA 23.24 - Elipse com suas componentes FONTE: Serway e Jewett Jr. (2011, p. 373).

Para se determinar uma elipse, você deve definir dois pontos (F_1 e F_2) que compreenderam seus focos e que devem estar posicionados a uma distância c do centro da elipse. Em seguida, para que um ponto (P) faça parte da elipse, a soma das distâncias (r_1 e r_2) entre o ponto e os focos (F_1 e F_2) deve ser constante, ou seja, $r_1 + r_2 = \text{constante}$. A elipse também é composta pelo eixo maior ($2a$) e pelo eixo menor ($2b$) e tem como característica respeitar a seguinte relação $a^2 = b^2 + c^2$. Além disso, o que define a forma da elipse é a excentricidade (e), que pode ser calculada por $e = c/a$.

Nesse sentido, temos que o Sol está posicionado em um dos focos das órbitas elípticas dos planetas, enquanto que, no outro foco, nada está presente. Assim, durante a translação dos planetas, existem dois pontos principais durante a órbita: afélio e periélio. O afélio compreende o ponto em que o planeta encontra-se mais afastado do Sol ($a+c$), e uma das

consequências que sentimos na Terra por isso é o inverno. Já o periélio ocorre quando o planeta está no ponto mais próximo do Sol (a-c), período que caracteriza o verão na superfície terrestre.

A segunda Lei de Kepler, por sua vez, afirma que a reta traçada entre o Sol e qualquer planeta percorre áreas iguais em intervalos de tempos iguais independentemente do ponto da trajetória em que se encontra, como apresentado na Figura 2.24.



2FIGURA 24.24 - Áreas iguais são varridas em tempos iguais pela linha que liga o Sol ao planeta FONTE: Young e Freedman (2008, p. 15).

Isso pode ser explicado porque a força gravitacional é denominada de força central, isto é, age ao longo da reta que liga a partícula (planeta) a um ponto fixo (Sol) e apresenta como consequência a conservação do momento angular constante.

Já a terceira Lei de Kepler afirma que o período orbital ao quadrado é proporcional à metade do eixo maior elevado ao cubo para qualquer planeta. Para planetas que descrevem a órbita em torno do Sol, a terceira Lei de Kepler pode ser escrita matematicamente pela Equação 53.

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM_s} \right) a^3 \quad (53)$$

em que T é o período que o planeta demora para completar sua órbita ao redor do Sol, a é a metade do comprimento do eixo maior da elipse, G é a constante gravitacional e M_s é a massa do Sol.

Buraco negro

Um conceito importante na astronomia e na física moderna é o denominado "buraco negro". Segundo Serway e Jewett Jr. (2011, p. 381) "**buracos negros são os remanescentes de estrelas que se contraíram devido às próprias forças gravitacionais**". Por isso, apresentam como característica uma força gravitacional excessiva em relação aos demais corpos e, assim, são capazes de aprisionar naves espaciais, estrelas e outros corpos celestes. Além disso, não são capazes de emitir luz própria, pois toda a luz é atraída para o seu interior. Isso ocorre, porque a velocidade de escape (Equação 46) para os buracos negros são superiores à velocidade da luz. O raio, cuja velocidade de escape é igual a velocidade da luz, é denominado de raio de Schwarzschild, e a região próxima a ele é denominada de horizonte de eventos, pois delimita a região entre o aprisionamento no corpo negro e a possibilidade de escape.

Depois dessa viagem ao conhecimento do universo e suas especificidades físicas, que tal resolvermos um exercício com o objetivo de fixar melhor o conteúdo?!

Reflita

Depois do estudo sobre energia, algumas questões rotineiras devem ser entendidas de acordo com os conceitos físicos. Que tal pensarmos em algo comum que acontece no nosso corpo nesse sentido então?! Vamos ao reflita!

Querido(a) aluno(a), você saberia explicar fisicamente um dos motivos principais pelo qual os nossos pêlos corporais arrepiam quando você sente frio?

Fique por dentro

Além da utilização da física para o entendimento de conceitos diários, temos que a cada dia surgem novas descobertas que ampliam os limites do conhecimento da humanidade. Vamos, então, aproveitar para nos atualizarmos no Fique por Dentro!

Alguns conceitos relativos ao buraco negro podem ser colocados em dúvida com a observação do nascimento de estrelas a partir de um buraco negro, o que foi observado por cientistas britânicos e publicado na revista científica Nature, como divulgado no site da revista Galileu no dia 28 de março de 2017, na seguinte reportagem: >.

<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>

<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>

<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>



Indicação de leitura

Nome do livro: Física para cientistas e engenheiros

Editora: LTC

Autor: TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene

ISBN: 978-85-216-1710-5

Um livro que apresenta de forma didática os conceitos estudados no capítulo com diversos exemplos práticos que incluem situações do dia-a-dia, checagens conceituais para que o aluno possa verificar o entendimento do conteúdo abordado e destaque para confusões comuns que ocorrem entre a teoria e a prática.

<<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>>

<<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>>

<<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>>

UNIDADE III

Propriedades da Matéria

Paula Gimenez de Souza

Luís Guilherme Gimenez de Souza

Caro(a) aluno(a), como estudado na unidade de Leis de Conservação, existem as energias interna e externa relacionadas com a massa de um sistema e que podem ser trocadas com a vizinhança através do calor e do trabalho. Seguindo esse raciocínio temos, como conceito geral, que a massa é a quantidade de matéria de um sistema ou objeto. Mas, como você caracterizaria a matéria? Nesta unidade, iremos revisar e aprofundar os conceitos que envolvem a matéria em termos de composição e de propriedades, e como ela se relaciona com a termodinâmica. A utilização da água neste estudo será recorrente devido à facilidade de encontrá-la nos três estados físicos principais.

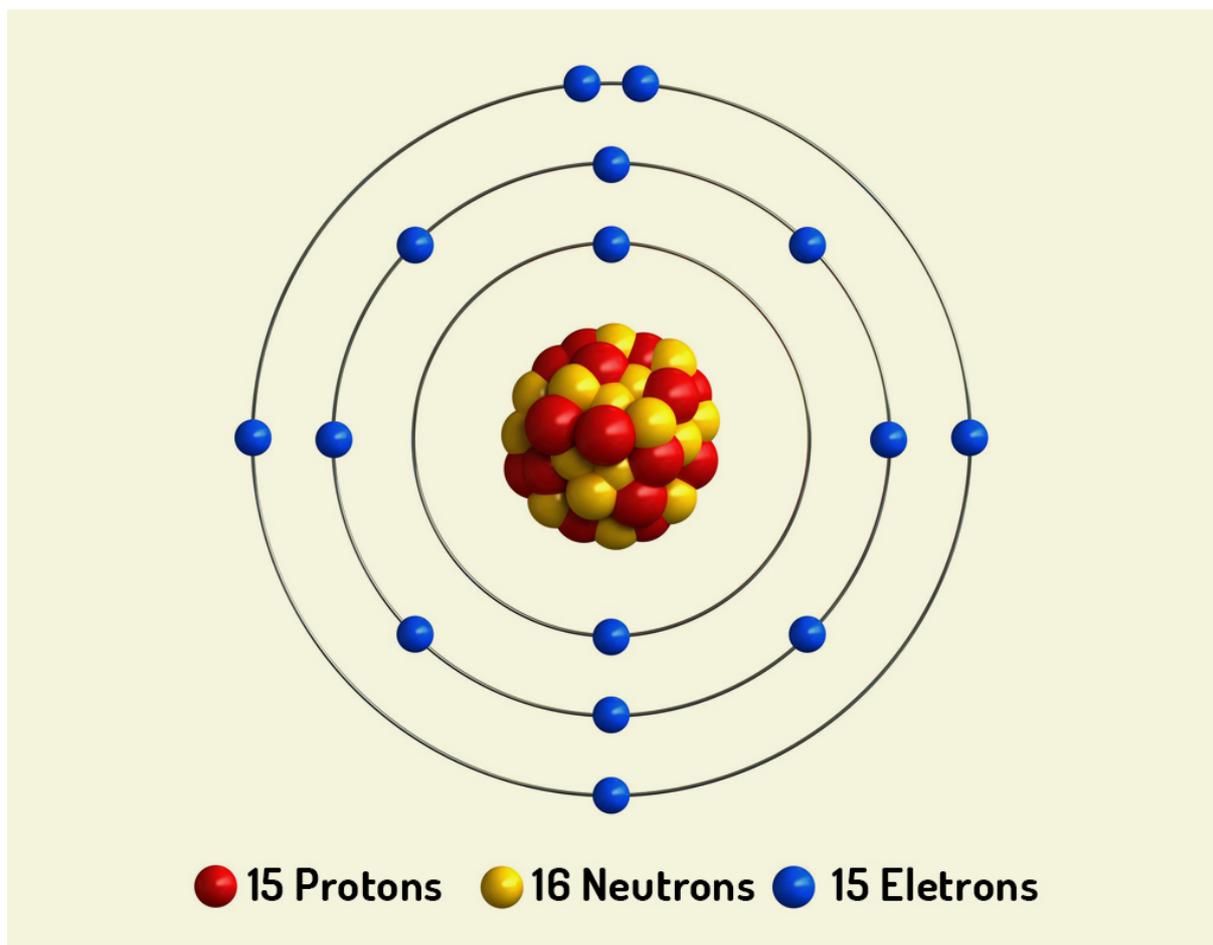
A natureza atômica da matéria

Conceitualmente, a matéria é definida como tudo aquilo que possui massa e que ocupa um lugar no espaço, ou seja, que apresenta existência física. Pode ser formada por átomos, moléculas, elementos e/ou compostos formando as substâncias ou misturas que podem ser encontradas nos diferentes estados físicos da matéria: sólido, líquido, gás e plasma.

Para dar início ao conteúdo, vamos relembrar os conceitos de química do ensino médio.

Estrutura atômica

Conforme Russel (1994, p. 52), os átomos são "**partículas submicroscópicas que compõem a matéria**" e podem ser definidos pela teoria atômica como a "**unidade básica e fundamental de um elemento que pode participar de uma combinação química**" (CHANG, 2006, p. 30), respectivamente. São formados pelas seguintes partículas subatômicas: elétrons (carga negativa), prótons (carga positiva) e nêutrons (eletricamente neutros), distribuídos como apresentado esquematicamente na Figura 3.1.



3FIGURA 1.24 - Representação da localização dos prótons, nêutrons e elétrons em um átomo FONTE: Marinov, 123RF.

Como pode ser observado (Figura 3.1), os prótons e nêutrons encontram-se concentrados no núcleo, enquanto que os elétrons encontram-se dispersos ao redor em orbitais atômicos com diferentes níveis de energia. O elétron apresenta uma massa de $9,10939 \cdot 10^{-28}$ g, enquanto que o próton e o nêutron apresentam valores de massa de $1,67262 \cdot 10^{-24}$ g e de $1,67493 \cdot 10^{-24}$ g, respectivamente, assim, pode-se afirmar que praticamente toda a massa do átomo está concentrada no seu núcleo. Por isso, o número de massa de um átomo (A) representa a soma dos prótons e nêutrons, enquanto que o número atômico (Z) consiste no número de prótons presentes.

Sendo assim, um átomo de um elemento (X) pode ser representado da seguinte forma:



em que A é o número de massa, e Z é o número atômico.

Os átomos que formam um elemento químico podem apresentar diferentes números de massa, no entanto sempre apresentam o mesmo número atômico e por isso são denominados de isótopos. Logo, o que caracteriza um átomo é seu número de prótons. Por exemplo, o oxigênio possui três isótopos 1_8O , ${}^{17}_8O$ e ${}^{18}_8O$; enquanto que para o hidrogênio temos o 1_1H (hidrogênio), 2_1H (deutério) e 3_1H (trítio); e para o urânio temos o ${}^{234}_{92}U$, ${}^{235}_{92}U$ e ${}^{238}_{92}U$. Como o número de prótons é igual ao número de elétrons em condições normais (carga total do átomo igual a zero), podemos apresentar a distribuição das partículas subatômicas para os átomos apresentados acima na Tabela 3.1.

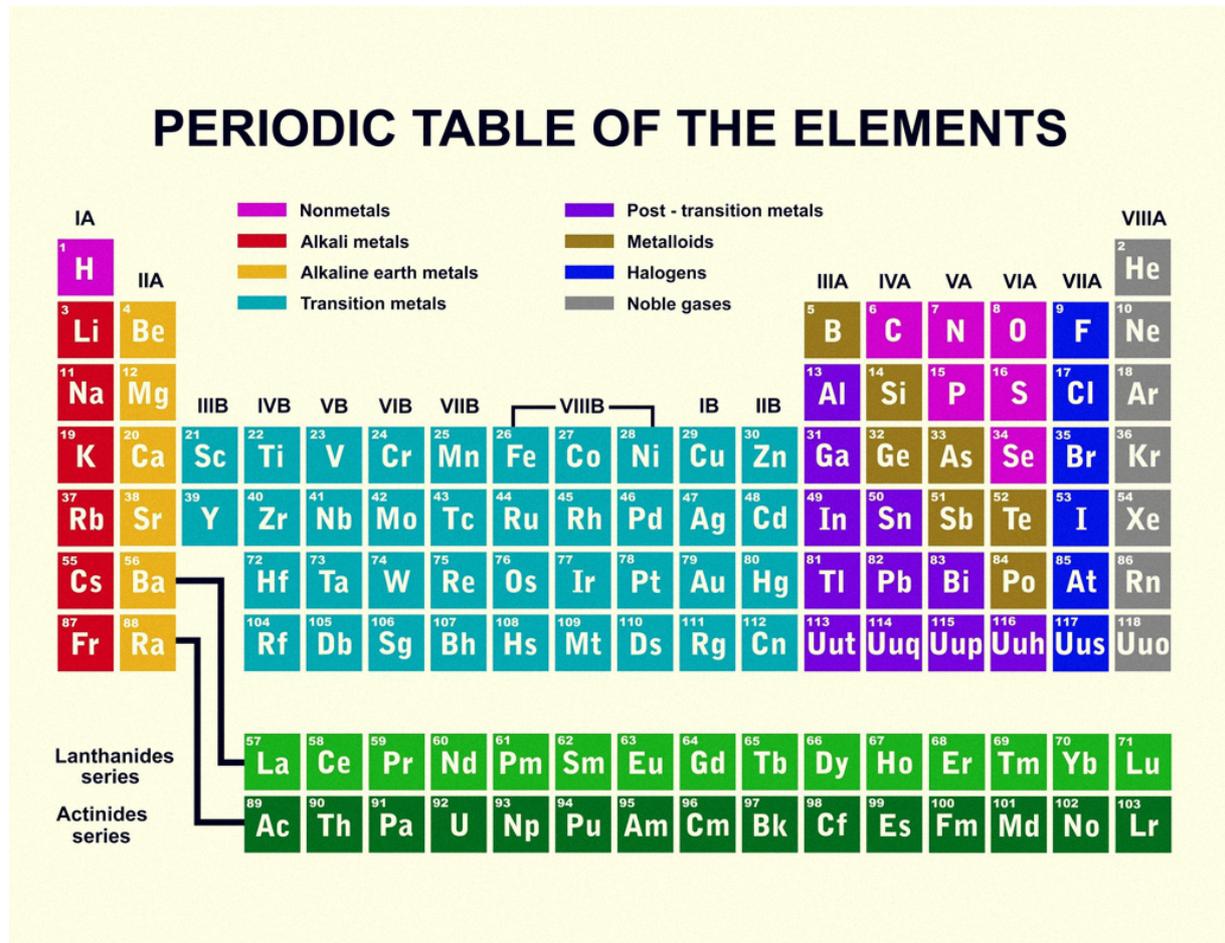
ÁTOMOS	PRÓTONS	NÊUTRONS	ELÉTRONS
1_1H	1	0	1
2_1H	1	1	1
3_1H	1	2	1
${}^{16}_8O$	8	8	8
${}^{17}_8O$	8	9	8
${}^{18}_8O$	8	10	8
${}^{234}_{92}U$	92	142	92
${}^{235}_{92}U$	92	143	92
${}^{238}_{92}U$	92	146	92

3QUADRO 1.4 - Número de prótons, nêutrons e elétrons nos isótopos de hidrogênio, oxigênio e urânio FONTE: Russel, 1994, p. 220.

As partículas responsáveis pelas transformações químicas nos átomos são os prótons e os elétrons devido a presença de cargas +1 e -1, respectivamente. Assim, pode-se concluir que os isótopos de um elemento químico possuem propriedades químicas e reatividade similares.

Com o intuito de organizar os elementos químicos por meio do agrupamento por similaridades nas propriedades químicas e físicas, foi desenvolvida a tabela periódica apresentada na Figura 3.2, cujos elementos são dispostos nas linhas horizontais (períodos) de acordo com o número atômico correspondente e nas linhas verticais (grupos ou famílias)

dependendo da semelhança nas propriedades químicas. Como você pode observar, a tabela é dividida em três grupos principais de acordo com as propriedades de transmissão de calor e de eletricidade: metais, semimetais e não metais.



3FIGURA 2.24 - Tabela periódica dos elementos químicos FONTE: Dece, 123RF.

Apesar da existência dos gases nobres monoatômicos - dispostos no grupo 18 da tabela periódica -, isto é, que são compostos por apenas um átomo, normalmente, a matéria é formada por moléculas ou íons.

As moléculas são definidas como agregados de no mínimo dois átomos (do mesmo elemento ou de elementos diferentes) que permanecem unidos por meio de ligações químicas. Os íons, por sua vez, compreendem **um átomo ou um grupo de átomos que**

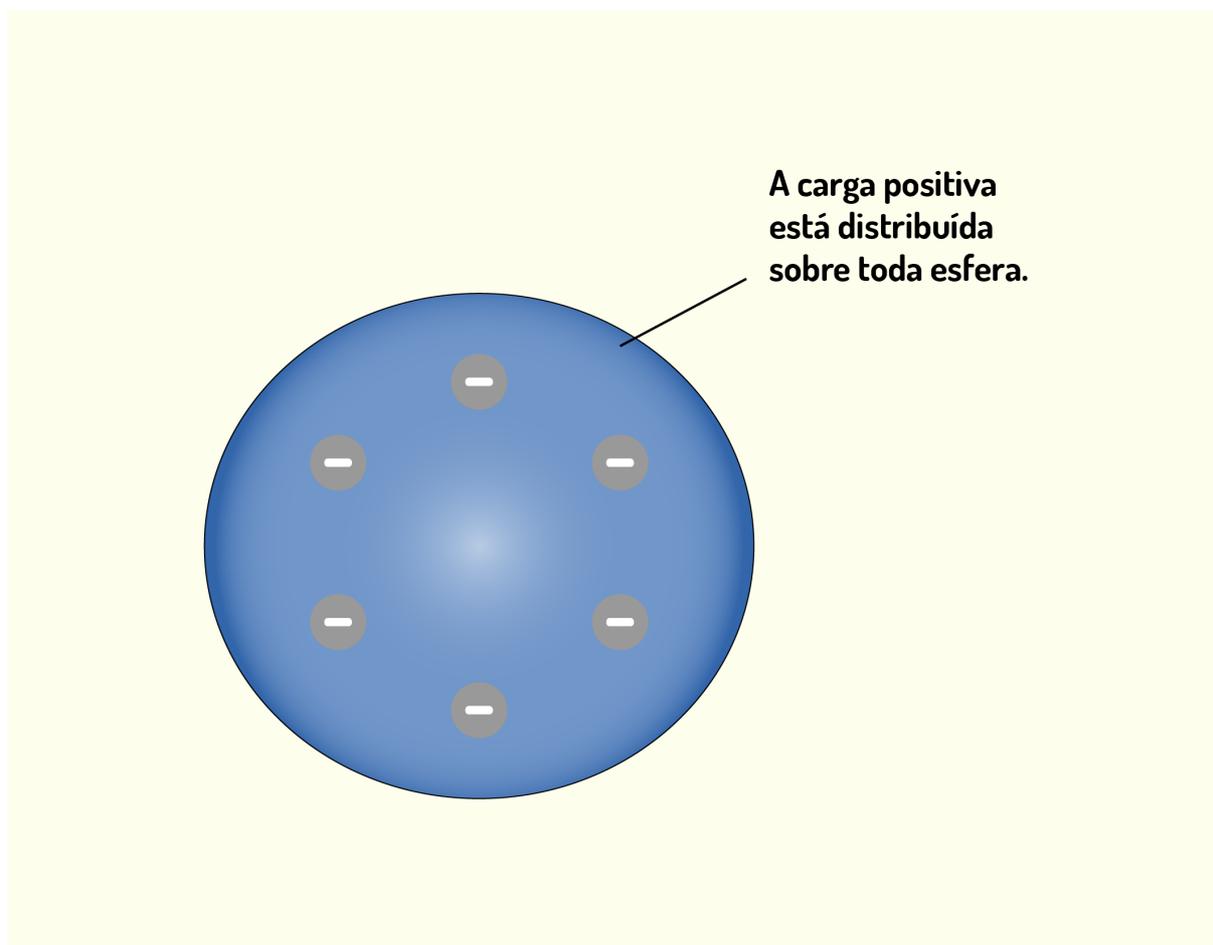
têm carga positiva (cátion) ou negativa (ânion)”, segundo definição apresentada por Chang (2006, p. 38).

Modelos atômicos

A tentativa de definir a constituição da matéria ocorre desde o século V (a.C.), quando os filósofos Leucipo e Demócrito afirmaram que toda a matéria era constituída de pequenas partículas indivisíveis denominadas de átomos. Mas, foi no século XIX que os modelos atômicos surgiram com o objetivo de comprovar experimentalmente as hipóteses até então levantadas.

O primeiro modelo atômico foi proposto por John Dalton, em 1803, que retomou a ideia de que a matéria é formada pelos átomos caracterizados como indivisíveis e permanentes, ou seja, que não podem ser criados nem destruídos. Essa teoria ficou conhecida como o modelo da “Bola de Bilhar” pelo fato de considerar os átomos como partículas esféricas, maciças e indivisíveis. Apesar de difundida por essa característica principal, segundo descrito por Russel (1994), Dalton afirmava também que as reações químicas envolveriam apenas a combinação, separação ou rearranjo dos átomos; que os elementos químicos seriam caracterizados por seus átomos e que os compostos químicos seriam formados por átomos de dois ou mais elementos em uma razão fixa. Dalton baseou seu modelo nas leis da conservação da massa e da composição definida.

Em 1890, no entanto, por meio de experimentos envolvendo tubos de Crookes, Thomson afirmou que o átomo seria constituído de uma esfera carregada positivamente não maciça com elétrons (carga negativa) distribuídos uniformemente, de modo que a carga total do átomo fosse nula como apresentado na Figura 3.3. Assim, esse modelo ficou conhecido como “Pudim de Passas”.



3FIGURA 3.24 - Modelo atômico de Thomson FONTE: Chang (2006, p. 36).

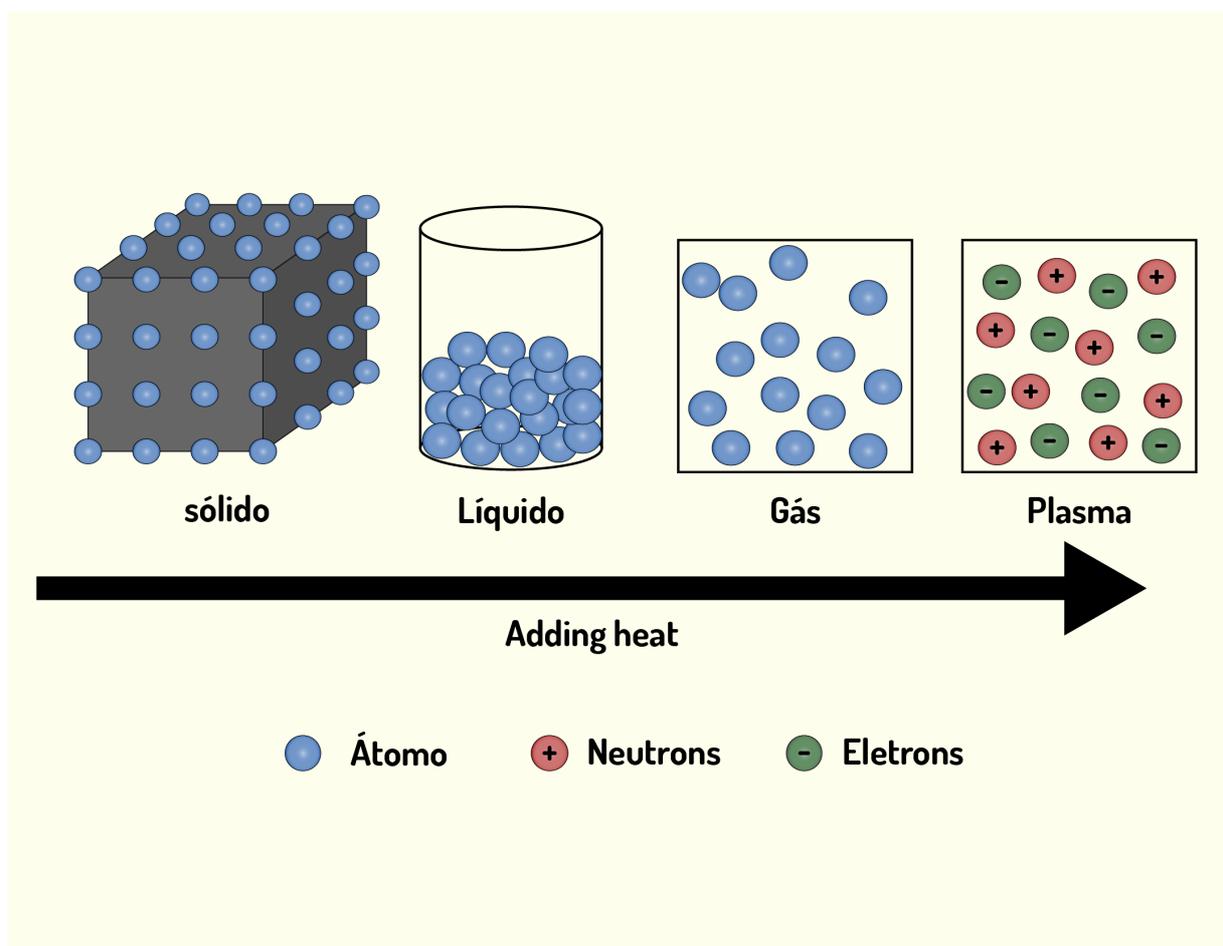
Com a utilização de um fluxo de partículas radioativas de polônio sobre diferentes superfícies como o ouro, Rutherford, em 1911, concluiu que o átomo era dividido em um núcleo rodeado pelos elétrons com grandes espaços vazios entre eles. Além disso, Rutherford caracterizou o núcleo como a região carregada positivamente, que contém praticamente toda a massa do átomo e que possui um raio muito pequeno comparado com a região que apresenta os elétrons distribuídos (eletrosfera). Esse modelo ficou conhecido como "Sistema Planetário", pelo fato de a estrutura do átomo se assemelhar ao sistema solar, em que o núcleo corresponderia ao Sol, e os planetas seriam a representação dos elétrons que orbitam ao redor do núcleo.

Em 1923, Bohr complementou o modelo de Rutherford ao afirmar que os elétrons descrevem órbitas circulares ao redor do núcleo com energia fixa e constante, de forma a não absorver ou emitir energia espontaneamente. No entanto, com a absorção de energia, o elétron

mudaria para um orbital com maior nível energético e, ao retornar ao orbital original, emitiria a mesma quantidade de energia na forma de luz ou calor.

Estados físicos da matéria

A matéria pode ser encontrada nos quatro estados físicos: gás, líquido, sólido e plasma, dependendo da condição a que está submetida, como representado na Figura 3.4.



3FIGURA 4.24 - Os quatro estados físicos da matéria FONTE: Udaix, 123RF.

A diferença básica entre os estados sólido, líquido e gasoso é a distância média entre as moléculas que compõem a matéria em função do seu grau de agitação. Para uma melhor compreensão, vamos caracterizar cada um dos estados a seguir.

Estado sólido

Conceitualmente, o estado sólido pode ser definido, segundo Russel (1994, p. 409), como ***“uma substância que apresenta suas partículas constituintes dispostas em um arranjo interno regularmente ordenado nas três dimensões do espaço”***, sendo caracterizado pelo volume e formato definidos, isto é, apresentar limites ou fronteiras bem estabelecidos. As moléculas que compõem esse estado são mantidas em posições fixas e apresentam baixo grau de vibração. Devido à grande proximidade e o elevado grau de ligação entre as moléculas, pode-se afirmar que os sólidos são incompressíveis.

Os sólidos são comumente encontrados na forma de cristais que podem apresentar uma estrutura cristalina ou amorfa dependendo das condições de nucleação e crescimento desse cristal. Um exemplo bastante típico é a formação de cristais pelo resfriamento de líquidos. Em casos em que esse processo ocorre lentamente, é mais provável que os átomos e moléculas tenham tempo suficiente para se ordenar formando sólidos cristalinos. Quando o processo é rápido, no entanto, os cristais são formados mais aleatoriamente e de forma não ordenada, o que resulta em cristais amorfos.

Dependendo da composição do sólido e do tipo de ligação existente entre os átomos, as moléculas ou os íons que formam o retículo cristalino, os sólidos podem ser classificados em:

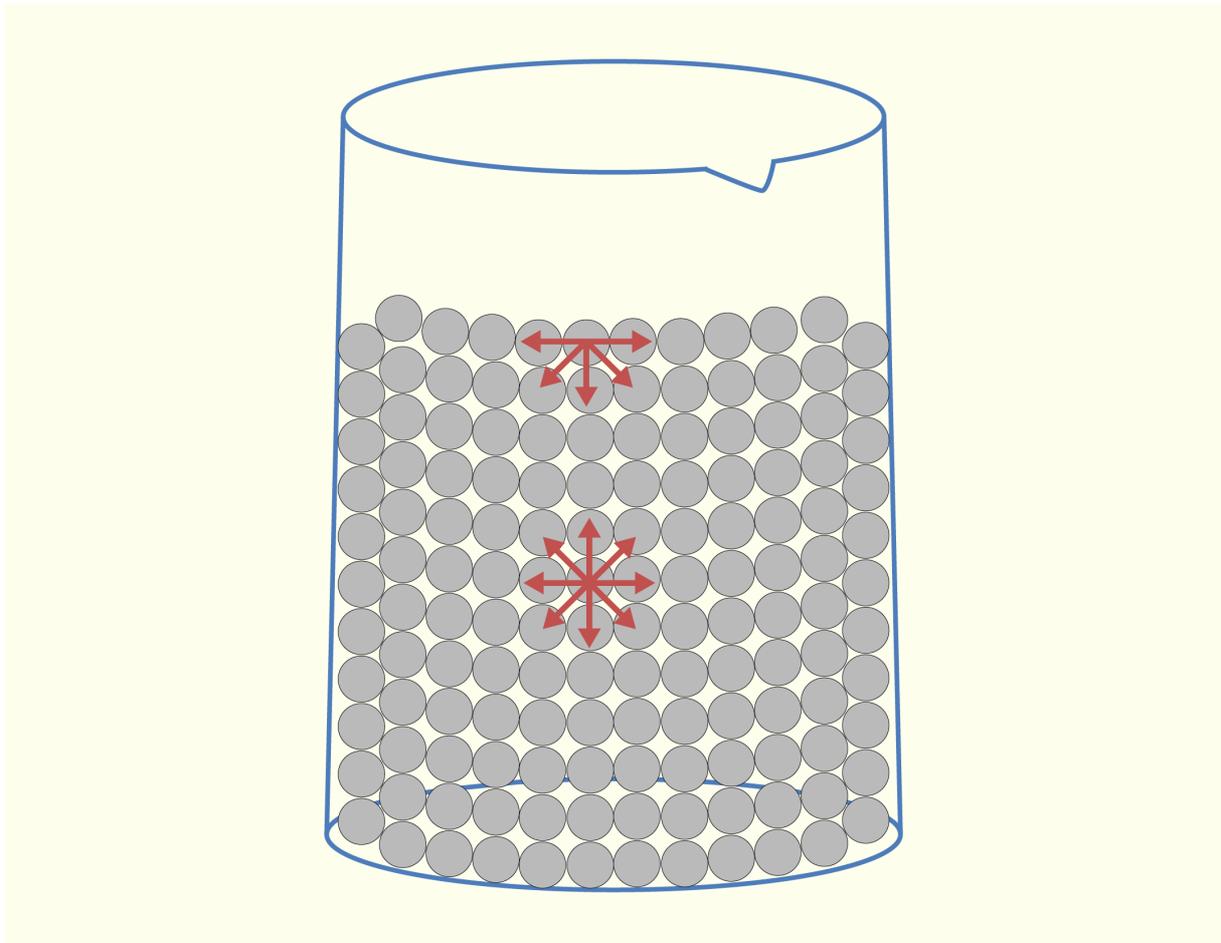
- Sólidos iônicos: são formados por cátions (átomos carregados positivamente) e ânions (átomos carregados negativamente) ligados entre si por ligações iônicas. São caracterizados por pontos de fusão relativamente elevados e baixa condutividade elétrica, além de serem rígidos, mas quebradiços. Exemplos: cloreto de sódio (NaCl) e carbonato de potássio (K₂CO₃).
- Sólidos moleculares: são formados por moléculas ligadas entre si por ligações covalentes (forças dipolo-dipolo e forças de London). Além de serem pouco rígidos e isolantes elétricos, são caracterizados por pontos de fusão relativamente baixos. Exemplos: gás carbônico (CO₂), água (H₂O) e metano (CH₄).

- Sólidos covalentes: também denominados de sólidos atômicos, são formados por átomos ligados por covalência. São caracterizados por uma estrutura rígida, alto ponto de fusão e baixa condutividade elétrica. Exemplos: quartzo (SiO_2) e diamante (C).
- Sólidos metálicos: são formados por íons positivos e estabilizados pelas forças de atração entre eles e pelos elétrons livres que encontram-se deslocalizados sobre o cristal. O grau de rigidez característico depende do composto envolvido, assim como o ponto de fusão que pode variar entre valores intermediários e elevados, além de apresentarem boa condutividade elétrica e térmica. Exemplos: ferro (Fe) e prata (Ag).

Estado líquido

O líquido é considerado o estado físico intermediário entre o sólido e o gás, o que proporciona características intermediárias entre os dois estados. Por exemplo, apesar do maior grau de agitação das moléculas que se encontram no estado líquido em relação ao estado sólido, as moléculas permanecem relativamente bem próximas umas das outras, o que gera uma baixa compressibilidade dos líquidos. Apesar disso, as moléculas encontram-se em um nível de desordem que ocasiona a manutenção do volume fixo devido às ligações químicas que as unem, mas não o formato em função da elevada mobilidade das moléculas que permite a sua fluidez. As propriedades principais que envolvem os líquidos são a tensão superficial e a viscosidade.

A tensão superficial, segundo Chang (2006, p. 384), pode ser definida como **“a quantidade de energia necessária para aumentar em uma unidade de área da superfície de um líquido”**. Esse gasto energético ocorre devido à tendência das moléculas do líquido se atraírem em todas as direções e, como na superfície não há moléculas de líquido na camada superior, ocorre um desequilíbrio de forças intermoleculares com a resultante voltada para o interior do líquido, resultando na formação de uma espécie de película superficial com elevada força de coesão, como apresentado na Figura 3.5.



3FIGURA 5.24 - Desequilíbrio de forças intermoleculares na superfície do líquido que resulta na tensão superficial
FONTE: Chang (2006, p. 386)

A viscosidade, por sua vez, consiste na resistência de um fluido ao escoamento. Essa propriedade está relacionada com as forças intermoleculares presentes na matéria e depende inversamente da temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura aplicada ao fluido, menor a resistência ao escoamento e, portanto, menor a sua viscosidade.

Estado gasoso

O estado gasoso é o estado físico que apresenta o maior nível de agitação das moléculas, o que gera um grande distanciamento entre elas. Essa característica permite a elevada compressibilidade da matéria quando presente nesse estado e baixos valores de massa específica (densidade). Além disso, os gases não possuem volume e formato definidos, de

modo a ocupar todo o volume e se adaptar à forma do recipiente que os contém. Diferentemente das moléculas do estado sólido, que não se misturam, ou das moléculas no estado líquido, que têm maior atração umas pelas outras em relação às de outros componentes, as moléculas dos gases se misturam completamente e de forma homogênea quando colocados em contato.

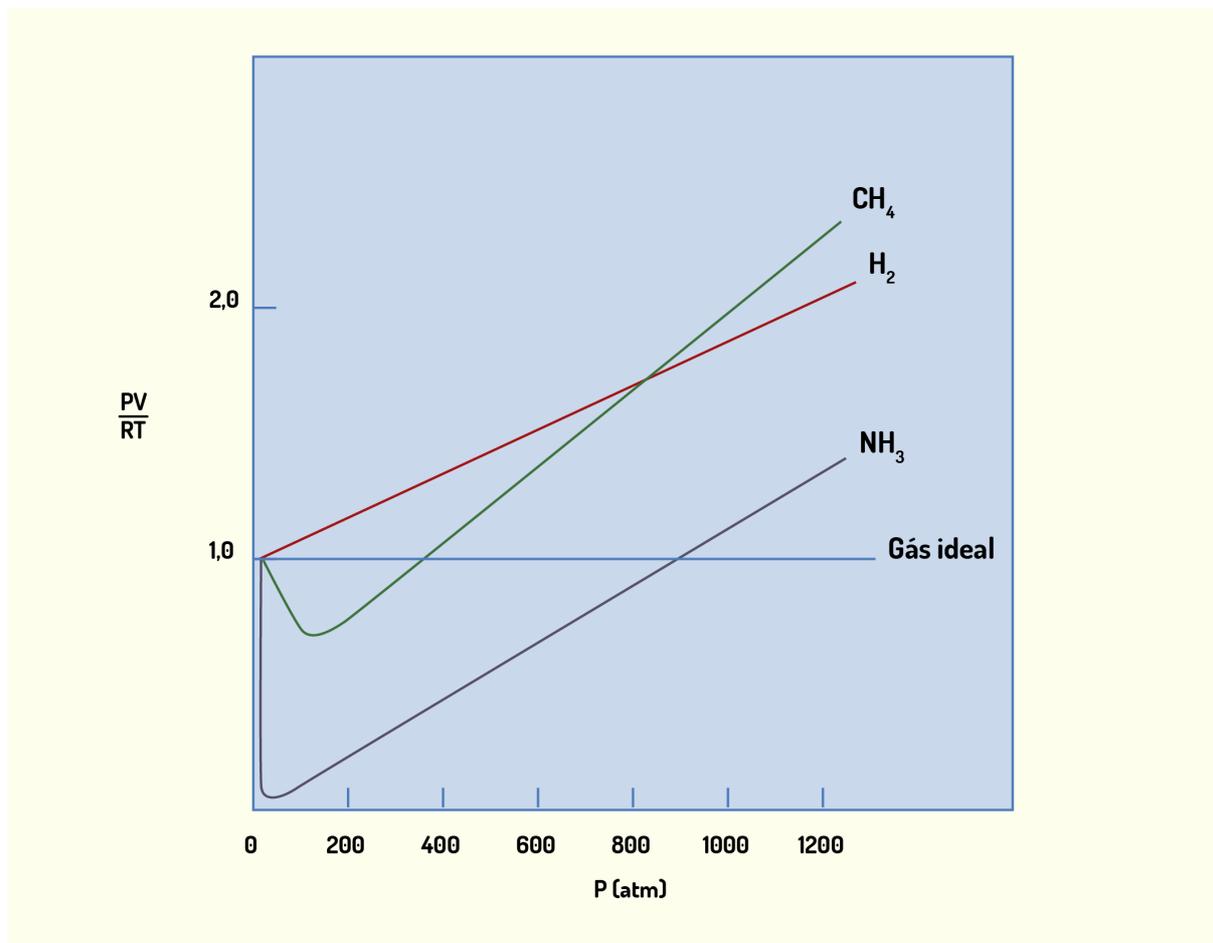
As variáveis utilizadas para descrever o comportamento dos gases são: pressão, volume e temperatura. Dependendo das características do sistema, podemos fazer a aproximação para um comportamento de gás ideal ou então considerá-lo um gás real.

Como discutido na unidade II - Leis de conservação -, o gás ideal é um modelo idealizado que faz a consideração de que as moléculas do gás estão infinitamente distantes umas das outras como se estivessem sozinhas no meio, ou seja, as forças intermoleculares são desprezadas, e o volume pode ser considerado desprezível. Assim, esse comportamento descreve relativamente bem condições em que a pressão do sistema é baixa ou moderada (até poucas atmosferas) em temperaturas elevadas. A equação que descreve o comportamento de gás ideal é rerepresentada na Equação 1:

$$PV = nRT \quad (1)$$

em que P é a pressão (Pa), V é o volume (m^3), n é o número de mols, R é a constante dos gases ideais ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e T é a temperatura absoluta (K).

Apesar de o comportamento de gás ideal ser bem aceito para alguns casos, existem os gases que não são bem descritos por essa aproximação, como pode ser observado na Figura 3.6.



3FIGURA 6.24 - Desvios da idealidade no comportamento de gases reais em relação ao gás ideal FONTE: Chang (2006, p. 158).

Os gases com comportamento dito real podem ser descritos, por exemplo, pela equação de Van der Waals, apresentada na Equação 2.

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right) (V - nb) = nRT \quad (2)$$

em que a ($\text{Pa m}^3 \text{ mol}^{-2}$) e b ($\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$) são constantes determinadas experimentalmente para cada gás, o termo $\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)$ representa a correção da pressão, e o termo $(V - nb)$ consiste na correção do volume em relação ao comportamento de gás ideal. Exemplos dos valores das constantes a e b para a equação de Van der Waals podem ser observados na Tabela 3.2.

GÁS	A (ATM L ² MOL ⁻²)	B (L MOL ⁻¹)
Hélio (He)	0,034	0,0237
Hidrogênio (H ₂)	0,244	0,0266
Nitrogênio (N ₂)	1,39	0,0391
Oxigênio (O ₂)	1,36	0,0318
Gás carbônico (CO ₂)	3,59	0,0427
Metano (CH ₄)	2,25	0,0428
Amônia (NH ₃)	4,17	0,0371
Água (H ₂ O)	5,46	0,0305

3QUADRO 2.4 - Valores das constantes experimentais de Van der Waals para determinados gases. FONTE: Chang (2006).

Plasma

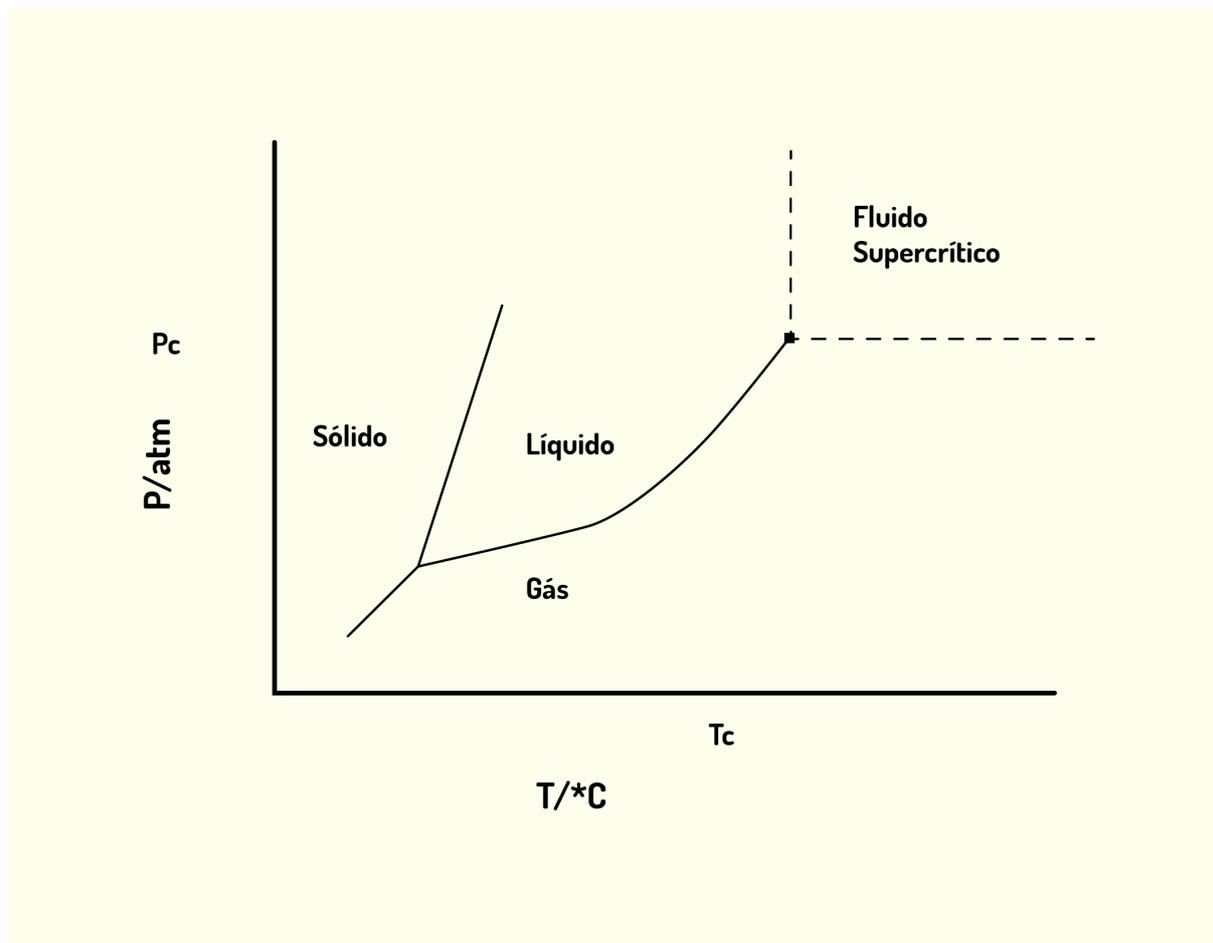
O plasma é considerado o quarto estado da matéria, no entanto, devido à dificuldade de atingir tal estado físico de forma natural na superfície terrestre, muitas vezes, é negligenciado nas discussões sobre o tema. Segundo Chang (2006), o plasma pode ser descrito como **“uma mistura gasosa de íons positivos e elétrons”**. De forma simplificada, as altas temperaturas geram um grau de agitação tão elevado que rompem as ligações dos elétrons nos orbitais, mantendo-os suspensos. Em função das elevadíssimas temperaturas necessárias para a sua formação, as moléculas deixam de existir, e a maioria dos átomos perde seus elétrons, o que acarreta em partículas carregadas que podem, então, sofrer a ação de campos magnéticos e conduzir eletricidade. Apesar disso, o plasma apresenta carga total nula, uma vez que essa é formada por núcleos e elétrons dissociados em igual quantidade. Como características, o plasma apresenta baixa massa específica (densidade), capacidade de escoar e pode emitir luz no espectro visível. O sol é um exemplo de matéria que se encontra nesse estado físico, assim como as auroras boreais.

Ponto triplo e ponto crítico

O ponto em que os três estados físicos principais (sólido, líquido e gasoso) coexistem em equilíbrio é denominado ponto triplo e ocorre em uma única condição de pressão e temperatura para cada substância. Por exemplo: para o dióxido de carbono (CO_2), o ponto triplo ocorre na temperatura de $-57\text{ }^\circ\text{C}$ e pressão de $5,2\text{ atm}$; enquanto que, para a água, a condição é de $0,01\text{ }^\circ\text{C}$ e $0,006\text{ atm}$.

O ponto crítico, por sua vez, segundo descrito por Russell (1994, p. 485), **"é a temperatura e a pressão acima das quais desaparece a distinção entre gás e líquido"**. Em condições acima do ponto crítico, forma-se o denominado fluido supercrítico, que apresenta propriedades químicas idênticas nas duas fases como massa específica (densidade), condutividade térmica, viscosidade e índice de refração. Normalmente, essas propriedades apresentam valores intermediários entre o valor que seria da propriedade nos estados gasoso e líquido individualmente. Por exemplo: o ponto crítico do dióxido de carbono (CO_2) ocorre na condição de $31\text{ }^\circ\text{C}$ e 73 atm ; enquanto que, para a água, essa condição ocorre em $374\text{ }^\circ\text{C}$ e 218 atm .

A Figura 3.7 apresenta um diagrama de pressão versus temperatura com a representação dos pontos triplo e crítico.



3FIGURA 7.24 - Representação esquemática dos pontos triplo e crítico em um diagrama P x T FONTE: Carrilho, Tavares e Lanças (2001, on-line).

Após a revisão dos conceitos de química, que tal realizarmos uma atividade para verificar como estamos em relação ao conteúdo?!

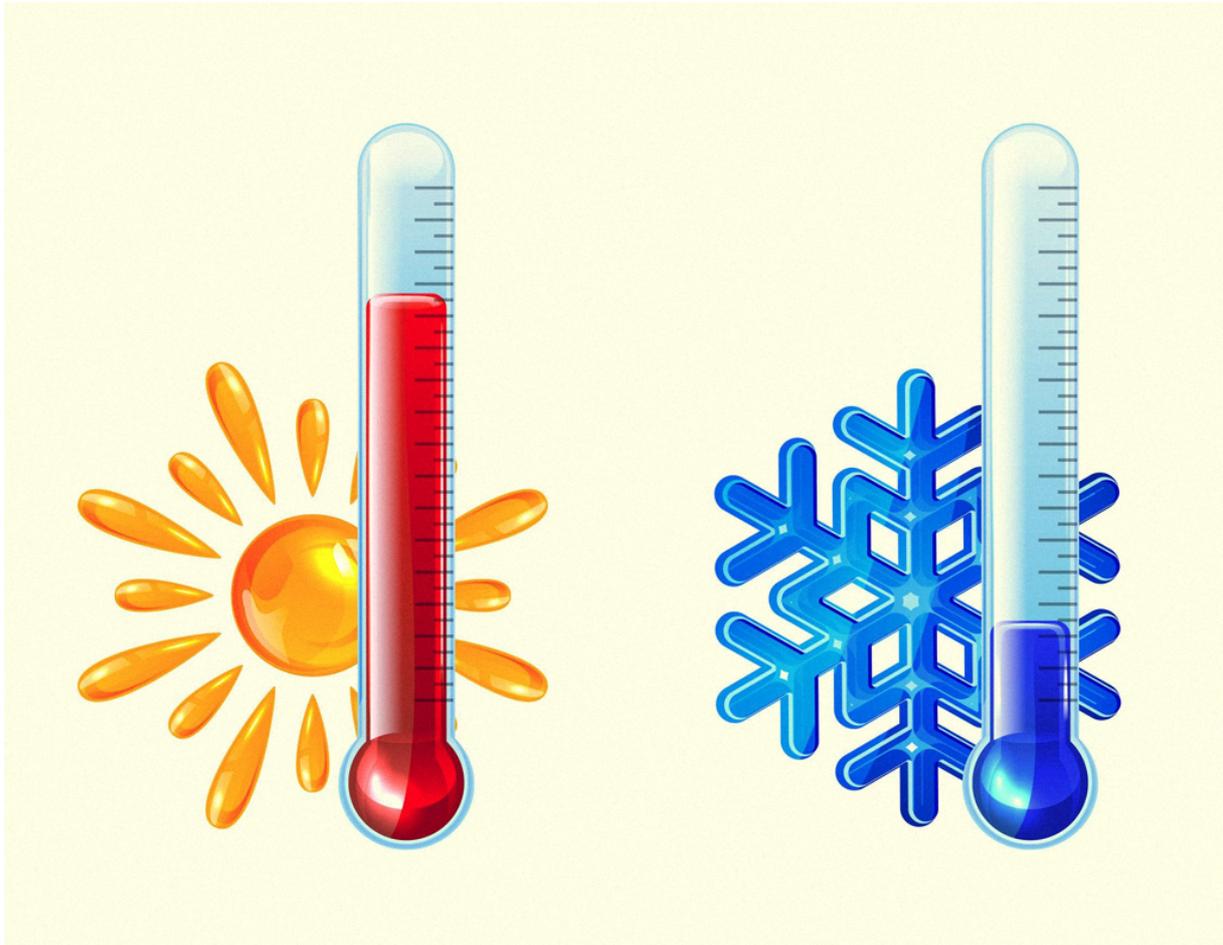
Temperatura, calor e dilatação

A temperatura aplicada à matéria interfere no grau de agitação das moléculas e, conseqüentemente, no estado físico em que a substância se encontra. Além disso, como visto na unidade II (Leis de Conservação), a temperatura está intimamente relacionada com a energia, que consiste no objeto principal de estudo da termodinâmica. Tendo o conhecimento sobre a importância do estudo da temperatura, que varia desde o cozimento ou esterilização de um alimento até a manutenção da eficiência de um processo térmico, por exemplo, você saberia caracterizar a temperatura e os conceitos - como calor e dilatação - relacionados a ela? Vamos, então, ao estudo!

Temperatura e equilíbrio térmico

A temperatura é uma grandeza fundamental que está relacionada à energia cinética das moléculas da matéria, podendo ser medida diretamente com o auxílio de termômetros. Uma das características principais dessa grandeza é estar fortemente relacionada com diversas propriedades dos materiais como a viscosidade e a solubilidade, que podem ser alteradas dependendo da temperatura aplicada. Por exemplo, o molho de tomate aquecido em altas temperaturas apresenta uma maior fluidez (menor viscosidade), assim como o açúcar possui uma maior solubilidade em água aquecida. O conhecimento a respeito de como a temperatura interfere na estrutura do material é fundamental em nível industrial, no dimensionamento e definição de equipamentos e na seleção de parâmetros mais adequados para cada processo. Em nível macroscópico, utilizamos esse conceito considerando a sensação de quente e frio.

Os termômetros são dispositivos calibrados que fornecem uma variação de temperatura em relação a uma escala estabelecida. Podem ser constituídos de líquidos - como o mercúrio ou álcool etílico -; gases que sofram expansão ou contração com o aumento ou redução da temperatura; ou então contam com a resistência elétrica de um fio condutor. Usualmente são utilizados termômetros como apresentado na Figura 3.8, que se apresentam como um tubo capilar de vidro contendo mercúrio ou álcool. Com a variação de temperatura, o fluido apresenta uma expansão (aumento da temperatura) ou contração (diminuição da temperatura) de seu volume de forma a indicar na escala do dispositivo a temperatura do material.



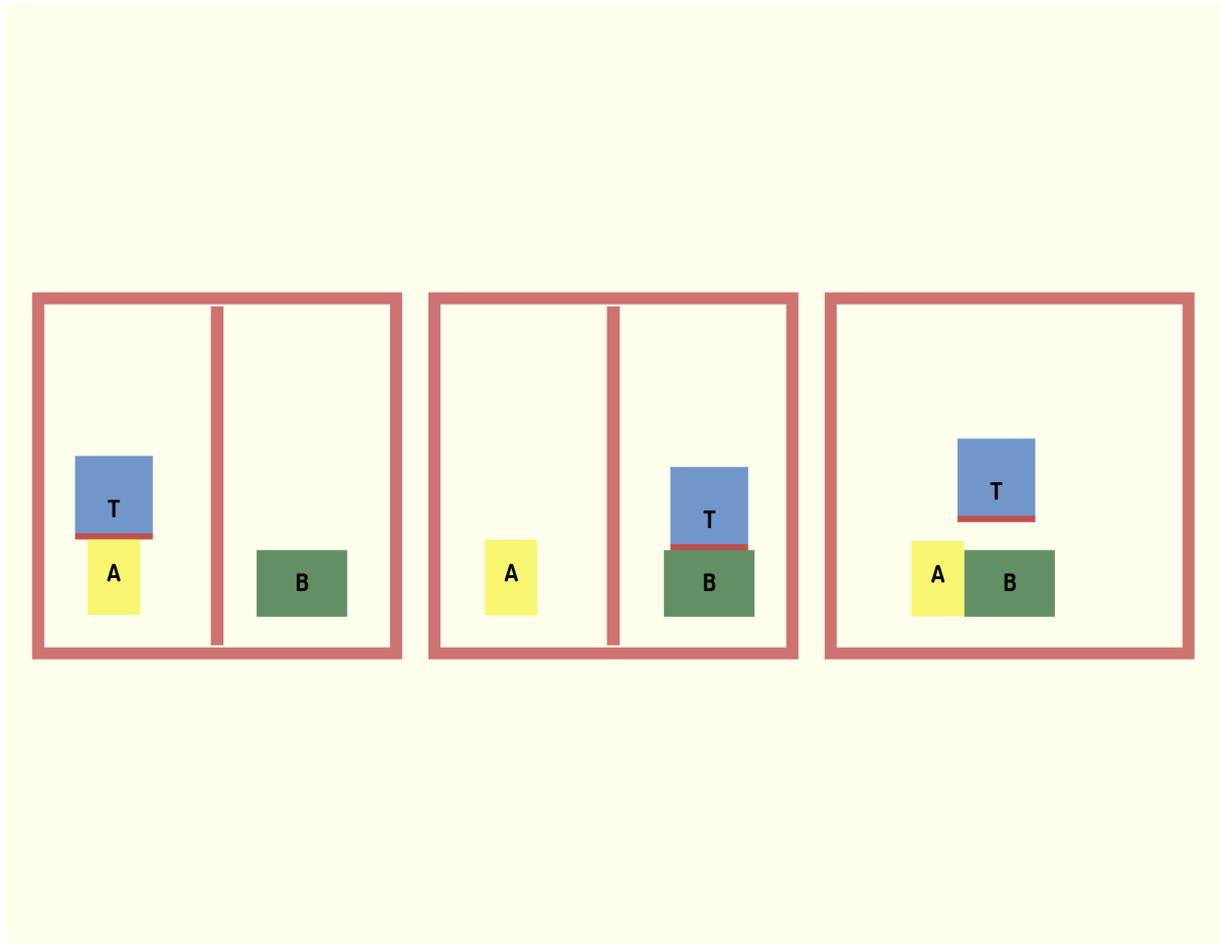
3FIGURA 8.24 - Representação da expansão e da contração do volume do fluido presente em termômetros usuais de acordo com a temperatura aplicada FONTE: Iljin, 123RF.

Como definido anteriormente, a diferença de temperatura é a força motriz para que ocorra a transferência de calor, ou seja, corpos em contato com diferentes temperaturas irão trocar calor do mais quente em direção ao mais frio até que atinjam o equilíbrio térmico. Nesse ponto, os dois materiais passam a apresentar temperaturas iguais e não há mais transferência de energia na forma de calor como representado na Figura 3.9.



3FIGURA 9.24 - Equilíbrio térmico entre dois corpos que inicialmente apresentavam diferentes temperaturas FONTE: File404, 123RF,

A ideia de equilíbrio térmico deu origem à “Lei zero da termodinâmica”, também denominada de lei do equilíbrio, que afirma que “se dois corpos A e B estiverem separadamente em equilíbrio térmico com um terceiro corpo T, então A e B estarão em equilíbrio térmico entre si” como apresentado na Figura 3.10.



3FIGURA 10.24 - Representação esquemática da Lei zero da termodinâmica FONTE: Halliday, Resnick e Walker (2009, p. 184).

Escalas de temperatura

A temperatura pode ser medida em diferentes escalas, sendo as mais usuais a Celsius, Fahrenheit e Kelvin. Para uma melhor compreensão, vamos entender como uma escala pode ser estabelecida. Seleciona-se um sistema já amplamente conhecido como a água, que apresenta o ponto de congelamento e de ebulição bem definidos. Ao colocar o termômetro em contato com a água em seu ponto de gelo, faça uma marcação no capilar de vidro em qual ponto o líquido interno do termômetro permaneceu no equilíbrio térmico. Em seguida, coloque o termômetro em contato com a água em seu ponto de vapor e realize outra

marcação no dispositivo no ponto que o líquido interno do capilar atingiu no novo equilíbrio térmico. A partir disso, você poderá arbitrar divisões internas entre os dois pontos e criar uma nova escala.

Partindo dessa ideia, Celsius estabeleceu no termômetro que os pontos marcados no capilar correspondem ao 0 °C e 100 °C, por estarem relacionados com as temperaturas de congelamento e de ebulição da água, respectivamente, à pressão atmosférica. Em seguida, subdividiu o capilar em 100 segmentos equidistantes que correspondem a cada grau Celsius.

Fahrenheit, por sua vez, estabeleceu que o ponto de congelamento da água corresponde à temperatura de 32 °F, enquanto que o ponto de ebulição da água encontra-se em 212 °F. Essa escala é muito utilizada nos Estados Unidos, mas pode ser facilmente relacionada com a escala Celsius utilizando a Equação 3:

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32 \quad (3)$$

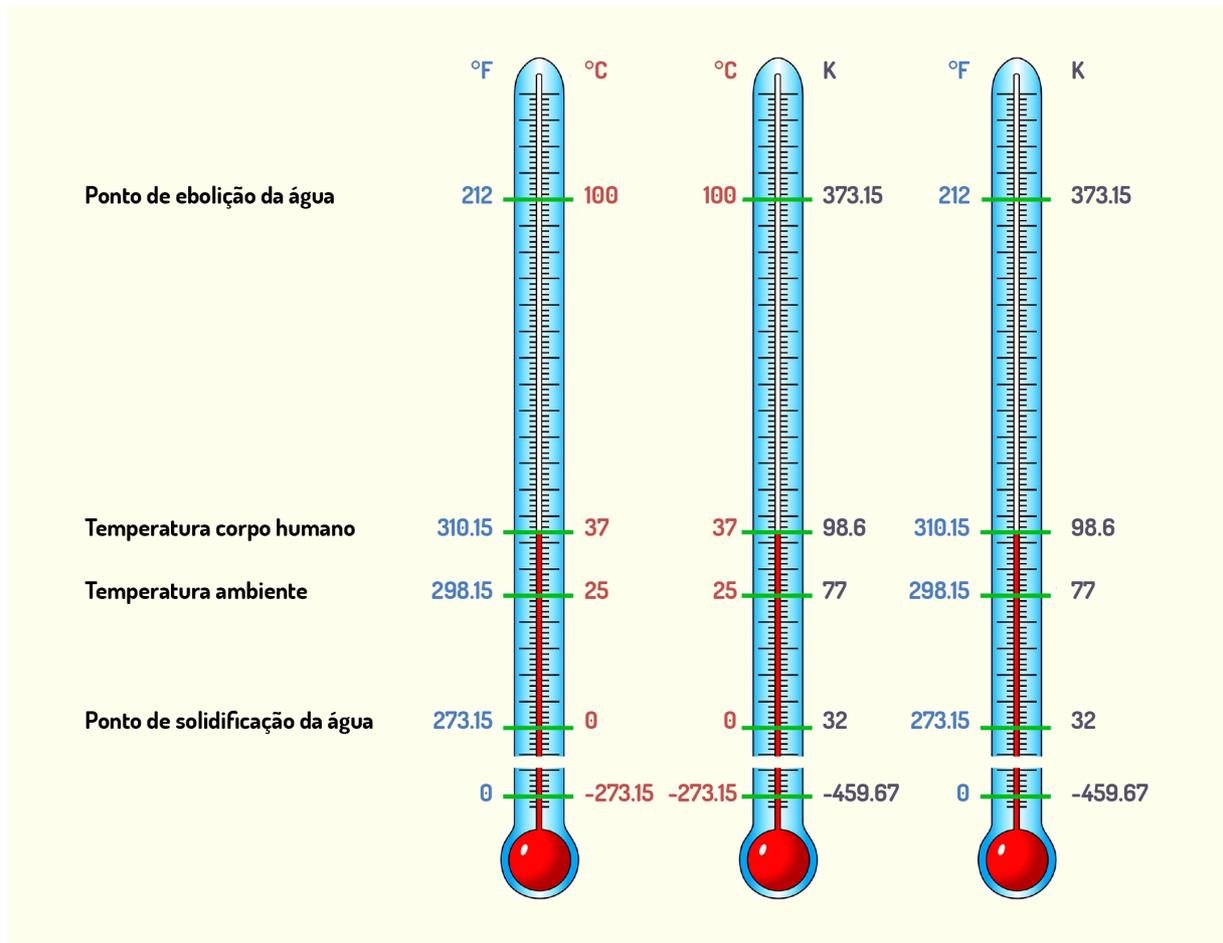
em que T_F e T_C são as temperaturas nas escalas Fahrenheit e Celsius, respectivamente.

Em função da possibilidade de existência de diferentes escalas, optou-se pelo desenvolvimento de uma escala que pudesse ser utilizada de forma geral, sendo então definida a escala Kelvin. Nessa escala, a temperatura 0 K - denominada de zero absoluto - corresponde ao ponto em que não há movimentação molecular para qualquer substância. A principal vantagem da utilização dessa escala ocorre pelo fato de não estar associado ao comportamento de nenhuma substância específica. O ponto de congelamento da água (0 °C) equivale a 273,15 K, enquanto que a temperatura de ebulição da água (100 °C) corresponde a 373,15 K. A relação entre as escalas Celsius e Kelvin pode ser observada na Equação 4.

$$T_C = T_K - 273,15 \quad (4)$$

em que T_C e T_K são as temperaturas nas escalas Celsius e Kelvin, respectivamente.

A Figura 3.11 apresenta a relação entre as escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin, com destaque para as temperaturas de ebulição e congelamento da água, temperatura ambiente e do corpo humano e a correspondente ao zero absoluto.



3FIGURA 11.24 - Correspondência entre as escalas de temperatura Celsius, Fahrenheit e Kelvin FONTE: Mazanov, 123RF.

Expansão térmica

Você já pensou no motivo de os líquidos utilizados nos termômetros subirem no capilar com o aumento da temperatura? Ou então sobre o motivo pelo qual as pessoas aquecem as tampas metálicas de recipientes de vidro, como embalagens de geleia ou de conservas em geral? Ou ainda por que estruturas metálicas devem ser construídas com um pequeno

espaçamento entre elas? Esses eventos ocorrem devido à expansão térmica. Por exemplo, no caso da embalagem, o metal sofre uma rápida dilatação em relação ao vidro e, por isso, a tampa fica um pouco mais afrouxada, o que permite uma maior facilidade de abertura; enquanto que, nas estruturas, para que não haja uma pressão em excesso entre elas, deve ser considerada essa variação com a expansão.

Os metais são exemplos simples de materiais que sofrem expansão térmica. No entanto, é importante lembrar que a maioria dos materiais podem dilatar em diferentes níveis quando são aquecidos. Dois tipos de dilatação são observados: o linear e o volumétrico. Vamos estudá-los separadamente.

Dilatação linear

A dilatação térmica linear ocorre quando a variação de um comprimento (ΔL) ocasionada pelo aumento de temperatura é diretamente proporcional à variação de temperatura (ΔT) e ao comprimento inicial (L_0), como representado na Equação 5:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (5)$$

em que α é o coeficiente de dilatação linear (K^{-1} ou $^{\circ}C^{-1}$). Esse coeficiente é específico para cada material e, apesar de ser considerado constante, pode apresentar pequenas variações com a temperatura. Alguns exemplos dos valores do coeficiente de dilatação linear podem ser observados na Tabela 3.3.

MATERIAL	α ($10^{-6}/^{\circ}C$)	MATERIAL	α ($10^{-6}/^{\circ}C$)
Gelo (0 $^{\circ}C$)	51	Concreto	12
Chumbo	29	Aço	11
Alumínio	23	Vidro comum	9
Cobre	17	Diamante	1,2

3QUADRO 3.4 - Valores do coeficiente de dilatação linear para determinadas substâncias FONTE: Halliday, Resnick e Walker (2009).

É importante lembrar que o comprimento nesse caso corresponde a todas as dimensões lineares, isto é, espessura, comprimento ou diâmetro.

Dilatação volumétrica

Como o próprio nome diz, a dilatação volumétrica é baseada em um aumento de volume quando ocorre uma elevação da temperatura, que ocorre tanto em líquidos como em sólidos. Assim como a dilatação linear, a variação de volume (ΔV) é diretamente proporcional à variação de temperatura (ΔT), ao volume inicial (V_0) e ao coeficiente de dilatação volumétrica (β) como apresentado na Equação 6:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad (6)$$

O coeficiente de dilatação volumétrica (β) também é apresentado em K^{-1} ou $^{\circ}C^{-1}$ e varia linearmente com a temperatura, apesar de poder ser considerado aproximadamente constante em pequenas variações de temperatura. Exemplos de valores de coeficiente de dilatação volumétrica para algumas substâncias podem ser observados na Tabela 3.4.

MATERIAL SÓLIDO	B ($10^{-5}/^{\circ}C$)	MATERIAL LÍQUIDO	B ($10^{-5}/^{\circ}C$)
Alumínio	7,2	Álcool etílico	75
Cobre	5,1	Dissulfeto de carbono	115
Vidro	1,2 - 2,7	Glicerina	49
Aço	3,6	Mercúrio	18

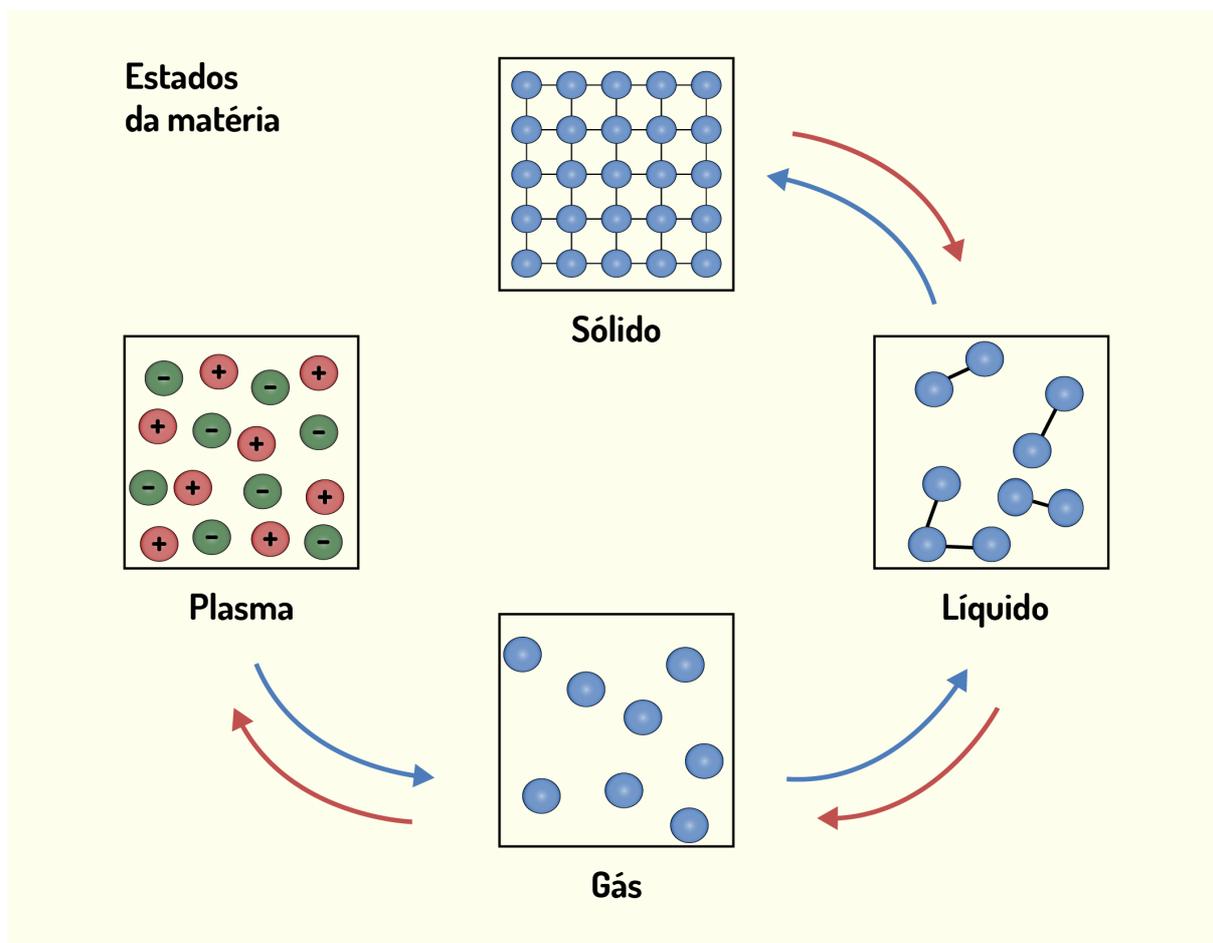
3QUADRO 4.4 - Valores do coeficiente de dilatação volumétrica para determinadas substâncias FONTE: Young e Freedman (2008).

Os coeficientes de dilatação linear (α) e volumétrica (β) podem ser relacionados pela Equação 7.

$$\beta = 3\alpha (7)$$

Mudanças de fases

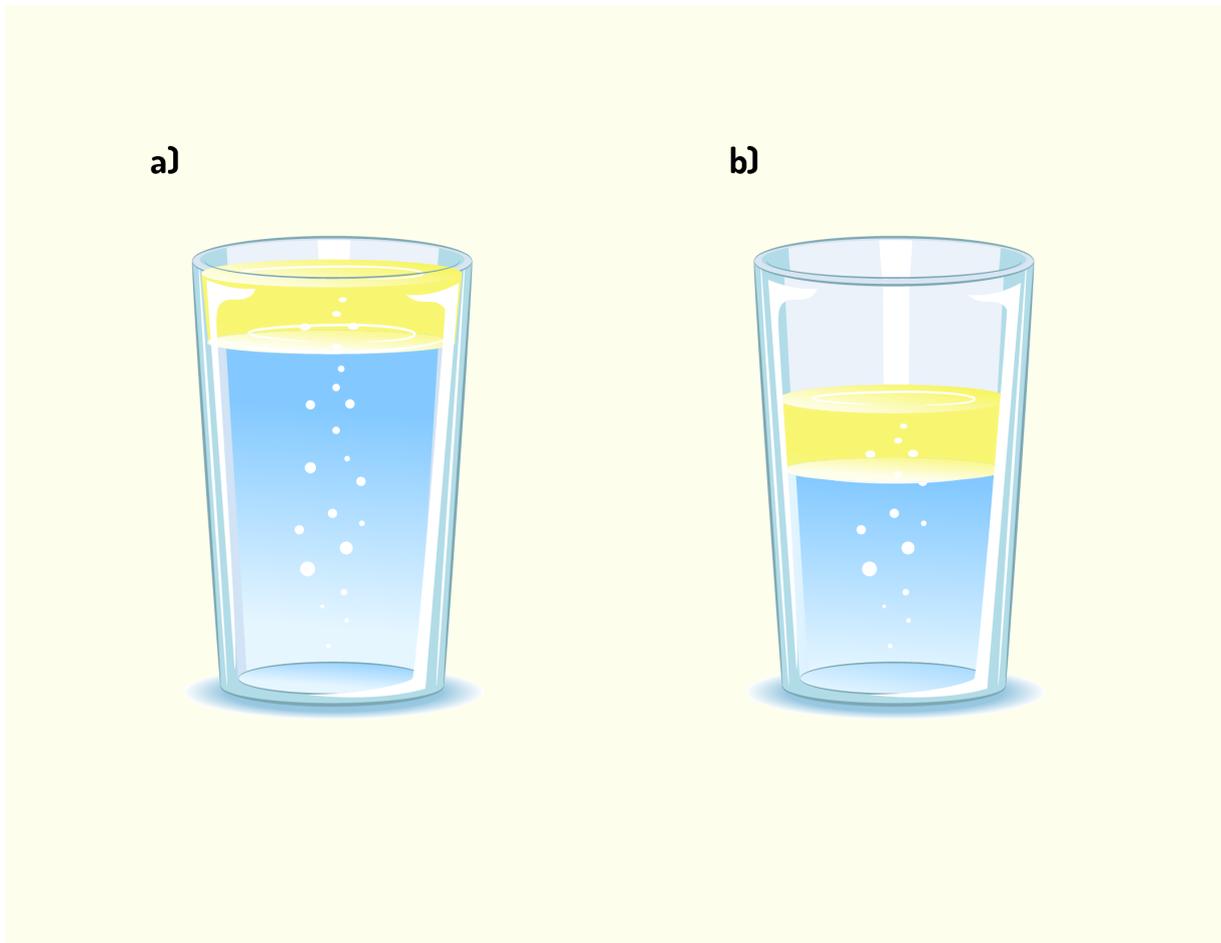
Como visto no início da unidade, a matéria pode ser encontrada em diferentes estados físicos (sólido, líquido, gás e plasma), sendo possível alterá-lo por meio do fornecimento ou retirada de energia do sistema como apresentado na Figura 3.12.



3FIGURA 12.24 - Mudanças de estado de agregação da matéria pela adição ou subtração de energia do sistema FONTE: Designua, 123RF.

Imagine, por exemplo, um cubo de gelo exposto ao ar ambiente ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Você concorda que, com o passar do tempo, o gelo irá receber energia na forma de calor e começará a derreter até que todo o gelo se transforme em água líquida, certo?! Quando isso acontece, dizemos que a substância sofre uma mudança de fase. Você saberia definir conceitualmente esse fenômeno?

Para darmos continuidade ao conteúdo, devemos entender primeiramente qual é o significado de fase. Segundo Chang (2006, p.394), "**fase é uma parte homogênea do sistema que está em contato com outras partes, mas delas separada por um limite bem definido**", isto é, são sistemas que se apresentam quimicamente homogêneos (composição e propriedades constantes em todo o material) e que são delimitados por uma fronteira bem definida. Por exemplo: óleo em um copo com água, como apresentado na Figura 3.13. Quantas substâncias e quantas fases você diria que o sistema copo apresenta? Independentemente do número de fases, sabemos que o sistema apresenta duas substâncias, a água e o óleo, certo?! Mas e em relação ao número de fases? Depende, não é mesmo?! Se o copo estiver completamente preenchido com as duas substâncias, teremos duas fases como apresentado na Figura 3.13a, uma fase com água e a outra fase com o óleo. No entanto, caso o copo (sistema) não esteja cheio, você concorda que haverá uma fase com vapor sobre os dois líquidos (Figura 3.13b)?! Ou seja, apesar da existência de duas substâncias, pode existir a mesma substância em mais de uma fase, assim como o caso de um copo de água com gelo, em que uma única substância pode coexistir em diferentes fases.

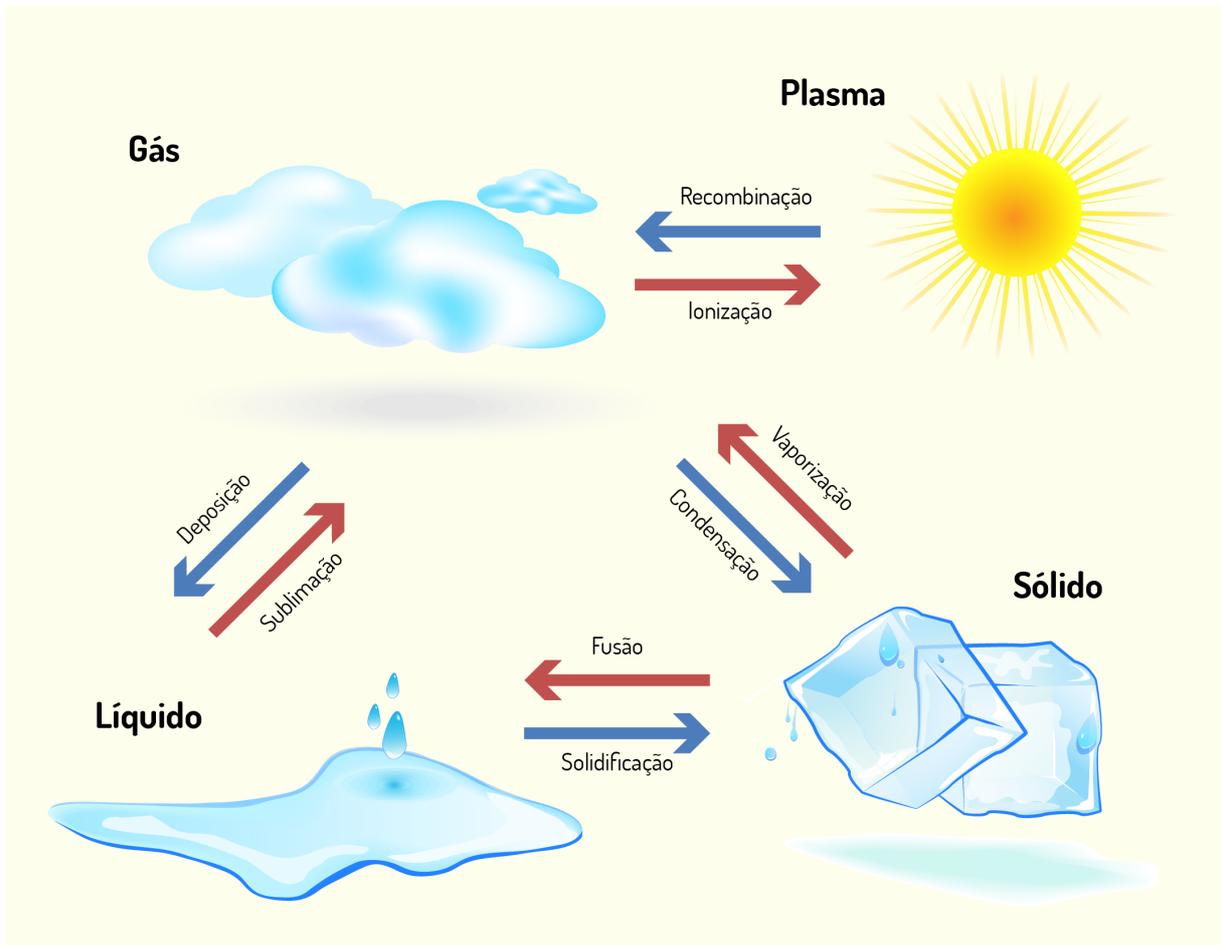


3FIGURA 13.24 - Um sistema contendo água e óleo pode apresentar duas (a) ou três (b) fases FONTE: Autor (2017).

Assim, temos que a mudança de fase, segundo Chang (2006, p. 394-395), pode ser definida como **"transformações físicas de uma fase em outra caracterizadas por modificações na ordem molecular"**, e sua classificação se dá conforme sintetizado na Figura 3.14:

- Fusão: transformação do estado sólido para o líquido com aumento de energia do sistema.
- Congelamento: transformação do estado líquido para o sólido com redução de energia do sistema.
- Vaporização: transformação do estado líquido para o gasoso com aumento de energia do sistema.
- Condensação: transformação do estado gasoso para o líquido com redução de energia do sistema.
- Sublimação: transformação do estado sólido para o gasoso com aumento de energia do sistema.

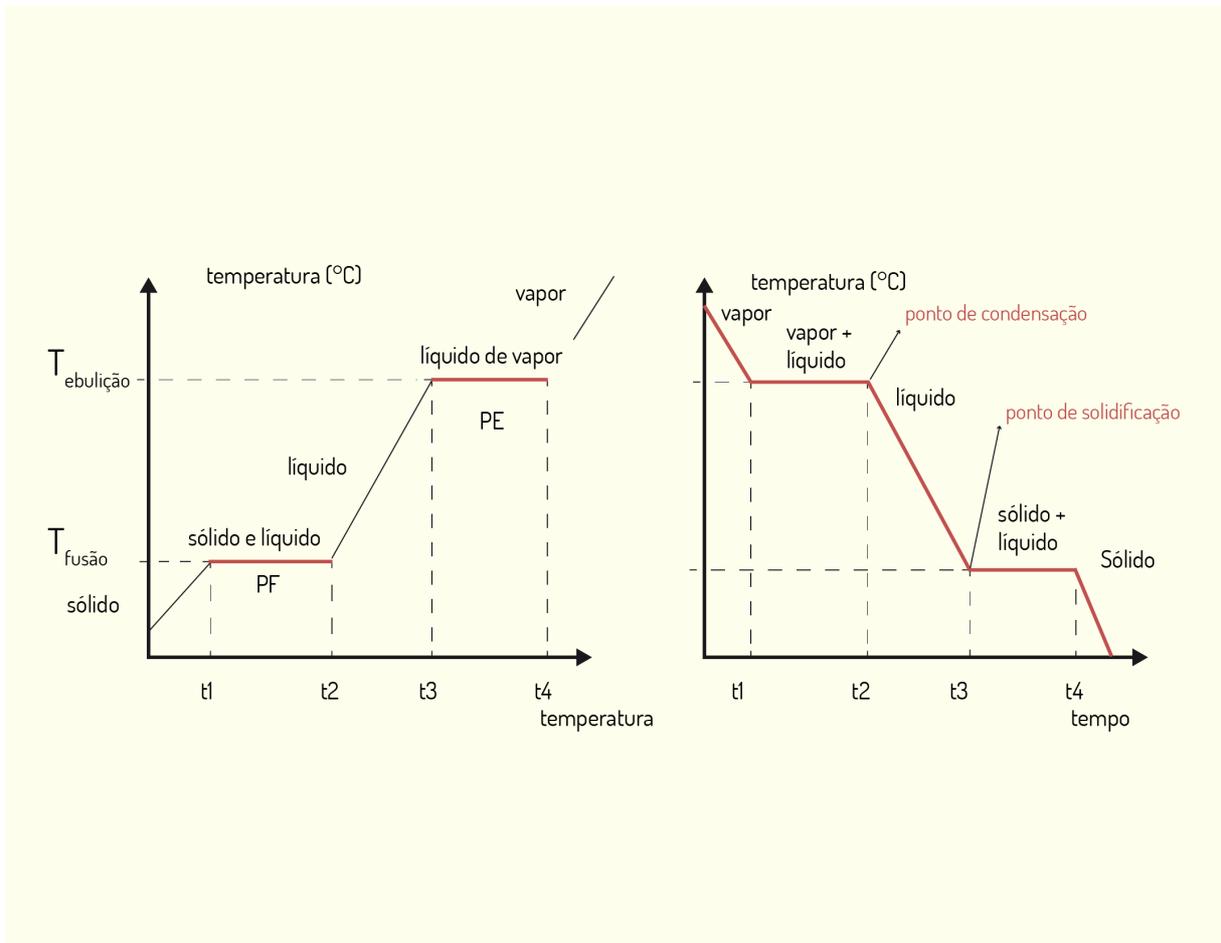
- Ressublimação (deposição): transformação do estado gasoso para o sólido com redução de energia do sistema.
- Ionização: transformação do estado gasoso em plasma com aumento de energia do sistema.
- Recombinação: transformação de plasma em estado gasoso com redução de energia do sistema.



3FIGURA 14.24 - Mudanças de estado físicos FONTE: Merisalu, 123RF.

A mudança de fase engloba tanto o calor sensível como o calor latente discutidos na unidade II - Leis de conservação. Isso ocorre porque, inicialmente, é necessário realizar um aumento ou diminuição da temperatura (calor sensível) do sistema até que ele atinja a

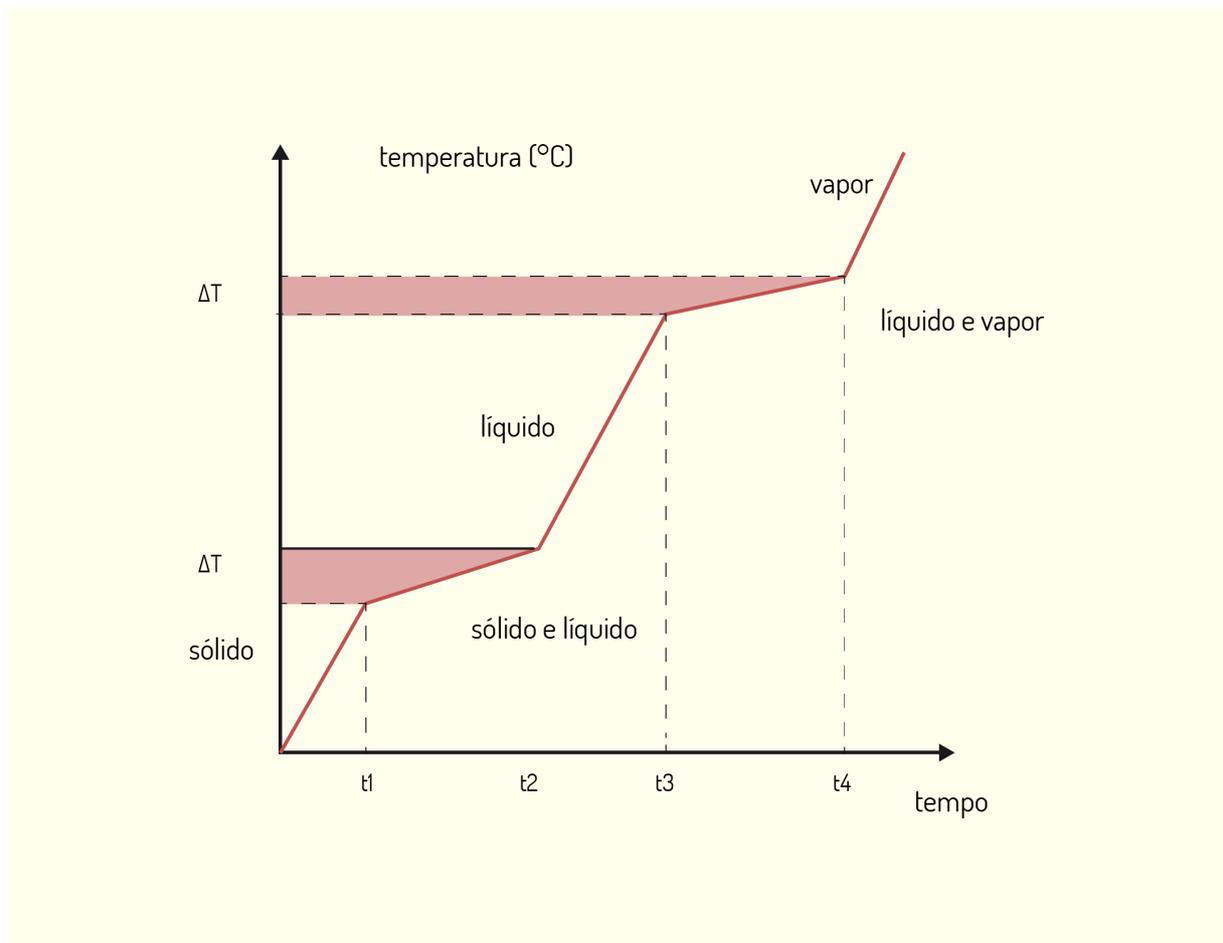
temperatura de mudança de fase desejada. Em seguida (já na mudança de fase), ocorre a transferência de calor latente entre as duas fases que coexistem em equilíbrio à temperatura constante até que toda a substância mude de fase como pode ser observado na Figura 3.15.



3FIGURA 15.24 - Curvas de aquecimento (a) e congelamento (b) para uma substância pura FONTE: Fogaça (on-line).

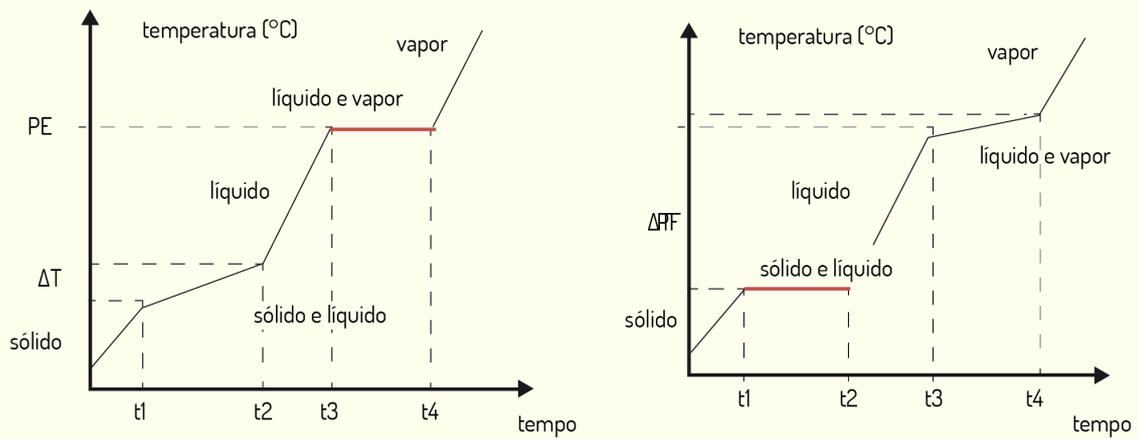
Nas curvas de aquecimento e de resfriamento (Figura 3.15), podem-se observar o ponto de fusão ou de congelamento e o ponto de ebulição ou de condensação, que consistem basicamente nas temperaturas em que ocorrem as transformações sólido-líquido ($T_{\text{fusão}}$) e líquido-vapor ($T_{\text{ebulição}}$), respectivamente. Usualmente, utilizamos os termos pontos de fusão e de ebulição, quando tratamos de curvas de aquecimento (Figura 3.15a), e os termos pontos de congelamento e de condensação, quando nos referimos às curvas de congelamento (Figura 3.15b).

Diferentemente do comportamento apresentado pelas substâncias puras, a mudança de fase para as misturas não ocorre a uma temperatura fixa, isto é, em um platô, mas em uma faixa de temperatura, de forma a deslocar ligeiramente o equilíbrio de fases como apresentado na Figura 3.16. Esse fenômeno ocorre devido à interação intermolecular entre as diferentes substâncias que compõem a matéria.



3FIGURA 16.24 - Mudança de estado físico para misturas FONTE: Fogaça (on-line).

Existem dois tipos de misturas, porém, as que merecem destaque são as azeotrópicas e as eutéicas, cujos comportamentos podem ser observados na Figura 3.17. As misturas azeotrópicas (Figura 3.17a) compreendem as matérias que apresentam um comportamento de substância pura na ebulição/condensação e de mistura na fusão/congelamento; enquanto que as eutéicas (Figura 3.17b) possuem um comportamento de mistura na etapa de ebulição/condensação, mas de substância pura na fusão/congelamento.



3FIGURA 17.24 - Comportamento de misturas azeotrópicas (a) e eutéicas (b) nas mudanças de fase FONTE: Fogaça (on-line).

Agora é hora de colocar em prática o conteúdo que você estudou até este ponto. Para isso, vamos realizar uma atividade de aprendizagem.

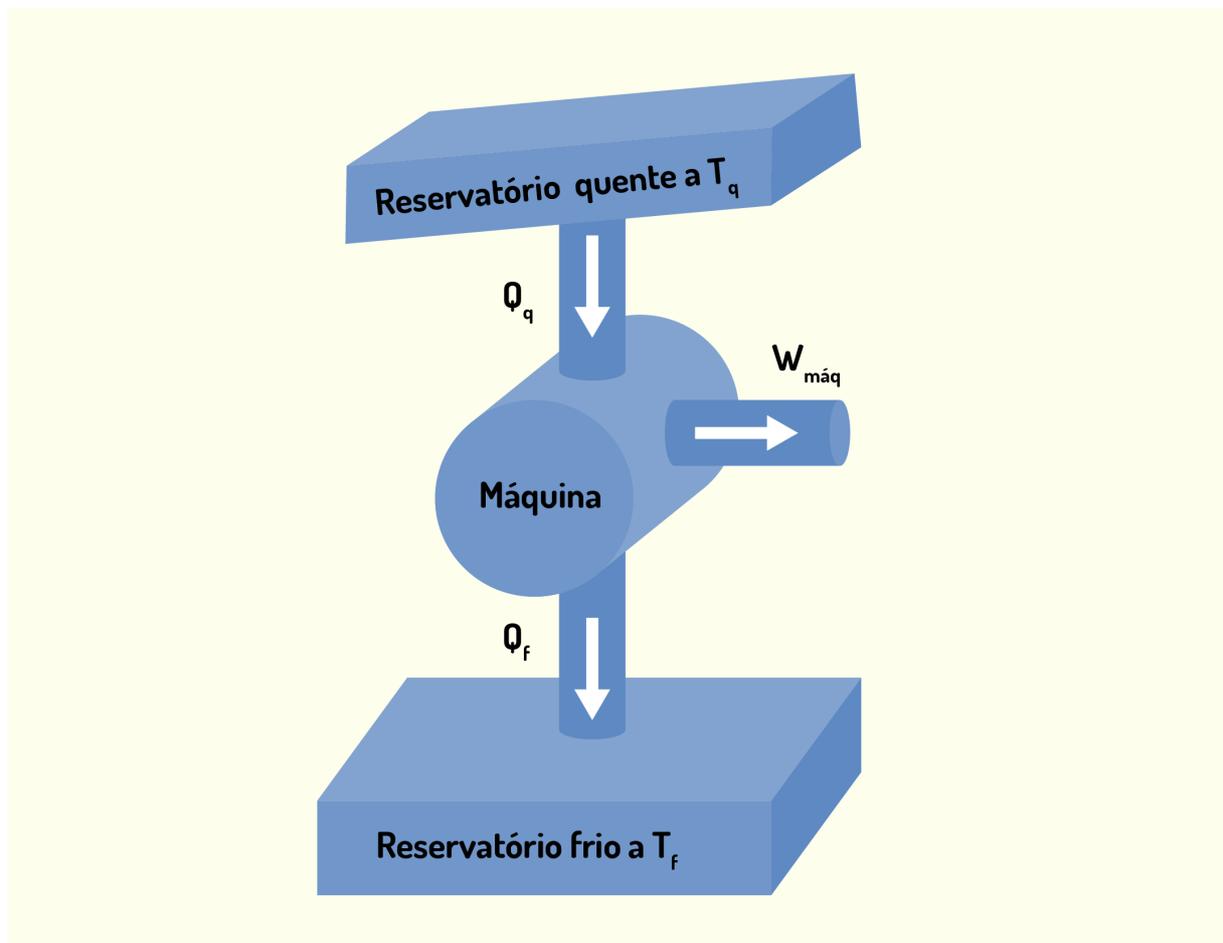
Segunda lei da termodinâmica e máquinas térmicas

Assim como apresentado na unidade II - Leis de conservação -, segundo a Primeira Lei da Termodinâmica, a energia de um sistema pode ser convertida em diferentes tipos de energia, mas será sempre conservada. No entanto, na prática, existem algumas conversões que ditam o sentido da reação, isto é, apesar de a energia ser conservada, a reação segue um sentido natural. É baseado nesse raciocínio que a Segunda Lei da Termodinâmica é enunciada. Para que esse conceito fique mais claro, vamos aos exemplos:

- O calor sempre flui do material mais quente para o mais frio.
- Um sistema isolado tende a atingir um estado de equilíbrio.
- Um objeto pode ser lançado ao solo, mas, uma vez no solo, não armazena energia suficiente para que saia do repouso e comece a saltar sem a presença de uma força externa.
- As moléculas de diferentes gases tendem a se misturar espontaneamente.

Como a física está intimamente ligada com o avanço industrial, a observação do sentido de conversão da energia foi utilizada para explicar o que era observado nas máquinas térmicas, que são equipamentos utilizados para geração de energia a partir da combustão de combustíveis fósseis.

Para uma maior compreensão, temos que as máquinas térmicas são dispositivos que operam em um sistema cíclico e que têm como objetivo a transformação máxima de calor em trabalho. Para isso, as máquinas retiram calor de um reservatório térmico quente com temperatura T_q e transformam a maior parte dessa energia em trabalho ($W_{máq}$). No entanto, a fração de energia que a máquina não consegue converter em trabalho é, então, transferida na forma de calor para outro reservatório térmico de temperatura mais baixa T_f , como representado como na Figura 3.18.



3FIGURA 18.24 - Representação do funcionamento de uma máquina térmica, em que parte do calor absorvido (Q_q) pela máquina é transformado em trabalho ($W_{máq}$) e parte é transferido para um reservatório frio (Q_f) FONTE: Serway e Jewett Jr. (2011, p. 636).

A partir das observações com as máquinas térmicas, Kelvin-Planck enunciaram a Segunda Lei da Termodinâmica como **"Nenhum sistema pode absorver calor de um único reservatório e convertê-lo inteiramente em trabalho, sem que resultem outras variações no sistema e no ambiente que o cerca"** (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 636). Esse enunciado é equivalente ao que Clausius afirmou como sendo a segunda lei, em que **"Um processo cujo único resultado efetivo seja o de retirar calor de um reservatório frio e liberar a mesma quantidade de calor para um reservatório quente é impossível"** (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 636). Ou seja, enquanto a primeira lei aborda as conversões de energia, a segunda lei trata basicamente do sentido em que essa conversão é possível.

Eficiência das máquinas térmicas

Por se tratar de um sistema cíclico, a máquina térmica não apresenta variação de sua energia interna ($\Delta U = 0$) como visto na unidade II, isto é, os estados inicial e final do sistema são iguais ($U_i = U_f$). Aplicando a primeira lei da termodinâmica para as máquinas térmicas, obtemos a Equação 8.

$$\Delta U = U_f - U_i = Q - W_{m\acute{a}q}$$

$$Q = W_{m\acute{a}q} \quad (8)$$

Nesse caso, no entanto, Q representa a energia líquida transferida na forma de calor e convertida em trabalho, como representado na Equação 9:

$$Q = Q_q - Q_f \quad (9)$$

em que Q_q é o calor retirado do reservatório térmico quente, e Q_f é o calor cedido ao reservatório térmico frio. Portanto, temos que o trabalho realizado pelas máquinas térmicas pode ser reescrito pela Equação 10:

$$W_{m\acute{a}q} = Q_q - Q_f \quad (10)$$

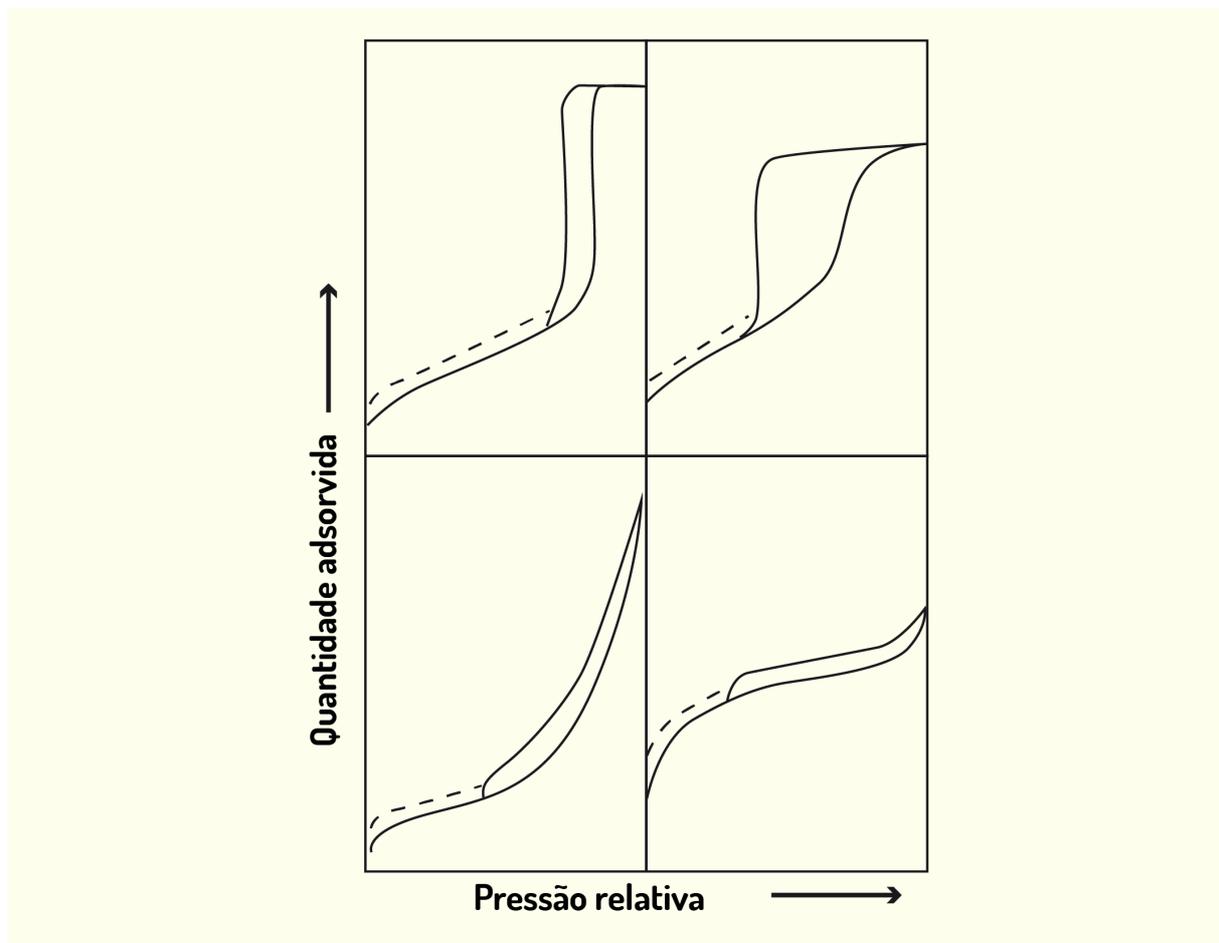
A eficiência térmica (e) de uma máquina térmica, por sua vez, consiste na fração de calor fornecido pelo reservatório quente que é convertida em trabalho, como apresentado pela Equação 11:

$$e = \frac{W_{m\acute{a}q}}{Q_q} = \frac{Q_q - Q_f}{Q_q} = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} \quad (11)$$

Reversibilidade

Os processos são ditos reversíveis quando podem retornar ao seu estado inicial ao realizar o mesmo caminho de ida, mas no sentido contrário. Isso é possível pelo fato de serem formados por uma série de estados infinitesimais de equilíbrio. Nesse caso, os gradientes de pressão, temperatura e/ou velocidade devem ser inexistentes ou muito pequenos (infinitesimais), de forma que não haja fluxos internos ou dissipação viscosa. Apesar de ser considerada uma idealização, pode ser utilizada como uma aproximação para sistemas reais que acontecem em velocidades extremamente baixas em relação à escala de tempo macroscópica, uma vez que, nesses casos, em cada instante, o sistema se deslocará pouco do estado de equilíbrio.

A irreversibilidade, por sua vez, está relacionada com a falta de simetria entre os caminhos de ida e de volta de um processo visando atingir as mesmas condições iniciais e também com a impossibilidade de realizar o caminho de volta, como em casos de transferência de calor de um material frio em direção a um material quente naturalmente, por exemplo. Pode-se dizer que todo processo real é irreversível, por apresentar fluxos internos e/ou dissipação viscosa resultante de gradientes de temperatura, pressão e/ou velocidade. Um exemplo bastante visual é a formação de diferentes tipos de histerese em ciclos de adsorção e dessorção de substâncias porosas como podem ser observados na Figura 3.19.



3FIGURA 19.24 - Exemplos de histereses formadas em processos irreversíveis de adsorção e dessorção de substâncias porosas. FONTE: King (2017, p. 2011).

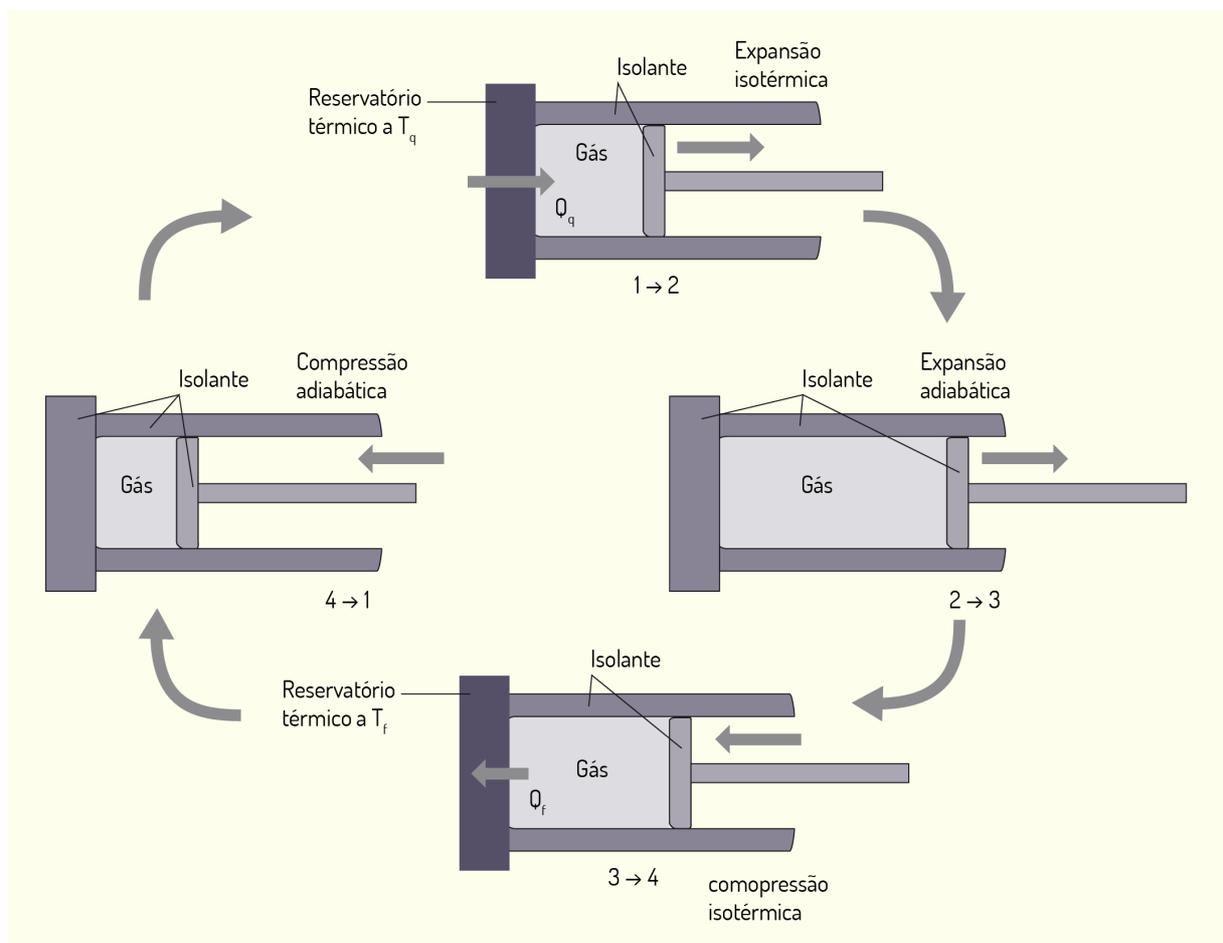
Máquina de Carnot

Como enunciado pela Segunda Lei da Termodinâmica, é impossível uma máquina térmica apresentar uma eficiência de 100 %, mas você saberia dizer qual é a eficiência máxima que ela pode operar então? Em 1824, o engenheiro francês Sadi Carnot enunciou o seguinte teorema: ***“Nenhuma máquina trabalhando entre dois dados reservatórios térmicos pode ser mais eficiente do que uma máquina reversível trabalhando entre os dois reservatórios”*** conhecido como o Teorema de Carnot (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 643).

Para uma melhor compreensão de uma máquina reversível descrita por Carnot, imagine a máquina como um sistema de pistão em que todas as paredes em contato com o fluido de trabalho (gás ideal) sejam isoladas e que não exista atrito na movimentação do pistão. O

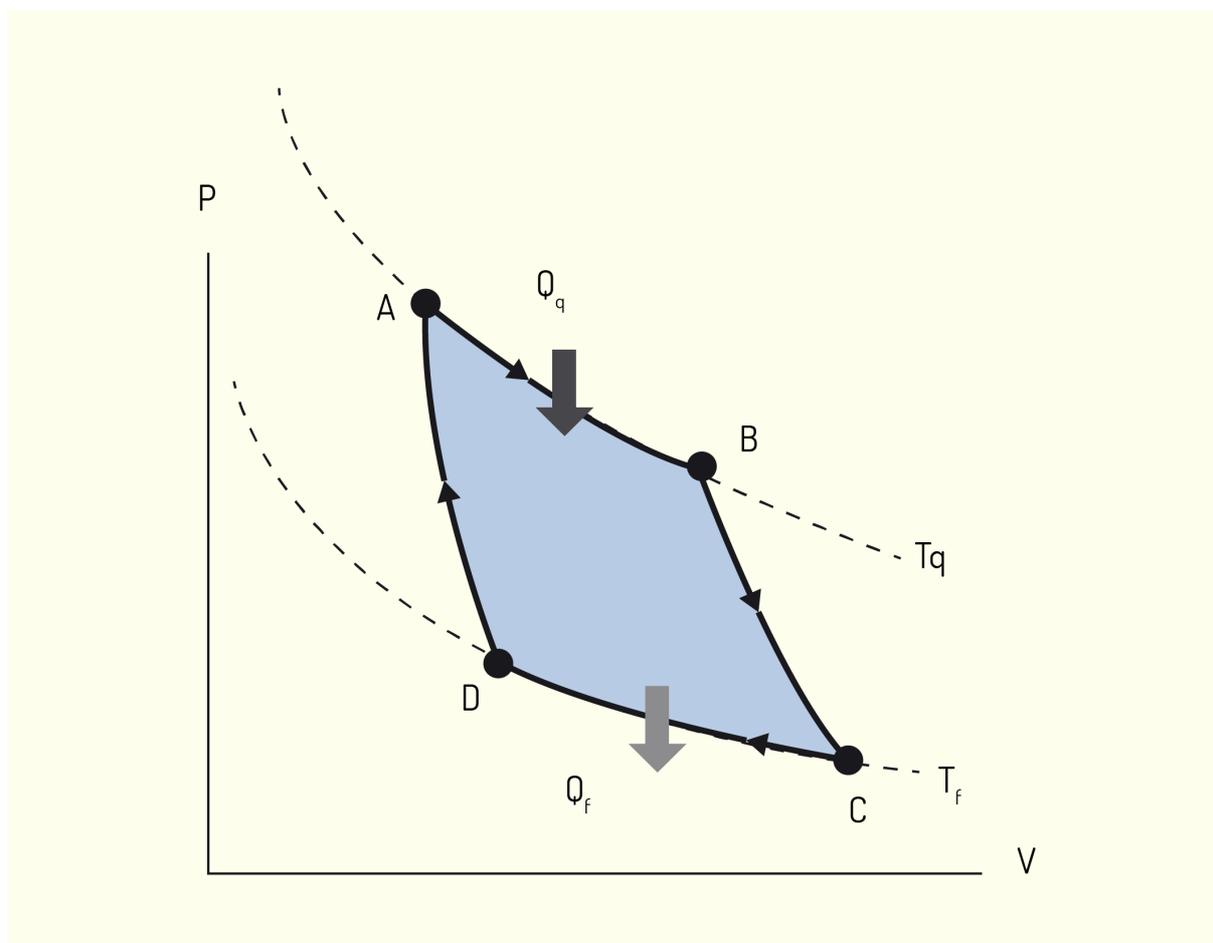
funcionamento dessa máquina pode ser observada na Figura 3.20 e consiste basicamente em:

1. O gás ideal absorve calor do reservatório quente à temperatura de T_q e sofre uma expansão isotérmica.
2. Em seguida, o gás sofre uma expansão adiabática em que parte da sua energia interna é utilizada para a realização de trabalho de forma a empurrar o pistão, aumentando o volume ocupado pelo gás e ocasionando a redução da temperatura para T_f .
3. A etapa seguinte consiste em uma compressão isotérmica em que o gás fornece calor para o reservatório frio.
4. E para fechar o ciclo, ocorre uma compressão adiabática até que o gás atinja novamente a temperatura T_q .



3FIGURA 20.24 - Etapas do ciclo de Carnot utilizando um gás ideal como fluido de trabalho para uma máquina reversível
FONTE: (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 645)

Esse ciclo pode também ser representado em um diagrama de pressão versus volume como apresentado na Figura 3.21.



3FIGURA 21.24 - Representação do ciclo de Carnot no diagrama pressão vs volume FONTE: Serway e Jewett Jr. (2011 p. 639).

A manipulação matemática dos conceitos termodinâmicos para o ciclo de Carnot, comprovou que, para esse ciclo, a razão entre o calor fornecido ao reservatório frio (Q_f) e o calor proveniente do reservatório quente absorvido pelo gás (Q_q) é igual a razão entre as temperaturas fria (T_f) e quente (T_q) dos respectivos reservatórios como apresentado pela Equação 12:

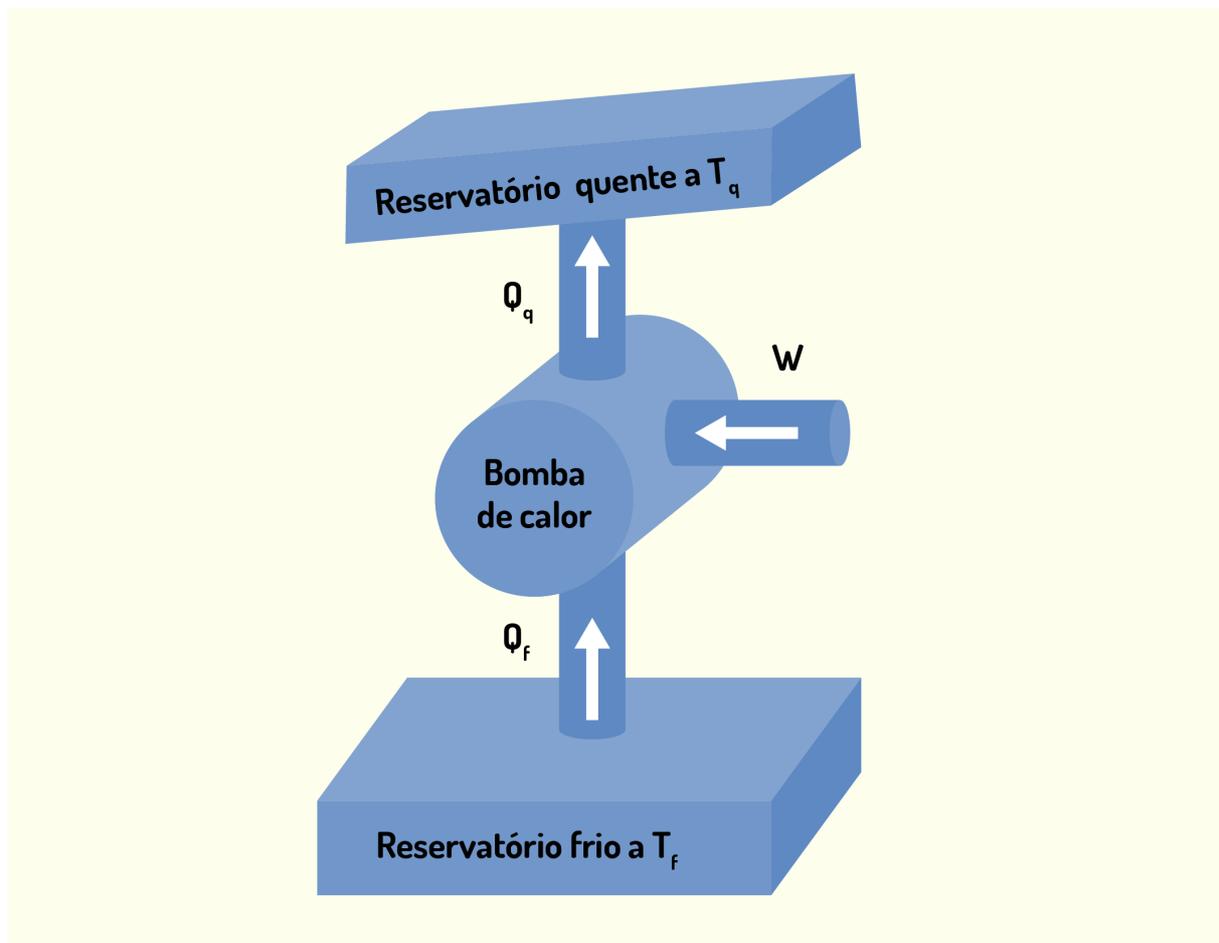
$$\frac{Q_f}{Q_q} = \frac{T_f}{T_q} \quad (12)$$

Assim, a eficiência térmica para o ciclo de Carnot (e_c) pode ser expressa de acordo com a Equação 13:

$$e_c = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (13)$$

Refrigeradores

Os refrigeradores podem ser entendidos como máquinas térmicas que funcionam de forma inversa, isto é, retiram calor do reservatório frio e liberam calor para o reservatório quente como apresentado na Figura 3.22.



3FIGURA 22.24 - Representação esquemática do funcionamento de um refrigerador FONTE: Serway e Jewett Jr. (2011, p. 641).

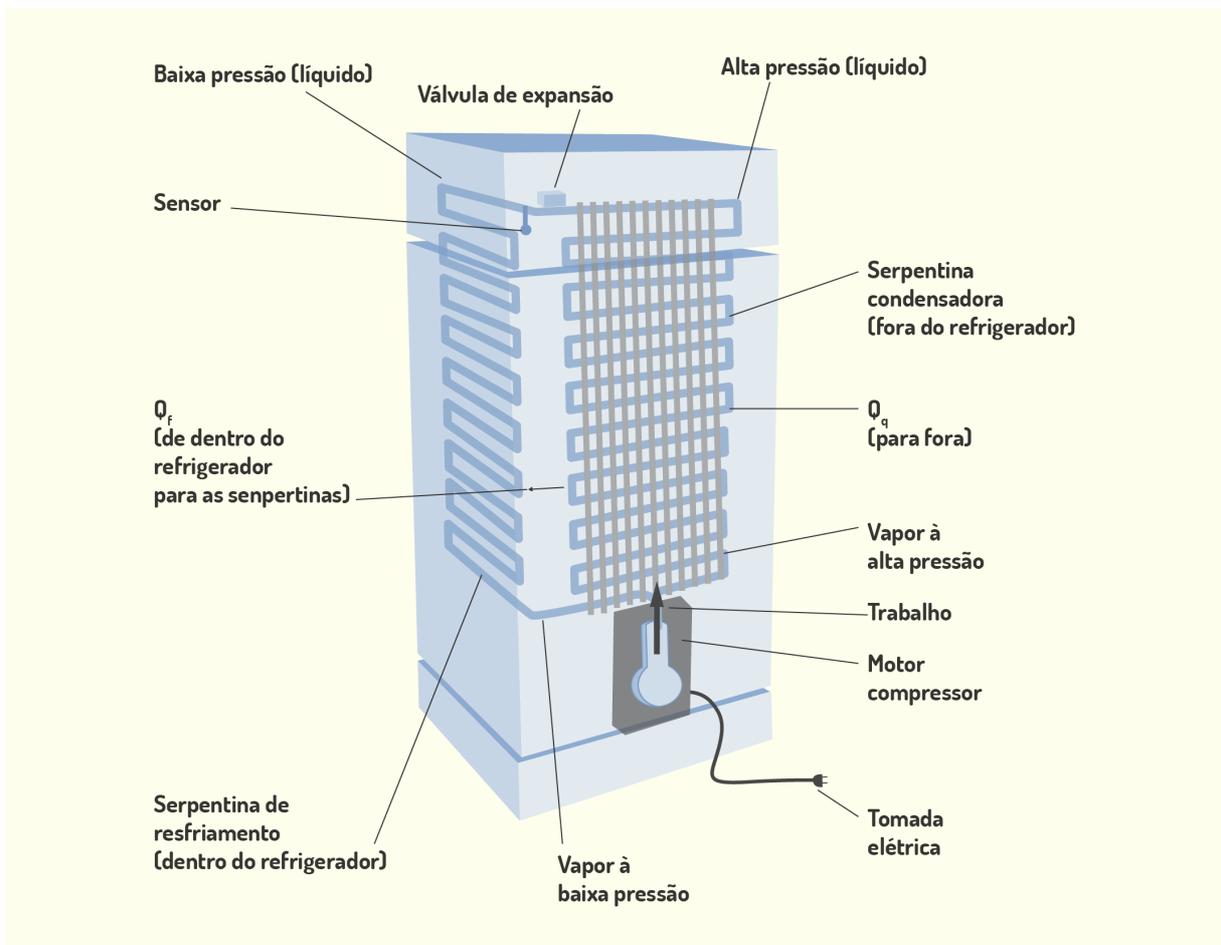
Para que isso seja possível, é necessária a adição de bombas de calor que consistem em dispositivos que transferem energia para o fluido de trabalho, permitindo que o sentido inverso ao natural ocorra. Por isso, o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica para os refrigeradores, segundo Tipler e Mosca (2009, p. 640), pode ser descrito como **"É impossível para um refrigerador, operando em um ciclo, produzir como único efeito o de retirar calor de um corpo frio e liberar na mesma quantidade de calor para um corpo quente"**. Os refrigeradores apresentam quatro equipamentos principais:

- Evaporador: absorve calor do ambiente interno do refrigerador (Q_f), fornecendo energia suficiente para que o fluido de trabalho seja transformado em vapor saturado ou ligeiramente superaquecido.
- Compressor: responsável pela compressão isoentrópica (W) do fluido de trabalho até atingir a pressão de operação do condensador de forma que o fluido de trabalho

encontra-se em uma condição completa de superaquecimento.

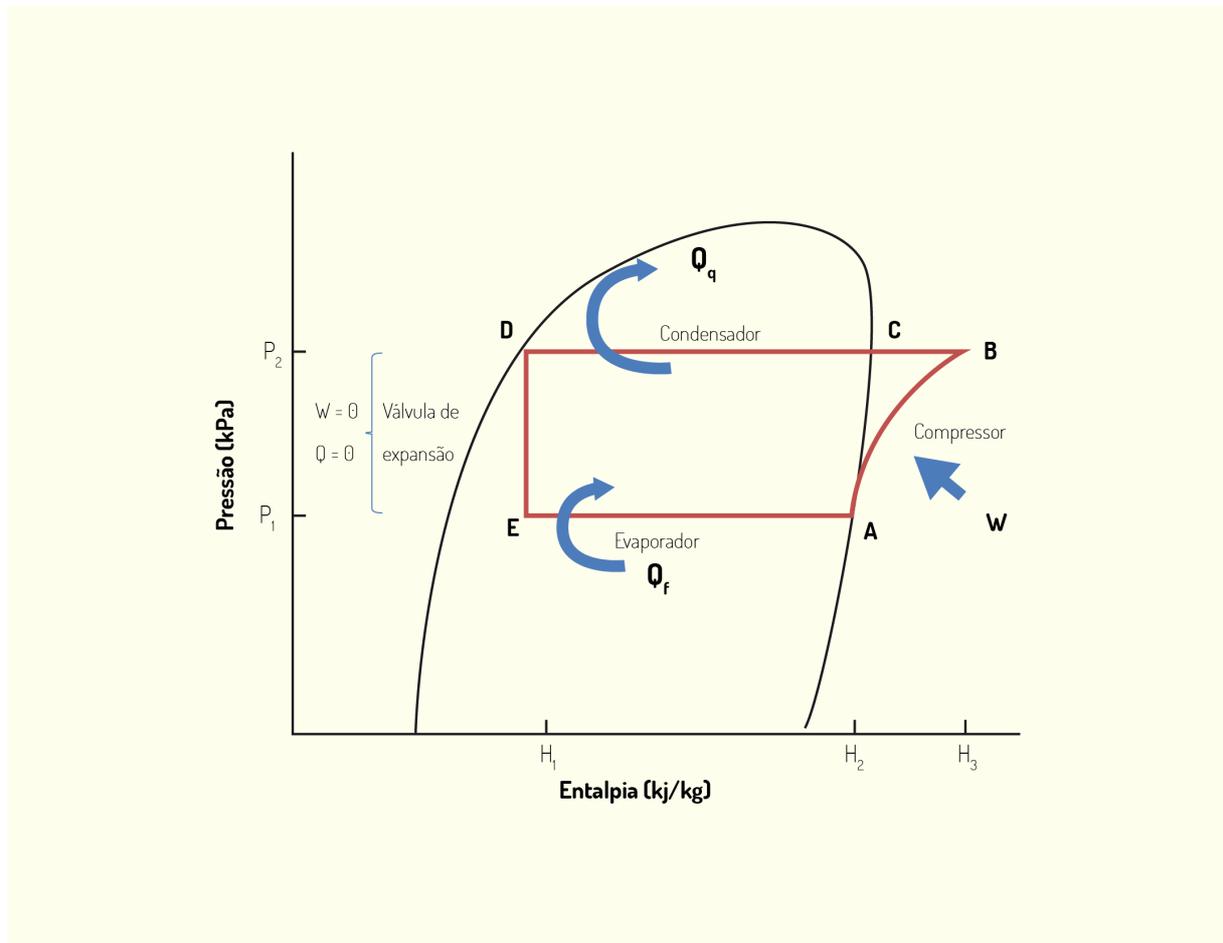
- Condensador: responsável por liberar o calor do fluido de trabalho em direção à parte externa do refrigerador (Q_q), transformando o fluido em líquido saturado ou levemente sub-resfriado.
- Válvula de expansão: expansão do fluido de trabalho até atingir a pressão de operação do evaporador com transformação parcial do fluido de trabalho em vapor, obtendo uma condição de equilíbrio líquido-vapor.

Os equipamentos responsáveis pelo funcionamento de um refrigerador podem ser observados na Figura 3.23.



3FIGURA 23.24 - Representação de um refrigerador de uso doméstico FONTE: Tipler e Mosca (2009, p. 641).

O ciclo de refrigeração em condições saturadas pode ser apresentado em um diagrama pressão versus entalpia como apresentado na Figura 3.24.



3FIGURA 24.24 - Representação esquemática de um ciclo de refrigeração genérico em um diagrama pressão versus entalpia FONTE: Singh e Heldman (2009, p. 472)

A eficiência dos refrigeradores é determinada pelo coeficiente de desempenho (CD) que pode ser calculado pela Equação 14.

$$CD = \frac{Q_f}{W} \quad (14)$$

A partir dos conhecimentos adquiridos nesta seção, vamos realizar uma atividade de aprendizagem para uma maior compreensão do conteúdo.

<<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>>

Entropia

Como visto no ciclo de refrigeração, a compressão ocorre em uma etapa isoentrópica, isto é, a entropia entre o estado inicial e final da compressão são iguais. Mas você saberia definir o que significa a entropia? Conceitualmente, a entropia (S) é uma função termodinâmica que mede o grau de desordem de um sistema. De forma geral, podemos entender a entropia como a propriedade que mede a reversibilidade e a espontaneidade de um processo, ou seja, indica o caminho natural que o sistema segue e, por isso, está relacionada com a Segunda Lei da Termodinâmica, podendo ser apresentada conforme a Equação 15:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (15)$$

em que dS é a variação infinitesimal da entropia ($J K^{-1}$), dQ é a quantidade de calor infinitesimal transferida para um sistema reversível (J) e T é a temperatura absoluta do sistema no ponto por onde há troca de calor (K).

Por meio da definição apresentada para entropia, pode-se concluir que, em um sistema em que ocorre troca de calor e trabalho com a vizinhança, apenas o calor promoverá variação de entropia do sistema. Além disso, o balanço geral para entropia é descrito pela Equação 16:

$$\frac{dS}{dt} = \sum m_i^o S_i + \sum \frac{Q_i}{T_j} + S_{ger} \quad (16)$$

em que $\frac{dS}{dt}$ indica a variação de entropia do sistema, $\Sigma m_i^o S_i$ representa a entropia associada com os fluxos mássicos através das fronteiras, $\Sigma \frac{Q_j}{T_j}$ representa a variação de entropia associada com a troca de calor e S_{ger} indica a entropia gerada no sistema.

Assim, pode-se observar que cada elemento de massa que cruza as fronteiras do sistema carrega consigo uma quantidade de entropia. Por isso, para os sistemas abertos que apresentam entrada e saída de fluxos de massa através das suas fronteiras, como definido na unidade II, o balanço de entropia é igual ao apresentado pela Equação 16.

Para um sistema fechado, por sua vez, em que há apenas transferência de energia nas fronteiras do sistema ($\Sigma m_i^o S_i = 0$), o balanço de entropia pode ser reduzido à Equação 17.

$$\frac{dS}{dt} = \Sigma \frac{Q_j}{T_j} + S_{ger} \quad (17)$$

Para um sistema adiabático em que não há transferência de energia na forma de calor ($\Sigma \frac{Q_j}{T_j} = 0$), tem-se o balanço de entropia apresentado pela Equação 18.

$$\frac{dS}{dt} = \Sigma m_i^o S_i + S_{ger} \quad (18)$$

E o balanço de entropia para um sistema em estado estacionário ($\frac{dS}{dt} = 0$) é indicado na Equação 19.

$$0 = \Sigma m_i^o S_i + \Sigma \frac{Q_j}{T_j} + S_{ger} \quad (19)$$

Uma observação importante é que, para sistemas em equilíbrio reversível, $S_{ger} = 0$.

Relação entre a entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica

Assim como visto na seção anterior, a Segunda Lei da Termodinâmica trata do sentido natural que os processos seguem. Por isso, pode-se afirmar que a entropia também representa uma das formas do enunciado dessa lei, uma vez que determina que todo o processo tende à desordem naturalmente.

Para os processos adiabáticos reversíveis, como o caso da etapa de compressão do ciclo de refrigeração ou então em qualquer ciclo reversível como a máquina de Carnot, teremos a variação de entropia igual a zero ($\Delta S = 0$) e, assim, o processo é denominado de isoentrópico.

Os processos irreversíveis, como a expansão livre de um gás ou o fluxo de calor entre dois corpos com diferentes temperaturas, por sua vez, estão relacionados com um aumento de entropia.

Assim, pode-se concluir que, para todos os sistemas, a entropia aumenta ou permanece constante.

Relação entre a entropia e outras propriedades termodinâmicas

Algumas grandezas termodinâmicas podem ser obtidas a partir dos balanços de energia e de entropia, como veremos a seguir.

Energia livre de Helmholtz (A)

Considere um sistema fechado, isotérmico e a volume constante que apresente trabalho de eixo (W_s):

- Balanço de energia: $\frac{dU}{dt} = Q + W_s \Rightarrow U_2 - U_1 = Q + W_s$
- Balanço de entropia: $\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{T} + S_{ger} \Rightarrow S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} + S_{ger}$

Ao isolar o termo do calor (Q) no balanço de energia e substituí-lo no balanço de entropia, tem-se:

$$W_s = (U_2 - TS_2) - (U_1 - TS_1) + TS_{ger}$$

Por definição, a energia livre de Helmholtz (A) está expressa pela Equação 20.

$$A = U - TS \quad (20)$$

Logo, $W_s = A_2 - A_1 + TS_{ger}$

Considerando o mesmo sistema (fechado, isotérmico, a volume constante), mas em sua forma reversível ($S_{ger} = 0$), teremos:

$$W_s^{rev} = \Delta A$$

Assim, podemos concluir pela Equação 21 que:

$$W_s = W_s^{rev} + TS_{ger} \quad (21)$$

Energia livre de Gibbs (G)

Considere um sistema fechado, isotérmico e isobárico (pressão constante) que apresente trabalho de eixo (W_s):

- Balanço de energia: $\frac{dU}{dt} = Q + W_s + W \Rightarrow U_2 - U_1 = Q + W_s + (-P\Delta V)$
- Balanço de entropia: $\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{T} + S_{ger} \Rightarrow S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} + S_{ger}$

Ao isolar o termo do calor (Q) no balanço de energia e substituí-lo no balanço de entropia, tem-se:

$$W_s = (U_2 + PV_2 - TS_2) - (U_1 + PV_1 - TS_1) + TS_{ger}$$

Por definição, a energia livre de Gibbs (G) está expressa pela Equação 22.

$$G = U + PV - TS = H - TS \quad (22)$$

Logo, $W_s = G_2 - G_1 + TS_{ger}$

Para um processo reversível, em que $S_{ger} = 0$, tem-se:

$$W_s^{rev} = \Delta G$$

Assim como apresentado na Equação 21, obtemos pela Equação 23:

$$W_s = W_s^{rev} + TS_{ger} \quad (23)$$

Uma observação importante é que o termo TS_{ger} pode ser considerado como a quantidade de energia mecânica convertida em energia térmica.

Equação geral

Uma equação mais geral pode ser utilizada de forma que, para casos específicos, restrições sejam aplicadas e obtenha-se a equação adequada para cada sistema. Para isso, considere um sistema aberto (um fluxo de massa), com variações de energias cinética e potencial desprezíveis, fluxos de calor e de massa sob temperatura constante e tanto o trabalho de eixo como o de expansão do sistema existentes. Os balanços de massa, de energia e de entropia referentes a esse sistema são apresentados pelas Equações 24, 25 e 26, respectivamente.

- Balanço de massa: $\frac{dm}{dt} = m^0$ (24)<
- Balanço de energia: $\frac{dU}{dt} = m^0 H + Q + W_s - P \frac{dV}{dt}$ (25)<
- Balanço de entropia: $\frac{dS}{dt} = m^0 S + \frac{Q}{T} + S_{ger}$ (26)<

Substituindo o balanço de massa nos demais balanços, multiplicando o balanço de entropia pela temperatura, realizando uma subtração entre o balanço de energia e de entropia e considerando um intervalo de tempo dt para a análise, obtém-se a expressão geral

apresentada na Equação 27.

$$dU = TdS + Gdm + W_s - PdV - S_{ger} \quad (27)$$

Algumas das restrições que podem ser impostas aos sistemas e a consequência na equação geral são apresentadas a seguir:

- Processo reversível ($S_{ger} = 0$): $dU = TdS + Gdm + W_s - PdV$
- Sistema fechado ($dm = 0$): $dU = TdS + W_s - PdV$
- Sistema com volume constante, fechado e reversível: $dU = TdS + W_s$
- Sistema apenas com trabalho de expansão, fechado e reversível: $dU = TdS - PdV$

Depois de tanto conteúdo, que tal uma pausa para a realização de um exercício? Vamos lá!

<<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>>



Fique por dentro

<<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>>

Vamos aproveitar para nos atualizarmos no Fique por Dentro em relação a conceitos previamente estabelecidos, mas que são colocados em prova todos os dias pela ciência!

<<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>>

O conceito de zero absoluto estabelecido por Kelvin como a menor temperatura possível, cuja medição seria impossível na prática, foi desacreditada com experimentos publicados na revista científica Nature por cientistas alemães que atingiram a temperatura de um sistema alguns bilionésimos abaixo de 0 K, como

divulgado no site G1 Ciência e Saúde no dia 06 de janeiro de 2013 na seguinte reportagem: <<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>>

g1.globo.com <<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2013/01/fisicos-alemaes-conseguem-atingir-temperatura-abaixo-do-zero-absoluto.html>>

Segue na íntegra o texto:

Físicos alemães conseguem atingir temperatura abaixo do zero absoluto. Equipe usou lasers e magnetismo para criar gás com átomos de potássio. Pesquisadores atingiram bilionésimos de grau abaixo de -273,15 °C.

Físicos da Universidade Ludwig Maximilian, em Munique, alcançaram pela primeira vez uma temperatura abaixo do zero absoluto, ao criar um gás quântico ultrafrio feito de átomos de potássio, usando lasers e magnetismo.

Os pesquisadores conseguiram chegar apenas alguns bilionésimos de 1 Kelvin - unidade básica internacional que mede a temperatura de um objeto - abaixo do zero absoluto (o equivalente a -273,15 °C). Os resultados estão publicados na edição desta sexta-feira (4) da revista "Science".

A nova técnica criada pelos alemães abre portas para o desenvolvimento de dispositivos quânticos e materiais com temperatura abaixo de 0 Kelvin. O novo gás também imita o comportamento da "energia escura" - força misteriosa que leva o Universo a se expandir a uma taxa cada vez mais rápida contra a força da gravidade - e poderia ajudar os astrônomos a entender a origem e a evolução do Universo.

Para acesso ao conteúdo original do artigo: www.nature.com <<http://www.nature.com/news/quantum-gas-goes-below-absolute-zero-1.12146>> .

Querido(a) aluno(a), você saberia explicar fisicamente por que os lagos congelam de cima para baixo?



Indicação de leitura

Nome do livro: Química Geral - Conceitos Essenciais

Editora: McGraw-Hill

Autor: CHANG, Raymond

ISBN: 85-86804-98-3

Comentário: Opção de livro para revisar conceitos de química que regem as interações entre moléculas que compõem a matéria e que estão intimamente associadas aos conceitos termodinâmicos.

UNIDADE IV

Eletromagnetismo

Luís Guilherme Gimenez de Souza

Paula Gimenez de Souza

Querido(a) aluno(a), até agora, você foi capaz de estudar e entender diversos pontos da Física, por exemplo, as leis de Newton, as propriedades da gravitação universal ou então as leis da termodinâmica. Nesta unidade, nós iremos estudar a força do eletromagnetismo, que é resultante da interação entre eletricidade e magnetismo. Um exemplo clássico da interação eletromagnética é o caso de uma bússola. Normalmente, a agulha da bússola aponta para o norte, pois é atraída pelo campo eletromagnético da Terra. Porém, se posicionarmos um fio com uma certa corrente elétrica fluindo nele, o campo eletromagnético resultante agirá mais intensamente sobre a agulha, fazendo com que ela mude de direção.

Força Elétrica

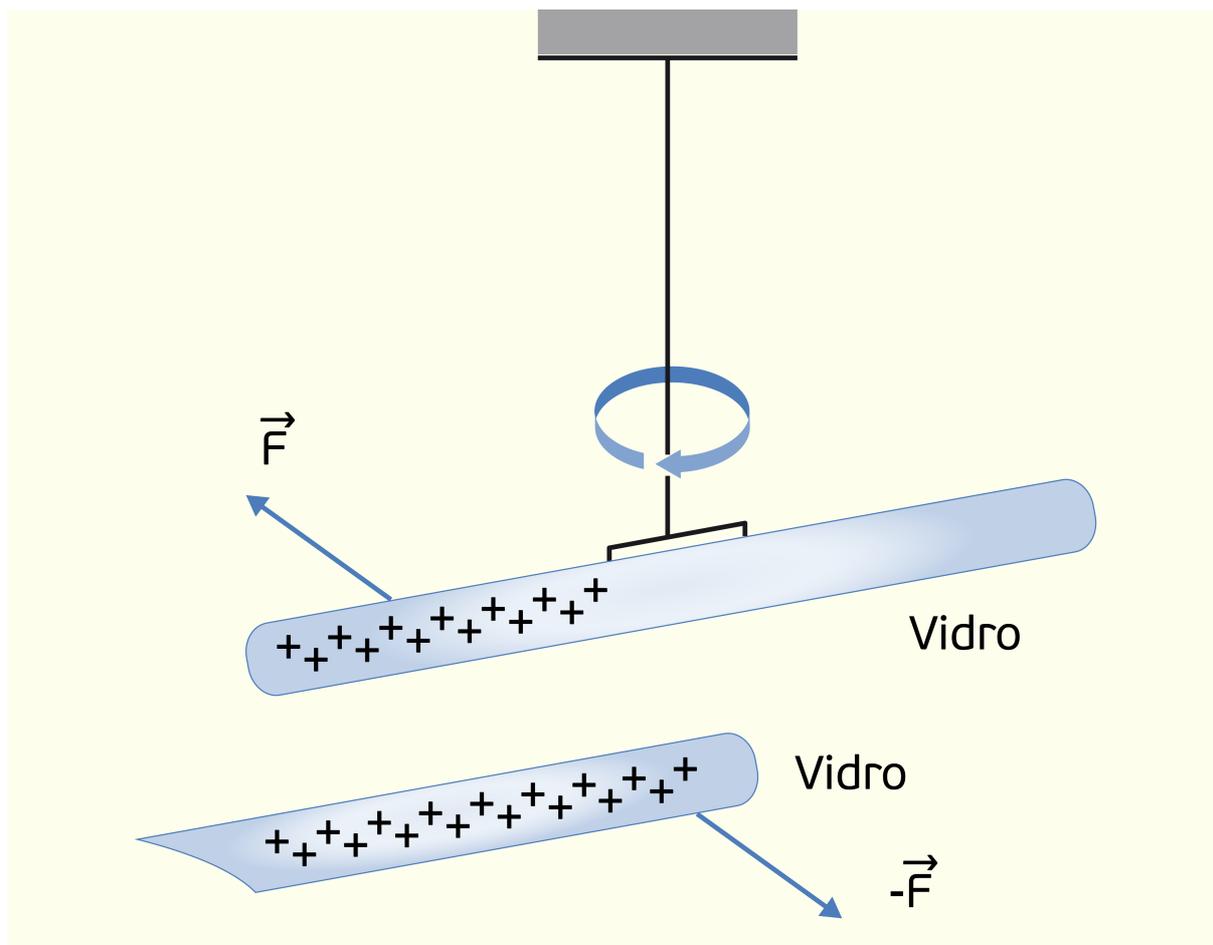
A caracterização da força elétrica pode ser um pouco abstrata e complicada de entender, pois não é algo que podemos ver ou tocar como conseguimos sentir a massa ou a força peso exercida sobre uma maçã quando a pegamos na mão. Para podermos entender como a força elétrica atua sobre os corpos carregados, será preciso utilizar diversos exemplos que ilustrem o resultado dessa atuação.

A descrição da força elétrica foi primeiramente feita pelo físico francês Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) no final do século XVIII. Por meio do uso de uma balança de torção, ele formulou a posteriormente chamada *Lei de Coulomb*, que é basicamente a formulação dos fenômenos de atração e repulsão que se manifestam em corpos eletricamente carregados.

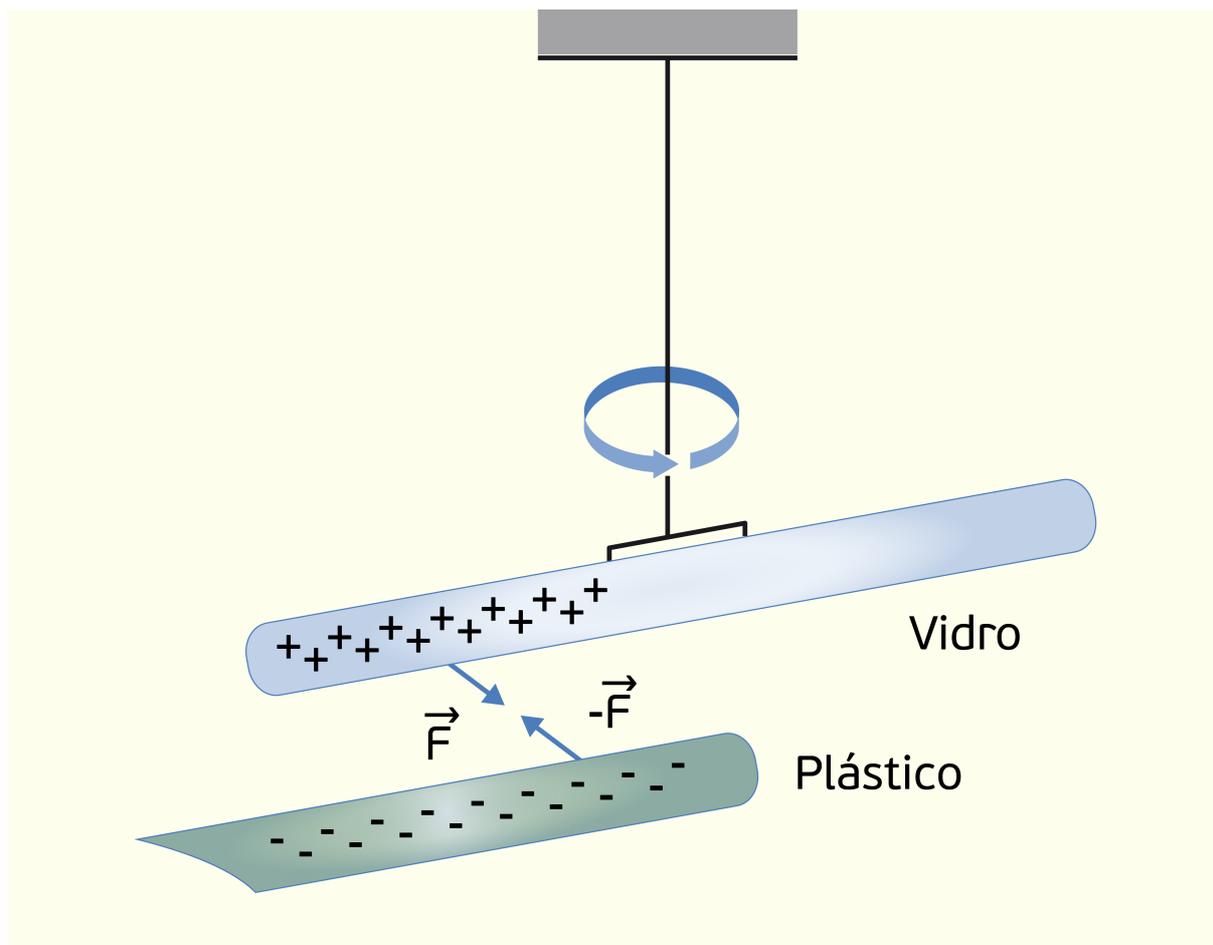
Para você poder entender completamente a força elétrica, vamos primeiro ver como devemos quantificar e caracterizar as cargas elétricas.

Carga Elétrica

Que tal começarmos a entender as cargas elétricas através de um exemplo bastante clássico? O que será descrito a seguir é bastante utilizado para explicar de maneira palpável a interação entre os diferentes tipos de cargas elétricas. O primeiro passo da experiência é pegar um bastão de vidro, esfregá-lo em um pedaço de seda e então pendurá-lo por um barbante como mostrado na Figura 4.1. Depois disso, esfregamos um outro bastão de vidro com o mesmo pedaço de seda. Se você tentar aproximar o segundo bastão do primeiro, aquele que está pendurado irá magicamente recuar em direção oposta. Agora pegue um bastão de plástico e o esfregue em um pedaço de lã. Se você o aproximar daquele bastão de vidro que está pendurado, ele será atraído pelo bastão de plástico, assim como ilustrado na Figura 4.2. Você sabe explicar por que isso acontece? Será que uma corrente de ar é produzida? Ou então algum tipo de vibração sonora?



4FIGURA 1.44 - Dois bastões de vidro carregados que se repelem FONTE: Halliday e Resnick (2012, p. 2).



4FIGURA 2.44 - Bastões de vidro e de plástico carregados que se atraem. FONTE: Halliday e Resnick (2012, p. 2).

Com essa experiência, por um acaso, você conseguiu perceber que existem tipos diferentes de forças e interações entre as cargas dos objetos? Na primeira experiência, ocorreu uma força de *repulsão*, ao passo que, na segunda atividade, houve uma *atração* entre os objetos. Depois de muito estudar e experimentar diversos tipos de materiais, os cientistas descobriram que essa diferença se deve ao tipo de *carga elétrica* transferida aos bastões quando os esfregamos com lã ou seda.

O cientista Benjamin Franklin (1706-1790) denominou os tipos de carga como **positiva** e **negativa**. Na grande maioria dos objetos, essas cargas estão completamente equilibradas (o número de partículas positivas é igual ao de partículas negativas) e, então, podemos falar que esses objetos são eletricamente **neutros**. Porém, quando, devido a algum fenômeno natural ou artificial, como no experimento realizado, o objeto é carregado com alguma carga elétrica, falamos que ele está com **excesso de carga**.

Na experiência citada anteriormente, quando esfregamos um bastão de vidro em um pedaço de seda, uma pequena carga negativa (**elétrons**) foi transferida do bastão à seda. Ao pendurarmos o bastão com um barbante, o estávamos isolando eletricamente e fazendo com que ele não transferisse o excesso de carga positiva (**prótons**) a nenhum outro objeto. Quando aproximamos outro bastão de vidro que também foi positivamente carregado, eles se repelem (como mostrado na Figura 4.1).

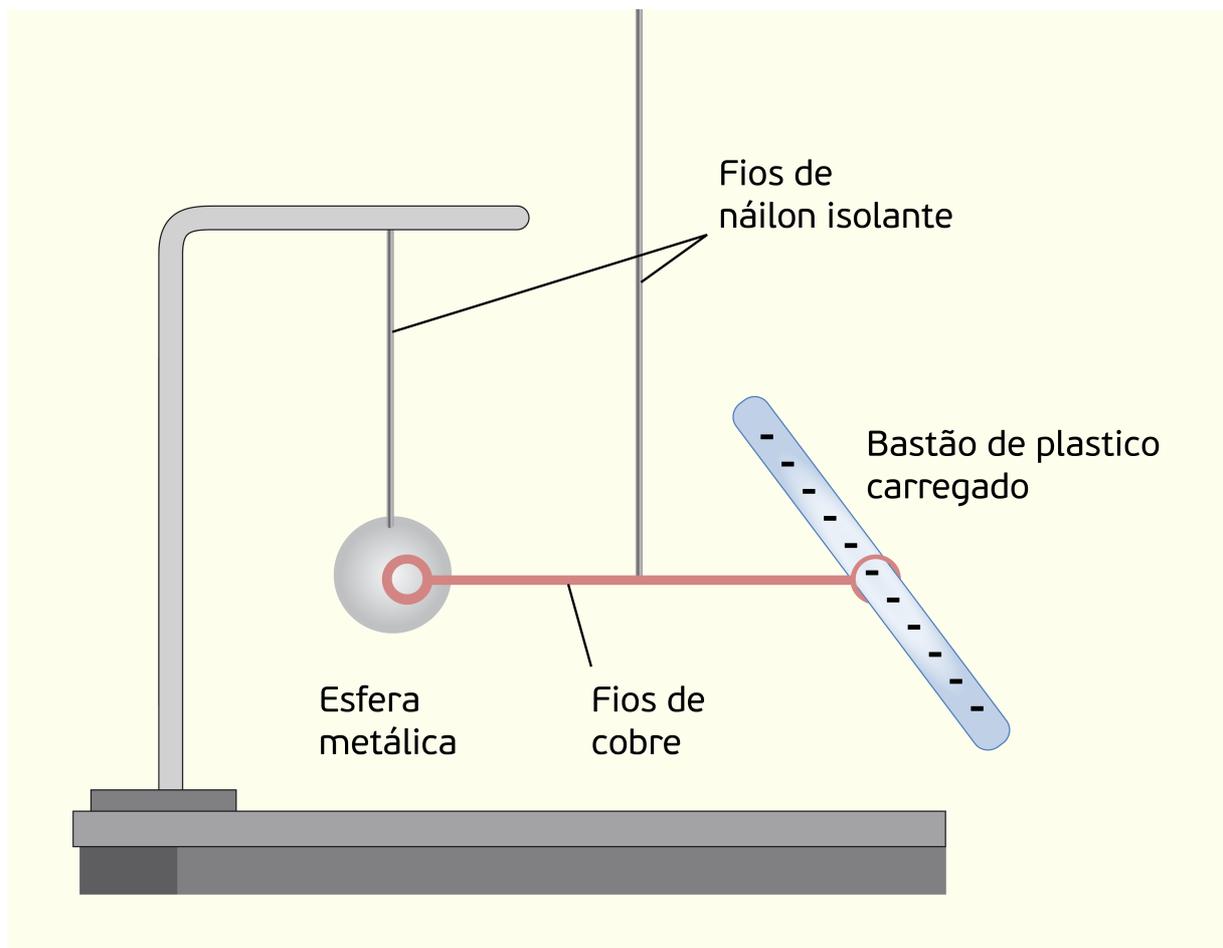
Quando esfregamos o bastão de plástico em um pedaço de lã, uma pequena carga negativa é transferida da lã para o plástico, tornando o bastão negativamente carregado. Ao aproximarmos o bastão de plástico do de vidro (como eles estavam com excessos de cargas diferentes), eles acabam se atraindo (Figura 4.2). Sendo assim, essas atrações não são um passe de mágica ou uma corrente de ar, e sim um resultado da interação entre objetos eletricamente carregados.

Condutores, isolantes e cargas induzidas

Agora que já sabemos quais são as cargas elétricas e aprendemos como funcionam as forças elétricas de repulsão e atração, podemos estudar como classificar alguns materiais de acordo com a facilidade que eles têm de deixar as cargas elétricas fluírem por eles. Você com certeza já deve ter utilizado uma fita isolante para algum trabalho manual. Mas você sabe por que ela possui esse nome? Um material **isolante** não permite que as cargas se movimentem através dele, enquanto os materiais **condutores** deixam que esse movimento ocorra com bastante facilidade. Existem também outros materiais como os **semicondutores**, que conduzem a eletricidade mais facilmente do que os isolantes, mas não tão bem quanto os condutores. Ou então os **supercondutores**, que são materiais criados para se comportar como condutores perfeitos, no qual as cargas elétricas fluem sem nenhuma resistência.

Se você observar um cabo de energia, vai verificar que, em seu interior, há um conjunto de feixes de cobre (ou outro material metálico), que são bons condutores. Em seu exterior, há uma camada de borracha ou plástico, cuja função é isolar a corrente elétrica que flui no condutor e não permitir que essa carga fluente seja transmitida para outros objetos ou pessoas.

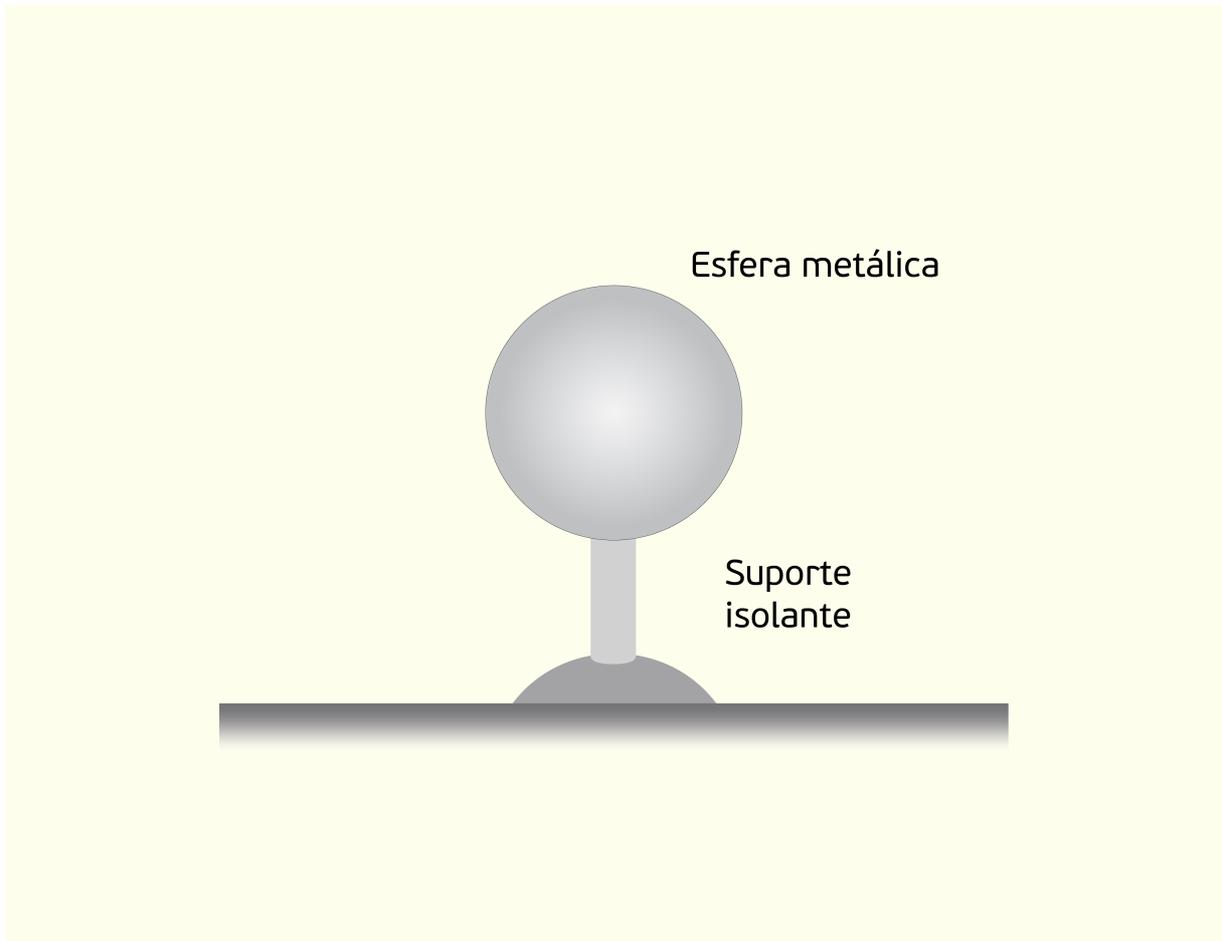
Agora, considere que uma esfera metálica (que é uma condutora) está em seu estado neutro (não carregada) e fixada, como mostra a Figura 4.3. Se você aproximar dela um bastão carregado negativamente e, através do auxílio de um fio de cobre (outro material condutor), fizer uma ligação entre a esfera e o bastão, alguns dos elétrons excedentes no bastão irão fluir para a esfera. Assim, você carregou a esfera através do método de condução.



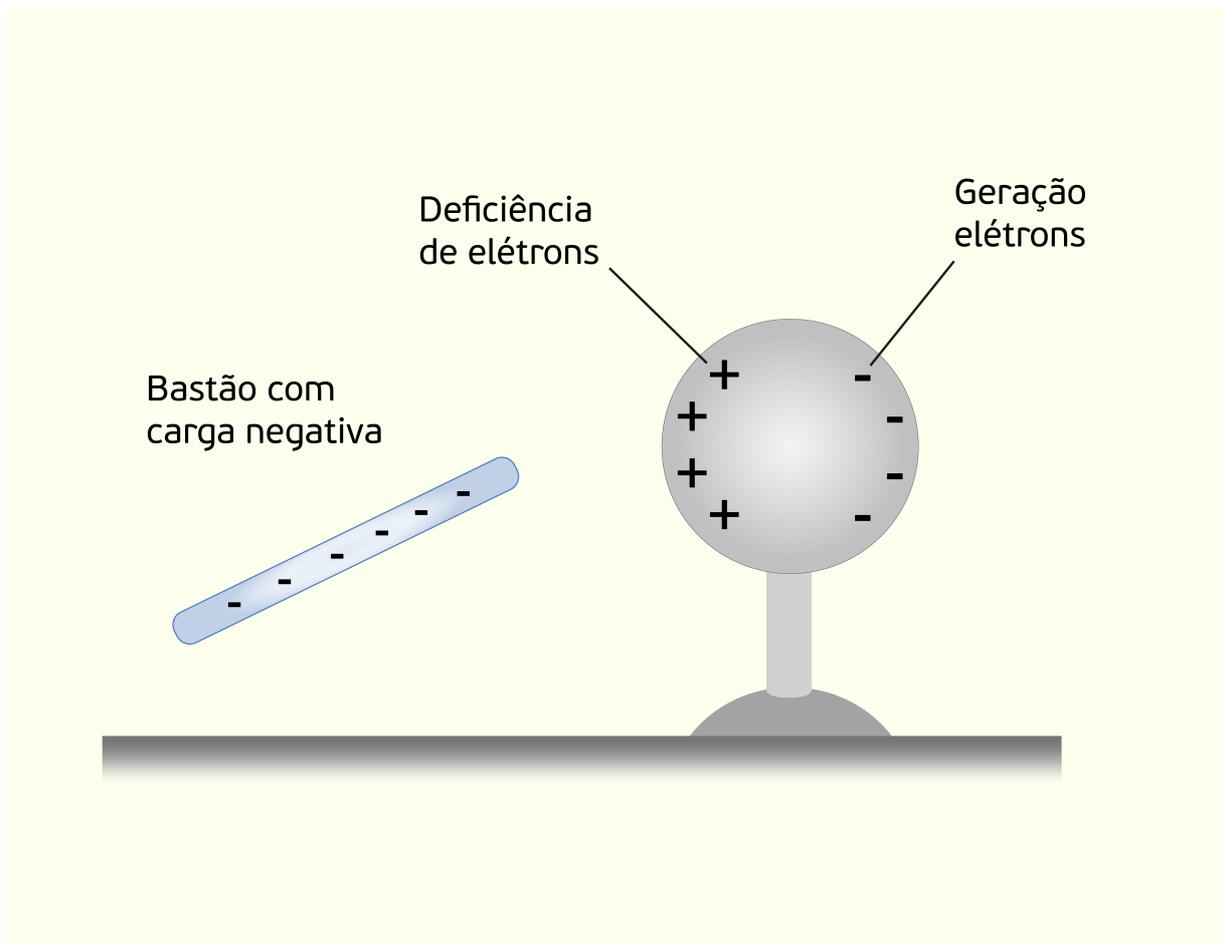
4FIGURA 3.44 - Carregamento por condução através de um fio de cobre. FONTE: Young e Freedman (2009, p. 5).

Podemos também carregar os materiais por um método chamado **indução**. Observe o caso da Figura 4.4, em que uma esfera metálica neutra está suspensa através de um suporte isolante. Ao aproximarmos um bastão com excesso de cargas negativas, os elétrons da extremidade esquerda da esfera irão ser repelidos para longe do bastão (indo para a

direita), assim como mostra a Figura 4.5. Como o suporte é isolante, ele não oferece meio para que esses elétrons em movimento saiam da esfera. Sendo assim, o lado direito da esfera terá uma deficiência de elétrons (carga líquida positiva), enquanto o lado esquerdo terá um excesso de elétrons. Fazendo isso, você pode dizer que **induziu cargas negativas** no lado esquerdo da esfera.



4FIGURA 4.44 - Esfera metálica apoiada sobre um suporte isolante. FONTE: Young e Freedman (2009, p. 6).

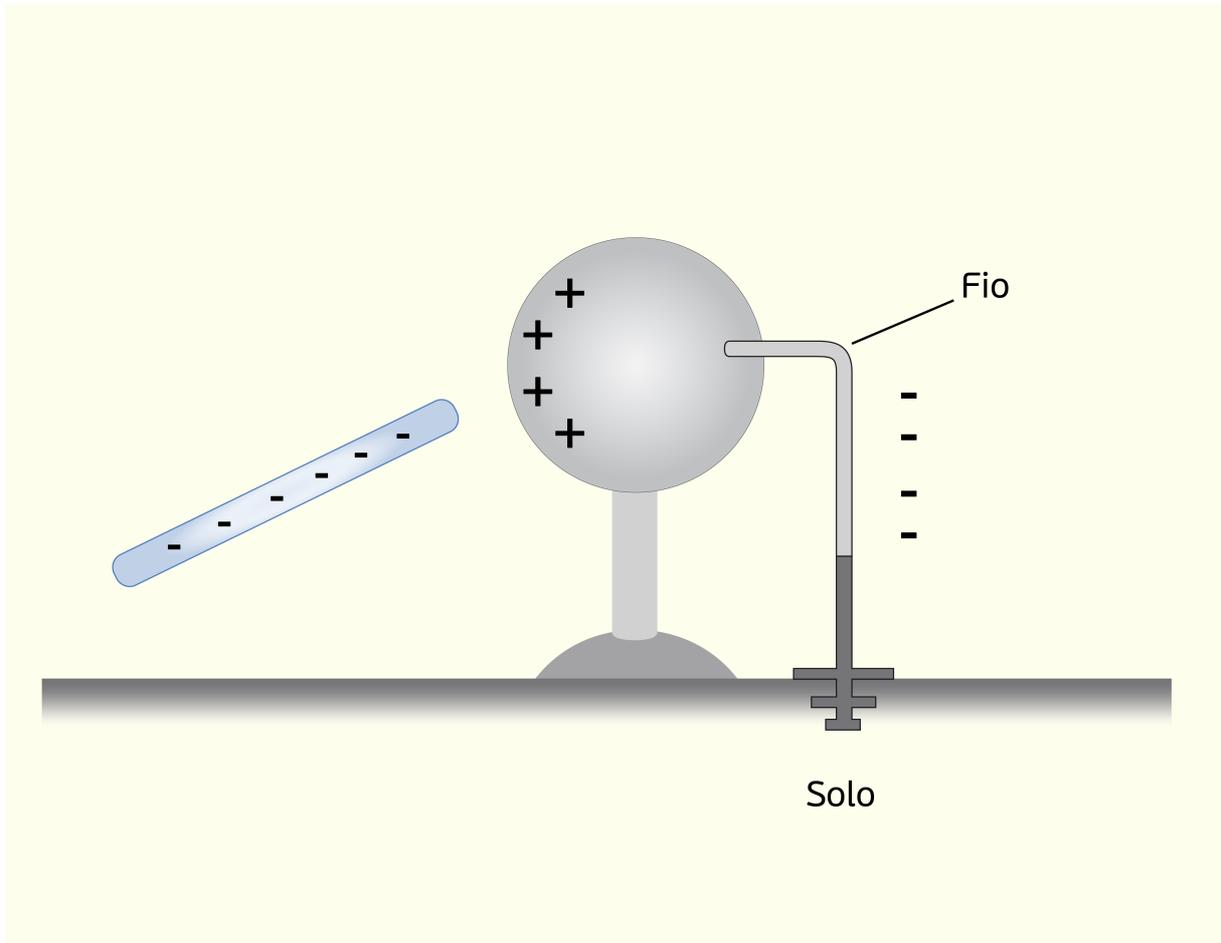


4FIGURA 5.44 - Indução de cargas elétricas sobre uma esfera metálica apoiada sobre um suporte isolante. FONTE: Young e Freedman (2009, p. 6).

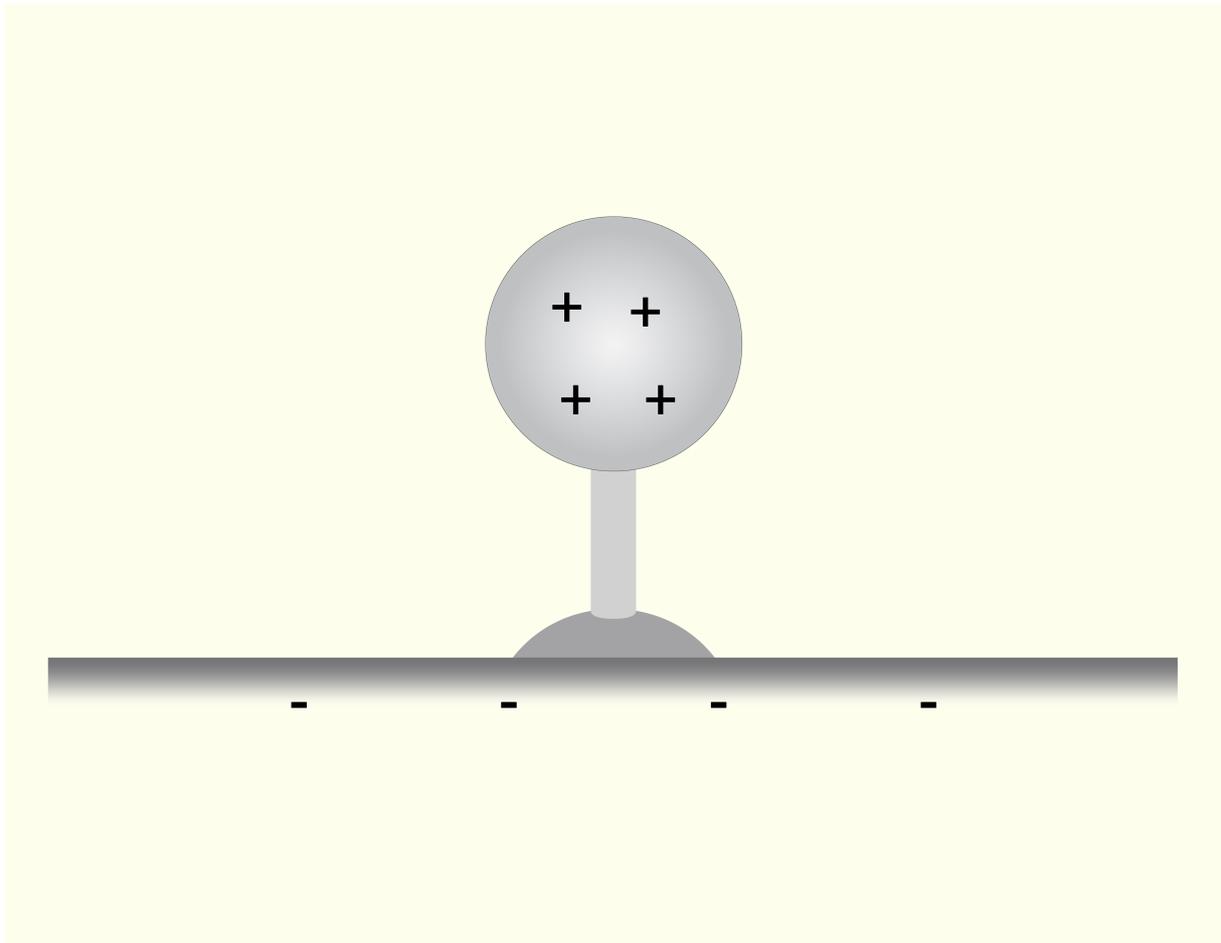
Como já observamos, cargas de mesmo sinal se repelem e cargas opostas se atraem. Então, como alguns elétrons livres do lado esquerdo estão indo para o lado direito, aqueles elétrons que já estavam do lado direito começam a repelir as cargas negativas em movimento, ao passo que a região com deficiência de elétrons tenta puxar cargas negativas de volta para ela. Esse processo continua até que haja um equilíbrio entre as forças de repulsão e atração.

Note também que as cargas que podem se movimentar são somente os elétrons e que a região com carga elétrica líquida positiva se formou somente devido aos elétrons que saíram dali e foram para o lado direito da esfera. Sendo assim, o que acontecerá se você mantiver o bastão com excesso de elétrons próximo à esfera e posicionar um fio de cobre encostado no lado direito da esfera e também na Terra (Figura 4.6)? Acontece que a Terra é uma grande condutora (pode absorver ou fornecer elétrons infinitamente) e assim muitas cargas elétricas negativas começarão a fluir pelo fio até a superfície da Terra. Agora, se você retirar o fio de

repente e também afastar o bastão, como vários elétrons saíram da esfera, ela estará agora com uma carga líquida positiva, e a Terra terá absorvido uma carga negativa de módulo igual ao de cargas positivas excedentes na esfera (Figura 4.7).



4FIGURA 6.44 - Fio de cobre conectando a esfera à superfície terrestre, criando um caminho para que os elétrons possam fluir. FONTE: Young e Freedman (2009, p. 6).



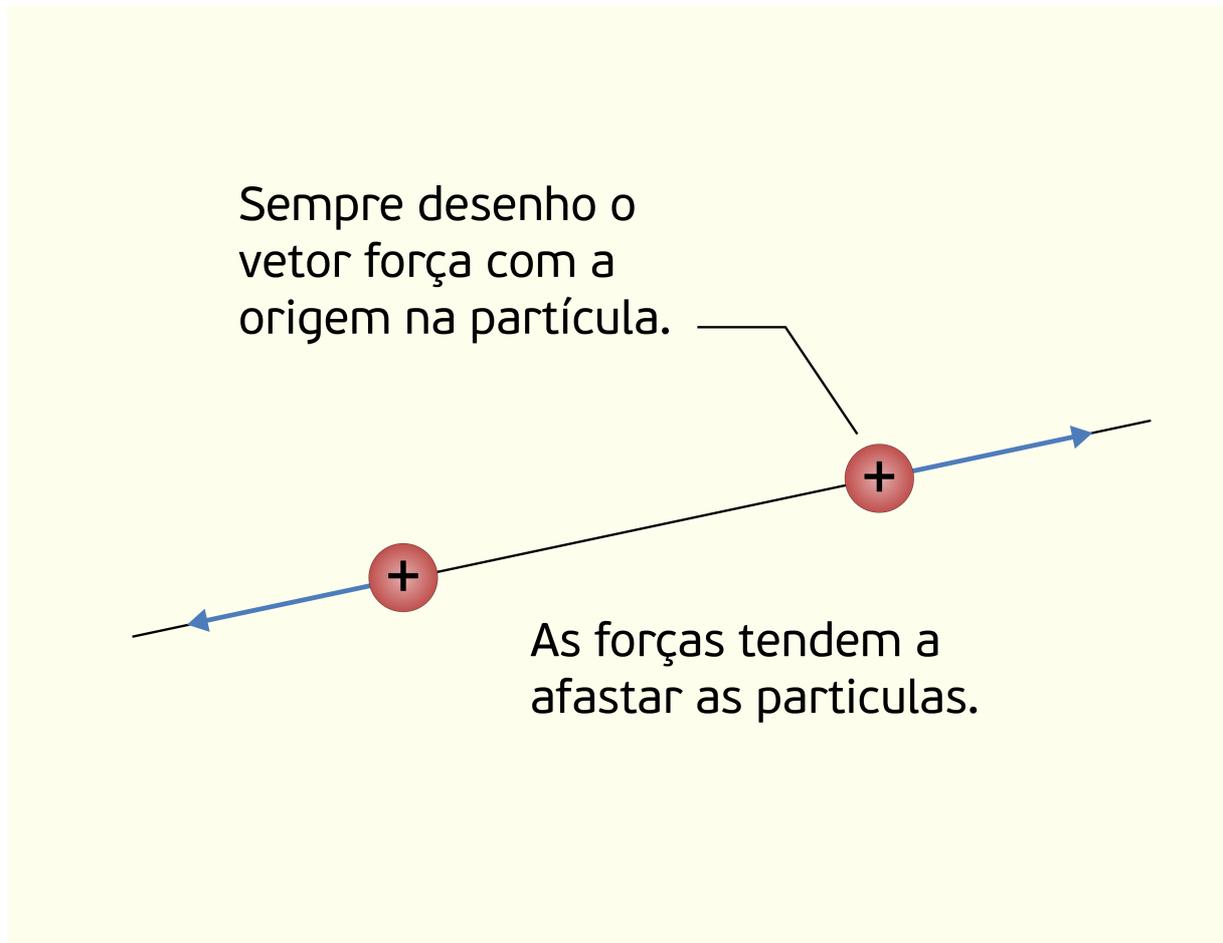
4FIGURA 7.44 - Fio de cobre e bastão removidos, deixando na esfera uma carga líquida positiva FONTE: Young e Freedman (2009, p. 6).

Lei de Coulomb

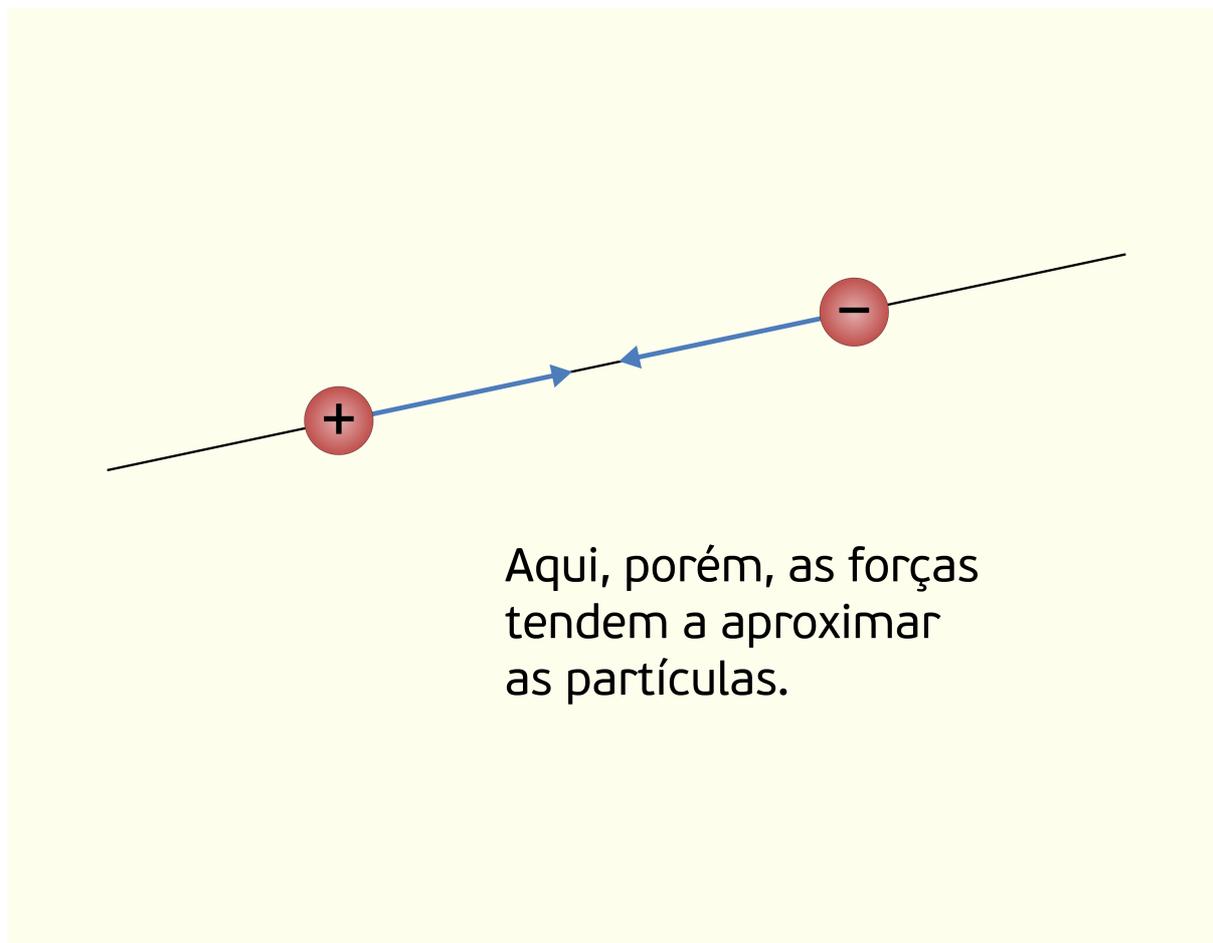
Neste ponto, iremos estudar um dos pontos mais importantes da teoria básica de eletromagnetismo: a lei de Coulomb. Porém, é extremamente necessário que você saiba que essa equação é aplicável somente para os casos de **partículas carregadas** (ou casos em que os objetos podem ser tratados como cargas pontuais). Na maioria dos casos, a carga não é pontual, e sim distribuída irregularmente ao longo do corpo de estudo. Para esses casos, é preciso utilizar análises mais complexas.

Você já deve ter observado nos exemplos anteriores que existe algum tipo de força agindo sobre as cargas elétrica, mas vamos agora definir melhor as forças com as quais estamos lidando. Força eletrostática é a exercida por uma partícula carregada sobre outra partícula

carregada. Se as cargas das partículas são de mesma polaridade, as forças tendem a afastar as partículas (Figura 4.8). Caso as cargas sejam de sinais opostos, as forças resultantes buscam aproximar as partículas (Figura 4.9).



4FIGURA 8.44 - Forças tendendo a afastar duas partículas de carga positiva FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 4).

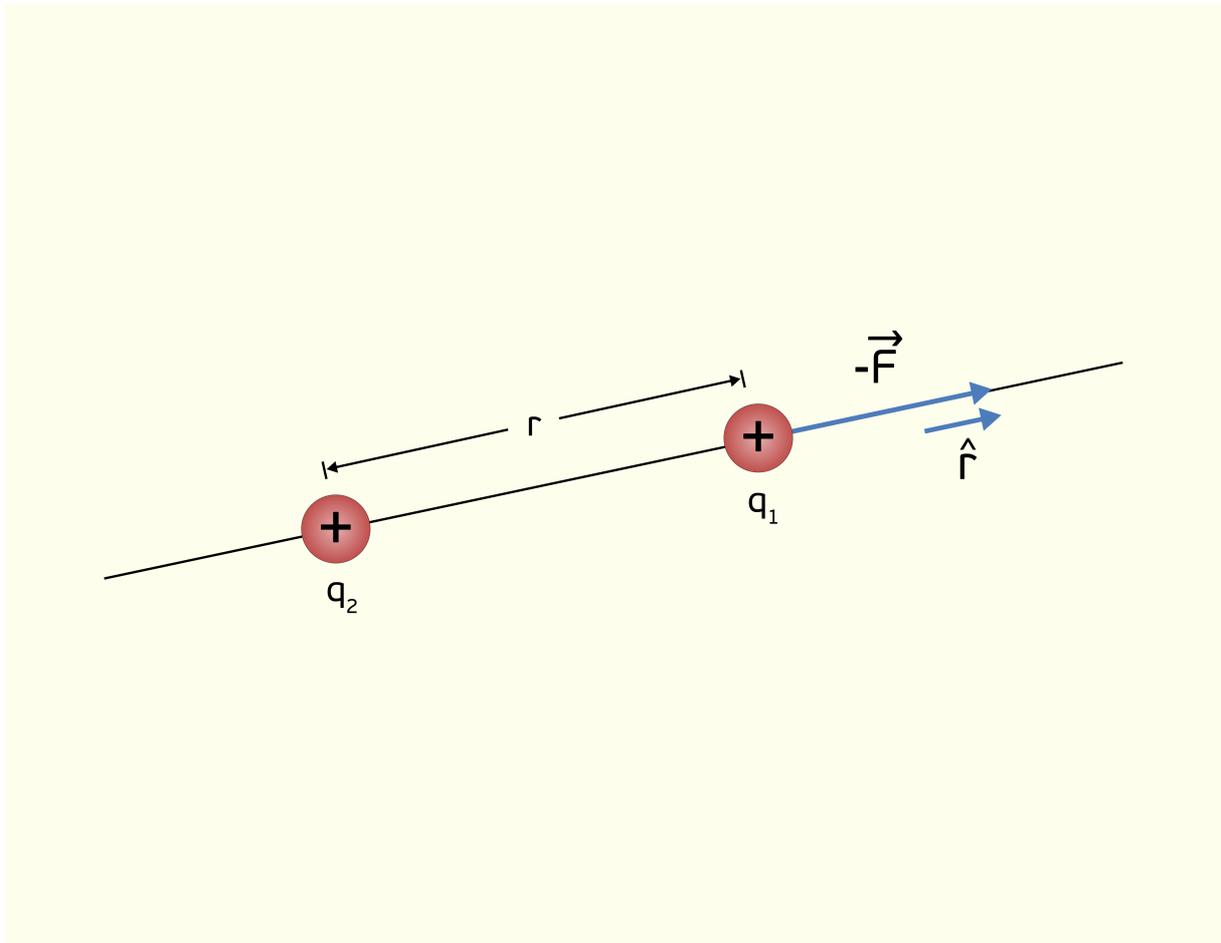


4FIGURA 9.44 - Forças tendendo a aproximar duas partículas de cargas opostas FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 4)

A Lei de Coulomb é, portanto, a equação que caracteriza matematicamente a força eletrostática exercida por essas partículas carregadas. Considere as duas partículas da Figura 4.10, cujas cargas são q_1 e q_2 (essas constantes podem ser positivas ou negativas). Se você observar a partícula 1, será possível descrever a força que age sobre ela na direção que liga as duas partículas e no sentido da partícula 2 para a partícula 1 (representado pelo vetor unitário \hat{r}). Segundo a Lei de Coulomb, a força eletrostática \vec{F} pode ser calculada da seguinte forma:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (4.1)$$

Sendo r a distância entre as duas partículas e k a constante de Coulomb.



4FIGURA 10.44 - Força eletrostática \vec{F} sobre a partícula 1 FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 4).

Se q_1 e q_2 tiverem o mesmo sinal, a partir da equação (4.1), a força que age sobre a partícula terá o mesmo sentido de \hat{r} (note que isso condiz com o que vimos, pois a força estará afastando a partícula 1 da partícula 2). Caso q_1 e q_2 sejam contrárias, o produto $q_1 q_2$ será negativo, e a força eletrostática atuante sobre a partícula 1 terá sentido oposto de \hat{r} , ou seja, ela estará atraindo as duas partículas.

A constante eletrostática é comumente escrita como sendo $1/4\pi\epsilon_0$. Dessa forma, o módulo da força eletrostática pode ser escrito, a partir de (4.1), como sendo:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad [C] \quad (4.2)$$

A sua unidade é o coulomb (C), e a constante k possui valor:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \quad (4.3)$$

E a constante $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} C^2 / N \cdot m^2$.

É interessante também contar para você que o coulomb é a negativa da carga total existente em aproximadamente 6×10^{18} elétrons. Como comparação, em um filamento de lâmpada incandescente, passam aproximadamente 1019 elétrons por segundo.

Assim como as outras forças estudadas até agora, o princípio da superposição pode ser aplicado a n forças eletrostáticas atuantes em uma partícula, ou seja:

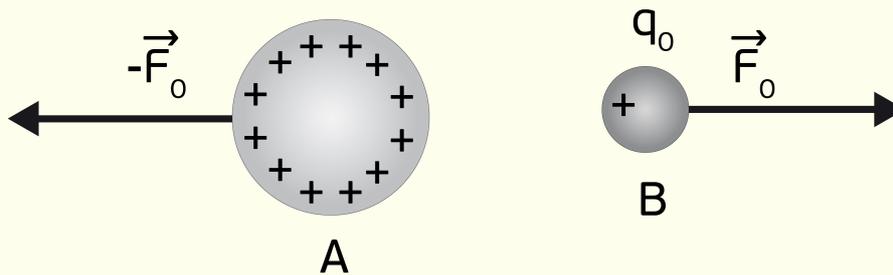
$$\vec{F}_{1,tot} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \dots + \vec{F}_{1n} \quad (4.4)$$

Que tal agora fazermos uma pequena atividade conceitual para testar algumas das ideias aprendidas até agora?

Campo Elétrico

Agora você pode se perguntar: como que a partícula 1 “sabe” que a partícula 2 está próxima a ela e vai então ser repelida ou atraída? A explicação para isso está em um fenômeno chamado **campo elétrico**. Qualquer partícula carregada cria ao redor dela esse campo, mesmo que não haja nada em seu entorno. Quando qualquer outra partícula é inserida no domínio desse campo elétrico, ela é afetada pelo seu efeito. Sendo assim, a partícula 1 não afeta a partícula 2 por contato direto, e sim por meio desse campo elétrico criado ao seu redor.

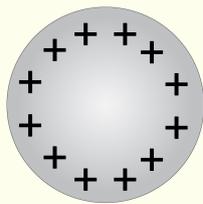
Para você poder entender melhor esse conceito, imagine que dois corpos A e B se repelem mutuamente, assim como mostrado na Figura 4.11. A partícula B possui uma carga q_0 , e \vec{F}_0 é a força elétrica que A exerce sobre B . Note que essa força age sobre B mesmo que os dois corpos não estejam em contato. Da mesma forma, a carga puntiforme q_0 também cria um campo elétrico ao seu redor, exercendo sobre A a força elétrica $-\vec{F}_0$.



4FIGURA 11.44 - Forças elétricas que A e B exercem entre si. FONTE: Young e Freedman (2009, p. 12).

Pode parecer um pouco confuso entender como esses fenômenos acontecem. Para entendermos melhor, imagine que, primeiramente, o corpo A estava na posição P e, em seguida, retiramos o corpo B do cenário (Figura 4.12). Nesse momento, o corpo A produz um campo elétrico \vec{E} no ponto P e em uma determinada vizinhança a seu redor, mesmo que nenhuma outra partícula esteja presente; esse campo é devido somente à existência do corpo A . Imagine então que a carga q_0 é colocada também no ponto P (que está dentro da faixa de atuação do campo elétrico de A) e, portanto, sofrerá ação de uma força elétrica \vec{F}_0 . Sendo assim, você pode falar que essa força é exercida sobre q_0 pelo campo elétrico atuante em P (Figura 4.13). Dessa forma, o campo elétrico serviu para comunicar a intensidade e orientação da força que A exerceu sobre q_0 .

Remova o corpo B...



A

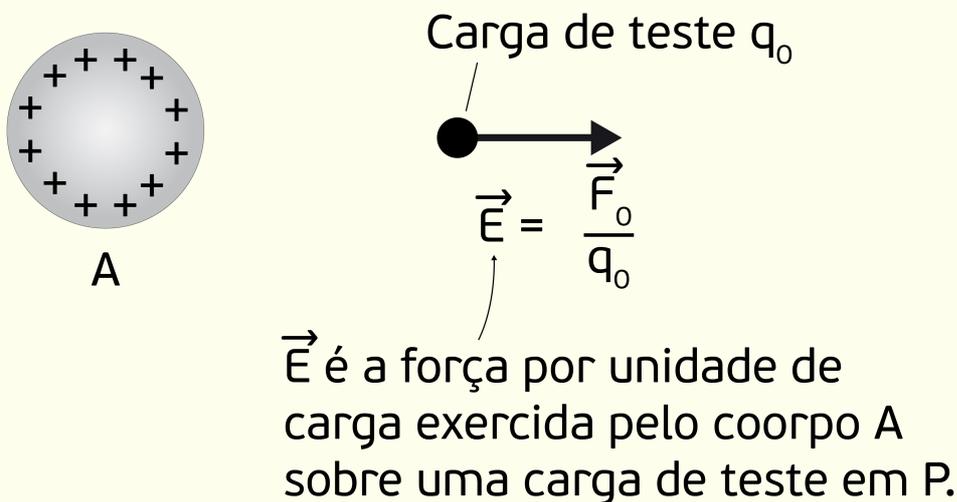
... e denomine sua posição anterior como P.



P

4FIGURA 12.44 - Momento em que retiramos o corpo B. FONTE: Young e Freedman [2009, p. 12].

O corpo A forma um campo elétrico \vec{E} no ponto P.



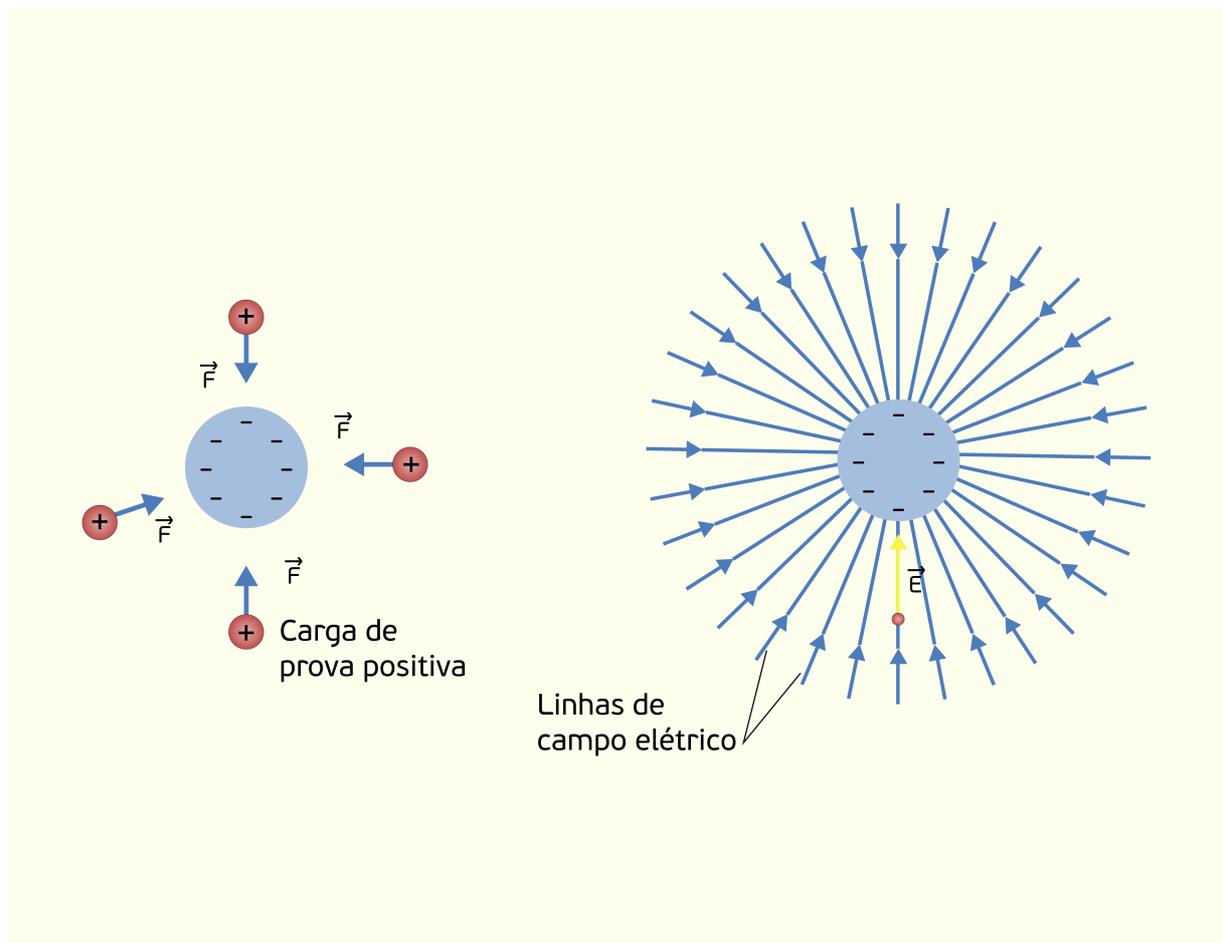
4FIGURA 13.44 - Campo elétrico \vec{E} formado por A no ponto P. FONTE: Young e Freedman (2009, p. 12).

Querido(a) aluno(a), é muito importante também você notar que a força elétrica produzida sobre um corpo é resultante somente da ação de outros corpos carregados. Sendo assim, o corpo carregado A não exerce força elétrica sobre ele mesmo.

Você deve também ter notado que tanto o campo quanto a força elétrica são grandezas vetoriais. Para podermos verificar a existência e então definir o campo elétrico em um ponto específico, é preciso inserir um corpo carregado (carga de prova) no ponto de interesse. Em seguida, medimos a força eletrostática \vec{F} que age sobre a carga, o campo elétrico \vec{E} é então definido pela razão entre a força resultante e a carga do corpo, e sua unidade é o newton por coulomb (N/C):

$$\vec{E} = \frac{F}{q_0} \quad \left[\frac{N}{C} \right] \quad (4.5)$$

Com isso, se você quiser descobrir qual é o comportamento do campo elétrico ao redor de um determinado ponto, basta pegar essa carga de prova, movimentá-la pelo espaço que circunda o corpo de interesse e anotar os valores de força eletrostática resultantes na carga, como mostrado na Figura 4.14.



4FIGURA 14.44 - Medição de linhas de campo elétrico através da mudança de posição da carga de prova. FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 23).

Lembra-se que logo no começo foi dito para você que essas equações só valeriam para o caso de cargas puntiformes? Pois é, sendo assim, idealmente teríamos que avaliar o limite de (4.5) quando a carga q_0 está tendendo a zero, para que seu efeito possa ser desprezado:

$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_0}{q_0} \quad (4.6)$$

Para os exercícios e exemplos utilizados aqui, vamos supor que \vec{E} seja fixo, o que não necessitará do processo de aplicação do limite da função.

Determinação de campo elétrico

Naqueles exemplos dos bastões utilizados anteriormente, o campo elétrico se comporta de forma diferente? Exatamente! Na maioria das situações, a carga de corpos carregados está distribuída ao longo do espaço, formando um campo elétrico específico. Nesta seção, você terá uma ideia de como é o campo elétrico produzido por alguns tipos de materiais com geometrias diferentes.

Para fazermos isso, imagine que qualquer objeto pode ser representado com a soma de inúmeras partículas. Portanto, um corpo carregado pode ser visto como um conjunto de cargas puntiformes q_0, q_1, q_2, \dots . Para cada ponto P no espaço, cada uma dessas cargas produz um campo elétrico $\vec{E}_0, \vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots$. Se você então colocar uma carga de prova q_0 nesse ponto, ela sofrerá ação das forças elétricas $\vec{F}_1 = q_0\vec{E}_1, \vec{F}_2 = q_0\vec{E}_2, \dots$. Como vimos anteriormente, a força elétrica resultante \vec{F}_0 será então a soma vetorial de todas essas forças.

Tendo em mãos o valor da força total que age sobre q_0 em P , podemos facilmente então encontrar o campo elétrico total em P a partir de (4.5):

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (4.7)$$

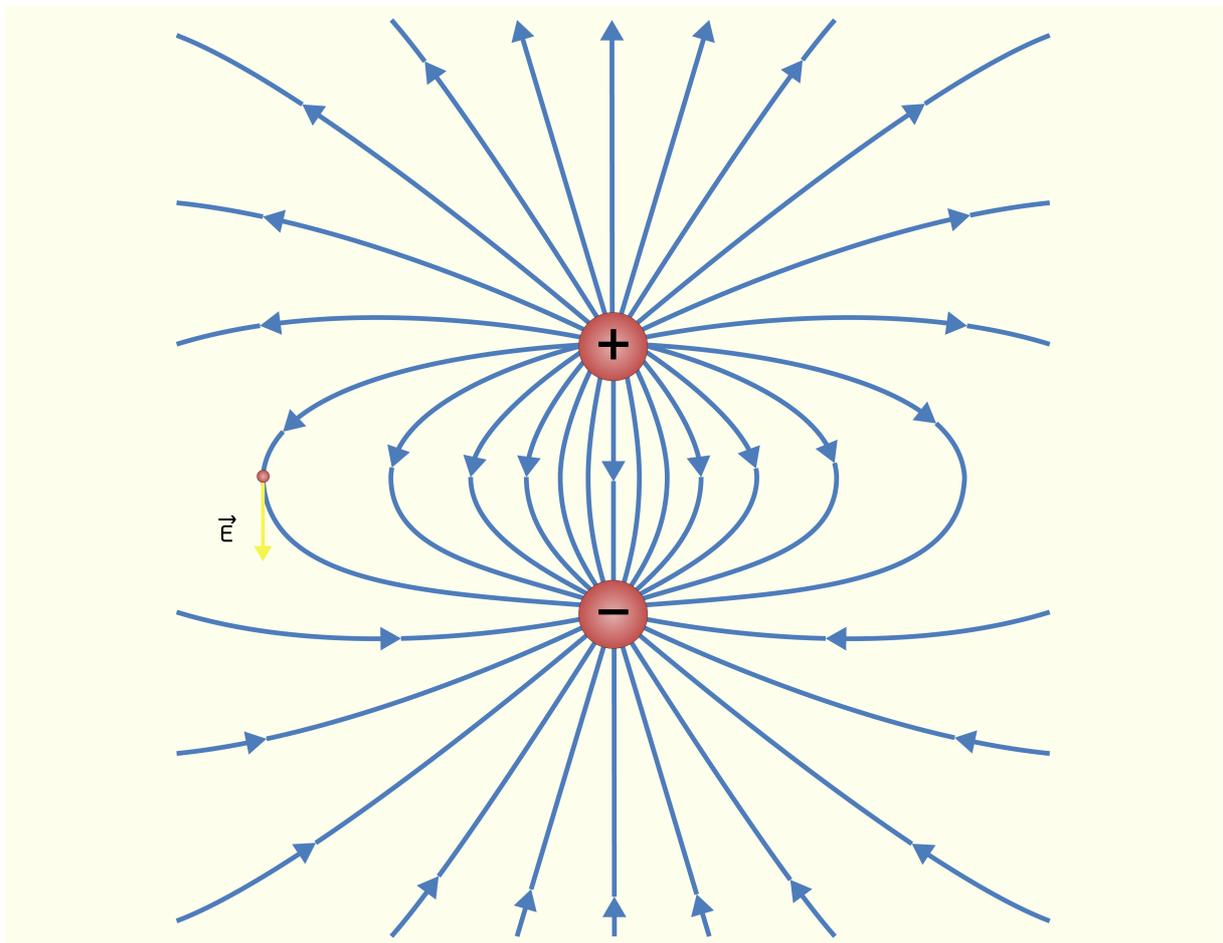
Ou seja, o campo elétrico total em um determinado ponto é a soma vetorial dos campos elétricos produzidos em P por cada uma das cargas (**princípio da superposição**).

Por isso, quando você for estudar alguma distribuição específica de cargas, será preciso se ater a três constantes importantes: i) quando as cargas estiverem distribuídas em linha, usaremos a **densidade linear de carga** λ (C/m). Quando a distribuição estiver ao longo de uma superfície, usaremos a **densidade superficial de carga** σ (C/m^2) ou então a **densidade volumétrica de carga** ρ (C/m^3) para quando as cargas estiverem ao longo de um volume.

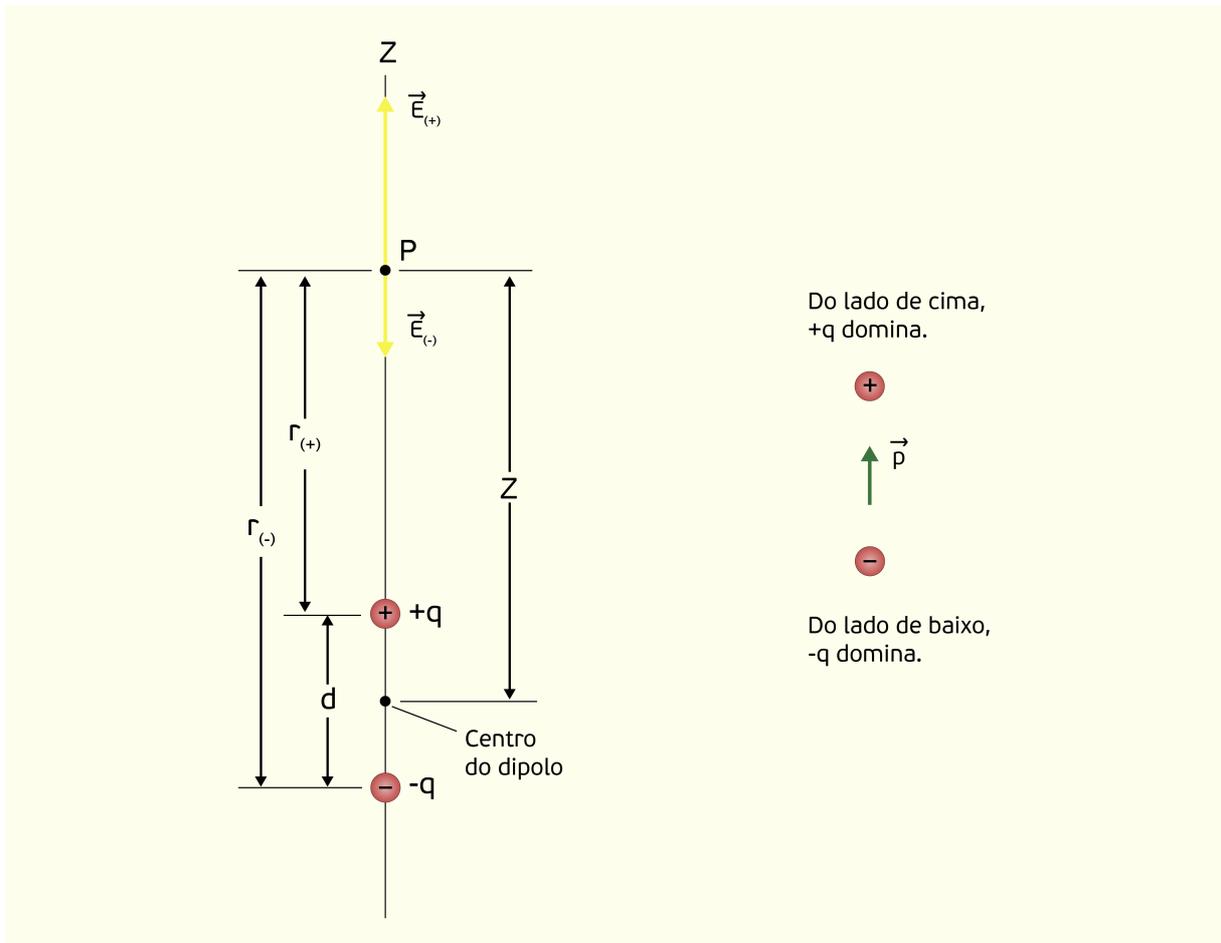
Nas próximas subseções, nós iremos calcular o campo elétrico em alguns casos específicos, pois assim poderemos compreender melhor o comportamento de \vec{E} .

Campo de um dipolo elétrico produzido por um dipolo elétrico

Observe a Figura 4.15, na qual há duas partículas carregadas com cargas de módulo q e sinais opostos separadas por uma distância d (note que as flechas indicam as linhas de campo elétrico saindo de uma partícula e indo em direção à outra, pois elas possuem sinais opostos).



4FIGURA 15.44 - Linhas de campo elétrico em um dipolo elétrico. FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 24).



4FIGURA 16.44 - Eixo do campo elétrico em um dipolo elétrico. FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 26).

A linha reta central que cruza as duas partículas é o eixo do dipolo (note que é também o eixo de simetria do campo elétrico). A partir de agora, chame esse eixo de eixo \hat{z} , que é o eixo no qual iremos trabalhar. A Figura 4.16 isola esse eixo e mostra os campos elétricos criados em um ponto P por ambas as partículas. A partícula de carga $+q$, que está mais próxima do ponto, produz um campo \vec{E}_+ no sentido positivo de \hat{z} (para longe de $+q$). A partícula de carga $-q$ produz um campo \vec{E}_- no sentido negativo de \hat{z} . Para encontrar o campo total \vec{E} , é preciso então fazer a soma vetorial de \vec{E}_+ e \vec{E}_- . Como os dois campos possuem a mesma direção, podemos substituir a soma vetorial pela diferença dos módulos, resultando na seguinte expressão:

$$E = E_+ - E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_+^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_-^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 (z - \frac{1}{2}d)^2} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 (z + \frac{1}{2}d)^2} \quad (4.8)$$

Se você fizer algumas manipulações algébricas, poderá simplificar (4.8) para:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 z^2} \frac{2d/z}{\left(1 - \left(\frac{d}{2z}\right)^2\right)^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 z^2} \frac{d}{\left(1 - \left(\frac{d}{2z}\right)^2\right)^2} \quad (4.9)$$

Geralmente, estudaremos casos em que o ponto P está distante das cargas do dipolo, ou seja, pontos onde $z \gg d$. Então, $d/2z \ll 1$, o que pode fazer você desprezar o termo $d/2z$ em (4.9) e finalmente simplificar a equação a:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{qd}{z^3} \quad (4.10)$$

É interessante também mostrar que a grandeza qd da equação (4.10) representa o módulo do **momento dipolar elétrico** \vec{p} do dipolo (medido em coulomb por metro [C/m]). Utilizando então essa notação, podemos escrever:

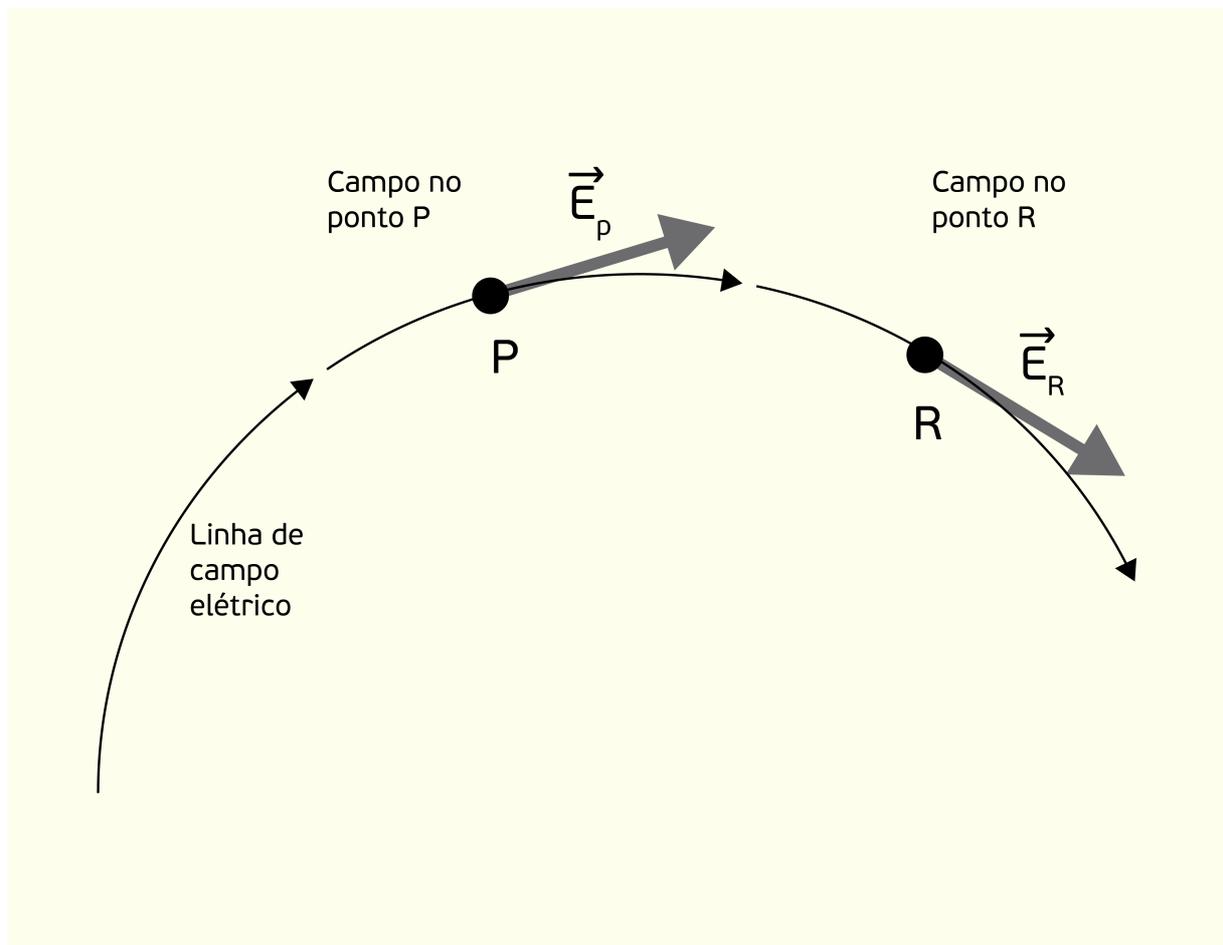
$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3} \quad (4.11)$$

E o sentido de \vec{p} é sempre tomado partindo do lado negativo e indo em direção ao positivo do dipolo, assim como descrito na Figura 4.16.

Observe também que as equações acima, assim como mencionado anteriormente, são válidas para pontos distantes e que se encontram no eixo que cruza as partículas do dipolo. Porém, para qualquer ponto, estando ou não no eixo, o campo elétrico será proporcional a $1/r^3$, sendo r a distância entre o ponto analisado e o centro do dipolo.

Linhas de força de um campo elétrico

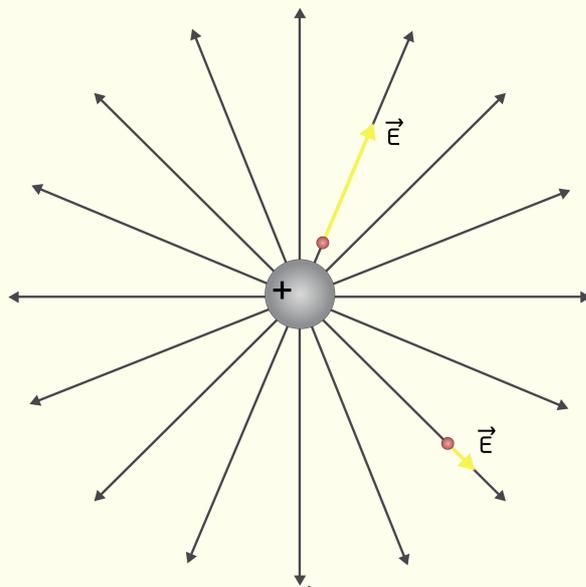
Você reparou que nós introduzimos um conceito muito importante para a análise do campo elétrico? Pois é, o conceito utilizado anteriormente é a chamada *linha de força de um campo elétrico*, ou simplesmente *linha de campo elétrico*. Esse é um conceito bastante abstrato, porém muito importante. Essa linha é uma reta ou curva imaginária na qual, em qualquer ponto dela, se você calcular a tangente da linha no ponto, encontrará a direção e o sentido do campo elétrico nesse mesmo ponto. A ilustração dessa ideia está mostrada na Figura 4.17.



4FIGURA 17.44 - Linha de campo elétrico com o campo \vec{E} indicado em alguns pontos FONTE: Young e Freedman (2009, p. 24).

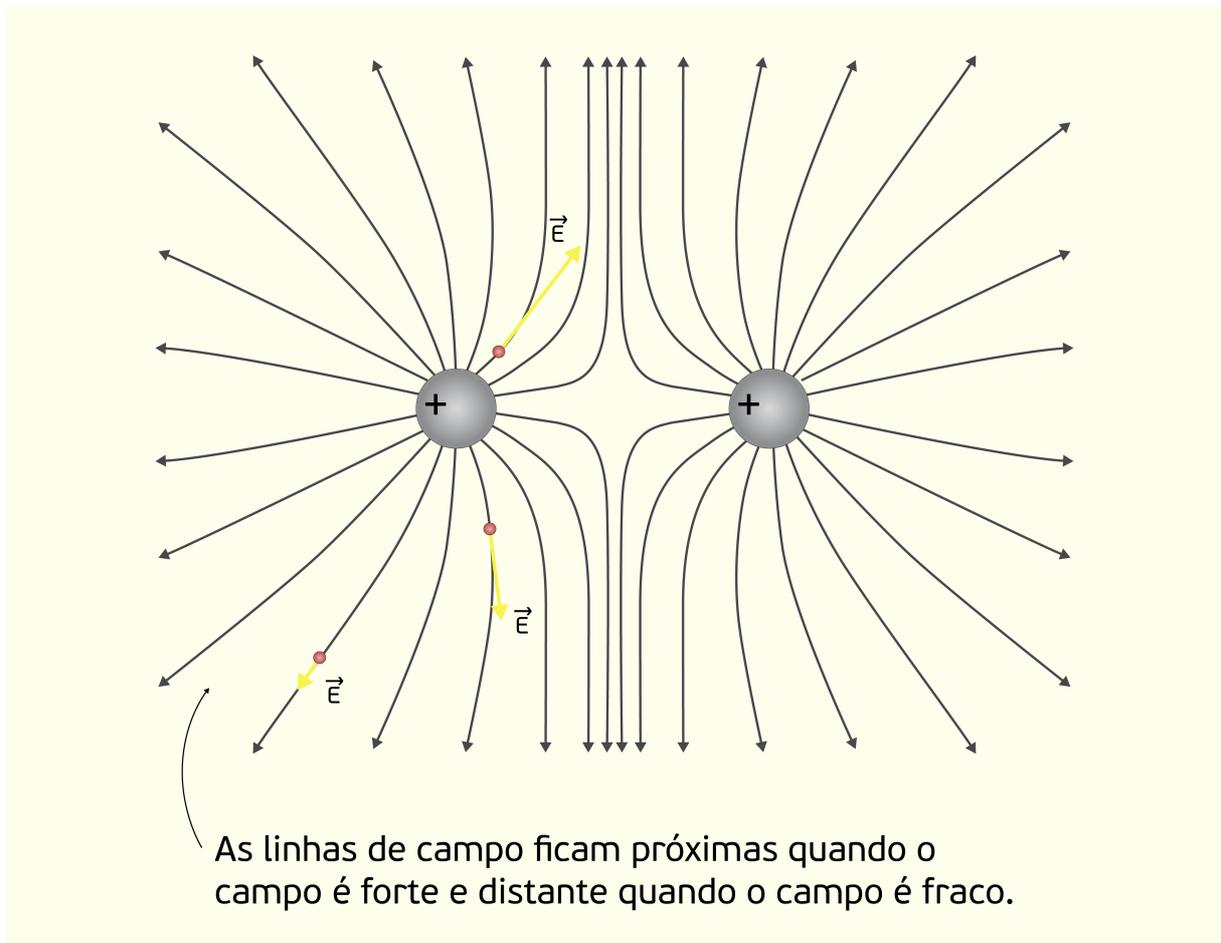
Para termos uma noção do comportamento do campo elétrico ao redor de uma ou mais partículas, é interessante desenharmos várias linhas de campo, pois saberemos a direção e o sentido em diversos pontos. Além disso, os pontos onde há uma grande concentração de linhas de campo indicam lugares em que o módulo de \vec{E} é maior, e locais onde as curvas estão mais espaçadas possuem uma intensidade menor de campo elétrico.

Observe a Figura 4.18 e veja que há uma partícula com carga positiva. Nesse caso, as linhas de campo sempre apontam para fora. Olhe também que, perto da partícula, as linhas estão mais agrupadas (maior intensidade de campo elétrico), e quanto mais distante do centro, mais espaçadas estão as linhas (lembre-se da equação (4.10) falando que a intensidade de campo elétrico decai com o cubo da distância).



Linhas de campo sempre apontam para fora de cargas (+) e para dentro de cargas (-).

4FIGURA 18.44 - Linhas de campo elétrico em uma única partícula com carga positiva. FONTE: Young e Freedman (2009, p. 24).



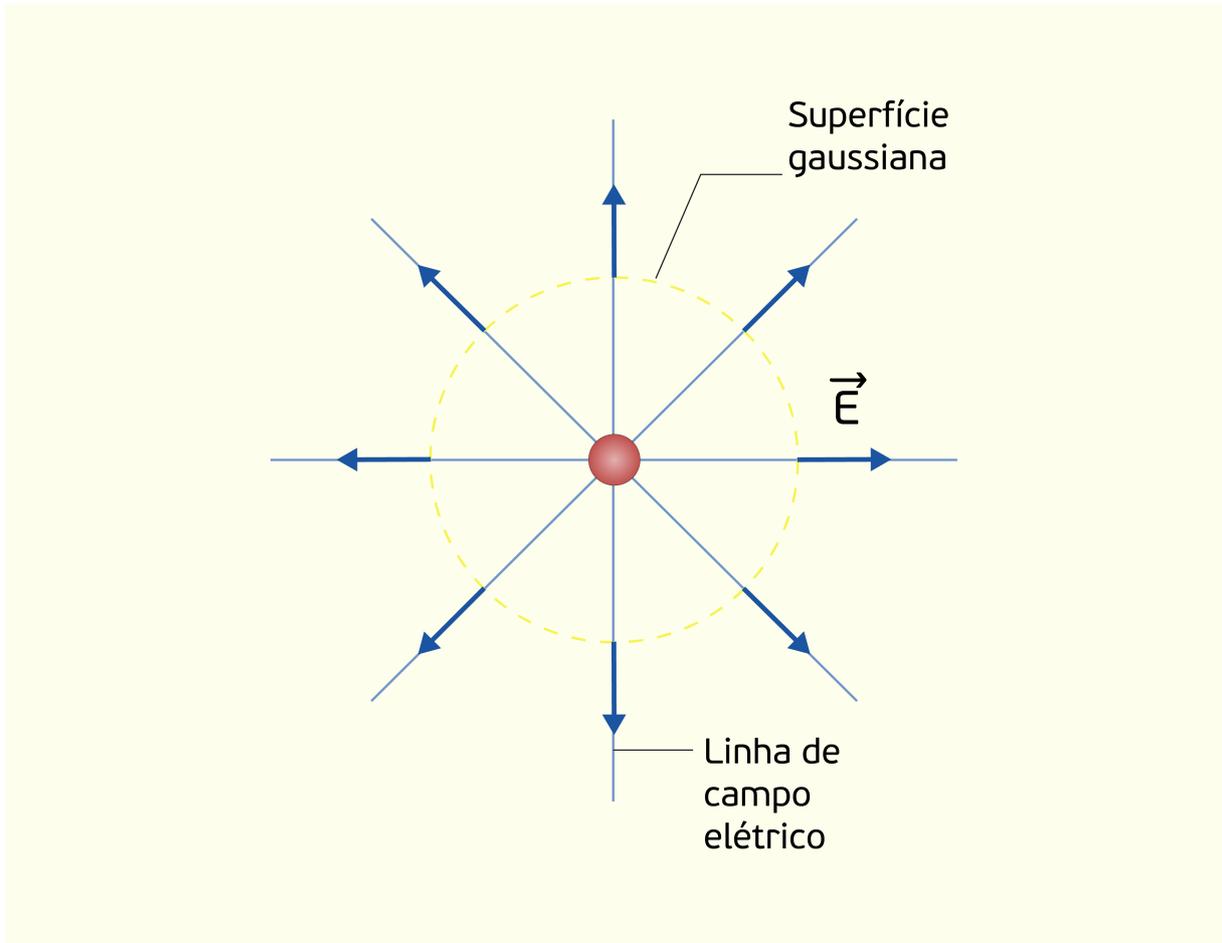
4FIGURA 19.44 - Linhas de campo elétrico no caso com duas partículas com cargas positivas FONTE: Young e Freedman (2009, p. 24).

Podemos também ter duas cargas positivas. Como as linhas de campo sempre saem das partículas com carga positiva, elas irão em algum ponto colidir e tomar outra direção, assim como ilustrado na Figura 4.19.

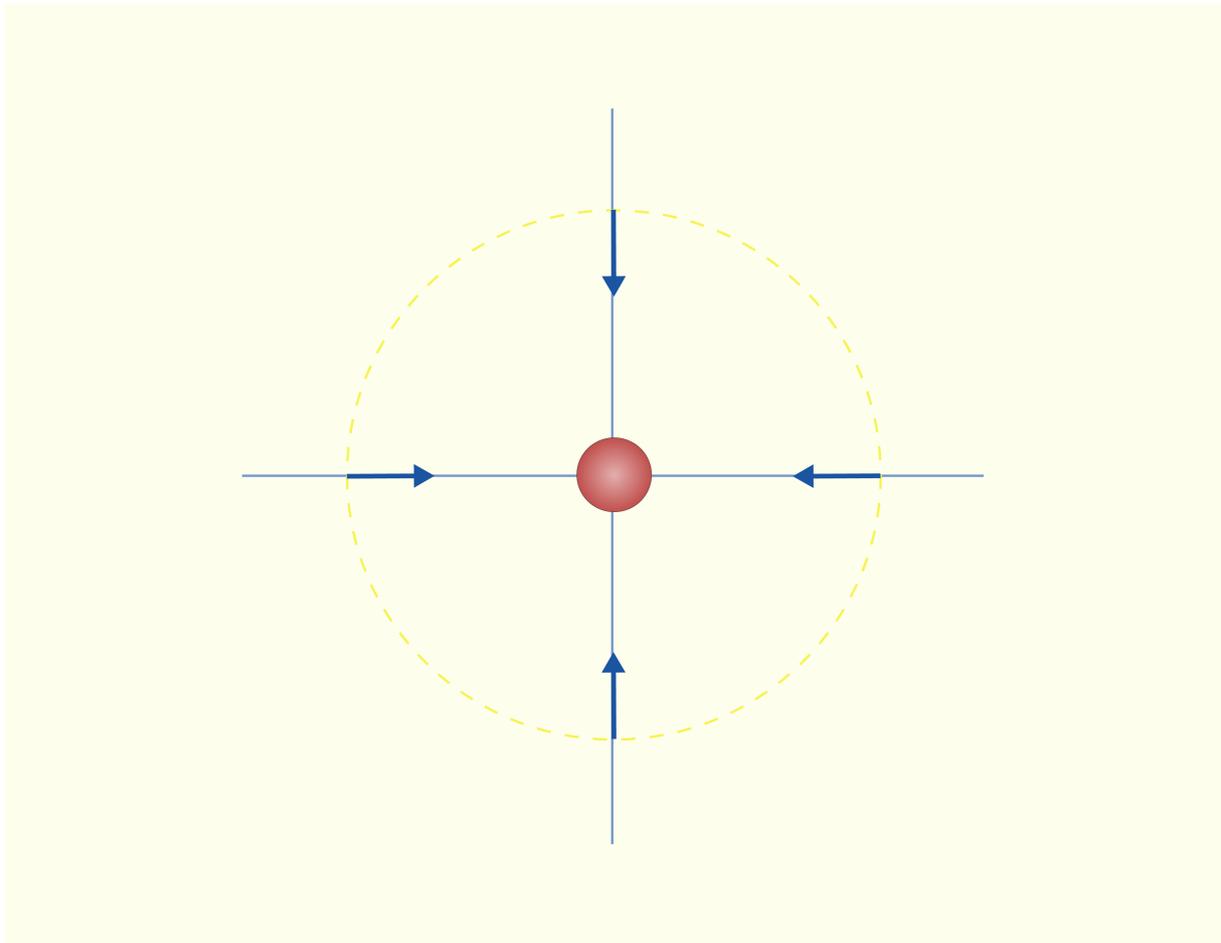
Fluxo elétrico e Lei de Gauss

Nos exemplos anteriores, nós partimos de partículas conhecidas para encontrar o campo elétrico resultante. E como devemos proceder quando conhecemos o campo elétrico, mas não sabemos nada sobre a partícula? Bom, para explicar de uma maneira básica, vamos observar o caso da Figura 4.20. Nela, há uma partícula desconhecida e nós sabemos o valor do campo elétrico nos pontos ao redor de uma esfera imaginária (chamada de superfície

gaussiana). O valor do campo elétrico é $\vec{E} = kq/r^2$ e aponta radialmente para longe da partícula. Sendo assim, como o campo aponta para fora da superfície, podemos afirmar que a carga é positiva.



4FIGURA 20.44 - Linhas de campo elétrico apontando radialmente para fora da superfície gaussiana. FONTE: Halliday e Resnick (2009, p. 50).



4FIGURA 21.44 - Linhas de campo elétrico apontando radialmente para fora da superfície gaussiana. FONTE: Halliday e Resnick (2009, p. 50).

Agora imagine o caso da Figura 4.21, em que as linhas de campo apontam radialmente em direção ao centro da esfera. Se você lembrar que as linhas de campo sempre apontam na direção das cargas negativas, poderá concluir que a partícula no centro da esfera da Figura 4.21 possui carga negativa. Além disso, observando o tamanho do vetor de linha de campo, podemos inferir que o módulo da carga da Figura 4.21 é menor do que o da carga positiva mostrada na Figura 4.20.

Com essas pequenas inspeções, já podemos apresentar a você que a lei de Gauss vai relacionar o campo elétrico em todos os pontos de uma superfície gaussiana (fechada) à carga total envolvida pela superfície.

Fluxo elétrico em uma superfície plana

Vamos começar com uma arquitetura simples para se calcular o fluxo elétrico: uma superfície plana. Considere a superfície da Figura 4.22, na qual um vetor de campo elétrico atravessa uma pequena área ΔA . Se você decompor o vetor \vec{E} , verá que somente a componente x atravessa a superfície, e a componente \vec{E}_y é paralela à superfície. O **fluxo elétrico** $\Delta\Phi$ é definido como a quantidade de campo elétrico que atravessa a superfície, e pode então ser calculado como:

$$\Delta\Phi = (E\cos\theta)\Delta A \quad (4.12)$$

Uma outra forma de escrever o fluxo elétrico é utilizando um vetor $\Delta\vec{A}$ que seja perpendicular à superfície e tenha módulo igual à pequena área ΔA . Então, se fizermos o produto escalar entre \vec{E} e $\Delta\vec{A}$, poderemos obter $\Delta\Phi$:

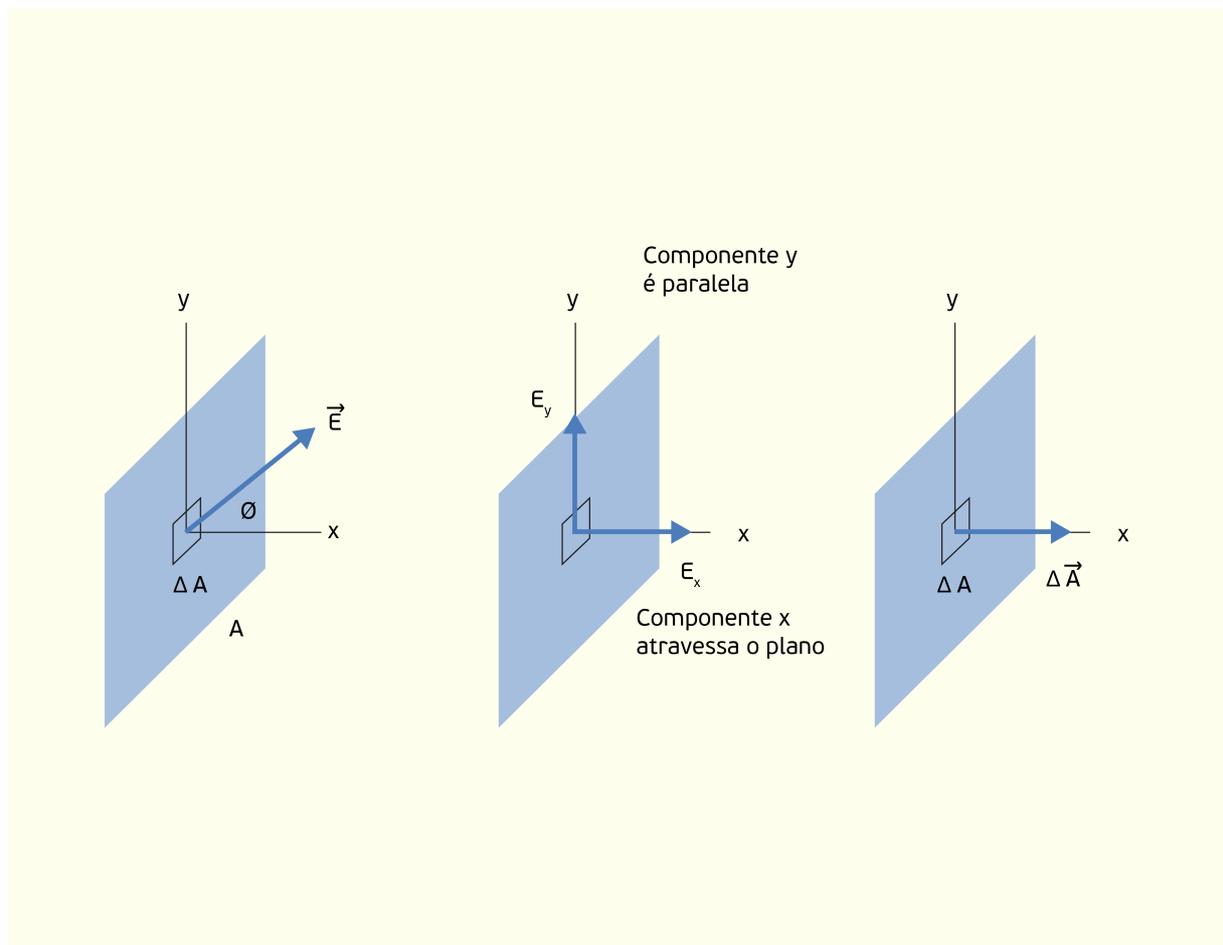
$$\Delta\Phi = \vec{E} \cdot \Delta\vec{A} \quad (4.13)$$

O **fluxo total** é então a soma do fluxo que atravessa todas as pequenas áreas que preenchem a superfície:

$$\Phi = \sum \vec{E} \cdot \Delta\vec{A} \quad (4.14)$$

Porém, para simplificar os seus cálculos (pois não queremos que você divida a superfície em milhares de pedacinhos e some todos os fluxos), é mais simples transformarmos os elementos ΔA em pedaços infinitesimais dA e então calcularmos a integral no lugar do somatório:

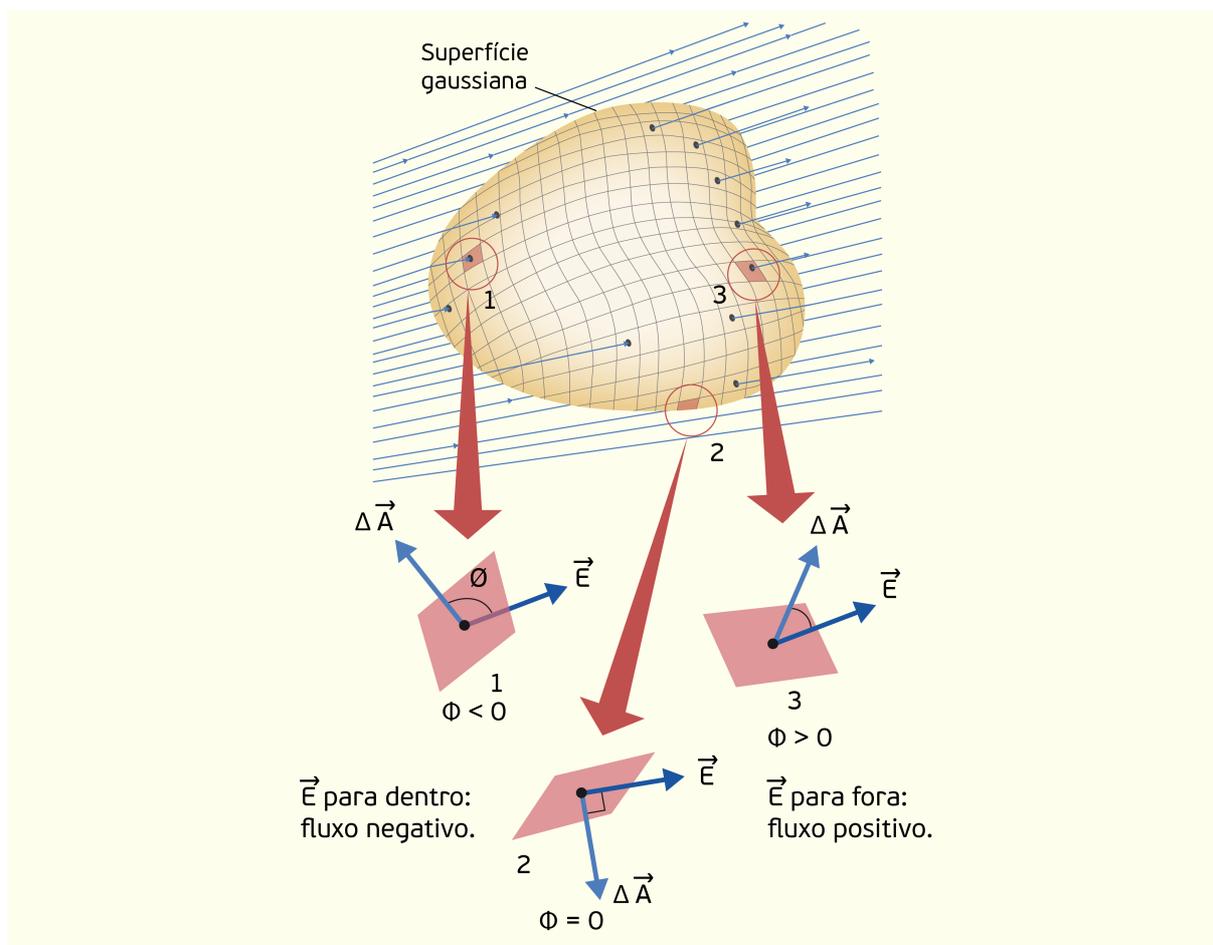
$$\Phi = \int \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (4.15)$$



4FIGURA 22.44 - Cálculo do fluxo elétrico através do vetor de campo elétrico que atravessa uma superfície plana.
 FONTE: Halliday e Resnick (2009, p. 51).

Fluxo elétrico em um superfície fechada

Para compreendermos e definirmos a lei de Gauss, nós não poderemos trabalhar apenas com uma superfície plana. Será necessário observarmos uma superfície fechada, assim como mostra a Figura 4.23 (observe que a superfície não precisa necessariamente ter uma forma geométrica bem definida, como uma esfera ou um cubo).



4FIGURA 23.44 - Superfície gaussiana dividida em pedaços ΔA e inserida em um local onde existe campo elétrico.
 FONTE: Halliday e Resnick (2009, p. 51).

Agora não estaremos mais interessados somente em saber onde o campo elétrico atravessa a superfície, mas também se ele atravessa de dentro para fora ou de fora para dentro. Observe que, em alguns pontos \vec{E} , entra na superfície e em outros ele sai. Além disso, será muito importante analisar também o ângulo com o qual o campo elétrico atravessa a superfície. Vamos adotar agora $\Delta\vec{A}$ como sendo positivo para fora da superfície gaussiana.

Observe os três casos da Figura 4.23. Se o campo elétrico estiver entrando na superfície, o ângulo entre \vec{E} e $\Delta\vec{A}$ é $90 < \theta \leq 180$, logo, $\cos \theta < 0$ e o produto escalar $\vec{E} \cdot \Delta\vec{A}$ é negativo, portanto o fluxo também é negativo. Caso o campo esteja saindo da superfície, $0 \leq \theta < 90$ e $\cos \theta > 0$, logo, $\vec{E} \cdot \Delta\vec{A} \geq 0$ e o fluxo também é positivo.

Agora, podemos escrever o fluxo elétrico de uma forma mais completa através do uso de uma superfície gaussiana (fechada). Assim como fizemos com a superfície plana, poderíamos dividir a superfície gaussiana em vários pedaços. Porém, é mais simples tomarmos pedaços

infinitesimais dA e utilizar a integração para chegar ao resultado. Logo, o fluxo total sobre uma superfície fechada é definido como:

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (4.16)$$

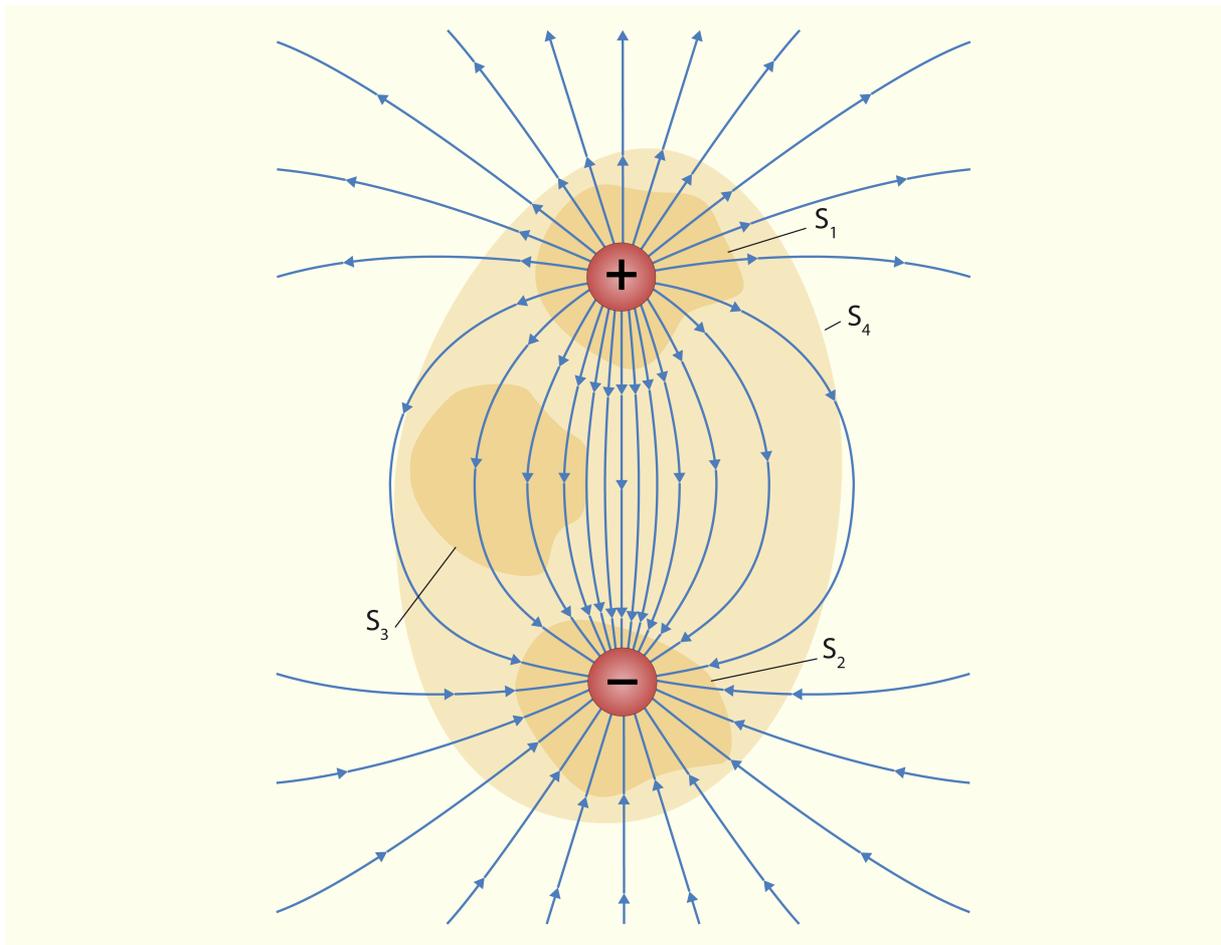
Lei de Gauss

Até que enfim chegamos ao ponto que poderemos conhecer a famosa lei de Gauss. Ela irá relacionar o fluxo elétrico total de um campo elétrico em uma superfície fechada à carga total q_t , que está no interior dessa superfície. Matematicamente, ela é simplesmente:

$$\epsilon_0 \Phi = q_t \quad \epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q_t \quad (4.17)$$

A carga total q_t é então a soma de todas as cargas (positivas e negativas) que a superfície gaussiana escolhida está envolvendo. Essa carga pode ser tanto positiva quanto negativa, ou até nula.

Vamos agora observar quatro situações de superfície gaussiana, em que, dependendo de como a definimos, o fluxo total e carga envolvida serão diferentes. Considere a Figura 4.24. Caso você escolha a superfície S_1 , o campo elétrico irá sempre apontar para fora. Portanto, considerando o que aprendemos com o fluxo e a lei de Gauss, o fluxo será positivo e a carga envolvida também. Porém se você optar pela superfície S_2 , todas as linhas de campo estão entrando, o que representa um fluxo negativo e uma carga total também negativa.



4FIGURA 24.44 - Quatro possíveis definições de superfície gaussiana envolvendo (ou não) partículas carregadas.
FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 55).

Porém, se você, por um acaso, escolher uma superfície que não envolva nenhuma carga, todas as linhas de campo que entrarem irão também sair. Logo, ao fazermos a soma dos produtos escalares (ou integração), os vetores de campo que entram irão anular os vetores que saem da superfície. Isso provoca um fluxo elétrico nulo e uma carga também nula.

Agora, mais interessante seria escolher a superfície S_4 , que envolve ambas as cargas. Como elas são de mesmo módulo e sinais opostos, a carga total envolvida é nula. Assim, de acordo com a lei de Gauss, o fluxo elétrico também será nulo. Observe que, nesse caso, assim como no anterior, o mesmo número de linhas de campo que entram na superfície também saem dela.

Enfim somos capazes de analisar mais completamente o que acontece com partículas carregadas e como elas interagem com outras partículas. Agora, vamos testar os conhecimentos adquiridos com uma atividade super interessante!

Potencial Elétrico e Corrente elétrica

Nesta seção, nós iremos estudar uma forma de energia relacionada à carga de partículas carregadas e seus respectivos campos elétricos. Por exemplo, se inserirmos uma partícula carregada em um ponto onde haja campo elétrico proveniente de outra carga, a partícula começará a se mover. Mas de onde veio a energia necessária para fazer a partícula se mover? Como você já deve saber, a energia não pode ser criada. Logo, essa energia veio da transformação da *energia potencial elétrica* U que foi transformada em *energia cinética*, fazendo com que a partícula se movesse.

Para entendermos esse fenômeno, será necessário definirmos o potencial elétrico, analisar a determinação do potencial elétrico e a relação entre potencial V e energia potencial elétrica U .

Potencial Elétrico e Energia Potencial Elétrica

A energia potencial de um objeto é igual ao trabalho (W) realizado para mover esse objeto de um ponto com energia potencial nula até o ponto de interesse:

$$U = -W \quad (4.18)$$

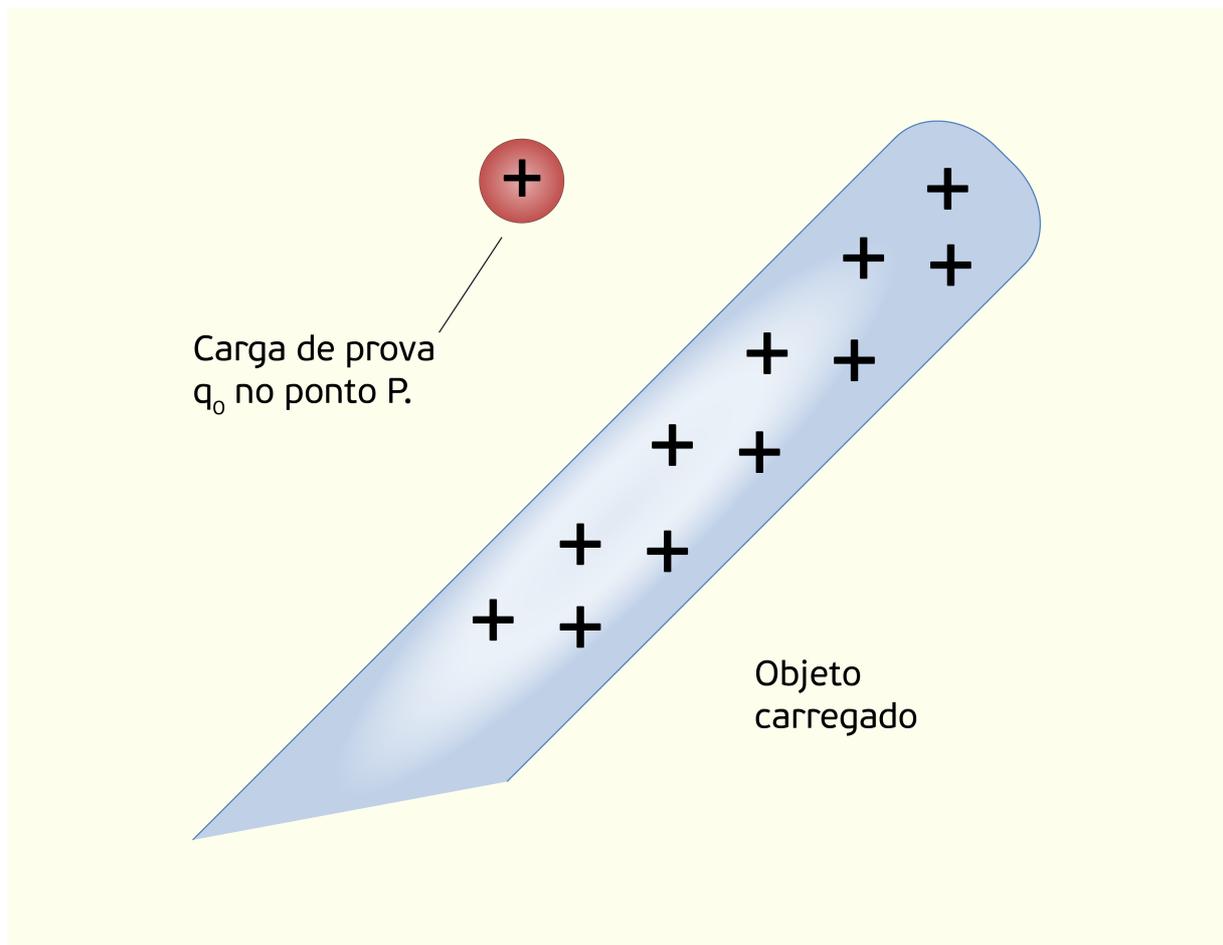
Se você não se lembra como é definido o trabalho para mover uma partícula de a para b , aqui vai uma recordação:

$$w_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_a^b F \cos \phi \, dl \quad (\text{trabalho realizado pela força } \vec{F}) \quad (4.19)$$

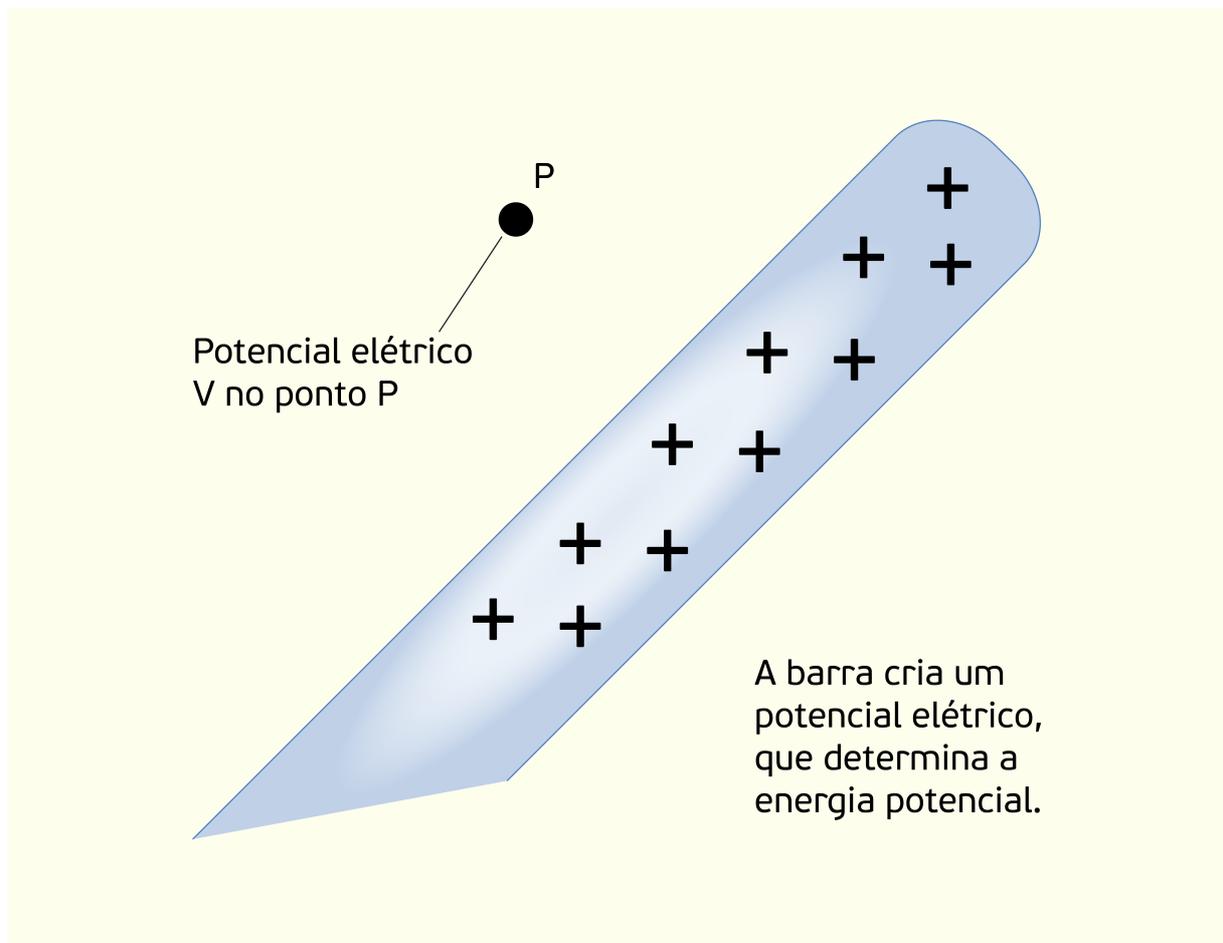
em que $d\vec{l}$ é o deslocamento realizado, e ϕ , o ângulo entre \vec{F} e $d\vec{l}$.

Sendo assim, vamos considerar a situação da Figura 4.25. Suponha que a referência onde a energia potencial $U = 0$ é a uma distância infinita da barra, pois não será afetada pelo campo elétrico da barra. O próximo passo é então calcular o trabalho necessário para mover essa partícula do infinito para o ponto P (Figura 4.26). Esse trabalho será denotado por W_∞ . A energia potencial elétrica será então:

$$U = -W_\infty \quad (4.20)$$



4FIGURA 25.44 - Arquitetura de referência para cálculo da energia potencial elétrica. FONTE: Halliday e Resnick (2010 p. 200).



4FIGURA 26.44 - Arquitetura de referência para cálculo da energia potencial elétrica FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 200).

O potencial elétrico V , em um determinado ponto, é então definido como sendo a razão entre a energia potencial elétrica e a carga da partícula quando ela é deslocada do infinito ao ponto em questão:

$$V = -\frac{W_{\infty}}{q_0} = \frac{U}{q_0} \quad (4.21)$$

Esse potencial elétrico é criado a partir da existência de um campo elétrico. Logo, assim como estudamos, o potencial V também existe mesmo que não haja nenhuma carga de prova ao redor do corpo. Com isso, você pode também imaginar que existe um potencial elétrico para cada ponto onde há campo elétrico. Então, de uma outra forma, podemos definir a energia potencial elétrica quando inserimos uma carga q em um ponto onde há potencial elétrico:

$$U = qV \text{ (4.22)}$$

A unidade do potencial elétrico é o volt, que é também o joule por coulomb ($1 V = 1 J/C$)

Quando movemos uma partícula de um ponto a para b em meio a um campo elétrico, existirá uma variação de potencial elétrico $\Delta V = V_b - V_a$ e, conseqüentemente, uma variação de energia potencial:

$$\Delta U = q\Delta V = q(V_b - V_a) \text{ (4.23)}$$

Assim como outras forças (por exemplo a gravitacional), a força elétrica é conservativa, fazendo com que a variação de energia potencial elétrica independa da trajetória feita entre os pontos a e b .

Da mesma forma, podemos também utilizar (4.20) para relacionar o trabalho realizado pela força elétrica para mover a partícula entre os dois pontos:

$$W = -\Delta U = -q\Delta V = -q(V_b - V_a) \text{ (4.24)}$$

Você reparou que falamos agora pouco sobre a propriedade conservativa da força elétrica? Pois é, isso significa que, se uma partícula eletricamente carregada se move ao longo de um campo elétrico sem que nenhuma força aja sobre ela, podemos escrever a relação de conservação de energia mecânica entre os pontos inicial e final:

$$U_a + K_a = U_b + K_b \text{ (4.25)}$$

Ou então:

$$\Delta K = -\Delta U \text{ (4.26)}$$

Representando que a energia mecânica em a (energia potencial elétrica U_a mais a energia cinética K_a) é igual à energia mecânica em b , se substituirmos (4.24) em (4.26) podemos então escrever:

$$\Delta K = -q\Delta V = -q(V_b - V_a) \text{ (4.27)}$$

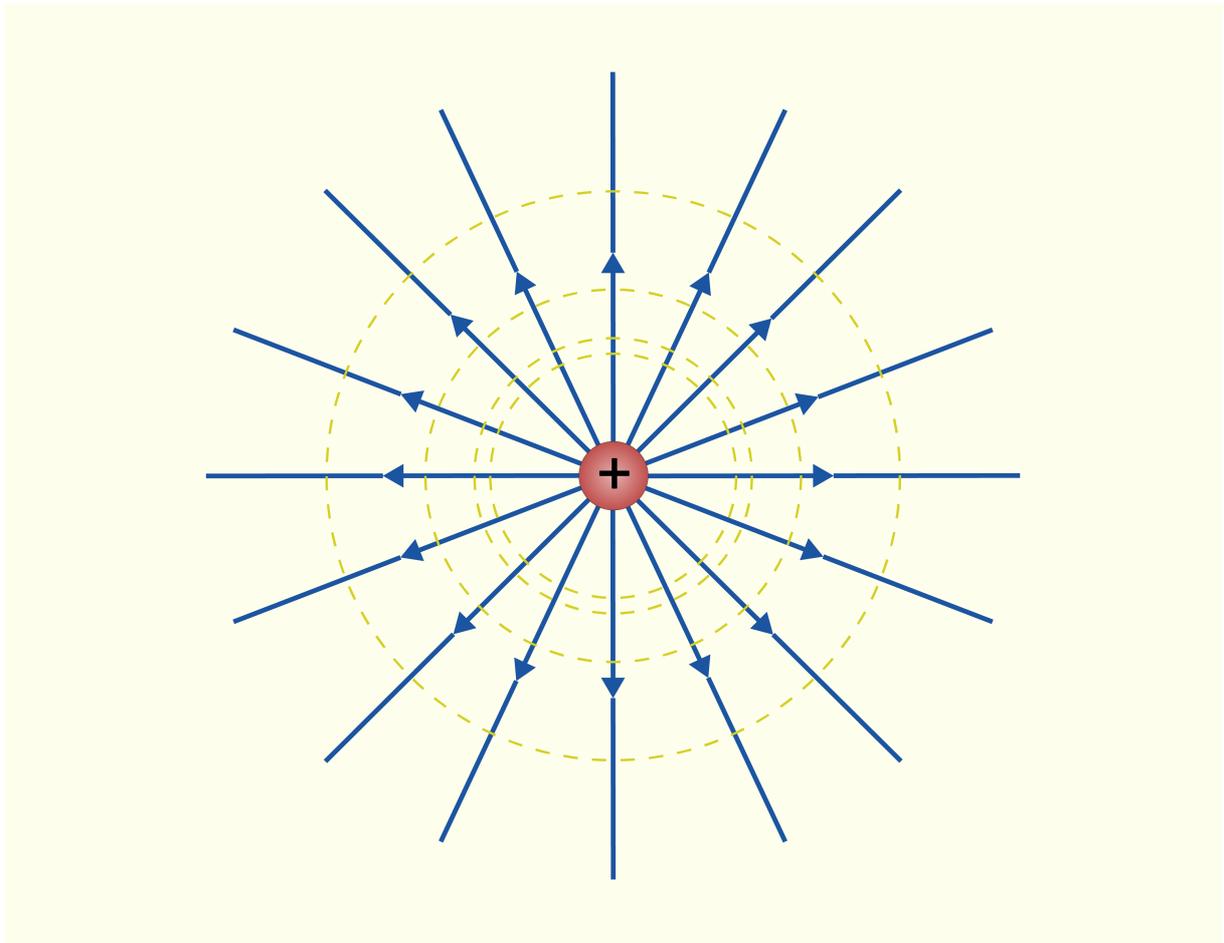
Superfícies equipotenciais

Como visto anteriormente, podemos utilizar *linhas de campo* para buscar entender melhor o comportamento do campo elétrico em uma determinada região. Da mesma forma, podemos utilizar *superfícies equipotenciais* para visualizar locais onde o potencial elétrico não varia. Sendo assim, se a carga de prova que vimos acima estiver se movendo ao longo de uma dessas superfícies, seu potencial elétrico V permanecerá constante.

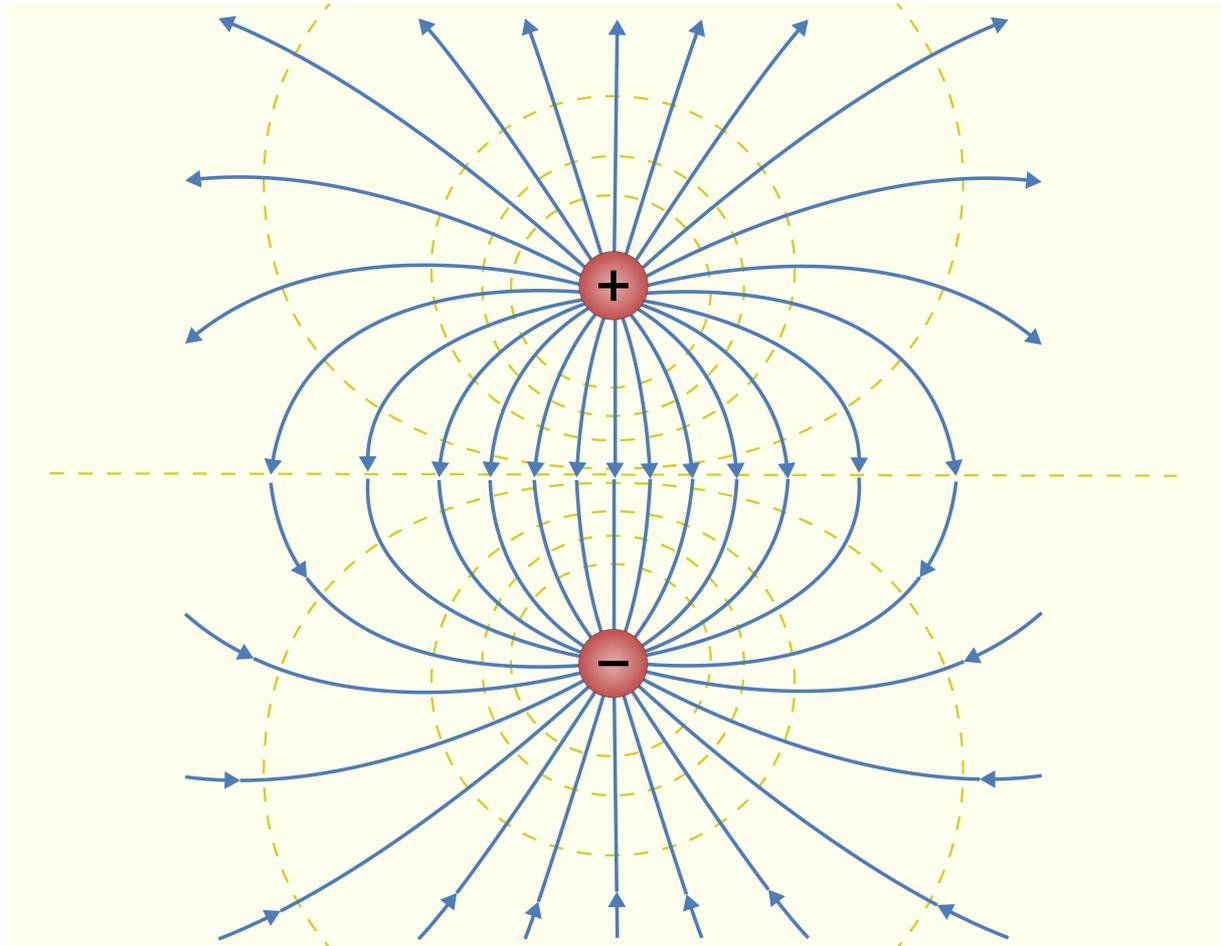
Nessa situação, se você observar as equações (4.23) e (4.24), verá que não somente o potencial elétrico é constante ao longo de uma superfície equipotencial, mas também a variação de energia potencial elétrica e o trabalho realizado serão nulos, pois $V_a = V_b \therefore V_b - V_a = 0$.

Vimos que a energia potencial não varia ao longo dessa superfície, e o campo elétrico não realiza trabalho sobre a carga que se move. Sendo assim, a força elétrica será sempre perpendicular à trajetória da carga de prova que está se movendo ao longo de uma superfície equipotencial.

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam dois arranjos diferentes de cargas com suas respectivas linhas de campo e superfícies equipotenciais. Observe que as linhas de campo e a seção da equipotencial são sempre perpendiculares. Além disso, as linhas equipotenciais foram desenhadas de modo que o espaçamento entre elas representa uma diferença constante de potencial entre duas linhas adjacentes. Ou seja, onde \vec{E} é mais forte, o campo realiza um trabalho grande para um pequeno deslocamento. Onde \vec{E} é fraco, necessita-se um deslocamento maior para provocar o mesmo valor de trabalho.



4FIGURA 27.44 - Linhas de campo e linhas de seção das superfícies equipotenciais ao redor de uma carga puntiforme positiva FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 79).



4FIGURA 28.44 - Linhas de campo e linhas de seção das superfícies equipotenciais ao redor de um dipolo elétrico
FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 79).

Gradiente de potencial

Vamos agora olhar para a Figura 4.29, em que uma carga q_0 se move de i para f . Suponha que nós conhecemos o campo elétrico \vec{E} em todos os pontos da trajetória. Logo, sabemos que haverá sempre uma força $\vec{F} = q_0\vec{E}$ agindo sobre a carga enquanto ela estiver se deslocando por um espaço $d\vec{s}$. Como há um deslocamento e uma força agindo, haverá um trabalho pontual durante esse deslocamento, que é igual a:

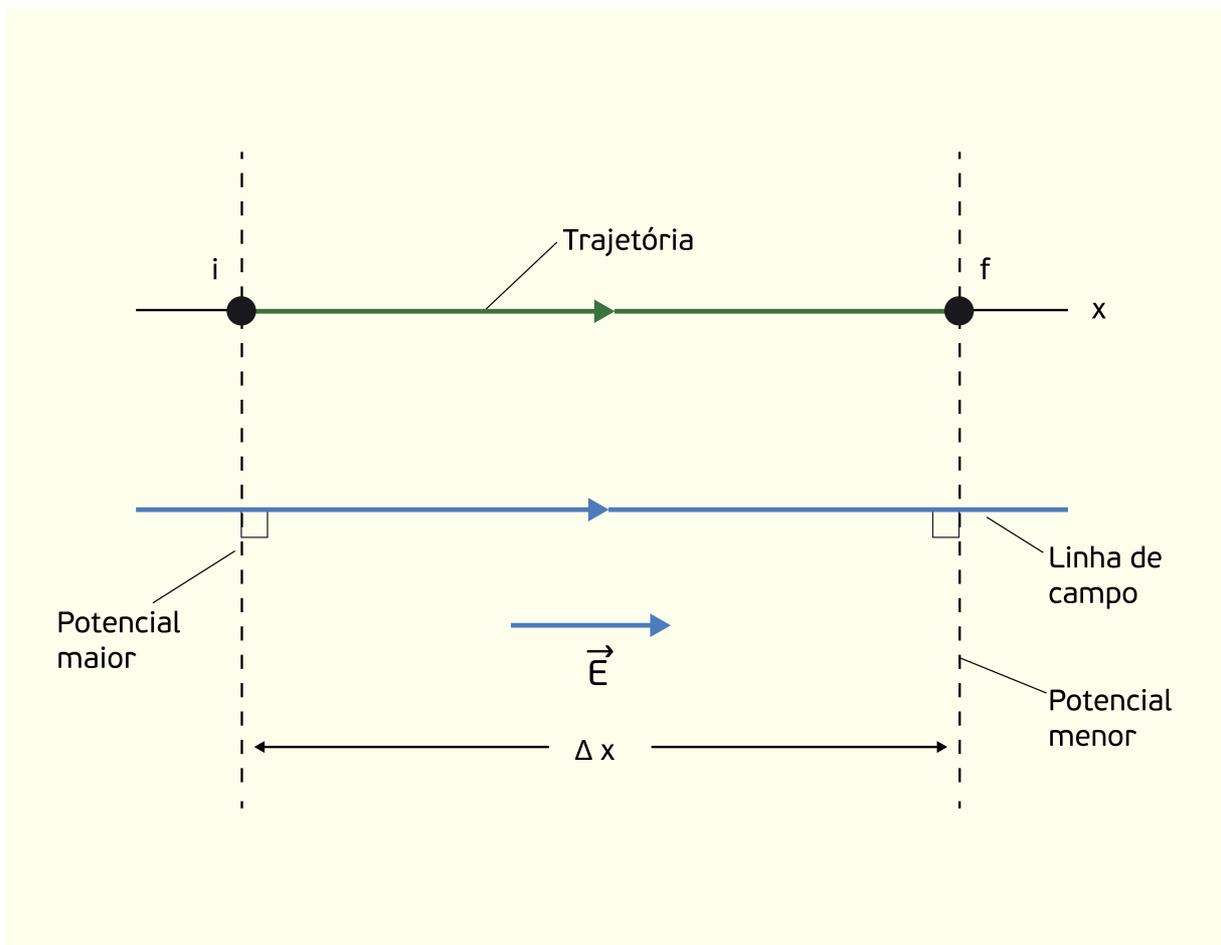
$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = q_0\vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (4.28)$$

Para encontrar o trabalho total realizado pelo campo durante o deslocamento, que vai de i para f , basta integrarmos ambos os lados de (4.28) nesse intervalo:

$$W = q_0 \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (4.29)$$

Substituindo o valor de W encontrado em (4.24), podemos relacionar também a diferença de potencial:

$$V_f - V_i = - \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (4.30)$$



4FIGURA 29.44 - Trajetória de uma partícula, paralela ao campo elétrico, com distância de separação igual a Δx

FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 209).

Portanto, se você considerar a mesma coisa que foi dita no início da seção (que o ponto inicial é onde o potencial elétrico é nulo) a equação (4.28) se torna:

$$V = - \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (4.31)$$

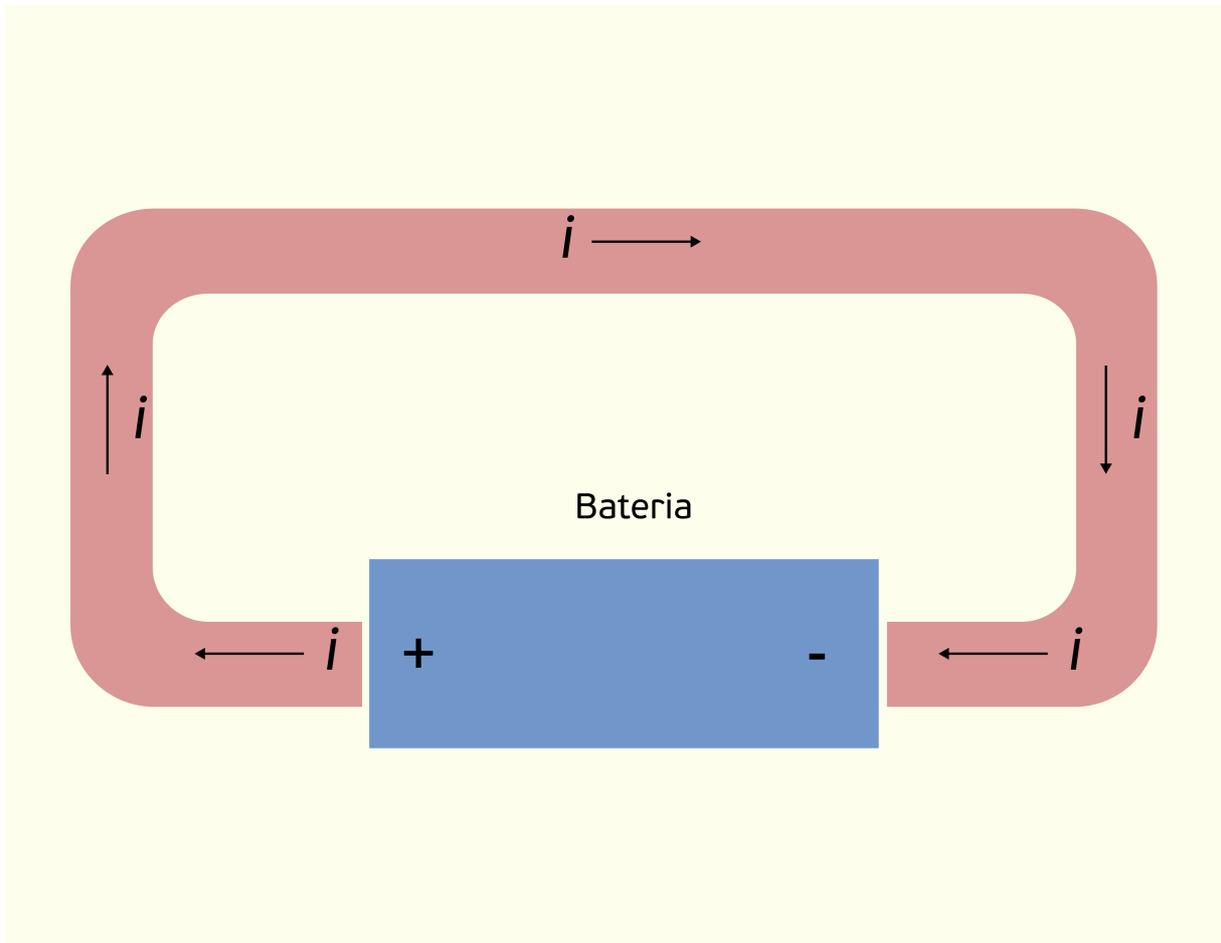
A equação (4.31) é então utilizada para calcular o potencial elétrico V em qualquer ponto dentro de um campo elétrico em relação à referência zero.

Se você for utilizar exemplos em que o campo elétrico é uniforme (assim como o da Figura 4.29), o ângulo entre $d\vec{s}$ e \vec{E} é igual a zero. Logo, $\vec{E} \cdot d\vec{s} = E ds \cos 0 = E ds$. Substituindo essa simplificação em (4.30):

$$V_f - V_i = -E \int_i^f ds = -E \Delta x \quad (4.32)$$

Corrente elétrica e resistência

Uma grandeza física muito utilizada no campo da eletricidade é a *corrente elétrica*, que é basicamente o movimento de partículas carregadas através de um material condutor. Por exemplo, quando possuímos um circuito composto por um material condutor e uma bateria, assim como ilustrado na Figura 4.30, o potencial elétrico não é o mesmo em todo o circuito. As forças resultantes do campo elétrico que se formam faz com que os elétrons se movam em um determinado sentido ao longo do material condutor.



4FIGURA 30.44 - Circuito elétrico composto por uma bateria e um material condutor FONTE: Halliday e Resnick (2010 p. 134).

A partir dessa ideia, podemos então definir matematicamente a corrente elétrica (I) como sendo a variação de cargas dq que flui sobre uma seção do fio condutor em um intervalo de tempo dt :

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (4.33)$$

Ou ainda, se desejarmos encontrar a quantidade de carga que passa por essa seção durante um determinado intervalo de tempo, podemos utilizar a integração:

$$q = \int dq = \int I dt \quad (4.34)$$

No SI, a unidade de corrente é o ampère (A), ou coulomb por segundo (C/s):

1 ampère = 1A = 1 coulomb por segundo = 1C/s

Você observou que, para ilustrarmos que há uma corrente elétrica no fio condutor da Figura 4.30, nós utilizamos algumas setas? Pois é, há uma convenção para determinarmos o sentido dessas setas, que representam o sentido da corrente elétrica. Elas indicam o sentido em que partículas positivas estariam se movendo devido à força do campo elétrico. Os portadores de carga são na verdade os elétrons (negativamente carregados). O campo elétrico então força esses elétrons a se moverem no sentido contrário às setas (saindo do terminal negativo da bateria e indo em direção o terminal positivo). Sendo assim, a convenção adotada é a seguinte: a seta de corrente é desenhada no sentido em que portadores de carga positiva se moveriam, mesmo que os reais portadores de carga, os elétrons, se movam no sentido oposto.

Resistência

No exemplo anterior, conectamos um fio condutor às extremidades de uma bateria. Quando fazemos isso, estamos impondo uma **diferença de potencial elétrico** sobre o fio condutor. Se fizermos esse mesmo tipo de conexão nas extremidades de um vidro, por exemplo, os resultados serão totalmente diferentes. Essa característica de cada material em deixar uma corrente elétrica fluir é chamada de **resistência** (R) elétrica. A resistência é definida como sendo a razão entre a diferença de potencial (V) e a corrente elétrica (I) resultante:

$$R = \frac{V}{I} \quad (4.35)$$

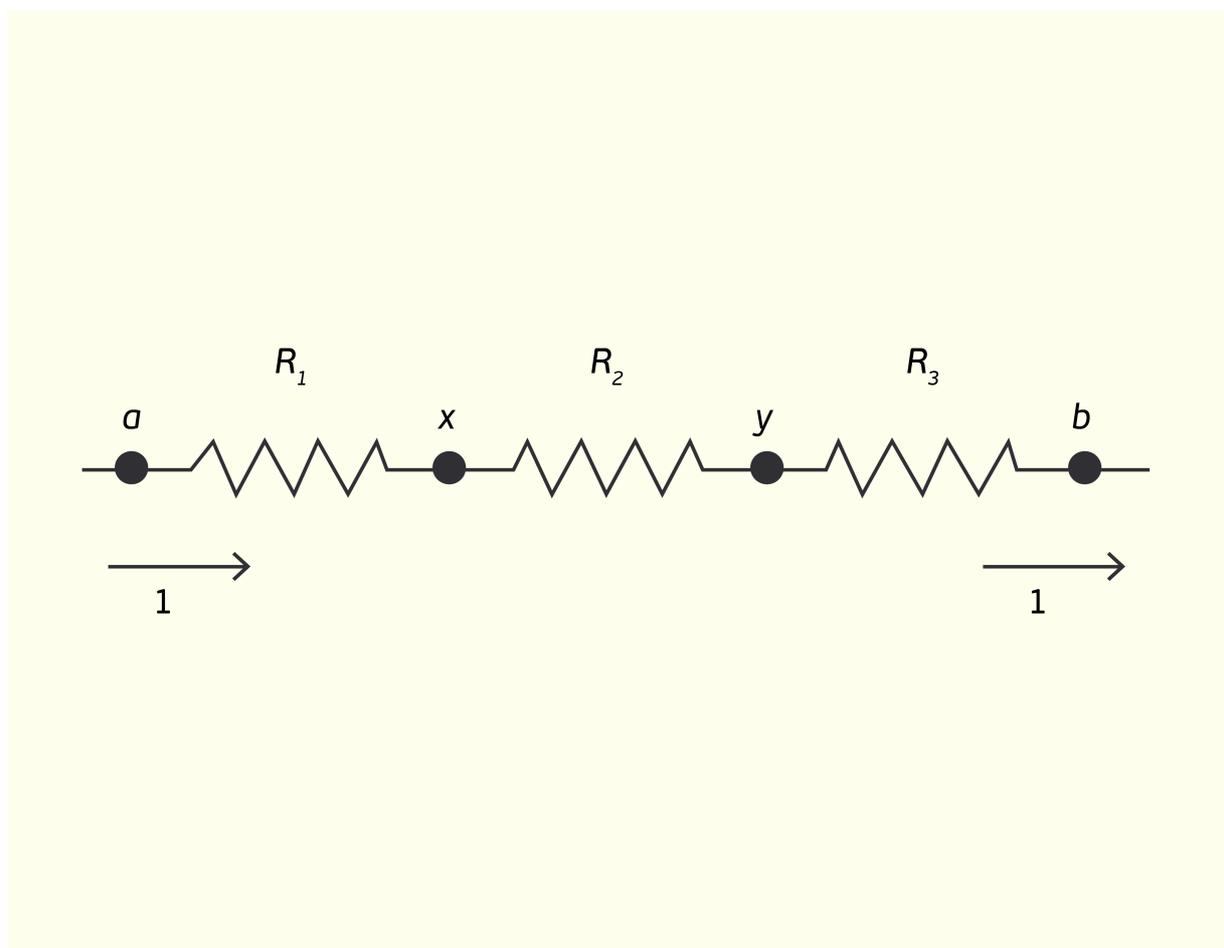
Observando a Equação 4.35 observamos que a unidade da resistência é o volt por ampère, também chamada de **ohm** (Ω).

Manipulando-se a Equação 4.35 podemos chegar a uma das equações mais importantes do campo da eletricidade, a chamada Lei de Ohm, que relaciona tensão (diferença de potencial), corrente elétrica e resistência:

$$V = RI \quad (4.36)$$

A resistência é uma grandeza física, e o componente elétrico cuja principal característica é apresentar uma resistência de valor bastante determinado é chamado de **resistor**. Esse tipo de componente é bastante utilizado em nosso dia a dia. Por exemplo, um secador de cabelos possui um resistor cuja função principal é dissipar energia elétrica na forma de calor, para então poder secar o cabelo do usuário. Você já deve ter observado que diversos equipamentos possuem, por exemplo, diversos níveis de aquecimento. Você tem alguma ideia de como isso pode ser implementado? É basicamente através da associação de dois ou mais resistores.

Podemos então fazer dois tipos de combinações com resistores: *série* e *paralelo*. A associação em série é mostrada na Figura 4.31, e é possível, através da análise das tensões sobre cada resistor, calcularmos a resistência equivalente do circuito.



4FIGURA 31.44 - Associação de resistores em série FONTE: Young e Freedman (2009, p. 170).

Aplicando a Lei de Ohm para cada resistor, obtemos a tensão sobre cada um deles:

$$V_{ax} = IR_1 \quad V_{xy} = IR_2 \quad V_{yb} = IR_3$$

Sendo V_{ax} a tensão entre os pontos a e x ; V_{xy} , a tensão entre os pontos x e y ; e V_{yb} , a tensão entre os pontos y e b , a tensão entre os pontos a e b é então:

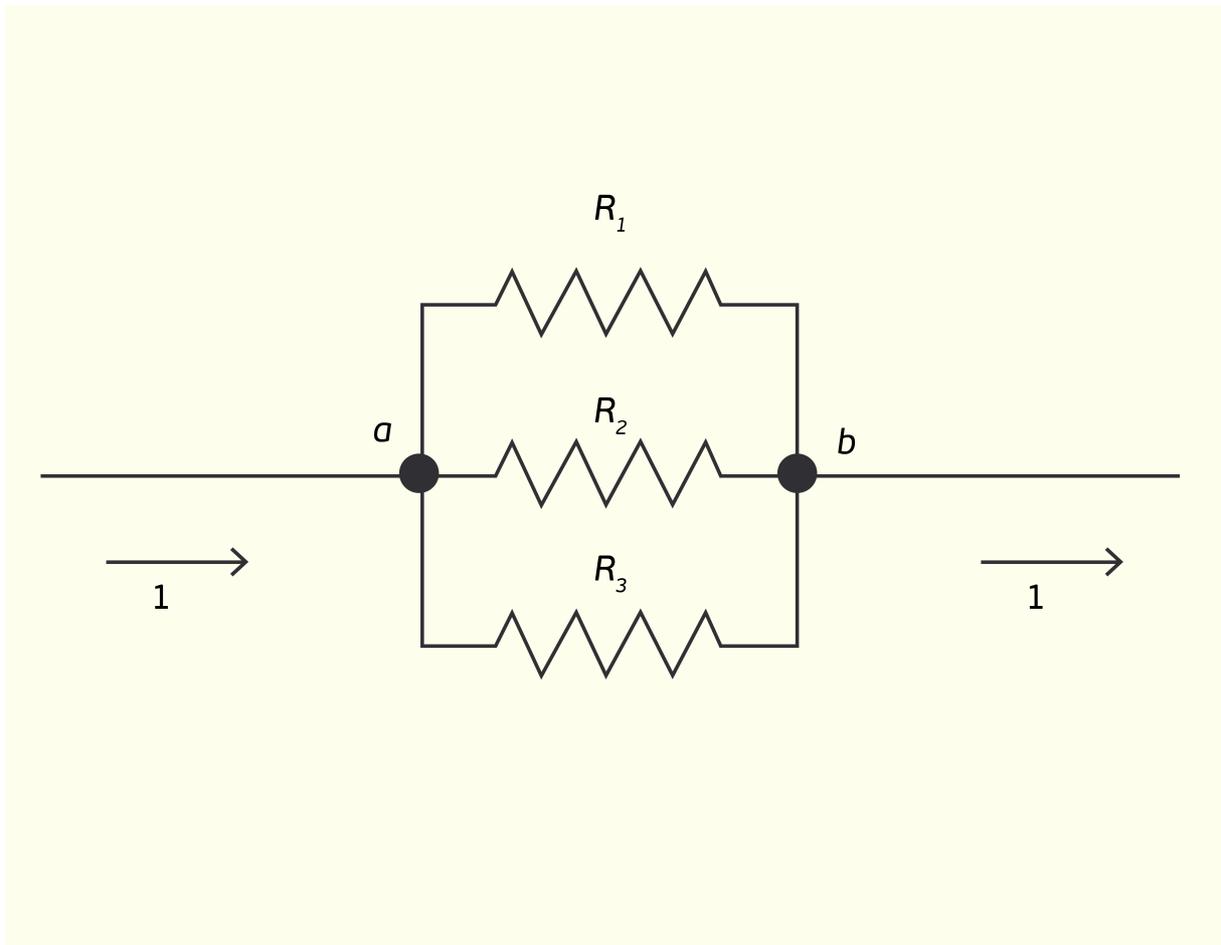
$$V_{ab} = V_{ax} + V_{xy} + V_{yb} = I(R_1 + R_2 + R_3) \quad (4.37)$$

Logo, a resistência equivalente é então:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{V_{ab}}{I} \quad (4.38)$$

A outra associação possível é a combinação em **paralelo**, que é ilustrada na Figura 4.32. Nesse caso, a tensão sobre os pontos a e b é a mesma para os três resistores. Logo, devemos utilizar a Lei de Ohm para encontrar a corrente em cada um deles:

$$I_1 = \frac{V_{ab}}{R_1} \quad I_2 = \frac{V_{ab}}{R_2} \quad I_3 = \frac{V_{ab}}{R_3}$$



4FIGURA 32.44 - Associação de resistores em série FONTE: Young e Freedman (2009, p. 170).

Nesse caso, a corrente total é a soma das correntes em cada um dos resistores:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = V_{ab} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \text{ ou } \frac{I}{V_{ab}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (4.39)$$

Logo, a resistência equivalente para o caso de associação de resistores em paralelo é:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (4.40)$$

A Equação 4.40 é utilizada para o caso de diversos resistores. Especialmente para o caso de dois resistores associados em paralelo, assim, podemos manipular a equação e chegar ao seguinte resultado:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.41)$$

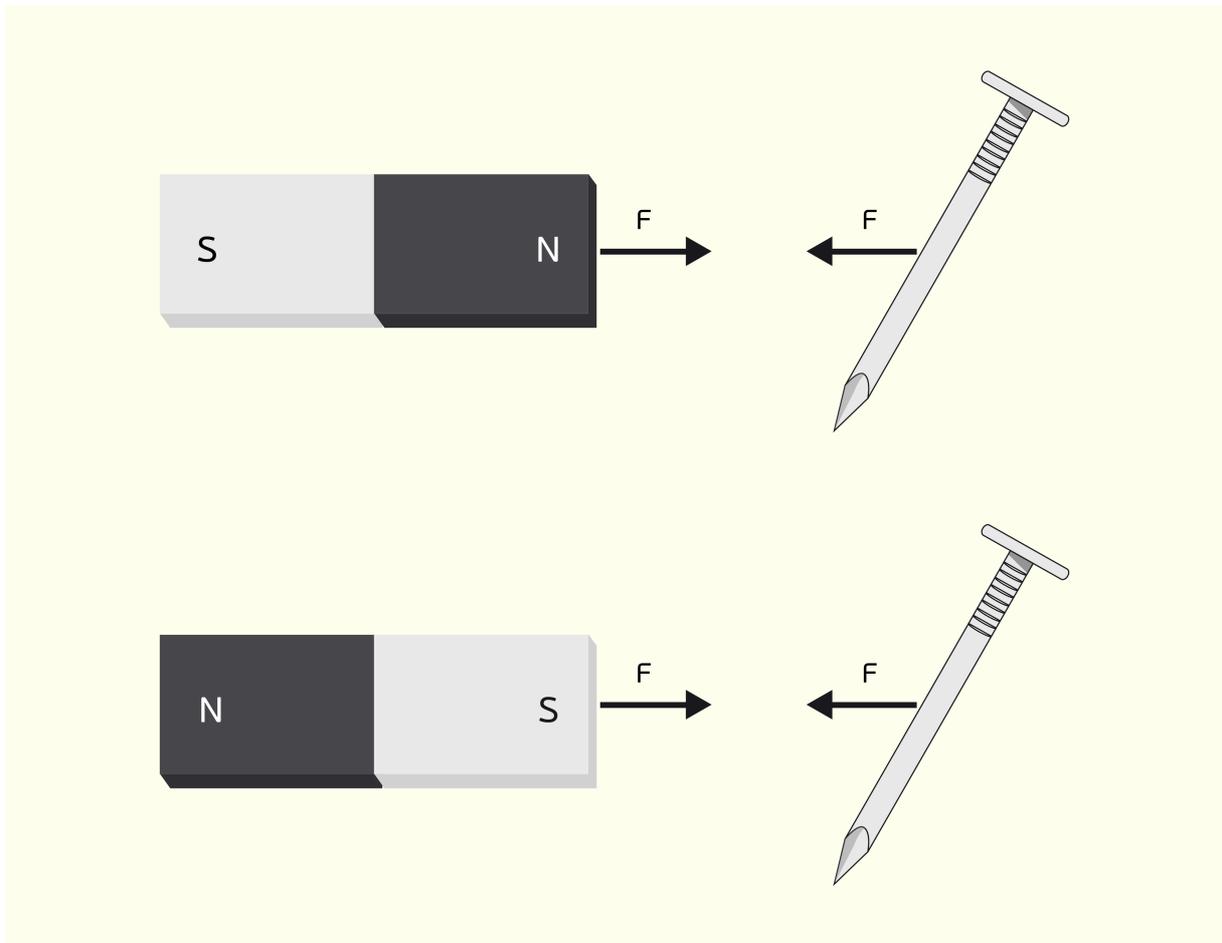
Agora, é hora de resolvermos mais um exercício para aplicar um pouco do conhecimento adquirido com o estudo do potencial elétrico

Campos magnéticos e Forças Magnéticas

Nas unidades anteriores, você pôde aprender como, a partir de um campo elétrico gerado por uma ou mais partículas carregadas, se produz uma força elétrica em outro corpo eletricamente carregado. Mas você reparou que esta unidade se chama Eletromagnetismo? Pois é. Agora iremos estudar um efeito análogo ao campo elétrico, que é o **campo magnético** e a **força magnética** produzida por ele.

Você com certeza já deve ter utilizado um pequeno ímã para prender algo na geladeira. Então, a interação que o ímã tem com a superfície metálica da geladeira se dá devido ao campo magnético produzido. Esse tipo de ímã que você utiliza na geladeira é chamado de **ímã permanente**, que é um material em que os campos magnéticos dos elétrons se somam para produzir um campo magnético permanente ao redor dele. Esse é um tipo especial de material, pois, na maioria dos objetos, os campos magnéticos dos elétrons se cancelam, formando um material com campo magnético nulo.

Antes de começarmos a detalhar o funcionamento do campo magnético, vamos conhecer uma definição muito importante: os **polos magnéticos**. Quando um ímã permanente possui formato de barra, se pendurando de modo a poder girar livremente, uma de suas extremidades irá apontar para o norte; essa extremidade é o polo norte (ou polo N). A outra extremidade é o polo sul (polo S). Observando a Figura 4.33 podemos ver um fenômeno interessante: se algum objeto de ferro (que não esteja imantado ou eletricamente carregado) for aproximado de um ímã, ele será atraído por qualquer um dos polos. É essa atração que ocorre entre o ímã e a porta da geladeira.



4FIGURA 33.44 - Atração entre um objeto metálico e qualquer polo de um ímã permanente. FONTE: Young e Freedma (2009, p. 203).

Lembra-se de como fizemos para definir o campo elétrico \vec{E} na equação (4.5)? Se tivéssemos informação sobre os monopolos magnéticos, poderíamos definir o campo magnético \vec{B} da mesma forma, porém um monopolo magnético ainda não foi encontrado. Para definirmos \vec{B} , teremos que encontrar a força magnética \vec{F}_B exercida sobre um determinado corpo.

Se você deseja medir \vec{B} , terá que encontrar a velocidade com a qual a partícula de prova passa pelo ponto P desejado. Depois de muitos experimentos, vai constatar que, quando a velocidade \vec{v} da partícula está em uma determinada direção, a força \vec{F}_B será zero e, para todas as outras possibilidades de direção de \vec{v} , o módulo de \vec{F}_B é proporcional a $v \sin \phi$, sendo ϕ o ângulo entre aquela direção para qual \vec{F}_B foi nula e a direção atual de \vec{v} . E quanto à direção da força magnética, ela será sempre perpendicular à velocidade \vec{v} da partícula.

Você aprendeu algumas propriedades sobre o módulo e a direção da força magnética. Agora, podemos falar que o campo magnético \vec{B} possui direção condizente com aquela direção em que \vec{F}_B foi nula. Então, você já sabe que \vec{v} e \vec{F}_B são sempre ortogonais. Se conseguirmos medir \vec{F}_B para esse caso, podemos definir o módulo de \vec{B} como sendo:

$$B = \frac{F_B}{|q|v} \quad (4.41)$$

Em que q continua sendo a carga da partícula de prova.

Como vimos, \vec{F}_B e \vec{v} são ortogonais, portanto podemos definir \vec{F}_B a partir do produto vetorial entre esses dois vetores:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (4.42)$$

Ou então utilizando a álgebra linear para encontrar o módulo de \vec{F}_B , podemos definir:

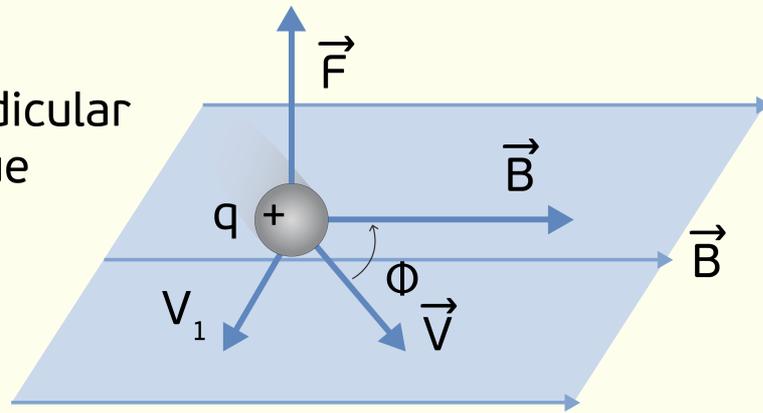
$$F_B = |q|vB \sin \phi \quad (4.43)$$

em que, como visto anteriormente, ϕ é o ângulo formado entre \vec{v} e \vec{B} (Figura 4.34).

Determinação da força magnética

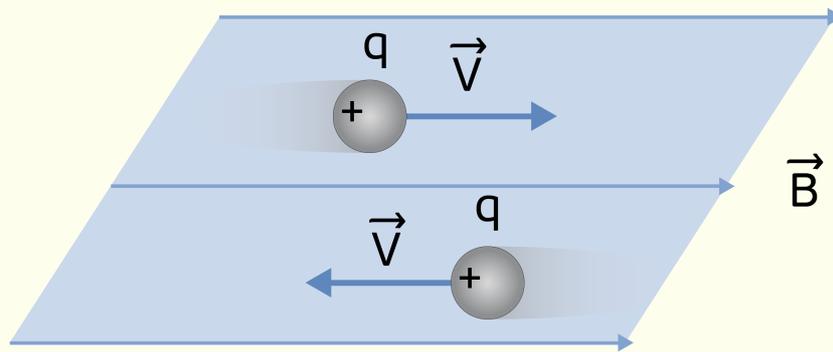
Se você for capaz de interpretar as equações acima, verá que a força \vec{F}_B , e consequentemente o campo \vec{B} , é nula quando a partícula estiver descarregada ($q=0$), parada ($\vec{v}=0$) ou então quando os vetores \vec{v} e \vec{B} forem paralelos (ou antiparalelos), pois seu produto vetorial é nulo, assim como mostrado na Figura 4.35. Além disso, a força \vec{F}_B é máxima (em módulo) se \vec{v} e \vec{B} paralelos (ou antiparalelos), pois seu produto vetorial será máximo (Figura 4.34).

\vec{F} é perpendicular
ao plano que
contém
 \vec{V} e \vec{B} .



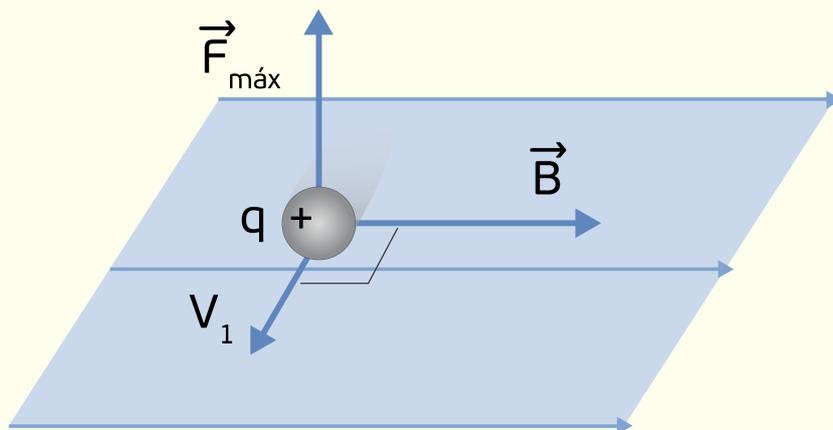
4FIGURA 34.44 - Força magnética $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ cujo módulo é $F_B = |q|vB\sin\phi$ FONTE: Young e Freedman (2009, p. 206).

A **força magnética** será igual a zero quando o movimento de uma carga for **paralelo** ao campo magnético.



4FIGURA 35.44 - Força magnética nula quando \vec{v} e \vec{B} são paralelos FONTE: Young e Freedman (2009, p. 206).

Quando o movimento da carga for perpendicular ao campo magnético, a carga sofrerá uma força magnética máxima com módulo $F_{\text{máx}} = qvB$.



4FIGURA 36.44 - Módulo de \vec{F}_B é máximo quando \vec{v} e \vec{B} perpendiculares FONTE: Young e Freedman (2009, p. 206).

Assim como fizemos com todas as outras forças, é importante também definirmos a unidade da força magnética. \vec{F}_B é medida em tesla (T), que é o newton por coulomb-metro por segundo:

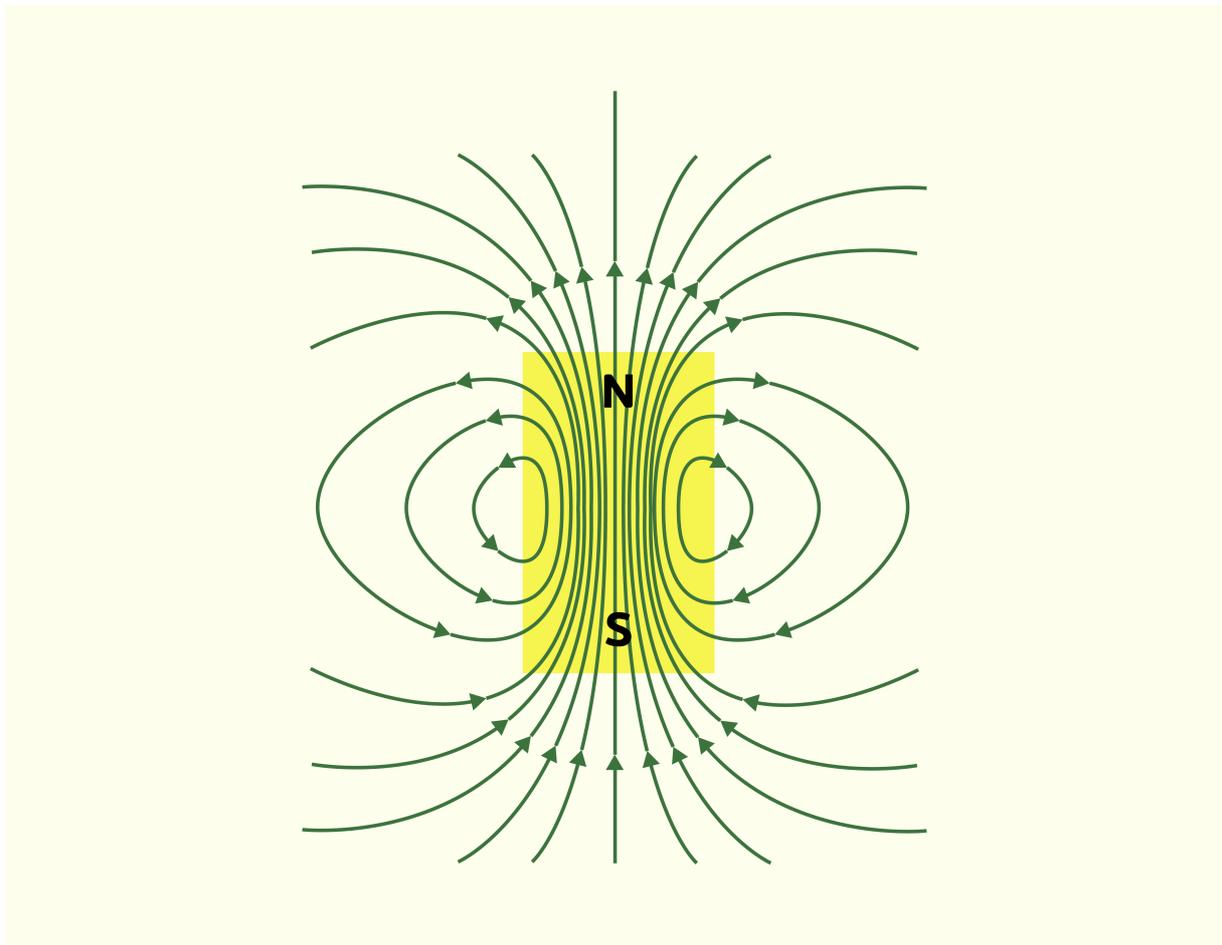
$$1 \text{ tesla} = 1 T = \frac{\text{newton}}{(\text{coulomb})(\text{metro/segundo})} = \frac{\text{newton}}{(\text{coulomb/segundo})(\text{metro})} = 1 \frac{N}{A \cdot m} \quad (4.44)$$

Linhas de campo magnético e fluxo magnético

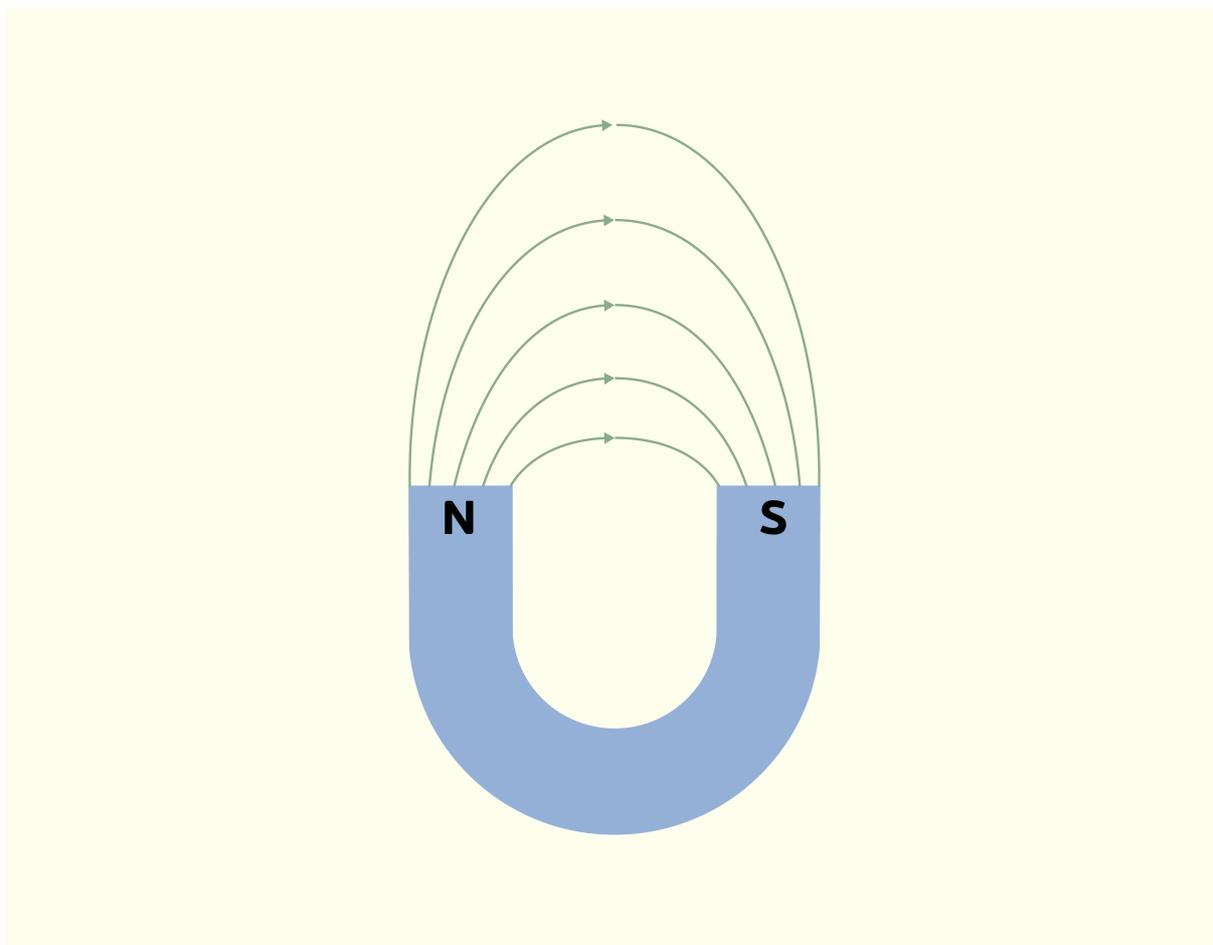
Lembra-se das linhas de campo elétrico? Para o caso do campo magnético, temos algo similar, que são as linhas de campo magnético. Sendo assim, algumas definições serão análogas àsquelas vistas anteriormente: i) em qualquer ponto da linha de campo magnético,

a direção de \vec{B} será a mesma direção da tangente da linha de campo magnético; *ii*) o espaço entre as várias linhas de campo representa a intensidade (módulo) de \vec{B} , ou seja, quanto mais concentradas estiverem as linhas, mais intenso é o campo.

Vamos observar a Figura 4.37, que mostra as linhas de campo magnético em um em um ímã em formato de barra, ou em formato de ferradura como na Figura 4.38. Observe que as linhas sempre saem pelo polo norte e entram no polo sul do ímã. Além disso, todas as linhas formam curvas fechadas (algumas linhas não aparecem em curvas fechadas na figura, pois as suas curvas são mais amplas do que o limite da imagem).



4FIGURA 37.44 - Linhas de campo magnético em um ímã com formato de barra FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 192).

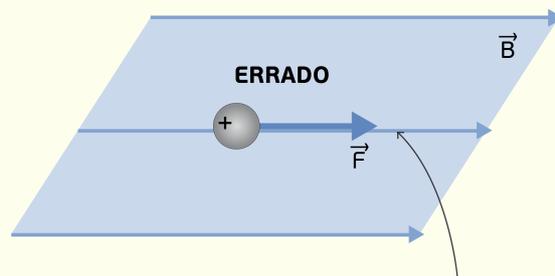


4FIGURA 38.44 - Linhas de campo magnético em um ímã com formato de ferradura FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 193).

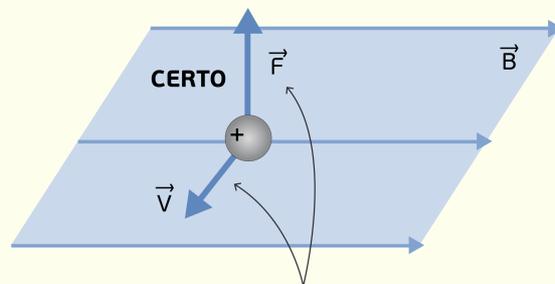
Observe que cada ímã possui dois polos. Por isso, você pode falar que ele se comporta como um **dipolo magnético**, o que vai permitir você fazer uma afirmação análoga ao caso dos dipolos elétricos: polos magnéticos de mesmo tipo se repelem, enquanto polos de tipos diferentes se atraem.

Observe também um fato muito importante no caso das linhas de campo magnético: **elas não possuem começo e fim**. Assim como desenhado na Figura 4.37, você consegue determinar o ponto onde elas entram e saem, mas na realidade elas continuam ao longo do ímã, formando então as curvas fechadas.

Outra interpretação muito importante que vale a pena ressaltar é que a força magnética atuante na partícula não está ao longo do sentido da linha de campo. Na verdade, o sentido de \vec{F}_B é determinado pelo produto vetorial já estudado $\vec{v} \times \vec{B}$, assim como ilustrado na Figura 4.38.



As linhas do campo magnético não são 'linhas de força'. A força que atua sobre a partícula carregada não está orientada ao longo do sentido de uma linha de campo.

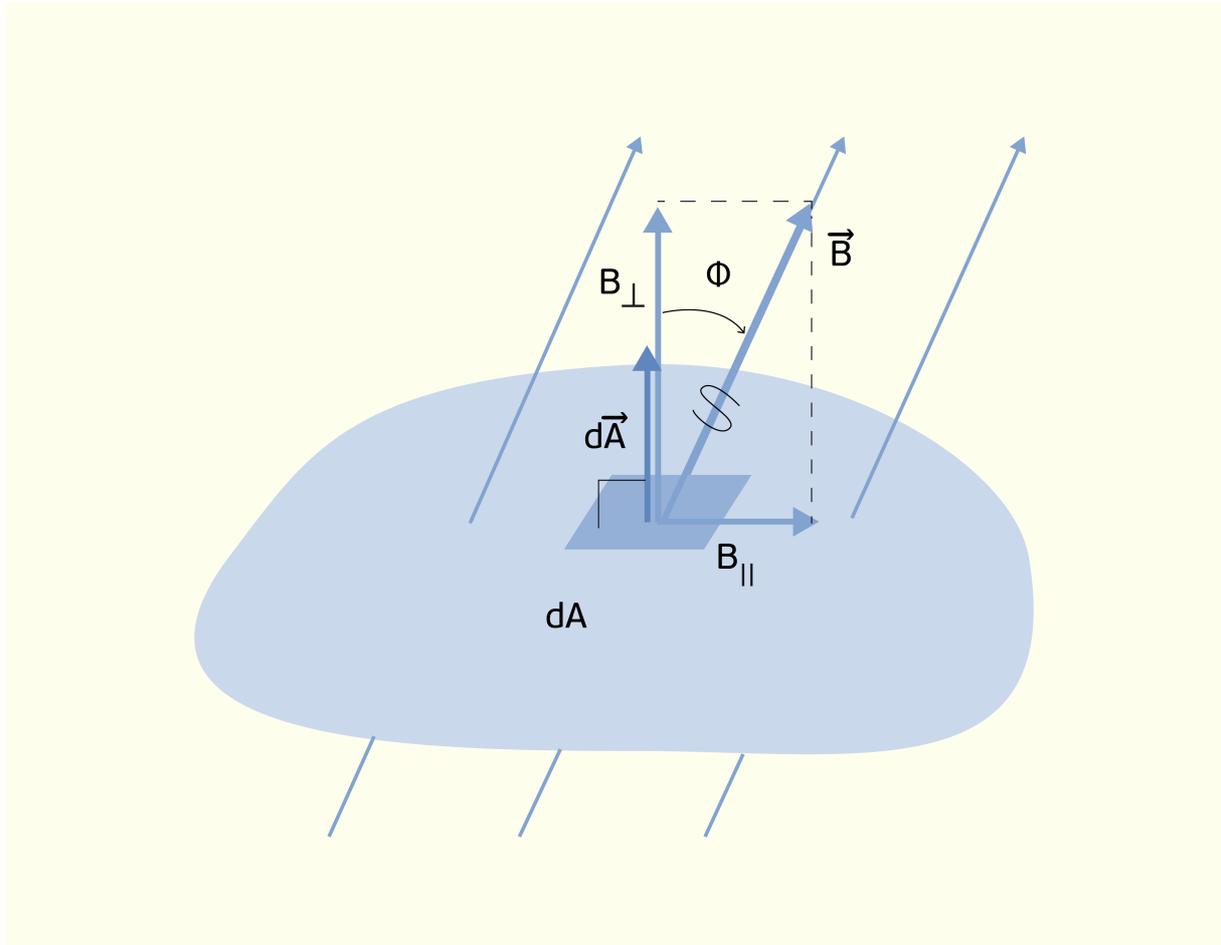


O sentido da força magnética depende da velocidade \vec{v} , conforme expressa pela lei da força magnética $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$.

4FIGURA 39.44 - Determinação da direção e sentido de \vec{F}_B FONTE: Young e Freedman (2009, p. 209).

Fluxo magnético e a lei de Gauss para o magnetismo

Lembra-se de como definimos o fluxo elétrico através do campo elétrico que atravessava uma pequena área de uma superfície fechada? Para a determinação do fluxo magnético, isso não será diferente. Observando então a Figura 4.40, você poderá identificar o pedaço de área dA escolhido e o campo \vec{B} que cruza essa área. Para cada elemento dA , será necessário calcular o componente de \vec{B} normal à superfície, que é dado por $B_{\perp} = B \cos \phi$, com o ângulo ϕ entre o vetor \vec{B} e a superfície.



4FIGURA 40.44 - Peça dA utilizado para cálculo do fluxo magnético FONTE: Young e Freedman (2009, p. 210).

Normalmente, o componente normal de \vec{B} varia em cada pequeno pedaço da superfície. Sendo assim, é necessário definir a variação de fluxo magnético $d\Phi_B$ (Φ_B é o fluxo, e $d\Phi_B$ é a variação) através da superfície gaussiana utilizada:

$$d\Phi_B = B_{\perp} dA = B \cos \phi dA = \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (4.45)$$

Portanto, integrando-se a variação do fluxo magnético ao longo de toda a superfície, você poderá encontrar o fluxo magnético total:

$$\Phi_B = \int B_{\perp} dA = \int B \cos \phi dA = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (4.46)$$

Observando (4.46), podemos analisar que a unidade do fluxo magnético será o resultado da multiplicação do campo magnético (dado em tesla) pela área (dada em metros quadrados). A isso nós damos o nome de **weber** (Wb), sendo $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$.

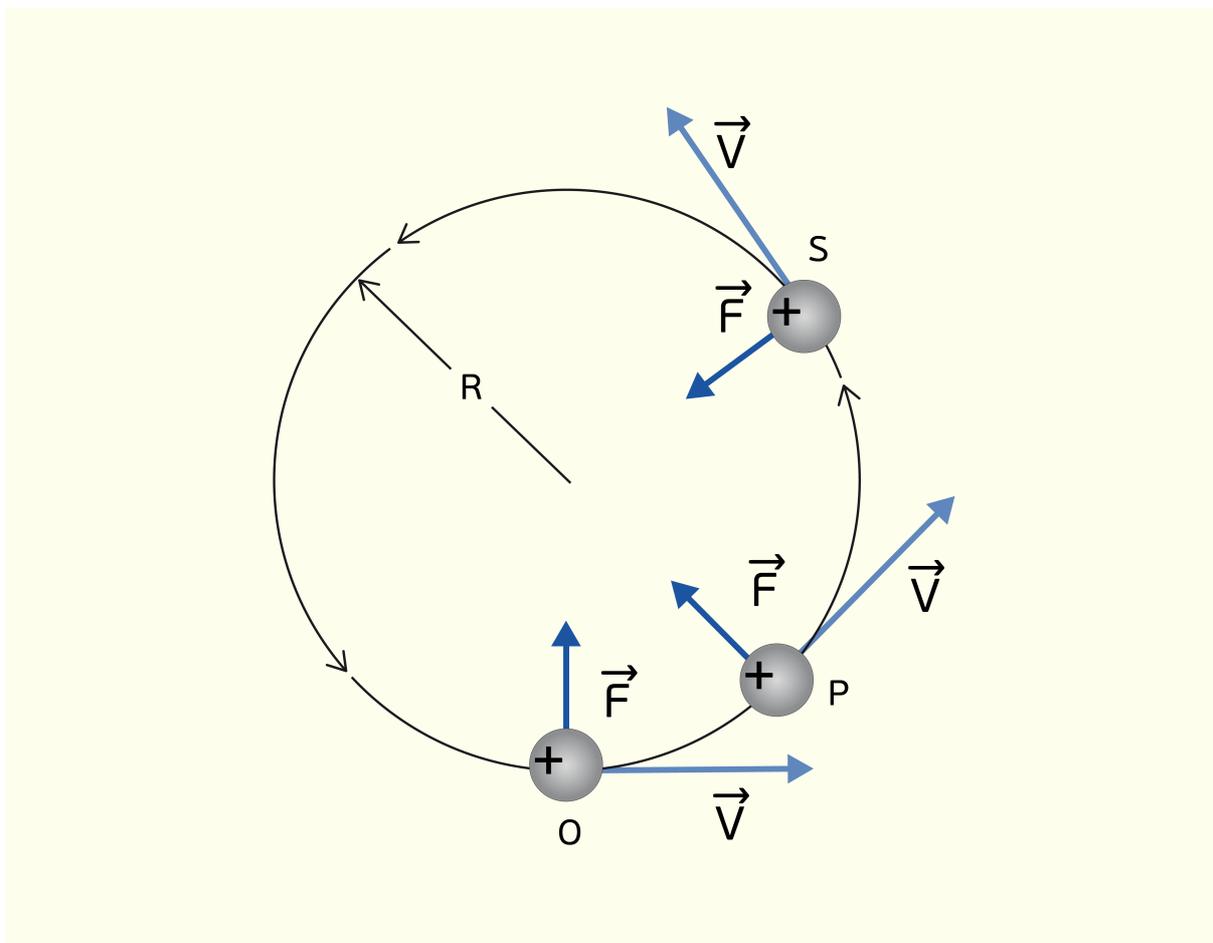
Lembra-se do que a lei de Gauss dizia sobre o fluxo *elétrico*? Ela fala que o fluxo elétrico total que flui através de uma superfície gaussiana é proporcional à soma de todas as cargas (carga total) existentes no interior dessa superfície. Por exemplo, caso a superfície englobe um dipolo elétrico, o fluxo elétrico total é zero, pois no dipolo uma carga anula a outra.

Se adaptarmos esse pensamento para o caso do fluxo magnético podemos chegar à mesma conclusão. Caso a superfície gaussiana englobe um ímã, o fluxo magnético é nulo, pois, em um ímã, um polo anula o efeito do outro. Se fosse possível criar um monopolo magnético, e a superfície fechada o englobasse, então o fluxo magnético seria proporcional à carga magnética do monopolo. Porém, você deve estar lembrado de que, até hoje, ninguém descobriu um monopolo livre. Portanto, **o fluxo magnético total através de uma superfície fechada é sempre igual a zero:**

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (4.47)$$

Movimento de partículas carregadas em um campo magnético

Você chegou a imaginar o que acontece se uma partícula carregada entrar em uma superfície na qual haja um campo magnético constante? Será que ela irá ser acelerada e sair da superfície? Ou então a força magnética irá parar o movimento da partícula? Observe então a Figura 4.41, na qual uma partícula com carga positiva está passando pelo ponto O com uma velocidade \vec{v} dentro de uma superfície onde o campo magnético \vec{B} é uniforme. Vendo que \vec{v} e \vec{B} são paralelos sabemos então que $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ possui módulo $F = qvB$ e direção mostrada na figura.



4FIGURA 41.44 - Partícula carregada em movimento dentro de uma superfície com campo magnético FONTE: Young e Freedman (2009, p. 212).

Observe que a força é sempre perpendicular à velocidade. Você sabe me dizer o que isso significa? Assim como vimos na Unidade I, se a força é ortogonal à velocidade, ela não conseguirá mudar o módulo da velocidade, apenas a direção dela. Ou seja, a força magnética nunca irá possuir componente paralelo à velocidade de uma partícula carregada, fazendo com que apenas a direção da velocidade varie, e não o módulo. Portanto, a velocidade de uma partícula carregada que se move em uma região onde só haja influência de campo magnético possuirá **módulo sempre constante**.

Você consegue enxergar semelhança entre isso e algum outro tipo de movimento estudado anteriormente? Lembra-se do movimento circular uniforme? Pois é, podemos afirmar que a partícula apresentará um movimento circular. Logo, o módulo da aceleração centrípeta é dado por v^2/R , sendo R o raio da circunferência. Dado que, neste exemplo, só há influência do

campo magnético, a força magnética (equação (4.43)) é a única atuante no movimento. Utilizando a segunda lei de Newton, podemos relacionar a força magnética à aceleração centrípeta e à massa da partícula:

$$F = |q|vB = \frac{mv^2}{R} \quad (4.48)$$

A partir de (4.48), você é capaz de encontrar o raio da trajetória feita pela partícula:

$$R = \frac{mv}{|q|B} \quad (4.49)$$

Lembrando que a velocidade angular ω é dada por $v = R\omega$, podemos encontrar:

$$\omega = \frac{v}{R} = v \frac{|q|B}{mv} = \frac{|q|B}{m} \quad (4.50)$$

O período dessa revolução é igual ao raio da circunferência dividido pela velocidade:

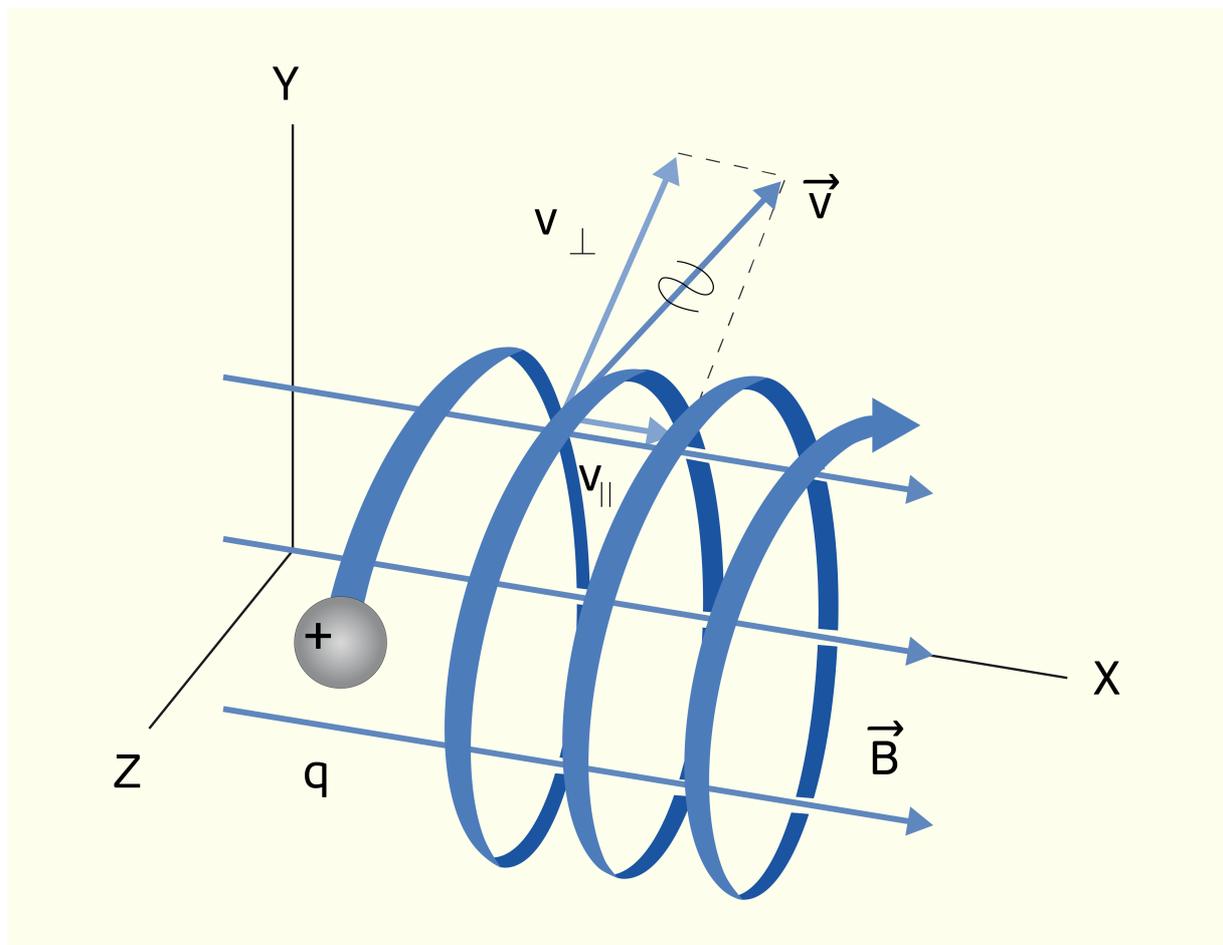
$$T = \frac{2\pi R}{v} = 2\pi R \cdot \frac{m}{|q|BR} = \frac{2\pi m}{|q|B} \quad (4.51)$$

A frequência de revolução é então:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{|q|B}{2\pi m} \quad (4.52)$$

Note que a frequência de revolução não depende da velocidade da partícula. Essa frequência é chamada de **frequência ciclotrônica**.

Mas e se a partícula não entrar no campo magnético com a velocidade perpendicular ao campo? Nesse caso, vamos observar a Figura 4.42. Como a força magnética será sempre perpendicular ao campo magnético, nunca haverá forças contribuindo para modificar o componente paralelo da velocidade. Portanto, o componente da velocidade perpendicular ao campo será responsável pelo movimento da partícula, a força magnética influenciará somente na direção da velocidade e o componente da velocidade perpendicular ao campo fará com que a partícula descreva um movimento helicoidal.

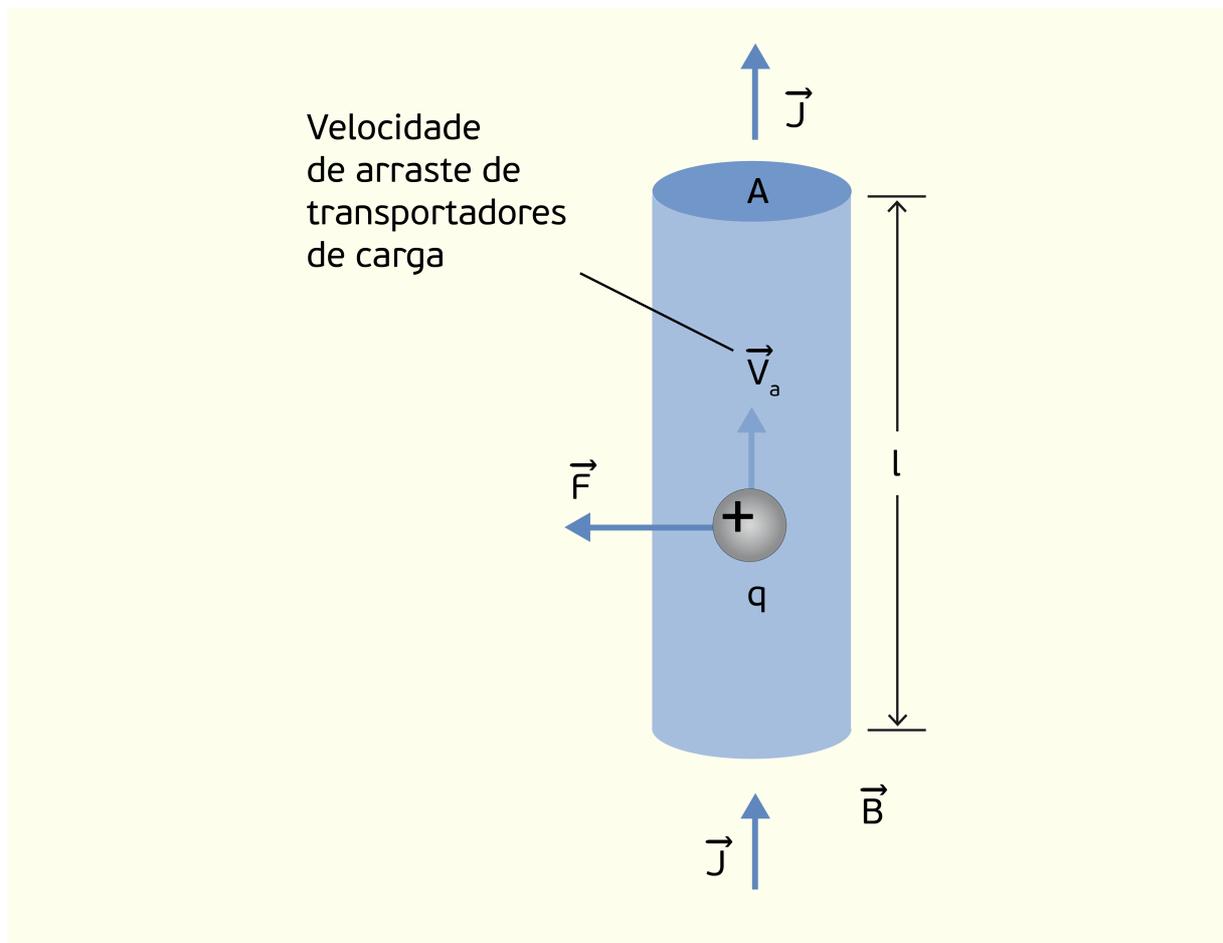


4FIGURA 42.44 - Movimento helicoidal de uma partícula sob influência somente do campo magnético FONTE: Young e Freedman (2009, p. 212).

Força magnética sobre um condutor transportando uma corrente

Você já se perguntou como funciona um motor elétrico? Como apenas aplicando uma tensão sobre ele conseguimos fazer seu eixo rotacionar? Essa resposta está intimamente ligada à força magnética. Quando uma corrente passa por um condutor, forças magnéticas atuam sobre o condutor e são transmitidas para o material do condutor, que irá sofrer uma ação distribuída ao longo de todo seu comprimento. Essa força irá então agir sobre o eixo, fazendo-o girar.

A Figura 4.43 mostra um pedaço de fio condutor transportando uma corrente i . Considerando apenas uma carga q no condutor de comprimento l , sabemos que a força magnética que age sobre ela é $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$, sendo \vec{B} o campo magnético no qual o condutor está inserido (resultado da corrente que flui por ele).



4FIGURA 43.44 - Condutor retilíneo transportando uma corrente FONTE: Young e Freedman (2009, p. 217).

Todas as cargas que estão no condutor são arrastadas em uma velocidade média \vec{v}_a . Desse modo, podemos falar que a força magnética média sobre cada uma das cargas é $\vec{F} = q\vec{v}_a \times \vec{B}$, que é perpendicular à velocidade de arraste. Como \vec{v}_a e \vec{B} também são perpendiculares, o módulo de \vec{F} é $F = qv_aB$.

Assumindo agora que em uma unidade de volume do condutor em questão haja n cargas de valor q . Como o condutor possui comprimento l , podemos afirmar que seu volume é Al , em que A é a área de seção do condutor. Portanto, ao longo de todo o condutor, o número total de cargas é nAl . Consequentemente, o módulo da força magnética total que atua sobre todas as cargas que se movem no condutor é:

$$F = (nAl)(qv_a B) = (nqv_a A)(lB) \quad (4.53)$$

Ou então podemos falar que, após um intervalo de tempo $t = l/v_a$, todas as cargas que estavam no comprimento l do fio já terminaram de atravessá-lo. Assim, a carga total pode ser proporcionalmente calculada:

$$q = i \cdot t = i \frac{l}{v_a} \quad (4.54)$$

Substituindo o valor da carga na equação da força:

$$F = qv_a B = i \frac{l}{v_a} v_a B = ilB \quad (4.55)$$

Porém, caso o campo magnético não seja perpendicular ao fio, a força magnética terá que envolver o produto vetorial entre um vetor \vec{L} - cujo módulo é igual a l e direção é igual à direção do trecho do fio - e o campo magnético, numa versão genérica de (4.55):

$$\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B} \quad (4.56)$$

E o módulo de \vec{F} para esse caso é:

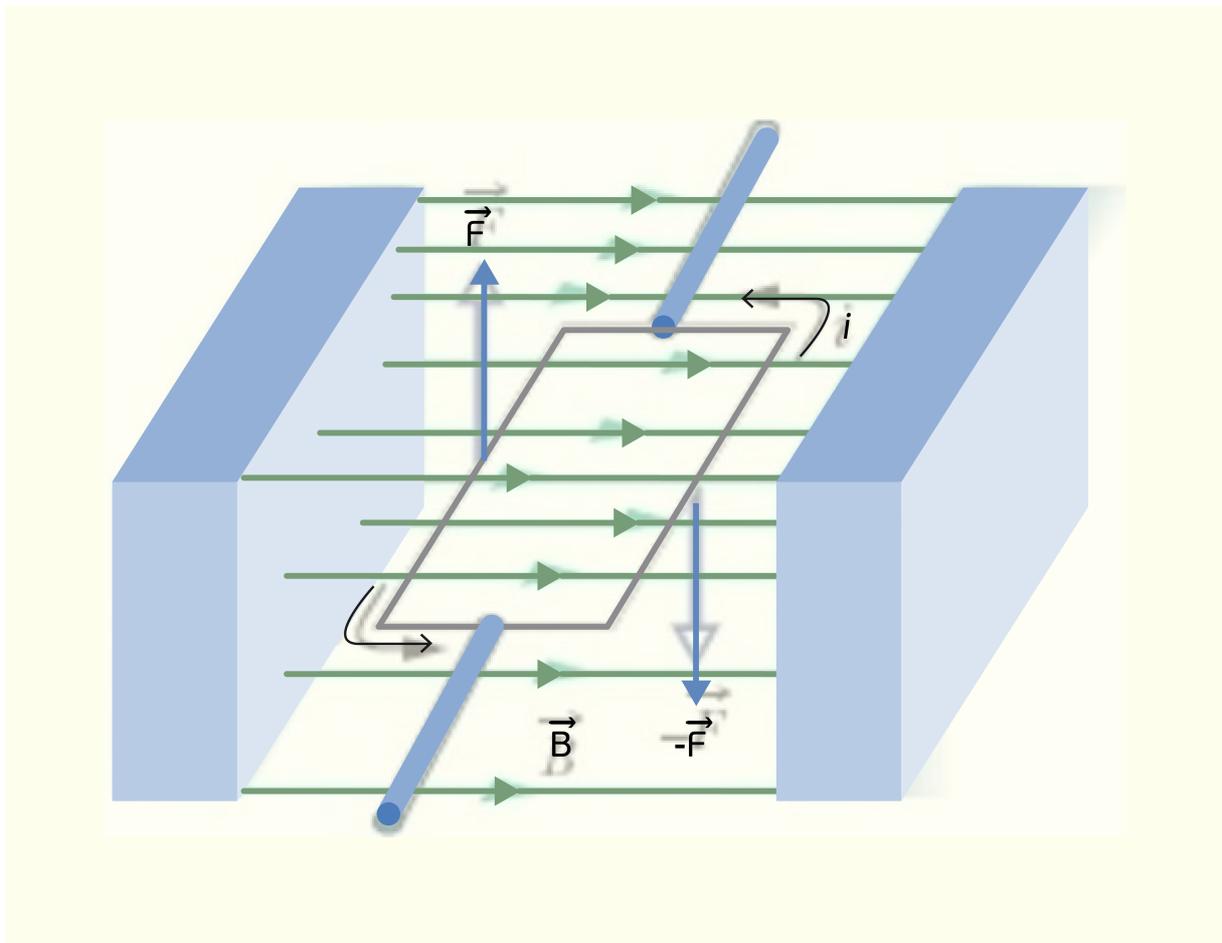
$$F = ilB \sin \phi \quad (4.57)$$

Sendo ϕ o ângulo entre \vec{L} e \vec{B} .

Força e torque sobre uma espira de corrente

Lembra-se da conversa sobre a rotação de um motor? Utilizando um simples exemplo de espira percorrida por uma corrente elétrica e inserida em um meio com campo magnético, poderemos entender, de uma forma muito básica e sem muitos detalhes, como o movimento de rotação acontece.

Observe o esquema mostrado na Figura 4.44, em que uma espira de corrente é inserida em um campo magnético. Como há uma corrente fluindo no condutor da espira, há inúmeras cargas ao longo de todo seu comprimento. As forças magnéticas \vec{F} e $-\vec{F}$, obtidas a partir do produto vetorial entre \vec{B} e \vec{v} , estão direcionadas de tal maneira que produzem um torque na espira, fazendo-a girar em torno de seu eixo central. Esse efeito é, de uma maneira muito básica, o que faz o rotor de um motor elétrico girar.



4FIGURA 44.44 - Bobina percorrida por corrente em meio a um campo magnético FONTE: Halliday e Resnick (2010, p. 206).

Entendemos que esta unidade foi um pouco mais complicada, pois estamos lidando com forças que não podemos visualizar. Mas os resultados provocados pela ação das forças e campos eletromagnéticos são muito visíveis. Para testarmos nosso conhecimento sobre as forças magnéticas, vamos agora responder a uma pequena pergunta teórica.

Querido(a) aluno(a), você chegou ao final de mais uma unidade e agora está apto para entender, de uma maneira mais detalhada, as forças eletromagnéticas que estão presentes em diversas situações do nosso dia a dia. Para instigar você a pesquisar ainda mais sobre o assunto vamos agora refletir um pouco sobre um fato bastante corriqueiro e que você provavelmente não sabe que é intimamente ligado ao que foi estudado nesta unidade.

Reflita

Você com certeza já deve ter parado para admirar os raios que cruzam o céu em dias chuvosos. Porém, o que você não sabe é que eles estão bastante ligados a cargas elétricas em excesso na atmosfera. Pois é, em dias chuvosos há uma grande tendência de que cargas elétricas fiquem acumuladas na atmosfera. Você com certeza também já deve ter visto algum para-raios, que possui um cabo condutor ligando uma antena metálica à superfície terrestre. Você sabe explicar por que os raios tendem a ser direcionados para os para-raios? Para responder a essa pergunta, saiba que a extremidade do para-raios é construída de tal forma a acumular uma quantidade substancial de cargas de sinal contrário àquelas cargas presentes na atmosfera nesses dias de tempestade.



Fique por dentro

Você com certeza já deve ter cozinhado alguma vez na sua vida. Fez isso em um fogão a gás? Ou fogão a lenha? Pode ter sido também em um fogão elétrico. Porém, você sabia que uma das mais novas tecnologias para fogões é totalmente baseada no conteúdo que nós estudamos nesta unidade? Pois é, eles são chamados de **fogões de indução**. Esses equipamentos são baseados no campo magnético gerado por uma bobina com corrente elétrica que circula por ela. Assim como visto nesta unidade, quando uma corrente elétrica passa por um condutor, há um campo magnético gerado ao seu redor. Nos fogões de indução, o condutor é composto por várias espiras e é chamado de indutor. Quando uma corrente elétrica circula pelo indutor, um intenso campo magnético é produzido. Através do método de indução, esse campo magnético induz cargas sobre a panela que está em cima do fogão. Devido às características ferromagnéticas do material da panela, essa carga induzida acaba se transformando em calor, que aquece a panela.

Um fato interessante é que, se não houver nenhuma panela de material ferromagnético, nenhum calor será induzido. Por exemplo, se uma panela de alumínio for colocada em cima do fogão, ela não esquentará, porque o alumínio tem uma propriedade específica que bloqueia o campo magnético. Além disso, o vidro que fica em cima do fogão de indução não aquece devido à indução magnética, pois o vidro deixa passar livremente todo o campo magnético. O vidro do fogão esquenta somente devido ao contato com a panela, pois, uma vez que ela fica quente, acaba transferindo calor por condução devido ao toque entre os dois materiais.

Como curiosidade, da próxima vez que encontrar um fogão desse tipo, coloque sua mão sobre o vidro e tente ligar o fogão. Nada acontecerá, pois não há nenhuma panela ou material ferromagnético para que o campo magnético seja induzido.

Conclusão

Querido(a) aluno(a), como você pôde observar, o estudo dos conceitos de física nos permite entender as leis gerais que regem a natureza e o universo, ao serem descritos os seus fenômenos, inter-relações e propriedades. Com o objetivo de recapitular o que foi visto neste livro, temos que: A Unidade I - Mecânica - apresentou as grandezas fundamentais da mecânica, classificando-as em escalares e vetoriais, juntamente com as operações matemáticas pertinentes a cada uma delas. Além disso, ao considerar como uma partícula se move ao longo de uma trajetória - linear ou circular - em relação a um determinado referencial, foram apresentadas as definições de velocidade e aceleração (médias, instantâneas e relativas), queda livre e do movimento realizado por um projétil. Também foram abordadas as Leis de Newton. A Unidade II - Leis de Conservação - classificou, por sua vez, os diversos tipos de sistemas (aberto, fechado, isolado), caracterizando as principais formas de energia (cinética, potencial, interna) e os mecanismos responsáveis por sua transferência; além dos conceitos relacionados à Primeira Lei da Termodinâmica, movimento de rotação e de gravitação universal. A Unidade III - Propriedades da Matéria - abordou a natureza química e os estados de agregação associados à matéria, assim como a Segunda Lei da Termodinâmica, as máquinas térmicas e a Entropia. Por último, a Unidade IV - Eletromagnetismo - desenvolveu a concepção de cargas elétricas (fluxos, resistência, potencial), a caracterização dos materiais em relação à condução da eletricidade (condutores, isolantes, semicondutores, supercondutores), a Lei de Coulomb e de Gauss, e os conceitos relacionados aos campos elétricos e magnéticos.

Agora chegamos ao final desta disciplina e esperamos que o conteúdo abordado neste livro tenha contribuído para a construção do seu conhecimento. Agradecemos a sua dedicação no decorrer de todo o estudo e desejamos persistência e tranquilidade para que você alcance seus objetivos profissionais. Boa sorte nas próximas etapas e até uma próxima oportunidade de trabalharmos juntos!

Referências

CARRILHO, Tavares e Lanças. Fluidos supercríticos em química analítica. I. Cromatografia com fluido supercrítico: conceitos termodinâmicos. Revista Química Nova, vol. 24, n.4, São Paulo, Julho/Agosto, 2001. CARRILHO, Emanuel; TAVARES, Maria Cecília H.; LANÇAS, Fernando M. Fluidos supercríticos em química analítica. I. Cromatografia com fluido supercrítico: conceitos termodinâmicos. Química Nova, São Paulo, volume 24, fascículo 4, 509-515, 2001. CHANG, Raymond. Química Geral: Conceitos Essenciais. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

CIENTISTAS observam pela primeira vez estrelas nascendo de buraco negro. Galileu. <<http://revista.galileu.globo.com/Ciencia/noticia/2017/03/cientistas-observam-pela-primeira-vez-estrelas-nascendo-de-buraco-negro.html>>

DECE. Periodic table of the elements. 123RF. <https://br.123rf.com/search.php?word=tabela+periodica&srch_lang=br&imgtype=&t_word=Periodic+Table&t_lang=br&oriSearch=%C3%A1tomos&sti=niw563ctro0pl6ey7dl>

DESIGNUA. Estados da matéria. fase ou estado da matéria e transição de fase. Este diagrama mostra os diferentes transições de fase, por exemplo, água. 123RF. <https://br.123rf.com/search.php?word=estados+da+mat%C3%A9ria&srch_lang=br&imgtype=&t_word=States+of+matter&t_lang=br&oriSearch=mudan%C3%A7a+de+fase&sti=oaz642eb6mmgghpriwl>

DESIGNUA. Estados fundamentais de mat. 123RF. <https://br.123rf.com/search.php?word=%C3%A1tomos+na+mudan%C3%A7a+de+fase&srch_lang=br&imgtype=&t_word=Atoms+in+phase+change&t_lang=br&oriSearch=%C3%A1tomos&sti=o4a369euaoxqibz2tyl>

DESIGNUA. Quatro estados da matéria são observáveis ??no cotidiano sólido, líquido, gás e plasma sol, nuvens, gota, cubos de gelo, água.123RF. <https://br.123rf.com/photo_17591962_quatro-estados-da-mat%C3%A9ria-s%C3%A3o-observ%C3%A1veis---no-cotidiano-s%C3%B3lido%20-l%C3%ADquido%20-g%C3%A1s-e-plasma-sol%20-nuvens%20-.html?term=17591962>

FILE404. Equil. 123RF. <https://br.123rf.com/search.php?word=equil%C3%ADbrio+t%C3%A9rmico&srch_lang=br&imgtype=&t_word=Thermal+equilibrium&t_lang=br&oriSearch=troca+t%C3%A9rmico&sti=n3588pe5q3mb78hwo8l>

FÍSICOS alemães conseguem atingir temperatura abaixo do zero absoluto. G1 - Ciência e Saúde. <<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2013/01/fisicos-alemaes-conseguem-atingir-temperatura-abaixo-do-zero-absoluto.html>>

FOGAÇA, Jennifer. Gráficos de mudança de estado físico. Brasil Escola. <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/graficos-mudanca-estado-fisico.htm>>

GASPAR, Alberto. Física 3 – Eletromagnetismo e Física Moderna. 9. ed. São Paulo, Brasil. Editora Ática, 2013. HALLIDAY, David; RESNICK, Robert e WALKER, Jearl. Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. Supervisão geral J. A. Souza. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2012. HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica. Rio de Janeiro: LTC, 2009. HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física 1: Mecânica. Rio de Janeiro: LTC, 1996. HALLIDAY, David; RESNICK, Robert e WALKER, Jearl. Fundamentos de Física: Mecânica. Supervisão geral J. A. Souza. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2012.

ILYIN, Y. Conjunto de term. 123RF. <https://br.123rf.com/search.php?word=term%C3%B4metro&srch_lang=br&imgtype=&Submit=+&t_word=&t_lang=br&orderby=0&sti=09jhs9gykb880u7i1ol>

KELLER, Frederick; GETTYS, W. Edward; SKOVE, Malcolm J. Física: volume 1. São Paulo: Makron Books, 1997. LEVENSPIEL, Octave. Termodinâmica amistosa para engenheiros. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

MARINOV, D. 3d rendem da estrutura do átomo de fósforo isoladas sobre o fundo branco Prótons são representados como esferas vermelhas, nêutrons como esferas amarelas, elétrons como esferas azuis. 123RF. <https://br.123rf.com/search.php?word=%C3%A1tomos&srch_lang=br&imgtype=&t_word=atoms&t_lang=br&oriSearch=estados+da+mat%C3%A9ria&sti=1h604gs4rwrc3uvbel&mediapopup=70590930>

MAZANOV, A. Term. 123RF. <https://br.123rf.com/search.php?word=escalas+de+temperatura+kelvin+celsius+fahrenheit&srch_lang=br&imgtype=&t_word=Temperature+scales+kelvin+celsius+fahrenheit&t_lang=br&oriSearch=escalas+de+temperatura&sti=n8z7u72cpu3ie87iibl&mediapopup=24759550>

MEIRELES, Maria Angela de Almeida; PEREIRA, Camila Gambini. Fundamentos de Engenharia de Alimentos. São Paulo: Atheneu, 2013.

MERALI, Zeeya. Quantum gas goes below absolute zero: Ultracold atoms pave way for negative-Kelvin materials. Nature, 03 de janeiro de 2013. <<http://www.nature.com/news/quantum-gas-goes-below-absolute-zero-1.12146>>

MERISALU, m. Estados da matéria. 123RF. <https://br.123rf.com/search.php?word=estados+da+materia&srch_lang=br&imgtype=&t_word=States+of+matter&t_lang=br&oriSearch=mudanca+de+fase&sti=oaz642eb6mmgghpriwl>

PRINCÍPIOS de funcionamento de compressor de pistão. YouTube. <<https://www.youtube.com/watch?v=MdIEwK1PqLk>>

QUEVEDO, Renata Tomaz. Entalpia. InfoEscola. <<https://www.infoescola.com/quimica/entalpia/>>

RUSSEL, John Blair. Química Geral: volume 1. São Paulo: Pearson Makron Books, 1994. RUSSEL, John Blair. Química Geral: volume 2. São Paulo: Pearson Makron Books, 1994. SANDLER, Stanley I. Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics. EUA: WILEY, 1999. SERWAY, Raymond A.; JEWETT Jr., John W. Princípios de Física: Mecânica Clássica. São Paulo: Cengage Learning, 2011. SERWAY, Raymond A.; JEWETT Jr., John W. Princípios de Física: Movimento Ondulatório e Termodinâmica. São Paulo: Cengage Learning, 2011. SING, K.S.W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. Pure and Applied Chemistry, Grã-Bretanha, volume 54, fascículo 11, 2201-2218, 1982. SINGH, R. Paul; HELDMAN, Dennis R. Introduction to Food Engineering. EUA: Elsevier, 2009. SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C.; ABBOTT, M.M. Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química. Rio de Janeiro: LTC, 2013. TIPLER, Paul; MOSCA, Gene. Física para Cientistas e Engenheiros: Mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

UDAIX. Estados de Mater quatro estados S. 123RF. <https://br.123rf.com/search.php?word=estados+da+mat%C3%A9ria&srch_lang=br&imgtype=&t_word=States+of+matter&t_lang=br&oriSearch=mudan%C3%A7a+de+fase&sti=oaz642eb6mmgghpriw>

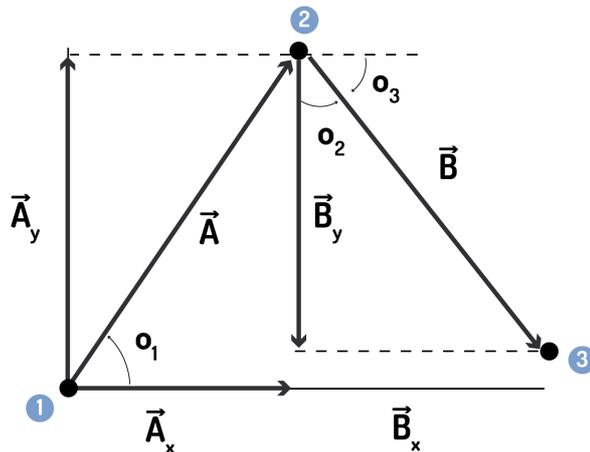
YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física I: Mecânica. São Paulo: Addison Wesley, 2008. YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física II: Termodinâmica e Ondas. São Paulo: Addison Wesley, 2008. YOUNG, Hugh D. e FREEDMAN, Roger A. Física III: Eletromagnetismo. Tradução Sonia Midori Yamamoto; revisão técnica Adir Moyses Luiz. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009. YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger. Física I: Mecânica. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2010.

Atividades



Atividades - Unidade I

Considere que um avião tenha saído do aeroporto de Congonhas e viajado por 150km, a 60° de leste para norte. De repente, foi necessário mudar a rota, e o avião voou 200km a 50° de sul para leste, onde fez um pouso de emergência. Quando o aeroporto enviar uma equipe de resgate, em que direção e qual a distância que eles deverão percorrer? Sugestão: desenhe os vetores e utilize notação em vetores unitários, como ilustrado na Figura.



Trajeto feito pela aeronave.

Fonte: os autores.

A) A equipe deverá percorrer 150km ao norte.

- B) A equipe deverá viajar 200km a 45º de leste para norte.
- C) A equipe deverá viajar 348km a 54º de leste para norte.
- D) A equipe deverá viajar 228km a -0,34º de leste para norte.

Dado que nós acabamos de aprender, não somente as propriedades dos vetores deslocamento, velocidade e aceleração, mas também suas características principais e dimensões, encontre a alternativa que esteja correta dentre as opções a seguir:

- A) Um vetor aceleração paralelo e com mesmo sentido da velocidade da partícula provoca variações em módulo e direção.
- B) Se o vetor aceleração for ortogonal à velocidade, haverá drástica mudança no módulo da velocidade.
- C) A velocidade instantânea é tangente à trajetória da partícula em cada ponto da trajetória.
- D) Quando uma partícula está com velocidade constante ao longo de uma trajetória curva, sua aceleração é nula.

O conteúdo estudado até agora nos proporcionou identificar e analisar alguns tipos de movimento uniformemente acelerado. Esse movimento pode estar presente em diversas situações, então faça a análise do caso em que um coelho corre com aceleração constante em um campo, sendo que suas coordenadas nos eixos x e y em função do tempo t podem ser descritas a partir das seguintes equações:

$$x(t) = -0,32t^2 + 7,2t + 28$$

$$y(t) = 0,22t^2 - 9,1t + 30$$

No instante $t = 20s$, qual é o valor dos vetores posição \vec{r} , velocidade \vec{v} e aceleração \vec{a} .

Dica: note que o vetor posição pode ser escrito como $\vec{r} = x(t)\hat{i} + y(t)\hat{j}$ e lembre-se das equações (1.34) e (1.36).

A) $\vec{r} = 44\hat{i} - 64\hat{j} \text{ m}; \vec{v} = -5,6\hat{i} - 0,3\hat{j} \text{ m/s}; \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = -0,64\hat{i} + 0,44\hat{j} \text{ m/s}^2.$

B) $\vec{r} = 44\hat{i} - 64\hat{j} \text{ m}; \vec{v} = 5,6\hat{i} + 0,3\hat{j} \text{ m/s}; \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = 0,64\hat{i} - 0,44\hat{j} \text{ m/s}^2.$

C) $\vec{r} = 44\hat{i} - 64\hat{j} \text{ m}; \vec{v} = 0,8\hat{i} - 4,7\hat{j} \text{ m/s}; \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = -0,32\hat{i} + 0,22\hat{j} \text{ m/s}^2.$

D) $\vec{r} = 44\hat{i} - 64\hat{j} \text{ m}; \vec{v} = -0,8\hat{i} + 4,7\hat{j} \text{ m/s}; \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = 0,32\hat{i} - 0,22\hat{j} \text{ m/s}^2.$

Você estudou a diferença entre peso e massa, além de ter conhecido as leis de Newton, que analisam objetos em inércia, com força resultante nula ou não e as forças de ação e reação. A partir do conhecimento adquirido, encontre a alternativa verdadeira.

- A) Quando aplicamos uma força de mesmo módulo, direção e sentido em corpos diferentes, a aceleração gerada será sempre a mesma.
- B) Se um corpo em equilíbrio que possui aceleração nula estiver em movimento em um local sem atrito, ele irá parar em um tempo proporcional às forças aplicadas nele.
- C) Uma balança mede o peso de um objeto, mostra em seu display a massa desse corpo e consegue efetuar a medida sem erros inclusive quando inserida em referenciais não inerciais.
- D) Quando uma laranja está em queda livre, ela também possui um par de forças, sendo uma a força que a Terra exerce na laranja e a outra a força de reação que a laranja exerce na Terra.



Atividades - Unidade II

A energia é algo completamente inserido em nossa rotina. Analise as situações a seguir e identifique qual é a alternativa correta.

- A) A energia interna de um bloco de gelo é aumentada durante seu derretimento em função do calor sensível perdido na forma de calor.
- B) Independentemente da força aplicada, uma mola esticada sempre tenderá a voltar ao seu estado inicial devido à energia potencial elástica presente no sistema.
- C) O aumento da energia mecânica de um sistema é proporcional ao aumento da sua temperatura.
- D) Ao realizar um esporte como o montanhismo ou o rapel, você transformará a energia interna das células do seu corpo em energia cinética e potencial.
- E) Vapor aquecido possui energia na forma de calor.

A partir dos primeiros conceitos de termodinâmica estudados nesta unidade, assinale a alternativa correta.

- A) Em processos isotérmicos, a quantidade de energia trocada na forma de calor é zero.
- B) Em um processo de solidificação de água, pode ocorrer tanto o fornecimento de calor latente como o de calor sensível.
- C) Assim como a energia interna e a entalpia, o calor e o trabalho são funções de estado que independem da trajetória sofrida pelo sistema.
- D) A Primeira Lei da Termodinâmica é sempre válida.
- E) Os mecanismos de transferência de calor necessitam de um meio físico para sua propagação.

Encontre a afirmativa correta dentre as opções a seguir:

- A) A aceleração angular é constante e igual à aceleração média para qualquer intervalo.
- B) Quanto maior o momento de inércia de um corpo rígido, mais difícil será fazê-lo iniciar o movimento de rotação a partir do repouso e mais fácil será pará-lo quando estiver girando.
- C) As velocidades linear e angular escalares podem ser positivas ou negativas dependendo da direção do movimento.
- D) As partículas que estão situadas em diferentes posições do eixo de rotação apresentam velocidades linear e angular diferentes.
- E) Um corpo rígido possui diferentes momentos de inércia e apresenta como valor mínimo o que está mais distante fisicamente do eixo que passa através do centro de massa.

A partir do conteúdo estudado no tópico "Gravitação Universal", assinale a alternativa correta.

- A) A força da gravidade entre duas partículas é alterada pela presença de outros objetos principalmente quando estão situados entre as partículas.
- B) A lei da gravitação de Newton pode ser aplicada a qualquer objeto real.
- C) A força gravitacional apresenta o mesmo nível de importância que as forças elétricas e magnéticas para os corpos celestes.
- D) Quando um corpo se afasta da Terra, a distância entre eles aumenta, a força gravitacional realiza um trabalho negativo e a energia potencial gravitacional é positiva.
- E) Quando uma massa pontual se move no interior de um sistema esférico descontínuo, nenhum trabalho é realizado sobre ela.



Atividades - Unidade III

Desde a antiguidade, o ser humano busca entender como a matéria é formada e como é possível caracterizá-la. Utilizando seus conhecimentos, identifique qual das alternativas é verdadeira.

- A) A afirmação de Dalton em relação a todos os átomos de um mesmo elemento serem idênticos em todos os aspectos é correta.
- B) Em nenhuma circunstância, uma substância no estado sólido apresenta variação de volume ou formato.
- C) O estado sólido é sempre mais denso do que mesmo composto no estado líquido.
- D) O plasma é um fluido supercrítico.
- E) A definição do comportamento de um gás como real ou ideal depende das condições a que estão submetendo o gás.

A partir do conteúdo abordado nas seções de "Temperatura, calor e dilatação térmica" e de "Mudanças de fases", encontre a alternativa correta.

- A) A escolha entre dois termômetros que medem entre 0 °C e 50 °C e entre 20 °C e 30 °C para uma medida de temperatura de 25 °C é indiferente.
- B) As temperaturas de congelamento e de fusão de uma substância pura são iguais.
- C) É correto afirmar que todo o movimento molecular cessa no zero absoluto.
- D) A pressão de um sistema não influencia as temperaturas de mudança de fase.
- E) Quando um rolamento se dilata, o furo da peça se torna menor.

A partir do estudo sobre a Segunda Lei da Termodinâmica e sua aplicação nas máquinas térmicas, encontre a alternativa correta.

- A) Nas máquinas térmicas, a temperatura do reservatório frio (T_f) aumenta no decorrer do processo devido à contínua transferência de calor.
- B) b) As máquinas a vapor operam com uma eficiência térmica de aproximadamente 60 %.
- C) c) A eficiência de Carnot é aplicada apenas para sistemas que apresentam gases ideais como fluido de trabalho.
- D) d) Uma máquina térmica ideal não apresenta um reservatório térmico frio.
- E) e) As bombas de calor são utilizadas exclusivamente para resfriar o ambiente.

Com os conhecimentos adquiridos sobre a entropia, leia as alternativas a seguir e encontre a alternativa correta.

- A) Os processos ocorrem naturalmente no sentido de redução do grau de desordem.
- B) Não existem variações de entropia negativas no interior de um sistema.
- C) Os sistemas isolados tendem à desordem.
- D) A magnitude do trabalho de eixo reversível é sempre menor que a do trabalho de eixo num processo real.
- E) As energias livres de Helmholtz e de Gibbs não são funções de estado.



Atividades - Unidade IV

Dado que até agora nós conseguimos aprender as características das cargas elétricas e como elas interagem através das forças elétricas, analise as alternativas a seguir, identificando a correta:

- A) Um objeto com mesma quantidade de cargas elétricas positivas (prótons) e negativas (elétrons) pode estar eletricamente carregado.
- B) A força resultante da interação elétrica entre duas ou mais partículas depende da carga elétrica que essas partículas carregam, que pode ser positiva ou negativa.
- C) Os objetos semicondutores possuem uma característica especial que possibilita a movimentação de cargas elétricas somente por uma parte do material e não por toda sua extensão.
- D) No experimento do bastão que ilustra a indução de cargas elétricas, os elétrons só puderam ser induzidos na esfera porque foi possível estabelecer um caminho para que eles saíssem do bastão (que estava com excesso de elétrons) e fluíssem para a superfície da esfera.
- E) Assim como visto nos experimentos que tratam de indução de cargas elétricas, um objeto que está carregado só pode interagir, induzir cargas ou até mesmo gerar forças elétricas em outro objeto eletricamente carregado.

Nesta unidade, você aprendeu as características e também como determinar o campo elétrico. Viu também as linhas de campo e como encontrar o fluxo elétrico para que, finalmente, chegasse ao conhecimento da famosa lei de Coulomb. Agora, com base no que aprendeu, encontre qual alternativa está correta:

- A) Para aplicação da lei de Gauss, é imprescindível que escolhamos uma superfície fechada simétrica, e ela pode ou não estar envolvendo uma partícula carregada.

- B) Considere uma superfície cilíndrica S_1 com raio r_1 que engloba uma partícula com carga $+q$. Se essa superfície tiver seu tamanho dobrado para $r_2 = 2r_1$, então o fluxo elétrico sobre a nova superfície decairá na proporção de $1/r_2$.
- C) O campo elétrico em qualquer ponto P é definido em função da força eletrostática exercida se uma carga de prova q_0 fosse colocada nesse ponto: $\vec{E} = \frac{q_0}{\vec{F}}$.
- D) O dipolo elétrico é formado por duas cargas de mesma intensidade e sinal, separadas por uma pequena distância d , sendo que geralmente buscamos avaliar a intensidade do campo elétrico em um ponto P bastante afastado do centro do dipolo.
- E) A concentração das linhas de campo elétrico é proporcional ao campo elétrico nessa região, e o vetor campo elétrico será perpendicular a essas linhas de campo em qualquer ponto do espaço.

A partir do estudo do potencial elétrico, da energia potencial elétrica e também da conservação de energia mecânica, avalie as alternativas a seguir e escolha aquela que é correta.

- A) Assim como para as superfícies gaussianas, podemos escolher arbitrariamente a arquitetura das superfícies equipotenciais, para então podermos calcular o comportamento e o valor da energia potencial de um sistema com partículas carregadas.
- B) A energia potencial elétrica é um caso muito particular de energia, pois, devido à sua característica de não conservação, tem seu valor alterado de acordo com a trajetória feita pela partícula em uma região sob efeito do campo elétrico.
- C) Uma superfície equipotencial é a superfície na qual o vetor de potencial elétrico aponta sempre na mesma direção e apresenta módulo constante.
- D) A diferença de potencial entre dois pontos i e f , que pode também ser chamada de potencial de i em relação a f , é calculada a partir da integral de linha de \vec{E} : $V_f - V_i = -E \int ds$.
- E) Se o potencial elétrico em um dado ponto é igual a zero então o campo elétrico é também nulo.

A partir dos estudos feitos sobre forças e campos magnéticos, avalie as alternativas a seguir e identifique a correta.

- A) A utilização de partículas eletricamente carregadas em movimento através de um condutor é responsável pela criação dos eletroímãs, que possuem polos positivos e negativos bem definidos. Diferentemente, os materiais com campo magnético intrínseco não apresentam polos definidos e necessitam ser polarizados artificialmente.
- B) O campo magnético \vec{B} é uma grandeza vetorial cujo módulo é igual a $B = \frac{qv}{r}$, e a direção coincide com aquela na qual a força magnética é máxima.
- C) As linhas de campo magnético possuem o mesmo comportamento visto nas linhas de campo elétrico, ou seja, elas começam no polo norte do dipolo magnético e terminam no polo sul.
- D) Se nós tivermos uma barra de imã, que possui polos norte e sul bem definidos, e a cortarmos ao meio, será possível separar os dois polos um do outro.
- E) Quando há uma partícula carregada inserida em um campo magnético, sempre haverá uma força eletromagnética agindo sobre a partícula, e será proporcional à carga da partícula e com direção sempre perpendicular a \vec{v} e \vec{B} .

