

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM QUÍMICA EM REDE NACIONAL**

**Produto Educacional**

**ENERGIA NO COTIDIANO:  
UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO  
ENVOLVENDO A TERMODINÂMICA**

**Ériton Luis Santolin**  
Emílio Borges (Orientador)  
Daniele Cristiane Menezes (Coorientadora)

**ÉRITON LUIS SANTOLIN**

**ENERGIA NO COTIDIANO:  
UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO  
ENVOLVENDO A TERMODINÂMICA**

Produto Educacional apresentado à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI), para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Emílio Borges

Coorientadora: Daniele Cristiane Menezes

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2021**

## APRESENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Prezado(a) colega professor(a):

O conteúdo deste livro foi extraído da dissertação construída por mim, professor-pesquisador, sob orientação do Professor Emílio Borges e Coorientação da professora Daniele Cristiane de Menezes (ambos do DEQ/UFV), sendo o produto educacional apresentado no curso de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, da Universidade Federal de Viçosa/Departamento de Química.

De maneira rigorosa, mas com pouco formalismo matemático, este material caminha no sentido de entender a Energia a partir dos conceitos básicos da Primeira e da Segunda Lei da Termodinâmica, culminando no conteúdo de Termoquímica. Para tanto, propomos que inicialmente haja uma apresentação histórica da Termodinâmica, com o propósito de entender que a ciência é o fruto coletivo de uma construção humana. Em seguida, serão apresentados os conceitos básicos que regem as Leis termodinâmicas, associados a questionamentos e a fenômenos observados no dia-a-dia.

Outra contribuição importante deste livro é na formulação de um espírito crítico por parte do leitor, principalmente ao refletir sobre as formas de geração de energia elétrica, o consumo e a necessidade cada vez maior do uso de energia no cotidiano, tanto nos aspectos econômicos quanto nos aspectos ambientais.

O conteúdo deste livro está organizado em capítulos, para facilitar os estudos, que podem ocorrer tanto por professores quanto por alunos. O material poder ser seguido na íntegra e na sequência como se apresenta, ou em recortes do seu conteúdo, a critério do professor. Sua construção foi feita para aprofundar os estudos de um aluno do Ensino Médio pré-universitário.

Esperamos que este material paradidático auxilie no desenvolvimento dos conteúdos de Química, aprofundando as discussões acerca do conceito de Energia, e abrindo caminhos para novos conhecimentos!

Um abraço,  
Ériton Luis Santolin

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: AS BASES PARA AS LEIS NATURAIS QUE CONTROLAM OS PROCESSOS ENERGÉTICOS.....</b>	<b>14</b>
1.1 História da Termodinâmica .....	16
1.2 Universo, sistema e vizinhança .....	32
1.3 Temperatura (T):.....	34
1.4 Calor (Q).....	41
1.5 Pressão (P).....	42
1.6 Trabalho (W).....	52
1.7 Energia interna (U) .....	54
<b>CAPÍTULO 2: PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA .....</b>	<b>60</b>
2.1 Fontes de energia elétrica .....	63
2.1.2 Energia eólica.....	65
2.1.3 Energia nuclear.....	66
2.1.4 Energia termoelétrica.....	68
2.1.5 Energia geotérmica .....	70
2.1.6 Energia solar .....	71
2.2 Situação energética atual .....	72
2.3 Questões Propostas.....	76
<b>CAPÍTULO 3: SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA .....</b>	<b>80</b>
3.1 Entropia .....	82
3.3 Questões Propostas.....	83
<b>CAPÍTULO 4: TERMOQUÍMICA .....</b>	<b>87</b>
4.1 Entalpia (H).....	87
4.2 Processo Exotérmico .....	88
4.3 Processo Endotérmico.....	90
4.4 Questões Propostas.....	92
<b>CAPÍTULO 5: SUGESTÕES DE PRÁTICAS PARA SALA DE AULA.....</b>	<b>98</b>
5.1 Termoscópio de Galileu .....	98
5.2 Máquina térmica de Heron .....	100
5.3 A entropia dos feijões.....	103
5.4 Determinando o $\Delta H$ de uma reação .....	105

5.5 Difusão de gases .....	107
5.6 Conservação de energia.....	109
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>113</b>

## CAPÍTULO 1: AS BASES PARA AS LEIS NATURAIS QUE CONTROLAM OS PROCESSOS ENERGÉTICOS

Estamos iniciando a segunda década do século XXI, e *Energia* é um dos termos mais utilizados no contexto tecnológico. Quando se observa o cotidiano atual da humanidade, percebe-se que uma série de recursos tecnológicos estão presentes, sendo que uma grande variedade das tecnologias que utilizamos necessitam de uma fonte energética para realizar suas atividades. Em uma rápida análise, pode-se inferir que o futuro não será diferente: mais recursos energéticos serão necessários.

É interessante perceber nessa descrição a respeito de energia que o termo geralmente está associado à ideia de consumo energético. E esta também é uma visão trazida pelos nossos alunos, quando começamos a questioná-los a respeito da definição do termo energia. Neste momento, é comum exemplificarmos formas de geração de energia elétrica, e comentar sobre questões associadas à obtenção e custo econômico e ambiental destas “energias”, uma vez que é muito comum que se visualize o barateamento do seu custo e o aumento de sua eficiência (ABRUÑA, 2013).

A humanidade tem utilizado bastante energia, e a previsão é de que este consumo aumente cada vez mais. Para tanto, é preciso obter mais energia, e de fontes com maior aproveitamento, e de menor custo ambiental. Como veremos adiante, a humanidade ainda utiliza fontes energéticas que apresentam baixa qualidade, devido ao grande efeito poluidor e/ou às diversas consequências que possam envolver questões ambientais e urbanas.

Uma preocupação que o professor deve ter em suas aulas está relacionada com o uso correto das definições dos termos empregados ao discorrer sobre os conteúdos trabalhados. É preciso entrelaçar os termos de maneira mais adequada com o seu real significado, uma vez que o tema “energia” traz consigo uma série de visões muitas vezes incompletas ou estereotipadas pelos alunos. Podemos citar a pesquisa desenvolvida por Souza, Neto, Lima (2017), em que foram feitos questionamentos a respeito do conceito de energia para alunos do sexto período dos cursos de licenciatura em Química e em Física de uma universidade pública, bem como alunos do segundo ano do Ensino Médio de uma escola da rede particular. A pesquisa ocorreu com o intuito de analisar o contrato didático em uma discussão a respeito do tema *Energia*. Assim, as análises ocorreram de forma independente

(alunos de Química, alunos de Física, alunos do ensino Médio), dividindo-se os alunos em grupos. Dessa forma, foram aplicadas questões simultaneamente para diferentes grupos de estudantes, gerando diálogos entre o professor/pesquisador e os alunos. Desse modo, o conteúdo a ser trabalhado é construído de maneira coletiva. Ao ler os diálogos transcritos nessa pesquisa, estes revelam uma certa dificuldade e insegurança inicial dos alunos em definir o termo *Energia*. Com a evolução dos diálogos, percebeu-se que existe um auxílio coletivo no sentido de conseguirem fazer boas associações cotidianas sobre este conceito, suas manifestações e transformações.

O tema *Energia* é gerador de debate, e apresenta uma riqueza enorme de presença em nosso cotidiano. Assim, os alunos podem trazer consigo um repertório de conhecimentos (mesmo que não seja proveniente da escola ou das disciplinas de Ciências da Natureza), o qual pode ser explorado pelo professor. Para a Termodinâmica, o ponto de partida geralmente ocorre dentro do contexto da Revolução Industrial (séc. XVIII), que levou ao desenvolvimento das máquinas térmicas e no uso dessas novas tecnologias dentro das indústrias, a fim de impulsionar suas produções. Da mesma forma, com o passar do tempo e com o uso cada vez mais amplo dessas máquinas térmicas na indústria, ocorreu o desenvolvimento e o aprimoramento da Termodinâmica.

Nessa época de ampliação da mecanização industrial, pouco ainda se conhecia a respeito dos princípios termodinâmicos responsáveis pelo aproveitamento da energia térmica para realização de trabalho. Muitas das explicações dadas para a ocorrência dos fenômenos eram meramente empíricas, baseadas apenas na observação pura dos fatos e na experimentação de mudança de algumas condições, para obtenção de novos resultados. A aplicação do conhecimento prático no desenvolvimento dessas máquinas térmicas, a princípio, era praticamente ignorada: precisava-se de máquinas que funcionassem e que dessem resultados e retorno financeiro.

Interessante observar neste caso que o desenvolvimento das máquinas térmicas ocorreu devido principalmente a uma profunda transformação social da sociedade inglesa ocorrida no séc. XVI. Essa mudança social promoveu grande desenvolvimento tecnológico para a época, para depois promover o conhecimento científico por trás destes princípios. Geralmente, seria esperado o contrário: o

conhecimento científico promove novas tecnologias, culminando em uma transformação social.

Assim, iniciamos a abordagem acerca da Termodinâmica com uma apresentação histórica, na qual veremos, por exemplo, que até o século XVIII o calor ainda era entendido como um fluido, sendo chamado de calórico. Hoje, sabemos que esta definição é bastante limitada, porque não permite compreender com clareza a origem dos processos que ocorriam dentro das máquinas térmicas.

O entendimento dos conceitos que constituem a Termodinâmica é a base para a construção das Leis que controlam os processos energéticos. Estes conceitos são: temperatura, calor, pressão, trabalho, energia interna, entalpia e entropia e serão discutidos em breve nesse texto.

## 1.1 História da Termodinâmica

No princípio da humanidade e da civilização humana, o uso da energia sempre foi necessário para se cultivar plantações, cozinhar, explorar o mundo, construir estradas, embarcações, erguer templos, monumentos. A energia necessária para a realização dessas tarefas muitas vezes foi encontrada na musculatura humana, assim como em diversos animais de carga, como o boi e o cavalo. Com o tempo, aprendeu-se a utilizar a força dos ventos e das águas para se desenvolver os trabalhos desejados. Assim também o “calor”, que sempre teve seu uso nas necessidades mais básicas do ser humano (como preparar alimentos ou moldar ferramentas), apresentou um uso mais tecnológico e industrial a partir da Primeira Revolução Industrial (*La Légende des Sciences – Brûler, 1996*).

Quando ocorreram os primeiros usos do “calor” nas máquinas térmicas do séc. XVII, pode-se dizer que não havia uma preocupação a respeito das leis físicas ou químicas por trás dos fenômenos observados. Até porque, a construção de tais máquinas estava ancorada em todo contexto de desenvolvimento econômico e social vividos pela sociedade inglesa da época. Esta preocupação veio a surgir posteriormente, através da Termodinâmica (QUADROS, 1996).

Além de econômicas, as preocupações deste período também eram filosóficas. Um importante personagem nesse contexto foi Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), um importante diplomata, cientista e filósofo dos séculos XVII e XVIII que tinha entre suas inquietações a compreensão do mecanismo de funcionamento do Universo. Ele

acreditava que poderia entender as leis que o regem a partir da compreensão sobre o funcionamento das grandes máquinas que começavam a surgir em seu tempo, pois acreditava que os princípios físicos para ambos os casos seriam os mesmos. Em 1676, um dos primeiros questionamentos que Leibniz explorou envolvia o estudo da colisão entre dois objetos, cunhando o termo “força vital” para explicar a transferência de movimento durante o processo. Segundo o filósofo, essa “força vital” teria sido inserida por Deus nos seres e nos objetos, de tal modo que permitiria a ocorrência dos fenômenos observados. Além disso, Leibniz afirmou que essa força vital no mundo se conservaria (*The Story Of Energy With Professor Jim Al-Khalili: Order and Disorder*, 2012).

Historicamente, a Termodinâmica surge como ciência ainda no período da Revolução Industrial, em meados do séc. XVIII. Em sua primeira versão, a Termodinâmica é uma ciência fenomenológica, que se baseia em observações experimentais. Sua evolução ocorreu de forma bastante rápida, e com grande interesse científico e econômico. Já no séc. XIX (1860) surgiu a termodinâmica molecular, com uma abordagem baseada em processos atômicos e moleculares, utilizando a estatística para obter grandezas do mundo macroscópico a partir de determinações do mundo microscópico.

Grandes descobertas foram feitas ao longo dos séculos, contribuindo para a evolução histórica da Termodinâmica. Estas descobertas permitiram a evolução do pensamento humano, levando a conquistas tecnológicas que conduziram a grandes avanços em nosso modo de vida, principalmente a partir do séc. XVII. Por exemplo, a construção das primeiras máquinas térmicas resultou na Primeira Revolução Industrial, em meados do séc. XVIII e, conseqüentemente, em uma grande evolução econômica e social.

São muitos os acontecimentos ao longo da História que contribuíram para o desenvolvimento das máquinas térmicas e da estruturação da Termodinâmica enquanto ciência. O Quadro 1 a seguir lista os principais eventos precursores desta evolução, e seus personagens. Este quadro foi obtido a partir dos relatos feitos em Pádua; Pádua; Silva, 2009.

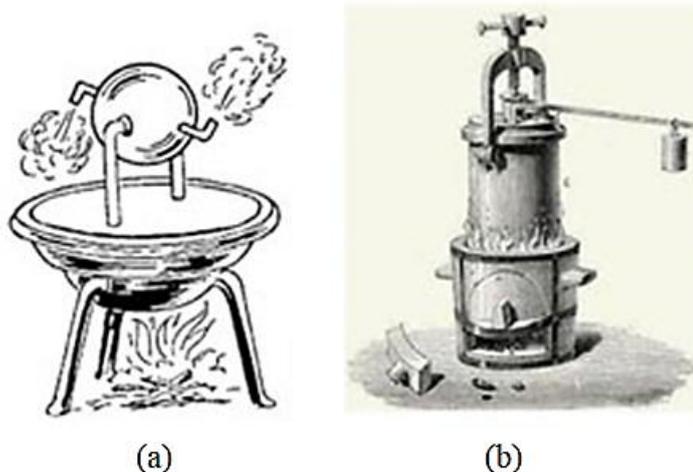
Quadro 1 — Primeiros eventos históricos relacionados à Termodinâmica.

<b>Data</b>	<b>Personagem</b>	<b>Principal contribuição</b>
500.000 a.C.	Homem de Peking	Primeiras evidências de utilização do fogo.
100 a.C.	Philon da Bizantina	Utilização de um termoscópio para estudar os fluxos de líquidos e gases.
100 d.C.	Heron de Alexandria	Invenção de uma máquina (conhecida como eolíptica) para estudar a força do vapor.
1592	Galileu Galilei	Construção de um termoscópio a ar, conectado a um bulbo com líquido colorido. Conforme ocorria variação de temperatura o líquido poderia subir ou descer pelo tubo.
1620	Francis Bacon	Responsável por fazer as primeiras diferenciações teóricas entre calor e temperatura, sugerindo que calor pudesse estar relacionado com o movimento de partículas.
1640	Ferdinando II	Construção de um termômetro a álcool.
1662	Robert Boyle	Desenvolveu uma lei empírica sobre os gases, afirmando que o produto entre a pressão e o volume de um gás seria sempre constante. Além disso, demonstrou que estamos imersos em um grande fluido, o ar, que nos comprime tal como uma coluna de 10 m de água. Nascia, portanto, o conceito de pressão atmosférica.
1665	Robert Hooke	Teorizou que o calor estaria associado ao movimento de partículas, de forma muito similar ao que no futuro seria a base da Teoria Cinética dos Gases.
1676	Edme Mariotte	De forma independente, redescobriu os resultados empíricos de Boyle.
1688	Guillaume Amontons	Desenvolvimento de um termômetro sensível às variações de pressão de um gás contido em seu

		interior, além de utilizar o mercúrio para medição das pressões. Ele estabeleceu, ainda, que o zero absoluto seria a temperatura na qual a pressão da amostra gasosa tende a zero.
1697	George Ernest Stahl	Associou o fogo a um tipo específico de substância ou elemento, presente em tudo que poderia sofrer combustão, a qual denominou <i>flogístico</i> .

As primeiras descobertas relacionadas ao estudo do “calor” foram de grande importância para os passos seguintes. A máquina de Heron, datada da Grécia antiga por exemplo, não tinha utilidade prática propriamente dita, uma vez que o movimento observado pela formação de vapor no interior do aparelho não era aproveitado para o funcionamento de uma máquina. Entretanto, os estudos realizados pelo francês Denis Papin (1647-1712) em 1679 no laboratório de Robert Boyle, na Inglaterra, levaram à invenção da panela de pressão e sua válvula de segurança (QUADROS, 1996). A Figura 1 a seguir contém representações para ambas as máquinas.

Figura 1 — (a) Máquina de Heron (100 a.C) e (b) Panela à vapor de Denis Papin.



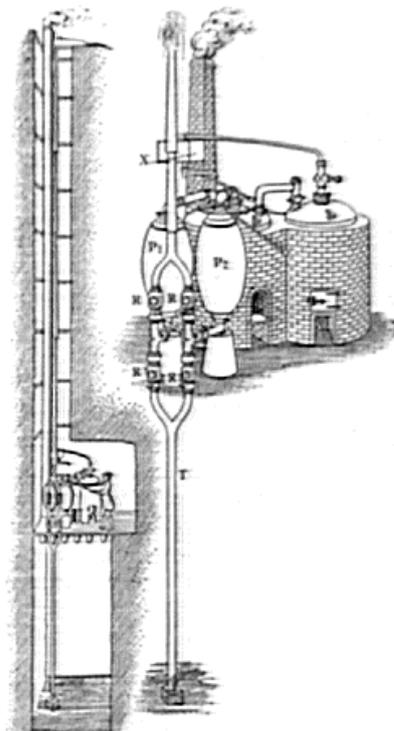
Fonte: <<https://callisto.ggsrv.com/imgsrv/FastFetch/UBER1/ZI-1STW-2018-JAN00-IDS1-2-1>> Acesso em 15/03/2021.

A panela de pressão inventada por Papin ainda não é uma máquina térmica propriamente dita, mas ao observar a saída de vapor proveniente de um recipiente com água aquecida, conforme a montagem por ele construída, é possível pensar em

diversas possibilidades de aproveitamento deste vapor formado. Assim, em 1687, foi feito o primeiro projeto de máquina à vapor (de autoria do próprio Denis Papin), a qual aproveitaria o vapor para movimentar um sistema contendo cilindro e pistão (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

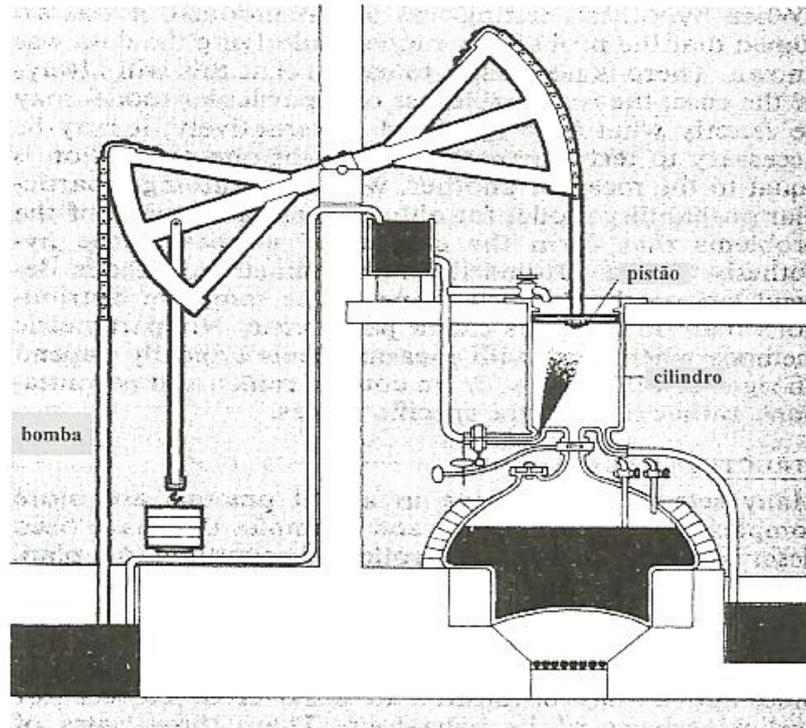
Em 1698, Thomas Savery (1650-1715) registra a primeira patente de uma máquina à vapor que é capaz de retirar a água de uma mina, por exemplo, utilizando-se a *força motriz* do fogo. Por ter sido o primeiro a obter a patente, todas as invenções semelhantes que surgiram nessa mesma época eram também registradas com o nome de Savery. Isto aconteceu com a invenção de Thomas Newcoman (1664-1729), mesmo ele tendo trabalhado de forma independente. As máquinas de Savery e Newcoman foram colocadas em funcionamento para bombear água do interior das minas inundadas, na Inglaterra, a partir de 1712 (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009). A Figura 2 mostra uma ilustração para a bomba desenvolvida por Savery, enquanto a Figura 3 é uma representação para a máquina desenvolvida por Newcoman.

Figura 2 — Máquina à vapor desenvolvida por Thomas Savery, para retirar água de uma mina.



Fonte: <[https://lh3.googleusercontent.com/proxy/JBezKAz\\_y51k8em7FwvjDNtrtn8ewKxLM49KUaAxx-Qwx4CuSKUtV26uxgx38nim83b4bGDjS-PWc\\_Y0sx687QzFoSfUC Ek0tJ40ViRMOmUc0q4yiPjaZ7S4](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/JBezKAz_y51k8em7FwvjDNtrtn8ewKxLM49KUaAxx-Qwx4CuSKUtV26uxgx38nim83b4bGDjS-PWc_Y0sx687QzFoSfUC Ek0tJ40ViRMOmUc0q4yiPjaZ7S4)>. Acesso em: 15/03/2021.

Figura 3 — Ilustração de uma máquina à vapor projetada por Newcomen, para retirar água de mina.



Fonte: PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009, p.38.

Em meio a tantas inovações tecnológicas dessa época, surgem as conclusões dos estudos teóricos desenvolvidos por Joseph Black (1728-1799). Em 1760, Black propôs a teoria do *calórico* em substituição à teoria do *flogístico*, na tentativa de explicar os fenômenos observados nas máquinas térmicas e nos experimentos que realizava. Segundo esta teoria, o *calórico* seria um fluido, que constituiria todas as substâncias. Este fluido seria suscetível às variações de temperatura dos corpos, e escoaria daquele de maior temperatura para o de menor, através do contato entre eles. Além disso, o calórico não poderia ser criado ou destruído ao longo de um processo térmico, o que comprovaria (segundo esta teoria) a existência de massa, bem como sua substancialidade (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

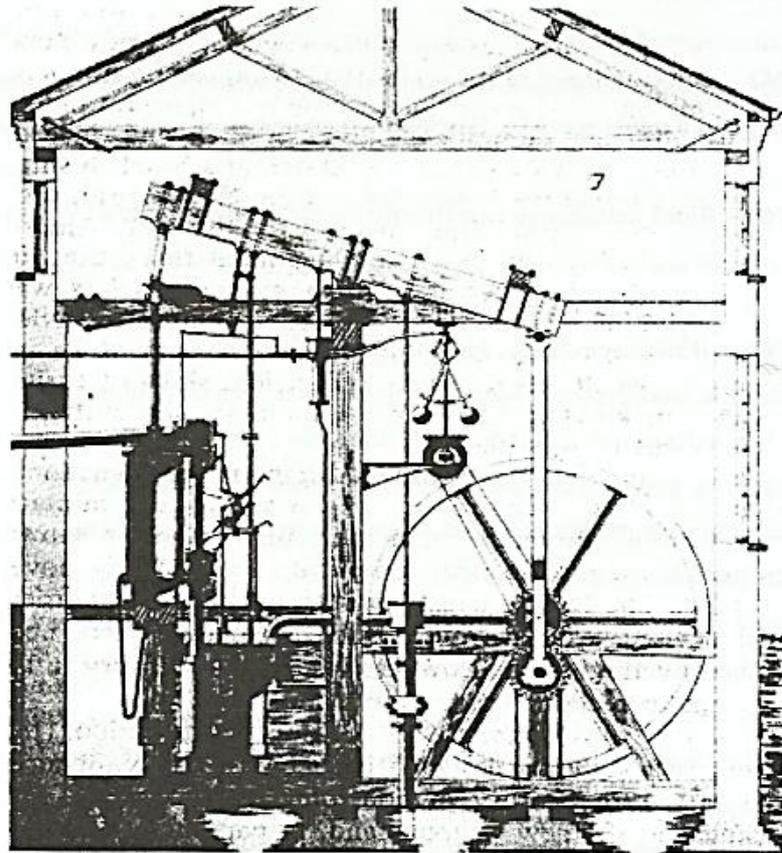
As máquinas de Savery e de Newcomen foram largamente utilizadas durante o século XVIII, na Inglaterra e restante da Europa, havendo a construção de centenas dessas máquinas para a retirada de água das minas de carvão. Ainda segundo o documentário *La Légende des Sciences – Brûler* (1996), James Watt (1736-1819), em 1765 (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009), teria sido convidado para consertar uma das

máquinas de Newcoman, e, assim, teria feito alguns aprimoramentos importantes, que levaram a uma grande evolução desses dispositivos.

Dentre as inovações de Watt, destaca-se a introdução de um sistema de resfriamento do vapor que sai do cilindro, chamado “câmara de condensação”, ou condensador. Este dispositivo trabalharia a uma temperatura mais baixa e era responsável por criar o vácuo para movimentação do pistão principal, que receberia o vapor. Com isso, o pistão principal trabalharia na mesma temperatura que o vapor, havendo menor perda de energia térmica e, conseqüentemente, menor consumo de carvão, fazendo com que todo o processo fosse 75% mais eficiente. Outro dispositivo importante nas adaptações de Watt foi o volante (roda), que tornou o movimento das máquinas mais constante (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

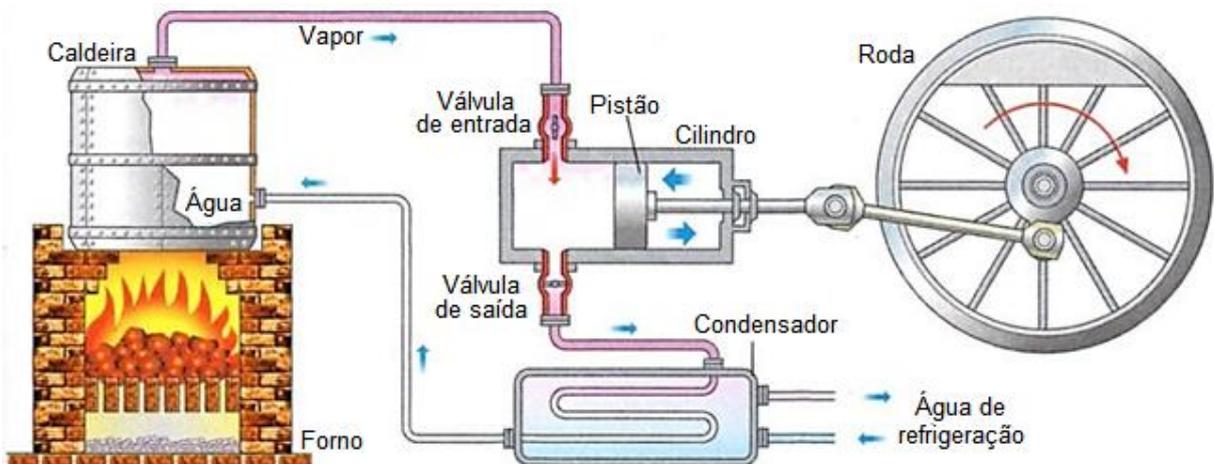
As máquinas desenvolvidas a partir das modificações de James Watt foram muito utilizadas nas indústrias têxteis no final do século XVIII, sendo este um dos marcos da Revolução Industrial. Watt fez associações entre a potência das máquinas térmicas e as cargas carregadas por cavalos, cunhando a unidade de medida de potência conhecida como *horsepower* (HP), ou cavalo-vapor. Atualmente ainda utilizamos esta unidade para medir a capacidade de realização de trabalho por um motor a combustão, uma turbina ou um motor elétrico, por exemplo. Devido aos seus estudos e suas grandes contribuições, Watt foi homenageado com o seu nome sendo utilizado na unidade de medida de potência (QUADROS, 1996). A Figura 4 traz uma fotografia de uma máquina à vapor de Watt e a Figura 5 consiste em uma ilustração didática sobre o seu esquema de montagem e funcionamento.

Figura 4 — Reprodução de fotografia tirada em 1788, da máquina à vapor rotativa de Watt.



Fonte: PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009, p. 42.

Figura 5 — Ilustração que demonstra a construção e funcionamento de uma máquina à vapor de Watt.



Fonte: adaptado de <<https://www.coladaweb.com/wp-content/uploads/2019/02/20190205-maquina-vapor.jpg>>. Acesso em 16/03/2021.

Diante do que foi relatado até o momento, é interessante refletir que ao estudarmos a evolução da construção da máquina a vapor, os personagens envolvidos diretamente talvez não tivessem a exata dimensão de todos os desdobramentos que estavam por vir. Evidentemente, cada qual sabia dos inventos e melhorias do passado e presente (a seu tempo), mas não poderiam dizer com precisão as próximas evoluções que estas descobertas e inventos trariam. Em muitos casos, tais melhorias ocorrem por meio de tentativa e erro, e, ao ocorrerem, é difícil notar que há uma ordem lógica deste desenvolvimento. Coube aos historiadores futuros perceberem que uma evolução foi pauta para o passo seguinte e, assim, a construção e difusão das máquinas a vapor na Inglaterra e restante da Europa, bem como a ocorrência daquele período que ficou conhecido como Primeira Revolução Industrial (*La Légende des Sciences – Brûler, 1996*).

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), em 1823, publicou um livro no qual escreve suas teorias sobre o poder motriz do fogo. Neste livro, Carnot faz reflexões teóricas acerca das relações entre trabalho e calor (considerando-o ainda como calórico), além de discutir sobre a eficiência das máquinas térmicas. Suas teorias são tão importantes para os desdobramentos que se seguiram à sua publicação, que Sadi Carnot é considerado o fundador da Termodinâmica. Cabe ressaltar que suas conclusões ocorreram graças às observações feitas nas máquinas térmicas, que neste período já haviam ganhado grande importância econômica e estratégica. Isto o levou a refletir acerca do princípio de conservação de energia e sobre a elucidação daquela que, anos mais tarde, veio a ser chamada de Segunda Lei da Termodinâmica (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

O pai de Sadi Carnot (Lazare Carnot) havia feito estudos teóricos no século XVIII acerca da dinâmica de movimentos dos corpos. Lazare considerava que todo movimento mecânico seria proveniente da tendência que um corpo apresentava para retornar ao seu equilíbrio. De forma análoga, Sadi Carnot associou esta ideia à energia calorífica, de tal modo que a transferência de “calórico” estaria relacionada a um princípio de retorno ao equilíbrio (*La Légende des Sciences – Brûler, 1996*). Assim, a transferência de energia de um corpo mais quente para outro mais frio consiste na tendência que o sistema apresenta para restabelecer seu equilíbrio calórico, da mesma forma que um objeto em uma altura mais elevada tem a tendência de cair.

Segundo Carnot, a força motriz de uma máquina térmica (hoje chamada de trabalho) ocorreria pela fluidez do “calórico” desenvolvido pela substância motora

(neste caso, o vapor), a qual para ter um máximo de desempenho deveria realizar ciclos reversíveis entre temperaturas altas e baixas. Este princípio ficou conhecido como Ciclo de Carnot (que será apresentado no Capítulo 3). Por muitos anos, a diferença das temperaturas de operação no Ciclo de Carnot ficou sendo uma questão entre as mais importantes em termos de melhoria de desempenho das máquinas térmicas (SILVA; PACCA, 2011).

Pelos estudos de Carnot, foi possível rever os primeiros princípios da Termodinâmica (atualmente conhecidos como Primeira e Segunda Lei). Naquela época, o primeiro princípio era visto como o mais básico e quase intuitivo, no qual entendemos que a energia de um processo é conservada durante uma determinada transformação. Muitas vezes, é comparado de forma generalizada em nossas aulas, como sendo “aquilo que se perde de um lado, ganha-se do outro”, e vice-versa. Já o segundo princípio pode ser apresentado na forma de uma proibição, ao concluir que a energia térmica não pode ser transferida de um corpo “frio” para um corpo “quente”.

A Primeira Lei da Termodinâmica foi inicialmente pronunciada por Julius Robert von Mayer (1814-1878), entre 1842 e 1843. Ele propôs que haveria uma equivalência mecânica entre calor e trabalho, sendo ambos apenas formas de manifestação da energia. Segundo seus escritos, na natureza, a energia existe de muitas maneiras diferentes, e entre elas vão ocorrendo diversas transformações, sem haver perdas. O que ocorre em uma certa transformação é apenas a mudança de uma forma para outra (NUSSENZVEIG, 1981 *apud* PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

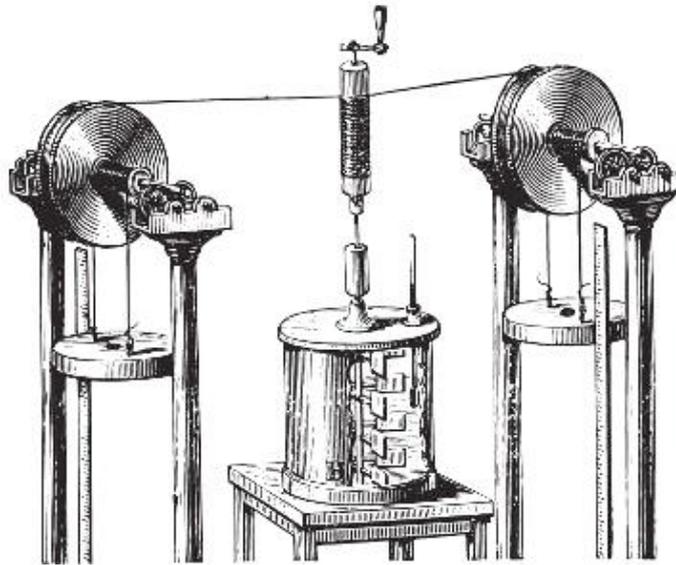
Posteriormente, e de forma independente, James Prescott Joule (1818-1889) realizou diversos estudos entre 1843 e 1845, levando-o a determinar o equivalente mecânico do calor. Esta determinação foi de grande importância, pois conseguiu associar a Primeira Lei da Termodinâmica como sendo o Princípio de Conservação da Energia (QUADROS, 1996). Entretanto, o reconhecimento sobre os trabalhos de Mayer e Joule vieram a ocorrer apenas mais tarde, em 1847, quando Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) publicou seus escritos acerca da conservação da energia.

Helmholtz era fisiologista, e em seus estudos queria provar a inexistência da chamada “força vital”. Para tanto, dizia que a energia utilizada pelos músculos na realização de determinada tarefa era proveniente dos alimentos. Assim, não seria possível a realização do trabalho a partir do nada, mas apenas por meio da transformação da energia dos alimentos em energia química, a fim de ser utilizada

pelo organismo animal. O fato de Helmholtz ter feito sua publicação com grande rigor matemático, além de extrapolar seus estudos para o calor, trabalho, eletricidade e magnetismo lhe conferiu grande credibilidade na comunidade científica (WILLIAMS, 2020).

Com estes estudos, Helmholtz estabeleceu uma nova definição de calor, atribuindo-lhe o entendimento de que ele seria uma forma de energia. Além disso, Helmholtz disse que existiria um equivalente em calor para todas as formas de energia, o que ampliou muito o entendimento teórico acerca dos estudos que estavam em ascensão na época. Com esta contribuição e as experiências de Joule e Rumford, estava-se encerrando, portanto, a era do “calórico” (um fluido hipotético que passaria entre um corpo quente e outro corpo frio), um conceito que entendia o calor de forma substancialista (MEDEIROS, 2009). A Figura 6 a seguir traz um esboço que representa o experimento utilizado por Joule para medir o equivalente mecânico do calor, e contribuir para a queda da teoria do calórico.

Figura 6 — Experimento de Joule.



Fonte: <<https://www.preparaenem.com/upload/conteudo/images/experimento-joule.jpg>>. Acesso em: 16/03/21

No experimento de Joule, duas massas presas por um fio passavam por roldanas, de modo que o movimento de descida dos objetos promovia um giro no sistema de pás no qual estavam conectados, de modo que a água no interior de um recipiente fosse agitada. A agitação da água significa que suas partículas passaram a

adquirir maior energia cinética e, conseqüentemente, maior energia interna. Para comprovar sua teoria, a temperatura da água foi medida durante os experimentos, revelando que acontecia um aumento no valor desta propriedade. Dessa forma, Joule estabeleceu o equivalente mecânico do calor, que consiste na transformação entre trabalho e calor.

Com os estudos de Helmholtz, observa-se que a comunidade científica estava passando por profundas transformações devido aos estudos que avançavam em Termodinâmica. Ao publicar seu livro “Sobre a Conservação da Energia, Helmholtz afirma:

[...] chegamos à conclusão de que a natureza como um todo possui um estoque de energia que não pode de forma alguma ser aumentado ou reduzido; e que, por conseguinte, a quantidade de energia na natureza é tão eterna e inalterável como a quantidade de matéria. Expressa desta forma, chamei esta lei geral de Princípio de Conservação da Energia. (NUSSENZVEIG, 1981 *apud* PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

Trabalhando entre 1846 e 1848 com base nas obras de Carnot e Clapeyron, William Thomson (1824-1907), posteriormente intitulado Lorde Kelvin, em 1892, estabeleceu uma escala absoluta de medida da temperatura, na qual o valor do zero absoluto seria correspondente à  $-273\text{ °C}$ , diante do qual, diante do ponto de vista clássico, o valor de energia cinética das partículas seria nulo (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

Além destas contribuições, Lorde Kelvin argumentou que as duas leis da Termodinâmica expressam a constância e a dispersão da energia, sendo que o ponto mais importante nos estudos da Segunda Lei seria o entendimento acerca dos processos irreversíveis. Em seus estudos, chegou a denominar de “morte térmica do Universo” o fenômeno que ocorreria caso a entropia do Universo sempre aumentasse. Isto porque sua temperatura acabaria por atingir um estado de uniformidade, tornando-se impossível a realização de qualquer trabalho (WEISSTEIN'S, 2007).

A partir de 1850, Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888) desenvolveu novos estudos acerca dos trabalhos feitos por Carnot, acrescentando o entendimento de que durante um processo termodinâmico não haveria absolutamente nenhuma perda de “calor”. Assim, reformulou o entendimento acerca da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, introduzindo o conceito de energia interna. Com este mesmo

trabalho, Clausius tinha a intenção de descrever a irreversibilidade dos processos naturais. Trabalho semelhante também foi publicado em 1851 por Kelvin (QUADROS, 1996 e PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

Em artigo publicado em 1857, Clausius avança nos estudos acerca da Teoria Cinética dos Gases com um rigoroso tratamento matemático, descrevendo os diferentes movimentos das partículas. Mais tarde, em 1865, realiza outra grande contribuição ao criar o conceito de entropia ( $S$ ), uma função de estado associada à dissipação de energia, a qual explicaria o funcionamento do Ciclo de Carnot e, portanto, das máquinas térmicas. (QUADROS, 1996 e PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009). Outra explicação dada pelo conceito de entropia estava relacionada com as perdas energéticas das máquinas térmicas durante seu funcionamento, e que seriam responsáveis pelas perdas de eficiência (SILVA; PACCA, 2011). Com todas essas contribuições, foi possível reformular de maneira mais geral as duas primeiras Leis da Termodinâmica.

Segundo o entendimento de Clausius, no Ciclo de Carnot o que se observa é um processo compensador das transformações gasosas, sendo que o estado térmico e mecânico do motor era restituído à sua forma inicial. A transferência de energia na forma de calor entre as fontes quente e fria, bem como a conversão de calor em trabalho, são compensatórios do ponto de vista físico-químico do sistema, sendo a natureza uma fonte inesgotável desta energia. Devido ao Princípio de Conservação da Energia, faz-se necessário a formação de uma diferença de temperatura entre as fontes quente e fria, por exemplo, para que o trabalho mecânico da máquina térmica seja evidenciado. De forma análoga, a mesma máquina térmica trabalhando de forma contrária poderia restaurar a diferença de temperaturas, requerendo trabalho (SILVA; PACCA, 2011).

Portanto, pode-se afirmar que Clausius reelaborou toda Termodinâmica através da rompimento de vez com uma conceituação substancialista do calor, e utilizando definitivamente uma concepção energética. Assim, a Termodinâmica a partir de então passa a descrever a conservação da energia na natureza, bem como suas equivalências e transformações diante das mais diversas formas, além de apresentar os argumentos matemáticos que sustentavam a teoria (SILVA; PACCA, 2011).

Em 1860 (e anos seguintes), James Clerk Maxwell (1831-1879) avança sobre a Teoria Cinética dos Gases alavancada por Clausius, e conclui que ao invés de as

várias colisões que ocorreriam entre as partículas das substâncias gasosas ocasionarem uma igualdade nas velocidades de todas as partículas, o que ocorreria de fato é que as partículas assumiriam velocidades distintas, promovendo uma distribuição estatística destas velocidades. Com rigoroso tratamento matemático, Maxwell introduz a probabilidade como um conceito adicional na Mecânica, estabelecendo as bases teóricas que influenciaram no surgimento da Mecânica Estatística. Esta, por fim, revelou-se como sendo a ligação entre a Mecânica e a Termodinâmica (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

Entre 1868 e 1871, Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), físico austríaco que dedicou boa parte de sua vida aos estudos termodinâmicos, publicou seus primeiros artigos sobre os estudos estatísticos envolvendo a Teoria Cinética dos Gases, generalizando os estudos de distribuição feitos por Maxwell. Por essas e outras contribuições, Boltzmann é considerado um dos fundadores da Mecânica Estatística (DAHMEN, 2006).

Um grande esforço feito por Boltzmann consistiu em entender o significado mecânico da Segunda Lei da Termodinâmica. Para tanto, inspirou-se no estudo feito em 1738 por Daniel Bernoulli (1700-1782), o qual dizia haver relação entre a pressão e a temperatura de um gás com os choques sofridos entre as partículas desta substância umas com as outras e as paredes do recipiente que a contém (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009 e DAHMEN, 2006).

Segundo Dahmen, 2006, outra grande dificuldade ao se estudar a Segunda Lei da Termodinâmica consistia no fato de que a diferença de entropia entre os estados final e inicial de uma dada transformação é maior, caso esta transformação fosse irreversível. Ou seja, em processos reversíveis, o ganho de entropia pelo sistema é menor do que seria se este processo fosse irreversível.

Para exemplificar essa situação, podemos ilustrar ambos os processos através de uma folha de papel (tal como fazemos em sala de aula). Suponhamos uma folha de papel que se dobra e retorna à posição inicial, sem amassar: tal processo seria reversível. Já se esta folha de papel que é totalmente amassada, é impossível retornar às condições iniciais da folha de papel ou o caminho para se restaurar essas condições é muito complexo. Assim, a entropia do processo irreversível é entendida maior do que se o processo fosse reversível.

Para resolver isto, seria preciso encontrar a irreversibilidade dos processos naturais através das deduções que forem feitas pelas leis da Mecânica, uma vez que

a cinética era o caminho trilhado por Boltzmann e seus antecessores. A escolha feita por Boltzmann para estudar um exemplo como o da folha de papel ou o de uma xícara que cai e se quebra ao tocar o chão consistiu em mostrar que, na verdade este processo de retorno ao estado inicial não é impossível, mas improvável (DAHMEN, 2006).

Assim, foi possível Boltzmann redefinir o conceito de entropia para termos probabilísticos, em 1877, com sua famosa equação, adaptada futuramente por Planck (DAHMEN, 2006):

$$S = k_B \ln W \quad (1)$$

onde  $k_B$  é chamada constante de Boltzmann (uma das suas maiores contribuições, onde ele pôde associar a energia das moléculas e sua respectiva temperatura) e  $W$  o número de microestados do sistema. Esta é uma das principais equações da Termodinâmica molecular. Devido à sua grande importância, foi escrita na lápide de Ludwig Boltzmann.

Neste momento, cabe comentar que os estudos da Mecânica Clássica acerca do comportamento de um sistema que contenha apenas uma partícula apresenta uma relevância muito grande, e foi amplamente realizado ao longo do tempo. Entretanto, ao se imaginar um sistema com muitas partículas, a complexidade dos eventos cinéticos que ocorrem, por exemplo, é muito maior. Assim, com o advento da Mecânica Estatística, foi possível adquirir ferramentas probabilísticas que permitiram estudar as propriedades físico-químicas de sistemas muito grandes, que contenham  $n$  mols de partículas. Nesse tipo de sistema, é impossível determinar, por exemplo, o momento linear de uma molécula, mas é possível calcular o valor médio desta propriedade para as moléculas do sistema.

Foi com o físico húngaro Josef Stefan (1835-1893) que Boltzmann desenvolveu um dos seus principais trabalhos: o estudo acerca da densidade de energia irradiada por um corpo negro, relacionando-a com a quarta potência da temperatura do corpo. Com este princípio, que ficou conhecido como Lei de Stefan-Boltzmann, foi possível unificar o Eletromagnetismo e a Termodinâmica, e o mesmo teve grande importância para o advento futuro da Mecânica Quântica (DAHMEN, 2006).

Outro personagem muito importante na Termodinâmica foi Josiah Willard Gibbs (1839-1903). Em seu artigo *“On the Equilibrium of Heterogeneous Substances”*,

publicado em 1876, introduziu o conceito de Energia Livre nos estudos termodinâmicos das reações químicas. Pouco tempo depois, Gibbs recebeu reconhecimento pessoal de Maxwell por suas contribuições (CROWTHER, 2021).

Em 1902, Gibbs publica o livro *“Elementary Principles in Statistical Mechanics”*, no qual apresenta o termo Mecânica Estatística e traz toda formalização para sustentar as bases deste novo ramo da Física. Além disso, neste mesmo livro ele estabelece as condições de equilíbrio para um sistema físico-químico (da forma como conhecemos hoje) e trabalha o conceito de *Ensembles* (coleções), inspirado em um trabalho publicado por Boltzmann em 1884 (DAHMEN; 2006 e PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

Outro personagem fundamental na história da Termodinâmica foi Max Karl Ludwig Planck (1858-1947), físico alemão que no final do século XIX fez contribuições acerca da Segunda Lei da Termodinâmica, tendo seu trabalho reconhecido por cientistas da época, como Maxwell. Por suas contribuições nesse contexto, Planck acabou sendo envolvido nos debates de atomistas e energetistas de sua época (NÓBREGA; FREIRE JR; PINHO, 2013).

A maior contribuição de Max Planck para a físico-química acontece em 1900, ao publicar um artigo no qual apresenta o conceito de *quantum* de energia (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009). Suas ideias o levaram a encontrar uma expressão matemática para a radiação de um corpo negro, e a explicar fenômenos que a Mecânica Clássica não conseguia elucidar. Dessa forma, Planck inaugurou um ramo novo, promissor, repleto de desconfianças e muito revolucionário para a Física, conhecido como Mecânica Quântica.

Em 1906, Walther Herman Nernst (1864-1941) elabora um teorema para explicar o comportamento da entropia de um sistema, quando este se aproxima da temperatura de zero kelvin (zero absoluto). Segundo os estudos de Nernst, nessa situação a entropia seria mínima, e qualquer transformação que houvesse próxima do zero absoluto não apresentaria variação de entropia (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

Max Planck também contribuiu nessa linha, que culminou na formulação da Terceira Lei da Termodinâmica, entre 1911 e 1912, confirmando e generalizando as observações feitas por Nernst (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009).

Segundo esses estudos, quando a temperatura de um sistema constituído por um cristal perfeito tende para o zero absoluto, tem-se que a entropia do sistema também tende a um valor nulo. Isto significaria que esse sistema apresentaria apenas

um microestado (ATKINS; PAULA, 2018), o que é impossível. Uma consequência disso é que o zero absoluto de temperatura é inatingível, o que é a essência da terceira lei da termodinâmica.

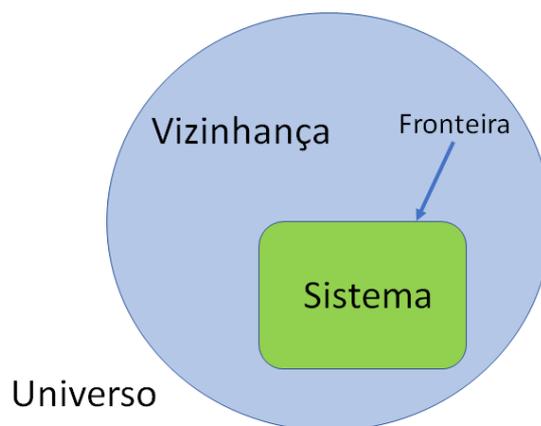
## 1.2 Universo, sistema e vizinhança

Diante do histórico apresentado até aqui, vimos diversas contribuições feitas para concluir que a Termodinâmica é uma ciência que estuda os processos químicos e físicos que são capazes de realizar ou sofrer calor e trabalho, descrevendo as transformações da energia, e se preocupando, inclusive, em quantificar esta energia.

Para os nossos estudos, é necessário definirmos os conceitos de universo, sistema e vizinhança.

Observemos o diagrama apresentado na Figura 7 a seguir. Se considerarmos o círculo como sendo o nosso universo de interesse científico, a parte do universo que estamos interessados em estudar é definida como sistema, sendo que o restante deste universo é considerado como a vizinhança. Sempre que iniciamos os estudos de Termodinâmica, é importante apresentar um diagrama como este para que o aluno possa entender os mecanismos de troca de energia através do calor e do trabalho entre o sistema e sua vizinhança.

Figura 7 — Universo, sistema e vizinhança.



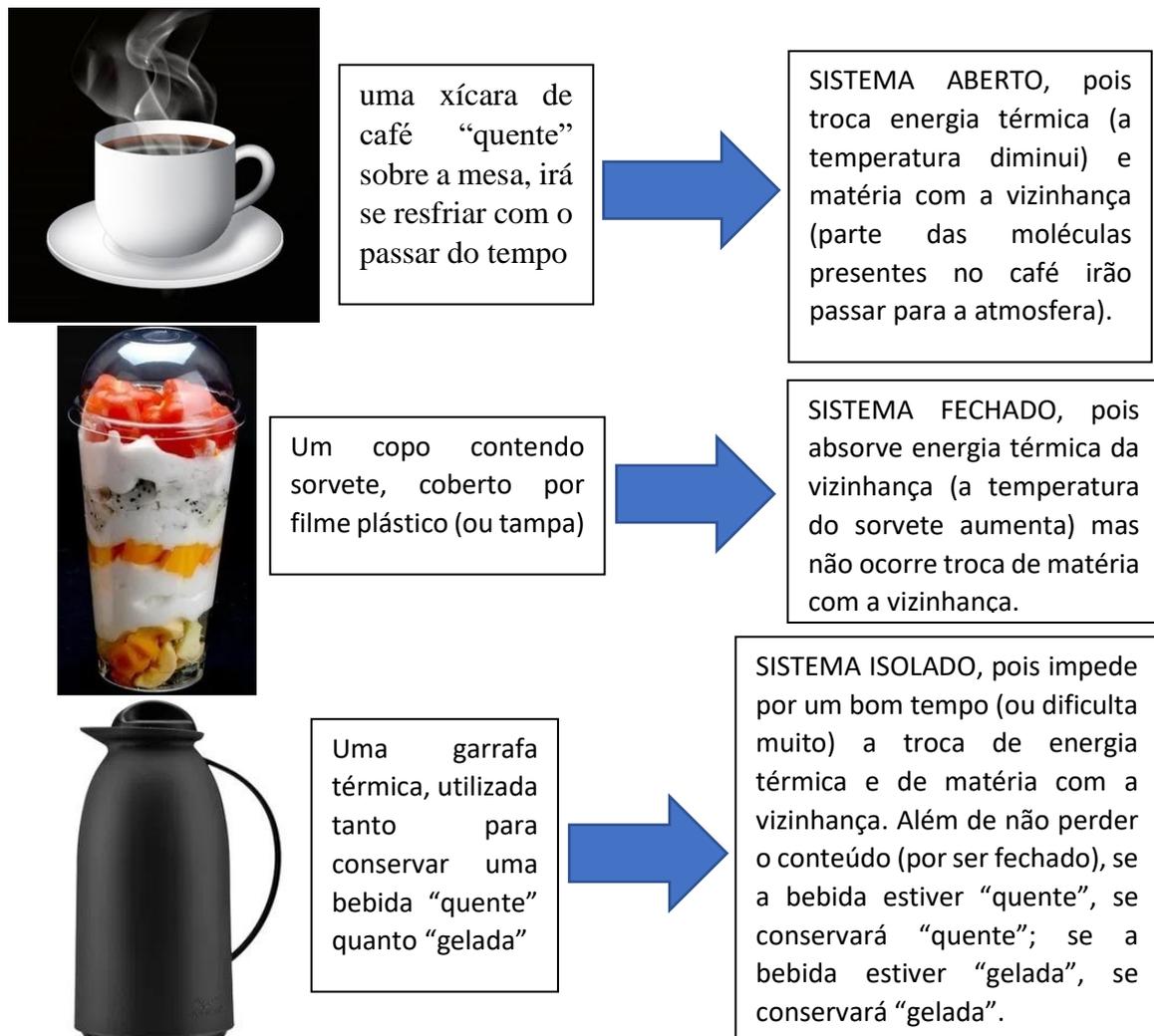
Fonte: o autor.

É importante enfatizar que o universo nesse contexto é uma região do espaço que é definida pelo cientista e não necessariamente o nosso universo cósmico. Por exemplo, o universo pode ser uma bancada de um laboratório de química contendo

um béquer. Nesse caso, o sistema pode ser uma soluço dentro do béquer e as vizinhanças o restante da bancada. As paredes de vidro do béquer seriam, nesse exemplo, a fronteira entre o sistema e as vizinhanças. Além disso, o universo (conjunto sistema + vizinhança) também   chamado de sistema isolado.

Outra defini o importante consiste na classifica o correspondente ao tipo de sistema, que são feitas de acordo com as características de sua fronteira. Um sistema aberto   aquele que troca matéria e energia com a vizinhança; um sistema fechado não troca matéria com a vizinhança, apenas energia; já um sistema isolado consiste naquele que não troca matéria nem energia com a vizinhança. A Figura 8 traz a explica o para cada tipo de sistema.

Figura 8 — Sistema aberto, fechado e isolado.



Fonte: o autor<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Para a constru o da Figura, foram utilizadas imagens adaptadas da internet, obtidas em:

Para prosseguirmos no entendimento das Leis da Termodinâmica, dependemos de alguns conceitos que muitas vezes são apresentados e compreendidos matematicamente. Em algumas situações é muito comum haver alguma confusão sobre as grandezas envolvidas (como ocorre, por exemplo, entre calor e temperatura). Por isso, é necessário primeiramente trabalharmos de forma precisa as definições, para minimizarmos os equívocos conceituais.

### 1.3 Temperatura (T):

Temperatura é um parâmetro que define se dois sistemas estão em equilíbrio térmico ou não. Se esse parâmetro for igual para os sistemas, esses estão em equilíbrio térmico pois não trocam mais energia. Se a temperatura for diferente, então os sistemas continuam trocando energia até que a temperatura se iguale. Essa é a definição, extraída do entendimento da Lei Zero da Termodinâmica.

A definição apresenta por Atkins e Paula (2018, p. 6) afirma que:

A temperatura é, convencionalmente, uma propriedade que determina em que direção a energia, na forma de calor, irá fluir quando duas amostras são colocadas em contato por meio de paredes termicamente condutoras: a energia será transferida da amostra com temperatura maior para a amostra com temperatura menor.

Porém, é mais fácil compreender esse parâmetro através de sua relação com o movimento das partículas de um sistema. Nesse sentido, temperatura pode ser pensada como o grau de agitação das partículas em um dado sistema. Quanto maior a energia cinética das partículas, conseqüentemente, teremos uma temperatura maior. Quanto menor a energia cinética das partículas, menor será o valor da temperatura.

Para se fazer a medida da temperatura de um corpo foi necessário o desenvolvimento de um instrumento e, desta forma, Galileu Galilei (1564-1642), no final do séc. XVI, desenvolveu o termoscópio, que consistia na expansão de um gás

---

Xícara de café: adaptado de <<https://quesepassa.files.wordpress.com/2011/04/cafc3a9.jpg>>. Acesso em: 09/08/2020.

Copo de sorvete: adaptado de <<https://images.app.goo.gl/2D84ox6vZMs5EjfU6>>. Acesso em: 09/08/2020.

Garrafa térmica: <<https://a0.vnda.com.br/invictaonline/2016/06/27/100688030105-garrafa-termica-vg-0-75l-219.jpg?1467052484>>. Acesso em: 09/08/2020.

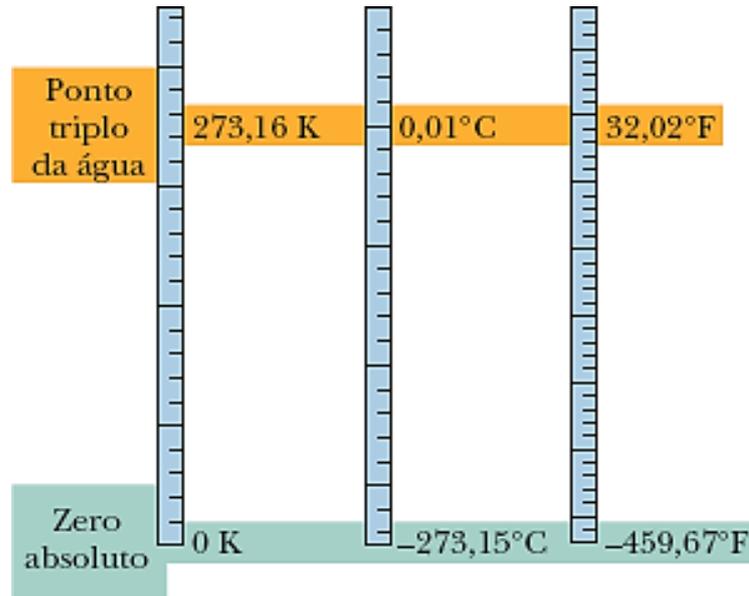
em tubo alongado, que estaria mergulhado em um líquido, que estaria em um bulbo acoplado. Conforme a temperatura da amostra variava, o líquido poderia subir ou descer pelo tubo. Este sistema bastante rudimentar de medição da temperatura possuía inconsistências nas suas medições, que oscilavam conforme o local em que ocorria a medição (o bulbo era aberto) e a volatilização do líquido. Em 1714, Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736) foi o primeiro a construir um termômetro de mercúrio, utilizando uma estrutura fechada, mercúrio e preparações que reduziam bastante as inconsistências das medidas (PIRES; AFONSO; CHAVES, 2006).

Neste período do século XVIII ocorreu uma corrida para a construção de escalas termométricas que possibilitassem comparações entre as temperaturas dos corpos. Essas escalas de medidas termométricas, tais como as escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin, por exemplo, são utilizadas conforme o regionalismo e a necessidade prática. Para se definir numericamente a escala, geralmente é escolhido um evento térmico reprodutível (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Por exemplo, inicialmente, para a definição de 0 °C na escala Celsius, foi utilizado o ponto de fusão da água a 1 atm. Ao ponto de ebulição da água, em 1 atm, foi atribuído do valor de 100 °C, e os demais valores subdivididos dentro desta escala. É por este motivo que a medida em graus Celsius também é conhecida como graus centígrados (BRITANNICA, 2019).

Apesar de não ser a mais comum no cotidiano das pessoas, a escala termométrica que pertence ao Sistema Internacional de Unidades é a Kelvin (não se utiliza o termo “grau”). Segundo Halliday, Resnick, Walker (2016), atualmente utiliza-se como padrão de medição de todas as escalas termométricas o ponto triplo da água. A escolha deste padrão aconteceu por meio de um acordo internacional. Para o ponto triplo da água, a temperatura atribuída é de 273,16 K. A Figura 9 a seguir compara as escalas kelvin, Celsius e Fahrenheit de temperatura.

Figura 9 — Comparação entre as escalas Kelvin, Celsius e Fahrenheit.

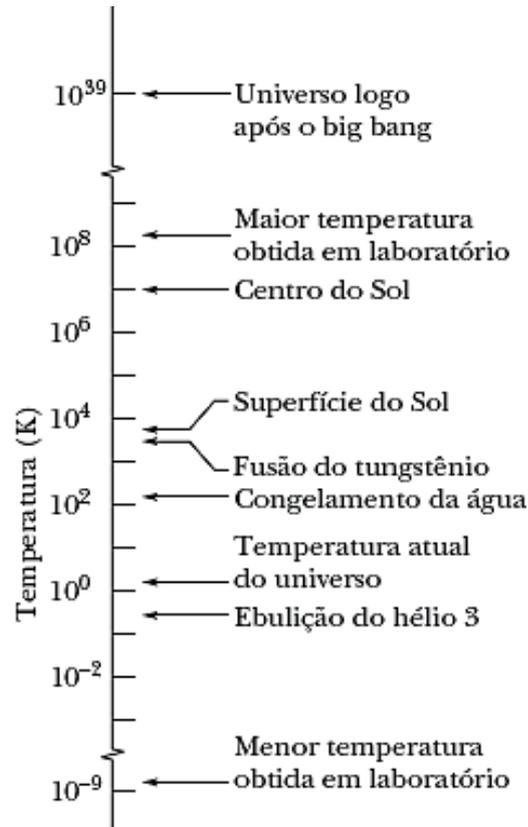


Fonte: HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2016.

Muitas foram as tentativas para se descobrir o valor do limite inferior da temperatura, que ficou conhecido como zero absoluto. Se a temperatura de um objeto pode ser definida como uma medida do grau de agitação de suas partículas, então, do ponto de vista clássico, na temperatura do zero absoluto a energia cinética das partículas seria nula, e não haveria movimento. Para fazer tal determinação, os experimentos realizados por Lord Kelvin envolveram o estudo da variação da pressão sobre uma amostra gasosa em recipiente fechado, conforme se variava a temperatura da amostra. Como será definido posteriormente, a pressão de uma amostra está diretamente relacionada com o movimento das suas partículas. Para um tipo específico de sistema, constituído por gás ideal, se o valor da pressão fosse nulo, então não haveria movimento e, portanto, a temperatura também seria nula. Descobriu-se que a temperatura em que a pressão da amostra gasosa se anularia seria de  $-275,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo este valor considerado como referência para 0 K (o zero absoluto) (PIRES; AFONSO; CHAVES, 2006).

É importante ressaltar que o zero absoluto, cujo valor na escala Kelvin é de 0 K e na escala Celsius de  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (valor atual), corresponde a um limite inferior para a temperatura. Não existe um limite superior. Para exemplificar os valores de algumas temperaturas, observa-se a Figura 10, que mostra, em escala logarítmica, as temperaturas de alguns eventos cósmicos e substâncias da natureza.

Figura 10 — Comparação entre alguns valores de temperatura.



Fonte: HALLIDAY, RESNICK, WALKER (2016).

Apesar de ser a escala Kelvin aquela aceita pelo Sistema Internacional de Unidades, no nosso cotidiano estamos mais acostumados com a escala Celsius. Então, é importante conhecer como é feita a conversão de uma escala para a outra. Tal conversão é feita através da seguinte expressão:

$$T_F = T_C + 273,15 \quad (2)$$

Na expressão 2, temos que  $T_F$  e  $T_C$  são respectivamente os valores nas escalas Kelvin e Celsius. Uma aplicação prática para o uso da propriedade temperatura no nosso cotidiano está na verificação da temperatura corporal de uma pessoa. Para tanto, é necessária a utilização de um termômetro (de mercúrio ou digital, conforme é mostrado na Figura 11 a seguir). A temperatura média do corpo humano é de  $36,5^\circ\text{C}$ . Na escala Kelvin, esta mesma temperatura seria de  $309,65\text{ K}$ . Valores maiores que  $37,5^\circ\text{C}$  já são considerados como febre, e merecem atenção especial, pois podem indicar que algo não está bem com o paciente.

Figura 11 — Modelo de termômetro digital, utilizado para medição da temperatura corporal. (marca G-Tech).



Fonte: o autor.

Um termômetro, portanto, é um aparelho construído para a medição da temperatura de um sistema. Existem diferentes tipos de termômetro, conforme o uso que se pretende (termômetro de gás, de líquido ou termômetro digital). A construção e o uso do termômetro devem levar em consideração as propriedades dos materiais de sua construção, tais como o vidro e o líquido em seu interior, por exemplo. É importante considerar também os pontos de fusão e ebulição, bem como a interação e reatividade (PIRES; AFONSO; CHAVES, 2006).

O princípio para se fazer a medição da temperatura na maioria dos termômetros é basicamente o mesmo em todos os modelos: é preciso que o aparelho esteja em contato físico com o sistema a ser examinado, e entre em equilíbrio térmico com este sistema (ou seja, haverá transferência de energia térmica do sistema para o termômetro ou do termômetro para o sistema, até que as temperaturas se igualem). Este processo de troca de energia calorífica, promovendo conseqüentemente a igualdade da temperatura dos sistemas é conhecido como Lei Zero da Termodinâmica.

Os termômetros de líquidos são muito comuns, e geralmente são construídos em vidro, apresentando um bulbo que armazena uma substância em seu interior (como etanol ou mercúrio) que irá variar seu volume ao longo de um capilar, conforme a temperatura do meio a ser medido. O aumento da temperatura promoverá o aumento do volume do líquido, que irá “subir” ao longo do capilar; já a diminuição da temperatura promoverá uma contração do líquido, que irá “descer” pelo capilar. A

leitura da temperatura é feita após o sistema entrar em equilíbrio térmico com o termômetro (não haverá mais oscilação no valor de temperatura lido no termômetro).

No ano de 2020, um tipo de termômetro que ficou bastante famoso é o modelo conhecido como “Termômetro de Tesla”, mostrado na Figura 12. Este aparelho ficou bastante conhecido por ser utilizado para medir a temperatura corporal das pessoas antes de adentrarem em lojas, instituições, veículos de transporte coletivo, dentre outros. Isso ocorreu devido à pandemia do novo coronavírus que assolou/assola o mundo (febre é um dos sintomas de Covid-19).

Figura 12 — Termômetro de Tesla em vista lateral (a), vista do visor e botões de opções (b) e vista frontal (c), região –que faz a coleta da radiação infravermelha para leitura.



Fonte: o autor.

Diferentemente dos termômetros comentados anteriormente, este aparelho não precisa entrar em contato físico direto com o objeto do qual se deseja medir a temperatura. Ele é construído em plástico, e possui em seu circuito eletrônico um sensor capaz de medir a radiação infravermelha emitida pelos corpos. Essa radiação é a principal portadora de energia térmica, que é chamada no cotidiano de “calor”. A partir dessa leitura, o circuito do termômetro interpreta qual é a temperatura desse objeto, cujo valor é apresentado no visor digital.

Todos os corpos emitem um tipo de radiação para a vizinhança a seu redor, a qual recebe o nome de radiação térmica. Esse tipo de radiação encontra-se na região do infravermelho do espectro eletromagnético, e é invisível para nós. Entretanto, quando aquecemos alguns materiais a temperaturas muito altas, eles podem adquirir luz própria, e, portanto, brilhar. Cabe ressaltar que, mesmo emitindo luz, cerca de 90% da radiação térmica emitida por esse material ocorre na região do infravermelho (EISBERG, RESNICK, 1979). Observe a Figura 13, que traz a imagem de uma barra de ferro aquecida.

Figura 13 — Barra de ferro aquecida.



Fonte: adaptada de <[https://live.staticflickr.com/8034/8057100609\\_d56b01b7c4\\_b.jpg](https://live.staticflickr.com/8034/8057100609_d56b01b7c4_b.jpg)>. Acesso em: 20/04/2021

Na figura anterior, podemos perceber que a barra de ferro está emitindo luz na região do visível, em diferentes tonalidades, devido ao grande aquecimento ao qual foi submetida. Cada tonalidade de brilho emitida pela peça apresenta uma relação direta com a temperatura em que aquela região do material se encontra. Quando a barra de ferro ainda não foi muito aquecida, ela não emite cor. Entretanto, à medida que sua temperatura se eleva, ela começa a brilhar em uma coloração vermelho escuro. Com o sucessivo aumento da temperatura, a barra de ferro pode assumir tonalidade vermelho claro, seguida de amarelo e de branco azulado ao alcançar valores muito elevados (EISBERG, RESNICK, 1979).

A temperatura é também uma propriedade importante observada na Previsão do Tempo, que pode ser consultada em jornais televisivos, *internet* ou mesmo alguns aplicativos de *smartphone* para este fim. Geralmente consultamos a previsão de temperatura para antecipar a informação se os próximos dias serão “quentes” ou “frios”. A temperatura prevista para um determinado dia depende de alguns fatores, tais como a formação de zonas de alta ou baixa pressão, correntes de ar carregadas de umidade, deslocamento de massas de ar “quente” ou “frio”, dentre outros.

Em nossas casas, os fogões domésticos que têm fornos, geralmente apresentam botões para controlar a saída de gás utilizada na combustão. Estes botões, quase sempre, apresentam indicações de valores de temperatura. Neste caso, ao liberar uma maior quantidade de gás será promovido um aumento no grau de ocorrência da reação de combustão, liberando maior quantidade de energia térmica. Obviamente, tal fato promoverá um aumento de temperatura interna do forno.

Em casa, costumamos ter também aparelhos para promover resfriamento, tais como geladeiras e *freezers*. Alguns desses aparelhos podem, inclusive, conter mostradores digitais de temperatura. Neste caso, a refrigeração promovida por esses aparelhos ocorre devido ao funcionamento de um compressor, que movimenta um fluido de refrigeração, cujo ponto de fusão é baixo. Entre ciclos de compressão e descompressão, o fluido percorre um circuito interno e outro externo, a fim de promover a retirada de energia térmica do interior para o exterior do aparelho.

Por fim, outro exemplo de uso importante dos termômetros e do controle de temperatura corresponde à conservação das vacinas, de uso humano ou veterinário. A manutenção da qualidade e a garantia de eficiência dessas vacinas exige que estes produtos (geralmente) sejam conservados em refrigerador para uso próprio, cuja temperatura deve permanecer entre 2 e 8 °C, a fim de garantir a qualidade das vacinas.

#### 1.4 Calor (Q)

A grandeza intitulada calor consiste em um processo de transferência de energia que ocorre de forma caótica de um sistema para sua vizinhança, ou vice-versa, promovendo um aumento de temperatura naquele que apresentar um menor valor desta propriedade. Portanto, calor é um **processo** dependente da maneira como a energia flui pela fronteira do sistema. Ele perdura durante a troca de energia entre

sistema e vizinhança quando estes apresentam diferenças de temperatura. Calor não é **medido** no sistema. O que é medido são a energia e a temperatura. Calor é **realizado** pelo ou sobre o sistema. A causa desse processo é uma diferença de temperaturas entre sistema e vizinhança.

Como exemplo podemos considerar uma xícara de café “quente” (que corresponde ao nosso sistema) transferindo energia para a vizinhança, diminuindo a temperatura da bebida e elevando a temperatura da vizinhança. O nome desse processo de transferência é calor. Ao igualar sua temperatura com a da vizinhança, suponhamos que tenha se estabilizado a temperatura em ambos. Neste momento, não há mais troca de energia. Não há mais processo calor.

Portanto, é preciso que se tome certo cuidado com algumas expressões do cotidiano, tais como “hoje está calor”, ou “este cobertor é quentinho”. Um dia que esteja fazendo mais “calor” corresponde a um dia de temperatura mais elevada e, portanto, transferirá mais energia térmica do ambiente (vizinhança) para o nosso organismo (sistema). Esta seria o equivalente à sensação de “calor”. Do contrário, quando a temperatura ambiente é baixa, haverá uma tendência de transferência de energia térmica do nosso organismo (sistema) para o ambiente (vizinhança).

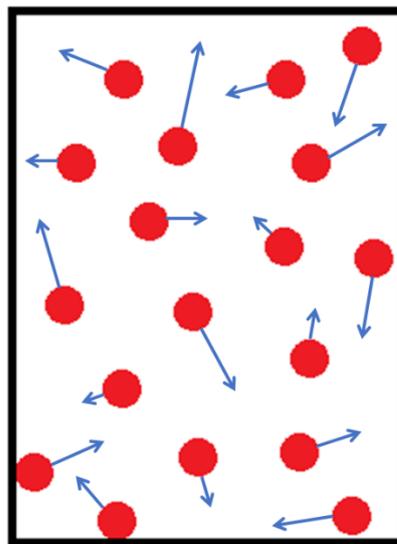
Além disso, a ideia de um “cobertor quentinho” está relacionada à sua capacidade de ser um bom isolante térmico, diminuindo a perda de energia térmica do corpo para o ambiente. A sensação de aquecimento percebida por quem utiliza o cobertor consiste em energia térmica proveniente do próprio corpo da pessoa, e não do cobertor.

## 1.5 Pressão (P)

Fisicamente, podemos definir pressão como a razão entre a força exercida por um corpo sobre a área de aplicação desta força. Dentro dessa definição, concluímos que uma força grande sobre uma área pequena resulta em uma grande pressão sobre a superfície. Para os estudos termodinâmicos, geralmente utilizamos o exemplo de uma amostra gasosa em um recipiente fechado. Nesta situação, podemos imaginar as partículas do gás se movimentando aleatoriamente dentro do frasco, e chocando-se de inúmeras formas entre si, inclusive com as paredes desse frasco. Neste caso, se o volume do recipiente não se altera, podemos dizer que a pressão do gás está relacionada com a força exercida por suas partículas sobre as paredes do recipiente.

(representado pelas esferas). Na Figura 14, temos uma representação para esta situação, onde as bolinhas ilustram os átomos de um gás ideal monoatômico e as setas representam o vetor velocidade de cada uma, indicando que apresentam direções e módulos variáveis.

Figura 14 — Recipiente fechado contendo uma certa amostra de gás ideal monoatômico

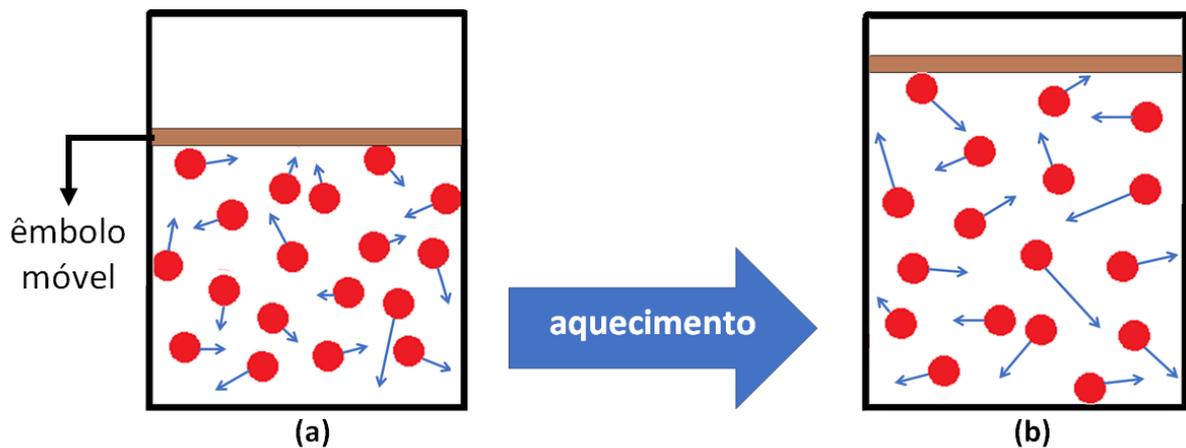


Fonte: o autor.

Se aumentarmos a temperatura do frasco, mantendo o seu volume constante, o número de choques e a força será maior, de tal forma que constataremos um aumento na pressão do gás. Uma ilustração desta situação pode ser dada através de um experimento muito simples, de um sistema constituído por um recipiente com êmbolo móvel, contendo uma amostra de gás ideal em seu interior, conforme mostra a situação (a), na Figura 14. Em um primeiro momento há equilíbrio mecânico entre as duas regiões do sistema isolado separadas pelo êmbolo. A região superior corresponde à vizinhança e a região inferior ao sistema. O êmbolo faz o papel de fronteira entre o sistema e a vizinhança.

Em um segundo momento, ao aquecermos a amostra gasosa do sistema, o número de choques e a força com a qual eles ocorrem aumentará, promovendo um deslocamento do êmbolo (b), a fim de que a pressão interna do sistema se iguale à pressão da vizinhança.

Figura 15 — Amostra gasosa promovendo deslocamento de êmbolo móvel, após sofrer aquecimento.

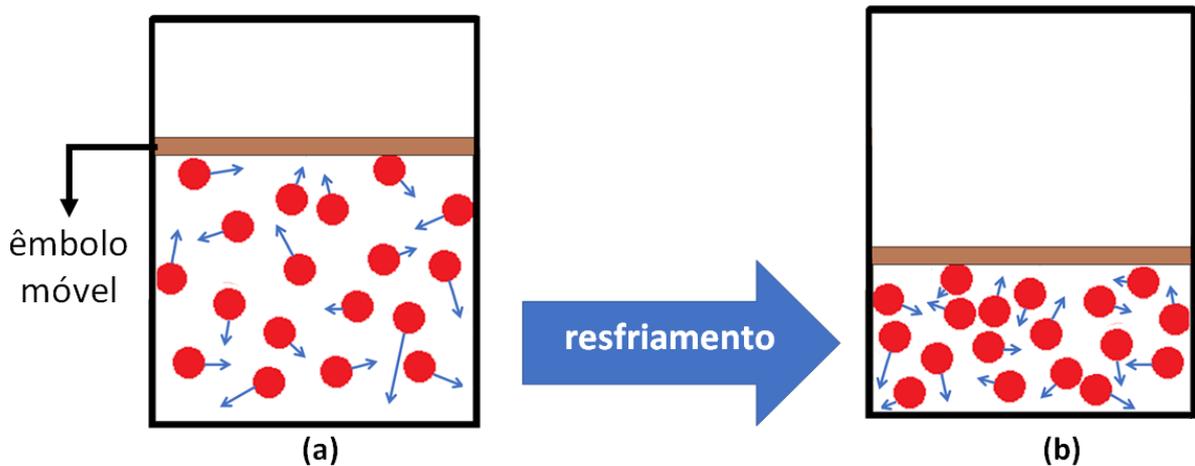


Fonte: o autor.

O efeito ilustrado na Figura 15 corresponde a uma transformação isobárica, ou seja, uma transformação à pressão constante, uma vez que o êmbolo se move para igualar as pressões entre sistema e vizinhança, a partir do aumento de temperatura do sistema. Como consequência desta situação, ocorrerá um aumento de volume do sistema.

Contrariamente, caso o sistema gasoso utilizado como exemplo sofresse uma diminuição de temperatura à pressão constante, as partículas do sistema teriam uma energia cinética menor, o que promoveria também um menor número de choques efetivos entre si e com as paredes do recipiente. Dessa forma, o êmbolo se moveria no sentido de diminuir o volume do sistema, a fim de igualar a pressão interna com a da vizinhança. Esta situação é ilustrada na Figura 16.

Figura 16 — Amostra gasosa promovendo deslocamento de êmbolo móvel, após sofrer resfriamento.



Fonte: o autor.

Um exemplo bastante cotidiano para esta situação está nas “bexigas de festa”, que quando cheias se aproximam (com exceções) da situação apresentada. Uma vez cheias, elas podem sofrer dilatação ou contração, conforme alteração da temperatura ambiente. Este é um experimento simples que pode ser proposto aos alunos, para que façam observações em casa ou na escola.

Apesar de ser uma aproximação, este exemplo permite uma visualização qualitativa deste princípio, e nos ajuda a entender como estas propriedades variam juntas. Ao promover deslocamento do êmbolo ou aumento no volume da bexiga, podemos entender também que houve realização de trabalho do sistema sobre a vizinhança, conforme será explicado adiante. Na ocorrência de diminuição do volume do sistema estudado, devido à diminuição de temperatura, poderíamos dizer que houve realização de trabalho da vizinhança sobre o sistema.

A pressão é uma propriedade física que pode ser medida através de um aparelho chamado barômetro. A unidade de medida no Sistema Internacional é o Pascal (Pa), mas é muito comum também utilizarmos atmosferas (atm), milímetros de mercúrio (mmHg), torricelli (torr), entre outras (ATKINS; PAULA, 2018). A Tabela 1 a seguir apresenta a relação existente entre as unidades de medida e o padrão utilizado no SI (Pascal).

Tabela 1 — Unidades de medida de pressão

Nome	Símbolo	Valor
pascal	1 Pa	1 N.m <sup>-2</sup> , 1 Kg.m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>
bar	1 bar	10 <sup>5</sup> Pa
atmosfera	1 atm	101,325 kPa
Torricelle	1 Torr	133,32... Pa
milímetros de mercúrio	1 mmHg	133,32... Pa
Libra-força por polegada quadrada	1 psi	6,894757... kPa

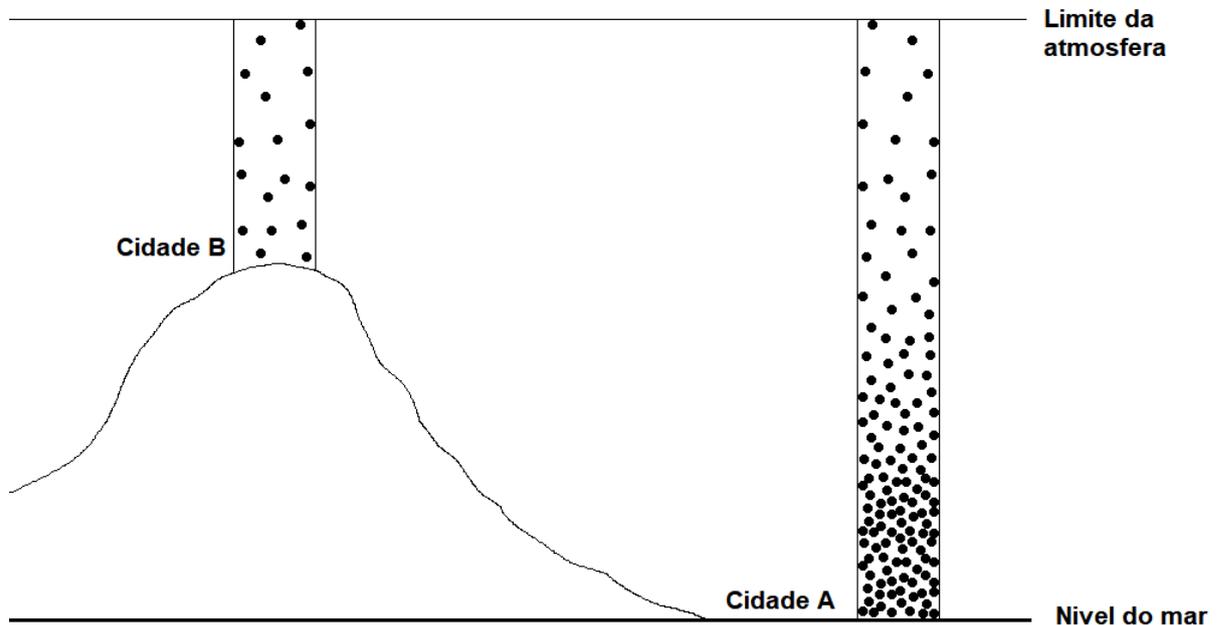
Fonte: adaptado de Atkins e Paula (2018, p.30).

Em nosso planeta, os gases presentes na atmosfera terrestre são responsáveis pela chamada pressão atmosférica. Como dito anteriormente, podemos definir fisicamente pressão como sendo a razão entre força e área. Assim, podemos entender a pressão atmosférica a partir deste princípio, e relacioná-la como a força exercida por uma coluna de ar sobre o observador, em um dado momento e em um dado local do globo terrestre (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Quanto mais distante da superfície da crosta terrestre, menor a atração gravitacional sobre as partículas gasosas, sendo mais rarefeita a atmosfera naquele local. Uma constatação interessante é que cerca de 50 % de toda massa apresentada pela atmosfera terrestre está presente nos primeiros 5 km de altura em relação ao nível do mar, enquanto 75 % até a altitude de 10 km e cerca de 95 % até os primeiros 20 km (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Dessa forma, é possível estabelecer uma relação entre a altitude que se encontra um dado observador, e a pressão atmosférica naquele local. Caso o observador esteja em uma altitude elevada em relação ao nível do mar, por exemplo, a coluna de ar sobre ele será menor, sendo menor também a pressão atmosférica medida neste local conforme se observa na Figura 17.

Figura 17 — Representação aproximada para a diferença de densidade gasosa entre as cidades A e B, devido à diferença de altitude.



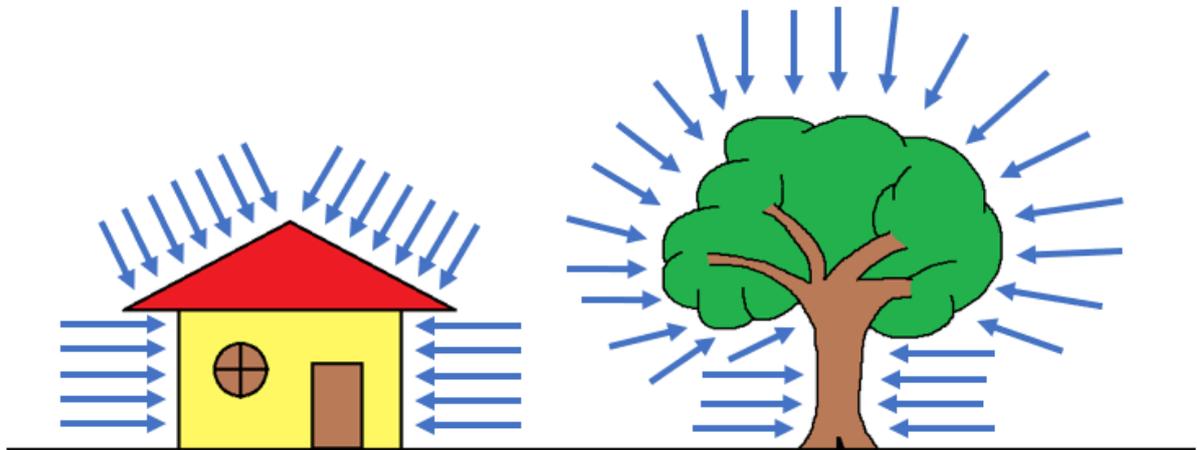
Fonte: o autor.

Como podemos observar na ilustração (fora de escala) que consta na Figura 17, a Cidade B está em uma altitude mais elevada em relação ao nível do mar, quando comparada com a Cidade A. Logo, a pressão atmosférica na cidade B será menor que na cidade A, assim como o ar será mais rarefeito. Uma constatação interessante dessa situação é observada em partidas de futebol que ocorrem em jogos no Peru, no Equador e na Bolívia, que apresentam cidades de altitude muito elevada (acima de 2,4 mil metros). Nestes casos, como a pressão atmosférica é menor, os pulmões absorvem menos oxigênio, diminuindo a eficiência aeróbica do organismo humano. Assim, durante a partida é comum que os jogadores sintam fadiga muscular e mental, sonolência, dores de cabeça e náusea. Devido a isto, os atletas costumam utilizar cilindros de oxigênio no intervalo das partidas. Outro efeito comum de ser constatado está na velocidade com a qual a bola percorre o campo durante o jogo. Como a resistência do ar é menor, a velocidade da bola será maior, podendo surpreender os jogadores em alguns lances da partida (SANTOS, 2020).

Uma dúvida comum de se encontrar na sala de aula consiste na confusão que alguns alunos fazem na hora de explicar a pressão atmosférica nos termos apresentados. Como é feita a definição a partir da ideia de uma coluna de ar sobre o

observado, na concepção de alguns alunos a pressão seria uma propriedade que atua apenas sobre a parte superior dos corpos. Entretanto, as partículas moleculares presentes na atmosfera estão sempre em constante movimento, e a força do choque das partículas que é responsável pela origem da pressão atmosférica. Assim, neste momento é importante salientar que pressão atmosférica em um local é exercida em toda a superfície do objeto/observador, conforme pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 — Pressão atmosférica atuando sobre os corpos.



Fonte: o autor.

Conforme dito anteriormente, à medida em que se distancia da superfície do planeta ocorrerá uma diminuição significativa no número de moléculas gasosas que compõem a atmosfera. Isto implicará em variações nas propriedades do ar, conforme demonstra a Tabela 2. Observe-se que à medida que a altitude (em relação ao nível do mar) aumenta, propriedades como pressão e densidade diminuem progressivamente. A massa molar aparente ( $M_a$ ) é um parâmetro que está relacionado com a massa molar da média ponderada dos componentes de uma mistura (seu cálculo é feito considerando a massa molar e a fração molar de cada componente na mistura). Neste caso, a mistura é o ar atmosférico. Observa-se que o valor de  $M_a$  praticamente não se altera até os primeiros 90 km de altitude. Tal fato revela que a composição atmosférica até este momento pode ser considerada constante.

Tabela 2 — Variação das propriedades do ar com a altitude.

Altitude (km)	Pressão (atm)	Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )	M <sub>a</sub> (g.mol <sup>-1</sup> )
10	2,62.10 <sup>-1</sup>	4,14.10 <sup>-1</sup>	28,96
20	5,45.10 <sup>-2</sup>	8,82.10 <sup>-2</sup>	28,96
30	1,18.10 <sup>-2</sup>	1,84.10 <sup>-2</sup>	28,96
40	2,83.10 <sup>-3</sup>	4,00.10 <sup>-3</sup>	28,96
50	7,88.10 <sup>-4</sup>	1,03.10 <sup>-3</sup>	28,96
60	2,22.10 <sup>-4</sup>	3,06.10 <sup>-4</sup>	28,96
70	5,45.10 <sup>-5</sup>	8,75.10 <sup>-5</sup>	28,96
80	2,05.10 <sup>-5</sup>	2,00.10 <sup>-5</sup>	28,96
90	1,62.10 <sup>-6</sup>	3,17.10 <sup>-8</sup>	28,96
100	2,97.10 <sup>-7</sup>	4,97.10 <sup>-7</sup>	28,88
110	7,25.10 <sup>-8</sup>	9,83.10 <sup>-8</sup>	28,56
120	2,49.10 <sup>-8</sup>	2,44.10 <sup>-8</sup>	28,07
130	1,20.10 <sup>-8</sup>	7,59.10 <sup>-9</sup>	27,58

Fonte: adaptado de Murgatroyd et al. (1965) *apud* Varejão-Silva (2006, p. 101).

A composição da atmosfera terrestre é variável conforme a localização no globo e a altitude em relação ao nível do mar. Além disso, o vapor de água presente no ar atmosférico também acaba por alterar a proporção de cada gás na mistura, por isso quando se fala em composição do ar atmosférico, considera-se o “ar seco”. A Tabela 3 a seguir apresenta os valores de composição média do ar atmosférico terrestre, até uma altitude de 25 km do nível do mar.

Tabela 3 — Composição do ar atmosférico seco até 25 km de altitude.

Constituinte	Fração molar (% do volume)	Massa molecular (g.mol <sup>-1</sup> )
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	78,084	28,013
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	20,946	31,999
Argônio (Ar)	0,934	39,948
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0,031	44,010
Neônio (Ne)	0,0018	20,183
Hélio (He)	0,000524	4,003
Criptônio (Kr)	0,00015	83,800
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0,00005	2,016
Xenônio (Xe)	0,000008	131,300
Ozônio (O <sub>3</sub> )	0,000001	47,998
Radônio (Rn)	6.10 <sup>-18</sup>	222
Massa molecular média (aparente)		28,964

Fonte: adaptado de Goody; Walker, 1975 *apud* Varejão-Silva (2006 p.100).

Ao analisar os dados da tabela 3, poderíamos questionar: se 78% da atmosfera é constituída de gás nitrogênio (N<sub>2</sub>), por que dizemos que respiramos gás oxigênio (O<sub>2</sub>)? Para que as reações bioquímicas em nossas células possam continuar ocorrendo, de modo a promover a continuidade da vida em nosso organismo, precisamos de O<sub>2</sub> que está na atmosfera. A maior parte do gás que respiramos é, de fato, N<sub>2</sub>, o qual é menos reativo que O<sub>2</sub>, e não utilizamos na cadeia respiratória. Um dos motivos para que isto ocorra está na estrutura química dos gases. A energia de ligação do N<sub>2</sub> (946 kJ.mol<sup>-1</sup>) é maior que a energia de ligação do O<sub>2</sub> (497 kJ.mol<sup>-1</sup>)<sup>2</sup> uma vez que o gás N<sub>2</sub> é formado por uma ligação tripla, enquanto o gás O<sub>2</sub> é formado por uma ligação dupla. Assim, é mais difícil liberar os átomos de nitrogênio do que os átomos de oxigênio, uma vez que é necessária a utilização de mais energia.

Outro gás interessante para comentarmos é o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O aumento desenfreado da taxa de CO<sub>2</sub> na atmosfera tem promovido um maior agravamento do aquecimento global, conforme tem-se observado nas últimas décadas. Com efeito, a temperatura média do planeta vem aumentando

<sup>2</sup> Valores de energia encontrados em Atkins, Paula (2018, p. 470).

gradativamente, e este fato pode desencadear uma série de consequências como por exemplo, o aumento da temperatura média dos oceanos. Essa é uma situação bastante preocupante, pois pode influenciar, por exemplo, na trajetória de algumas correntes marítimas. Alterações nessas trajetórias podem promover desde mudanças climáticas a alterações no comportamento da fauna marinha (Uma Verdade Inconveniente, 2006). Diversos dados atualizados acerca das emissões de CO<sub>2</sub> no mundo, seja por atividade humana ou por processos naturais, inclusive com monitoramento diário, pode ser feito através da ferramenta *Global Carbon Atlas*<sup>3</sup>.

A Figura 19 consiste em um gráfico de barras azuis e vermelhas, que informa sobre o comportamento da temperatura média mundial no período de 1850 a 2019. Essa imagem foi obtida através da ferramenta “*Show Your Stripes*”<sup>4</sup>, do pesquisador e climatologista britânico Ed Hawkins (*University of Reading*). Como o próprio pesquisador informa<sup>5</sup>, a ferramenta traz dados precisos das temperaturas registradas nesse período e é capaz de gerar este e outros gráficos com os registros de temperatura por região do planeta. Seu objetivo principal é divulgar e alertar a população mundial acerca dessa problemática.

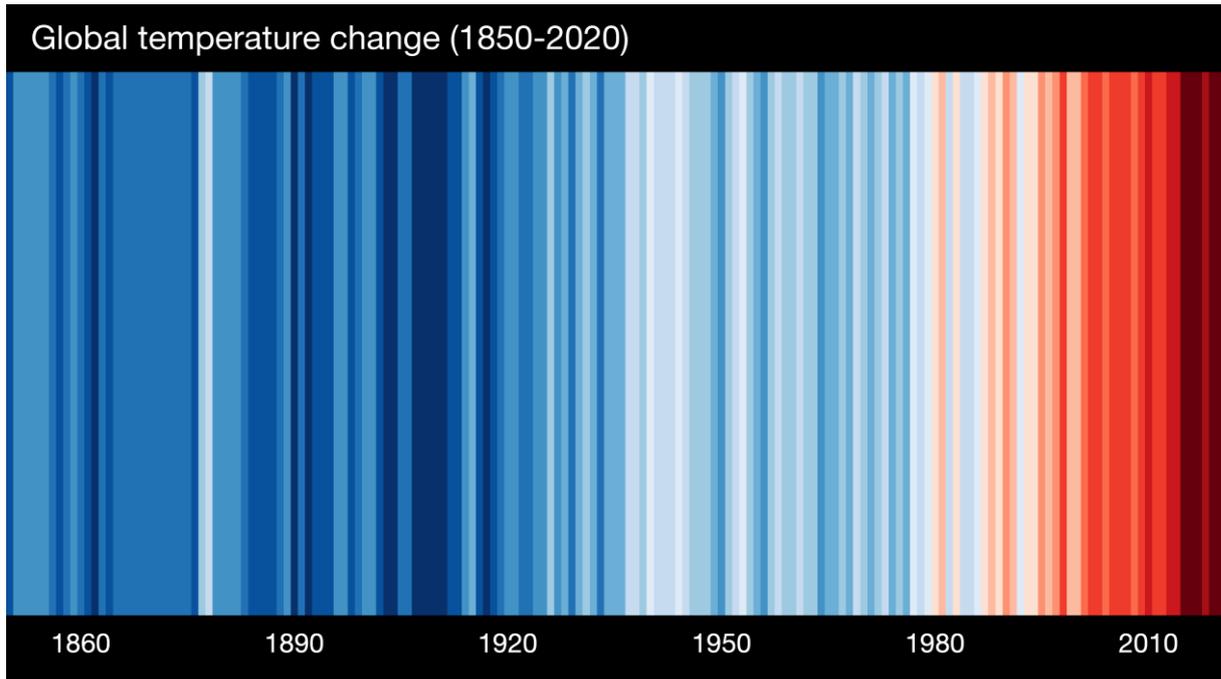
---

<sup>3</sup> Disponível em: <<http://www.globalcarbonatlas.org/en/content/welcome-carbon-atlas>>. Acesso em: 20/04/2021.

<sup>4</sup> Disponível em: <<https://showyourstripes.info/>>. Acesso em: 20/04/2021.

<sup>5</sup> HAWKINS, E. ***The story behind the viral graphic that electrified the climate movement***. Fast Company & Inc, 2019. Disponível em: <<https://www.fastcompany.com/90405797/the-story-behind-the-viral-graphic-that-electrified-the-climate-movement>>. Acesso em: 20/04/2021.

Figura 19 — Temperatura global média entre 1850 e 2020.



Fonte: imagem gerada a partir de <<https://showyourstripes.info/>>. Acesso em: 12/07/2021.

Nessa figura, as barras azuis são registros de temperaturas médias mais baixas, enquanto as barras vermelhas são temperaturas mais elevadas. Essa é uma imagem que nos preocupa bastante, pois constatamos que há um agravamento significativo do aquecimento global nas últimas décadas. Segundo os registros divulgados pela plataforma, a temperatura média global aumentou em mais de 1,2 °C durante este período.

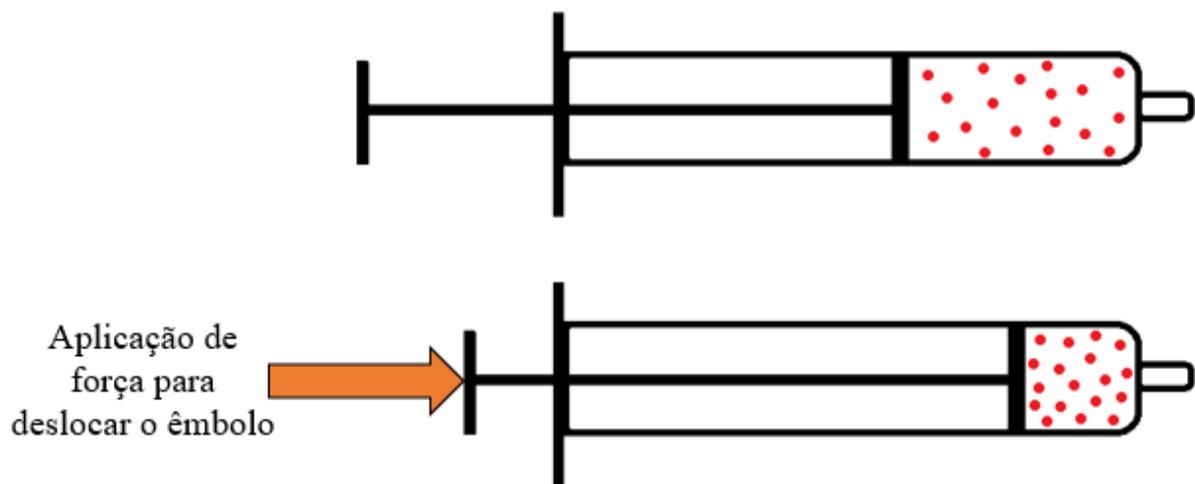
## 1.6 Trabalho (W)

Trabalho pode ser definido como um processo mais organizado e direcional de transferência de energia entre um sistema e sua vizinhança, atuando no sentido contrário da força que atua sobre o sistema (ou vice-versa). Portanto, o trabalho também é uma forma de transferência de energia, ocorrendo na fronteira do sistema. A causa desse processo é uma diferença de pressões entre sistema e vizinhança.

Um exemplo bastante prático e interessante de estudarmos é o de um gás em uma seringa com êmbolo móvel, conforme ilustrado na Figura 20. Ao se cobrir a ponta da seringa, e pressionar o pistão (à temperatura constante) para comprimir o gás em

seu interior (sistema), perceberemos que o volume interno irá diminuir, e haverá uma tendência no conjunto para que a seringa retorne à posição inicial. Isto ocorre porque a pressão interna do sistema irá aumentar (menos espaço com a mesma temperatura, leva a um maior número de choques com a parede do recipiente/seringa). Nesta situação, pode-se dizer que, durante o processo, o sistema (gás no interior da seringa) está sofrendo trabalho das vizinhanças.

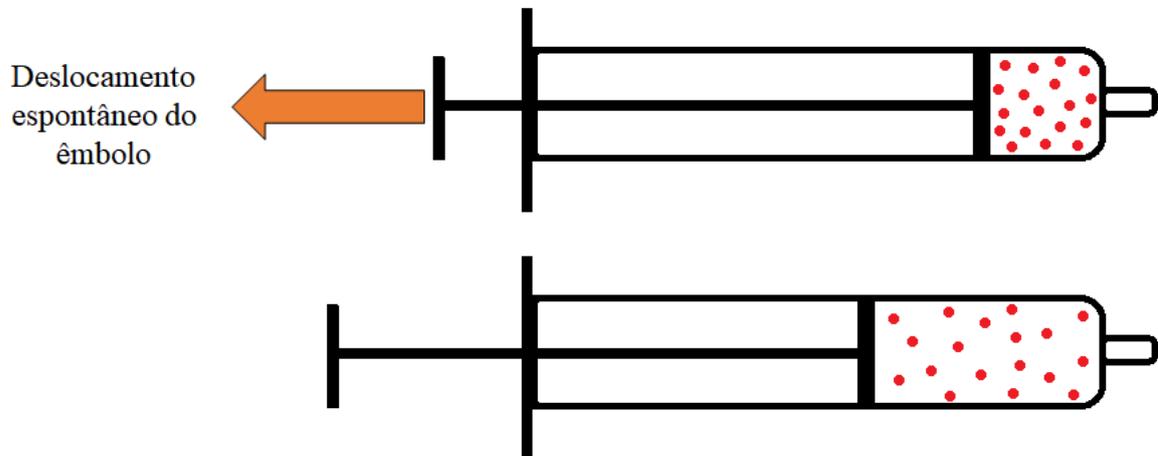
Figura 20 — Deslocamento do êmbolo de uma seringa fechada, devido à aplicação de uma força externa.



Fonte: o autor.

Ao se soltar o êmbolo, observa-se que este retorna para sua posição original, uma vez que o gás comprimido em seu interior (sistema) realiza trabalho sobre a seringa (vizinhança), conforme se observa na Figura 21, a qual demonstra o retorno do êmbolo da seringa à sua posição original, uma vez que a força externa deixou de atuar. Tal deslocamento ocorre para igualar a pressão interna à pressão externa da seringa. Neste caso, podemos afirmar que o sistema realizou trabalho sobre a vizinhança.

Figura 21 — O êmbolo de uma seringa retorna à sua posição original, após deixar de atuar uma pressão externa sobre a seringa.



Fonte: o autor.

Com este simples exemplo, podemos perceber que o Trabalho só existe enquanto há o deslocamento do êmbolo da seringa, seja quando forçado para comprimir ou quando solto para retornar à posição original. Logo, o trabalho só existe no processo.

### 1.7 Energia interna (U)

Inicialmente, precisamos definir o que vem a ser energia. Para tanto, em nossas aulas costumamos dizer que “a energia de um sistema é a sua capacidade de realizar trabalho” (ATKINS; PAULA, 2016 p. 65). Em vista dos nossos estudos, concluímos que todos os corpos possuem energia. Assim, poderíamos também entender energia como sendo a capacidade de um corpo para transferir energia térmica na forma do processo calor.

A energia interna de um sistema químico corresponde ao conteúdo total de energia contida nesse sistema. Todas as formas de energia existente em um sistema, ou seja, o somatório de energias provenientes do movimento das partículas (energia cinética), energia vibracional, rotacional, potencial, energia das ligações químicas, das interações subatômicas, das interações intermoleculares, das diversas formas de movimento, entre outras. Essa energia total que pode ser transferida através dos processos calor ou trabalho durante a ocorrência de uma transformação no sistema.

Segundo Monk (2004), a energia total de um corpo (também chamada de energia interna) pode sofrer alterações, e está nele “aprisionada” de três maneiras distintas: a) através da força interna dos átomos (energia nuclear, em grande quantidade, que pode ser liberada por rompimento do núcleo); b) através das energias químicas de ligação intermoleculares e interatômicas; c) energia potencial relativa aos modos vibracional, rotacional e translacional dos átomos da substância (esta energia é quantizada). É preciso enfatizar que o valor absoluto desta energia total não é conhecido, mas apenas pode-se medir suas variações ao longo dos processos. Para isto, temos a representação:

$$\Delta U = U - U_0 \quad (3)$$

Onde  $\Delta U$  é à variação de energia interna, dada pela diferença de energia entre o estado final (U) e o estado inicial ( $U_0$ ).

A energia interna de um sistema pode aumentar caso ele sofra calor ou trabalho da vizinhança. Dessa forma, haverá transferência de energia para as partículas do sistema, o que pode ser constatado pela observação do aumento de temperatura e/ou pressão do sistema. De maneira análoga, e contrária, caso um sistema realize calor ou trabalho para a vizinhança sua energia interna diminuirá e, conseqüentemente, poderemos perceber a diminuição da temperatura ou da pressão do sistema.

As unidades de medida de energia mais comuns são caloria (cal) e Joule (J), sendo esta última a unidade padrão do Sistema Internacional. Comumente são encontradas múltiplos das unidades, tais como kcal, kJ, MJ. É importante ressaltar que estas mesmas unidades são utilizadas para calor e trabalho. Do mesmo modo, quando falamos em consumo de energia elétrica, energia mecânica, energia química, energia nuclear ou energia térmica é preciso saber que se tratam de manifestações distintas (causas diferentes) da mesma entidade física (energia).

Os termos calorias (cal) ou quilocaloria (kcal) podem ser facilmente encontrados nas embalagens de alimentos consumidos diariamente pelas pessoas. Nessas embalagens, é possível encontrar a descrição dos valores nutricionais daquele produto para uma dieta nutricional diária geralmente de 2.000 kcal. Poderíamos, portanto, supor que este valor seria o necessário para a manutenção energética média diária de um ser humano, para o período de um dia (24 horas).

Evidentemente, este valor deve variar conforme a idade, a prática de atividades físicas, o metabolismo do organismo, dentre outras variáveis.

Assim, supondo um valor médio de energia equivalente a 2.000 kcal para a sobrevivência diária, poderíamos fazer a conversão deste valor para kJ (sabendo que 1 cal = 4,184 J), e experimentar converter para outras formas de energia, apenas para conhecer a sua equivalência. Neste caso, teremos o valor energético de 8.368 kJ para média diária de necessidade energética de um ser humano. O Quadro 2 a seguir contém a ilustração de alguns exemplos, com quantidades equivalentes a este mesmo valor energético.

Quadro 2 — Equivalência energética referente à necessidade humana para um dia.

Exemplo	Equivalência
Lâmpada incandescente de 100 W	Cerca de 23 horas de funcionamento
Lâmpada de LED de 15 W	Funcionamento por um período aproximado de 6,5 dias
Chuveiro caseiro, na posição “verão” (aproximadamente 2200 W)	Banho de aproximadamente 1 hora e 3 min.
Objeto de 100 kg	Utilizando-se 8.368 kJ na forma de trabalho, este objeto pode ser erguido a uma altura de, aproximadamente, 8,5 m.
Etanol ( $\Delta H_{\text{comb.}} = 1368 \text{ kJ/mol}$ ) <sup>6</sup>	Combustão de cerca de 6,1 mol (280,6 g) de etanol.
Fissão do $U^{235}$ ( $2,1 \times 10^{10} \text{ kJ/mol}$ ) <sup>7</sup>	Decaimento radioativo de aproximadamente 93,6 $\mu\text{g}$ de $U^{235}$ .

Fonte: o autor.

Para exemplificar como os cálculos da tabela 1 foram feitos, será mostrada a seguir a determinação do tempo que uma lâmpada LED ficaria acesa com esta mesma quantidade de energia. Para tanto, é preciso conhecer o valor da potência elétrica, à

<sup>6</sup> Atkins e Paula (2018, p. 456)

<sup>7</sup> Valor obtido a partir da equação  $E=mc^2$ .

qual está associado o seu funcionamento. Este valor é medido em *watt* (W), que equivale a 1 J/s (um Joule por segundo), e geralmente vem descrita em seu manual de uso ou em alguma etiqueta afixada no produto.

Para este cálculo, foi utilizada a expressão (4), em que o termo *Pot* corresponde à potência de operação do aparelho (neste caso, 15 W). O termo *w* é a energia na forma de trabalho, a qual vamos associar à média diária da necessidade humana, ou seja, 8368 kJ (que deverá ser multiplicado por  $10^3$ , a fim de se converter para J) e o termo  $\Delta t$  a variação de tempo em que ocorre o funcionamento da lâmpada.

$$Pot = \frac{w}{\Delta t} \quad (4)$$

$$15 = \frac{8368 \cdot 10^3}{\Delta t}$$

$$\Delta t = 557,9 \cdot 10^3 \text{ s}$$

Como 1 hora apresenta 3600 segundos, temos que o valor de  $\Delta t$  acima equivale a quase 155 horas (aproximadamente 6,5 dias).

Agora, vamos fazer algumas hipóteses de obtenção para o mesmo valor energético médio diário para uma pessoa (8368 kJ) que não fosse através da alimentação, mas por meio da rede elétrica. Obviamente, os exemplos a seguir são imaginários e possuem apenas efeito didático e comparativo entre as formas de energia, não podendo ser reproduzidos em hipótese alguma.

Se estivesse conectado a um carregador de celular comum, via conexão USB, cuja saída elétrica fornece uma tensão de 5,0 V e corrente de 1,55 A, por exemplo, quanto tempo levaria para uma pessoa obter a energia média necessária para um dia de sobrevivência? A demonstração dos cálculos é apresentada a seguir. Para tanto, precisamos da expressão (05), que corresponde à potência elétrica ( $Pot_{el.}$ ).

$$Pot_{el.} = V \cdot i \quad (5)$$

Nessa equação, o termo *V* é a tensão de operação do aparelho (5 V) e o termo *i* a corrente elétrica (1,55 A). Igualando esta expressão com a equação 4, temos:

$$V \cdot i = \frac{w}{\Delta t}$$

$$5,0 \cdot 1,55 = \frac{8368 \cdot 10^3}{\Delta t}$$

$$\Delta t \cong 1,08 \cdot 10^6 \text{ s} \quad \therefore \quad \Delta t \cong 300 \text{ h}$$

É interessante notar que este tempo de carga (cerca de 12,5 dias) seria para se obter a mesma energia necessária para o consumo médio de um dia para uma pessoa. De forma análoga, e utilizando agora como exemplo uma tomada doméstica comum, cujo valor de tensão seja de 127 V, e supondo o mesmo valor de corrente elétrica (1,55 A), temos que para se obter o mesmo valor energético, o tempo conectado à rede seria de aproximadamente 11,8 horas.

Vamos imaginar agora uma residência com quatro moradores, que apresentem alguns aparelhos elétricos comuns, para uso em seu dia-a-dia. Para calcularmos o consumo de energia elétrica da suposta residência, é preciso saber que a conta enviada mensalmente pela concessionária de energia considera para este fim o número total de kwh/mês (quilowatt hora por mês) consumidos. Assim, a Tabela 4 a seguir indica alguns aparelhos elétricos da suposta residência e o tempo de uso semanal e mensal de cada, para determinação do valor de kWh/mês de cada aparelho.

Tabela 4 — Aparelhos comuns em uma residência (valores de potência e tempo de uso aproximados).

<b>Aparelhos</b>	<b>Potência aproximada (valor total)</b>	<b>Tempo de uso semanal (horas)</b>	<b>Tempo de uso mensal (horas)</b>	<b>KWh/mês</b>
Geladeira simples	250 W	90	360	90
Aparelho de TV LED 40'	100 W	35	140	14
Computador	300 W	30	120	36
10 Lâmpadas fluorescentes de 15 W	150 W	20	80	12
Lavadora de roupas	1000 W	6	24	24

Chuveiro elétrico (supondo uso diário de 15 min por cada pessoa, com uso na posição “inverno”)	5500 W	7	28	154
2 ventiladores (150 W cada)	300 W	28	112	33,6
Ferro de passar roupa	1000 W	3	12	12
6 aparelhos de baixo consumo (por exemplo, carregadores de celular, sintonizador de TV, rádio-relógio, etc.)	30 W	84	336	10,1
<b>TOTAL</b>				<b>385,7</b>

Fonte: o autor.

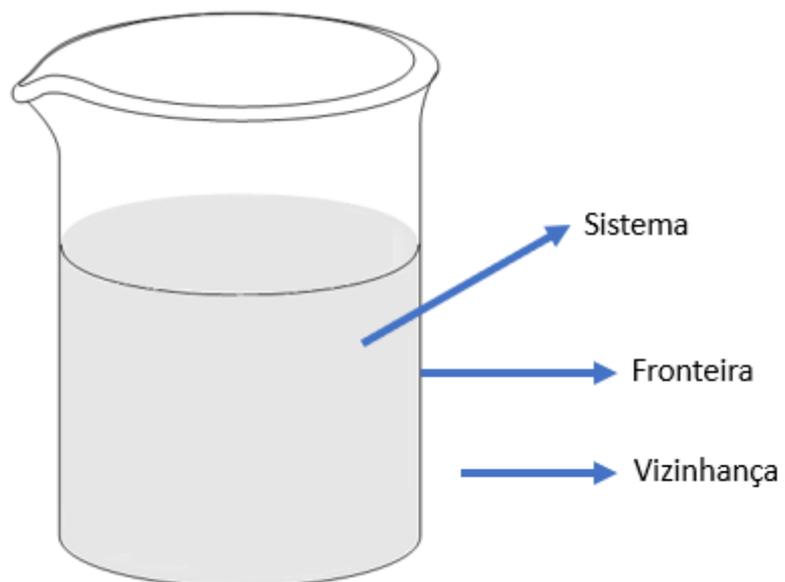
Cabe ressaltar que os aparelhos da tabela 3, bem como o tempo de uso de cada, tem seus valores supostos. O uso dessas informações é meramente didático, com a finalidade de exemplificar o consumo elétrico de uma residência. A observação dos valores calculados na tabela 4 chama atenção para uma dúvida bastante comum: de onde vem a energia que utilizamos no nosso dia-a-dia? Vários trabalhos têm sido desenvolvidos em nossas escolas a respeito desse questionamento, e é recorrente a realização de pesquisas escolares (feitas pelos alunos) no sentido de descrever as fontes energéticas mais comuns no nosso país. Este assunto geralmente desperta muito a curiosidade dos estudantes, que também utilizam bastante os recursos elétricos/eletrônicos em seu cotidiano.

## CAPÍTULO 2: PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Todos os processos de troca de energia que ocorrem em um sistema em contato com sua vizinhança são governados por algumas leis naturais, chamadas de leis da Termodinâmica. Também conhecida como Lei da Conservação da Energia, a primeira Lei da Termodinâmica estabelece que, em processos termodinâmicos, a energia não pode ser criada ou destruída, mas pode ser transferida de um sistema para outro, ou para a vizinhança, de tal forma que a energia do Universo se conserva. Esta transferência de energia pode ocorrer na forma de calor ou trabalho.

Durante a ocorrência de um processo termodinâmico ocorre variação da energia interna do sistema em estudo, sendo que este sistema pode aumentar ou diminuir sua energia interna, conforme o processo. Esta troca de energia (na forma de calor e/ou trabalho) ocorre através da fronteira do sistema com a vizinhança. Vamos imaginar um experimento ocorrendo no interior de um béquer, como mostrado na Figura 22, em que haja liberação de energia (aquecimento espontâneo do sistema).

Figura 22 — Béquer ilustrando uma mistura reacional, evidenciando sistema, fronteira e vizinhança.



Fonte: o autor.

A energia liberada no sistema em decorrência da reação química, será transferida na forma de calor para a vizinhança do béquer, através da fronteira entre eles. Como a energia do sistema foi “perdida” para a vizinhança, temos que, ao final

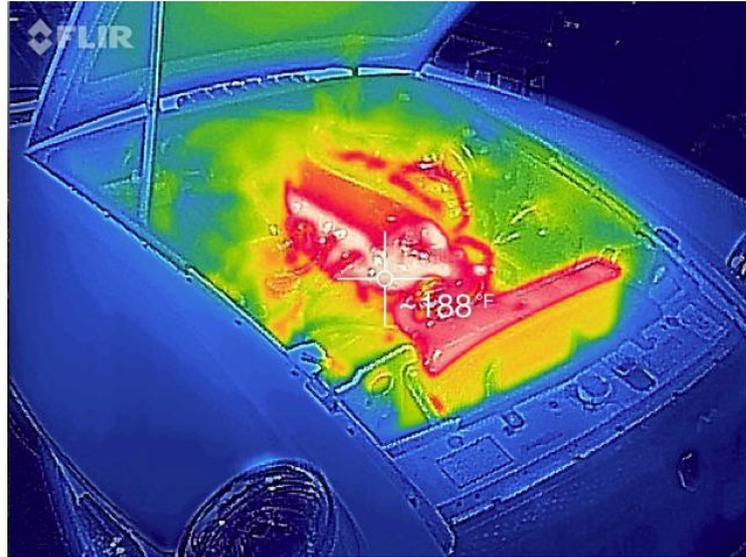
do processo, a energia interna deste sistema terá diminuído. É importante aqui destacar uma concepção que muitas vezes carece de ser apresentada nas nossas aulas de termoquímica do Ensino Médio: esta energia não foi destruída, mas transferida. Enquanto a energia total (energia interna) do sistema diminui, a energia total da vizinhança irá aumentar. De tal modo, que a variação total de energia interna do universo pode ser dada por:

$$\Delta U_{universo} = \Delta U_{sistema} + \Delta U_{vizinhança} \quad (6)$$

No exemplo da Figura 20, sistema e vizinhança irão trocar energia na forma de calor, enquanto houver diferença de temperatura entre sistema e vizinhança. Quando as temperaturas se igualarem, e não houver mais trocas energéticas (na forma de calor ou trabalho), de tal modo que a energia “perdida” pelo sistema é transferida para a vizinhança. Assim, devido ao Princípio de Conservação da Energia (Primeira Lei), o resultado da equação 6 é zero. Podemos concluir ainda que o conjunto sistema + vizinhança tornou-se um sistema isolado.

Exemplo semelhante pode ser pensado ao se observar um carro em funcionamento. Sabemos que o trabalho de deslocamento que o veículo desenvolve é impulsionado pelo motor mecânico que ele possui. Nesse motor ocorrem reações de combustão, as quais promovem liberação de energia que estava acumulada nas ligações químicas das substâncias que compõem o combustível. Esta energia é responsável pelo funcionamento do motor e movimento do carro (trabalho), bem como pelo seu aquecimento e das peças que estão ao seu redor (calor), conforme pode ser observado na Figura 23. Nessa figura, é possível observar que a parte do motor em que ocorre maior aquecimento (marcada na imagem com +88°F) não é a única a se aquecer.

Figura 23 — Fotografia térmica do motor de um carro em funcionamento.

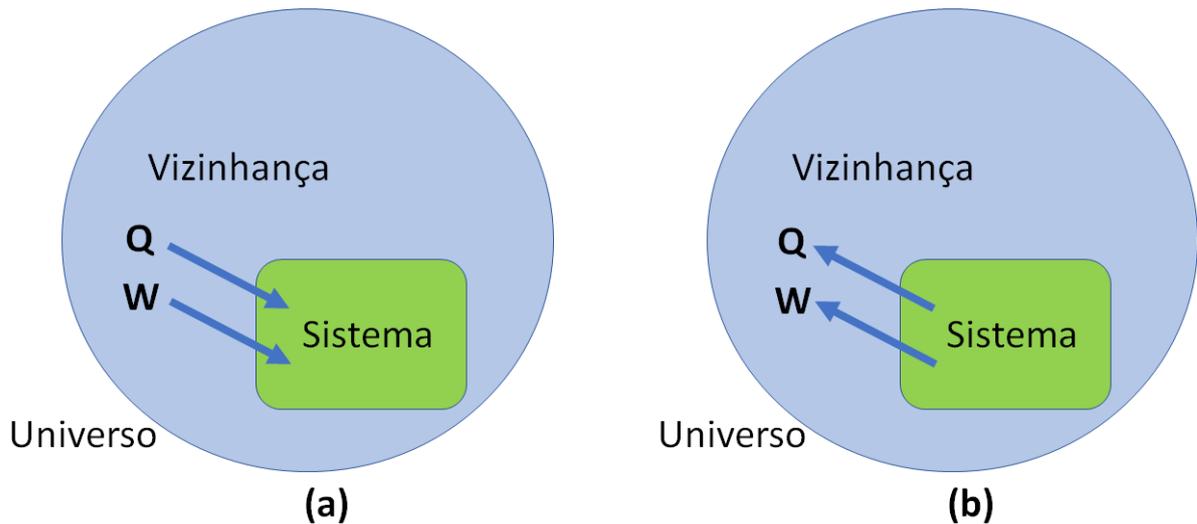


Fonte: <[https://www.mgexp.com/phile/1/425845/Engine\\_Bay\\_1.jpg](https://www.mgexp.com/phile/1/425845/Engine_Bay_1.jpg)>. Acesso em 20/03/2021.

Como vemos, ao ocorrer a combustão no interior do motor, grande quantidade de energia térmica produzida é utilizada tanto para a realização de trabalho quanto para o aquecimento das peças do motor e peças ao seu redor (neste caso, devido à dispersão de energia). Esta energia proveniente da reação de combustão era parte constituinte da energia total (energia interna) das moléculas presentes no combustível e no gás oxigênio (reagentes da combustão). Não é possível determinar o quanto de energia havia antes da ocorrência do processo, e o quanto permaneceu nos produtos da reação após a combustão. Entretanto, a quantidade de energia proveniente da reação química (entalpia de combustão) e disponível para realização de trabalho e calor corresponde a esta diminuição da energia interna dos reagentes da combustão (MONK, 2004).

A Figura 24 (a) ilustra a realização de calor e trabalho da vizinhança sobre o sistema, o que promoverá um aumento na energia interna do sistema. Já na situação evidenciada na Figura 22 (b), temos que ocorre realização de calor e trabalho do sistema sobre a vizinhança, havendo, portanto, uma diminuição na energia interna do sistema.

Figura 24 — Trocas de energia através do processo calor e do processo trabalho.



Fonte: o autor.

## 2.1 Fontes de energia elétrica

Como já foi mencionado, o desenvolvimento da humanidade está atrelado ao uso cada vez crescente de energia em seu cotidiano. A energia é necessária para construir, produzir, crescer, desenvolver, alimentar, sobreviver. Nos últimos anos, a humanidade tem sentido intensamente os efeitos do agravamento do aquecimento global, como o aumento da temperatura média dos oceanos e mudanças climáticas em diversas partes do mundo.

Em vista de alavancar o desenvolvimento da humanidade, foi necessário o advento de diversas tecnologias, tais como as máquinas a vapor (a partir do séc. XVII), para a industrialização. Entretanto, o uso cada vez mais crescente de combustíveis fósseis preocupa diversos grupos da sociedade em relação ao custo ambiental que está sendo cobrado da natureza.

Atualmente, a eletricidade tem se apresentado cada vez mais presente no dia-a-dia das pessoas, inclusive se colocado como substituinte dos combustíveis fósseis em várias situações cotidianas, como em fogões e fornos elétricos, aquecimento doméstico (em países frios) e o advento de carros elétricos. É muito comum também nas indústrias encontrarmos motores elétricos sendo utilizados em substituição às máquinas térmicas. Entretanto, apesar dos grandes avanços que já foram alcançados

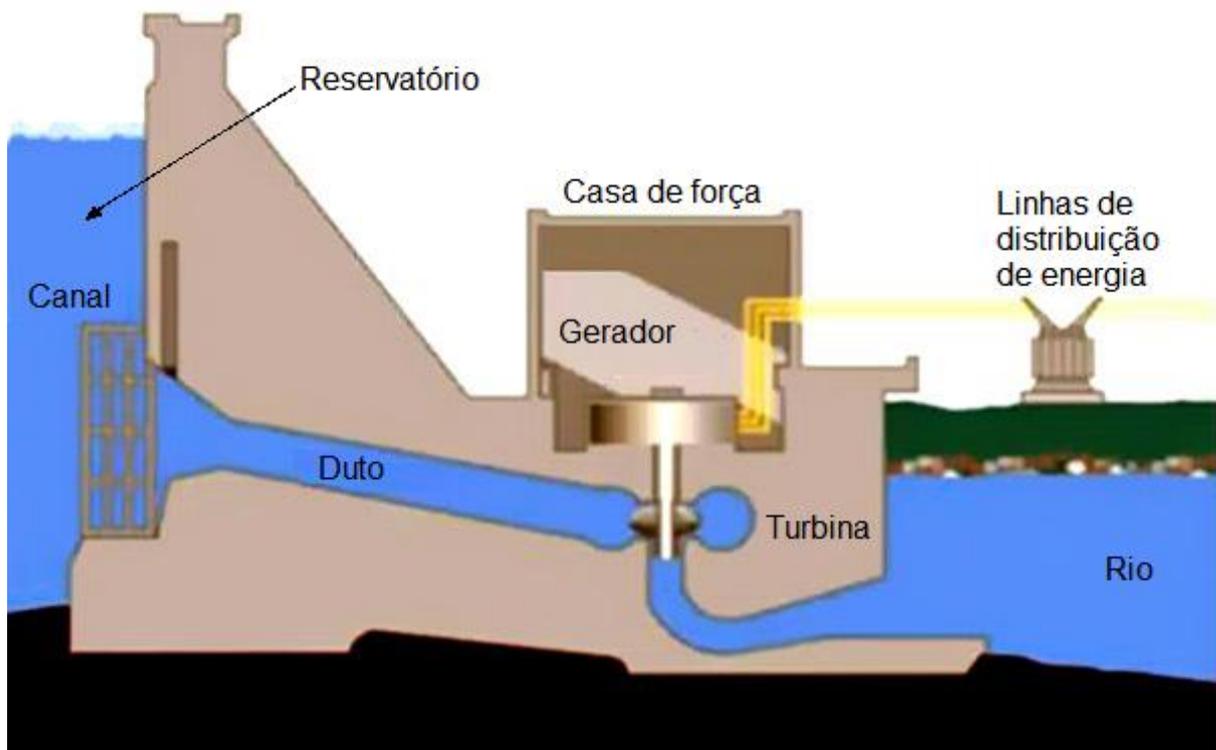
para minimizar a poluição advinda dessas fontes, parte da geração da energia elétrica acaba por ainda utilizar fontes não renováveis de energia.

A seguir, apresentamos brevemente algumas fontes de geração de energia elétrica, com algumas de suas vantagens e desvantagens, tal como poderia ser trabalhado em sala de aula.

### 3.1.1 Energia hidrelétrica:

A energia hidrelétrica utiliza a energia potencial de passagem das águas para movimentar um gerador elétrico. Geralmente é necessário que haja uma grande represa, com uma grande área alagada para elevar o nível da água em um dos lados, e aproveitar o movimento de transferência da água de um lado para o outro. Com isso, uma turbina é rotacionada, sendo o movimento transmitido para um gerador que irá transformar o seu trabalho em energia elétrica, conforme se observa na Figura 25.

Figura 25 — Esquema de uma usina hidrelétrica.



Fonte: adaptado de <<http://4.bp.blogspot.com/-if35V9CXUSk/VljCaShJZaI/AAAAAAAAACec/rSG8nirbdeY/s1600/Energi31.jpg>>. Acesso em: 29/01/2020.

Segundo informações do Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020<sup>8</sup> (AEEE, 2020) divulgado pelo Governo Federal, o Brasil ocupa lugar de destaque no cenário internacional de geração de energia hidrelétrica, apresentando uma produção de 367 Twh/ano<sup>9</sup> em 2017, sendo o 3º maior produtor. Entretanto, este valor corresponde a 9,3% de toda geração hidrelétrica mundial. A China gera pouco mais do que o triplo do Brasil (1.134 Twh/ano), sendo a maior produtora mundial, com uma participação de 28,6%.

Vantagens: é de baixo custo operacional (comparado a outras matrizes energéticas), possui fonte renovável, e apresenta grande potencial de uso no Brasil, que apresenta grande riqueza hídrica natural.

Desvantagens: necessita de grandes áreas para alocação das represas, sendo necessário em vários casos o deslocamento de comunidades instaladas, com impactos ambientais locais de fauna e flora, além de alterar a paisagem.

### **2.1.2 Energia eólica:**

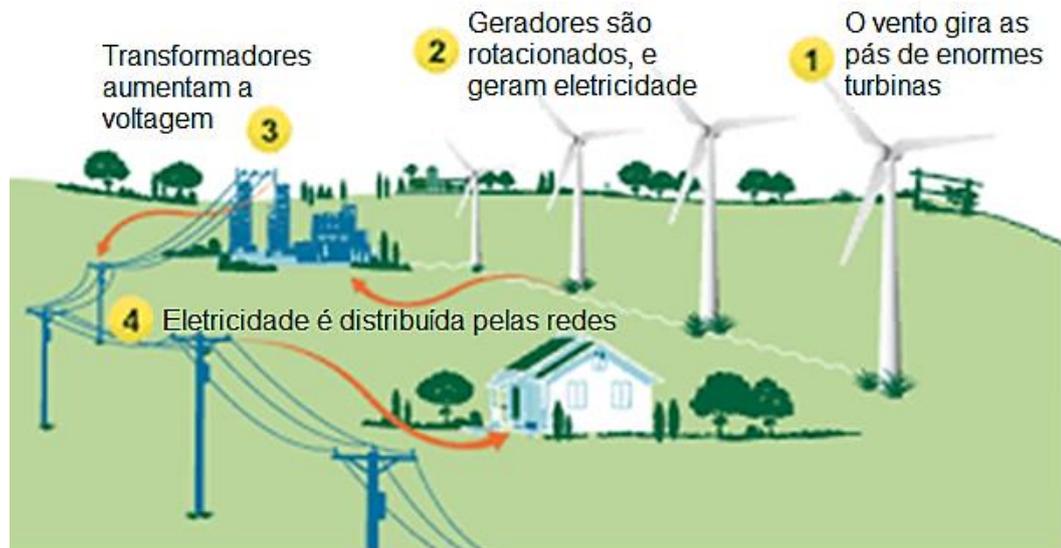
Utiliza a energia de movimento dos ventos para girar as hélices de gigantesco aerogeradores, que transmitirão esse movimento para um gerador, o qual fará a transformação para energia elétrica. Geralmente estão localizados em regiões que apresentem este recurso natural a maior parte do ano. A Figura 26 é uma ilustração para entender o esquema de geração e distribuição de energia eólica.

---

<sup>8</sup> Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202020.pdf>>. Acesso em: 20/04/2020.

<sup>9</sup> 1 Twh = 10<sup>9</sup> Kwh

Figura 26 — Esquema de geração e distribuição de energia eólica.



Fonte: adaptado de <[https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTk\\_rG1LDcLChhtAuwuPLspntuFg6eUsP6PGg&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTk_rG1LDcLChhtAuwuPLspntuFg6eUsP6PGg&usqp=CAU)>. Acesso em: 29/01/2021.

Dados do AEEE (2020) revelam um crescimento significativo da geração de energia eólica no cenário nacional, com um aumento de 15,5% entre os anos de 2018 e 2019. Entretanto, a participação dessa forma de geração de energia no cenário brasileiro ainda é discreta, correspondendo a apenas 9% da malha energética em 2019 (cerca de 56 Twh/ano). Existe uma tendência de aumento nos próximos anos.

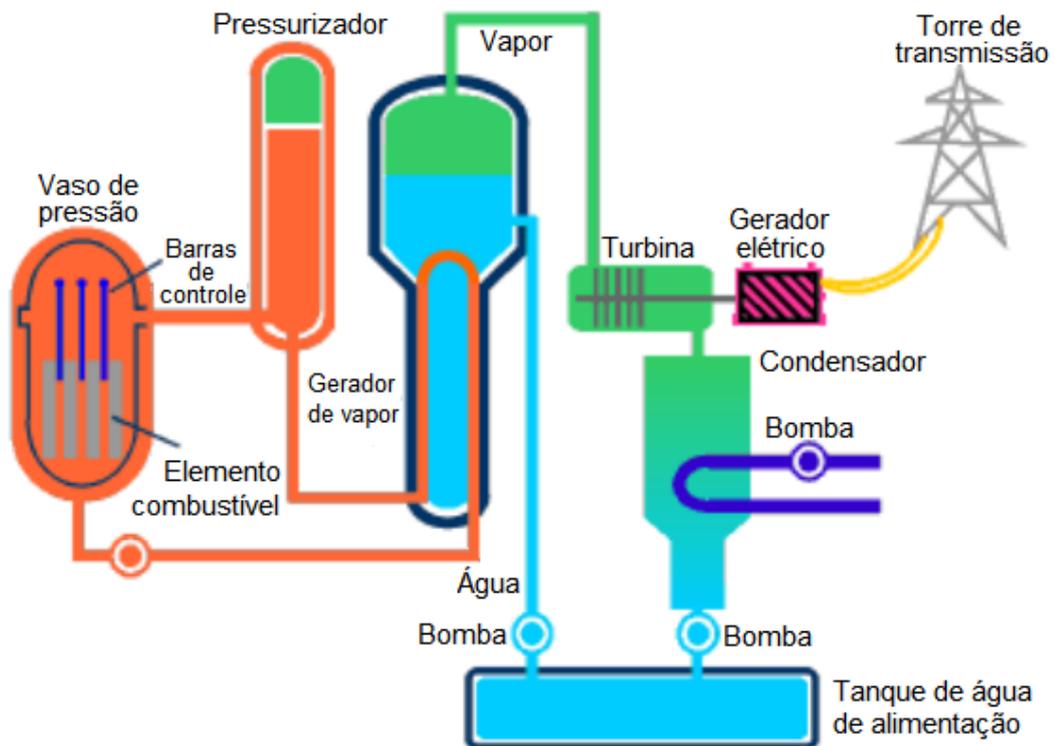
Vantagens: apresenta baixo custo operacional, sua fonte é renovável e apresenta baixo impacto ambiental, sendo compatível o compartilhamento do terreno com culturas agrícolas e pecuárias.

Desvantagens: produzem ruído, baixa produção energética comparada com as demais, apresentam restrição geográfica e podem interferir na rota de voo de aves migratórias.

### 2.1.3 Energia nuclear:

A partir da energia calorífica advinda da fissão nuclear de átomos de urânio, uma certa massa de água é aquecida e o seu vapor promove o movimento de um gerador elétrico, que realiza a conversão da energia. A Figura 27 ilustra um esquema de geração em usina nuclear.

Figura 27 — Esquema de uma usina nuclear.



Fonte: adaptado de CARDOSO, p. 15

A parte principal da usina consiste no reator nuclear, onde estão localizadas as varetas com urânio, que é o elemento combustível. A fissão nuclear do urânio aquece a água que passa pelo reator, a qual é conduzida para um sistema gerador de vapor, que faz uma troca de energia térmica entre a água do primeiro circuito e a água do sistema secundário. O vapor produzido nessa etapa é conduzido para a turbina, cujo movimento aciona um gerador elétrico. Posteriormente, o vapor passa por um condensador, que refrigera o vapor, fazendo com que a água retorne para o sistema. É preciso ressaltar que para controlar a reação de fissão nuclear são utilizadas barras de controle, feitas de substância que consegue absorver nêutrons (geralmente cádmio), a fim de minimizar ou interromper a reação, que ocorre em cadeia.

O AEEE (2020) informa que o maior produtor mundial de energia nuclear são os EUA, com uma geração de 805 Twh de energia em 2017, o que corresponde a quase um terço (32,4%) de toda geração nuclear do mundo. Em segundo lugar, encontra-se a França, com uma participação de 15,4%, e em 3º lugar a China, contribuindo com 9,4% da produção mundial. No Brasil, o cenário é de um uso bem

menor que a desses países, produzindo apenas 15 Twh em 2017, o que representa apenas 0,6% do cenário internacional, ocupando a 21<sup>o</sup> posição.

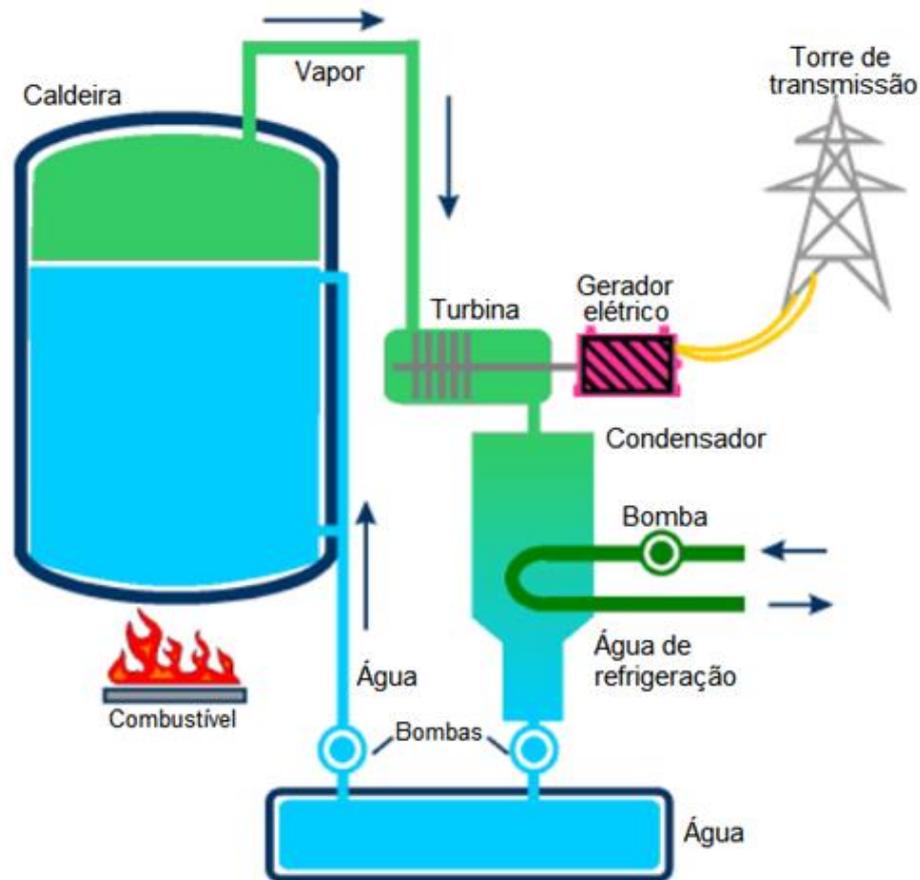
Vantagens: alta produção energética, sendo considerada uma energia “limpa”, uma vez que não forma gases agravantes do aquecimento global.

Desvantagens: alto custo, geração de resíduo radioativo (geralmente descartado em local ermo), risco de acidentes catastróficos.

#### **2.1.4 Energia termoelétrica:**

Utiliza a queima de carvão ativado, gás natural ou derivados do petróleo, que são combustíveis fósseis, para a produção de energia elétrica, a partir do aquecimento de uma certa quantidade de água. Conforme mostra a Figura 28, o vapor formado será responsável por movimentar uma turbina acoplada a um gerador, que transformará seu movimento em energia elétrica. Geralmente é utilizada para complementar outras fontes energéticas quando há um maior consumo de eletricidade.

Figura 28 — Esquema de uma usina termoelétrica.



Fonte: adaptado de CARDOSO, p.8.

Em 2019, no Brasil, cerca de 24,2% da energia nacional foi gerada a partir de termoelétricas. No ranking da ANEEL (2020) a respeito da geração elétrica a partir da produção térmica com uso de combustíveis fósseis, em 2017 a China ocupa a primeira posição, com 4.398 Twh/ano (28,1% de participação no cenário mundial). Em segundo lugar encontra-se os EUA (16,2%) e em 3º lugar a Índia (7,4%). O Brasil ocupava a 26ª posição, com uma participação de 0,6% da produção mundial.

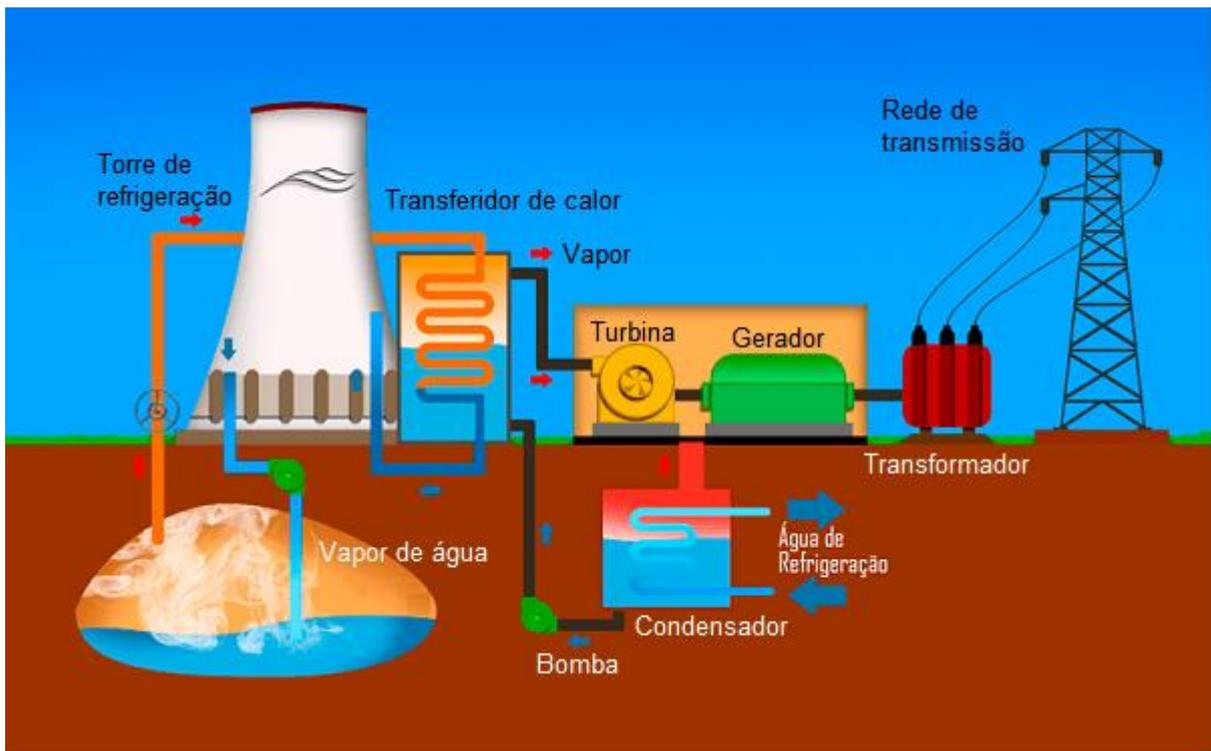
Vantagens: não depende de condições climáticas para a geração de energia, sendo geralmente utilizadas em locais que sejam pobres em recursos naturais (hídricos ou eólicos, por exemplo).

Desvantagens: são de alto custo, além de produzir gases agravantes do aquecimento global.

### 2.1.5 Energia geotérmica:

Esta forma de produção de eletricidade aproveita a alta temperatura do interior do planeta para aquecer uma amostra de água, cujo vapor formado é utilizado para movimentar um gerador elétrico. A Figura 29 ilustra uma instalação de usina geotérmica.

Figura 29 — Esquema de uma usina geotérmica.



Fonte: adaptado de <<https://2.bp.blogspot.com/-CqqFbEv-jWY/WxUZu8HHw4I/AAAAAAAAASJM/QS8WeDxbrRQYKVab-VGudhjXVaHqPd71QCLcBGAs/s640/energia-geotermica.png>>. Acesso em: 29/01/2021

Apesar de ser considerada uma “energia limpa”, devido à baixa ou quase nenhuma emissão de gases do efeito estufa, sua participação no cenário internacional é bem pequena, correspondendo a 0,3% em 2017 (AEEE, 2020). No Brasil, não há uma planta industrial para produção de energia geotermal.

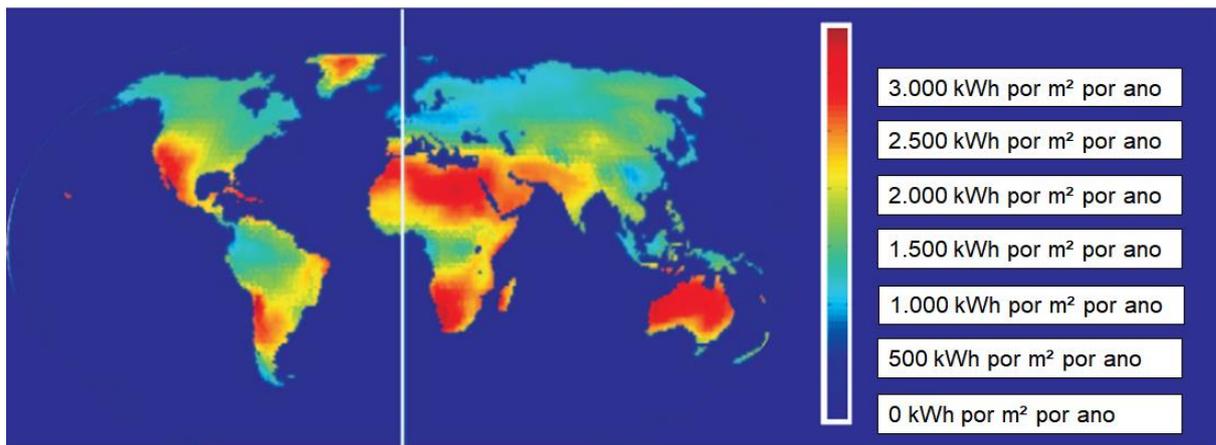
Vantagens: é considerada uma energia limpa, necessita de pouco espaço e pode abastecer locais isolados.

Desvantagens: de alto custo, pode ocorrer esgotamento do campo geotérmico, além de promover emissão de H<sub>2</sub>S.

### 2.1.6 Energia solar:

Utiliza a luz solar para transformação em energia térmica ou energia elétrica. Esta forma de conversão de energia está ganhando cada vez mais espaço na sociedade, principalmente devido à grande preocupação em se utilizar fontes renováveis de energia. Para tanto, é importante que a região onde se quer utilizar esta fonte energética apresente boa insolação solar durante o ano. A Figura 30 apresenta uma imagem com o mapeamento médio de incidência solar no planeta. As regiões marcadas em amarelo e vermelho indicam os locais com maior capacidade de utilização dessa forma de energia.

Figura 30 — Insolação média no mundo.



Fonte: adaptado de IEA, 2010 *apud* CEMIG, 2012, p.98.

É visível que o aproveitamento da energia solar tem ganhado cada vez mais espaço em nossa sociedade. Em muitos imóveis pelas cidades já encontramos com maior frequência reservatórios de água acoplados a placas de aquecimento, conforme mostrado na Figura 31 (a), bem como o uso de placas fotovoltaicas para a geração de energia elétrica, conforme mostrado na Figura 31 (b).

Figura 31 — Formas de transformação de energia solar.



Fontes: imagem (a) disponível em <<https://blog.energystore.com.br/wp-content/uploads/2018/09/quanto-custa-sistema-de-aquecimento-solar.jpg>>;  
imagem (b) disponível em: <<https://www.solenerg.com.br/wp-content/uploads/2016/12/fotovoltaica-600x372.jpg>>

No Brasil, a energia solar é bastante promissora. Em 2019, segundo o AEEE (2020), sua representatividade no cenário nacional ainda é bem discreto, com uma participação de 1,1% na malha energética nacional. Porém, de 2018 para 2019 houve um aumento de 92,1% na quantidade de energia elétrica gerada a partir desta fonte.

Vantagens: é uma energia limpa, não há produção de gases e praticamente não requer manutenção rotineira do sistema.

Desvantagens: apresenta alto custo de investimento inicial, é intermitente (produz enquanto há presença da luz solar, variando a taxa de produção de acordo com o ângulo de incidência da radiação solar).

## 2.2 Situação energética atual

O domínio humano sobre a produção e o uso da energia a seu favor promoveram a transformação da sociedade para um patamar muito mais evoluído. Seja desde o domínio sobre a produção do fogo (ainda na pré-história), sobre o uso das máquinas térmicas, na conquista do espaço ou no avanço tecnológico sobre os computadores e robôs, a energia tem e terá um papel fundamental.

Segundo dados do AEEE (2020), o maior consumidor de energia elétrica do mundo é a China, que em 2017 foi responsável por 26,6% de todo consumo mundial (5.935 Twa). Além de consumir bastante, a China também registou um significativo aumento de 6,6% entre 2016 e 2017. Em segundo lugar encontra-se os EUA (17,3%), e em 3º lugar a Índia (5,3%). Nesse ranking, o Brasil ocupa a 7ª posição, tendo uma participação de 2,3% (516 Twh) no cenário internacional.

Como sabemos, há uma demanda muito grande (e crescente) de energia. Segundo ABRUÑA, 2013, o crescimento da necessidade energética da humanidade será muito maior em 2050, e ainda utilizamos os combustíveis fósseis como principal fonte energética. Entretanto, estas fontes são limitadas e irão diminuir ao longo dos anos (principalmente o petróleo), fazendo com que a humanidade seja obrigada a encontrar outras fontes de energia. Além disso, estas fontes energéticas fósseis são responsáveis por grandes emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, promovendo o agravamento do aquecimento global, como já mencionado anteriormente.

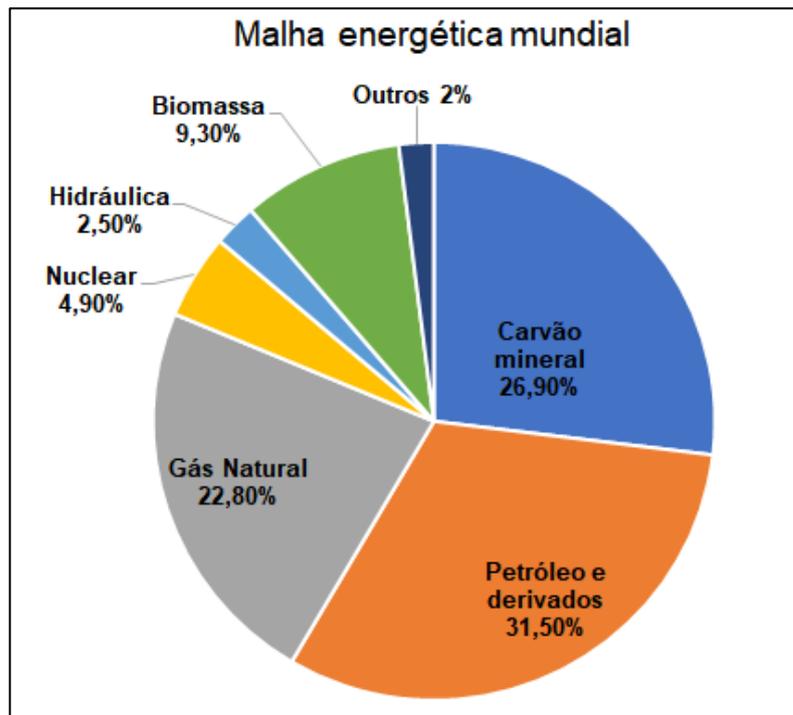
Apesar do grande esforço internacional para elevar a preocupação dos países em relação ao uso de fontes energéticas não renováveis, o que se observa atualmente é que, em escala mundial, a humanidade ainda utiliza como principais fontes energéticas o petróleo (31,5%), o carvão mineral (26,9%) e o gás natural (22,8%). Estes dados são de 2018 e divulgados pela *International Energy Agency* (IEA), publicados em sua página oficial e replicados pela Empresa de Pesquisa Energética, do governo brasileiro<sup>10</sup>.

O gráfico da Figura 32 revela que mais de 80% das fontes energéticas utilizadas no planeta são de combustíveis fósseis.

---

<sup>10</sup> Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 30/01/2021.

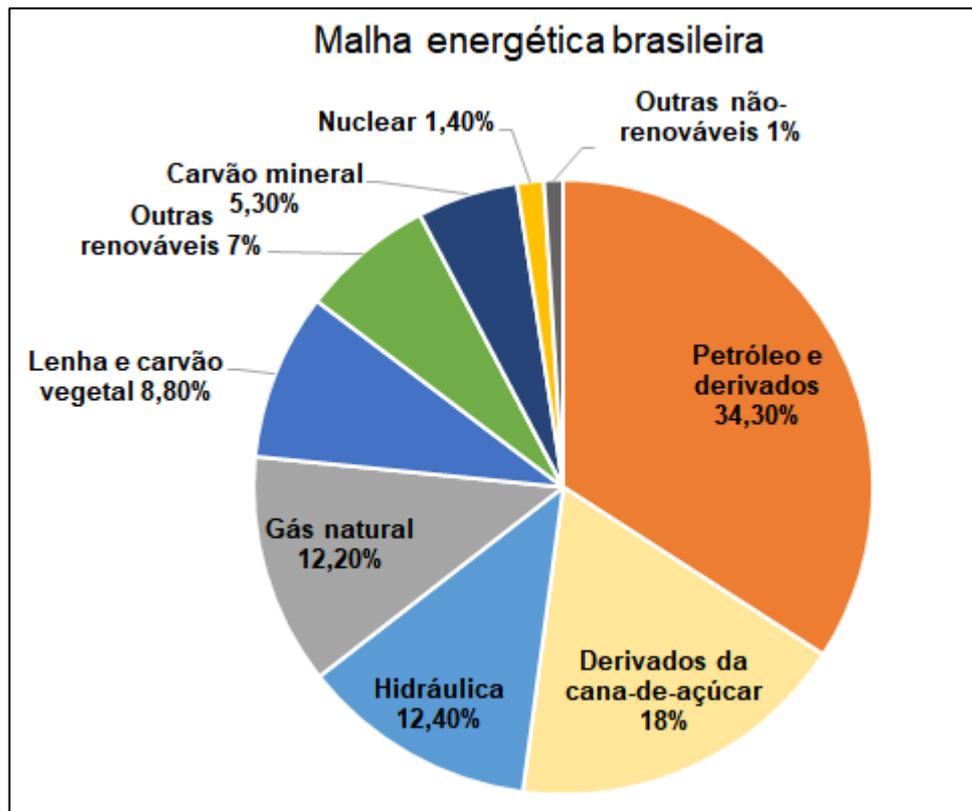
Figura 32 — Gráfico com dados divulgados pela IEA que mostram as principais fontes energéticas utilizadas no planeta.



Fonte: adaptado de <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 30/01/2021.

Ao observarmos a situação brasileira, vemos que utilizamos petróleo e seus derivados em uma quantidade acima da média mundial (quase 3 pontos percentuais acima). Entretanto, o uso de gás natural e carvão mineral são bem inferiores ao observado na escala global. O uso das chamadas fontes renováveis vem ganhando cada vez mais espaço na sociedade brasileira, que há décadas vem utilizando, por exemplo, a cana-de-açúcar como matéria prima para produção de etanol. Evidentemente ainda há um longo caminho para se percorrer no sentido de substituir os combustíveis fósseis em nossa malha energética. A Figura 33 mostra a situação da malha energética brasileira.

Figura 33 — Gráfico com dados divulgados pela IEA que mostram as principais fontes energéticas utilizadas no Brasil.



Fonte: adaptado de <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 30/01/2021.

Além da demanda mundial por substituição das fontes energéticas danosas ao ambiente, segundo ABRUÑA, 2013, é necessário que haja uma substituição tecnológica de alguns utensílios, aparelhos e tecnologias de motores para que a eficiência energética destes produtos seja melhor aproveitada. Um exemplo citado é o da lâmpada incandescente, que é capaz de converter apenas 2% da energia utilizada em luz (o restante se dissipa por aquecimento). Outro é de um motor veicular (à gasolina), que costuma ter um aproveitamento máximo de 25%, enquanto uma célula de combustível, que converte energia química em energia elétrica, pode ter eficiência em torno de 90%.

Para uma transformação mais consciente da nossa realidade de busca energética, é necessário também uma mudança de mentalidade das pessoas e de adaptações de suas rotinas. As escolhas que fazemos ao comprar um determinado produto, possuidor de uma tecnologia energeticamente mais eficaz, ou ao escolher um determinado combustível para um veículo híbrido ou que tenha motor *flex* será

responsável por transformações mais profundas em nossa realidade. O relato de Aerts; True (2006) é bastante interessante neste sentido.

A decisão de reformar um rancho, descrita em Aerts; True (2006), mostra a importância de adaptarmos as nossas escolhas tecnológicas diárias para que nossa residência tenha maior eficácia energética. A projeção do telhado, por exemplo, permite reter o excesso de luz solar direta durante o verão e permite uma maior incidência solar durante os dias de inverno. Além disso, foram instalados painéis solares para aquecimento da água utilizada. Este sistema, que inclusive começa a ser muito visto nas cidades brasileiras, não apresenta um custo tão elevado de instalação e o retorno do investimento ocorre em um prazo menor do que a instalação de painéis fotovoltaicos.

O uso da energia solar para geração de energia elétrica é bastante inspirador, e precisa ser melhor divulgado, bem como o seu custo minimizado, a fim de ampliar seu uso. Em vista do tempo de existência que ainda terá, e comparando com a existência humana, podemos dizer que o Sol é uma fonte de energia praticamente inesgotável. Assim disse Thomas Edison para Henry Ford e Harvey Firestone, em 1931 (QUOTED *in* NEWTON, 1987 *apud* ABRUÑA, 2013 p.1412, tradução nossa).

Eu apostaria no sol e na energia solar. Que fonte de poder!  
Espero que não tenhamos que esperar até que o petróleo e o  
carvão acabem antes de resolver isso.

Assim, é importante que as preocupações referentes ao futuro da humanidade também permeiem as discussões em sala de aula, para que os alunos possam questionar sua realidade e adequarem seu dia-a-dia a opções de menor custo ambiental e maior eficiência energética.

### **2.3 Questões Propostas**

Neste momento, serão apresentados alguns questionamentos interessantes a respeito de observações realizadas no dia-a-dia, cuja explicação se baseia na Primeira Lei da Termodinâmica, ou em seus fundamentos. As questões foram adaptadas de discussões feitas por Monk (2004).

### 2.3.1 Por que a água no topo de uma cachoeira é mais fria do que a água em sua base?

Esta interessante questão foi observada e estudada por Joule. Apesar de ser sua lua de mel, Joule utilizou seu “tempo livre” para medir as diferenças de temperatura entre as partes superior e inferior de longas cachoeiras na Suíça. Ele conseguiu determinar que a cada 249 m de queda livre da água, haveria um aumento de 1 °F da temperatura da água.

Para explicar suas observações, Joule disse que isso não seria explicado pelo fato de o ar atmosférico ser “mais frio” no topo da cachoeira, ou devido ao atrito da água nas rochas. Ele atribuiu este aumento de temperatura à mudança na energia interna da água, simplesmente porque a água estaria mudando sua altitude.

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (7)$$

onde  $m$  é a massa,  $g$  é a aceleração devido à gravidade e  $h$  a altura em que se encontra o objeto. Ao descer pela cachoeira, a energia potencial da água diminui, sendo tal energia convertida em cinética, promovendo aumento de temperatura. Assim, e como fez em outros experimentos, Joule associou este fato ao trabalho termodinâmico, que é energeticamente equivalente ao abaixamento ou levantamento de um peso (como a água da cachoeira).

### 2.3.2 Por que um alimento fica quente quando colocado em um forno?

Poderíamos responder de forma óbvia, dizendo que a energia térmica é irradiada a partir da reação de combustão que ocorre em seu interior, aumentando a temperatura do alimento que foi nele colocado, alcançando um equilíbrio térmico a partir da Lei Zero da Termodinâmica. Devido à elevação de sua temperatura, podemos afirmar que haverá um aumento na energia interna do alimento.

Em termos termodinâmicos, temos que a energia interna ( $U$ ) sofre alterações em resposta a duas variáveis: trabalho calor. O aumento ou a diminuição na energia interna de um sistema ocorre de acordo com a soma nas mudanças de valores entre o calor sofrido ou realizado por um sistema, bem como pelo trabalho executado ou sofrido por ele. Mesmo que uma das variáveis não sofra alterações, a energia interna de um sistema pode aumentar ou diminuir. No exemplo do alimento no forno, sua energia interna aumenta devido ao processo calor e não há trabalho envolvido.

### 2.3.3 Por que é tão difícil encher o pneu de uma bicicleta?

Para encher um pneu, é necessário aumentar a quantidade de gás em seu interior. Apesar de sua estrutura ser de borracha, tal material apresenta uma construção muito rígida, sendo que suas paredes sofrem pouca variação de volume com o aumento da sua pressão interna. Para se ter uma ideia, um pneu de carro totalmente inflado apresenta pressão interna cerca de dez vezes maior que a pressão atmosférica padrão. Tal tarefa, portanto, não é tão simples quanto parece, requerendo bastante energia para realizar tal trabalho

Como a pressão interna do pneu é muito elevada, é necessária a realização de muito trabalho ( $W$ ), até que se alcance a pressão desejada para o pneu. Como consequência, a energia interna ( $U$ ) do gás no interior do pneu aumentará.

### 2.3.4 Por que o ar expulso de um pneu é tão frio?

Ao esvaziar um pneu, podemos perceber que o ar que é expulso pelo sistema apresenta uma temperatura menor que a ambiente. Como a pressão interna do pneu é maior que a pressão externa, o movimento de saída das partículas gasosas ocorre de maneira bastante rápida. O jato de ar que sai acaba por se expandir ao entrar em contato com o ambiente externo, arrastando partículas do ar atmosférico. Tal fenômeno exige um esforço desse gás que escapa, e podemos dizer, portanto, que trabalho é realizado. Como o gás realiza trabalho sobre a atmosfera, sua energia interna sofrerá uma diminuição, o que pode ser constatado pela diminuição de sua temperatura.

### 2.3.5 Por que um pneu esquenta durante sua inflação?

O trabalho necessário para inflar um pneu é realizado sobre o gás que está sendo injetado. Sendo assim, tal fato promoverá um aumento na energia interna das partículas gasosas, ocasionando um aumento de temperatura do gás no pneu.

### 2.3.6 É possível determinar a quantidade de energia para a ocorrência de uma destilação?

Processos de destilação são bastante comuns em laboratórios de química e em algumas indústrias. Geralmente uma amostra líquida é aquecida para que a temperatura de ebulição de uma determinada substância componente seja alcançada,

de tal forma que o gás produzido é coletado pela montagem do aparelho construído para a destilação. Em seguida, esse gás é resfriado, e sofre condensação, retornando ao estado líquido e sendo coletado em um frasco específico.

Para o aquecimento da mistura, pode-se utilizar uma chapa de aquecimento (em laboratório, por exemplo), que converte energia elétrica em energia térmica devido ao aquecimento promovido pela passagem de corrente elétrica através de um resistor. Outras formas consistem na utilização de energia liberada em processos de combustão de gases, carvão, lenha ou diesel, por exemplo.

O aquecimento da amostra líquida aumenta a energia interna das moléculas, para que estas sofram o processo de vaporização. É importante frisar que nem toda energia transferida à amostra é utilizada neste processo: parte dessa energia também é utilizada para o deslocamento da atmosfera, ou seja, na realização de trabalho.<sup>11</sup>

Na produção de bebidas destiladas, tais como cachaça, vodca, tequila e uísque, por exemplo, este processo é essencial. Após a fermentação da mistura extraída da cana-de-açúcar ou de outros alimentos (como a batata, por exemplo), a mistura obtida é submetida ao aquecimento, e posteriormente o vapor condensado. Em muitos casos, o produto obtido na condensação é submetido a novas etapas de destilação, o que aumenta o consumo de energia.

---

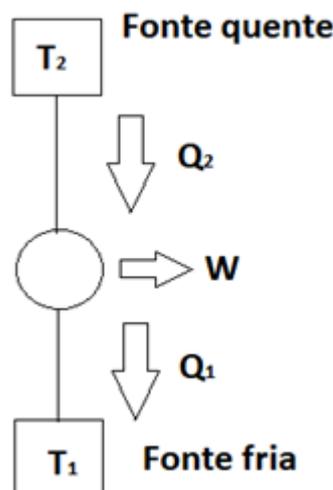
<sup>11</sup> A diferença entre a energia interna e a energia utilizada na forma de calor e trabalho é dada por  $\Delta H = \Delta U + p\Delta V$ , onde temos que  $\Delta U$ ,  $p$  e  $\Delta V$  são funções de estado, levando-nos a concluir que entalpia (H), que será abordada em detalhes no Capítulo 4, também é uma função de estado. O conceito de entalpia geralmente é utilizado em sistemas cuja pressão é constante, mas podem sofrer variações de volume. Assim, muitas vezes o conceito de entalpia é erroneamente equiparado ao de calor, que é uma função de caminho.

### CAPÍTULO 3: SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Este princípio termodinâmico tem seu desenvolvimento também em meados do séc. XVIII, sendo Carnot o principal personagem dessa história. O entendimento desta Lei é bastante simples e prático: a energia térmica sempre irá fluir de um corpo mais “quente” para um outro menos “quente”. É nesse contexto que surge o conceito de entropia, que pode ser definida como uma dispersão da energia, como será apresentada adiante. Um sistema tem a tendência para assumir uma condição de maior dispersão de energia, ou seja, o sistema sempre assumirá um estado de maior entropia.

Como mencionado no Capítulo 1, com o intuito de aumentar o rendimento das máquinas de seu tempo, Sadi Carnot desenvolveu vários estudos no sentido de entender e explicar o uso dessa direcionalidade do fluxo de energia para a promoção de trabalho nas máquinas térmicas. Estas observações auxiliaram em muito a elucidação da segunda lei da Termodinâmica, que está relacionada com a direcionalidade de um processo termodinâmico. Quanto maior a entropia, maior a probabilidade de que o processo seja espontâneo. Esta direcionalidade de ocorrência do processo calor é indicado na Figura 34 a seguir.

Figura 34 — Direcionalidade de um processo termodinâmico.



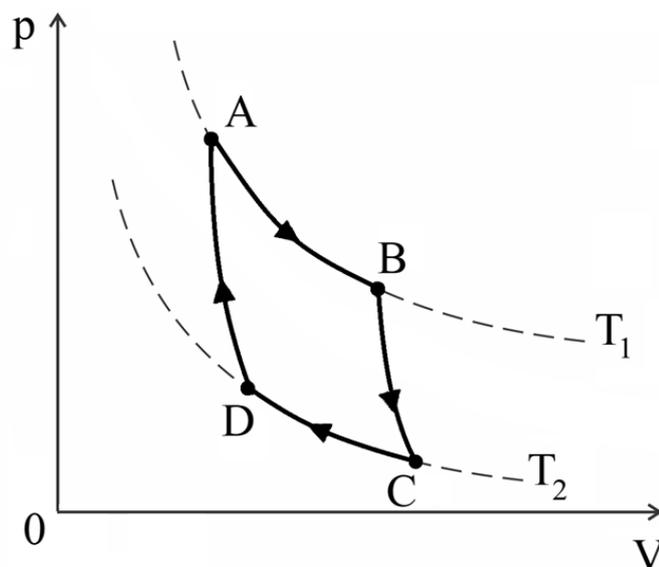
Fonte: o autor.

A figura anterior ilustra de forma bastante simplificada o princípio básico e geral do funcionamento de uma máquina térmica, explicando a espontaneidade operacional

do calor em uma máquina térmica. Nessa imagem, temos que a ocorrência do processo calor ( $Q_2 \rightarrow Q_1$ ) promove a realização de trabalho ( $W$ ). Além disso, dos estudos de Carnot, temos ainda que quanto maior for a diferença entre as temperaturas alta ( $T_1$ ) e baixa ( $T_2$ ), obtidas no funcionamento de um determinado motor, maior será a conversão dessa energia térmica em trabalho.

Os estudos de Sadi Carnot demonstraram ainda que o melhor aproveitamento do trabalho desempenhado por uma máquina térmica ocorreria a partir da realização do seu trabalho em ciclos reversíveis entre temperaturas altas e baixa. Estes estudos são feitos a partir de um diagrama  $P \times V$ , tal como é apresentado na Figura 35, que é um esboço para o Ciclo de Carnot.

Figura 35 — Ciclo de Carnot.



Fonte: o autor.

No Ciclo de Carnot, a máquina térmica deve operar entre duas temperaturas distintas  $T_1$  e  $T_2$ , onde  $T_1 > T_2$ . Segundo Carnot, a substância motriz (que pode ser um gás ou o vapor das máquinas térmicas) quando aquecida, deveria aumentar seu volume sem alterar sua temperatura, ou seja, sofrer uma *expansão isotérmica* de A para B, no gráfico da Figura 35. Para que possa expandir e manter sua temperatura constante, é necessário que a energia interna da substância motriz aumente, o que ocorre pelo fluxo de energia térmica da vizinhança para o sistema (energia fornecida pela combustão de carvão, por exemplo).

Em seguida, o gás ou o vapor no interior da máquina sofre uma expansão, sem que haja processo calor, mas com diminuição da temperatura de  $T_1$  para  $T_2$  (chamamos esse tipo de transformação de *adiabática*, a qual está indicada entre os pontos B e C do Ciclo de Carnot). Isto nos traz um indicativo de que a energia interna da substância também sofreu uma diminuição, e tal fato ocorreu porque houve a realização de trabalho.

O próximo passo consiste em uma diminuição de volume na substância motriz, à temperatura  $T_2$  constante (a qual chamamos de *compressão isotérmica*), liberando energia térmica do sistema para a vizinhança (ou seja, ocorrerá o processo calor). No Ciclo de Carnot, esta transformação é evidenciada entre os pontos C e D. Por fim, o gás ou vapor no interior da máquina térmica é comprimido, havendo aumento na sua temperatura de  $T_2$  para  $T_1$ , mas sem haver perdas de energia térmica para a vizinhança (chamamos este processo de *compressão adiabática*). Esta transformação ocorre de D para A, retornando para o início do Ciclo.

Para além das máquinas térmicas, a Segunda Lei da Termodinâmica também explica diversos outros processos cotidianos, seja sobre uma mudança de estado físico, a dissolução de um determinado sal em água ou até mesmo por que uma xícara de café “quente” tenderá a diminuir sua temperatura. Para exemplificar, neste último caso temos que a temperatura em que está o café é maior do que a constatada no ambiente em que se encontra, ocorrendo, portanto, transferência de energia térmica do café (neste exemplo, o sistema) para a vizinhança, até que sua temperatura se iguale à do ambiente, alcançando um equilíbrio térmico.

### 3.1 Entropia

Entropia é uma grandeza difícil de ser esclarecida para os alunos do Ensino Médio, sendo muitas vezes associadas por nós professores (e por muitos materiais didáticos) como sendo uma medida do grau de desordem do sistema. Acreditamos que essa forma de pensar não está adequada, e pode promover um mau entendimento da definição correta de entropia. Entendemos que é possível se fazer uma associação melhor dessa definição com os nossos estudantes, a fim de melhor definirmos esta grandeza.

Entropia vem do termo grego “*entropé*”, que significa mudança, transformação (PÁDUA; PÁDUA; SILVA, 2009). Como foi visto no Capítulo 1, o conceito foi

inicialmente cunhado por Clausius, no séc. XIX, com sua definição associação à dispersão de energia, sendo sempre representada por  $S$ . Segundo Atkins, Paula (2018), a entropia de um sistema indica que “a direção de uma transformação está relacionada à distribuição de energia e matéria”. O autor continua dizendo que “(...) as mudanças espontâneas estão sempre acompanhadas de uma dispersão de energia e matéria”.

Outra definição interessante colocada por Atkins, Paula (2018 p.14) diz que:

A entropia,  $S$ , é uma medida da qualidade da energia de um sistema. Se a energia é distribuída entre muitos modos de movimento (por exemplo, movimentos de rotação, vibração e translação das partículas que formam o sistema), então a entropia é alta. Se a energia é distribuída somente sobre um número pequeno de modos de movimento, a entropia é baixa.

Assim, e de forma geral, podemos falar que a entropia é uma função de estado, e está relacionada com a dispersão de energia em um processo reversível, indicando sua espontaneidade. Termodinamicamente, em uma linguagem mais formal, entropia pode ser enunciada como:

$$\Delta S = \frac{Q_{rev}}{T} \quad (8)$$

Quando se fala em entropia como dispersão de energia, esta relação está justificada na equação acima. Uma vez que calor é um processo em que a energia térmica fluirá espontaneamente de um corpo de maior temperatura para um corpo de menor temperatura, observa-se a ocorrência de dispersão de energia, implícita na equação 8.

### 3.3 Questões Propostas

Neste momento, serão apresentadas algumas discussões feitas por Monk (2004), cujos fundamentos para a explicação estão baseados principalmente na Segunda Lei da Termodinâmica. O objetivo dessas questões consiste em apresentar situações simples do cotidiano, em que talvez o aluno ainda não tivesse observado

correlação direta com este princípio termodinâmico, ou que ainda paira uma certa dúvida a respeito de sua ocorrência.

### 3.3.1 Por que a cor se espalha ao colocar uma gota de tinta em um prato com água limpa?

Ao adicionarmos uma gota de corante em uma amostra de água contida em um prato, pode-se observar que logo a coloração da tinta se espalhará por lugares onde antes não estava presente, até que a mistura se torne homogênea. Para ocorrer, este processo não requer agitação ou aquecimento da mistura. É preciso enfatizar que o processo contrário não será observado, ou seja, a água não se tornará límpida novamente, com a gota de corante concentrada. Dessa forma, podemos concluir também que a situação observada é um processo irreversível.

A explicação para a dispersão da coloração na solução aquosa consiste no fato de que a situação final é mais favorável e estável que a situação inicial, uma vez que ocorrerá um aumento na entropia do sistema. É importante lembrar que a entropia aponta em qual direção um processo ocorrerá espontaneamente.

### 3.3.2 Quando derramamos uma tigela de açúcar, por que os grãos se espalham pelo chão?

Certamente, deixar uma tigela com açúcar cair no chão é uma situação que causa bastante confusão. Os cristais de açúcar se espalharão pela superfície do piso, abrangendo uma grande área. Temos que uma porção pode ficar mais concentrada em determinado local (com maior acúmulo de energia potencial), enquanto uma outra parcela irá migrar para áreas mais distantes (maior propagação de energia cinética). Esta situação é uma demonstração de que a natureza procura situações em que haverá um aumento na entropia do sistema.

É possível reunir todo açúcar (puro) novamente na tigela? Sim, com bastante esforço, é possível realocar o açúcar. Para tanto, é preciso que se tenha um gasto energético significativo, o que demonstra a não espontaneidade do processo nesse sentido.

### 3.3.3 Por que quando misturamos água quente e fria, após um certo tempo, as temperaturas se igualam?

Ao misturarmos porções de água, inicialmente com temperaturas diferentes, teremos que, após um certo tempo da mistura, haverá um equilíbrio térmico, não sendo mais possível identificar alguma parcela da mistura que tenha vindo de uma ou da outra fonte. Essa mistura, com conseqüente equilíbrio térmico, acontece mesmo que não ocorra agitação da mistura.

Uma maneira que temos de explicar este processo parte da definição de temperatura como uma medida do estado de agitação das partículas de um sistema. As moléculas de água na amostra que se encontrava em menor temperatura apresenta menos energia do que as moléculas da porção de água em temperatura maior. Podemos, então, concluir que parte da energia das moléculas de maior temperatura é transferida para as moléculas da porção de água em menor temperatura, até que o equilíbrio seja alcançado.

O raciocínio apresentado até aqui é consistente com os princípios estudados na Lei Zero da Termodinâmica.

Mas poderíamos questionar: qual é a causa da transferência de energia entre as moléculas de água neste processo? A causa é o aumento da entropia, pois, a energia se dispersa.

#### 3.3.4 Por que uma sala contendo laranjas adquire seu aroma?

Se deixarmos uma fruteira com laranjas na copa de uma residência, por exemplo, após certo tempo o ambiente terá adquirido o odor proveniente das frutas. Tal fato ocorre devido à volatilização de uma substância presente nas frutas, o limoneno.

Enquanto presente na fruta, o limoneno é um líquido, entretanto, por ser apolar, apresenta uma volatilidade significativa. Como as moléculas em fase gasosa apresentam maior liberdade de movimento e menos interações entre si, logo apresentarão maior distribuição de energia das partículas. Isto significa que as moléculas de um gás apresentam maior entropia em relação à fase líquida dessa mesma substância.

#### 3.3.5 Por que as roupas úmidas ficam secas quando penduradas do lado de fora?

Ao se colocar roupas no varal, mesmo em dias de pouco sol, elas secam. A água presente nos tecidos sofre um processo de evaporação de forma espontânea. A

ocorrência desse processo está relacionada com o fato de que a água no estado gasoso apresenta maior entropia do que a água em seu estado líquido.

Generalizando, temos que uma substância no estado líquido apresenta maior energia e liberdade de movimento do que se estivesse no estado sólido, uma vez que este apresenta uma estrutura rígida de suas partículas, formando, inclusive, uma rede. Já o gás apresentará mais energia e mais liberdade de movimento do que o seu respectivo estado líquido. Logo, podemos estabelecer analogia para a entropia desse sistema, que aumenta na mesma ordem do aumento de energia e da liberdade de movimento.

$$S_{(g)} \gg S_{(l)} > S_{(s)} \quad (9)$$

### 3.3.6 Por que ocorre a cristalização de um soluto?

Se pensarmos bem, seria estranho que ocorresse a precipitação de um determinado soluto que estivesse solubilizado por um certo solvente. Isto porque cada íon ou molécula na solução apresenta um alto grau de liberdade e, conseqüentemente, um alto valor de entropia. Ao produzir os sólidos da precipitação, temos a formação de um rede cristalina, a qual apresenta unidades de repetição, uma liberdade de movimento muito menor, bem como uma maior aproximação das partículas. Assim, esta é uma situação em que haverá uma menor dispersão de energia, e, conseqüentemente, uma menor entropia. O que poderíamos esperar é que a precipitação não fosse um processo espontâneo, entretanto ela ocorre espontaneamente em diversas situações.

Para entender melhor esse fenômeno, precisamos considerar todas as relações energéticas que existem durante uma precipitação, inclusive considerando fenômenos que ocorrem na vizinhança do sistema. Por exemplo, em solução aquosa, o íon cloreto é solvatado por seis moléculas de água. Nessa situação, estar com seis moléculas de água ao redor de um íon limita a liberdade das moléculas do solvente. Assim, “deixar” o íon para que ele forme um precipitado e tornar-se um solvente livre não ligado aumenta a entropia do solvente.

Logo, duas situações precisam ser consideradas: a entropia do soluto diminui conforme ocorre a sua precipitação, entretanto haverá um aumento significativo e simultâneo na entropia do solvente, à medida em que este é “liberado” e retorna para a solução.

## CAPÍTULO 4: TERMOQUÍMICA

A Termoquímica é um ramo da Termodinâmica que se dedica a estudar as variações de energia envolvida nas transformações químicas e físicas, devido a fenômenos envolvendo o processo calor. Nesse contexto, a energia dessas transformações é conhecida como Entalpia.

### 4.1 Entalpia (H)

O termo entalpia corresponde ao conteúdo de energia liberada ou absorvida durante a realização de uma transformação termoquímica. Esta energia está relacionada, na maioria das vezes, com as interações interatômicas e intermoleculares que são rompidas e formadas durante a ocorrência de um processo.

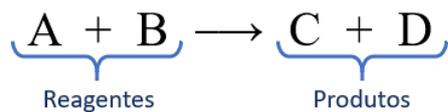
A entalpia é uma espécie de energia térmica do sistema, um pouco maior do que a energia interna uma vez que possui um termo que depende da pressão e do volume. A definição de entalpia é dada por:

$$H = U + PV \quad (10)$$

Entretanto, geralmente o valor absoluto da entalpia de um sistema não pode ser medido, tal como ocorre com a energia interna. Dessa forma, nos interessa, na maioria das vezes, medir a variação desta entalpia ( $\Delta H$ ) ao final do processo, onde chegaremos à conclusão se esta transformação irá ocorrer por absorção ou por liberação de energia.

É importante enfatizar que entalpia é uma propriedade presente tanto em processos químicos quanto em processos físicos. A variação de entalpia pode ser calculada para mudanças de fase, ebulição, solvatação, adsorção ou reações químicas, por exemplo.

Para as reações químicas, esta variação de entalpia pode ser conhecida fazendo-se a diferença entre os valores de entalpia de produtos ( $H_p$ ) e dos reagentes ( $H_R$ ) de uma transformação química.



Assim, para uma reação química em que A e B sejam reagentes (a entalpia pode ser dada por  $H_R = H_A + H_B$ ), C e D sejam produtos (em que  $H_P = H_C + H_D$ ), temos que o valor de  $\Delta H$  pode ser determinado fazendo-se:

$$\Delta H = H_P - H_R \quad (11)$$

Dessa forma, para uma reação química, podemos definir entalpia como a energia liberada ou absorvida durante a ocorrência do processo. Essa energia é utilizada para realizar ou sofrer trabalho e/ou calor.

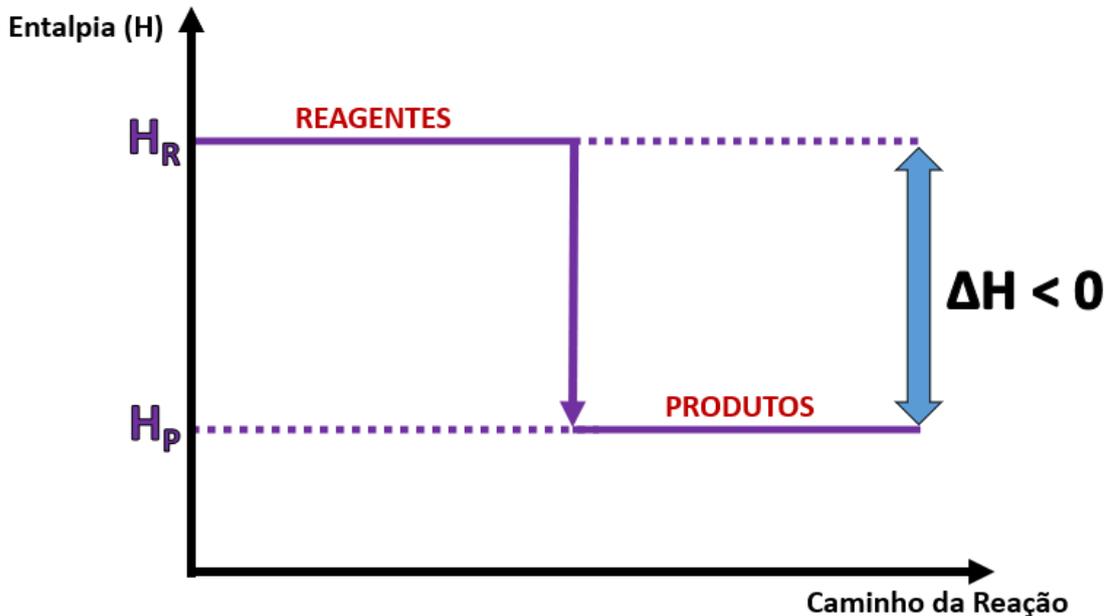
## 4.2 Processo Exotérmico

Uma transformação exotérmica consiste em um processo que ocorre por liberação de energia do sistema para a vizinhança, tendo por consequência uma diminuição da energia total do sistema. A Figura 36 mostra o esboço para um diagrama de energia de um processo exotérmico<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> Ressaltamos que é comum encontrarmos outras representações gráficas para este mesmo diagrama, que possam, inclusive, conter mais informações a respeito da cinética das reações.

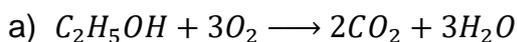
Figura 36 — Diagrama representativo de um processo exotérmico.



Fonte: o autor.

Como a energia dos produtos é menor que a dos reagentes, ao se efetuar a equação 11, teremos que o valor de  $\Delta H$  será negativo. Esta conclusão significa que ao ocorrer um processo exotérmico, este irá liberar entalpia para a vizinhança, promovendo nela um certo aumento de temperatura (uma sensação de calor).

A seguir, apresentamos alguns exemplos de processos exotérmicos.



Os reagentes são  $C_2H_5OH$  (etanol) e  $O_2$  (gás oxigênio), enquanto os produtos são  $CO_2$  (dióxido de carbono) e  $H_2O$  (água). Esta equação representa o processo de combustão (queima) de etanol. É uma reação bastante conhecida do nosso cotidiano, e, ao ocorrer, promove liberação de energia no valor de 1350 kJ/mol. Ou seja, podemos também representar estas informações como  $\Delta H = -1350$  kJ/mol.

b) na fabricação de sabão caseiro, utiliza-se uma mistura de óleo ou gordura e soda cáustica. A reação de saponificação que ocorre é exotérmica, levando a um grande aquecimento do meio reacional. Em alguns casos, pode-se observar até mesmo a ocorrência de fervura da mistura.

c) ao lavarmos as mãos com água, e em seguida aplicarmos álcool, perceberemos uma sensação de calor nas mãos. Isto se deve ao fato de a mistura entre álcool e água ser do tipo exotérmica, ocorrendo por liberação de entalpia.

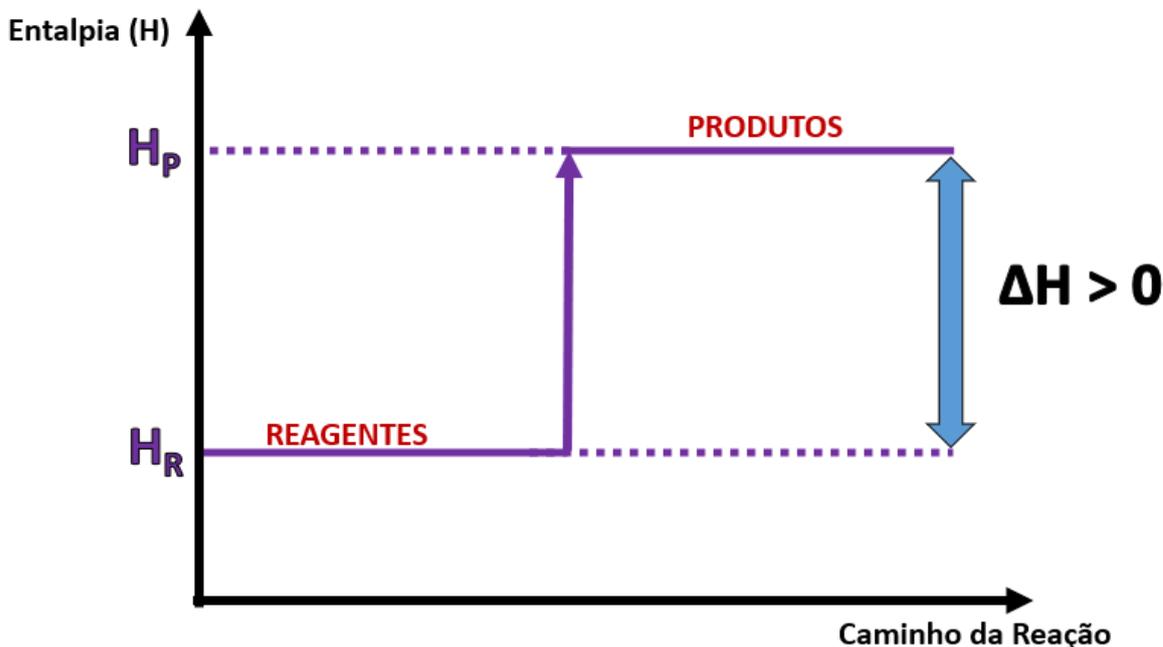
d) na ocorrência de chuvas, a transformação de água do estado vapor para água no estado líquido ocorre por liberação de energia (passagem de um estado mais energético para outro menos energético). Com isso, em algumas ocorrências de chuvas (sobretudo as torrenciais), é possível ter a sensação de que o ambiente ficou “abafado”.

e) em países muito frios, é comum que se adicione sal à neve presente nas ruas para promover o seu derretimento. Isto ocorre porque a dissolução de sal na água é um processo exotérmico. Além disso, a mistura de sal e água obtida apresenta um ponto de fusão inferior ao da água pura (devido ao efeito coligativo da crioscopia).

### **4.3 Processo Endotérmico**

Transformação que ocorre por absorção de energia da vizinhança, promovendo, portanto, um aumento na energia total do sistema. A Figura 37 mostra o esboço para um diagrama de energia de um processo endotérmico.

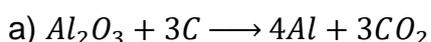
Figura 37 — Diagrama representativo de um processo endotérmico.



Fonte: o autor.

Como a energia dos produtos é maior que a dos reagentes, ao se efetuar a equação 11, teremos que o valor de  $\Delta H$  será positivo. Esta conclusão significa que ao ocorrer um processo endotérmico, este irá absorver entalpia da vizinhança, promovendo nela uma certa diminuição de temperatura (uma sensação de frio).

A seguir, apresentamos alguns exemplos de processos endotérmicos.



O reagente é  $Al_2O_3$  (óxido de alumínio, também conhecido como alumina), enquanto os produtos são alumínio e dióxido de carbono. Esta equação representa o processo de eletrólise ígnea do alumínio. É uma reação bastante utilizada para a obtenção de alumínio metálico na indústria, e é conhecida por necessitar de grande quantidade de energia para ocorrer. O valor da variação de entalpia deste processo é de  $\Delta H = +495,17 \text{ kJ/mol}^{13}$ .

b) ao se passar álcool nas mãos, é comum ter uma sensação de frescor. Tal fato ocorre porque a volatilização do etanol é um processo endotérmico, ocorrendo por

<sup>13</sup> Valor de  $\Delta H$  calculado a partir dos valores de entalpia de formação tabelados, que constam em Atkins, Paula (2018).

absorção de entalpia da vizinhança. Como a vizinhança, neste caso, são as mãos de quem está aplicando o álcool, a perda de energia térmica do organismo da pessoa para o etanol é interpretada pelo cérebro como uma sensação de frio.

c) a fotossíntese é um processo biológico de produção de glicose, a partir da reação entre  $\text{CO}_2$  (gás carbônico) e  $\text{H}_2\text{O}$  (água), com absorção de luz solar. Por absorver energia da vizinhança, este processo é endotérmico.

d) algumas lentes de óculos podem escurecer “automaticamente” quando expostas a luz solar. Estas lentes possuem  $\text{AgCl}$  em sua composição (que é incolor). Quando expostas à radiação solar, ocorre a formação de prata metálica (Ag), que escurece as lentes. Como é necessário absorver radiação solar para ocorrer, esta reação é endotérmica.

#### 4.4 Questões Propostas

A seguir, serão apresentados alguns questionamentos relacionados com os princípios termoquímicos apresentados até aqui. As questões de 5.4.1 até 5.4.10 foram adaptadas de discussões feitas por Monk (2004).

##### 4.4.1 Por que a pele é esquentada pelo vapor?

O vapor de água, que corresponde à água na forma gasosa, encontra-se em uma temperatura mais elevada que a pele humana. Ao entrarem em contato físico, energia térmica será transferida do vapor para o local de contato no corpo humano, promovendo um aumento de temperatura neste ponto. A água, na sua forma gasosa, sofrerá perda de energia térmica e, conseqüentemente, diminuição de temperatura. Tal fato irá promover o processo de condensação (passagem do estado gasoso para o estado líquido), deixando úmida a região de contato no corpo humano, além dos efeitos próprios de queimadura e sensação de dor. A equação para a condensação da água é dada por:



##### 4.4.2 Por que suamos?

O suor consiste em uma mistura de água, sal e óleos naturais do nosso corpo, e é formado por glândulas presentes sob a pele humana, quando ocorre uma elevação da temperatura corporal devido a um aumento na temperatura ambiente, ou por ocorrência de atividade física, ou por elevação da temperatura corporal devido a alguma doença (reação de febre).

O sal tem a função de diminuir a tensão superficial da água, para facilitar o processo de vaporização da mesma, enquanto o óleo mantém a hidratação da pele. Para que a água sofra evaporação, é preciso haver um ganho de energia térmica, uma vez que a água no estado de vapor é mais energética que a água no estado líquido. Para isso, a energia utilizada é obtida do próprio corpo humano, o que promoverá uma diminuição de temperatura no organismo. Quando o “suor secar”, por exemplo com a passagem de uma brisa, tal diminuição de temperatura no corpo trará também uma sensação de frescor.

#### 4.4.3 Por que ainda sentimos calor enquanto suamos em uma praia úmida?

Em um dia de praia ensolarada, mesmo suando bastante, a sensação de calor que sentimos é mais permanente. Isso ocorre principalmente porque o ambiente da praia é bastante úmido, apresentando grande quantidade de água na forma de vapor. Desse modo, dois processos estão ocorrendo simultaneamente na pele humana: a evaporação do suor formado na pele e a condensação da água proveniente do ambiente úmido da praia.

#### 4.4.4 Por que um fósforo emite calor quando aceso?

Quando “acendemos” um fósforo, na verdade iniciamos uma combustão. Em uma reação desse tipo, diversas ligações químicas entre os constituintes da madeira que queimam (geralmente carboidratos) e o oxigênio do ar são rompidas em quantidade maior do que a energia consumida para a formação dos produtos (água e CO<sub>2</sub>). Devido a isso, o processo é exotérmico, promovendo aumento de temperatura na vizinhança.

Outro fato que pode ser considerado é que nesse processo ocorre liberação de gases para a atmosfera, promovendo deslocamento de gás do entorno, realizando trabalho. Assim, temos que a energia interna da vizinhança irá aumentar.

#### 4.4.5 Por que a entalpia do gelo derretido diminui conforme a temperatura diminui?

O valor de entalpia para o processo de solidificação da água é de  $-6,00 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , sendo a temperatura de fusão dada por  $273,15 \text{ K}$ . O valor negativo para esta entalpia ocorre porque a energia é liberada durante o congelamento. Caso a pressão externa seja alterada, a temperatura de fusão da água também sofrerá mudança. Por exemplo, caso a pressão externa seja 100 vezes maior que a pressão padrão, o congelamento ocorrerá abaixo de  $253 \text{ K}$  ( $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Nessa temperatura, a entalpia do processo de fusão passa a ser  $-5,2 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Esta diferença é ocasionada pela diminuição na temperatura de fusão constatada. Dessa forma, sempre que for citado o valor de entalpia para um certo processo, deve-se falar também a temperatura em que tal processo ocorre.

#### 4.4.6 Por que a água leva mais tempo para aquecer sob pressão no fogão do que em uma panela aberta?

Uma panela comum, que não seja de pressão, consiste em um sistema aberto. A pressão exercida sobre o sistema em seu interior é constante, e corresponde à pressão atmosférica. Neste caso, como a panela é aberta, o volume do vapor formado aumenta continuamente, uma vez que sua temperatura também aumenta.

Ao aquecer uma panela de pressão a partir da temperatura ambiente, temos que, neste momento, ela equivale a um sistema fechado. Assim que ocorrer a fervura da água em seu interior, a pressão interna da panela aumenta drasticamente, chegando a valor cerca de 6 vezes a pressão atmosférica padrão. Esta condição eleva o valor da temperatura de ebulição da água. Evidentemente, a partir do momento que a válvula de escape do vapor começar a atuar, a panela de pressão deixa de ser considerada como sistema fechado (entretanto, sua pressão interna fica mantida).

Como a temperatura necessária para a fervura da água na panela de pressão é maior que a constatada na panela aberta, o tempo necessário para alcançar tal temperatura também será maior.

#### 4.4.7 Por que a temperatura muda durante uma reação?

Podemos definir uma reação química como um processo no qual diversos rearranjos de ligações são feitos, havendo rompimentos de algumas ligações e formações de outras. A quantidade de energia liberada ou absorvida em um desses processos apresenta características próprias para cada caso. A melhor forma de

constatarmos pequenas variações de energia de um sistema consiste em detectarmos mudanças de temperatura.

#### 4.4.8 Os diamantes são eternos?

O diamante é um alótropo do carbono na natureza, assim como o grafite e outros menos comuns (como os fulerenos<sup>14</sup>). Isto quer dizer que a essas substâncias são formadas pelo mesmo elemento químico, sendo diferentes apenas na forma como os átomos estão ligados. Apesar do diamante não ser a forma mais estável de carbono, em uma quantidade de tempo suficientemente longa seria possível constatar a transformação de diamante em grafite, por este ser a forma termodinamicamente mais estável de carbono na natureza, ou seja, à temperatura ambiente, espera-se que a transformação de diamante em grafite seja um processo espontâneo, uma vez que nessa transformação ocorrerá aumento de entropia para o sistema isolado. Caso se queira converter grafite em diamante, portanto, é necessário fornecer energia térmica, bem como aumentar a pressão sobre a amostra (esta energia seria de 2,4 kJ para cada 1 mol de grafite).

#### 4.4.9 Por que o butano queima com uma chama “mais quente” do que o metano?

Metano e butano são gases, que podem facilmente ser utilizados como combustíveis em processos de combustão. A variação de entalpia durante a combustão do metano corresponde a  $-866 \text{ kJ.mol}^{-1}$ , enquanto para o butano esta propriedade tem o valor de  $-2878 \text{ kJ.mol}^{-1}$ . Logo, butano é um combustível melhor do que metano, uma vez que libera mais energia durante o processo de combustão, sendo o principal componente do GLP (gás liquefeito de petróleo), utilizado como “gás de cozinha”.

#### 4.4.10 Por que nossa boca fica fria depois de comer hortelã-pimenta?

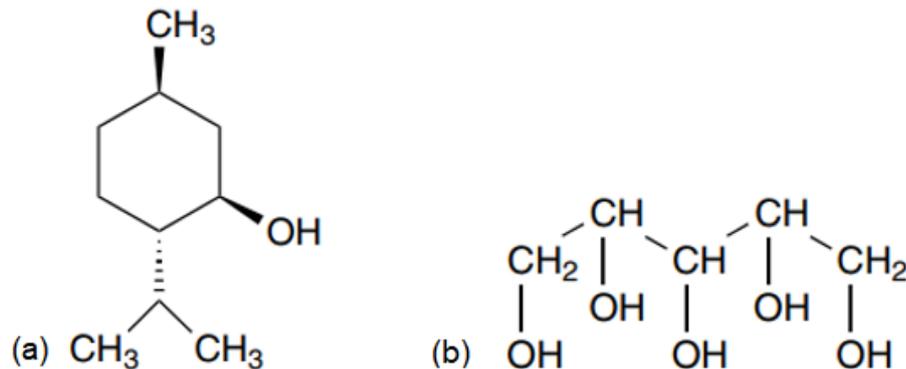
Diversos componentes presentes nas folhas e talos da hortelã-pimenta são responsáveis por promover uma sensação de frescor na boca, após o seu consumo. Dentre elas, uma das principais substâncias é o (-)-mentol, que é encontrado em maior

---

<sup>14</sup> Os fulerenos são uma família de moléculas que incluem o *buckminsterfullereno* ( $C_{60}$ ), o qual apresenta uma estrutura semelhante a uma bola de futebol (esférica, formada por ciclos hexagonais e pentagonais). Os fulerenos são formados em combustões com muita fumaça, bem como nas gigantes vermelhas (estrelas enormes, com baixa temperatura superficial (ATKINS, 2012)).

quantidade. Outro componente importante é o xilitol. Ambos são muito utilizados por indústrias na composição de balas, chicletes, doces, cremes dentais e soluções bucais, dentre outros. As estruturas químicas de (-)-mentol e xilitol são apresentadas na Figura 38 a seguir.

Figura 38 — Estruturas químicas do (-)-mentol (a) e do xilitol (b).



Fonte: adaptado de Monk (2004 p. 125-126).

A sensação de frescor (ou frio) sentido por quem consome essas substâncias está relacionada com o valor da variação de entalpia ser positivo, quando se dissolve tais componentes em solução aquosa. Tal fato ocorre também com outras substâncias presentes na hortelã.

No caso do (-)-mentol puro, ele se apresenta como um sólido. Ao sofrer dissolução, sua estrutura se desfaz e ligações de hidrogênio do grupo hidroxila (OH) com a água são formadas. É necessário fornecer energia ao sistema tanto para romper as ligações do sólido, quanto para formar as novas ligações de hidrogênio que se formam. Desse modo, tal processo de dissolução é endotérmico, pois precisa absorver energia.

#### 4.4.11 Por que um copo com uma água gelada “sua”?

Ao colocarmos água gelada em um copo, haverá uma diferença de temperatura entre o sistema e sua vizinhança. Devido à presença de água na forma de vapor na atmosfera, a partir do momento que essas moléculas de água entram em contato com a superfície mais fria do copo (fronteira do sistema) o vapor irá transferir energia térmica para o sistema e, então, sofrerá condensação, retornando para o estado

líquido. Este fenômeno também pode ser observado nas janelas de casas e carros em dias frios, assim como nas tampas de panelas ou em tubulações de ar refrigerado.

#### 4.4.12 Por que sentimos sensação de frio ao passar álcool nas mãos?

O etanol (álcool comum) é uma substância conhecidamente bastante volátil. Ao se passar etanol nas mãos, temos que logo ocorrerá o processo de volatilização desse álcool. Tal processo é endotérmico, pois a forma de vapor é mais energética que a forma líquida da substância. Assim, para que o processo ocorra, é preciso absorver energia da vizinhança, que, neste caso corresponde à mão da pessoa. A passagem de energia térmica da mão para o álcool é interpretada pelo nosso organismo como uma sensação de frio.

O mesmo ocorre quando saímos de um banho, por exemplo. Enquanto ainda estamos molhados, sentimos uma sensação de frio em todo corpo, porque a água sobre nossa pele, que se encontra em estado líquido, está absorvendo energia térmica do nosso organismo para sofrer evaporação. Por isso, é sempre bom nos secarmos rapidamente, para que a perda energética que ocorre neste processo não nos cause incômodo com a sensação de frio que sentimos.

#### 4.4.13 Por que temos uma sensação de "abafado" durante uma chuva de verão?

A conversão de água no estado de vapor para o estado líquido corresponde a um processo do tipo exotérmico, ou seja, ocorre por liberação de calor. Outros motivos ainda devem ser considerados, tais como a rápida volatilização da água ao encontrar-se com o solo, que está em temperatura mais elevada. O "vapor que sobe", por ser água com maior conteúdo de energia interna, apresentará temperatura maior, aumentando a sensação de "abafamento".

Outro motivo interessante consiste na realização de trabalho pelas gotas de água ao atravessarem a atmosfera, deslocando grandes quantidades de gases. A realização desse trabalho aumenta a energia interna das partículas da atmosfera, promovendo aumento de temperatura.

## **CAPÍTULO 5: SUGESTÕES DE PRÁTICAS PARA SALA DE AULA**

Neste capítulo, apresentaremos algumas sugestões de roteiros para aulas práticas, que acreditamos ter relação direta com os conceitos trabalhados nos capítulos anteriores, apresentando também objetivo de instigar o estudante a aprofundar mais os seus estudos acerca da Termodinâmica. A visualização dos fenômenos termodinâmicos, na prática, auxilia na construção de uma aprendizagem significativa dos conteúdos trabalhados. Estas sugestões de aulas práticas podem ser utilizadas na aplicação do material teórico construído nos capítulos anteriores, seja em uma sequência didática, seja em uma oficina temática ou de forma independente, em uma feira de ciências, por exemplo.

### **5.1 Termoscópio de Galileu**

Essa prática é bastante conhecida e desenvolvida em feiras de ciências, geralmente com outros nomes e com algumas adaptações. Neste roteiro, será construído um termoscópio rudimentar, a fim de remeter ao estudos feitos por Galileu Galilei, em 1592, no qual foi possível avaliar de forma qualitativa o aumento ou a diminuição da temperatura em um sistema, através da dilatação ou contração de um líquido em um tubo capilar. Muitas vezes, a montagem que será feita nesta prática é chamada inadequadamente de termômetro, mas para isso ela precisaria sofrer algumas adaptações a fim de conseguir fazer medições de temperatura, o que neste momento não é o objetivo. Apesar de apresentar um caráter mais qualitativo, esta prática auxilia na observação do funcionamento de um termômetro, visualizando como a altura da coluna de líquido no canudo se comporta em diferentes temperaturas.

Objetivos: construir um termoscópio caseiro com materiais de baixo custo para a verificação do comportamento de um líquido mediante oscilações da temperatura ambiente.

Materiais:

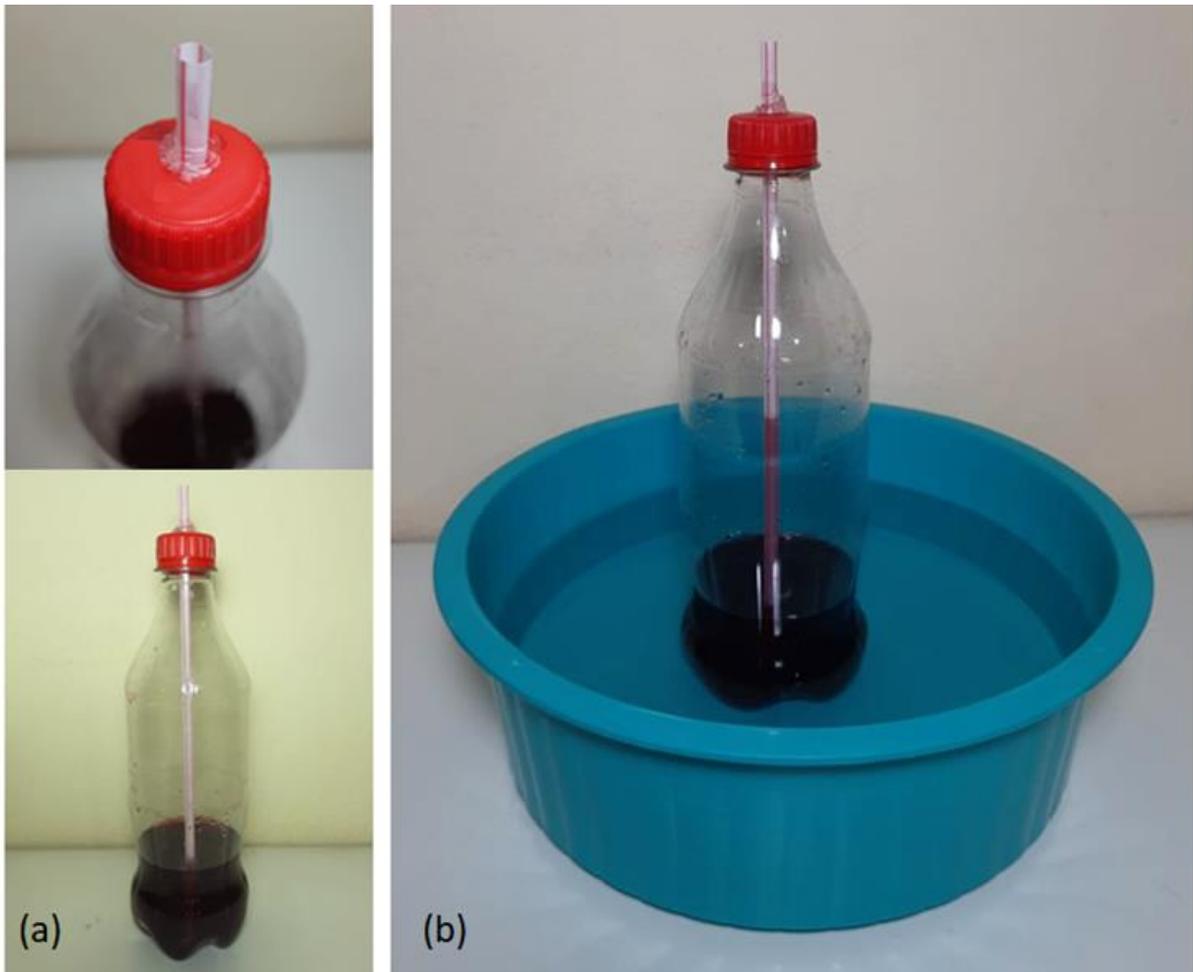
- 150 mL de álcool 70%;
- corante;
- 01 garrafa PET;

- 01 canudo transparente;
- cola quente.

Construção:

- 1º. Coloque o álcool na garrafa PET, e pingue 3 gotas de corante.
- 2º. Faça um furo na tampa da garrafa, e feche-a.
- 3º. Passe o canudinho pelo furo, e faça uma vedação entre o canudo e a tampa, utilizando cola quente. A montagem final fica como mostrado na Figura 39 (a). É importante que o canudinho não esteja encostado no fundo da garrafa, para que o líquido no interior da garrafa possa entrar e sair.

Figura 39 — Montagem para experimento do termoscópio de Galileu.



Fonte: o autor.

### Experimento:

1º. Leve a montagem do termoscópio a um recipiente com água aquecida, e observe o líquido subir pelo canudo, tal como mostrado na Figura 39 (b).

2º. Agora, coloque o termoscópio caseiro em água fria, e observe a contração e descida do líquido pelo canudo.

3º. Para que seu termoscópio torne-se um termômetro, é necessário que seja escrito uma escala termométrica. Com o auxílio de um termômetro de mercúrio (ou outro), você pode colocar o seu termoscópio caseiro com o termômetro de mercúrio, e marcar com caneta esferográfica na garrafa PET a altura em que se encontra o líquido no interior do canudo. Com água morna, deve-se repetir o procedimento, e marcar a temperatura obtida com a água morna.

Obs.: Caso a amostra a amostra de água morna esteja muito quente, é provável que o líquido no interior do termoscópio extravase pelo canudo.

## **5.2 Máquina térmica de Heron<sup>15</sup>**

Esta montagem apresenta referência direta com a eolítica, uma máquina térmica construída por Heron de Alexandria, por volta do ano 100 d.C. para estudar o comportamento do vapor. Além de trazer um elo com a história da Termodinâmica, nesta prática podem ser trabalhados diversos conceitos com os estudantes, tais como: universo, sistema e vizinhança, energia, calor, trabalho, temperatura de ebulição, conservação de energia, dispersão de energia. Além disso, é esperado que os estudantes façam uma correlação com o funcionamento de uma panela de pressão, ou até mesmo de uma caldeira (caso tenham conhecimento). Assim, cabe ao professor/mediador o papel de orientar os questionamentos para um melhor aproveitamento das discussões.

Objetivos: Visualizar o efeito promovido pela saída de vapor de água através de orifícios feitos em uma latinha de alumínio, contendo água sob aquecimento.

---

<sup>15</sup> Adaptado de <[https://www.youtube.com/watch?v=u2CbJNz\\_fFM&ab\\_channel=Editoras%C3%81ticaeScipione](https://www.youtube.com/watch?v=u2CbJNz_fFM&ab_channel=Editoras%C3%81ticaeScipione)>. Acesso em: 30/03/2021.

Materiais:

- 1 lata de refrigerante, cheia;
- 1 vasilha;
- água;
- linha, régua e agulha;
- 3 velas;
- suporte para suspender a lata (pode ser uma montagem em madeira ou outro material).

Construção:

- Com o auxílio de uma régua, meça cerca de 5 cm de altura na lata, conforme observado na Figura 40 (a). Fure a lata com a agulha, e deixe a lata esvaziar. Após isso, faça mais 2 furos na mesma altura, e de forma equidistante.
- Insira a lata em uma vasilha com água, e espere encher até a altura dos furos (aproximadamente), conforme se observa na Figura 40 (b).
- Suspenda a lata utilizando as linhas e o suporte, de modo que consiga colocar as velas embaixo da montagem, tal como é mostrado na Figura 40 (c).

Figura 40 — Etapas de construção e realização do experimento da máquina térmica de Heron.



Fonte: o autor.

Experimento:

- 1º. Acenda as velas, e observe. O fundo da lata será aquecido, promovendo aumento de temperatura da água no interior da lata.
- 2º. Vapor de água começa a se formar, aumentando a pressão no interior da lata.
- 3º. Devido ao aumento de pressão, parte do vapor é expulso pelos furos feitos na lata, promovendo um movimento de rotação na mesma.

### 5.3 A entropia dos feijões<sup>16</sup>

Nesta prática, serão discutidos os efeitos da dispersão de energia nas partículas constituintes de um sistema. Ao receberem energia térmica da vizinhança (agitação) para o sistema, as partículas precisarão se movimentar no interior da montagem para dispersarem a energia transferida, alterando sua distribuição. Dessa forma, se o experimento for repetido diversas vezes, será possível observar que diferentes configurações serão obtidas, revelando que a energia recebida da vizinhança sofre dispersão de diferentes modos entre os subsistemas no interior da montagem. Além disso, esta prática também tem por objetivo abrir uma discussão e convidar o estudante a aprofundar (ou iniciar) seus estudos acerca da definição estatística para entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica, segundo os estudos desenvolvidos por Boltzmann.

Objetivos: verificar a dispersão de energia sofrida pelas partículas de um sistema, após este ser submetido a agitação.

Materiais:

- tesoura;
- cola branca;
- 10 sementes de feijão preto;
- 10 sementes de feijão vermelho;
- 2 caixas de fósforo vazias.

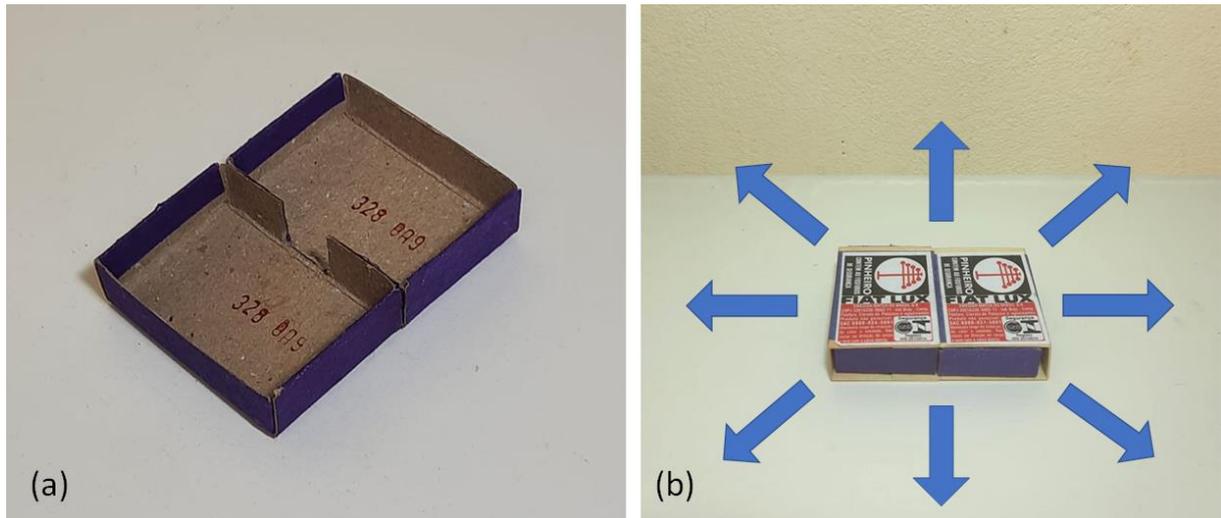
Construção:

- Una as duas gavetas das caixas de fósforo com cola branca e, utilizando a tesoura, faça uma abertura entre as gavetas unidas, conforme observado na Figura 41 (a).
- Inicialmente, coloque 5 feijões pretos em uma das gavetas e 5 feijões vermelhos na outra.
- Utilizando as tampas, una-as com cola branca, feche o sistema.

---

<sup>16</sup> Adaptado de: MONDAINI, F. (coord.) **Entropia e a segunda lei da termodinâmica**. Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Vol. 2, Mód. 2, Física. p. 124. Disponível em: <<http://projetoeduc.cecierj.edu.br/eja/material-professor/modulo-02/FISICA-MOD02-VOL02.pdf>>. Acesso em: 17/04/2021.

Figura 41 — Montagem e movimentação do sistema para o experimento com feijões.



Fonte: o autor.

Experimento:

- Em uma superfície horizontal, movimente o conjunto em diferentes direções, conforme mostrado na Figura 41 (b). Essa movimentação simula a agitação térmica das partículas.
- Abra o sistema, e observe o ocorrido com os feijões.
- Reinicie o experimento, separando novamente feijões pretos de um lado e vermelhos do outro. Após isso, coloque o restante dos feijões, de modo que fiquem 10 sementes de um mesmo tipo em cada gaveta.
- Feche o sistema e movimente o conjunto em diferentes direções sobre uma superfície horizontal.
- Abra o sistema, e observe o ocorrido.
- Repita o procedimento, e anote em uma folha de papel a quantidade de feijões pretos e vermelhos obtidos em cada gaveta do conjunto.
- Após muitas repetições, você acredita ser possível encontrar os feijões de mesmo tipo separados novamente? Existe uma probabilidade para que isso ocorra?

#### 5.4 Determinando o $\Delta H$ de uma reação<sup>17</sup>

De maneira simplificada, nesta prática é construído um calorímetro rudimentar, que com o auxílio de um termômetro verificará a alteração de temperatura devido a ocorrência de uma reação química. Com os valores inicial e final da medição da temperatura, podemos calcular (com aproximações) o valor da variação de entalpia deste processo. Assim, o estudante poderá compreender que as reações químicas podem liberar energia térmica durante a sua ocorrência, e que esta energia pode ser medida. Além disso, esta prática visa discutir a “origem” desta energia. Cabe ao professor orientar que outras reações podem ocorrer de modo contrário, absorvendo energia térmica da vizinhança, o que seria verificado com a diminuição da temperatura registrada no termômetro.

Objetivos: determinar experimentalmente o valor da variação de entalpia em um processo químico.

Materiais:

- 2 embalagens térmicas (de isopor) para lata de cerveja/refrigerante.
- 1 termômetro.
- 1 frasco de 100 mL de água oxigenada 10 volumes.
- fermento biológico.
- palito de fósforo.

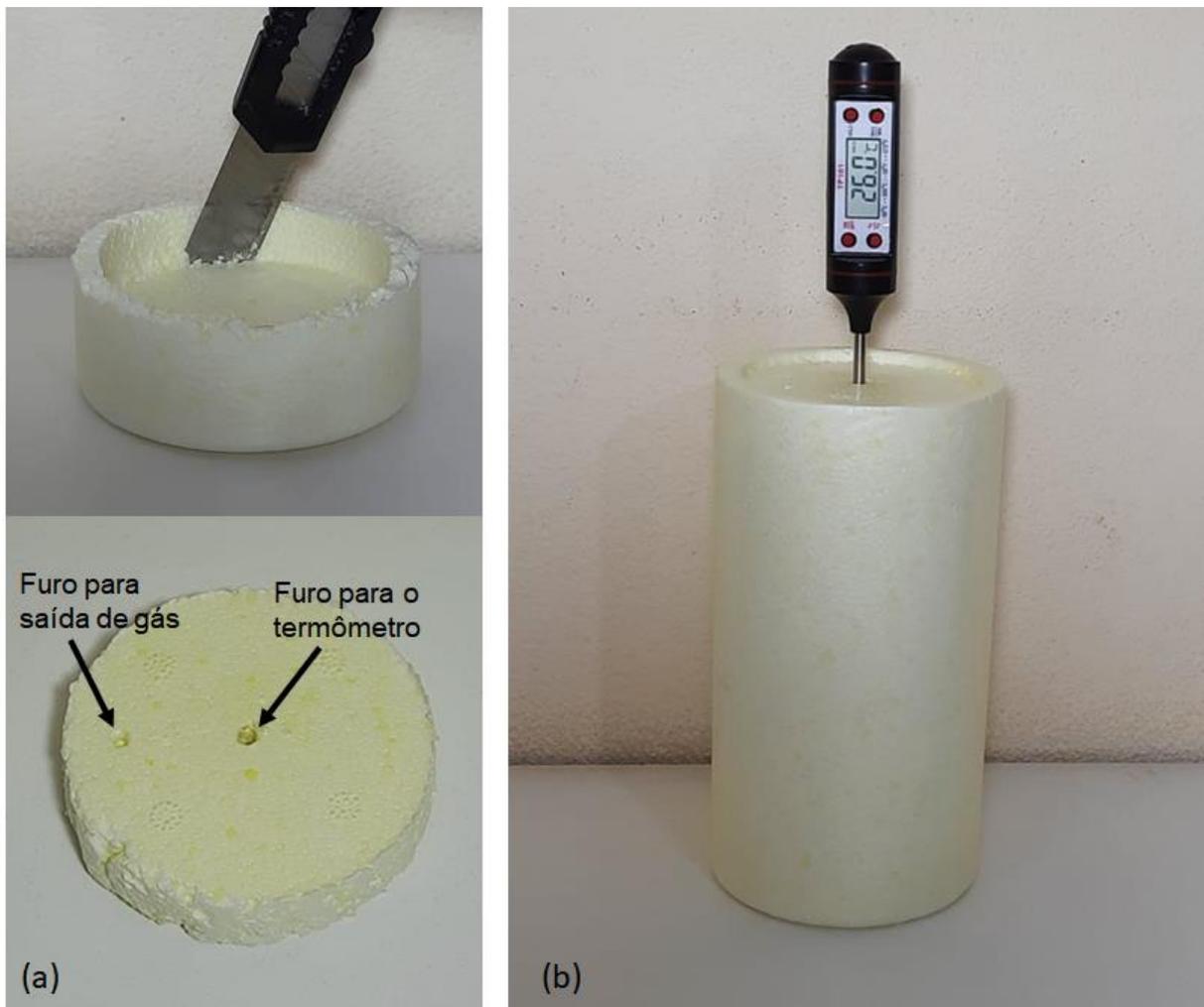
Procedimentos:

- Construa um calorímetro a partir das embalagens térmicas, conforme observado na Figura 42 (b). Para a tampa, deve-se cortar o fundo de uma das embalagens térmicas com auxílio de um estilete, ajustando o seu tamanho a fim de que encaixe dentro da outra embalagem (essa parte deve ser lixada para que fique bem justa ao corpo do calorímetro). Além disso, a tampa precisa ter dois furos: um central, para colocação do termômetro e um furo lateral (menor), para escape do gás produzido durante a reação química, conforme pode ser observado na Figura 42 (a).

---

<sup>17</sup> Adaptado de: BRAATHEN, P. C. **Instrumentação para o ensino de Química: É fazendo que se aprende**. 1ª ed., CRQ-MG, Viçosa/MG, 2016.

Figura 42 — Calorímetro para realização do experimento



Fonte: o autor

- Acrescente 100 mL de água oxigenada 10 volumes.
- Feche o calorímetro, e aguarde o termômetro estabilizar a medição da temperatura. Anote este valor.
- Acrescente um pouco de fermento biológico à amostra de água oxigenada, e feche rapidamente o calorímetro. Agite suavemente, e cuidado para que a mistura reacional não transborde.
- Observe que o termômetro irá variar a temperatura durante a ocorrência do processo químico no interior do calorímetro. Anote o valor de temperatura mais alto, e acompanhe a ocorrência da reação pelo escape de gás oxigênio que ocorre no segundo furo da tampa.

- Acenda um palito de fósforo, e deixe-o queimar um pouco. Em seguida, apague o palito e, estando em brasa, aproxime-o do furo feito na tampa para a saída de gás. Observe e descreva o que ocorre.
- Por que a temperatura aumentou? De onde vem essa energia térmica?

#### Cálculos:

- A água oxigenada 10 volumes apresenta apenas 3% (m/m) de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (peróxido de hidrogênio), que sofre a decomposição constatada nessa prática (o restante é água). A entalpia liberada durante a reação química faz com que a temperatura do restante da mistura aumente. A equação para a reação é apresentada a seguir.



- Considerando que a densidade da solução água oxigenada 10 volumes seja igual à da água pura à temperatura ambiente (1,00 g/mL), bem como o seu calor específico (1 cal/g.°C = 4,18 J/g.°C), podemos utilizar a expressão  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  na determinação da entalpia na forma de energia térmica transferida da reação para o meio.
- O valor encontrado no passo anterior corresponde a uma quantidade de 3 g de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (ou seja, 0,088 mol), que é o que se encontra em 100 mL da solução de água oxigenada 10 volumes utilizada. Assim, a quantidade de energia térmica calculado precisa ter seu valor corrigido para um mol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, a fim de obtermos o  $\Delta H$  da reação.
- Considere que o valor teórico para a decomposição do H<sub>2</sub>O<sub>2(aq)</sub> é de -94 kJ/mol, e compare com o resultado obtido. Apesar de todos os cuidados com a realização do experimento, é muito comum a ocorrência de erros experimentais nesta prática. Pesquise sobre medições calorimétricas e responda: a quais fatores podemos atribuir os erros experimentais desta prática?

### **5.5 Difusão de gases**

Este roteiro consiste em uma proposta de utilização de software educativo para uma melhor ilustração dos efeitos da dispersão de energia nas partículas de um sistema. De forma mais lúdica, espera-se que o estudante demonstre interesse na realização desta prática, experimentando diferentes opções de alterações do sistema (o que é condição limitada na prática 6.3), tais como a atribuição de energias distintas

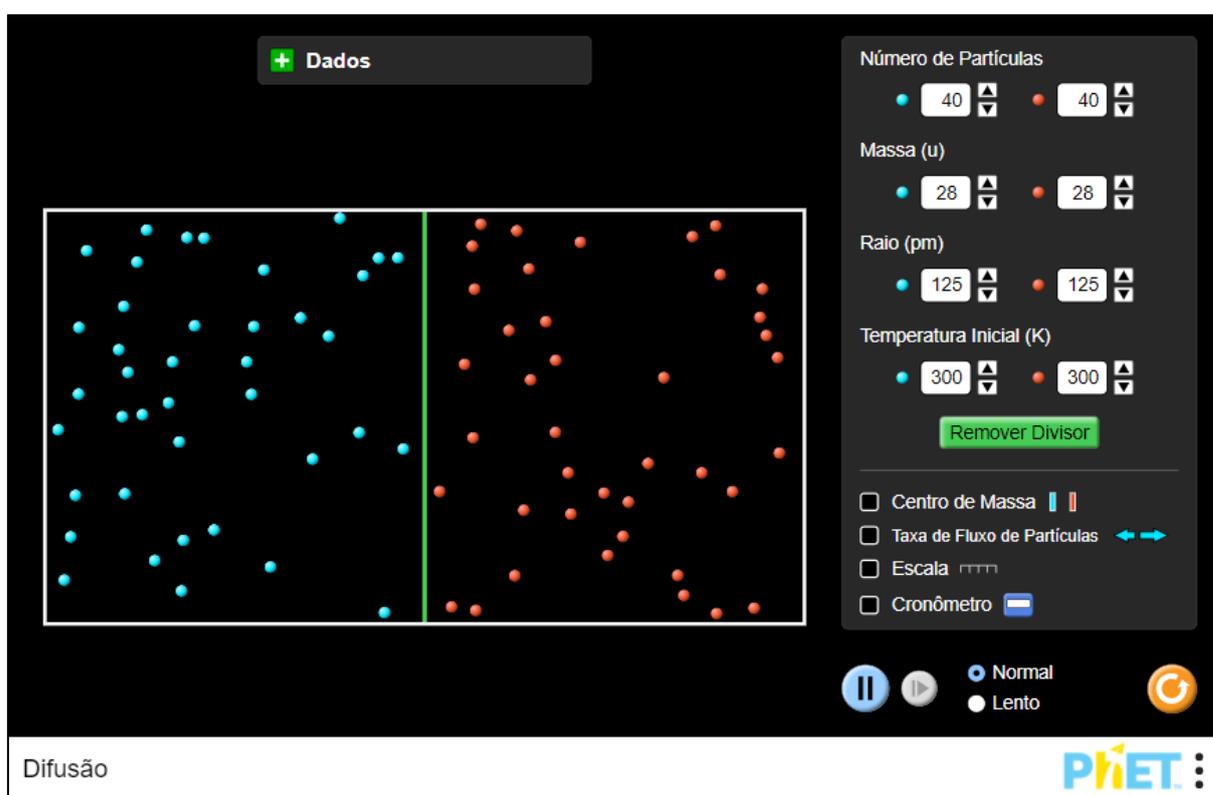
aos subsistemas da montagem e/ou atribuição de valores de massas diferentes para as partículas. Assim, novamente o estudante será instigado a aprofundar seus estudos, esperando que perceba que a dispersão de energia das partículas leva a diferentes configurações do sistema.

Objetivos: ampliar o entendimento do conceito de entropia a partir de simulações computacionais geradas por software educativo, o qual permite visualizar a ocorrência da difusão entre substâncias gasosas.

Procedimentos:

- Acesse o software educativo disponível em [https://phet.colorado.edu/sims/html/diffusion/latest/diffusion\\_pt\\_BR.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/diffusion/latest/diffusion_pt_BR.html), conforme apresentado na Figura 43.

Figura 43 — Software educacional para estudo da difusão de gases.



Fonte: <[https://phet.colorado.edu/sims/html/diffusion/latest/diffusion\\_pt\\_BR.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/diffusion/latest/diffusion_pt_BR.html)>

Acesso em: 17/04/2021.

- No painel de controle que consta à direita, escolha o número de partículas desejado para cada lado do sistema, a massa desejada, o tamanho (raio) e a temperatura inicial das partículas.
- Após isso, clique em “remover divisor”, e observe o que ocorre.
- Para verificar o número de partículas presente em cada lado do sistema, bem como a temperatura dos componentes, clique em “dados”.
- Experimente mexer nos outros controles na parte inferior do painel, para observar outras informações que podem ser obtidas no experimento
- O software pode ser reiniciado para que outros experimentos sejam feitos.
- O que ocorre quando as partículas se chocam?
- É possível (ou provável) que o sistema retorne à situação inicial? Justifique.

## 5.6 Conservação de energia

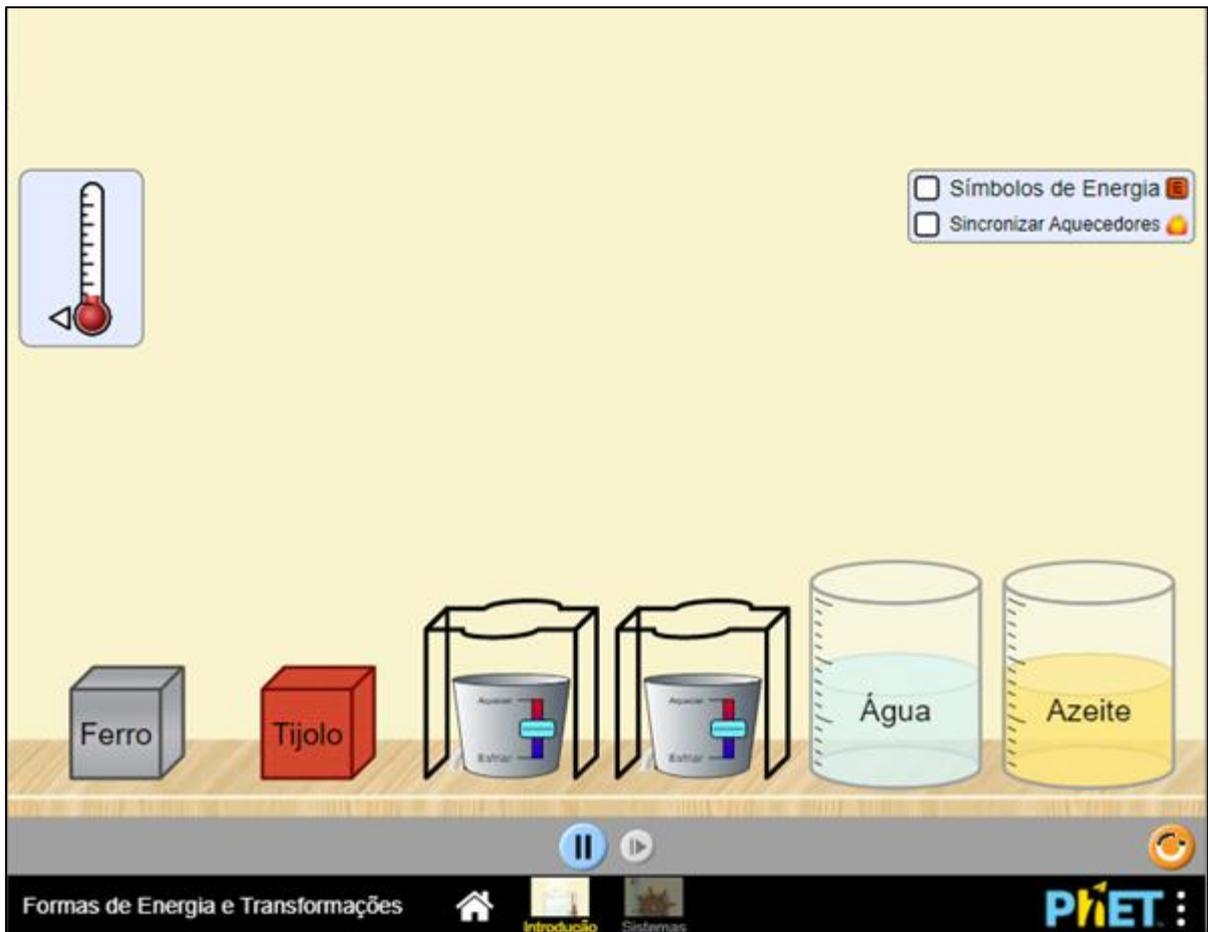
Essa prática se baseia novamente no uso de um software educativo. O aplicativo possui duas etapas. A primeira parte é uma fase introdutória, em que a energia térmica é transferida de uma fonte para outra, ou inclusive entre as amostras, promovendo alterações de temperatura, o que pode ser verificado com termômetros no próprio aplicativo. A segunda parte consiste na transformação de energia entre diferentes formas de geração e utilização, sendo verificados efeitos térmicos, cinéticos ou luminosos no aplicativo. Com a todas essas possibilidades, o estudante poderá estabelecer relações diretas com a Primeira Lei da Termodinâmica.

Objetivos: estudar formas de conversão de energia a partir de simulações computacionais geradas por software educativo, a fim de compreender que a energia não pode ser criada e nem destruída, mas transformada ou transferida.

Procedimentos:

- Acesse o software educativo “Formas de Energia e Transformações”, disponível em [https://phet.colorado.edu/sims/html/energy-forms-and-changes/latest/energy-forms-and-changes\\_pt\\_BR.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/energy-forms-and-changes/latest/energy-forms-and-changes_pt_BR.html). Serão apresentadas duas opções: “introdução” e “sistemas”. Escolha “introdução”, e será aberta a simulação que consta na Figura 44.

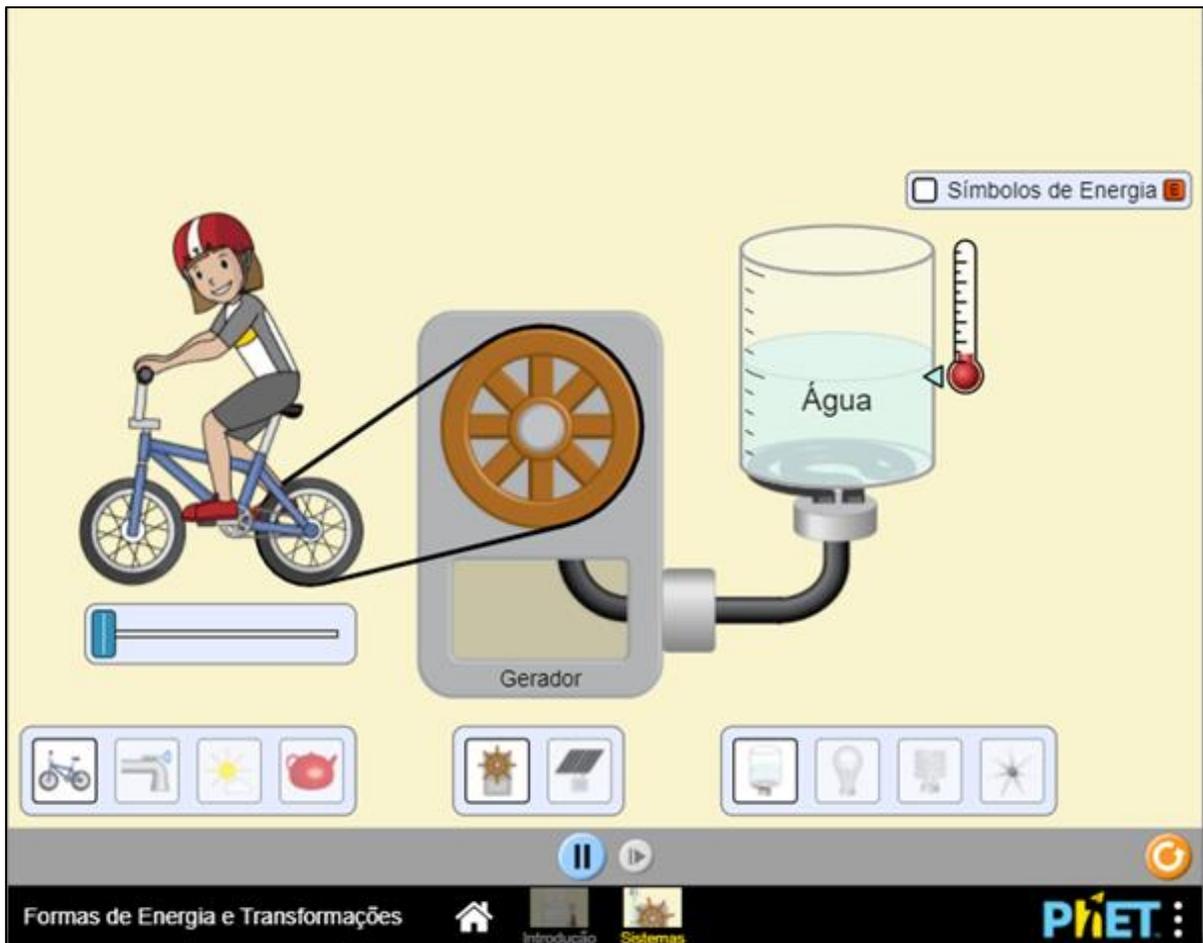
Figura 44 — Software educacional para estudo da conservação da energia.



Fonte: <[https://phet.colorado.edu/sims/html/energy-forms-and-changes/latest/energy-forms-and-changes\\_pt\\_BR.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/energy-forms-and-changes/latest/energy-forms-and-changes_pt_BR.html)> Acesso em: 17/04/2021.

- Nessa tela, pode-se aquecer ou resfriar amostras de água, azeite, ferro ou tijolo. Para experimentar, basta clicar sobre a ilustração de cada amostra, arrastar para a montagem onde é feito o aquecimento ou resfriamento, arrastando-se um botão.
- Experimente medir a temperatura com os termômetros disponíveis.
- Experimente aquecer a amostra de ferro, e, após atingir uma temperatura bem alta, introduzi-la na amostra de água.
- Clique em “Símbolos de energia”, e observe a transferência de energia da chama para a amostra, ou da amostra para o gelo, ou entre uma amostra e outra.
- Após realizar alguns estudos nessa etapa, avance para outra tela, clicando no botão “Sistemas”, localizado na parte inferior. Será aberta a tela que consta na Figura 45.

Figura 45 — Simulações de experimentos sobre transformação da energia.



Fonte: <[https://phet.colorado.edu/sims/html/energy-forms-and-changes/latest/energy-forms-and-changes\\_pt\\_BR.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/energy-forms-and-changes/latest/energy-forms-and-changes_pt_BR.html)> Acesso em: 17/04/2021.

- Arraste o botão que está localizado na parte inferior do ciclista, para que ele comece a pedalar. Sua bicicleta está conectada a um gerador, que converterá o trabalho realizado na bicicleta em energia elétrica para o aquecimento de uma amostra de água.
- A amostra de água pode ser substituída por uma lâmpada incandescente, ou uma lâmpada fluorescente ou um ventilador, conforme pode ser escolhido no painel de controles inferior, localizado à direita.
- O exercício do ciclista não é eterno. Em algum momento ele precisará repor suas energias através da alimentação.
- Para movimentar o gerador, existem outras maneiras disponíveis no software. A seleção pode ser feita no painel de controle inferior, à esquerda. Assim, o ciclista pode

ser substituído por uma fonte de água, uma chaleira (que necessita ser aquecida para gerar vapor e movimentar o gerador) e o sol.

- Caso escolha o sol, perceberá que a energia não poderá ser gerada. É preciso selecionar outra forma de conversão de energia, pois o gerador mecânico não consegue converter a energia luminosa em energia elétrica. Assim, no painel inferior, na região central, selecione o painel fotovoltaico para que a eletricidade possa ser “produzida”.

- Para melhor visualização da transferência de energia entre os elementos do software, clique em “símbolos de energia”, para visualizar como ocorre a transferência de energia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRUÑA, H. D. *Energy in the Age of Sustainability*. Journal of Chemical Education, 2013, vol. 90, p. 1411–1413

AERTS, D; TRUE, B. *Energy Conservation and Renewable Energy in Homes*. Journal of Chemical Education, Vol. 83, N. 10, october 2006, p. 1440-1443.

ANDERSON, G. M. *Thermodynamics of Natural Systems*. Toronto, University of Toronto, 2005.

ATKINS, P. *Four Laws that Drive the Universe*. Oxford, Oxford University Press, 2007.

ATKINS, P; JONES, L. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

ATKINS, P.; PAULA, J. de. **Físico Química**. 10ª ed. Vol. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. **Celsius**. Encyclopedia Britannica, 3 Apr. 2019, Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/Celsius-temperature-scale>>. Acesso: 25/01/2021.

CARDOSO, E. M. (Coord.). **Energia Nuclear: apostila educativa**. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce1302/energia.pdf>>. Acesso em: 24/04/2021.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Alternativas energéticas: Uma visão da Cemig**. Belo Horizonte: CEMIG, 2012.

CROWTHER, J. G. **J. Willard Gibbs**. Encyclopedia Britannica, 2021. Disponível em: <<https://www.britannica.com/biography/J-Willard-Gibbs>>. Acesso em: 23/03/2021.

DAHMEN, S. R. **A obra de Boltzmann em Física**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n. 3, p. 281 - 295, 2006.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica – Átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. 1ª ed. Editora Campus Ltda., Rio de Janeiro, 1979.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. **Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 9ª. ed., Vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

***La Légende des Sciences - Brûler. Direção: Robert Pansard-Besson.*** Produção de Arte France, Caméras Continentales, France 3, La Cinqüième, Les Éditions Audio-Visuelles, Musée du Louvre, Nickelodeon Productions. França: Arte, 1996. Disponível em: < [https://www.youtube.com/watch?v=J5JSWebXms0&ab\\_channel=FredLeCoquil](https://www.youtube.com/watch?v=J5JSWebXms0&ab_channel=FredLeCoquil) >. Acesso em 15/03/2021.

LANGEVIN, P.; **O Valor Educativo da História das Ciências**. Ciência e Técnica: Antologia de Textos Históricos (Ruy Gama), São Paulo, 1993.

MEDEIROS, A. **Entrevista Conde Rumford: da teoria do Calórico ao calor como forma de movimento**. Física na Escola, v. 10, n. 1, 2009. pag. 1-13.

MONK, Paul M. S., ***Physical Chemistry: understanding our chemical world***. Chichester, West Sussex, England; Wiley, 2004.

NÓBREGA, M. L., FREIRE JR., O., PINHO, S. T. R. **Max Planck e os enunciados da segunda lei da termodinâmica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 2, 3601. 2013.

PÁDUA, A. B.; PÁDUA, C. G. de; SILVA, J. L. C. **A História da Termodinâmica Clássica: Uma Ciência Fundamental**. Eduel, 2009, 134p.

PIRES, D. P. L.; AFONSO, J. C.; CHAVES, F. A. B. **A termometria nos séculos XIX e XX**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n. 1, p. 101-114, 2006.

QUADROS, S. **A termodinâmica e a invenção das máquinas térmicas**. São Paulo: Editora Scipione, 1996.

SANTOS, L. F. **Entenda os efeitos da altitude durante um jogo de futebol.** Disponível em: <<https://www.terra.com.br/esportes/futebol/copa-sul-americana/entenda-os-efeitos-da-altitude-durante-um-jogo-de-futebol,5206a8e0361f57f3964a3ea6a9a6dc7az9ulk53t.html>>. Acesso em: 24/06/2021.

SILVA, D. N.; PACCA, J. L. de A. **O Ensino Da Termodinâmica e as contribuições da História da Ciência.** *In*: Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 08, 2011, Campinas. **Atlas do VIII ENPEC.** Campinas: ABRAPEC, 2011. Disponível em: <[http://abrapecnet.org.br/atas\\_enpec/viiienpec/resumos/R0555-1.pdf](http://abrapecnet.org.br/atas_enpec/viiienpec/resumos/R0555-1.pdf)>. Acesso em: 02/03/2020.

***The Story Of Energy With Professor Jim Al-Khalili: Order and Disorder.*** Produção de: Paul Sem. Direção: Nic Stacey. Londres: BBC, 2012. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=qj7HH0PCqIE&ab\\_channel=Spark](https://www.youtube.com/watch?v=qj7HH0PCqIE&ab_channel=Spark)>. Acesso em: 11/08/2020.

**Uma Verdade Inconveniente.** (An inconvenient truth). Dirigido por Davis Guggenheim. EUA: Paramount. 2006. 100 min. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=MwxMrnDkbPU&ab\\_channel=YouTubeMovies](https://www.youtube.com/watch?v=MwxMrnDkbPU&ab_channel=YouTubeMovies)>. Acesso em: 20/04/2021.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; **Meteorologia e Climatologia.** Versão Digital 2, Recife, 2006. Disponível em: [https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA\\_E\\_CLIMATOLOGIA\\_VD2\\_Mar\\_2006.pdf](https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf). Acesso em: 15/09/2020.

WEISSTEIN'S, E. W. ***Kelvin, Lord William Thomson (1824-1907).*** World of Scientific Biography. 2007. Disponível em: <<https://scienceworld.wolfram.com/biography/Kelvin.html>>. Acesso em: 18/03/21.

WILLIAMS, L. P. ***Hermann von Helmholtz.*** *Encyclopedia Britannica*, September 4, 2020. Disponível em <<https://www.britannica.com/biography/Hermann-von-Helmholtz>>. Acesso em: 18/03/21.