


Sequência Didática para Abordagem de Conceitos da Termodinâmica

Termodinâmica

<p>A Eolípila (Máquina de Heron)</p> 	<p>Revolução Industrial</p> 
<p>Será que a máquina de Heron pode ser considerada uma máquina térmica?</p> 	<p>Pássaro Sedendo</p> 

123 456 789 012

PROF MAURO RODRIGUES
PROF. DR. JAMES ALVES DE SOUZA.

VOL. 1
LIMITED EDITION

Conteúdo

1 EXPERIMENTOS UTILIZADOS	6
1.1 MÁQUINA DE HERON OU EOLÍPILA	6
1.2 O EXPERIMENTO DO PÁSSARO SEDENTO	10
2 CONCEITOS DE FÍSICA	15
2.1 EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE CALOR	15
2.2 CALÓRICO	16
2.3 O USO CORRETO DA TERMINOLOGIA CALOR	17
2.4 MÁQUINAS TÉRMICAS E A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	19
2.5 SADI CARNOT E A BUSCA POR MÁQUINAS TÉRMICAS MAIS EFICIENTES	20
2.6 A TERMODINÂMICA	28
2.7 LEI ZERO DA TERMODINÂMICA E A DEFINIÇÃO DE TEMPERATURA	30
2.8 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	31
2.9 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E O CONCEITO DE ENTROPIA	32
3 SEQUÊNCIA DIDÁTICA	35
3.1 PRIMEIRA PRÉ-AULA	36
3.2 PRIMEIRA AULA	38
3.3 SEGUNDA PRÉ-AULA	38
3.4 SEGUNDA AULA	39
REFERÊNCIAS	45

PREFÁCIO

Este produto educacional foi desenvolvido com o objetivo de ser viável para ser executado em sala de aula no tempo de aula de qualquer escola, mesmo aquelas que adotam um sistema apostilado com conteúdos restritos e voltados principalmente para a realização de vestibulares.

Na sequência didática proposta utilizamos dois experimentos para abordagem de temas da Termodinâmica, como temperatura, calor, energia, máquinas térmicas, Lei Zero, Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica e até mesmo conceitos pouco explorados no Ensino Médio, como a entropia. O método da experimentação foi realizado de maneira demonstrativa em alguns momentos e com a participação dos alunos em outros. No primeiro experimento exploramos o funcionamento da Eolípila de Heron, a qual é usualmente tratada como uma máquina térmica em alguns livros didáticos. Sua classificação como máquina térmica foi colocada à prova neste experimento pela variação da temperatura externa ao dispositivo, fonte fria do sistema, para verificar a influência desta no rendimento da Eolípila. Devido à dificuldade de realização deste procedimento, este foi filmado fora do ambiente escolar e apresentado aos alunos na forma de vídeo para discussão. Os resultados mostraram que a Eolípila não pode ser classificada como uma máquina térmica de acordo com o que é estabelecido pela Segunda Lei da Termodinâmica. Um dispositivo que pode ser classificado de acordo com tais princípios é o pássaro sedento. Este experimento foi realizado com a participação dos alunos, considerando também variações da temperatura da fonte fria durante o seu funcionamento. Diferentemente da Eolípila, o rendimento do pássaro sedento foi dramaticamente afetado pelas condições experimentais impostas.

Para facilitar a discussão dos temas e para discutir com os alunos sobre o fazer ciência, mostrando como este é um processo lento, a realidade dos cientistas diante dos contextos sociais e políticos da época e como o trabalho destes é repleto de tentativas e erros como qualquer outro, exploramos a contextualização histórica na elaboração da Segunda Lei da Termodinâmica com o trabalho de Carnot.

O método utilizado durante a aplicação do nosso produto educacional foi o *Flipped Classroom* ou sala de aula invertida. Este foi escolhido para conferir mais responsabilidades e autonomia aos alunos durante o processo de ensino e aprendizagem. Todos estes procedimentos

foram favoráveis para conduzir uma excelente discussão sobre os conceitos da Termodinâmica propostos, a definição de máquina térmica e também para o estabelecimento de um ambiente mais motivador e colaborativo entre o professor e os alunos.

Esperamos que este produto educacional seja útil para complementar as aulas de Termodinâmica dos professores do Ensino Médio e que o mesmo seja um bom exemplo de execução do método da sala de aula invertida, o qual tem se apresentado como uma excelente alternativa metodológica para a melhoria do ensino de Física.

Para dúvidas ou informações adicionais, envie um e-mail para
maurofut@gmail.com

Os autores.

Este material foi produzido no Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da
Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba (PROFIS-So)
Sorocaba, fevereiro de 2021.

1 EXPERIMENTOS UTILIZADOS

Para discutir o que é uma máquina térmica de acordo com o que é estabelecido pela Segunda Lei da Termodinâmica nós utilizamos os experimentos da Eolípila de Heron e do Pássaro Sedento na nossa sequência didática.

A Segunda Lei da Termodinâmica trata da influência dos reservatórios térmicos no rendimento e, conseqüentemente, na possibilidade de funcionamento de uma máquina térmica. Realizamos um experimento com a Eolípila para verificar se seu rendimento se alterava com a mudança de temperatura dos supostos reservatórios térmicos que este experimento teria. Os resultados mostraram que a Eolípila não pode ser considerada como uma máquina térmica de acordo com os conceitos estabelecidos pela Termodinâmica. Mas como podemos classificar este dispositivo? A Eolípila seria o primeiro protótipo da história de uma turbina de ação e reação a vapor, por se tratar de uma máquina que utiliza energia térmica e vapor pressurizado para a produção de movimento.

Para o Pássaro Sedento, nós utilizamos um procedimento semelhante, conduzindo um experimento para verificar possíveis variações no rendimento do pássaro pela modificação da temperatura de sua fonte fria. Os resultados mostraram que este experimento é um excelente exemplo de máquina térmica, podendo ser definido e testado como tal de acordo com o que é estabelecido pela Segunda Lei da Termodinâmica.

Nas próximas seções apresentamos maiores detalhes sobre como montar uma Eolípila com materiais de fácil aquisição e os experimentos executados com a Eolípila e o Pássaro Sedento para verificar o funcionamento de ambos sob a óptica da Termodinâmica.

1.1 MÁQUINA DE HERON OU EOLÍPILA

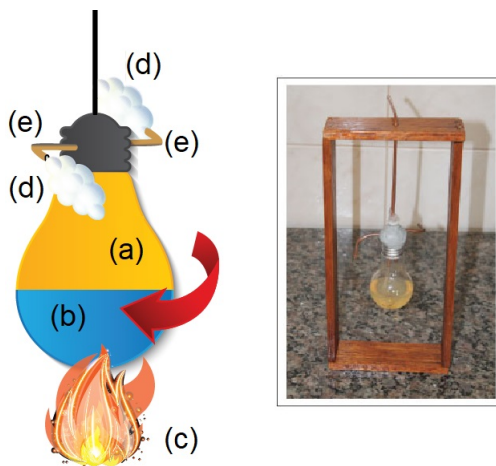
O procedimento experimental realizado com a Eolípila não é fácil de ser reproduzido em sala de aula, pois foi necessário utilizar um forno de cozinha aberto para criar uma atmosfera externa à mesma com uma temperatura de aproximadamente 80°C. Por isso, este foi realizado antes da aula e todo o procedimento foi gravado em vídeo para mostrar os resultados aos alunos.

A Eolípila utilizada em nossa sequência didática foi construída com o bulbo de uma lâmpada incandescente, bastando retirar o soquete da mesma, dado pela parte metálica, junto com o filamento de tungstênio. O soquete pode ser reaproveitado para fazer o suporte de suspensão da máquina. O bulbo compõe a caldeira do sistema para produzir vapor de água, que é a substância de trabalho utilizada para obtenção de força motriz. Os melhores resultados foram obtidos colocando-se água até a metade da capacidade máxima do bulbo. Para a vedação da extremidade superior do bulbo utilizamos uma rolha. Esta foi perfurada em dois pontos para a instalação de dois canos de cobre. Cada cano foi colocado em uma posição específica, conforme mostrado na figura 1, para que o escape do vapor seja feito em pontos diametralmente opostos para colocar o bulbo em rotação.

O reservatório térmico de maior temperatura (T_1), ou fonte quente, é constituído pela caldeira, a qual é alimentada pela chama de uma vela, e o reservatório térmico de menor tempera-

tura (T_2), ou fonte fria, é composto pela atmosfera que envolve o aparato. O bulbo é suspenso por um fio inextensível preso ao soquete da lâmpada de forma que permita que a mesma gire livremente em torno do ponto de apoio. Para verificar a influência da temperatura da fonte térmica no rendimento da Eolípila nós variamos o valor de T_2 .

Figura 1: À esquerda apresentamos o esquema ilustrativo da Eolípila de Heron montada utilizando um bulbo de lâmpada incandescente (a) como caldeira. A água (b) é colocada até a metade do bulbo formando a fonte quente do sistema, a qual é alimentada pela chama de uma vela (c). O vapor (d) proveniente da evaporação da água escapa através de dois bocais (e), produzindo um binário fazendo com que o bulbo gire. À direita apresentamos uma imagem da Eolípila utilizada na aplicação do nosso produto educacional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A diferença entre o rendimento real da máquina, $\eta_{real} = \frac{W}{Q_1}$, é naturalmente menor do que o valor máximo obtido teoricamente, $\eta_{Max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$, para uma máquina reversível. A variação esperada da eficiência da Eolípila, devido à variação de T_2 , seria observada por alguma variação significativa na velocidade de rotação do bulbo, pois estaríamos verificando a influência direta da fonte fria na força motriz do dispositivo. O número de rotações realizadas pela máquina em um intervalo de tempo específico foi medido a partir do momento em que seu movimento se tornou estacionário, ou seja, não analisamos o movimento transiente de rotação.

Para isso foram realizados quatro procedimentos idênticos variando-se apenas a temperatura externa (T_2) do sistema, sendo considerados os valores $T_2 = 15, 27$ e 80°C , ou em Kelvin $T_2 = 288, 15, 300, 15$ e $353, 15\text{K}$. A temperatura interna do bulbo, fonte quente, foi considerada $T_1 = 96^\circ\text{C}$ ($369, 15\text{K}$), devido à evaporação da água no local em que o experimento foi realizado.

Após o sistema atingir um movimento aproximadamente estacionário, foram cronometrados 20 s em cada ensaio para a contagem do número de rotações realizadas pelo bulbo. Os resultados são apresentados na tabela 1, junto com os valores de η_{Max} para os mesmos valores de temperatura T_2 considerados em nosso experimento. Estes resultados são apresentados no gráfico da figura 2 para uma comparação qualitativa sobre o comportamento do sistema, experimental e teórico, em função da temperatura da fonte fria T_2 .

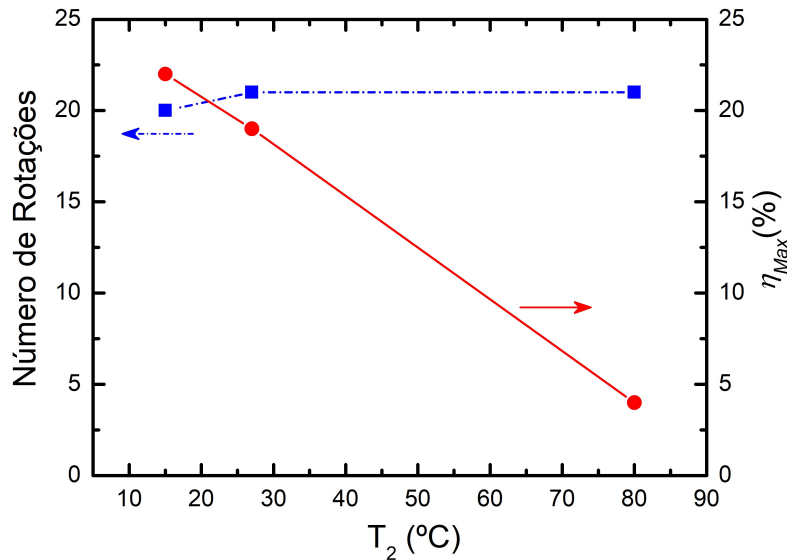
Pelos resultados obtidos nota-se que as médias das rotações são aproximadamente as mesmas para as diferentes temperaturas da fonte fria. Isso significa que a temperatura da atmosfera envolvendo a Eolípila não exerce qualquer influência em sua força motriz. Pelo enunciado de Kelvin da segunda lei “é impossível realizar um processo cujo o único efeito seja remover

energia através de calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de energia através de trabalho”, vemos que a Eolípila de Heron não pode ser considerada como uma máquina térmica, pois esta estaria operando apenas com uma fonte térmica. A Eolípila não é, de fato, uma máquina térmica e sim uma turbina de ação e reação. Como os bocais são fixados ao bulbo, o conjunto gira em torno de um ponto fixo devido à reação da saída de vapor. Este resultado foi comparado graficamente de maneira qualitativa, veja figura 2, com o perfil da curva do rendimento máximo de uma máquina de Carnot em função da temperatura. Se considerarmos, por simplicidade, o trabalho realizado pela Eolípila como sendo diretamente relacionado com a rotação da mesma, observa-se que o seu rendimento não é afetado por variações na temperatura da fonte fria.

Tabela 1: Número de rotações realizadas pelo bulbo contabilizados a cada 20 s para diferentes valores da temperatura da fonte fria T_2 , em Kelvin. Apresentamos também a média simples do número de rotações para os quatro procedimentos realizados e o valor teórico do rendimento máximo η_{Max} da máquina de Carnot para os mesmos valores de T_2 considerados no experimento. O valor da temperatura da fonte quente para o cálculo de η_{Max} foi de $T_1 = 96^\circ C = 369,15K$.

$T_2(K)$	288,15	300,15	353,15
Procedimento 1	20	20	21
Procedimento 2	19	20	20
Procedimento 3	21	21	19
Procedimento 4	20	22	22
Média Simples	20	21	21
η_{Max} (%)	22	19	4

Figura 2: Médias das rotações realizadas pelo bulbo nos quatro procedimentos realizados em um intervalo de tempo de 20 s, à esquerda, e valor máximo do rendimento da máquina de Carnot η_{Max} , à direita, em função da temperatura T_2 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Segunda Lei da Termodinâmica, qualquer mudança na temperatura dos reservatórios de uma máquina térmica deveria, necessariamente, implicar em uma mudança no rendimento da mesma. No gráfico da figura 2 observa-se que para uma máquina reversível quanto menor

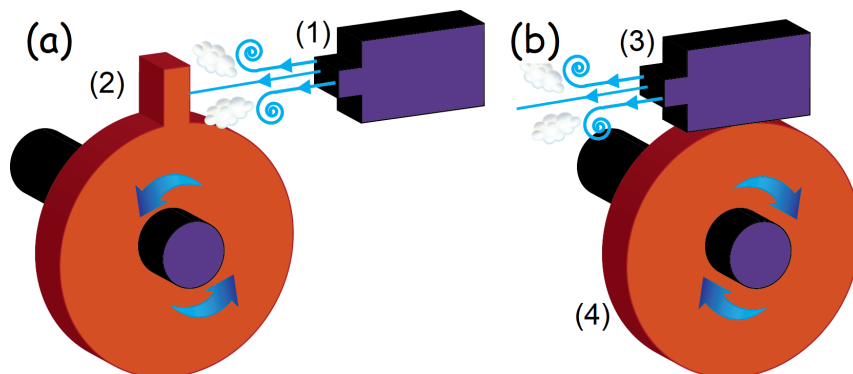
(maior) for a diferença de temperatura entre os reservatórios menor (maior) deve ser o rendimento da máquina. Quando aumentamos a temperatura da fonte fria (T_2) no experimento da Eolípila, diminuindo a diferença de temperatura entre os reservatórios, deveria ser possível observar alguma modificação no número de rotações em função do tempo se esta fosse uma máquina térmica. Ou seja, deveríamos observar algum decréscimo no número de rotações do bulbo. No nosso experimento esse comportamento não foi observado, com a rotação do bulbo permanecendo praticamente inalterada, reforçando dessa forma, que a Eolípila de Heron não é uma máquina térmica.

Como pode ser classificada então a máquina de Heron? Devido ao seu funcionamento, a Eolípila pode ser utilizada como um protótipo de turbina de ação e reação. Uma turbina, especificamente, é um motor rotativo que converte energia proveniente de uma corrente de água, vapor de água ou gás, em energia mecânica. O elemento básico da turbina é uma roda ou rotor composto por paletas, hélices, lâminas ou cubos colocados ao redor de sua circunferência, de forma que o fluido em movimento produza uma força tangencial que impulsiona a roda, fazendo-a girar. A energia mecânica adquirida é transferida através de um eixo para movimentar uma máquina, um compressor, um gerador elétrico ou uma hélice.

O princípio básico que rege o movimento de uma turbina é o da ação e reação. Apesar de possuir um mesmo princípio de funcionamento tais turbinas são classificadas como *turbina de ação* e *turbina de reação*, dependendo da forma como é feita a conversão da energia térmica em energia cinética. A classificação da diferença de tais turbinas não está no escopo do nosso trabalho. Maiores detalhes sobre o assunto podem ser encontrados na referência (PEXE, 2020). Neste trabalho nos referiremos à turbina de ação e reação apenas como turbina AR.

De maneira bastante simplificada para fins didáticos, uma turbina AR pode ser constituída por um expansor fixo ou móvel. No caso em que o expansor é fixo a força de ação do jato de vapor é dirigida contra um anteparo móvel para deslocar o mesmo na direção do jato para produzir movimento, conforme ilustrado na figura 3 (a). Se, entretanto, o expansor for móvel, a força de reação que atua sobre ele fará com que o mesmo se desloque na direção oposta do jato de vapor, veja ilustração na figura 3 (b).

Figura 3: Esquema ilustrativo de uma turbina AR. Em (a) um expansor fixo (1) expela vapor na direção de uma pá (2) que gira um eixo perpendicular. Em (b) temos um expansor móvel (3) que se move junto com o eixo (4) na direção contrária do jato de vapor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Eolípila de Heron se aproxima mais de uma turbina AR com expansor móvel, pois o

sistema composto pelo bulbo e pelas válvulas de escape do vapor gira como um todo em torno de seu eixo de simetria se deslocando na direção oposta do jato de vapor. A partir desse experimento outros tópicos da Física podem ser explorados junto com a Termodinâmica como as leis de Newton, movimento de rotação, torque de uma força, entre outros.

Mostrar a Eolípila para os alunos antes do Pássaro Sedento durante a definição e tratamento de máquinas térmicas foi muito interessante, porque foi criado um desafio e até mesmo um conflito sobre o que é uma máquina térmica de acordo com a Termodinâmica. Para a maioria das pessoas, quando falamos em máquina térmica, naturalmente surge a ideia de um dispositivo que contém uma caldeira, fogo e vapor para produzir movimento, como uma locomotiva a vapor (Maria Fumaça). Isso é observado na Eolípila e não é observado, pelo menos a olhos nus, no Pássaro Sedento. Mas ao contrário da Eolípila, o Pássaro Sedento é o experimento que pode ser classificado como máquina térmica de acordo com o que é estabelecido pela Termodinâmica. Os alunos acharam isso surpreendente, sendo de extrema relevância para auxiliar os mesmos a entenderem melhor a Segunda Lei da Termodinâmica.

1.2 O EXPERIMENTO DO PÁSSARO SEDENTO

O experimento ou brinquedo usualmente chamado de pássaro sedento ou “*drinking bird*” é constituído por dois bulbos esféricos de vidro de mesmo tamanho ligados por um tubo fino, também de vidro. O bulbo inferior e o tubo da configuração que formam o corpo do pássaro, ficam parcialmente preenchidos com um líquido de cor avermelhada, altamente volátil, chamado diclorometano (CH_2Cl_2), cujo ponto de ebulição é em torno de $40^\circ C$. Dessa maneira é possível notar duas interfaces atmosfera-líquido no interior do recipiente de vidro. Uma no bulbo inferior e outra no bulbo superior. Como o tubo fica parcialmente preenchido com o líquido, as duas atmosferas formadas não se comunicam. O bulbo superior, que compõe a cabeça do pássaro, é coberto por um material poroso para dar a aparência de um pássaro, com o pico, olhos e uma cartola, como mostrado na figura 4.

O corpo do pássaro é preso a uma base, no formato de pernas, por um pivô. Este faz com que o aparato de vidro gire livremente, como ilustrado na figura 5.

Quando o pássaro se inclina para frente ele encosta o bico em um recipiente contendo água, passando a impressão de que o mesmo está bebendo água para saciar sua sede. Em seguida ele retorna à sua posição inicial realizando um movimento cíclico de vai e vem.

Mas por que ocorre esse movimento? Qual a condição inicial para que o movimento se inicie?

Para que o movimento periódico comece não é necessário dar nenhum impulso inicial no pássaro. Basta segurar o bico do mesmo no copo contendo água para que o material que compõe a cabeça do pássaro seja molhado. Em seguida é só abandonar o pássaro e esperar. Antes desse procedimento ser realizado, tanto o líquido quanto as atmosferas formadas no recipiente de vidro estão em equilíbrio térmico com sua vizinhança, caracterizada pela temperatura ambiente local. O centro de gravidade do pássaro está próximo ao bulbo inferior, uma vez que a maior parte do líquido se encontra nesta região, como ilustrado na figura 6(a). O sistema se encontra em

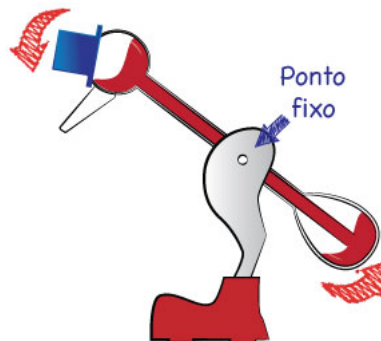
equilíbrio estático, pois a soma de todas as forças se anulam e a soma de todos os momentos também se anulam.

Figura 4: Fotografia do brinquedo pássaro sedento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5: Ilustração do corpo do pássaro sedento executando seu movimento característico em torno de um ponto fixo.



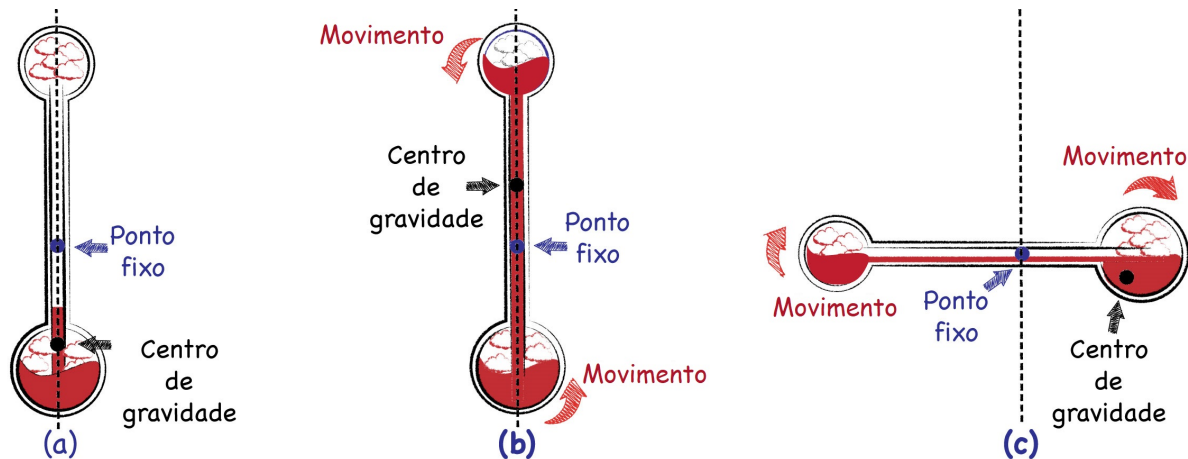
Fonte: Elaborado pelo autor.

Se a umidade do ar não estiver muito alta, a água utilizada para molhar o bico do pássaro começa a evaporar com o passar do tempo. O processo de evaporação faz com que a temperatura da atmosfera no bulbo superior diminua. Conseqüentemente, essa atmosfera sofre uma contração fazendo com que haja uma diferença de pressão entre a parte superior e inferior do corpo do pássaro. Isso faz com que o líquido do bulbo inferior suba deslocando a posição do centro de massa do sistema para cima, conforme ilustração da figura 6(b). Como resultado, o pássaro executa um movimento de rotação em torno do ponto fixo se inclinando na direção do copo contendo água.

A altura do copo deve ser estabelecida para o pássaro atingir a posição horizontal, para que o líquido em seu interior fique nivelado com os dois bulbos criando uma única interface líquido-atmosfera, veja ilustração na figura 6(c). Dessa forma as pressões nos dois bulbos se igualam

fazendo com que o pássaro volte à sua configuração inicial, como na figura 6(a), reiniciando o ciclo.

Figura 6: Descrição do movimento do pássaro sedento após o material que compõe o seu bico ser molhado. Em (a) ilustramos o momento inicial em que todo o líquido está no bulbo inferior do pássaro. À medida que a água que molhou o pico do pássaro evapora a temperatura da atmosfera no interior do bulbo superior começa a diminuir ocasionando uma compressão do gás nesta região. Isso faz com que a pressão no bulbo superior seja menor do que no bulbo inferior deslocando o líquido pela coluna de vidro até o bulbo superior, como mostrado em (b). Esse movimento ocorre porque o centro de gravidade do pássaro é deslocado à medida que o líquido sobe. (c) Quando o pássaro desce até o copo é formada uma única interface líquido-atmosfera fazendo com que a pressão seja a mesma em todo o sistema. Consequentemente, o pássaro retorna à sua configuração inicial reiniciando o ciclo. Este movimento ocorre enquanto o processo de evaporação for mantido na região da cabeça do pássaro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

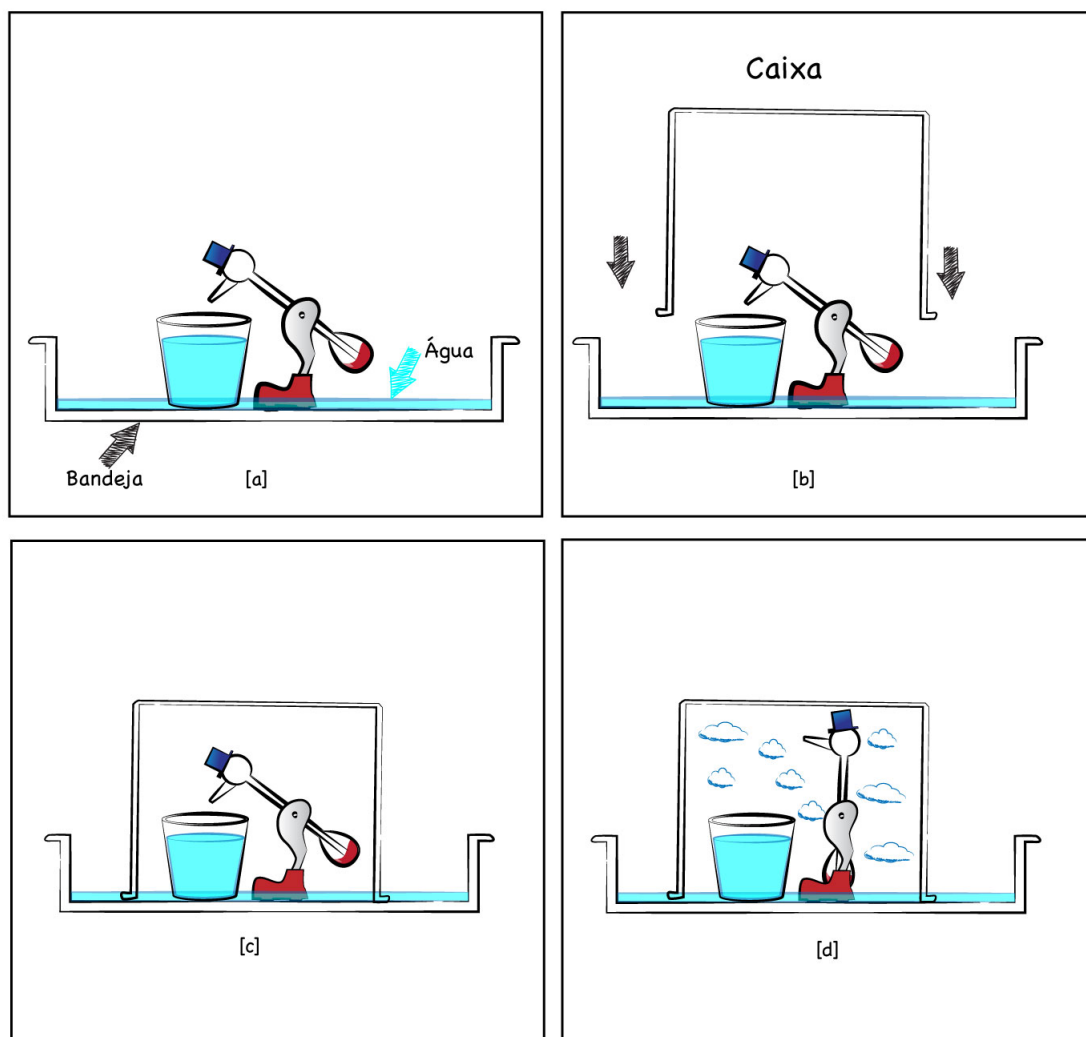
Vemos portanto que o pássaro executa um movimento periódico como em uma máquina térmica. O sistema também possui duas fontes térmicas, uma quente, dada pela atmosfera à volta do experimento, e uma fria, dada pela cabeça do pássaro. A diferença de temperatura entre as duas fontes faz com que o centro de massa do pássaro se movimente periodicamente através de um ciclo termodinâmico cuja substância de trabalho é a atmosfera formada no interior do pássaro.

Para verificar se o dispositivo do pássaro sedento pode ser considerado como uma máquina térmica de acordo com o estabelecido pela Segunda Lei da Termodinâmica nós não variamos a temperatura da fonte fria diretamente, como nós fizemos no experimento da Eolípila. Neste caso nós saturamos a atmosfera em volta do pássaro com vapor de água para impedir que a água na cabeça do mesmo evapore e a temperatura nesta região diminua. O processo de evaporação é responsável por criar uma diferença de temperatura entre as regiões superior e inferior do pássaro fazendo com que uma diferença de pressão seja estabelecida no interior do dispositivo de maneira que a posição do seu centro de massa varie e o pássaro se movimente. Inicialmente, o dispositivo foi montado sobre uma bandeja plástica com uma pequena quantidade de água, formando um espelho d'água. Encostamos a cabeça do pássaro na água dentro do copo para que o processo de evaporação iniciasse e o movimento periódico fosse estabelecido.

Como o sistema foi colocado para funcionar ao ar livre, o espelho d'água não exerceu uma influência significativa no seu funcionamento e o intervalo de tempo de cada ciclo foi medido para um total de 20 ciclos. Essa configuração inicial foi escolhida para facilitar o procedimento

seguinte, o qual consistiu em cobrir o pássaro com uma caixa de plástico transparente para que a atmosfera em torno do mesmo ficasse saturada com vapor de água. O espelho d'água foi útil para vedar o sistema e evitar que o vapor de água se dispersasse. A umidade do ar no interior da caixa aumentou gradativamente fazendo com que o tempo de cada ciclo do pássaro aumentasse significativamente. Uma ilustração das etapas do procedimento experimental adotado é apresentada na figura 7.

Figura 7: Ilustração do procedimento experimental adotado para verificar se o pássaro sedento é uma máquina térmica, mostrando em (a) o dispositivo montado em uma bandeja contendo um espelho d'água, em que a quantidade de água deve ser suficiente para ficar espalhada por toda a bandeja. Em seguida é colocada uma caixa transparente sobre o pássaro, (b) e (c), para formar uma atmosfera de vapor de água (d) em torno do pássaro para impedir que a água em sua cabeça seja evaporada fazendo com que o processo responsável para a produção de movimento seja cessado.

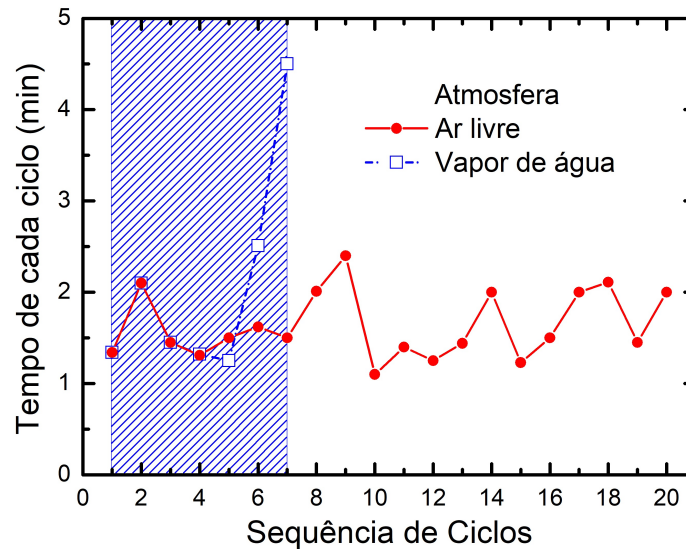


Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo medido de cada ciclo do pássaro é apresentado no gráfico da figura 8 para 20 ciclos. Para a configuração inicial o pássaro opera o seu movimento ciclicamente por tempo indeterminado. Note que o intervalo de tempo para cada ciclo não é constante, pois nós não temos o controle absoluto da atmosfera em torno do mesmo, de maneira que o processo de evaporação que ocorre na cabeça do pássaro pode sofrer flutuações, ainda mais com a lâmina

d'água presente. Quando a caixa de plástico foi introduzida o tempo de execução do movimento aumentou consideravelmente no sexto ciclo, veja área hachurada no gráfico da figura 8, com o pássaro cessando o seu movimento no sétimo ciclo.

Figura 8: Tempo de cada ciclo executado pelo pássaro sedendo operando ao ar livre e coberto com a caixa plástica formando uma atmosfera de vapor d'água saturado (área hachurada). Note que o movimento neste caso cessa no sétimo ciclo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse procedimento faz com que a fonte fria do sistema seja completamente eliminada, mostrando claramente a influência da mesma no movimento do pássaro. Este resultado deixa claro que este experimento pode ser utilizado didaticamente como um excelente exemplo de máquina térmica que opera ciclicamente com duas fontes térmicas. Ao retirar a caixa de plástico nota-se imediatamente que o líquido dentro do pássaro começa a subir, dando início ao ciclo novamente. A retirada da caixa faz com que a atmosfera de vapor d'água ao redor do pássaro diminua, de maneira que a diferença de temperatura entre a região superior e inferior do pássaro seja restabelecida e a máquina térmica volte a operar, apresentando um rendimento diferente de zero.

Para facilitar a visualização da formação de uma atmosfera saturada de vapor d'água em torno do pássaro quando colocamos a caixa de plástico podemos acelerar o processo. Isto pode ser feito colocando-se água a 60°C no espelho d'água. É interessante deixar o pássaro realizar alguns ciclos, sem colocar a caixa. A frequência de oscilação do pássaro não sofre alterações significativas com a água aquecida no espelho d'água. Porém, quando cobrimos o pássaro com a caixa plástica o pássaro para de oscilar quase que imediatamente como consequência da grande quantidade de vapor proveniente da água quente, acelerando o processo de saturação do ar no interior da caixa. Como utilizamos uma caixa transparente foi possível verificar claramente o fluido vermelho no interior do brinquedo descer até ficar no nível mais baixo possível. Uma foto do pássaro coberto pela caixa é apresentada na figura 9 para mostrar a visibilidade do experimento. Ao retirar a caixa, o vapor de água se dispersa, o fluido do pássaro volta a subir imediatamente e o movimento cíclico é retomado.

As duas montagens experimentais propostas no nosso produto educacional nos possibilitou

discutir com os alunos de maneira mais clara o significado da Segunda Lei da termodinâmica com enfoque no rendimento de uma máquina térmica. No caso da Eolípila podemos mostrar para os alunos que nem toda máquina que possui uma fonte de energia térmica pode ser considerada como uma máquina térmica. Com o experimento do pássaro sedento é possível mostrar que uma alteração em um dos reservatórios térmicos do sistema pode modificar de maneira significativa o rendimento da máquina.

Figura 9: Fotografia do pássaro sedento coberto pela caixa plástica para formar uma atmosfera saturada de vapor d'água em sua volta. Note que mesmo com a caixa é possível ter total visibilidade do experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2 CONCEITOS DE FÍSICA

Nas próximas seções apresentamos os conceitos que podem ser abordados durante a aplicação deste produto. Além da experimentação, nós exploramos a História da Ciência para ser um dos norteadores da nossa proposta didática. A partir dessa abordagem é possível contextualizar o momento histórico vivido por Carnot na elaboração de sua teoria, publicada em 1824, que culminou no estabelecimento da Segunda Lei da Termodinâmica com os trabalhos de William Thomson e Clausius, permitindo construir com os alunos até mesmo o conceito de **Entropia**, decorrente da Segunda lei, o qual é pouco abordado no Ensino Médio.

2.1 EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE CALOR

Na Grécia, por volta de 490 a.C., Empédocles sintetizou o pensamento de vários filósofos anteriores a ele, com a doutrina dos quatro elementos imutáveis: terra, fogo, ar e água. Esses elementos não devem ser confundidos com as substâncias ordinárias que possuem os mesmos nomes. Estes seriam “as raízes de todas as coisas”, com cada substância material sendo constituída por eles e regidas por duas forças, o amor e o ódio (atração e repulsão). As características relacionadas a quente, frio, úmido e seco eram associadas aos elementos citados (PIRES, 2008).

O conceito de quente e frio dominou a Filosofia Natural até a revolução científica, quando surge a necessidade de mensurar e quantificar os fenômenos observados. Essa “crise de consciência” europeia faz surgir uma nova maneira de ver o mundo, que vai mudar a posição do homem de espectador para senhor da Natureza (KOYRÈ, 2001). Novos instrumentos de medição para a análise de fenômenos foram desenvolvidos.

Neste sentido, Galileu Galilei contribuiu de maneira significativa para mudar a forma de se pensar ciência na época. Ele encarava a Filosofia Natural como uma forma de entender a Natureza partindo de experiências que lhe permitiram expressar resultados por meio da matemática. Assim, surgiu a necessidade de encontrar uma maneira de medir a temperatura quantitativamente. A invenção do termoscópio foi o primeiro passo nessa direção. Este era constituído de um bulbo contendo um tubo longo com um extremo mergulhado em um líquido (PIRES, AFONSO e CHAVES, 2006). Uma pequena quantidade de ar era retirada do tubo, a diferença de pressão faz com que o líquido suba, conforme a temperatura do conjunto muda a pressão sobre o ar contido no tubo se altera, movendo o líquido no tubo. O fato da pressão atmosférica não ser sempre constante tornava esse instrumento pouco confiável.

A procura por um instrumento mais confiável motivou o astrônomo Ole Røemer a criar um termômetro onde a dilatação sofrida pelo álcool líquido fosse o fenômeno a ser observado. Røemer foi o primeiro a utilizar dois pontos fixos em uma escala termométrica. Vários fatores como guerras, interpretações diferentes do mesmo fenômeno físico, diferenças culturais, entre outros, dificultaram a adoção de uma escala única para medir a temperatura. Em 1778 haviam 27 escalas termométricas diferentes sendo adotadas na Europa (PIRES, AFONSO e CHAVES, 2006). Duas delas ainda são utilizadas no meio científico, as escalas Fahrenheit e Celsius.

- Gabriel Fahrenheit em 1708, começou a produzir seus próprios termômetros onde os pontos fixos eram a temperatura de uma mistura de água, gelo e cloreto de amônio ($0^{\circ}F$), e a temperatura do corpo humano ($100^{\circ}F$);
- A escala Celsius, proposta por Anders Celsius em 1742, usava o ponto de ebulição da água em uma extremidade ($0^{\circ}C$) e o de congelamento na outra ($100^{\circ}C$). Mais tarde o biólogo sueco Lineu inverteu tais valores, considerando $0^{\circ}C$ para o ponto de congelamento e $100^{\circ}C$ para o ponto de ebulição da água.

Nesse período ainda não era claro para os cientistas da época o que estava sendo realmente mensurado pelos termômetros, pois calor e temperatura eram usualmente vistos como o mesmo fenômeno físico. Mesmo sendo aceitas nos meios científicos as escalas termométricas não indicavam o que estava ocorrendo fisicamente com a matéria quando a temperatura mudava. Seria preciso entender melhor o conceito de calor para poder compreender o que estava realmente acontecendo.

2.2 CALÓRICO

A hipótese de que quente e frio estavam relacionados às substâncias permaneceu durante séculos no pensamento humano. Na antiguidade, o calor era considerado uma substância que fluía de

corpos quentes para corpos frios se aproximando muito do que entendemos hoje por energia. Em 1665 Robert Hooke propôs uma visão diferente para o calor, sugerindo que o mesmo era uma propriedade do corpo surgindo do movimento de suas partes. Assim, um corpo quando em contato com outro trocava essa agitação. Newton, para explicar por que um bloco de metal quando aquecido a altas temperaturas emite luz, também sugere que partes vibrantes do corpo eram a causa desse fenômeno.

Em 1697, o médico alemão Georg Ernest Sthal propôs a teoria do flogístico, como sendo um elemento que seria responsável pela combustão. Esse elemento possuía massa e estaria presente em todos os materiais combustíveis, sendo liberados durante a queima. Quando foi descoberto o Hidrogênio acreditou-se que se tratava do flogístico puro, já que o Hidrogênio é altamente inflamável e muito leve (PIRES, 2008).

Em 1760, o médico escocês Joseph Black visualizou o calor como sendo um fluido ponderável e indestrutível (se conservava) capaz de penetrar em todos os corpos materiais. Ele associou a mudança de temperatura de um corpo à troca de calor realizada por ele. Sua grande contribuição para o estudo do calor foi a constatação de que corpos de diferentes materiais tem diferentes capacidades de armazenar calor, chamando essa propriedade de *capacidade térmica*. Em um estudo mais detalhado chegou ao conceito de *calor específico* como sendo uma propriedade do material. Black também introduziu a ideia de *calor latente*, responsável pela mudança de estado de um corpo, fazendo uma distinção entre calor e temperatura (PIRES, 2008).

No final do século XVIII Antoine L. Lavoisier derrubou a teoria do flogístico. Ele utilizou a terminologia **calórico** como sendo a causa do efeito chamado calor. O calórico era geralmente visto como uma quantidade mensurável do calor. Para os defensores dessa teoria, o calórico era capaz de penetrar todo o espaço e fluir para dentro e para fora de todas as substâncias, sendo considerado como auto repulsivo e fortemente atraído pela matéria (BROWN, 1950). No contato térmico entre dois corpos o calórico fluiria no sentido do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. Essa ideia pôde ser sustentada através da analogia mecânica da água escoando de um reservatório mais alto para outro mais baixo. O movimento do fluido cessa quando o nível da água é igual nos dois reservatórios. Isso deu suporte para acreditar que o calórico deixaria de fluir quando os dois corpos alcançassem o equilíbrio térmico.

2.3 O USO CORRETO DA TERMINOLOGIA CALOR

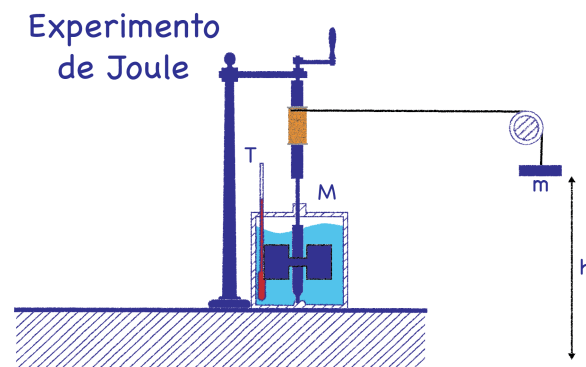
Benjamin Thompson, o conde de Rumford, na primeira metade do século XIX discordava da teoria do calórico com uma importante observação: A quantidade de calor “espremida” para fora de um corpo por atrito deveria ser finita? Ao supervisionar a perfuração de canhões nas oficinas do arsenal de Munique ele percebeu que a quantidade de calor retirada durante a perfuração parecia infinita. Thompson então se pergunta: “*De onde vem o calor realmente produzido na operação mecânica mencionada?*” (PIRES, 2008).

O médico alemão Julius Robert Von Mayer, em 1842, em uma viagem aos trópicos, fez uma observação sobre o sangue venoso dos nativos, que apresentava uma maior taxa de oxigenação (coloração mais avermelhada) do que os nativos de regiões de clima frio. Ele acreditava que o

calor humano produzido pelo metabolismo dos alimentos fosse balanceado por uma combinação de dois fatores opostos: o calor perdido pelo corpo para o ambiente e o trabalho realizado pelo mesmo. Mayer enfatiza em seu trabalho a ideia de que alguma coisa deve se conservar nas transformações físicas, ele afirma que *duas* coisas independentes se conservam nos fenômenos: por um lado, a matéria; por outro lado algo correspondente ao nosso conceito atual de energia (MARTINS,1984).

Todas essas observações indicavam que o calor estava associado a uma nova forma de energia. Em 1843 é feita esta comprovação através dos experimentos do físico inglês James Prescott Joule, cujo objetivo era encontrar o equivalente mecânico do calor. Um de seus procedimentos mais celebres consistia de um aparato dado por um calorímetro contendo uma massa M de água. Em seu interior continha um conjunto de paletas acopladas a um eixo, este eixo girava quando os corpos de massa m caíam de uma altura h , veja ilustração na figura 10. Repetindo o procedimento algumas vezes Joule mediu o aumento de temperatura ΔT da água dentro do calorímetro, associando o aumento de temperatura à energia potencial gravitacional dos pesos de massa m . Joule chegou a conclusão de que 1 caloria, que era a unidade atribuída à medida do calor, equivale a 4,182 J, sendo o joule a unidade atribuída a energia (GRIBBIN, 2005).

Figura 10: Ilustração de um dos aparatos de Joule utilizados para obtenção do equivalente mecânico do calor. A queda de uma altura h de um corpo de massa m , preso a um fio, faz girar as pás no interior de um calorímetro. Com um termômetro T Joule podia medir o aumento de temperatura de uma quantidade M de água decorrente do movimento das pás.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A discussão sobre a natureza do calor perdurou por vários anos. De maneira bem resumida podemos dizer que a terminologia calor foi utilizada inicialmente como sendo uma causa repulsiva que balanceava a atração entre as moléculas de um corpo, ou seja, o calor surgia como uma força termo-repulsiva. Durante a exploração da natureza do calor este foi confundido com temperatura e energia. Por estar muito próximo do conceito de energia foi introduzido o termo calórico como sendo um fluido imponderável que era o princípio do calor ou seu portador. Até o início do século XX era comum a introdução de fluidos imponderáveis teoricamente, dentre os mais conhecidos o calórico, o fluido magnético, o fluido elétrico e o eter, para organizar efeitos observados em um sistema e auxiliar na explicação desses fenômenos. Eles não eram necessariamente únicos nem necessariamente representações de causas reais na natureza. Contudo, com o calórico o calor passa a ser encarado como uma entidade física independente da matéria, ou seja, este poderia ser transmitido de um corpo para outro. Esta circunstância leva os cientistas

da época a acreditarem que era possível mensurar o calor através do calórico (FRIEDMAN, 1977). Todavia, foi demonstrado em vários trabalhos, com destaque para o conde Rumford (GOLDFARB, 1977), que isso não era possível e que o calor está associado à transferência de energia térmica.

O calor é um dos conceitos mais difíceis de se trabalhar no ensino de física de maneira geral, pois este é utilizado na linguagem cotidiana o tempo todo de maneira incorreta. Como exemplo, é comum ouvirmos que em um dia ensolarado está muito calor ou que calor é transferido de um corpo para outro. Este último trata o calor como uma substância, da mesma forma como na teoria do calórico. Em textos científicos e livros didáticos (SILVA, LABURÚ e NARDI, 2008) também não é difícil encontrarmos frases como “energia na forma de calor” ou que “calor é energia em trânsito”. O conceito termodinâmico de calor não se refere a uma substância ou a uma forma de energia. De maneira bastante simples, o calor é a forma ou o método pelo qual energia térmica é transferida de um ponto a outro de um sistema devido a uma diferença de temperatura entre eles, ou seja, o calor é o método pelo qual energia térmica é transferida, este está relacionado a um processo e não a uma substância ou entidade (BAZAROV, 1964; ATKINS, 2010).

Em sala de aula discutimos com os alunos a evolução histórica do conceito do calor e o seu estabelecimento com a Termodinâmica. Nosso objetivo foi mostrar a diferença entre os conceitos de temperatura, calor e energia. Em seguida contextualizamos o momento histórico em que surgiu os primeiros trabalhos que culminariam na elaboração da Segunda Lei da Termodinâmica. Nesta época na Europa estava acontecendo a revolução industrial e a compreensão do funcionamento de máquinas térmicas foi essencial para o surgimento da Termodinâmica como ciência. Maiores detalhes sobre isso são descritos na próxima seção.

2.4 MÁQUINAS TÉRMICAS E A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

O período de maior desenvolvimento da Termodinâmica é referente aos séculos XVIII e XIX quando profundas mudanças sociais e econômicas ocorreram na Europa. Nesse período da história um pequeno grupo rompe o sistema de produção feudal, inicialmente, com uma produção artesanal e doméstica. Mais tarde essas produções artesanais cresceram e necessitaram de uma melhor organização na forma de trabalho e inovações tecnológicas que possibilitassem aumentar a produção. Era o início de uma **Revolução Industrial** que iria mudar o mundo econômica e socialmente (ROCHA, PINHO e ANDRADE, 2002).

As máquinas a vapor tiveram um papel muito importante nessa época, de tal forma que entendê-la foi de vital importância para as economias das nações pelo mundo afora. A primeira máquina a vapor foi criada por Denis Pappin em 1691. Por volta de 1750, um ferreiro inglês, Thomas Newcomen, aprimorou a máquina a vapor criando um reservatório de vapor a baixa pressão. Esta era utilizada para retirar água das minas de carvão, apresentando um rendimento por volta de 1%. Em 1764 James Watt realizou várias modificações na máquina de Newcomen, melhorando consideravelmente o rendimento da mesma. A primeira locomotiva movida a vapor fez seu passeio inaugural em 1804. Antes disso, os vagões que transportavam carvão sobre

trilhos eram conduzidos por cavalos, até o construtor galês Richard Trevithick criar seu “cavalo mecânico” no auge da Revolução Industrial na Inglaterra (GRIBBIN, 2005).

Esses homens impulsionaram a Revolução Industrial na Inglaterra, tornando a Grã-Bretanha na primeira nação a se industrializar e a desenvolver um sistema fabril de produção. A quantidade de máquinas movidas a vapor aumentou rapidamente naquela época, mas o entendimento do seu funcionamento através das leis da Física ainda não estava no mesmo ritmo. A demanda por produtividade tornava a identificação de fatores que pudessem melhorar o rendimento de uma máquina térmica cada vez mais importante.

Ao final das guerras Napoleônicas a França se vê derrotada pela Inglaterra. A superioridade tecnológica dos ingleses sobre seus rivais na época foi um dos motivos que levaram o francês Nicolas Sadi Carnot, em seu trabalho **“Reflexões sobre a potência motriz do calor”** a escrever:

A máquina a vapor escava nossas minas, propõe nossos navios, escava nossos portos e rios, forja o ferro... Retirar hoje da Inglaterra suas máquinas a vapor seria retirar-lhe ao mesmo tempo o carvão e o ferro. Secariam todas as fontes de riquezas... Apesar do trabalho de toda sorte realizado pelas máquinas a vapor, não obstante o estágio satisfatório de seu desenvolvimento atual, a sua teoria é muito pouco compreendida (CARNOT, p. 39 e 40, 1897).

Em 1824 ao escrever seu artigo, Carnot se questiona sobre a eficiência das máquinas térmicas e sobre os princípios que regem o seu funcionamento. O trabalho de Carnot, juntamente com os trabalhos de Clausius, realizado em 1850, e de Thomson (lorde Kelvin) de 1851, conduziram a formulação da Segunda Lei da Termodinâmica.

2.5 SADI CARNOT E A BUSCA POR MÁQUINAS TÉRMICAS MAIS EFICIENTES

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796 – 1832) era um jovem preocupado com o futuro da França e um brilhante cientista. Ele percebeu a importância de compreender o funcionamento das máquinas térmicas que estavam revolucionando o mundo. Carnot fala sobre estas máquinas em seu artigo **“Reflexões sobre a força motriz do calor”** publicado em 1824 da seguinte forma:

O estudo dessas máquinas é do maior interesse, sua importância é enorme, seu uso está aumentando continuamente e estas parecem estar destinadas a produzir uma grande revolução no mundo civilizado. O motor a vapor já trabalha nossas minas, propõe nossos navios, escava nossos portos e nossos rios, forja o ferro, modela a madeira, mói grãos, faz a fiação e tece nossas roupas, transporta as mais pesadas cargas, etc. Pela sua utilidade este pode servir como um motor universal algum dia e ser substituído do poder animal, cachoeiras e correntes de ar (CARNOT, p. 38, 1897).

Vamos discutir sobre o funcionamento de uma máquina térmica, pensando em uma máquina a vapor, exibindo trechos da descrição original do trabalho de Carnot. Como Carnot utilizou

a terminologia *calórico* para se referir ao funcionamento da máquina térmica, ao final de cada trecho discutiremos o que foi descrito por ele de acordo com a terminologia mais aceita e atual da Termodinâmica para referenciar o calor e a energia térmica de maneira mais adequada. O uso dessa terminologia por Carnot em seu trabalho de 1824 se deve ao fato de que o conceito de energia ainda não era bem desenvolvido naquela época, uma vez que os experimentos de Joule e Mayer começaram a obrigar a aceitação da lei de conservação de energia no final da década de 1840.

Primeiro precisamos de um processo que possa ser repetido indefinidamente enquanto o fornecimento de energia ao sistema é mantido. Este tipo de processo é chamado de cíclico e faz com que o sistema analisado sempre volte ao seu estado inicial ao final de cada ciclo. Carnot propõe que:

A produção de movimento causada pelo vapor é sempre acompanhada de uma circunstância que chama nossa atenção. Esta circunstância é o reestabelecimento do equilíbrio no *calórico*, isto é, sua passagem de um corpo de temperatura mais ou menos elevada para outro de menor temperatura (CARNOT, p. 44 e 45, 1897).

Em termos atuais Carnot estava se referindo ao processo de transferência de energia térmica através do calor da fonte térmica de maior temperatura para a fonte de menor temperatura de maneira espontânea. Usualmente nos referimos a esse processo como fluxo espontâneo de energia térmica ou fluxo espontâneo de calor. Segundo Carnot:

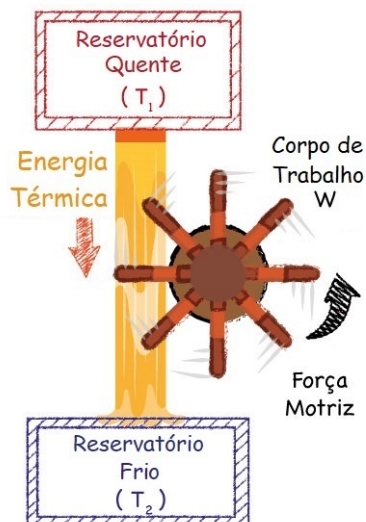
O *calórico* desenvolvido no forno pelo efeito da combustão atravessa as paredes da caldeira, produz vapor e, de alguma forma, incorpora-se a ele. O vapor transporta o *calórico*, primeiro para o cilindro, onde desempenha alguma função, e de lá para o condensador, onde é condensado pelo contato com a água fria. Então, como resultado final, a água fria do condensador toma posse do *calórico* proveniente da combustão. Este é aquecido pela intervenção do vapor como se tivesse sido colocado diretamente sobre o forno. O vapor é aqui apenas um meio de transportar o *calórico* (CARNOT, p. 45, 1897).

Neste trecho Carnot se refere ao transporte de energia térmica realizado através dos mecanismos da máquina térmica. Seu início se dá com a energia proveniente da combustão do carvão no forno para aquecer a água da caldeira. Esta é a fonte quente da máquina, a qual irá fornecer energia térmica ao sistema para realização de alguma função no corpo de trabalho (motor). No motor parte da energia proveniente da fonte quente será convertida em energia mecânica através do trabalho. A parte da energia que não é convertida é dissipada no próprio sistema, carcaça do motor, para sua vizinhança e para a fonte fria. Tanto a fonte quente quanto a fonte fria são essenciais para o funcionamento adequado da máquina durante a realização da compressão e expansão do vapor, os quais serão responsáveis pelo movimento de cilindros, abertura e fechamento de válvulas, entre outros mecanismos para reiniciar o ciclo e manter a máquina térmica funcionando periodicamente enquanto existir combustível para alimentar a caldeira.

Carnot afirma que é impossível propelir uma máquina térmica apenas retirando energia térmica, nas suas palavras *calórico*, de um reservatório térmico de temperatura T . Para isso

é necessário dois reservatórios com temperaturas diferentes T_1 e T_2 , em que $T_1 > T_2$. Ele faz uma analogia do funcionamento de uma máquina térmica com uma roda d'água, conforme a figura 11. A *força motriz* na roda é produzida pela queda da água de um ponto mais elevado, equivalente à força motriz na máquina térmica produzida pelo escoamento de energia térmica ou fluxo espontâneo de energia do reservatório quente, de maior temperatura T_1 , para o reservatório frio de menor temperatura, T_2 .

Figura 11: Analogia mecânica feita por Carnot para descrever o funcionamento de uma máquina térmica. A energia térmica faz o papel da água e as diferentes temperaturas dos reservatórios térmicos são análogas à diferença de altura responsável pelo escoamento da água para movimentar a roda.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A produção de *força motriz* na máquina térmica é realizada pelo motor a vapor, com a energia térmica fluindo do reservatório quente para o reservatório frio. Carnot percebeu que este princípio é aplicável a qualquer máquina térmica, ou seja, uma máquina que converte energia térmica em energia mecânica através do calor e do trabalho. Apesar da teoria do *calórico* não ser consistente, a discussão sobre máquinas térmicas conduzida por Carnot em seu livro “Reflexões sobre a potência motriz do calor” permanecem válidas, bastando substituir o termo *calórico* por energia térmica ou calor, dependendo do contexto.

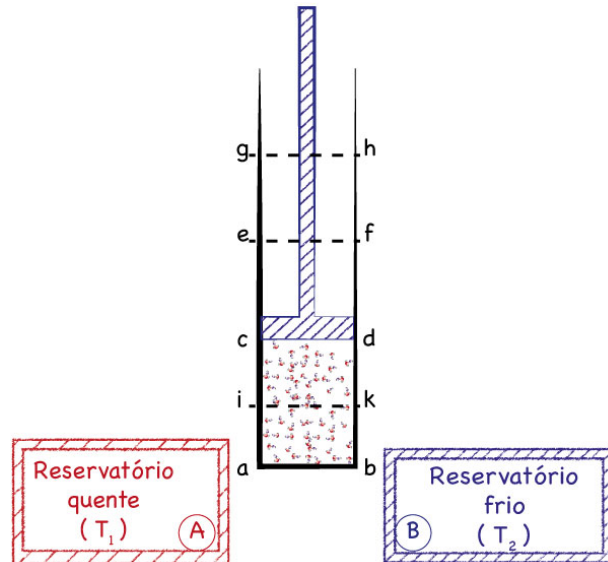
Na busca por uma máquina térmica com eficiência máxima, Carnot imaginou uma máquina perfeita, que não perdesse energia térmica para o meio externo e que os dois reservatórios térmicos permanecessem à temperatura constante. Ele idealizou sua máquina de maneira bastante simples, veja figura 12, considerando um cilindro e um pistão móvel (cd), uma substância de trabalho que ele assumiu ser um gás perfeito como o ar, por exemplo, preenchendo um certo volume do cilindro ($abcd$) e dois reservatórios térmicos A e B mantidos a diferentes temperaturas, T_1 e T_2 , respectivamente, com $T_1 > T_2$.

Com estas considerações Carnot descreve uma série de processos, os quais resumimos abaixo substituindo a terminologia do calórico, utilizada por ele, por calor e energia térmica de acordo com o contexto em que a mesma aparece em seu trabalho (CARNOT, p. 63-65, 1897):

1. Assumindo que as paredes do cilindro são diatérmicas, o que significa que é possível haver troca de energia térmica quando em contato com outro objeto, considera-se a posição

inicial do pistão em cd como sendo aquela em que o contato térmico do sistema com o reservatório A é estabelecido, conforme ilustrado na figura 13 (a). Ou seja, o volume do gás dado por $abcd$ consiste no estado inicial do sistema. O intuito de Carnot neste primeiro momento é estabelecer um processo isotérmico, em que a troca de energia térmica entre o cilindro e o reservatório A ocorre à temperatura constante.

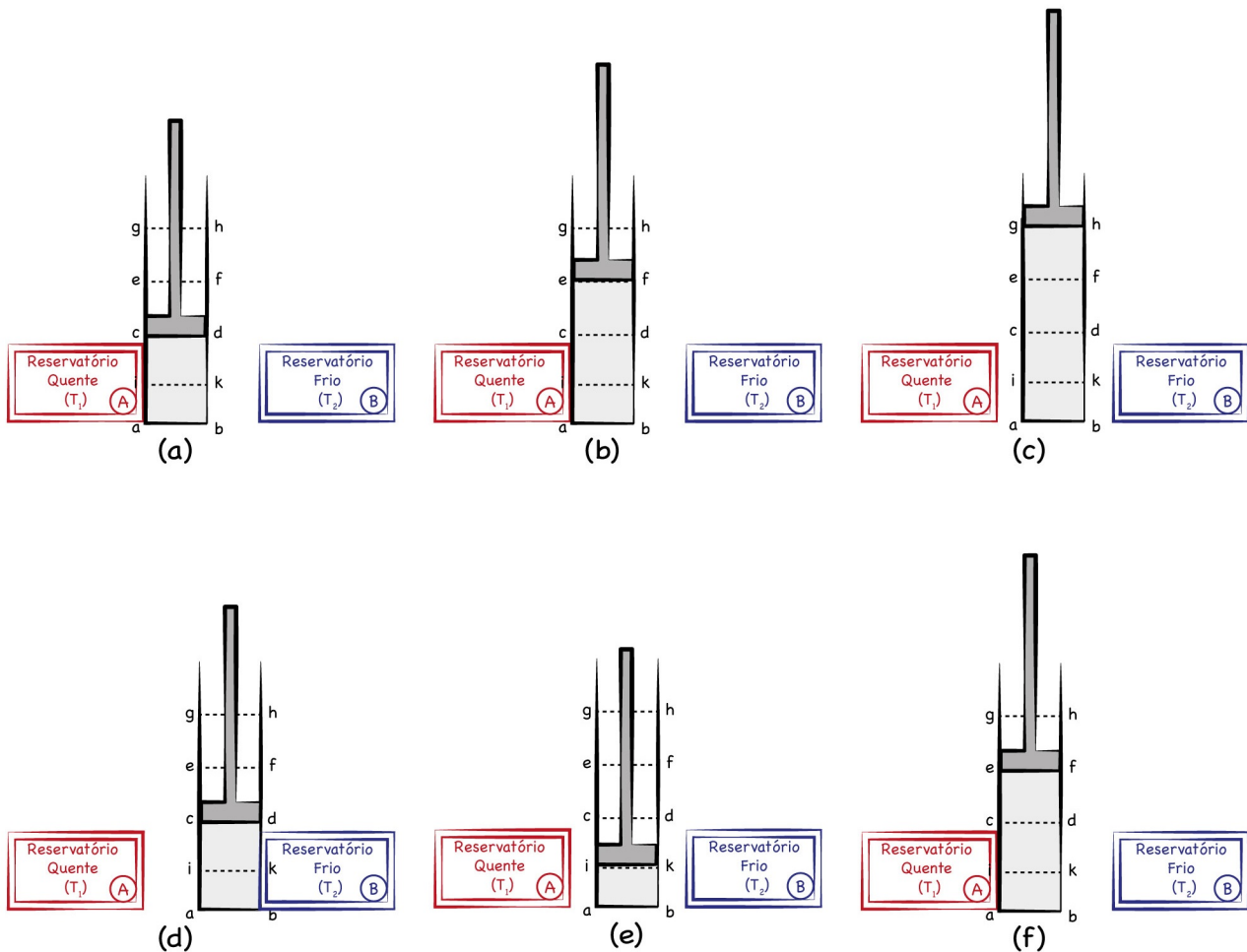
Figura 12: Máquina idealizada por Carnot, consistindo de um pistão móvel em um cilindro contendo ar como substância de trabalho e dois reservatórios térmicos com temperaturas T_1 e T_2 , com $T_1 > T_2$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2. O pistão agora é movido gradualmente para a posição ef , como ilustrado na figura 13 (b), fazendo com que o gás no interior do cilindro sofra uma expansão. Apesar deste processo, a temperatura do sistema é mantida constante pelo contato térmico entre o reservatório A e o cilindro. Como o volume V do gás no interior do cilindro tem seu volume aumentado, sua pressão P deverá variar para que sua temperatura T seja mantida constante. Essa variação em um processo isotérmico pode ser melhor ilustrada para os alunos considerando a equação do gás ideal $PV = nRT$, uma vez que Carnot supõe um gás ideal como substância de trabalho. As constantes n e R são dadas pelo número de mols do gás e pela constante universal dos gases, respectivamente. Note pela igualdade que, para manter T constante em uma expansão (aumento de V), como no caso descrito, necessariamente a pressão no gás terá que diminuir.
3. Nesta etapa o contato térmico entre o reservatório A e o cilindro é interrompido, de modo que o cilindro não troca energia com nenhum outro sistema. Enquanto isso, o pistão continua se movendo a partir da posição ef de maneira que o ar no interior do cilindro continua se expandindo sem qualquer fornecimento de energia fazendo com que sua temperatura diminua. Carnot supõe que o sistema diminui sua temperatura até se tornar igual à temperatura do reservatório B . Neste momento o pistão para, permanecendo na posição gh conforme ilustrado na figura 13 (c).

Figura 13: Processos idealizados por Carnot em sua máquina térmica com o objetivo de obter uma máquina com rendimento máximo. Os processos ilustrados em $a \rightarrow b$ e $c \rightarrow d$ são isotérmicos, enquanto que os processos ilustrados em $b \rightarrow c$ e $d \rightarrow e$ são realizados sem qualquer troca de energia entre o sistema e sua vizinhança, ou seja, são adiabáticos. Em (f) ilustramos o reinício do ciclo de operação da máquina de Carnot.



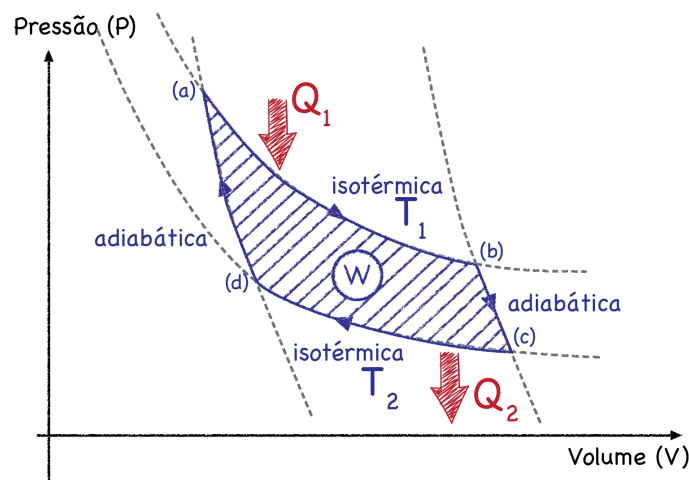
Fonte: Elaborado pelo autor.

4. O cilindro é agora colocado em contato com o reservatório B com temperatura $T_2 < T_1$. O pistão é movido da posição gh para a posição cd comprimindo o gás no interior do cilindro isotermicamente, veja ilustração na figura 13 (d).
5. De maneira semelhante ao descrito no processo 3, o contato térmico entre o reservatório B e o cilindro é interrompido de maneira que o mesmo não troca energia com nenhum outro sistema. Neste processo o pistão continua a comprimir o gás no interior do cilindro fazendo com que sua temperatura aumente até a temperatura do reservatório A . O pistão passa durante este tempo da posição cd para a posição ik , como ilustrado na figura 13 (e).
6. Em seguida o sistema é novamente colocado em contato com o reservatório A com o pistão se movendo da posição ik , passando pela posição cd inicial até a posição ef , reiniciando o ciclo, conforme ilustrado na figura 13 (f).

Note que Carnot, de maneira engenhosa, percebe que o máximo rendimento de uma máquina térmica pode ser obtido se a mesma operar através de processos reversíveis, em que não há fluxo

espontâneo de energia térmica. Dessa forma, o ciclo da máquina deve ser composto por duas isotermas, que são os processos $a \rightarrow b$ e $c \rightarrow d$ da figura 13, em que as trocas de energia são realizadas à temperatura constante, e duas adiabáticas, processos $b \rightarrow c$ e $d \rightarrow e$ da figura 13, em que não há troca de energia. Este é conhecido como o Ciclo de Carnot e é apresentado na figura 14 em um diagrama de pressão P em função do volume V . No diagrama PV os processos são apresentados em um ciclo fechado, diferentemente do que foi exposto por Carnot na figura 13. Observe que o segundo processo adiabático é descrito neste diagrama por $d \rightarrow a$.

Figura 14: Diagrama da pressão P em função do volume V para o Ciclo de Carnot, o qual é composto por dois processos isotérmicos $a \rightarrow b$ e $c \rightarrow d$, de temperaturas T_1 e T_2 , em que são realizados as trocas de energia através de calor Q_1 e Q_2 , respectivamente, e duas adiabáticas $b \rightarrow c$ e $d \rightarrow a$ em que $Q = 0$. A quantidade de energia térmica convertida em energia mecânica através de trabalho é dada por W e pode ser obtida pela área hachurada no ciclo fechado do diagrama PV .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para entender melhor o ciclo da figura 14 vamos utilizar a notação e o diagrama de máquina térmica apresentado na figura 15, os quais são comumente utilizados nos livros didáticos sobre o assunto. Neste, Q_1 representa a quantidade de energia térmica que o reservatório A fornece ao sistema através do calor e Q_2 a quantidade de energia térmica que a máquina térmica perde através do calor para o reservatório B . Usualmente Q é definido como quantidade de calor. Apesar do nome, Q não representa uma medida do calor, mas sim, uma medida de energia térmica que o sistema adquire ou perde através do método calor.

Considerando uma máquina a vapor como exemplo de máquina térmica, o reservatório quente A de temperatura T_1 é composto pela caldeira, a qual fornece energia térmica Q_1 ao sistema através de calor. No motor a vapor parte da energia térmica fornecida pelo reservatório A é convertida em energia mecânica (W) através de trabalho e o restante Q_2 é perdido para o reservatório frio B de temperatura T_2 . O reservatório frio neste caso pode ser um condensador ou a própria atmosfera que envolve a máquina a vapor. Por conservação de energia devemos ter,

$$Q_1 = W + Q_2. \quad (1)$$

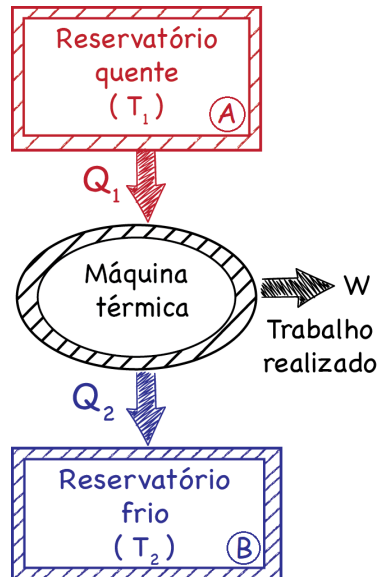
O rendimento da máquina térmica η é definido como a razão da energia mecânica produzida

através de trabalho W pela quantidade total de energia térmica Q_1 fornecida ao sistema através de calor,

$$\eta = \frac{W}{Q_1}, \quad (2)$$

ou seja, o rendimento da máquina térmica é dado pelo fator de conversão de calor em trabalho.

Figura 15: Diagrama de uma máquina térmica operando entre dois reservatórios térmicos de temperaturas T_1 e T_2 , sendo $T_1 > T_2$. O reservatório quente de temperatura T_1 cede uma quantidade de energia térmica, dada por Q_1 , ao sistema. Parte dessa energia, representada por W , é convertida em energia mecânica através do trabalho e o restante, dado por Q_2 , é perdida para o reservatório frio de temperatura T_2 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Da equação (1) podemos escrever $W = Q_1 - Q_2$. Substituindo na equação (2) obtemos:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (3)$$

O resultado acima mostra que o rendimento máximo de uma máquina térmica é sempre menor do que 100%, ou seja, $\eta < 1$, uma vez que Q_2 é parte da energia total Q_1 fornecida pelo reservatório quente e portanto, $Q_2 < Q_1$.

Em 1851, analisando o ciclo de Carnot, William Thomson propõe uma escala termométrica absoluta. Ao estudar as máquinas a vapor Carnot não tinha ideia de uma escala de temperatura que indicasse um valor absoluto. Por isso, ele associou as trocas de energia apenas às etapas isotérmicas do ciclo. As únicas características consideradas associadas aos reservatórios térmicos são suas temperaturas T_1 e T_2 . Dessa forma, podemos afirmar que a energia fornecida ao sistema através do calor é uma função que só depende da temperatura, ou seja, (NUSSENZVEIG, 1981)

$$\frac{Q_2}{Q_1} = f(T_1; T_2) \rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{f(T_2)}{f(T_1)}. \quad (4)$$

Substituindo esse resultado na equação (3) tem-se que o rendimento teórico máximo de uma

máquina térmica operando no ciclo de Carnot pode ser expresso apenas pelas temperaturas absolutas dos reservatórios térmicos A e B ,

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (5)$$

Esse resultado será deduzido formalmente a partir do conceito de entropia na próxima seção.

Carnot estabelece, de certa maneira, o resultado apresentado na equação (5) como uma proposição geral da seguinte forma:

A força motriz do calor é independente dos agentes empregados para produzi-la; sua quantidade é fixada unicamente pelas temperaturas dos corpos, entre os quais é efetuada, finalmente, a transferência do calórico (CARNOT, p. 68, 1897).

Nesta proposição Carnot estabelece que a eficiência de uma máquina térmica operando no ciclo proposto por ele independe da substância de trabalho, sendo determinada apenas pelas temperaturas dos reservatórios quente e frio, como mostra a expressão (5). Como já discutido, Carnot se refere à transferência de energia térmica entre os corpos de diferentes temperaturas como “*transferência de calórico*”. Os “*agentes empregados*” citados por Carnot seria qualquer substância de trabalho utilizada na máquina, como o ar citado anteriormente, que seria o meio pelo qual a força motriz do calor seria desenvolvida para colocar a máquina térmica em movimento. Nas palavras dele,

[...] é evidente que o raciocínio teria sido o mesmo para todas as outras substâncias gasosas e até mesmo para todos os outros corpos sujeitos à mudanças de temperatura causadas por sucessivas contrações e expansões (CARNOT, p. 68, 1897).

Apesar de nenhuma máquina térmica utilizada na engenharia moderna trabalhar de acordo com o ciclo de Carnot, sua importância consiste em fornecer a eficiência máxima para todos os outros ciclos trabalhando nos mesmos limites de temperatura.

Carnot também percebe a impossibilidade de produzir uma quantidade de força motriz maior do que a que seria equivalente ao fornecimento de uma determinada quantidade de energia térmica do reservatório quente, concluindo que “*isto seria não só movimento perpétuo, mas uma criação de força motriz ilimitada sem o consumo de calórico ou de qualquer outro agente*” (CARNOT, p. 55, 1897). Apesar do uso da terminologia *calórico* o trabalho de Carnot envolve, indiretamente, a impossibilidade de violação da lei de conservação de energia.

Analisando o problema do fluxo espontâneo de energia térmica, nas palavras dele *calórico*, Carnot concluiu que a perda de energia de uma máquina para o ambiente é um processo natural. A energia que não é aproveitada para a produção de força motriz é dissipada para o reservatório frio de temperatura menor, de maneira que é impossível converter toda a energia fornecida pelo reservatório quente em força motriz.

As proposições estabelecidas por Carnot são equivalentes à Segunda Lei da Termodinâmica. A formulação inicial desta lei surge para expressar a lei de conversão de calor em trabalho e de trabalho em calor e é dada pelas duas teses independentes:

$$Q \xrightarrow{\quad} W \text{ e } W \xrightarrow{\quad} Q,$$

com as setas indicando a direção do processo.

A primeira nos diz que é impossível converter todo calor em trabalho, ou seja, é impossível converter toda a energia térmica proveniente de um reservatório térmico em qualquer outra modalidade através de trabalho. Essa é uma característica marcante de processos irreversíveis e qualquer processo envolvendo o fluxo de energia espontânea através do calor, devido a diferença de temperatura entre dois corpos, é irreversível. Já a segunda tese mostra esta possibilidade, pois podemos converter, por exemplo, uma determinada quantidade de energia mecânica completamente em energia térmica através do atrito.

O trabalho de Carnot passa despercebido por alguns anos, em parte porque na época as teorias científicas tinham que ter um status experimental. O francês Émile Clapeyron, em 1834, publica um artigo onde formaliza algebricamente a teoria de Carnot. E só em 1856 que William Thomson estabelece uma escala termométrica absoluta, podendo assim quantificar o rendimento de uma máquina térmica.

No ano de 1832 a cidade de Paris é atingida por um surto de cólera, Carnot se apresenta como voluntário para ajudar as vítimas do surto, mas acaba contraindo a doença, vindo a falecer em 24 de agosto. Seus escritos foram queimados por medo de uma contaminação, sobrando apenas poucas páginas de seu trabalho. Com o seu trabalho intitulado como “Reflexões sobre a força motriz do calor” (*“Reflections on the motive power of heat”*), Carnot muda a forma de entender o funcionamento de máquinas térmicas despertando o interesse da comunidade científica da época. Mesmo Carnot utilizando a teoria do calórico, o seu trabalho, juntamente com a lei de conservação e transformação de energia, fornecem a base para o surgimento da Termodinâmica como um sistema científico formal nos trabalhos de Rudolf Julius Emanuel Clausius e William Thomson, em que as formulações modernas da segunda lei foram desenvolvidas e os conceitos mais importantes de entropia e temperatura absoluta foram introduzidos.

2.6 A TERMODINÂMICA

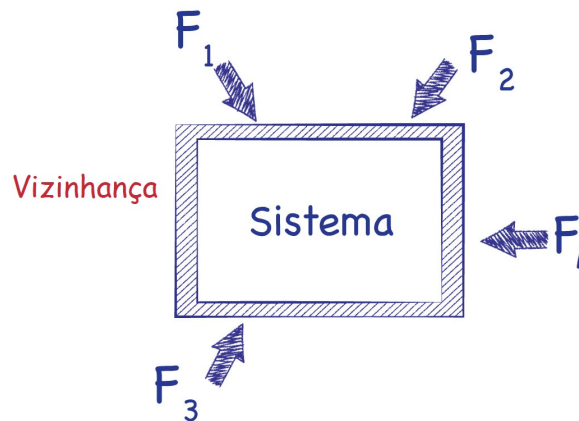
A termodinâmica é uma ciência dedutiva cujos conteúdos principais são derivados a partir de duas leis fundamentais, chamadas de leis da termodinâmica, e de uma série de resultados e observações experimentais. Com base nas primeira e segunda leis, a termodinâmica nos permite investigar as propriedades gerais de sistemas físicos reais finitos em equilíbrio com um grande número de partículas e para intervalos de tempo finitos. Ou seja, na termodinâmica estudamos o efeito coletivo dos constituintes da matéria, não utilizando explicitamente noções sobre a estrutura molecular de uma substância.

Para compreender melhor os fenômenos físicos que regem as máquinas térmicas e entender as relações entre calor e trabalho, vamos desenvolver nesta seção o formalismo necessário de acordo com os conceitos e definições da Termodinâmica.

Toda análise termodinâmica é focada em um sistema macroscópico consistindo de um grande número de partículas ($N \gg 1$) que ocupam uma região definida no espaço, ou seja, que possui

uma fronteira. Este número pode variar de milhares de partículas (10^3) ao número de Avogadro (10^{23}), dependendo do sistema e da propriedade em estudo. A fronteira pode limitar como o sistema interage com a sua vizinhança. Um sistema é dito isolado quando o seu estado, caracterizado por variáveis como volume (V), pressão (P) e temperatura (T), por exemplo, não é afetado pela ação de forças externas F_i , veja ilustração na figura 16. No caso em que o sistema não troca energia térmica com sua vizinhança através de calor, este é chamado de adiabaticamente isolado ou apenas adiabático. Nesta situação dizemos que o sistema possui paredes adiabáticas. Se a troca de energia térmica entre o sistema e a vizinhança existir, dizemos que o mesmo possui paredes diatérmicas.

Figura 16: Sistema termodinâmico interagindo com sua vizinhança através de forças externas F_i . Se as paredes do sistema são adiabáticas o sistema não troca energia térmica com sua vizinhança. Se as mesmas são diatérmicas a troca de energia ocorre. Nos livros didáticos as paredes adiabáticas são representadas como na figura enquanto que as paredes diatérmicas são ilustradas como linhas retas apenas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A caracterização e a determinação do estado de um sistema termodinâmico são feitas através de um conjunto de parâmetros macroscópicos independentes, os quais são classificados como:

- **Parâmetros externos:** são determinados pela posição de corpos externos e não são componentes do sistema, como o volume ou a intensidade de um campo de forças devido à posição de cargas e correntes.
- **Parâmetros internos:** são determinados pelo movimento combinado e pela distribuição espacial das partículas que compõem o sistema como densidade, pressão, energia, polarização, magnetização, etc.
- **Variáveis intensivas:** são aquelas independentes da massa e do número de partículas do sistema, como pressão, temperatura, etc.
- **Variáveis extensivas:** são as que possuem tal dependência, como volume, energia, entropia, etc.

Estes parâmetros caracterizam um sistema em seu estado de equilíbrio termodinâmico.

2.7 LEI ZERO DA TERMODINÂMICA E A DEFINIÇÃO DE TEMPERATURA

Antes de definirmos temperatura vamos falar um pouco sobre o que é equilíbrio termodinâmico. A termodinâmica estuda principalmente as propriedades de sistemas físicos no estado de equilíbrio. Tais propriedades são caracterizadas pela ação combinada de um número muito grande de partículas constituintes do sistema se movendo continuamente. Este movimento desordenado recebe o nome de movimento térmico.

Como já discutido anteriormente, a presença de corpos externos ao sistema pode influenciar as propriedades do mesmo devido à alteração no movimento térmico do sistema. É postulado em termodinâmica que:

Um sistema isolado sempre atinge, no decorrer do tempo, um estado de equilíbrio termodinâmico e nunca sairá deste espontaneamente.

Se o sistema é isolado não há trocas de energia com sua vizinhança. O equilíbrio é alcançado a partir da troca de energia entre as partículas do próprio sistema. Como em um sistema termodinâmico o número de partículas é muito grande, $N \gg 1$, as flutuações nos parâmetros do sistema, devido às próprias interações das partículas do sistema podem ser, sem perda de generalidade, negligenciadas. Se o postulado acima for considerado, todos os fenômenos conectados com flutuações de parâmetros, fazendo com que o sistema saia de seu estado de equilíbrio espontaneamente são renunciados. Tais fenômenos são tratados no domínio da física estatística.

Isso nos leva a concluir que o estado de equilíbrio termodinâmico de um sistema é estabelecido quando todos os parâmetros externos não variam com o tempo, ou seja, o equilíbrio termodinâmico do sistema é estabelecido quando há *equilíbrio térmico*, caracterizado pela temperatura constante, *equilíbrio químico*, em que a estequiometria do sistema se mantém a mesma e *equilíbrio mecânico*, quando o sistema não sofre deformações.

Mas como podemos caracterizar o estabelecimento do equilíbrio interno de um sistema que ocorre ao longo do tempo quando o sistema é isolado? Para responder a essa pergunta vamos considerar dois sistemas isolados A e B . Cada um deles é caracterizado por um estado de equilíbrio independente. Se considerarmos o contato entre os dois sistemas através de uma parede adiabática, como ilustrado na figura 17(a), o estado de equilíbrio de um não é afetado pelo outro. Se agora substituirmos a parede adiabática por uma parede diatérmica, conforme figura 17(b), energia pode ser trocada entre os dois sistemas e, após um certo tempo, um novo estado de equilíbrio dado por $A + B$ é obtido, de modo que podemos dizer que A está em equilíbrio com B . Considerando a nova configuração apresentada na figura 17(c), em que os sistemas A e B estão separados por uma parede adiabática, mas ambos estão em contato com um novo sistema C , trocas de energia serão estabelecidas entre os sistemas $A \leftrightarrow C$ e $B \leftrightarrow C$, de maneira que um novo estado de equilíbrio $A + B + C$ é obtido. Neste caso, o equilíbrio entre A e B é atingido através do sistema C , mesmo A e B estando separados por uma parede

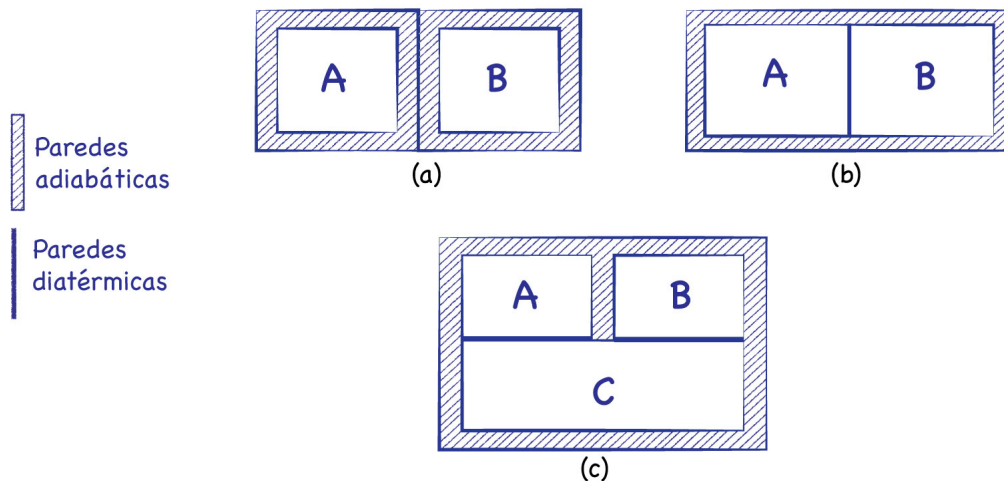
adiabática (NUSSENZVEIG, 1981). Todo esse procedimento pode ser desenvolvido e observado experimentalmente e é referido como *Lei Zero da Termodinâmica*:

Dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si.

Como os sistemas estão isolados, o equilíbrio entre eles é estabelecido internamente, apenas pela energia que caracteriza o movimento térmico de cada sistema. Para medir tal estado de equilíbrio precisamos de um parâmetro que expresse o estado de movimento interno do sistema. Esse parâmetro é chamado de *temperatura*. Portanto a Lei Zero da Termodinâmica estabelece a existência da temperatura T como uma função especial do estado de equilíbrio de um sistema. A temperatura quantifica a intensidade do movimento térmico do sistema tendo um único e mesmo valor em todas as partes de um sistema complexo em equilíbrio independentemente do número de partículas do mesmo (parâmetro intensivo).

A existência de temperatura estabelece que um estado de equilíbrio termodinâmico é determinado pelo conjunto de parâmetros externos e a temperatura.

Figura 17: Diferentes configurações de contato estabelecidos entre os sistemas A , B e C para obtenção de novos estados de equilíbrio. Em (a) temos os estados de equilíbrio independentes A e B , em (b) $A+B$ e em (c) $A+B+C$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.8 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

A primeira lei da termodinâmica é a lei de conservação e transformação de energia. Energia é uma propriedade física dos corpos, a qual pode ser transferida de um corpo para outro através de interações e pode ser convertida em diferentes modalidades ou formas. Em Termodinâmica o sistema é constituído por um grande número de partículas, sua energia total pode ser dividida em energia interna e externa.

A energia interna está relacionada com todas as formas de movimento e interações das partículas que compõem o sistema, tais como: energia de movimento de translação, rotação e vibração das moléculas, energia de interação molecular, energia interatômica, etc. A energia

externa é descrita pelo movimento do sistema como um todo e pela energia potencial do mesmo em um campo de forças.

Existem duas formas ou métodos diferentes de transmissão de energia de um sistema para sua vizinhança, o trabalho W e o calor Q . No Sistema Internacional de unidades (S.I.) tanto o calor quanto o trabalho possuem dimensão de energia, o joule J , mas estes não constituem formas de energia, eles caracterizam a quantidade de energia que um sistema perdeu ou adquiriu através dos métodos trabalho ou calor. Matematicamente a Primeira Lei da Termodinâmica é expressa como:

$$\Delta U = Q - W, \quad (6)$$

em que ΔU é a variação da energia interna do sistema, também conhecida como energia térmica. Dessa forma a Primeira Lei estabelece que a energia interna de um sistema varia somente sob a influência de ações externas conectadas com a transferência de energia através de trabalho W e através do calor Q .

Para verificar o princípio de conservação de energia em um sistema isolado podemos reescrever a equação (6) como $Q = \Delta U + W$, ou seja, a energia fornecida pela fonte quente através de calor $Q > 0$ será convertida em outra modalidade através de trabalho $W > 0$ e acarretará no aquecimento do sistema, através da variação de sua energia térmica, ou interna, $\Delta U > 0$. No caso de um processo cíclico, característico em máquinas térmicas, tem-se $\Delta U = 0$ o que fornece $W = Q$, mostrando que trabalho só pode ser realizado às custas da energia fornecida de uma fonte externa.

Pela igualdade $W = Q$ em um processo cíclico poderíamos ser levados a acreditar que calor pode ser completamente convertido em trabalho e vice-versa. As restrições impostas nesse processo de conversão são estabelecidas pela Segunda Lei da Termodinâmica.

2.9 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E O CONCEITO DE ENTROPIA

Como já discutido anteriormente, historicamente a descoberta da segunda lei está conectada com a análise do funcionamento de máquinas térmicas, a qual também foi responsável pela formulação inicial da própria lei.

O trabalho de Carnot, considerado teoricamente em 1824, apesar de concebido com o conceito do calórico, prova com completo rigor que a eficiência de máquinas térmicas trabalhando em um determinado ciclo, o Ciclo de Carnot, é independente da substância de trabalho utilizada no ciclo. Para maiores detalhes veja a seção 2.5. Mais tarde, ao rejeitarem as ideias de Carnot sobre o conceito de calórico, Clausius e Thomson (Lord Kelvin) estabeleceram correções no trabalho de Carnot fornecendo o que conhecemos hoje como segunda lei. Logo após James Joule estabelecer o equivalente mecânico do calor, Clausius em 1850 e Thomson em 1851 propuseram diferentes versões da segunda lei da termodinâmica, como segue:

Enunciado de Kelvin: *É impossível realizar um processo cujo o único efeito seja remover energia através de calor de um reservatório térmico e produzir uma*

quantidade equivalente de energia através de trabalho.

Enunciado de Clausius: *É impossível realizar um processo cujo o único efeito seja transferir energia através de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.*

Se considerarmos uma máquina térmica operando ciclicamente tem-se pelo enunciado de Kelvin, que é impossível que essa máquina opere com um único reservatório térmico, sendo necessário que existam pelo menos dois reservatórios com temperaturas diferentes, como no diagrama apresentado na figura 15. Outra implicação equivalente é a impossibilidade de converter toda a energia térmica fornecida ao sistema através de calor em outra modalidade através de trabalho, ou seja, é impossível conceber uma máquina com rendimento ou eficiência de 100%. Esse resultado já havia sido obtido por Carnot que, mesmo considerando processos reversíveis, em que não há perdas de energia, verificou que o rendimento máximo de qualquer máquina térmica deve ser, necessariamente, menor do que 100%. Isso é claro, levando-se em conta a impossibilidade de se atingir a temperatura do zero absoluto na fonte fria, $T_2 = 0$.

Em todo o processo de funcionamento de uma máquina térmica o que se observa é um fluxo espontâneo de energia do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura e nunca o contrário, conforme estabelecido no enunciado de Clausius. O fluxo espontâneo de energia através de calor é um processo irreversível, ou seja, é impossível retornar ao estado inicial do ciclo sem uma compensação. Essa compensação é fornecida pelo consumo de combustível para compensar de fato as perdas de energia que existem na máquina durante o seu funcionamento. Se considerarmos a equação (1), em que $Q_1 = W + Q_2$ tem-se que $Q_1 > W$, como discutido anteriormente, e nunca $Q_1 \equiv W$, pois Q_2 , que é a energia dissipada pela máquina, sempre existirá, ou seja, a energia útil em qualquer máquina térmica é sempre menor que a energia fornecida à máquina. Se pensarmos em um motor de carro essa ideia se torna natural, pois o motor do carro sempre aquece enquanto está funcionando. Essa energia responsável pelo aquecimento do motor nunca será convertida no movimento do carro.

Esta é uma característica marcante da energia térmica. Como esta está associada à modificações no movimento coletivo das partículas do sistema, a energia térmica sempre tende a se espalhar e isso é o que ocorre comumente em máquinas térmicas reais, onde os processos são irreversíveis. Quanto mais o motor de uma máquina térmica esquenta, por exemplo, mais energia térmica se espalha se tornando menos útil. A medida desse processo é chamada de *entropia*. O significado físico mais profundo em Termodinâmica da entropia é revelado justamente em processos irreversíveis, pois a sua variação ΔS é uma medida da irreversibilidade de processos em sistemas isolados termicamente e caracteriza a direção de processos naturais.

De acordo com Clausius a mudança da entropia ΔS é observada quando transferência de energia através de calor ocorre à temperatura constante. Quantitativamente tem-se,

$$\Delta S = \frac{Q}{T}. \quad (7)$$

Esta relação só é válida para uma máquina térmica reversível, ou seja, cujo ciclo é composto

por processos reversíveis.

Para uma máquina reversível nenhum aumento de entropia ocorre porque o ganho de entropia da fonte fria é igual à perda de entropia da fonte quente. Já para uma máquina térmica real, em que há processos irreversíveis, a entropia aumenta, pois o ganho de entropia da fonte fria é maior do que a perda de entropia da fonte quente, ou seja, em um motor real, menos trabalho é realizado, em comparação com a máquina reversível, para a mesma quantidade de energia Q_1 fornecida pela fonte quente. Isso significa que o rendimento de uma máquina irreversível η_{irr} é menor que o de uma máquina reversível η_{rev} ,

$$\begin{aligned}\eta_{irr} &< \eta_{rev} \\ \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) &< \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \\ \left(-\frac{Q_2}{Q_1}\right) &< \left(-\frac{T_2}{T_1}\right) \\ \therefore \frac{Q_1}{T_1} &< \frac{Q_2}{T_2}.\end{aligned}\tag{8}$$

Esse resultado mostra porque o significado físico da entropia está relacionado à medida da irreversibilidade de processos e que em uma máquina térmica real mais energia é espalhada, se tornando menos útil.

Vemos então que a Segunda Lei da Termodinâmica estabelece a existência, em um sistema em equilíbrio, de um novo parâmetro de estado de único valor, chamado de entropia S , que permanece constante para máquinas reversíveis ($\Delta S = 0$) e sempre aumenta para máquinas irreversíveis ($\Delta S > 0$). Esta última proposição é comumente chamada de *lei do aumento da entropia*.

Vamos calcular agora o rendimento de uma máquina de Carnot, considerando o ciclo de Carnot, utilizando a Segunda Lei da Termodinâmica. Para um ciclo fechado temos $\Delta S = 0$. Considerando o ciclo de Carnot em um diagrama de temperatura T em função da entropia S , como mostrado na figura 18, e considerando a variação da entropia, dada pela equação (8), para cada processo separadamente, a variação de entropia do ciclo fechado será dada por $\Delta S = \Delta S_{ab} + \Delta S_{bc} + \Delta S_{cd} + \Delta S_{da} = 0$, ou seja,

$$\frac{Q_{ab}}{T_{ab}} + \frac{Q_{bc}}{T_{bc}} + \frac{Q_{cd}}{T_{cd}} + \frac{Q_{da}}{T_{da}} = 0.\tag{9}$$

Para os processos isotérmicos ab e cd tem-se que $Q_{ab} = Q_1$, $T_{ab} = T_1$, $Q_{cd} = -Q_2$ e $T_{cd} = T_2$. O sinal negativo de Q_{cd} aparece porque o sistema está perdendo a quantidade de energia Q_2 através de calor. Para os processos adiabáticos bc e da tem-se $Q_{bc} = 0$ e $Q_{da} = 0$, de maneira que a equação (9) torna-se:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0.\tag{10}$$

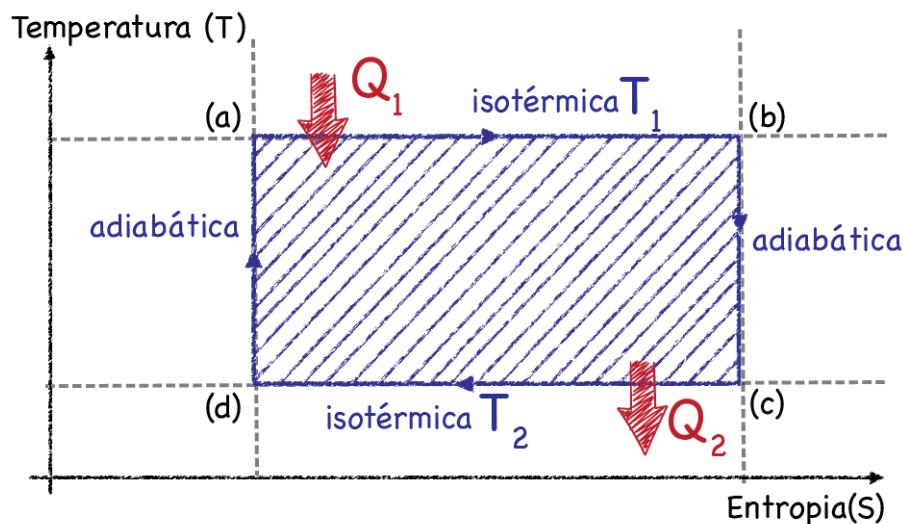
$$\therefore \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (11)$$

Substituindo o resultado (11) na expressão obtida para o rendimento de Carnot na equação (3) obtemos o mesmo resultado apresentado na equação (5), ou seja,

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Qualquer mudança nos reservatórios deve implicar em uma mudança no rendimento da máquina, quanto menor a diferença de temperatura entre os reservatórios menor o rendimento da máquina, e analogamente, quanto maior a diferença de temperatura maior o rendimento. Se pudermos aumentar gradativamente a temperatura da fonte fria (T_2) será possível ver o rendimento da máquina térmica diminuir proporcionalmente a mudança de temperatura, até a situação onde ocorrer o equilíbrio térmico ($T_1 = T_2$) entre os dois reservatórios, cessando o movimento da máquina.

Figura 18: Diagrama da temperatura T em função da entropia S do ciclo de Carnot.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3 SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Nossa sequência didática foi estruturada para ser aplicada em sala de aula utilizando-se o método de ensino *Flipped Classroom* (sala de aula invertida). Parte do conteúdo abordado foi transmitido aos alunos através de vídeos para assistirem em casa, para que os mesmos pudessem chegar na sala de aula mais preparados para uma discussão mais aprofundada. O conhecimento prévio pode contribuir significativamente na aprendizagem de novos conhecimentos, permitindo dar significados a estes. Tal material inicial foi organizado em pré-aulas, auxiliando os alunos como organizadores prévios. A aplicação de todo o conteúdo proposto neste produto educacional

pode ser feita em quatro aulas de 45 minutos. A descrição a seguir é feita para duas aulas geminadas de 90 minutos, primeira e segunda aulas.

3.1 PRIMEIRA PRÉ-AULA

Essa atividade consiste em propor aos alunos que assistam ao vídeo **A história da energia** (STACEY, 2012). Esse vídeo tem aproximadamente 1 hora de duração, o que torna impraticável sua reprodução em sala de aula. O documentário traz uma discussão sobre o que é energia e a formulação das leis da Termodinâmica, sempre mencionando os estudiosos que elaboraram as leis e seus momentos históricos.

Após assistirem ao vídeo, os alunos são convidados a responderem a um questionário, que nós denominamos como Questionário Inicial. Este pode ser respondido on-line ou entregue impresso conforme o professor desejar. Para o questionário on-line sugerimos a utilização da ferramenta *SurveyMonkey*, que é uma companhia global de software de pesquisa on-line que oferece opções gratuitas de questionários que podem ser enviados com facilidade para os destinatários, permitindo ainda fazer uma análise estatística simples das respostas.

Para facilitar a aplicação do questionário on-line, o professor pode gerar um *QRcode*, como o mostrado na figura 19, para os alunos acessarem o questionário. Essa alternativa de comunicação com os alunos é bastante interessante e a possibilidade de utilizar o celular como uma ferramenta de ensino torna a atividade mais atrativa para eles.

Figura 19: Exemplo de *QRcode* utilizado para direcionar o navegador de internet do celular dos alunos para o link <https://pt.surveymonkey.com/r/WG9NJMV>, para a realização das atividades das pré aulas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O questionário inicial possui quatro perguntas de múltipla escolha elaboradas de acordo com o conteúdo do filme, como segue:

QUESTIONÁRIO INICIAL

1. O Físico e Matemático Gottfried Leibniz propôs uma explicação para a transferência do movimento de um objeto para outro durante uma colisão, introduzindo a ideia de força vital. Podemos associar essa ideia a qual conceito moderno da Física?
 - a) Força.
 - b) Força centrípeta.
 - c) Conservação de energia.

- d) Conservação de quantidade de movimento.
 - e) Aceleração.
2. O documentário trata de um importante período da história da humanidade em que viveu o Físico francês Nicolas Léonard Sadi Carnot. Que período foi esse?
- a) Revolução Industrial.
 - b) Idade Média.
 - c) Século XX.
 - d) Renascimento.
 - e) Revolução Francesa.
3. No documentário é descrito que Carnot acreditava que o calor era um tipo de substância que fluiria naturalmente, ou espontaneamente, de um corpo para outro em um único sentido. Qual seria esse sentido?
- a) Sempre do corpo de maior tamanho para o de menor tamanho.
 - b) Sempre do corpo de maior massa para o de menor massa.
 - c) Sempre do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura.
 - d) Sempre do corpo mais alto para o mais baixo.
 - e) Sempre do corpo de menor temperatura para o de maior temperatura.
4. O Físico Carnot defendeu que uma máquina térmica deve operar entre dois reservatórios térmicos. Para melhorar o rendimento ou a eficiência da máquina ele propõe o seguinte:
- a) Diminuir a diferença de temperatura entre os dois reservatórios térmicos.
 - b) Aumentar a diferença de temperatura entre os dois reservatórios térmicos.
 - c) Trocar de combustível.
 - d) Aumentar as dimensões da máquina.
 - e) Diminuir as dimensões da máquina.

Nosso objetivo com este questionário é pautar os assuntos a serem tratados em sala de aula. A primeira pergunta tem como foco iniciar a discussão sobre a ideia de conservação de energia. Na segunda, o objetivo é contextualizar historicamente o tema a ser estudado na época da Revolução Industrial, discutindo as condições encontradas pelos estudiosos da época na análise e elaboração dos primeiros conceitos sobre como as máquinas térmicas funcionavam. Com a terceira pergunta pode-se conduzir uma discussão sobre a elaboração do conceito de calor e energia térmica. E por fim com a quarta pergunta, o professor pode discutir com os alunos a construção realizada por Carnot sobre o funcionamento das máquinas térmicas, que seria mais tarde estabelecida como a Segunda Lei da Termodinâmica. No modelo da sala de aula invertida é muito importante considerar os momentos de *feedback* dos alunos, para podermos preparar

um material mais significativo para as aulas. A partir das respostas dos questionários on-line o professor pode preparar a aula focando nas dificuldades apresentadas pelos estudantes.

3.2 PRIMEIRA AULA

A primeira aula é destinada para a construção do conceito de rendimento térmico proposto por Carnot e para a discussão de vários conceitos da Termodinâmica como temperatura, calor, energia, trabalho, entre outros, suas relações através da Lei Zero e da Primeira Lei da Termodinâmica e como estes conceitos evoluíram historicamente. Como sugestão, o professor pode iniciar sua aula com trechos editados do vídeo “A história da energia” (STACEY, 2012), focando apenas nas partes da construção dos principais conceitos sobre o funcionamento de uma máquina térmica de acordo com Carnot, que vai do minuto 13 até o minuto 20 do vídeo.

Após a exibição do vídeo, o professor pode dar um direcionamento na sua aula de acordo com as respostas dos alunos para o questionário inicial. Nós, particularmente, demos ênfase para as maiores dificuldades dos mesmos durante a discussão dos tópicos que vão da seção 2.1 a 2.9.

É interessante o professor falar sobre a segunda pré-aula ao final da primeira aula, apresentando sucintamente o que os alunos deverão fazer entre a primeira e a segunda aulas.

3.3 SEGUNDA PRÉ-AULA

Nossa proposta para a segunda pré-aula é a construção de uma versão bastante simples da Eolípila de Heron através de um tutorial fortemente estruturado, como o mostrado na figura [20](#). Note que o tutorial foi desenvolvido em uma linguagem visual de história em quadrinhos para tornar o material mais atrativo para os alunos.

Para esta atividade experimental o professor pode solicitar aos alunos que a mesma seja feita em grupo ou individualmente. Nós optamos pelo trabalho em grupo, com no máximo 5 alunos por grupo.

A ênfase dada na Eolípila de Heron é proposital porque esse dispositivo é citado, usualmente, em alguns livros didáticos, como no livro “*Experiências de Ciências*” de Alberto Gaspar (GASPAR, 2015), como sendo um exemplo de máquina térmica. Pela montagem e manipulação do dispositivo os alunos podem ter uma noção mais clara sobre os conceitos termodinâmicos abordados na aula e o porquê da Eolípila não poder ser classificada como uma máquina térmica.

Para viabilizar a montagem da Eolípila pelos alunos sugerimos que sejam utilizados materiais de baixo custo e fácil aquisição, como uma lata de refrigerante fechada, barbante, uma agulha e velas.

Para verificar os experimentos o professor pode solicitar aos alunos que produzam vídeos da montagem e funcionamento de suas máquinas ou que levem as mesmas para a sala de aula. Em ambos os casos os resultados podem ser muito interessantes.

3.4 SEGUNDA AULA

A segunda aula pode ser iniciada com a exposição das máquinas ou dos vídeos produzidos pelos alunos na segunda pré-aula. Durante essa atividade é interessante o professor colocar a pergunta a seguir como desafio para os alunos responderem até o final da aula.

A Eolípila de Heron pode ser considerada como uma máquina térmica de acordo com o que é estabelecido pelas Leis da Termodinâmica?

Figura 20: Tutorial para a construção de uma versão simples da Eolípila de Heron. Este material foi entregue para os alunos como tarefa da segunda pré aula.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Se considerarmos apenas o funcionamento ordinário da Eolípila, da forma como foi montada pelos alunos, essa pergunta não é tão simples de ser respondida. Para realizar os experimentos e testes necessários para fazer tal verificação a atividade se torna inviável em sala de aula, a menos que a escola tenha uma estrutura adequada que não coloque em risco a integridade física dos alunos. Este problema pode ser contornado pelo professor através da exibição de um vídeo, produzido por ele mesmo, sobre os testes realizados com a Eolípila em diferentes condições de temperatura ambiente, conforme descrito na seção 1.1.

Após a discussão dos resultados apresentados no vídeo produzido pelo professor, a pergunta desafio proposta pode ser respondida mais facilmente se o professor revisar com os alunos o conceito de máquina térmica de acordo com o que é estabelecido na Termodinâmica. Esta revisão pode ser feita analisando-se como o movimento da Eolípila acontece. Isso facilitará a classificação da Eolípila como uma turbina de ação e reação.

Para ilustrar ainda melhor a Segunda Lei e os conceitos da Termodinâmica trabalhados com os alunos o professor pode utilizar o experimento do pássaro sedento. A execução deste experimento pode contribuir de maneira fundamental para os alunos perceberem as diferenças entre o funcionamento de uma máquina térmica verdadeira e a Eolípila. Todo o procedimento realizado e as discussões para mostrar que o pássaro sedento é uma máquina térmica, seção 1.2, podem ser realizados em sala de aula em uma única aula com o auxílio dos alunos. Mostrar uma máquina térmica operando sem uma caldeira alimentada por uma chama, vapor de água sendo expelido, como no caso da Eolípila, pode favorecer bastante a construção do conceito de máquina térmica e do entendimento da Segunda Lei da Termodinâmica durante as discussões.

A introdução do conceito de **Entropia** foi feita durante a nossa aplicação no momento em que o pássaro sedento diminuiu a frequência do seu movimento, devido a atmosfera de vapor de água criada ao redor do experimento. Nós relacionamos o movimento do pássaro diretamente com o seu rendimento para explicar o conceito de entropia, pois se este diminui, significa que mais energia está sendo dissipada ou espalhada (aumento de irreversibilidade), ou seja, o sistema possui menos energia disponível para a produção de movimento, causando o aumento da entropia do sistema. Portanto, o conceito de entropia foi exposto como sendo a medida, ou o parâmetro relacionado com o aumento de irreversibilidade ou perda de energia do sistema.

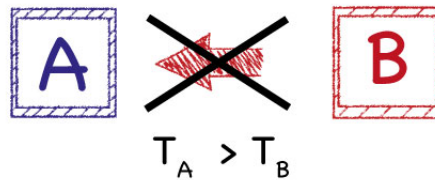
Ao final da segunda aula o professor pode aplicar os conceitos discutidos nas duas aulas em exercícios de vestibulares e do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), por exemplo. A seguir apresentamos como sugestão um questionário final para concluir a aplicação da proposta.

QUESTIONÁRIO FINAL

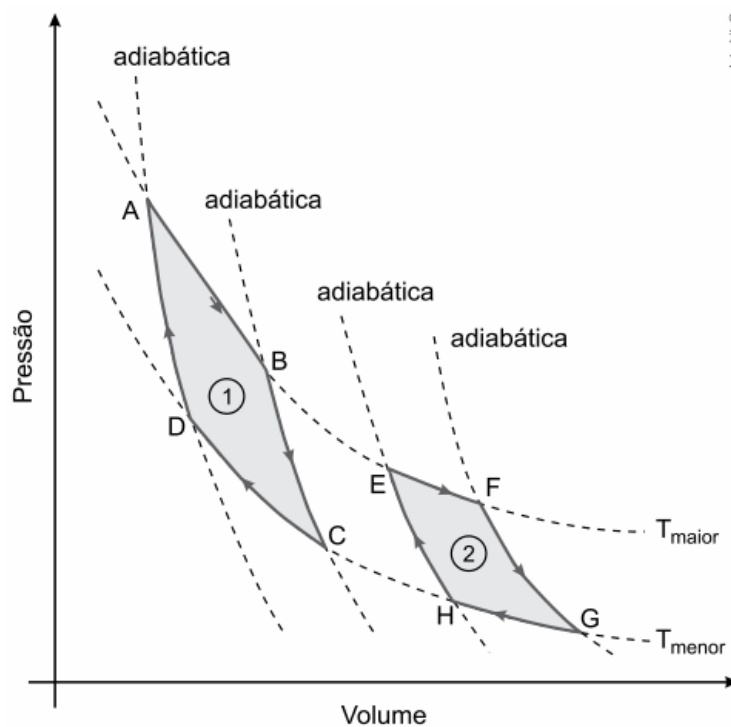
1. (Ueg 2019) Em um livro com diagramação antiga era apresentado o esquema a seguir, da troca de calor entre dois corpos A e B.

Nesse esquema o autor explica que “o calor espontaneamente não pode ir de um corpo para outro de temperatura mais alta”. Essa afirmação está de acordo com a

- a) transformação adiabática.



- b) Primeira Lei da Termodinâmica.
 c) Segunda Lei da Termodinâmica.
 d) propagação de calor por convecção.
 e) experimentação de Joule-Thompson.
2. (Famema 2017) Duas máquinas térmicas ideais, 1 e 2, têm seus ciclos termodinâmicos representados no diagrama pressão x volume, no qual estão representadas quatro transformações isotérmicas (T_{MAIOR} e T_{MENOR}) e quatro transformações adiabáticas. O ciclo $ABCD$ refere-se à máquina 1 e o ciclo $EFGHE$ à máquina 2.



Sobre essas máquinas, é correto afirmar que a cada ciclo realizado,

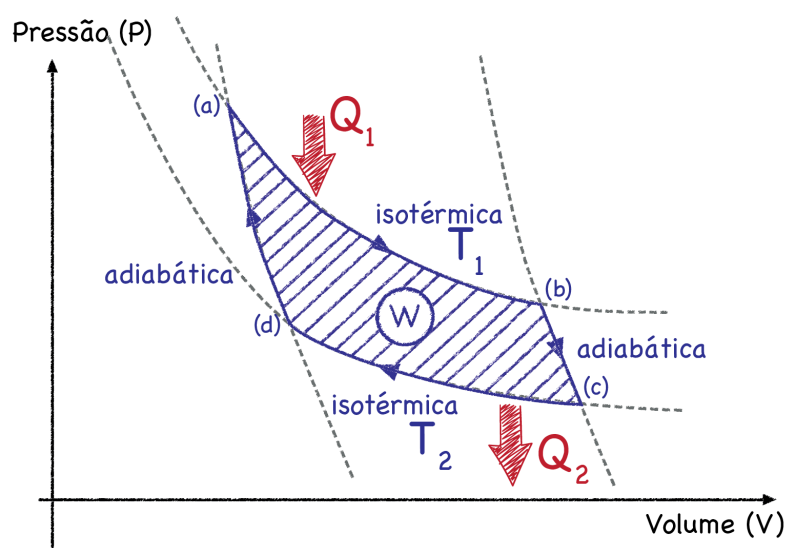
- a) o rendimento da máquina 1 é maior do que o da máquina 2.
 b) a variação de energia interna sofrida pelo gás na máquina 1 é maior do que na máquina 2.
 c) a variação de energia interna sofrida pelo gás na máquina 1 é menor do que na máquina 2.
 d) nenhuma delas transforma integralmente calor em trabalho.
 e) o rendimento da máquina 2 é maior do que o da máquina 1.

3. (ENEM 2012)

Aumentar a eficiência na queima de combustível dos motores à combustão e reduzir suas emissões de poluentes são a meta de qualquer fabricante de motores. É também o foco de uma pesquisa brasileira que envolve experimentos com plasma, o quarto estado da matéria e que está presente no processo de ignição. A interação da faísca emitida pela vela de ignição com as moléculas de combustível gera o plasma que provoca a explosão liberadora de energia que, por sua vez, faz o motor funcionar. Disponível em: www.inovacaotecnologica.com.br. Acesso em: 22 jul. 2010 (adaptado).

No entanto, a busca da eficiência referenciada no texto apresenta como fator limitante,

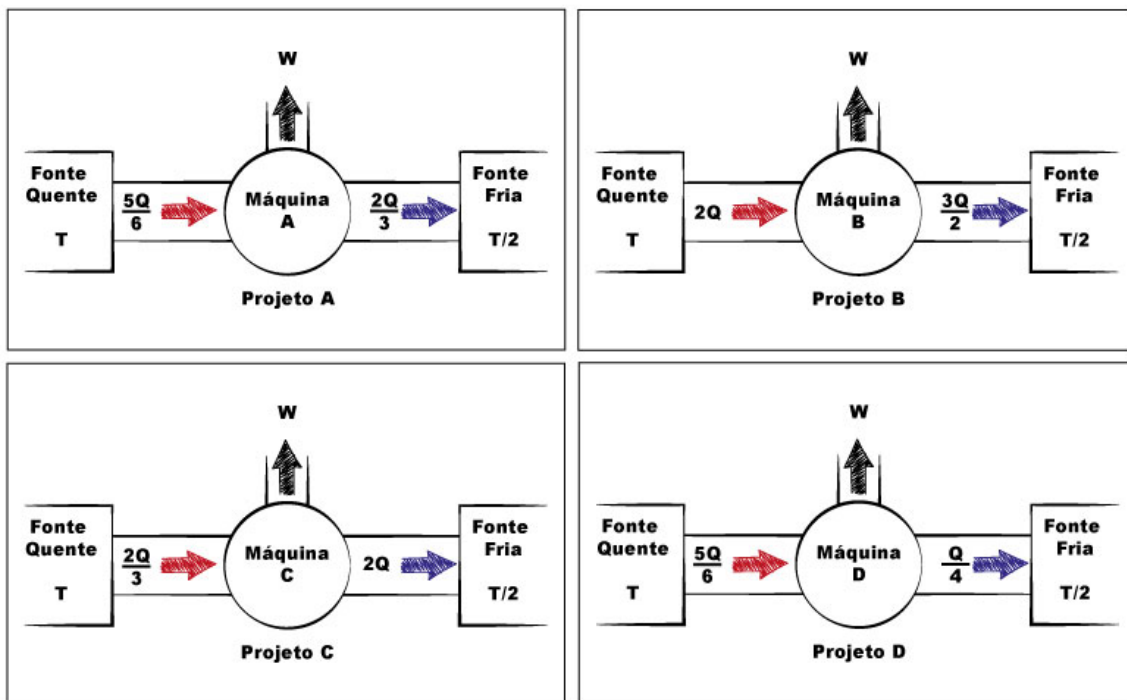
- o tipo de combustível, fóssil, que utilizam. Sendo um insumo não renovável, em algum momento estará esgotado.
 - um dos princípios da termodinâmica, segundo o qual o rendimento de uma máquina térmica nunca atinge o ideal.
 - o funcionamento cíclico de todos os motores. A repetição contínua dos movimentos exige que parte da energia seja transferida ao próximo ciclo.
 - as forças de atrito inevitáveis entre as peças. Tais forças provocam desgastes contínuos que com o tempo levam qualquer material à fadiga e ruptura.
 - a temperatura em que eles trabalham. Para atingir o plasma, é necessária uma temperatura maior que a de fusão do aço com que se fazem os motores.
4. (AFA-2020 - Adaptado) Considere uma máquina térmica ideal M que funciona realizando o ciclo de Carnot, como mostra a figura abaixo.



Essa máquina retira uma quantidade de calor Q_1 de um reservatório térmico à temperatura constante $T_1 = T$, realiza um trabalho total W e rejeita um calor Q_2 para a fonte fria

à temperatura $T_2 = T/2$, também constante. A partir das mesmas fontes quente e fria projeta-se quatro máquinas térmicas A, B, C e D, respectivamente, tendo como referência o rendimento máximo da máquina ideal de Carnot M . Nessas condições, as máquinas térmicas que poderiam ser construídas a partir dos projetos apresentados seriam,

- a) A e B
- b) B e C
- c) C e D
- d) A e D



Gabarito:

Resposta da questão 1: [C]

Resposta da questão 2: [D]

Resposta da questão 3: [B]

Resposta da questão 4: [A]

REFERÊNCIAS

- ATKINS, P. The Laws of Thermodynamics: A Very Short Introduction. Oxford University Press, 2010.
- BAZAROV, I. P. Thermodynamics. Translated by F. Immirzi. Pergamon Press: New York, 1964.
- BROWN, S. C. The Caloric Theory. American Journal of Physics, n.18, p.367-373, 1950.
- CARNOT, N.-L.-S. Reflections on the motive power of heat. From the Original French of CARNOT, N.-L.-S. Accompanied by “An Account of Carnot’s Theory” by Sir William Thomson (Lord Kelvin). Edited by THURSTON, R. H. New York: JOHN WILEY & SONS. London: CHAPMAN HALL, Limited, 1897. “Disponível em:” <https://www3.nd.edu/powers/ame.20231/carnot1897.pdf>. Acesso em: 01 Setembro 2019.
- FRIEDMAN, R. M. Creation of a New Science: Joseph Fourier’s Analytical Theory of Heat. Historical Studies in the Physical Sciences, v.8, p. 73–99, Jan. 1977.
- GASPAR, A. Experiências de ciências. São Paulo-SP: Livraria da Física. 2015.
- GOLDFARB, S. J. Theory of Heat: A Reassessment. The British Journal for the History of Science, v. 10, n. 01, p. 25-36, March 1977.
- GRIBBIN, J. História da ciência de 1543 ao presente. Editora Europa-América, 2005.
- KOYRÈ, A. Do mundo fechado ao universo infinito. Rio de Janeiro, RJ: Forense Universitária, 2001.
- MARTINS, R.; Mayer e a conservação de energia Cadernos de História e Filosofia da Ciência. v. 6, p. 63-84, 1984.
- NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física básica Vol.2 - Fluidos, oscilações, ondas e calor. São Paulo: Edigar Blücher, 1981.

PEXE, R. Turbina a vapor de ação e reação. “Disponível em:” <https://turbivap.com.br/turbina-a-vapor-de-acao-e-reacao/>. Acesso em: 25 set. 2020.

PIRES, A. S. T. Evolução das ideias da física. São Paulo - SP: Editora Livraria da Física, 2008.

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

ROCHA, J. F., PINHO, S. T. e ANDRADE, F. S. Origens e evolução das ideias da Física. Salvador: EDUFBA, 2002.

SILVA, O. H. M., LABURÚ, C. E. e NARDI, R. Reflexões para subsidiar discussões sobre o conceito de calor na sala de aula. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 25, n. 3, p. 383-396, Dez. 2008.

STACEY, N. “The Story of Energy.” From the TV Mini-Series Order and Disorder, Season 1, Episode 1. Furnace Ltd MMXII, for BBC. October 2012.