

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufscar** Sorocaba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

Sequência Didática para Abordagem da Segunda Lei da Termodinâmica no Ensino Médio

Mauro Rodrigues Alves Nogueira

Orientador: Prof. Dr. James Alves de Souza

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

Sequência Didática para Abordagem da Segunda Lei da Termodinâmica no Ensino Médio

Mauro Rodrigues Alves Nogueira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física no Ensino Médio
Orientador: Prof. Dr. James Alves de Souza

MAURO RODRIGUES ALVES NOGUEIRA

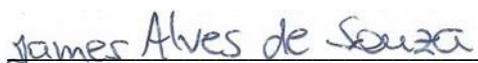
**SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA A ABORDAGEM DA SEGUNDA LEI DA
TERMODINÂMICA NO ENSINO MÉDIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Física no Ensino Médio.

Sorocaba 11 de dezembro de 2020.

Orientador:



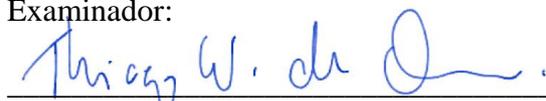
Prof. Dr. James Alves de Souza
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. Rafael Henriques Longaresi
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. Thiago Werlang de Oliveira
UFMT – Cuiabá

Rodrigues Alves Nogueira, Mauro

Sequência didática para abordagem da Segunda Lei da Termodinâmica no ensino Médio / Mauro Rodrigues Alves Nogueira -- 2020.
144f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): James Alves de Souza
Banca Examinadora: Rafael Henriques Longaresi, Thiago Werlang de Oliveira
Bibliografia

1. Ensino de Física. 2. Termodinâmica. 3. Sala de aula invertida. I. Rodrigues Alves Nogueira, Mauro. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979

DEDICATÓRIA

Em memória de meu pai Mauro Valter Garcia Nogueira.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha mãe Maria Lúcia pelo incentivo de continuar a me qualificar para o mercado de trabalho, e também ao meu filho Lucas pela companhia durante a montagem dos experimentos e pela diversão nos momentos de relaxamento.

Ao meu orientador Prof. Dr. James Alves de Souza que me acolheu em um momento de dificuldade me ajudando a realizar esse trabalho.

Não posso esquecer a importante ajuda do companheiro de mestrado Laércio Junior, pelas palavras de apoio e ideias que me auxiliaram a realizar essa tarefa árdua.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o período de formação.

RESUMO

NOGUEIRA, Mauro Rodrigues Alves. Sequência Didática para Abordagem da Segunda Lei da Termodinâmica no Ensino Médio. 2020. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba, 2020.

Uma característica muito comum presente nos currículos de educação científica é a expectativa de que os estudantes aprendam o conteúdo científico proposto, suas metodologias e sobre a ciência em si, o que inclui sua natureza, sua interação com a sociedade e diferentes culturas, sua história e como estas são diferentes de abordagens não científicas. O uso de contextualização histórica aliado à experimentação em aulas de física pode contribuir significativamente para demonstrar a relação entre ciência e um mundo de ideias mais amplo, podendo motivar os alunos a explorar questões contemporâneas. Neste trabalho consideramos a contextualização histórica para discutir a evolução de alguns conceitos da termodinâmica, como o calórico e sua consideração no trabalho de Sadi Carnot, o surgimento da terminologia calor, a importância das máquinas térmicas na revolução industrial até o estabelecimento da Segunda Lei da Termodinâmica e sua concepção mais moderna através do conceito de entropia. Para demonstração desses conceitos foram utilizados dois aparatos experimentais, o pássaro sedento e a eolípila de Heron, usualmente considerada como a primeira máquina térmica conhecida. O conceito de máquina térmica foi explorado pelos alunos utilizando a segunda lei da termodinâmica com o objetivo de verificar se os dois experimentos podem ser considerados como máquinas térmicas. Através dessa abordagem e dos testes experimentais realizados foi possível mostrar que o pássaro sedento é uma máquina térmica e um excelente dispositivo didático para o tratamento da Segunda Lei da Termodinâmica em sala de aula, enquanto que a Eolípila de Heron não pode ser considerada como tal. Esta última pode ser considerada como o primeiro protótipo de turbina de ação e reação a vapor da história, sendo útil para discutir como um movimento mecânico de rotação pode ser produzido através de energia térmica e vapor pressurizado. As atividades foram conduzidas em sala de aula através da metodologia chamada de sala de aula invertida (*Flipped Classroom*), em que os momentos e papéis no ensino podem ser invertidos e o conteúdo, usualmente ensinado pelo professor, pode ser assistido em horário escolar pelo aluno por meio de ferramentas multimídia. As atividades práticas, normalmente atribuídas para serem feitas em casa, foram realizadas em sala de aula de maneira interativa e colaborativa. Nossa proposta foi bem sucedida em sala de aula, motivando os alunos a participarem de maneira mais ativa durante a realização das atividades, possibilitando o tratamento de assuntos mais complexos da Termodinâmica como o conceito de entropia. Nosso produto educacional consiste de uma sequência didática para abordagem de vários conceitos da termodinâmica, com ênfase na Segunda Lei da Termodinâmica, preparada em uma linguagem simplificada para auxiliar o professor de Física do ensino médio.

Palavras-chave: Ensino de Física. Termodinâmica. Sala de Aula Invertida. Máquina Térmica. Eolípila.

ABSTRACT

NOGUEIRA, Mauro Rodrigues Alves. Teaching Sequence to Approach the Second Law of Thermodynamics in High School. 2020. Master's Thesis (Master's degree in Physics Teaching) – Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba, 2020.

A very common characteristic of science education curricula is the expectation that students learn the proposed scientific content, its methodologies and about science itself, which includes its nature, its interaction with society and different cultures, its history and how these are different from non-scientific approaches. The use of historical context combined with experimentation in physics classes can significantly contribute to demonstrate the relationship between science and a wider world of ideas, and can motivate students to explore contemporary issues. In this work we consider the historical context to discuss the evolution of some concepts of thermodynamics, such as caloric and its consideration in Carnot's work, the emergence of heat terminology, the importance of heat engines in the industrial revolution until the establishment of the second law of thermodynamics and its most modern conception through the concept of entropy. In order to demonstrate such concepts, two experiments were used, the drinking bird and Hero's Aeolipile (Hero's engine), usually considered as the first known heat engine. The concept of heat engine was explored by the students using the second law of thermodynamics in order to verify whether the two experiments can be considered as heat engines. Through this approach and the experimental tests carried out, it was possible to show that the drinking bird is a heat engine and an excellent didactic device for the treatment of the second law of thermodynamics in the classroom, while Hero's Aeolipile cannot be considered as such. The latter can be considered as the first steam action and reaction turbine prototype in history, being useful to discuss how a rotational motion can be produced through thermal energy and pressurized steam. The activities were conducted in the classroom using the *Flipped Classroom* methodology, in which the moments and roles of teaching can be inverted and the content, usually taught by the teacher, can be watched in school time by the student using multimedia tools. The practical activities, normally assigned to be done at home, were carried out in the classroom in an interactive and collaborative manner. Our proposal was successful in the classroom, motivating the students to participate more actively during the activities. It has also enabled a treatment of more complex subjects of thermodynamics such as the concept of entropy. Our educational product consists of a teaching sequence to approach several concepts of thermodynamics, with particular attention to the second law of thermodynamics. It was prepared in a simplified language to better assist the high school physics teacher.

Keywords: Physics Teaching. Thermodynamics. Flipped Classroom. Heat Engine. Hero's Aeolipile.

Lista de Figuras

2.1	Esquema do método da sala de aula invertida (<i>Flipped Classroom</i>), mostrando como a dinâmica de trabalho dos alunos pode ser realizada dentro e fora da sala de aula.	30
2.2	Gráfico da porcentagem de utilização das TDIC em relação às atividades realizadas em sala de aula. Este resultado é fornecido pelo Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação (Cetic.br).	32
2.3	Gráfico de demonstração da utilização do celular como principal dispositivo para acesso à Internet, ilustrando o destaque que o celular adquiriu na forma de comunicação do aluno (CETIC, 2016).	33
3.1	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.	43
3.2	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.	46
3.3	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 $T_1 > T_2$.	47
3.4	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.	48

3.5 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 50

3.6 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 50

3.7 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. 54

3.8 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) $A + B + C$ 55

3.9 Diagrama da temperatura T em função da entropia S do ciclo de Carnot. 60

3.10 Esquema ilustrativo de uma turbina AR. Em (a) um expansor fixo (1) expelle 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. Este último é o que mais se aproxima da Eolípila de Heron. 62

3.11 Fotografia do brinquedo pássaro sedento. 62

3.12 Ilustração do corpo do pássaro sedento executando seu movimento característico em torno de um ponto fixo. 63

- 3.13 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. 64
- 4.1 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. 66
- 4.2 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 67
- 4.3 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. 69
- 4.4 Tempo de cada ciclo executado pelo pássaro sedento 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. 70
- 4.5 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. 71
- 4.6 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. 76

4.7	Exemplo de uma das respostas dadas pelos alunos da escola α na primeira pré-aula durante a aplicação do produto educacional. As respostas são referentes ao questionário inicial apresentado na seção 4.3.1 e são transcritas na íntegra como: “Atividade de Física. 1.c Já que de acordo com Leibniz a força vital pode ser capturada e trocada entre colisões. 2. a. Já que mostra o período que as máquinas a vapor foram desenvolvidas (1ª Revolução Industrial). 3. c. De acordo com o que foi visto no documentário o calor vai sempre do corpo mais quente para o mais frio. 4. b. De acordo com Nicolas Carnot ao aumentar a diferença de temperatura entre os reservatórios o rendimento seria maior.” . . .	82
4.8	QRcode utilizado para direcionar o navegador de internet do celular dos alunos para o link https://pt.surveymonkey.com/r/WG9NJMV , para realização das atividades das pré-aulas.	83
4.9	Foto da tela do computador mostrando o resultado parcial, referente à quarta questão do questionário inicial, da primeira pré-aula na escola β . Nesta, o questionário foi respondido on-line pelos alunos através da plataforma <i>SurveyMonkey</i>	83
4.10	Gráficos das respostas dos alunos das duas escolas relacionadas ao questionário inicial apresentado na seção 4.3.1. Cada questão possui cinco alternativas de (a) a (e). 32 alunos da escola α e 20 alunos da escola β participaram da atividade. As setas horizontais indicam as respostas corretas.	84
4.11	Imagem de um dos experimentos da Eolípila de Heron montado pelos alunos a partir das instruções fornecidas pelo professor através do tutorial mostrado na figura 4.6.	86
4.12	Imagem dos alunos realizando o experimento do pássaro sedento. Em (a) o aluno coloca a caixa sobre o dispositivo para formar uma atmosfera mais densa de vapor de água para fazer com que o pássaro cesse o seu movimento e em (b) o Aluno retira a caixa para que o movimento do pássaro seja restabelecido.	86
4.13	Gráficos das respostas dos alunos das duas escolas relacionadas ao questionário final apresentado na seção 4.3.4. Cada questão possui cinco alternativas de (a) a (e). 32 alunos da escola α e 20 alunos da escola β participaram da atividade. As setas horizontais indicam as respostas corretas.	87
A.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.	103
A.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	104

A.3	Esquema ilustrativo de uma turbina AR. Em (a) um expensor fixo (1) expelle vapor na direção de uma pá (2) que gira um eixo perpendicular. Em (b) temos um expensor móvel (3) que se move junto com o eixo (4) na direção contrária do jato de vapor.	105
A.4	Fotografia do brinquedo pássaro sedento.	107
A.5	Ilustração do corpo do pássaro sedento executando seu movimento característico em torno de um ponto fixo.	107
A.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. Conseqüentemente, 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.	108
A.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.	109
A.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.	110
A.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.	111
A.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.	114

A.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.	118
A.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 $T_1 > T_2$	119
A.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.	120
A.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	122
A.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	122
A.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.	125
A.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) $A + B + C$	127
A.18 Diagrama da temperatura T em função da entropia S do ciclo de Carnot.	131
A.19 Exemplo de <i>QRcode</i> 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.	132
A.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.	135

Lista de Tabelas

4.1	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 $T_1 = 96^\circ C = 369,15K$	67
A.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 $T_1 = 96^\circ C = 369,15K$	104

Lista de abreviaturas e siglas

- **BNCC** - *Base Nacional Comum Curricular.*
- **PCN** - *Parâmetros Curriculares Nacionais.*
- **MNPEF** - *Programa Nacional de Mestrado Profissional em Ensino de Física.*
- **TDIC** - *Tecnologias Digitais da Informação Comunicação.*
- **Cetic.br** - *Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação.*
- **PNE** - *Plano Nacional de Educação.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	24
2 REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA	27
2.1 O MÉTODO DA SALA DE AULA INVERTIDA - <i>FLIPPED CLASSROOM</i>	30
2.2 HISTÓRIA DA CIÊNCIA	34
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	39
3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO CALOR	40
3.1.1 Calórico	41
3.1.2 O Uso Correto da Terminologia Calor	42
3.2 MÁQUINAS TÉRMICAS E A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	44
3.3 SADI CARNOT E A BUSCA POR MÁQUINAS TÉRMICAS MAIS EFICIENTES	45
3.4 A TERMODINÂMICA	53
3.4.1 Lei Zero da Termodinâmica e a Definição de Temperatura	54
3.4.2 Primeira Lei da Termodinâmica	56
3.4.3 Segunda Lei da Termodinâmica e o Conceito de Entropia	57
3.5 EOLÍPILA DE HERON	61
3.6 PÁSSARO SEDENTO	62
4 PREPARAÇÃO E APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	65
4.1 MONTAGEM E ANÁLISE DA EOLÍPILA DE HERON	66
4.2 ANÁLISE DO EXPERIMENTO DO PÁSSARO SEDENTO	68
4.3 ESTRUTURA DO PRODUTO EDUCACIONAL	71
4.3.1 Primeira pré-aula	73
4.3.2 Primeira aula	74
4.3.3 Segunda pré-aula	76
4.3.4 Segunda aula	77
4.4 DISCUSSÃO SOBRE A APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	81
5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	89

A PRODUTO EDUCACIONAL	99
A.1 EXPERIMENTOS UTILIZADOS	102
A.1.1 Máquina de Heron ou Eolípila	102
A.1.2 O experimento do Pássaro Sedento	106
A.2 CONCEITOS DE FÍSICA	111
A.2.1 Evolução Histórica do Conceito Calor	111
A.2.2 Calórico	112
A.2.3 O Uso Correto da Terminologia Calor	113
A.2.4 Máquinas Térmicas e a Revolução Industrial	115
A.2.5 Sadi Carnot e a busca por Máquinas Térmicas mais Eficientes	116
A.2.6 A Termodinâmica	124
A.2.7 Lei Zero da Termodinâmica e a Definição de Temperatura	126
A.2.8 Primeira Lei da Termodinâmica	127
A.2.9 Segunda Lei da Termodinâmica e o Conceito de Entropia	128
A.3 SEQUÊNCIA DIDÁTICA	131
A.3.1 Primeira Pré-aula	132
A.3.2 Primeira Aula	134
A.3.3 Segunda Pré-aula	134
A.3.4 Segunda Aula	134
B TUTORIAL PARA A MONTAGEM DE UMA VERSÃO SIMPLIFICADA DA EOLÍPILA DE HERON	141
C RELAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR PELA TEMPERATURA	143

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

De acordo com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) a área de Ciências da Natureza no Ensino Médio tem o papel de construir uma base de conhecimentos contextualizada, que auxilie os alunos a fazer julgamentos sobre fenômenos da natureza, tomar iniciativas, elaborar argumentos, apresentar proposições alternativas e fazer uso de diversas tecnologias (BNCC, 2017). A promoção dessas práticas e o diálogo com as demais áreas do conhecimento podem auxiliar nas discussões sobre as implicações éticas, socioculturais, políticas e econômicas de temas relacionados às Ciências da Natureza.

A disciplina de Física, se bem conduzida, pode ter um papel fundamental na formação dos jovens para o enfrentamento dos desafios da contemporaneidade e fornecer condições de distinguir informações incorretas ou falsas das verdadeiras. A desinformação tem sido um grande problema na sociedade brasileira atualmente. A compreensão de fenômenos físicos pode auxiliar o estudante a interagir com diversas tecnologias com mais consciência, conduzindo o aluno a realizar novas leituras do mundo e a adquirir condições para aprofundar o exercício do pensamento crítico.

A Física é uma ciência em que se propõe conhecer a natureza da forma mais precisa possível. Ao longo dos últimos trezentos anos foi possível desenvolver um rico arsenal de modelos teóricos e procedimentos experimentais que auxiliaram na compreensão da natureza e no desenvolvimento de novas tecnologias. Esse acúmulo de conhecimento e pesquisa é muito importante para obtenção de novos saberes e proporcionar que novas descobertas sejam possíveis (PIETROCOLA, 2001). É importante que os estudantes de ensino médio tenham o conhecimento de Física para poder compreender a natureza e interagir com as diversas tecnologias que surgiram e que estão surgindo, como decorrência de descobertas realizadas pelos físicos ao longo da história.

Apesar do importante papel na formação do aluno o desinteresse pela área de Ciências da Natureza é grande e as dificuldades são enormes no ensino de Física. Os modelos apresentados aos estudantes são, na maioria das vezes, expostos como uma matematização de um fenômeno, lembrando que o ensino de Ciências é uma atividade complexa e problemática, que não deve ser exclusivamente reduzida a resolução de problemas (PINHEIRO, 2001).

O conhecimento abrangido pela Física forma um corpo articulado de modo complexo, que

envolve outras áreas do conhecimento. Muitas vezes tratamos esse corpo de conhecimento de forma simplificada, apenas com equações e técnicas de resolução de exercícios (RIBILOTTA, 1998). Não tratar a Física considerando problemas reais e atuais pode tornar seu ensino pobre e desatualizado, fazendo com que a mesma seja pouco atrativa para os estudantes. É importante evitar que a Física seja tratada em sala de aula sem sua construção histórica do conhecimento, para que não seja passada a impressão de que a Física é uma elaboração infalível de seus criadores geniais (OLIVEIRA e SILVA, 2012). Tornar o ensino de Física mais atrativo para os alunos não é uma tarefa simples. A contextualização do momento da elaboração de um conceito físico em seu momento histórico pode ser um grande aliado do professor para mostrar aos alunos as dúvidas que os cientistas da época tiveram em sua elaboração, mostrando uma Física mais viva e cheia de incertezas (RIBILOTTA, 1998).

Não é difícil observarmos em sala de aula uma visão dos alunos de que a Física é uma ciência infalível, que não admite imprecisões, com respostas exatas. Isso acaba tornando o ensino de Física distante do cotidiano. Alguns livros didáticos apresentam as leis da Física gradativamente, de maneira linear, estando vinculadas à aplicação de fórmulas em exercícios, na maioria das vezes fora de contexto no qual surgiram (KUHN, 2000).

Essa maneira de transmitir o conhecimento científico pode criar paradigmas de verdades universais e incontestáveis, passando a impressão de que não há incertezas ou erros na Física. O aluno de ensino médio pode ser levado a acreditar que um pesquisador científico nunca erra e, como consequência, evita questionar o conhecimento construído (PEDUZZI, MARTINS e FERREIRA, 2012).

O ensino de Física sempre esteve muito ligado aos procedimentos e práticas experimentais, tendo uma relação bastante estreita com atividades realizadas em laboratório. Este usualmente é visto como a solução de inúmeros problemas no ensino de Física (FILHO, 2000). Muitos professores acreditam que a melhoria do ensino pode estar vinculada à introdução de aulas práticas no currículo do ensino médio. Porém, as dificuldades encontradas são grandes, indo desde a falta de recursos para compra de componentes, materiais, problemas técnicos, falta de pessoal capacitado para manter os laboratórios à falta de tempo do professor para planejar a realização de atividades como parte do seu programa de ensino. Devido a essas e outras justificativas, poucos experimentos são realizados pelos alunos durante o ensino médio. Os poucos experimentos realizados neste nível de ensino usualmente seguem o modelo de laboratório tradicional, onde o aluno realiza atividades práticas, envolvendo observações e medidas, sobre os fenômenos previamente determinados pelo professor. Geralmente os alunos trabalham em pequenos grupos e seguem as instruções de um roteiro fortemente estruturado. O objetivo da atividade prática pode ser o de testar uma lei científica, ilustrar ideias e conceitos aprendidos nas aulas teóricas, descobrir ou formular uma lei acerca de um fenômeno específico, visando comprovar o que foi dito em sala de aula, ou seja, os experimentos tem que dar certo necessariamente sendo preparados para minimizar incertezas. Os alunos passam a acreditar em uma Ciência pronta, com respostas para todas as dúvidas, sem incorrer em erros ou passar por problemas (BORGES, 2002).

Na sequência didática proposta nesta dissertação realizamos dois experimentos, o pássaro sedento e a eolípila de Heron, para abordagem de diversos conceitos da termodinâmica considerados no ensino médio, com destaque para a Segunda Lei da Termodinâmica e o conceito de entropia. Experimentos envolvendo Termodinâmica são escassos, existindo poucas publicações de experimentos didáticos em revistas especializadas (AZEVEDO, 2000). O ensino da Termodinâmica no Ensino Médio tem sido considerado um desafio tanto para os professores quanto para os estudantes. Essa disciplina tem sido um dos assuntos em que os alunos apresentam maior dificuldade para compreender os conceitos envolvidos (LIMA, 2016). Apesar das dificuldades o conteúdo é de muita importância, pois envolve conceitos e informação muito útil diretamente relacionados ao cotidiano dos alunos, como a conservação de energia, o funcionamento e a eficiência de máquinas térmicas. Adicionalmente, esta pode complementar de maneira significativa no entendimento de conceitos mais complexos como energia, trabalho, calor e entropia. O ensino de Termodinâmica segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) tem a seguinte orientação:

A Termodinâmica, por sua vez, ao investigar fenômenos que envolvem o calor, trocas de calor e de transformação da energia térmica em mecânica, abre espaço para uma construção ampliada do conceito de energia. Nessa direção, a discussão das máquinas térmicas e dos processos cíclicos, a partir de máquinas e ciclos reais, permite a compreensão da conservação de energia em um âmbito mais abrangente, ao mesmo tempo em que ilustra importante lei restritiva, que limita processos de transformação de energia, estabelecendo sua irreversibilidade. A omissão dessa discussão da degradação da energia, como geralmente acontece, deixa sem sentido a própria compreensão da conservação de energia e dos problemas energéticos e ambientais do mundo contemporâneo. Também a discussão de fontes e formas de transformação/produção de energia pode ser a oportunidade para compreender como o domínio dessas transformações está associado à trajetória histórica humana e quais os problemas com que hoje se depara a humanidade a esse respeito (BRASIL, parte III, 2000, p. 25 e 26).

Outro pilar na construção da sequência didática apresentada neste trabalho é a utilização da História da Ciência. Esta, se bem conduzida, pode ter diversos benefícios na formação dos alunos. Além de fornecer condições para o aprendizado de conteúdos específicos da Física, esta também pode auxiliar na ampliação da cultura geral do estudante, de modo a se tornar um recurso didático promissor para melhorar a compreensão dos alunos sobre ciência. O aprendizado baseado na construção histórica da ciência pode ser fundamental para o letramento científico, podendo desenvolver a capacidade crítica dos estudantes e a compreensão dos processos socioculturais na construção do conhecimento científico (FORATO, MARTINS e PIERTECOLA, 2012).

As competências gerais da educação básica da BNCC valorizam a construção de conceitos a partir de momentos históricos:

Valorizar e utilizar os conhecimentos historicamente construídos sobre o mundo físico, social, cultural e digital para entender e explicar a realidade, continuar aprendendo e colaborar para a construção de uma sociedade justa, democrática e inclusiva (BRASIL, 2017, p. 9).

Utilizando a História da Ciência como norteador em nossa proposta didática, construímos com os alunos o conceito de **Entropia**, decorrente da segunda lei da Termodinâmica, o qual é pouco abordado no Ensino Médio. Visando tornar o ensino/aprendizagem mais significativo, contextualizamos 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. Os experimentos utilizados foram muito importantes para demonstrar tais conceitos no funcionamento e na definição de máquina térmica, de acordo com o que é estabelecido na Segunda Lei da Termodinâmica.

Para dar mais autonomia aos estudantes utilizamos o método de ensino conhecido como *blended learning* (ensino híbrido). Esta é uma proposta educacional que mescla momentos em que o aluno estuda os conteúdos e instruções usando recursos *on-line* e outros em que o ensino ocorre em sala de aula. Nesta abordagem é necessária a presença física de ambos, professor e aluno.

Com o *blended learning* a abordagem pedagógica é realizada pela combinação de atividades presenciais e atividades realizadas por meios de tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC). Existem diversas maneiras de combinar essas atividades, porém, na essência, a estratégia consiste em colocar o foco do processo de aprendizagem no aluno e não mais na transmissão de informação que o professor tradicionalmente realiza (MORAN 2015). Nessa proposta a aprendizagem pode surgir a partir de responsabilidades compartilhadas, com amplo acesso à informação, modificando totalmente as relações de domínio do conhecimento em sala de aula. Isso pode conduzir uma mudança profunda nos papéis desempenhados pelos professores e estudantes, uma vez que o conhecimento pode ser produzido e compartilhado através das TDIC (SARMENTO, VILLAROUÇO e GOMES, 2020). Nesse modelo o aluno precisa se preparar para a aula, e não apenas para as avaliações. Ao final de cada atividade o estudante responde as perguntas sobre o que foi estudado por ele. O professor tem acesso, através das TDIC, das respostas dos alunos antes da aula.

Dentro desta abordagem pedagógica se destaca a sala de aula invertida (*Flipped Classroom*), em que o conteúdo é passado aos alunos através de um meio tecnológico, como vídeos. Se o aluno assistir o vídeo em casa, ele poderá chegar na sala de aula mais preparado para uma discussão mais aprofundada. A sala de aula passa a ser um local de realização de atividades práticas como resolução de problemas e projetos, discussão em grupo e laboratórios (VALENTE, 2014).

Adicionalmente a isso utilizamos organizadores prévios para estabelecer nossa estratégia para aplicação da sequência didática desenvolvida. Ausubel propõe o uso de tais organizadores para auxiliar o processo de ensino/aprendizagem. Estes são compostos por materiais introdutórios que antecedem os conteúdos a serem aprendidos. Os organizadores prévios auxiliam na aprendizagem significativa por salientarem informações com as quais os alunos já tenham familiaridade e que servirão como substrato para a assimilação de novos materiais (RIBEIRO, SILVA e KOSCIANSKI, 2012).

Em nossa sequência didática as atividades foram iniciadas com o episódio 1 do documentário sobre Ordem e Desordem produzido pela BBC FOUR (BBC, 2012), o qual fala sobre energia

e os aspectos históricos sobre a evolução deste conceito. Este vídeo foi assistido pelos alunos em casa, antes do assunto ser tratado na sala de aula. Com este organizador prévio, o aluno foi capaz de assimilar alguns conceitos sobre calor e situar o momento histórico onde esse conceito foi construído. Adicionalmente, foi proposto aos alunos uma atividade prática em que eles construíram uma eolípila, também conhecida como máquina de Heron, para verificarem que esse dispositivo não pode ser considerado como uma máquina térmica, de acordo com o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica. Isso trouxe grande surpresa aos alunos, uma vez que este experimento aparece em alguns materiais didáticos como um exemplo de uma máquina térmica, como na obra “Experiências de Ciências” de Alberto Gaspar (GASPAR, 2015). O conceito de máquina térmica foi verificado de maneira clara através do experimento do pássaro sedento. Através de um procedimento experimental simples foi possível mostrar para os alunos que se alterarmos as fontes térmicas do sistema modificamos drasticamente o seu rendimento, traduzido através do movimento do pássaro. Com estes experimentos foi possível discutir também o conceito de entropia de uma maneira mais atrativa e consistente.

Além dos organizadores prévios e das atividades práticas, propomos aos alunos algumas situações-problema envolvendo a Segunda Lei da Termodinâmica para avaliar algumas implicações da mesma no cotidiano, como a impossibilidade da existência de um motor que funcione continuamente ou que apresente rendimento de 100%. Essa abordagem vai de encontro com a proposta de Ensino de Física segundo a BNCC:

Analisar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação - TDIC (BNCC, 2017, p. 539).

Na sequência didática apresentada separamos os temas a serem estudados em dois momentos, uma pré-aula e uma aula. Na pré-aula criamos as condições para que o aluno pudesse estudar o assunto que discutimos em sala de aula. Dessa forma o aluno foi para sala de aula mais preparado, com uma boa noção dos conteúdos considerados. Os alunos responderam a um questionário ao final da pré-aula, que foi enviado para o professor antes da aula, possibilitando ao professor preparar melhor a aula. Na aula foi proposto uma discussão sobre as leis da Termodinâmica contextualizada historicamente, levando o aluno a compreender a construção de seus conceitos e os cientistas que se debruçaram sobre o tema calor.

Em um segundo momento foi proposto aos alunos que construíssem uma eolípila para verificar se esta é uma máquina térmica de acordo com o que é estabelecido pela Segunda Lei da Termodinâmica. O objetivo foi confrontar a ideias de que nem toda máquina que recebe energia através de calor é uma máquina térmica. O experimento com a eolípila foi realizado fora da sala de aula e um vídeo com os resultados foi mostrado. Os próprios alunos chegaram a conclusão de que a eolípila não é uma máquina térmica.

Para mostrar o funcionamento de uma verdadeira máquina térmica realizamos com os alunos um experimento demonstrativo dado pelo pássaro sedento. Neste, alteramos a fonte fria da

máquina ficando evidente a alteração do rendimento da mesma. Após esse experimento pedimos para os alunos responderem um questionário *on-line* contendo questões sobre a Segunda Lei da Termodinâmica.

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Sou professor de física no ensino médio desde 1993, sempre gostei de lecionar ciências com aulas práticas, mas sempre encontrei dificuldades de ministrar aulas práticas em laboratório de ensino. Nem sempre foi possível conciliar o meu desejo com o cronograma imposto. Outra dificuldade que sempre encontrei foi a falta de um laboratório de ensino de ciências na escola. Quando era possível contornar todas as dificuldades surgia outro problema, como a falta de hábito do aluno em realizar um procedimento científico. Atualmente, com a padronização do ensino médio com material apostilado e salas de aulas mais lotadas, a tendência, diante do cenário que tenho observado e vivido, está sendo tornar as aulas práticas cada vez mais distantes do cotidiano dos alunos, como se fosse algo desnecessário para o ensino de ciências.

Eu acredito, e a literatura tem comprovado isso (AZEVEDO, 2000), que o ensino de física sempre esteve atrelado às aulas práticas experimentais tendo por objetivo proporcionar aos alunos um contato mais próximo com os fenômenos físicos. O termo aula prática é empregado para designar as atividades nas quais os alunos interagem com materiais destinados a realização de uma experiência voltada a entender um fenômeno da natureza ou apenas observar um comportamento a ser estudado (RIBILOTTA, 1998). Os alunos geram uma grande expectativa quanto as aulas práticas, pois este é um dos momentos em que a teoria e o formalismo matemático desenvolvidos na sala de aula confrontam o mundo real através dos experimentos.

Os experimentos de física no ensino médio estão se tornando raros na atualidade, devido a poucas escolas terem um local apropriado para a realização de experimentos em suas dependências (RIBILOTTA, 1998). Um levantamento que quantifica o número de publicações em revistas e periódicos especializados em ensino de física, refletindo as tendências do uso de experimentos para o ensino de física (AZEVEDO, SANTOS, CARLOS e TANCREDO, 2009), mostra que a quantidade de experimentos didáticos está muito abaixo do esperado, tanto na formação dos nossos alunos das escolas públicas e particulares, quanto na formação dos licenciandos em física nos diversos cursos de formação de professores. Neste levantamento foram encontrados 274 experimentos para aulas de física em nove periódicos. Dos nove periódicos analisados três não possuem nenhum artigo publicado refletindo as tendências do uso de experimentos de física e outros três tem pouquíssimos trabalhos na área, refletindo o pouco interesse no tema. Neste estudo os autores mostraram que apenas os três periódicos Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, A Física na Escola e a Revista Brasileira de Ensino de Física têm por hábito publicar artigos que discutem o uso de experimentos de física para o ensino. Dos 274 artigos encontrados e analisados, 269 foram publicados nos periódicos citados.

No tema Termodinâmica, escolhido para o desenvolvimento deste trabalho, existe um número muito pequeno de propostas de experimentos a serem realizadas pelos estudantes. Somente

12,77%, dos 274 artigos selecionados por Azevedo e seus colaboradores, são relacionados à Termodinâmica. Este é um número muito pequeno dado a importância da Termodinâmica no ensino de física e sua presença no cotidiano dos alunos. Outro dado levantado pelos autores é a contextualização histórica dos experimentos realizados, em que apenas 6 dentre os 274 artigos (pouco mais de 2%) tem como tema experimentos a partir da reconstrução de aparatos históricos da física (AZEVEDO, SANTOS, CARLOS e TANCREDO, 2009).

Essa quantidade baixa de experimentos voltados ao ensino da Termodinâmica acaba gerando pouco interesse dos alunos sobre o assunto, tornando o processo de ensino/aprendizagem maçante (AZEVEDO, SANTOS, CARLOS e TANCREDO, 2000). Sempre tive dificuldades de preparar uma atividade experimental, específica em Termodinâmica, que fosse significativa para os estudantes. Neste trabalho foi desenvolvida uma sequência didática que une dois experimentos de Termodinâmica e a contextualização histórica na elaboração da segunda lei, abrindo uma oportunidade para discutir em sala de aula o conceito de Entropia, que é um assunto pouco abordado no Ensino Médio (NÓBREGA, 2009).

A proposta de uma sequência didática com dois experimentos visa uma aprendizagem significativa de forma mais autônoma, dando mais responsabilidades aos alunos. O método para a aplicação da proposta, o *Flipped Classroom*, atribui ao estudante responsabilidades e autonomia no processo de ensino/aprendizagem.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA

Os professores de Física estão tendo que se especializar a cada dia mais para conseguir motivar os alunos em sala de aula, o que inclui identificar e aprender a utilizar uma grande variedade de novas técnicas de ensino, novos equipamentos, programas de computador e softwares, entre outros (UNDERWOOD, 2000). Uma maneira de tornar o processo de ensino/aprendizagem mais conectado com os recursos atuais é mesclar as atividades presenciais com atividades remotas através das tecnologias digitais de informação e comunicação. O *blended learning* é uma abordagem pedagógica com grande potencial para isso, pois através desta é possível combinar atividades presenciais e atividades realizadas por meios de TDIC (MORAN, 2015).

O produto educacional apresentado nesta dissertação foi desenvolvido para lecionar a Segunda Lei da Termodinâmica de forma mais significativa para os alunos e útil para os professores do ensino médio. Para isso, escolhemos o método de ensino *Flipped Classroom*, o qual vai de encontro com a ideia de uma aprendizagem significativa de forma mais autônoma, dando mais responsabilidades aos alunos. Aliado a este método utilizamos a História da Ciência como linha condutora para contextualizar a construção dos conceitos que culminaram no estabelecimento da Segunda Lei da Termodinâmica.

De acordo com Lefrançois a aprendizagem é definida como:

Toda mudança relativamente permanente no potencial de comportamento, que resulta da experiência, mas não é causada por cansaço, maturação, drogas, lesões ou doença. No sentido estrito, claro, a aprendizagem não é definida pelas mudanças reais ou potenciais no comportamento. Em vez disso, a aprendizagem é o que acontece ao organismo (humano ou não humano) como resultado da experiência. As mudanças comportamentais são simplesmente evidências de que a aprendizagem ocorreu (LEFRANÇOIS, p.5, 2018).

Quando falamos em aprendizagem segundo o construto cognitivista, estamos encarando a aprendizagem como um processo de armazenamento de informação, condensação em classes mais genéricas de conhecimentos, que são incorporados a uma estrutura na mente do indivíduo, de modo que esta possa ser manipulada e utilizada no futuro. É a habilidade de organização

de informações que deve ser desenvolvida. Para Ausubel, a aprendizagem significa organização do material na estrutura cognitiva (MOREIRA, 2001).

Segundo Ausubel a aprendizagem significativa segue um processo de assimilação na aprendizagem e na retenção significativas:

A aprendizagem significativa constitui apenas a primeira fase de um processo de assimilação mais vasto e inclusivo, que também consiste na própria fase sequencial natural e inevitável da retenção e do esquecimento. A Teoria da Assimilação explica a forma como se relacionam de modo seletivo, na fase de aprendizagem, novas ideias potencialmente significativas do material de instrução com ideias relevantes, e, também, mais gerais e inclusivas (bem como mais estáveis), existentes (ancoradas) na estrutura cognitiva. Estas ideias novas interagem com as ideias relevantes ancoradas e o produto principal desta interação torna-se, para o aprendiz, o significado das ideias de instrução acabadas de introduzir. Estes novos significados emergentes são, depois, armazenados (ligados) e organizados no intervalo de retenção (memória) com as ideias ancoradas correspondentes (AUSUBEL, p.11, 2003).

Ausubel partiu da ideia de que a aquisição e retenção de conhecimento convertem-se em um processo ativo, integrador e interativo entre o material potencialmente significativo e as ideias pertinentes da estrutura cognitiva do aprendiz. Dentro da teoria da aprendizagem significativa, o conceito de “subsunçor” se refere a uma ideia já presente na estrutura cognitiva do aprendiz, responsável por fazer a interação ou ponte cognitiva daquilo que já sabe com a nova informação. É através do subsunçor preexistente que o aprendiz poderá fazer uma âncora com a nova informação, promovendo, desta forma, uma aprendizagem significativa, menos mecânica e com mais sentido (RIBEIRO, SILVA e KOSCIANSKI, 2012).

Mas como é possível criar novas conexões entre os novos conceitos e a estrutura cognitiva do aluno? Segundo Ausubel:

Dependendo da natureza da tarefa de aprendizagem (*i.e.*, recepção ou descoberta), o mecanismo pode ser descobrir ou, simplesmente, apreender (compreender) e incorporar tais relações na estrutura cognitiva. Por outro lado, na aprendizagem por memorização, o mecanismo do aprendiz pode consistir em descobrir uma solução arbitrária para um problema, ou interiorizar o material verbal de forma arbitrária e literal, como um objetivo discreto e isolado por si só. Contudo, tal aprendizagem não ocorre, como é óbvio, num vácuo cognitivo. O material está relacionado com aspectos relevantes da estrutura cognitiva, mas não de forma substantiva (não literal) e não arbitrária, permitindo a incorporação numa das relações existentes na estrutura cognitiva acima especificadas. Sempre que a aprendizagem pela descoberta está envolvida, a distinção entre aprendizagem por memorização e significativa corresponde a distinção entre ‘tentativa e erro’ e resolução de problemas com discernimento (AUSUBEL, p.57, 2003).

A ideia central da teoria de Ausubel é a de que o fator mais importante influenciando o processo de ensino/aprendizagem é aquilo que o aluno já sabe. A aprendizagem significativa é um processo pelo qual uma nova informação se relaciona com um aspecto relevante da estrutura de conhecimento do estudante (MOREIRA e MASINI, 2001). Isso significa que, caso fosse possível isolar uma única variável como sendo a que mais influencia novas aprendizagens,

esta variável seria o conhecimento prévio, os subsunçores já existentes na estrutura cognitiva do estudante. O conhecimento prévio “ajuda” na aprendizagem de novos conhecimentos, permite dar significados a estes conhecimentos, ao mesmo tempo que fica mais estável, mais rico, mais elaborado. Mas, dizer que o conhecimento prévio é a variável que mais influencia a aprendizagem significativa de novos conhecimentos não significa dizer que é sempre uma variável facilitadora (MOREIRA, 2012).

Porém, a falta de subsunçores pode ser um problema. Nessa situação sugere-se o uso de organizadores prévios, que são mecanismos pedagógicos auxiliares na ligação entre aquilo que o aprendiz já sabe e aquilo que irá adquirir. Utilizamos no produto educacional um vídeo como organizador prévio. Foi proposto aos alunos que assistissem ao documentário da BBC sobre energia e que respondessem a um questionário com perguntas sobre o que assistiram. Foi solicitado aos alunos também que respondessem a um questionário on-line, o qual foi disponibilizado antes da aula.

A justificativa para o uso dos organizadores prévios vem do fato de que as ideias existentes na estrutura cognitiva do aprendiz podem não ter a relevância e o conteúdo suficientes para estabelecerem ligações com as novas ideias introduzidas pelo material de instrução (RIBEIRO, SILVA e KOSCIANSKI, 2012). Nesse caso, o organizador prévio faz o papel de mediador e também faz a alteração das ideias preexistentes, preparando-as para o estudo do material posterior. Segundo Ausubel, “apresentam-se os organizadores a um nível mais elevado de abstração, generalidade e inclusão do que os novos materiais a serem aprendidos” (AUSUBEL, 2003, p. 11).

Para isso, os organizadores prévios devem salientar os pontos mais evidentes do material e omitir informações menos importantes; eles auxiliam o estudante a realizar sua própria codificação da nova informação na memória (RIBEIRO, SILVA e KOSCIANSKI, 2012).

As condições para se observar aprendizagem significativa são essencialmente duas: o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo e o aprendiz deve apresentar uma predisposição para aprender. O material de aprendizagem, como livros, aulas, aplicativos, entre outros, precisa ter um significado lógico para que o estudante possa dar um significado a ele. Com relação a predisposição do aprendiz é preciso que o aluno tenha em sua estrutura cognitiva ideias-âncora relevantes com as quais esse material possa ser relacionado. Ou seja, o material deve ser relacionável à estrutura cognitiva e o aprendiz deve ter o conhecimento prévio necessário para fazer esse relacionamento de forma não-arbitrária e não-literal (MOREIRA, 2012).

No papel de professor sempre procuramos, de várias formas, meios para que os alunos tenham uma aprendizagem significativa, mas a pergunta que sempre fazemos é: Como criar um material potencialmente significativo? O material em si, por melhor que seja, deve ser bem explorado pelo professor. Para isso é essencial selecionar um método para aplicação do material que seja o mais adequado possível com a realidade escolar dos alunos. O método escolhido para aplicação da nossa proposta é conhecido como sala de aula invertida, ou *Flipped Classroom*. Este tem como prática o uso de pré-aulas como organizadores prévios para auxiliar na ligação

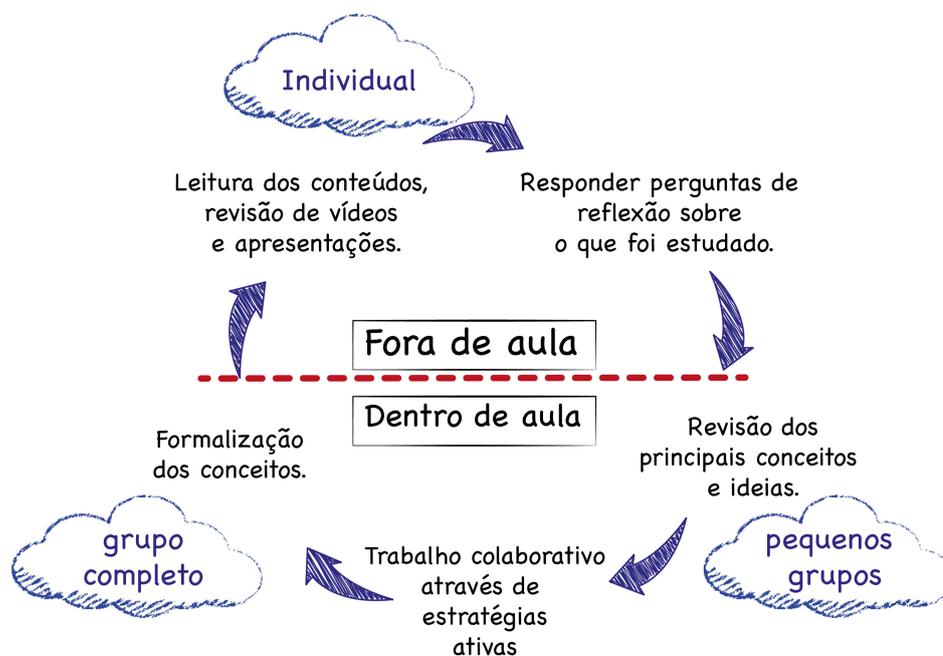
entre aquilo que o aprendiz já sabe e aquilo que irá adquirir.

2.1 O MÉTODO DA SALA DE AULA INVERTIDA - *FLIPPED CLASSROOM*

Os novos métodos educacionais apontam para um ensino centrado no aluno, onde o estudante assume o protagonismo com uma participação mais ativa e autônoma. Isso supõe a necessidade de uma nova abordagem por parte dos professores para atender aos novos requisitos (RIBILOTTA, 1998). Os métodos educacionais chamados de tradicionais são caracterizados por focar no acúmulo de conteúdo e no papel principal do professor na sala de aula, promovendo atividades que podem favorecer ou induzir à memorização.

No método da sala de aula invertida, também conhecido como *Flipped Classroom*, os momentos e papéis do ensino tradicional são invertidos, ou seja, o conteúdo, normalmente ensinado pelo professor, pode ser trabalhado pelo aluno em horário escolar com o auxílio de ferramentas multimídia. Dessa forma, as atividades práticas, que normalmente são deixadas para serem feitas pelo aluno em casa, podem ser realizadas em sala de aula por meio de métodos interativos de trabalho colaborativo, aprendizagem baseada em problemas e realização de projetos, como representado no esquema da figura 2.1 (COLLAZOS, 2006; VALENTE, 2014; CARVALHO, 2014).

Figura 2.1: Esquema do método da sala de aula invertida (*Flipped Classroom*), mostrando como a dinâmica de trabalho dos alunos pode ser realizada dentro e fora da sala de aula.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na nossa proposta de sequência didática abordamos diferentes maneiras de combinar atividades presenciais e à distância utilizando este método. Os procedimentos, o conteúdo e as

instruções sobre os assuntos abordados não foram transmitidos exclusivamente pelo professor em sala de aula. Os alunos estudaram o material antes de frequentarem as aulas. Nosso intuito inicial foi fazer com que os alunos começassem a aprender ativamente, realizando as atividades de resolução de problemas ou projetos propostos e interagissem durante as discussões com o apoio do professor e a colaboração dos colegas.

Um grande benefício do método da sala de aula invertida foi facilitar a atividade de educador, atuando principalmente como um mediador, conferindo ao aluno maior autonomia. Foi possível verificar que o educador pode ter um papel mais plural e atuante na linha construtivista, buscando valorizar a ação dos seus alunos e assim estimular capacidades e competências. Para utilizar este método de ensino é aconselhável seguir algumas regras básicas para inverter a sala de aula. Segundo o relatório *Flipped Classroom Field Guide* (201-?): 1) As atividades em sala de aula envolvem uma quantidade significativa de questionamento, resolução de problemas e de outras atividades de aprendizagem ativa, obrigando o aluno a recuperar, aplicar e ampliar o material aprendido on-line. 2) Os alunos recebem um feedback imediatamente após a realização das atividades presenciais. 3) Os alunos são incentivados a participar das atividades on-line e presenciais. Estas são computadas na avaliação formal do aluno, ou seja, valem nota. 4) Tanto o material a ser utilizado on-line quanto os ambientes de aprendizagem em sala de aula são altamente estruturados e bem planejados.

O impacto das novas tecnologias digitais em diferentes áreas tem pressionado os professores a mudar suas estratégias de ensino/aprendizagem. As Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC) fornecem acesso instantâneo à informação através de diferentes dispositivos tecnológicos com acesso à internet.

Para conduzir aulas com o método de sala de aula invertida é importante utilizar ferramentas que facilitem a troca de informações entre o professor e os estudantes, tanto dentro quanto fora da sala de aula. Neste sentido, o uso das TDIC representa uma excelente oportunidade, que também favorece o desenvolvimento das habilidades digitais necessárias à sociedade do conhecimento (COLLAZOS, 2006).

Existem muitos desafios a serem vencidos para integrar as tecnologias de informação com o cotidiano escolar. A ampliação e qualificação do acesso aos dispositivos e redes é um dos principais fatores que atrapalha as atividades de ensino e aprendizagem utilizando as TDIC. Apesar das políticas de fomento ao acesso às tecnologias nas escolas os resultados ainda estão abaixo do esperado (CETIC, 2017). As TDIC estão presentes em algumas metas do Plano Nacional de Educação (PNE) como área de estudo e pesquisa para estudantes do Ensino Médio, como forma de diversificar os métodos de ensino e as propostas pedagógicas.

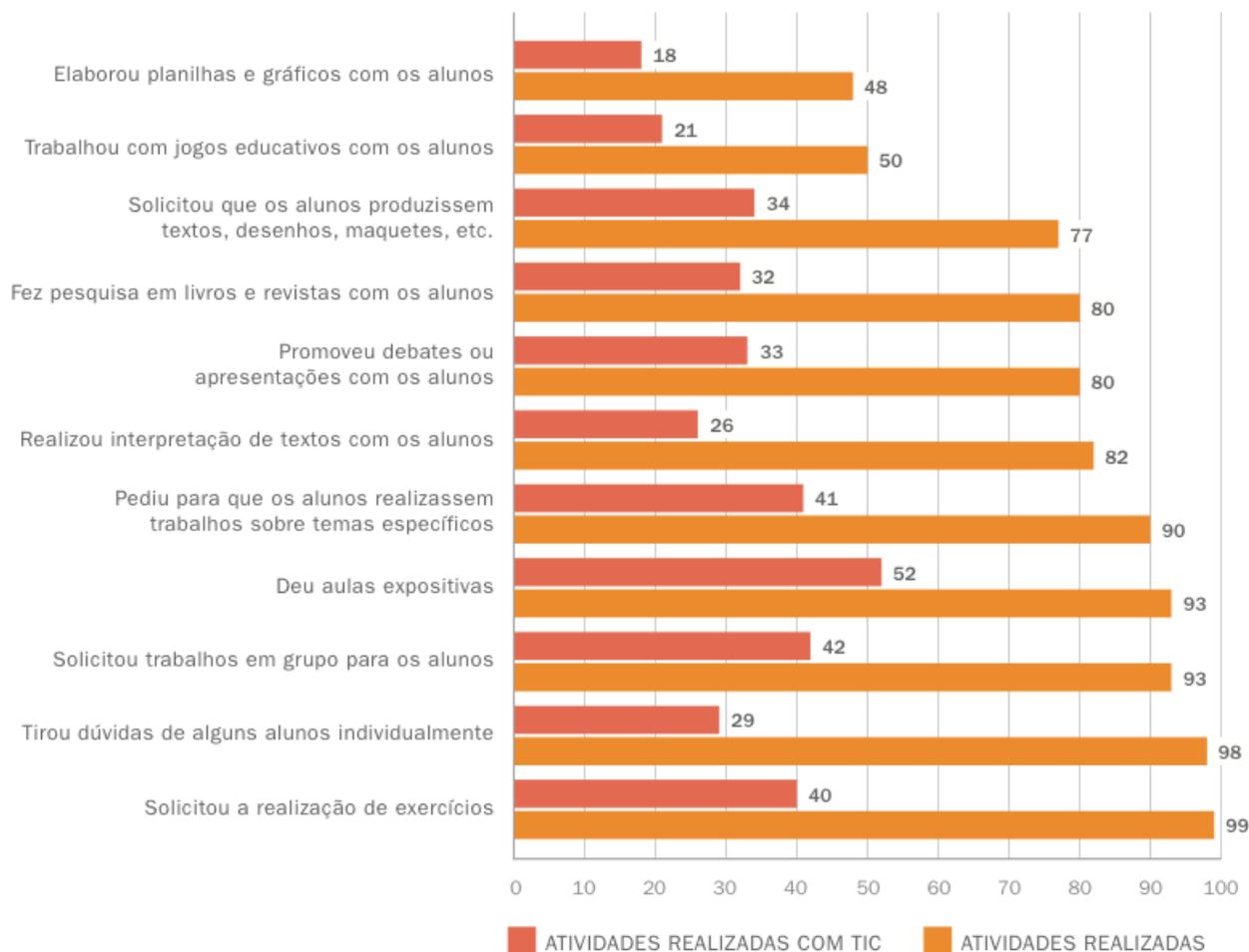
Em uma pesquisa realizada em 2016 pelo Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação (Cetic.br) é possível notar que a prática do professor na sala de aula continua sendo realizada, em sua maioria, de forma tradicional e com pouca inserção de novas tecnologias. Na figura 2.2 é apresentado um gráfico que mostra a comparação entre atividades realizadas em sala de aula com o uso de TDIC em relação ao número total de atividades realizadas. Neste é possível verificar que o percentual de atividades em que são

utilizadas TDIC é muito inferior àquele relacionado às atividades realizadas de forma geral. Isso ocorre, em parte, porque a escola não possui estrutura adequada para permitir um fácil acesso à utilização das TDIC (CETIC, 2016).

Figura 2.2: Gráfico da porcentagem de utilização das TDIC em relação às atividades realizadas em sala de aula. Este resultado é fornecido pelo Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação (Cetic.br)

PROFESSORES, POR ATIVIDADES REALIZADAS COM OS ALUNOS (2016)

Total de professores usuários de Internet (%)



Fonte: Gráfico extraído de CETIC, p.112, 2016.

Apesar deste resultado, uma nova perspectiva pode mudar a forma de utilização das TDIC. Os dispositivos móveis de telefonia estão cada vez mais tomando o lugar do computador como forma de obter informação. O celular foi o principal dispositivo para acesso à Internet para 77% dos alunos usuários da rede de ensino, sendo que em 2015 essa proporção era de 73%. Ao mesmo tempo, o acesso à Internet prioritariamente por outros equipamentos, como computadores de mesa (9%) e laptops (6%), apresenta tendência de redução. O gráfico na figura 2.3 mostra o destaque que o celular adquiriu na forma de comunicação do aluno (CETIC, 2016).

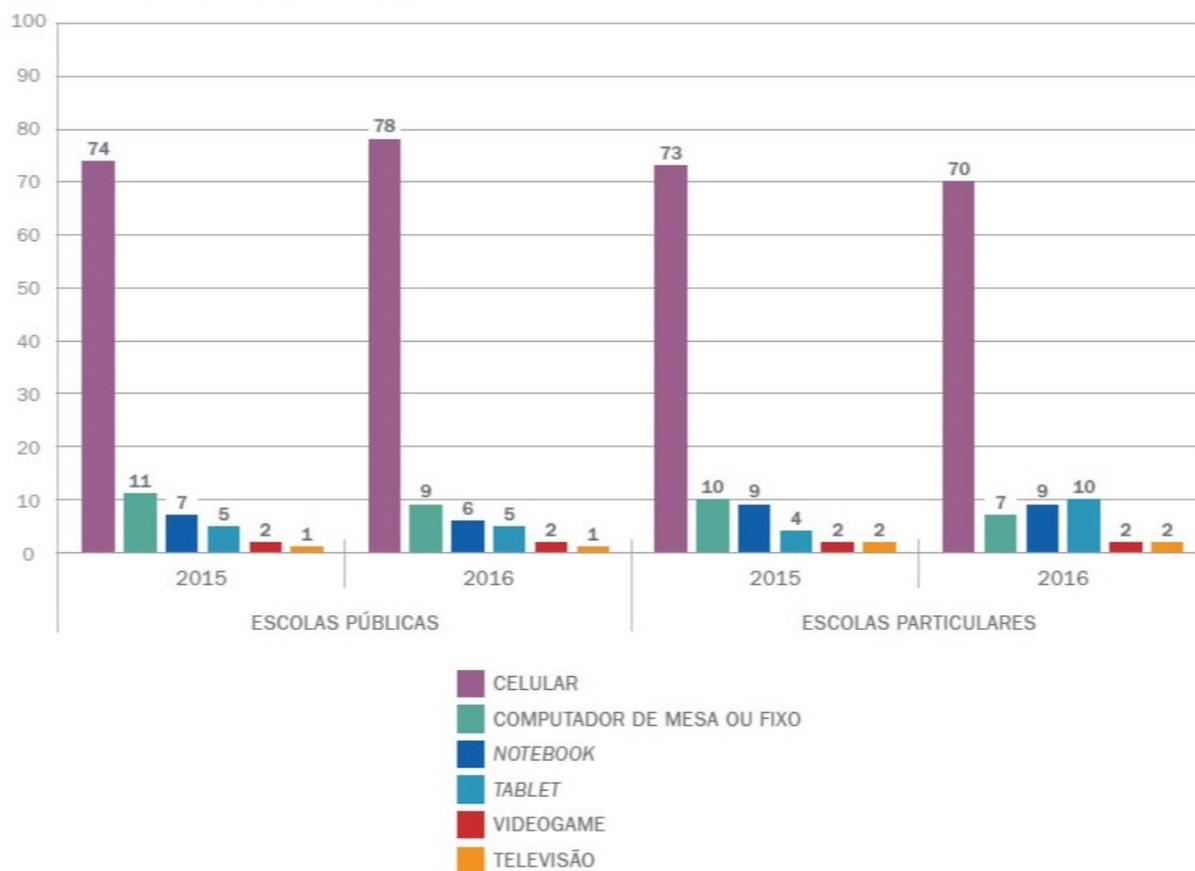
Com a utilização do celular como dispositivo de acesso a internet a comunicação aluno/professor passa a ser mais ágil, tornando o modelo *Flipped Classroom* mais eficiente. No produto educacional proposto, a comunicação com o aluno antes da aula foi muito importante para preparar a aula que viria a seguir, pois o conhecimento dos alunos sobre o assunto a ser tratado foi

mapeado através de questionários. Utilizamos a plataforma *SurveyMonkey* para realizar um questionário on-line e a aceitação dos alunos a essa forma de comunicação foi imediata. Todos responderam ao questionário participando ativamente e de forma autônoma.

Figura 2.3: Gráfico de demonstração da utilização do celular como principal dispositivo para acesso à Internet, ilustrando o destaque que o celular adquiriu na forma de comunicação do aluno (CETIC, 2016).

ALUNOS, POR PRINCIPAL EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA ACESSAR A INTERNET (2015 – 2016)

Total de alunos usuários de Internet (%)



Fonte: CETIC, p 105, 2016.

O método de ensino da sala de aula invertida foi desenvolvido para lecionar disciplinas do curso de medicina. Posteriormente outros cursos de graduação passaram a adotar essa metodologia. Uma vez que um curso de graduação é direcionado a uma profissão específica escolhida pelo aluno, espera-se maior autonomia e aceitação do mesmo para explorar diferentes metodologias. Isso é um pouco mais trabalhoso no ensino médio, porque geralmente lecionamos ciências, no caso física, para alunos que não tem o mínimo interesse em seguir uma carreira científica, dificultando a questão do interesse e da autonomia do aluno durante a realização das atividades. Portanto, é sempre importante introduzir tal metodologia aos poucos para ver se a mesma será aceita pelos alunos.

Nós fizemos o primeiro contato dos alunos com o método através de um filme documentário. Este foi escolhido por ser um material acessível e adequado à maturidade esperada para um aluno entre 15 e 18 anos, com o tema sendo trabalhado com uma linguagem simples, com demonstrações de aplicações no cotidiano das pessoas e tratando sobre a importância histórica e atual de se saber e explorar o assunto.

Existem inúmeras possibilidades de aplicação do método da sala de aula invertida. Cada uma delas segue uma filosofia de ensino centrada no aluno, incentivando e orientando-o efetivamente no processo de ensino/aprendizagem. Estas, geralmente oferecem ao aluno uma oportunidade de obter um primeiro contato com o conteúdo proposto antes da aula correspondente. Esse momento é usualmente chamado de pré-aula. O objetivo principal desse momento é incentivar o aluno a se preparar para a aula, fornecendo suporte ao mesmo para que ele tenha uma visão mais clara entre o que será feito dentro e fora da sala de aula (ROTELLAR, 2016).

Este método também possibilita ao professor preparar uma aula voltada às necessidades do aluno. Em uma sala de aula com 50 ou mais alunos é difícil identificar o que cada aluno já sabe sobre o que vai ser estudado. Preparar uma aula sem saber o conhecimento prévio do aluno faz com que o direcionamento da aula, ou foco, seja feito apenas com relação àquilo que o professor acha mais importante. Mas esta forma de trabalhar pode não ser eficiente o suficiente para atingir e despertar o interesse da maioria dos alunos. No nosso produto educacional foi montada uma estrutura de aula que consiste em atividades de aprendizagem pré e pós-aula. A pré-aula serve como um organizador prévio, o aluno vai se preparar para aula estudando o que vai ser discutido em sala. Através de um questionário o professor poderá mapear o conhecimento prévio dos alunos sobre um assunto específico e focar a aula nos pontos em que a turma tem mais dificuldades para assimilar.

Os benefícios do método *Flipped Classroom* a longo prazo podem incluir menos tempo gasto para a preparação das aulas, implicando em mais tempo para o professor interagir com os alunos. Adicionalmente, o método pode proporcionar maior envolvimento dos alunos com o conteúdo trabalhado, participação mais ativa, possibilitando o professor até mesmo aprofundar mais o assunto tratado ou questões que os alunos julgam ser muito difíceis de serem exploradas em sala de aula (CARVALHO, 2014).

2.2 HISTÓRIA DA CIÊNCIA

Para a elaboração do produto educacional nós utilizamos também a História da Ciência como linha condutora na construção do conceito da Segunda Lei da Termodinâmica. Em geral estudantes e professores de ensino médio demonstram interpretações simplistas sobre a natureza da ciência, como uma forte visão egocêntrica, desconsiderando o papel da criatividade e da imaginação na produção do conhecimento científico. Isso pode acarretar em interpretações equivocadas e falta de compreensão das diferenças entre fato e evidência ou observação e experimentação. Há um crescente consenso entre pesquisadores e educadores de que a aprendizagem da ciência deve ser acompanhada por uma aprendizagem sobre a ciência. A contextualização histórica da descoberta do conteúdo estudado durante as aulas de Ciências pode melhorar essa visão. A aprendizagem sobre a ciência deveria incluir elementos tais como sua relação com a cultura e a sociedade, o caráter mutável das ideias científicas, a humanização dos cientistas, entre outros (SILVA, MOURA, 2008).

Muito se discute sobre a utilização, no Ensino de Ciências, da História e da Filosofia, de

forma que estas fossem inseridas e entrelaçadas, tornando a aprendizagem mais significativa. A recomendação não se aplica apenas ao aspecto cognitivo, de maneira que esta poderia funcionar também como um gerador de valores e atitudes. Desse modo, nada seria mais importante para o cidadão do que desenvolver boas atitudes tanto no que se relaciona à sua vida pessoal quanto no que diz respeito à vida em sociedade. Na perspectiva de um professor de Física que persegue o objetivo de melhoria da educação científica, seria importante a inserção e o entrelaçamento dessas disciplinas para contribuir no entendimento dos conteúdos da Física. Esse entrelaçamento também contribuiria de maneira relevante para o surgimento de atitudes e valores dos sujeitos envolvidos no processo de ensino/aprendizagem, independentemente destes serem professores ou estudantes (FILHO, 2012).

O uso da História da Ciência na educação tem sido recomendado em documentos oficiais, tais como os Parâmetros Curriculares Nacional (PCN) e a Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Esta última propõe,

[...] ampliar e sistematizar as aprendizagens essenciais desenvolvidas até o 9º ano do Ensino Fundamental. Isso significa, em primeiro lugar, focalizar a interpretação de fenômenos naturais e processos tecnológicos de modo a possibilitar aos estudantes a apropriação de conceitos, procedimentos e teorias dos diversos campos das Ciências da Natureza. Significa, ainda, criar condições para que eles possam explorar os diferentes modos de pensar e de falar da cultura científica, situando-a como uma das formas de organização do conhecimento produzido em diferentes contextos históricos e sociais, possibilitando-lhes apropriar-se dessas linguagens específicas (BRASIL, 2017, p. 537).

Pelo tempo disponível em sala de aula e a grande quantidade de conteúdo presente nos livros didáticos a parte histórica da ciência acaba se resumindo apenas à datas e fatos curiosos e engraçados ocorridos na vida pessoal do cientista que formulou um determinado conceito. Para entender a ciência como uma atividade humana, socialmente construída, é interessante discutir as dificuldades encontradas pela comunidade científica da época. Dessa forma, o aluno pode ter mais condições para traçar um paralelo com as pesquisas realizadas hoje e ter uma compreensão mais ampla de seu papel na sociedade contemporânea.

O amadurecimento do pensamento crítico e criativo está entre um dos principais objetivos para uma educação científica de qualidade. O processo de ensino/aprendizagem deve preparar o estudante para lidar com as constantes inovações das ciências e tecnologias, além de levá-lo a compreender a articulação entre os conteúdos científicos e seus usos sociais (FILHO, 2012). A contextualização histórica ajuda na construção desse pensamento crítico, desconstruindo uma ideia de um cientista alienado, apenas preocupado com seus estudos.

A Ciência não pode ser considerada como meramente uma reunião de fatos, teorias e métodos. O processo científico é lento e criterioso e a História da Ciência contribui para mostrar os sucessos e as adversidades na construção desse conhecimento, revelando os obstáculos que inibiram o acúmulo de conhecimento ou os acontecimentos que favoreceram sua expansão (KUHN, 2000).

Quando se utiliza a História da Ciência para contextualizar o conhecimento científico no tempo, no espaço e em sua relação com outros saberes, é necessário lembrar que a concepção

que se tem sobre a ciência estará sempre refletida em todo o projeto educacional. É importante ter atenção a vários detalhes desde a seleção e abordagem de conteúdos até as metodologias educacionais utilizadas nos processos de ensino/aprendizagem. Não basta inserir conteúdos de História da Ciência na sala de aula sem admitir que qualquer prática educativa reflete as concepções que os professores têm sobre o trabalho científico (FORATO, MARTINS e PIETROCOLA, 2012).

Ao não tomar cuidado na elaboração de uma proposta educacional voltada para a contextualização da História da Ciência, pode-se criar concepções dogmáticas, elitistas, exclusivamente analíticas, acumulativas e lineares dos processos de construção do conhecimento científico, em geral protagonizadas por *insights* individuais de grandes pensadores. A intenção de utilizar a História da Ciência no processo de ensino/aprendizagem é exatamente oposto a isso. Como já discutido, esta tem como objetivo tornar a Ciência mais viva e não apenas um acúmulo de conhecimentos. Para evitar concepções acumulativas e dogmáticas devemos evitar histórias fantasiosas, ou pseudo-histórias, no Ensino de Ciências. Além de serem conflitantes com a visão de ciência que tem sido sugerida para a educação científica, tais versões históricas constituem-se um desestímulo ao pensamento crítico (FORATO, MARTINS e PIETROCOLA, 2012).

Mas como podemos evitar que a abordagem adotada na elaboração de uma aula apresente concepções acumulativas e dogmáticas, eliminando a presença de uma pseudo-história no Ensino de Ciências? O uso da História e Filosofia da Ciência na educação vai requerer que se estabeleça a visão de ciência e dos processos de sua construção que os fundamentam. Segundo Forato, Martins e Pietrocola (2012) é possível analisar se a abordagem adotada na elaboração do material que será passado aos alunos tem os seguintes pontos de reflexão:

- a natureza não fornece dados suficientemente simples que permitam interpretações sem ambiguidades;
 - uma observação significativa não é possível sem uma expectativa preexistente;
 - a ciência é uma atividade humana influenciada pelo contexto sociocultural de cada época;
 - teorias científicas não podem ser provadas e não são elaboradas unicamente a partir da experiência;
 - o conhecimento científico baseia-se fortemente, mas não inteiramente, na observação, evidência experimental, argumentos racionais e ceticismo.
- (FORATO, MARTINS e PIETROCOLA, p. 126, 2012).

No nosso produto educacional nós problematizamos os mitos sobre a construção do conhecimento científico em torno da construção de conceitos referentes ao estabelecimento da Segunda Lei da Termodinâmica. Nós discutimos com os alunos sobre o momento histórico de sua elaboração e indagamos por que essas ideias não surgiram antes, revelando crenças, valores, disputas e controvérsias que permeiam a construção da ciência. Assim, o aluno pôde compreender melhor os termos que envolvem o debate científico e a ciência como parte de sua cultura envolvendo julgamentos de valores, ou seja, eles puderam conhecer não apenas os conteúdos científicos, mas também seus pressupostos e limites de validade postos pelo seu contexto histórico.

Ao analisarmos a construção da **Eolípila** de Heron verificamos se a mesma poderia ser descrita como uma máquina térmica de acordo com o estabelecido na Segunda Lei da Termodinâmica. Adicionalmente, levantamos com os alunos o porquê da Termodinâmica não ter surgido antes da Revolução Industrial. Em um segundo momento verificamos o conceito de rendimento de uma máquina térmica com outro experimento, o do **pássaro sedento**. Com um procedimento experimental simples foi possível mostrar para os alunos a influência da fonte de energia térmica no movimento do pássaro. Nesse momento levantamos questões sobre a pouca aceitação das ideias de Carnot pela comunidade científica da época, devido à não quantificação de suas hipóteses. Essas controvérsias permitiram aos alunos ter uma melhor noção do processo de construção da ciência. Eles tiveram a oportunidade de compreender os termos que envolvem o debate científico e a ciência como parte da cultura e sociedade vigentes na época.

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No produto educacional elaborado relacionamos o funcionamento da máquina de Heron desenvolvida no século I a.C. com as leis da Termodinâmica desenvolvidas nos séculos XVIII e XIX. Nosso objetivo foi contextualizar os períodos históricos e tornar o ensino de física mais amplo, utilizando os conhecimentos historicamente construídos ao longo dos anos sobre o mundo físico, social e cultural, na tentativa de fazer com que o aluno possa relacionar melhor o desenvolvimento científico com a realidade.

Heron criou várias máquinas na escola de mecânica de Alexandria. Ele viveu e trabalhou por volta de 62 d.C. sendo considerado um grande inventor da sua época. Pouco se sabe sobre sua vida e as informações que existem são obtidas de seus livros e invenções. Suas invenções eram, em geral, brinquedos mecânicos e alguns equipamentos bélicos. Dentre elas a mais famosa é a dioptra, que consiste em um instrumento utilizado por topógrafos que servia parcialmente como um teodolito para medida de ângulos (RONAN, 2001).

Mas por que estudarmos um brinquedo mecânico? Por que uma instituição intelectual como a biblioteca de Alexandria iria se interessar por brinquedos? Segundo Ronan (RONAN, 2001) estes estudos eram utilizados na época para testar os princípios da física ou para demonstrá-los em alguma audiência. Passados mais de 2000 anos vamos repetir o mesmo procedimento através da análise da Eolípila para verificar se a mesma pode ser considerada como uma máquina térmica, como afirmava Heron, de acordo com as leis da Termodinâmica.

As discussões foram iniciadas em sala de aula com o levantamento de questões sobre o desenvolvimento de alguns conceitos relacionados ao tema, por exemplo: Como um pensador no ano de 62 a.C. pôde idealizar uma máquina térmica? Por que a humanidade demorou mais de 1800 anos para conseguir transformar a máquina de Heron em uma locomotiva? E por fim perguntamos se a máquina de Heron de Alexandria é uma máquina térmica de acordo com os conceitos modernos da Termodinâmica.

Antes de responder a estas e outras perguntas analisamos o desenvolvimento das leis da Termodinâmica historicamente seguindo os passos de Nicolas Sadi Carnot e em seguida formalizamos o que é uma máquina térmica e como se dá o seu funcionamento de acordo com estas leis.

Como já discutido no capítulo anterior, a História da Ciência tem sido indicada como uma

estratégia didática que pode trazer benefícios em vários níveis. Ela humaniza o conteúdo ensinado e incentiva uma melhor compreensão dos conceitos científicos, pois permite contextualizar e discutir seus aspectos que naquele momento não eram claros para os cientistas. Esta também permite ressaltar o valor cultural da ciência e enfatizar o caráter mutável do conhecimento científico (FILHO, 2012). Seguindo esta estratégia didática, nos situamos no momento histórico no qual o assunto abordado foi desenvolvido.

3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO 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°C) e o de congelamento na outra (100°C). Mais tarde o biólogo sueco Lineu inverteu tais valores, considerando 0°C para o ponto de congelamento e 100°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.

3.1.1 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.

3.1.2 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).

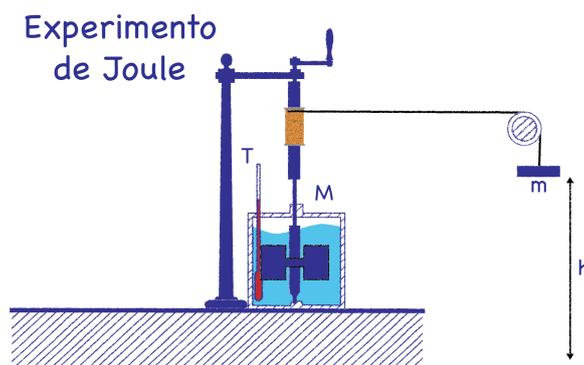
O médico alemão Julius Robert Von Mayer, em 1842, em uma viagem aos trópicos, fez uma observação sobre o sangue venoso dos nativos, que apresentava uma maior taxa de oxigenação (coloração mais avermelhada) do que os nativos de regiões de clima frio. Ele acreditava que o calor humano produzido pelo metabolismo 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 célebres 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 3.1. 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).

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 necessari-

amente 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.

Figura 3.1: 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.

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.

3.2 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, propele 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 suas 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 (lord Kelvin) de 1851, conduziram a formulação da Segunda Lei da Termodinâmica.

3.3 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 substituto 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).

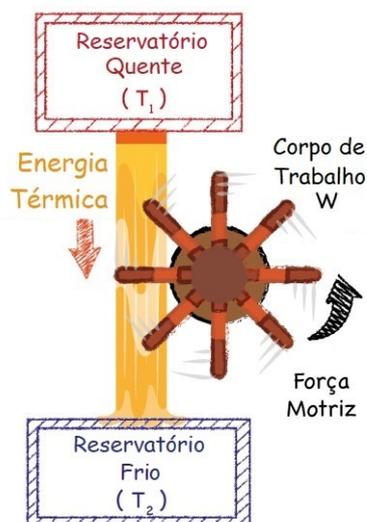
Em termos atuais Carnot estava se referindo ao processo de transferência de energia térmica através do calor da fonte térmica de maior temperatura para a fonte de menor temperatura de maneira espontânea. Usualmente nos referimos a esse processo como fluxo espontâneo de energia térmica ou fluxo espontâneo 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 propeler 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 3.2. 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 3.2: 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.

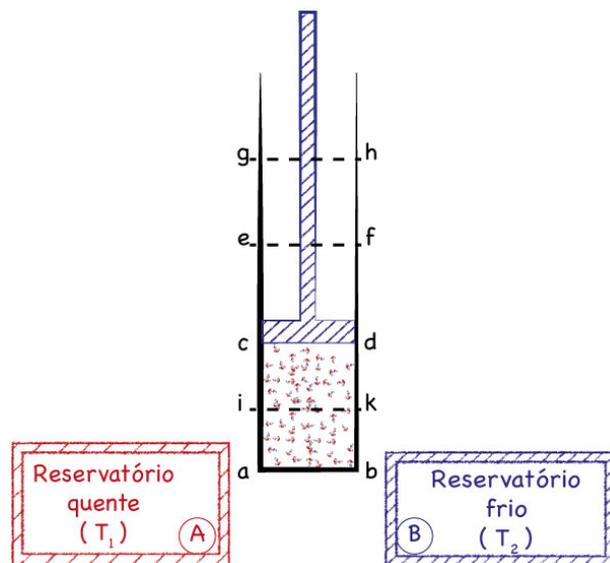


Fonte: Elaborado pelo autor.

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 3.3, 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 $T_1 > T_2$.

Figura 3.3: 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 $T_1 > T_2$.



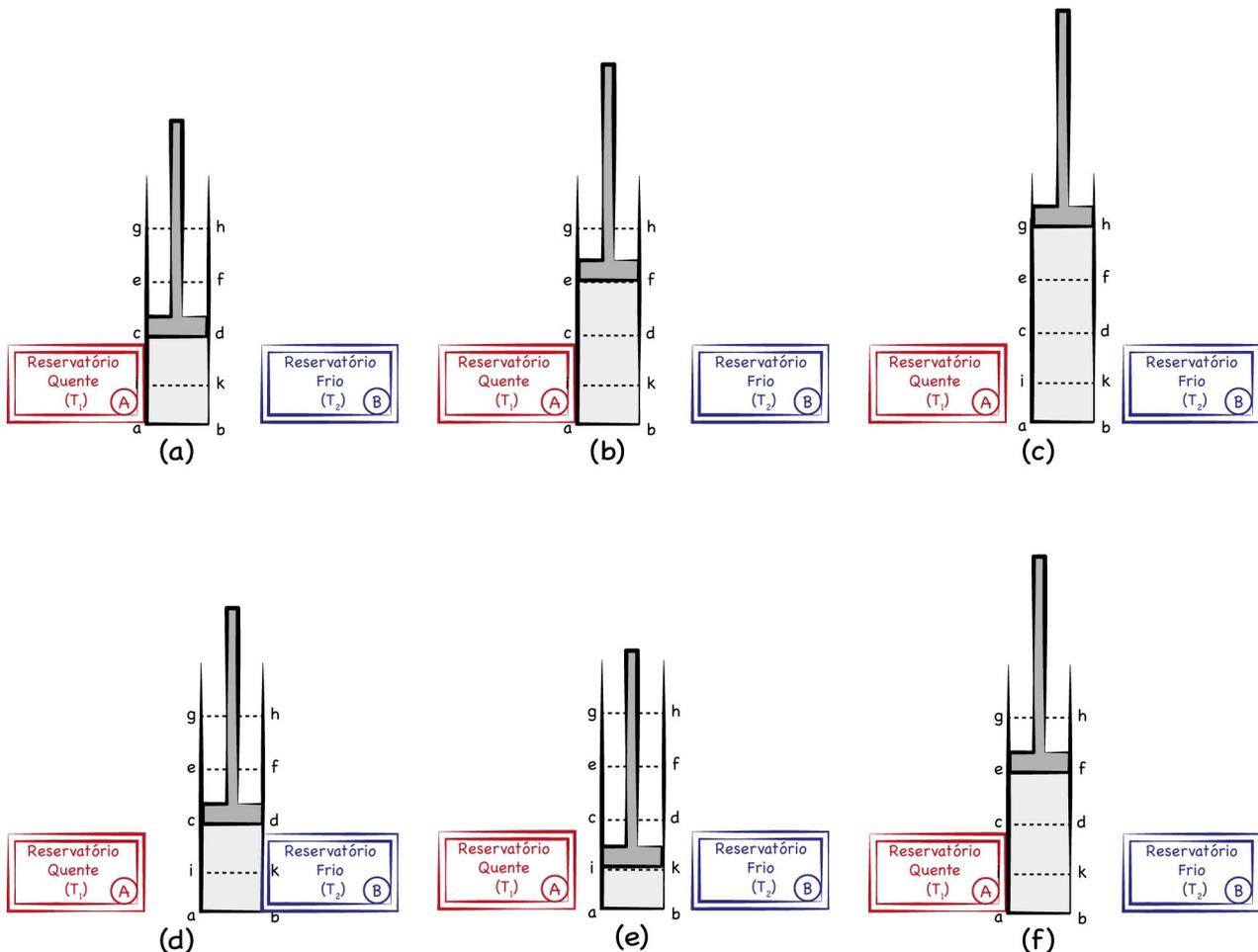
Fonte: Elaborado pelo autor.

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 3.4 (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.

2. O pistão agora é movido gradualmente para a posição ef , como ilustrado na figura 3.4 (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.

Figura 3.4: 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.

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 tem-

peratura diminua. Carnot supõe que o sistema diminui sua temperatura até se tornar igual a temperatura do reservatório B . Neste momento o pistão para, permanecendo na posição gh conforme ilustrado na figura 3.4 (c).

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 3.4 (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 3.4 (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 3.4 (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 3.4, em que as trocas de energia são realizadas à temperatura constante, e duas adiabáticas, processos $b \rightarrow c$ e $d \rightarrow e$ da figura 3.4, em que não há troca de energia. Este é conhecido como o Ciclo de Carnot e é apresentado na figura 3.5 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 3.4. Observe que o segundo processo adiabático é descrito neste diagrama por $d \rightarrow a$.

Para entender melhor o ciclo da figura 3.5 vamos utilizar a notação e o diagrama de máquina térmica apresentado na figura 3.6, 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,

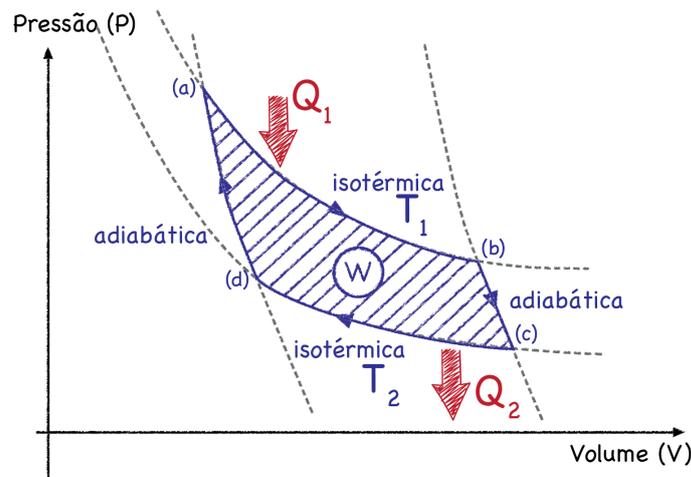
$$Q_1 = W + Q_2. \quad (3.1)$$

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,

$$\eta = \frac{W}{Q_1}, \quad (3.2)$$

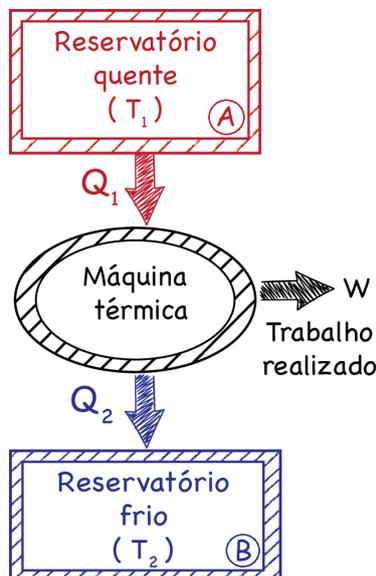
ou seja, o rendimento da máquina térmica é dado pelo fator de conversão de calor em trabalho.

Figura 3.5: 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 realizadas 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.

Figura 3.6: 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 (3.1) podemos escrever $W = Q_1 - Q_2$. Substituindo na equação (3.2) obtemos:

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

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (3.3)$$

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)

$$\frac{Q_2}{Q_1} = f(T_1; T_2) \rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{f(T_2)}{f(T_1)}. \quad (3.4)$$

Substituindo esse resultado na equação (3.3) 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 ,

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (3.5)$$

Esse resultado será deduzido formalmente a partir do conceito de entropia e da igualdade de Clausius na próxima seção.

Carnot estabelece, de certa maneira, o resultado apresentado na equação (3.5) 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 (3.5). 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:

$$Q \rightarrow W \text{ e } W \rightleftharpoons Q,$$

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.

3.4 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 3.7. 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.

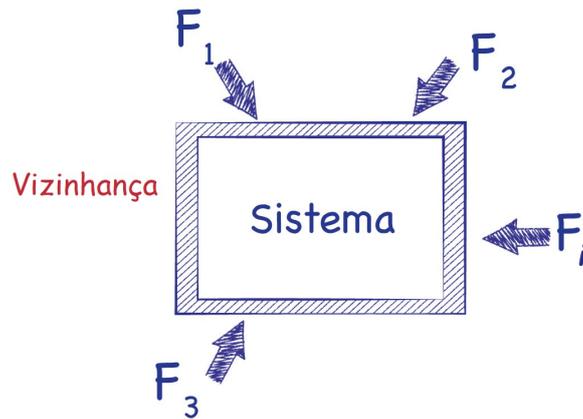
A caracterização e a determinação do estado de um sistema termodinâmico são feitas através de um conjunto de parâmetros macroscópicos independentes, os quais são classificados como:

- **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.

Figura 3.7: 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.

3.4.1 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 a 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.

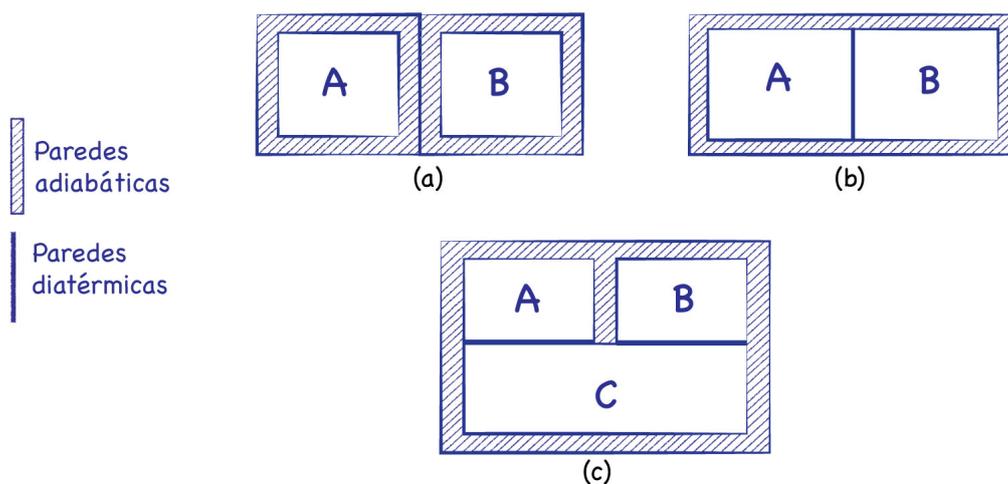
Se o sistema é isolado não há trocas de energia com sua vizinhança. O equilíbrio é alcançado a partir da troca de energia entre as partículas do próprio sistema. Como em um sistema termodinâmico o número de partículas é muito grande, $N \gg 1$, as flutuações nos parâmetros do sistema, devido às próprias 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 3.8(a), o estado de equilíbrio térmico de um não é afetado pelo outro. Se agora substituirmos a parede adiabática por uma parede diatérmica, conforme figura 3.8(b), energia pode ser trocada entre os dois sistemas e, após um certo tempo, um novo estado de equilíbrio térmico dado por $A + B$ é obtido, de modo que podemos dizer que A está em equilíbrio térmico com B . Considerando a nova configuração apresentada na figura 3.8(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 térmico $A + B + C$ 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.

Figura 3.8: Diferentes configurações de contato estabelecidas 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.

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.

3.4.2 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. Esta pode ser realizada com a variação dos parâmetros externos do mesmo e sem a variação desses parâmetros. O primeiro método é chamado de trabalho W e o segundo de 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 dizemos que trabalho e calor são diferenciais inexatas sendo representadas por δW e δQ , respectivamente, pois ambos não constituem uma propriedade física do sistema. O trabalho W e o calor Q são diferentes de zero quando um processo é realizado no sistema.

A primeira lei em sua forma diferencial é dada por:

$$dU = \delta Q - \delta W, \quad (3.6)$$

em que U é a energia interna do sistema, também conhecida como energia térmica. Dessa forma a primeira lei estabelece que a energia interna de um sistema é uma função de único valor de seu estado e varia somente sob a influência de ações externas, conectadas com a variação dos parâmetros externos do sistema, através de trabalho δW , e com a variação dos parâmetros internos ou da temperatura do sistema, através do calor δQ .

Para verificar o princípio de conservação de energia em um sistema isolado podemos rees-

crever a equação (3.6) como $\delta Q = dU + \delta W$, ou seja, a energia fornecida por uma fonte térmica através de calor Q será convertida em outra modalidade através de trabalho W e acarretará no aquecimento do sistema, através da variação de sua energia térmica, ou interna, ΔU . 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.

3.4.3 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 3.3. 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, cujo o único efeito seria operar 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 3.6. 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 3.1, 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.

Para obtermos um significado quantitativo da entropia vamos calcular o trabalho W realizado no ciclo de Carnot utilizando como substância de trabalho um gás ideal, cuja equação de estado térmica é dada por $PV = nRT$. Como apresentado na figura 3.5 o ciclo de Carnot é composto por dois processos isotérmicos $a \rightarrow b$ e $c \rightarrow d$, de temperaturas T_1 e T_2 , em que são realizadas trocas de energia através de calor Q_1 e Q_2 , respectivamente, e dois processos adiabáticos $b \rightarrow c$ e $d \rightarrow a$. O trabalho realizado pelo gás ideal na expansão isotérmica ab é dado por:

$$W = \int_a^b P dV. \quad (3.7)$$

Sendo $P = \frac{nRT_1}{V}$ tem-se:

$$\begin{aligned} W &= (nRT_1) \int_a^b \frac{1}{V} dV \\ W &= (nRT_1) \ln \frac{V_b}{V_a} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Como estamos considerando um gás perfeito a energia interna do sistema só depende da temperatura, $U = U(T)$, de modo que em um processo isotérmico $\Delta U = 0$. Portanto, pela primeira lei da Termodinâmica tem-se que $W_{ab} = Q_1$. Pela equação (3.8) obtemos:

$$Q_1 = (nRT_1) \ln \frac{V_b}{V_a}. \quad (3.9)$$

Analogamente podemos concluir que $W_{cd} = Q_2$ de maneira que:

$$Q_2 = (nRT_2) \ln \frac{V_d}{V_c}. \quad (3.10)$$

Para os processos adiabáticos considerando o gás ideal, precisamos utilizar a equação adiabática de Poisson $PV^\gamma = \text{constante}$. No apêndice C apresentamos todas as etapas detalhadamente para obtenção da seguinte proposição:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}. \quad (3.11)$$

A relação (3.11) só é válida para uma máquina térmica reversível, ou seja, cujo ciclo é composto por processos reversíveis. A quantidade Q/T é definida por Clausius como a mudança da entropia ΔS quando transferência de energia através de calor ocorre à temperatura constante, ou seja,

$$\Delta S = \frac{Q}{T}. \quad (3.12)$$

Portanto, 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} ,

$$\begin{aligned} \eta_{irr} &< \eta_{rev} \\ \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) &< \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \\ \left(-\frac{Q_2}{Q_1}\right) &< \left(-\frac{T_2}{T_1}\right) \\ \therefore \frac{Q_1}{T_1} &< \frac{Q_2}{T_2}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

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 isso vamos escrever a Segunda Lei

para processos reversíveis em sua forma infinitesimal,

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (3.14)$$

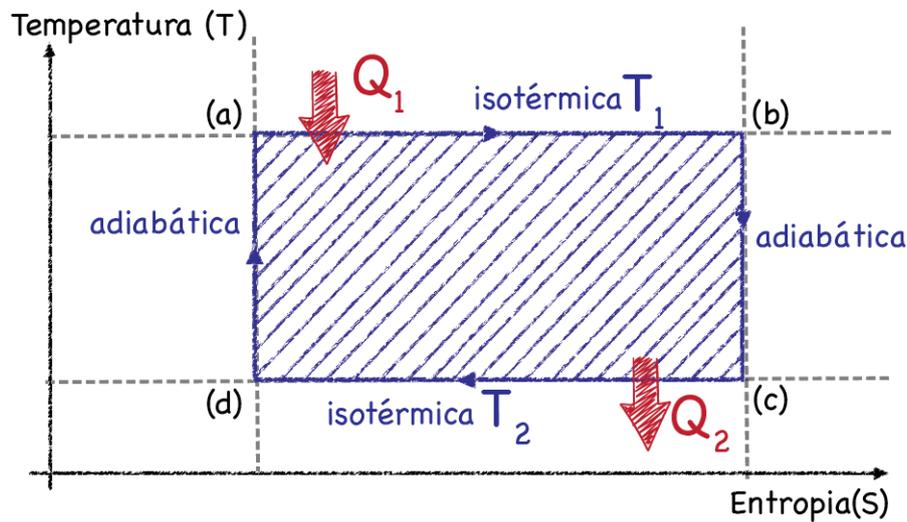
Para um ciclo fechado temos a *igualdade de Clausius*,

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0. \quad (3.15)$$

Considerando o ciclo de Carnot em um diagrama de temperatura T em função da entropia S , como mostrado na figura 3.9, e aplicando a igualdade de Clausius ao ciclo de Carnot tem-se:

$$\int_a^b \frac{dQ}{T} + \int_b^c \frac{dQ}{T} + \int_c^d \frac{dQ}{T} + \int_d^a \frac{dQ}{T} = 0$$

Figura 3.9: Diagrama da temperatura T em função da entropia S do ciclo de Carnot.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como os processos bc e da são adiabáticos, $\delta Q = 0$, e os trechos ab e cd são isotérmicos tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{Q_1}{T_1} + 0 - \frac{Q_2}{T_2} + 0 &= 0 \\ \therefore \frac{Q_2}{Q_1} &= \frac{T_2}{T_1}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Substituindo esse resultado na expressão obtida para o rendimento de Carnot na equação (3.3) obtemos o mesmo resultado apresentado na equação (3.5), ou seja,

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

Nas próximas seções descreveremos os experimentos utilizados na nossa sequência didática para discutir o que é uma máquina térmica de acordo com o estabelecido pela Segunda Lei da

Termodinâmica.

3.5 EOLÍPILA DE HERON

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 possui. Os detalhes são descritos no capítulo 4. Os resultados mostraram que a Eolípila não pode ser considerada como uma máquina térmica de acordo com os conceitos estabelecidos pela Termodinâmica, em especial a Segunda Lei. 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.

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.

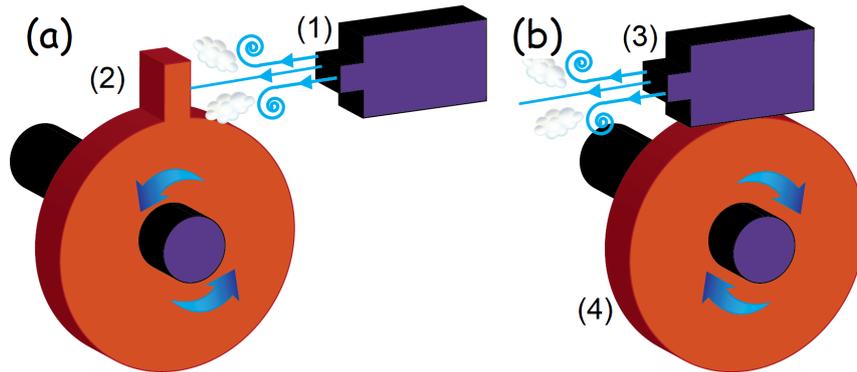
O princípio básico que rege o movimento de uma turbina é o da ação e reação. Apesar de possuir um mesmo princípio de funcionamento tais turbinas são classificadas como *turbina de ação* e *turbina de reação*, dependendo da forma como é feita a conversão da energia térmica em energia cinética. A classificação 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 3.10 (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 3.10 (b).

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.

Figura 3.10: Esquema ilustrativo de uma turbina AR. Em (a) um expansor fixo (1) expelle 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. Este último é o que mais se aproxima da Eolípila de Heron.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 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 bico, olhos e uma cartola, como mostrado na figura 3.11.

Figura 3.11: Fotografia do brinquedo pássaro sedento.

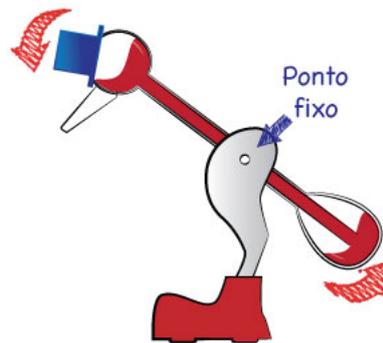


Fonte: Elaborado pelo autor.

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 [3.12](#).

Figura 3.12: Ilustração do corpo do pássaro sedento executando seu movimento característico em torno de um ponto fixo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

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 [3.13\(a\)](#). 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.

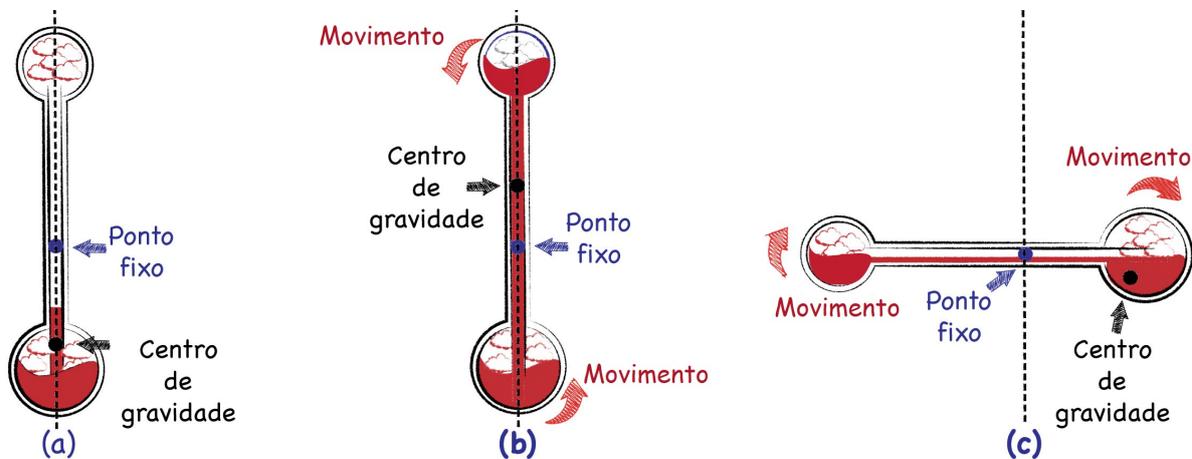
Se a umidade do ar não estiver muito alta, a água utilizada para molhar o bico do pássaro começa a evaporar com o passar do tempo. O processo de evaporação faz com que a temperatura da atmosfera no bulbo superior diminua. Conseqüentemente, essa atmosfera sofre uma contração fazendo com que haja uma diferença 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 [3.13\(b\)](#). 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 [3.13\(c\)](#). Dessa forma a pressão nos dois bulbos se igualam fazendo com que o pássaro volte à sua configuração inicial, como na figura [3.13\(a\)](#), reiniciando o ciclo.

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. No próximo capítulo forneceremos maiores detalhes sobre como este experimento é um excelente modelo didático de uma máquina térmica.

Figura 3.13: 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. Conseqüentemente, 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

Capítulo 4

PREPARAÇÃO E APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

A experimentação é muito importante para auxiliar na construção de conceitos para a aprendizagem de Física ou ciências de maneira geral, fornecendo uma excelente oportunidade ao aluno para o fazer ciência de forma reflexiva. A contextualização histórica pode tornar a experimentação ainda mais eficiente no ensino aprendizagem, uma vez que esta pode ser feita tanto sobre a construção do conceito científico estudado quanto sobre o experimento utilizado para a descrição daquele conceito. Além de possibilitar o professor a fornecer um significado maior sobre conceitos e experimentos, a história da ciência pode contribuir para desmistificar a ciência como um conhecimento restrito à poucas pessoas, ou seja, o aluno pode, a princípio, contemplar o desenvolvimento da Física, por exemplo, como uma fração do conhecimento humano construída por pessoas normais que cometeram erros e tiveram dúvidas na construção de suas teorias.

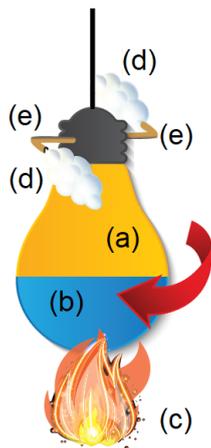
Para trabalharmos o conceito de máquina térmica, nós utilizamos os experimentos da Eolípila e do pássaro sedento. Em ambos experimentos criamos condições para verificar se o rendimento desses dispositivos poderiam ser alterados por modificações em seus reservatórios térmicos. As condições aplicadas na Eolípila não são fáceis de serem reproduzidas em sala de aula, pois utilizamos um forno de cozinha aberto para criar uma atmosfera externa à mesma com uma temperatura de aproximadamente 80°C . Por isso, o experimento com a Eolípila foi realizado antes da aula e todo o procedimento foi gravado em vídeo para mostrar os resultados aos alunos. Já o experimento do pássaro foi realizado de maneira simples junto aos alunos em uma aula expositiva.

A seguir apresentamos todos os detalhes sobre a montagem e execução dos dois experimentos e os resultados obtidos para verificar se estes podem ser considerados como máquinas térmicas de acordo com as leis da Termodinâmica.

4.1 MONTAGEM E ANÁLISE DA EOLÍPILA DE HERON

A Eolípila, propriamente dita, 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 ilustração apresentada na figura 4.1, para que o escape do vapor seja feito em pontos diametralmente opostos para colocar o bulbo em rotação.

Figura 4.1: 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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

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 temperatura (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 .

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.

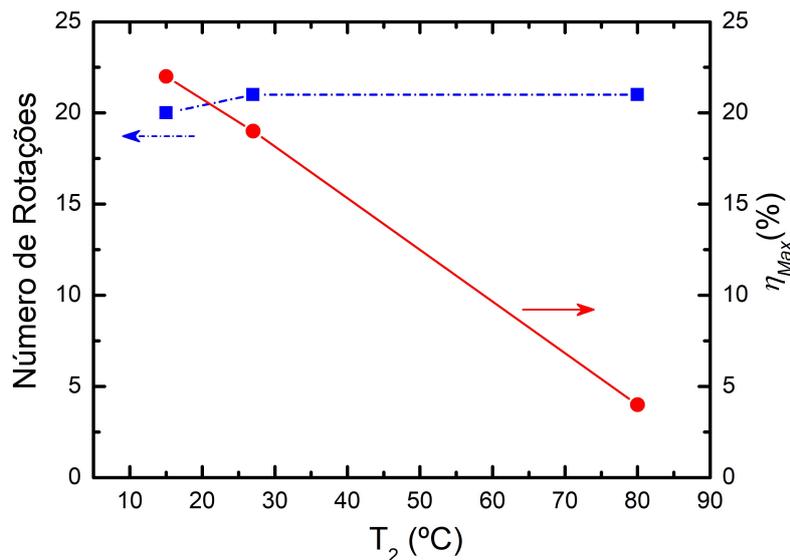
Para isso foram realizados quatro procedimentos idênticos variando-se apenas a temperatura externa (T_2) do sistema, sendo considerados os valores $T_2 = 15, 27$ e 80°C , ou em Kelvin $T_2 = 288, 15, 300, 15$ e $353, 15\text{K}$. A temperatura interna do bulbo, fonte quente, foi considerada $T_1 = 96^\circ\text{C}$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

Após o sistema atingir um movimento aproximadamente estacionário, onde o trabalho realizado pela máquina seria o suficiente para vencer o atrito e manter o movimento uniforme, foram cronometrados 20 s em cada ensaio para a contagem do número de rotações realizadas pelo bulbo. Os resultados são apresentados na tabela 4.1, 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 4.2 para uma comparação qualitativa do comportamento do sistema, experimental e teórico, em função da temperatura da fonte fria T_2 .

Tabela 4.1: 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 $T_1 = 96^\circ\text{C} = 369, 15\text{K}$.

$T_2(K)$	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 4.2: 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.

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. Como já discutido anteriormente, 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 4.2, 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.

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 4.2 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.

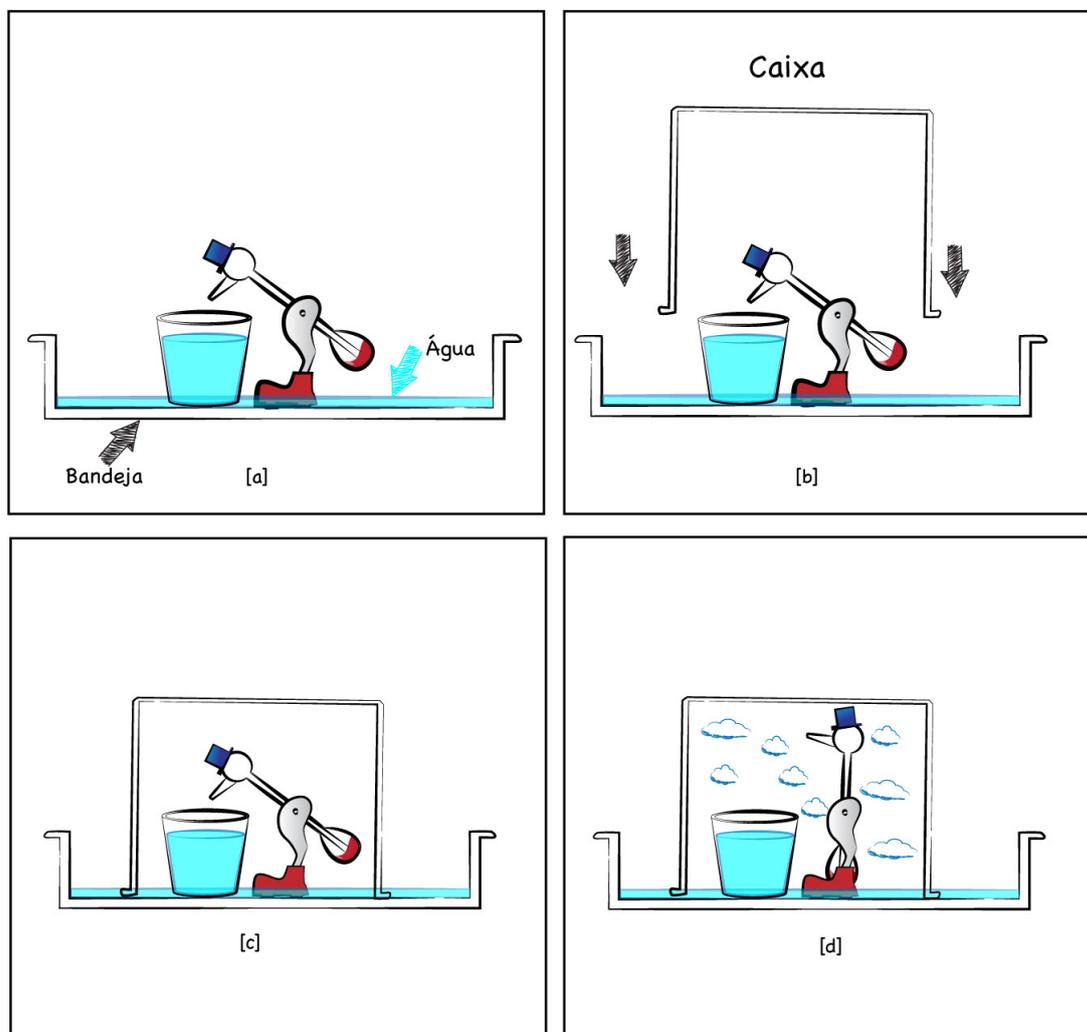
4.2 ANÁLISE DO EXPERIMENTO DO PÁSSARO SEDENTO

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. Como discutido anteriormente, 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. Para maiores detalhes sobre o funcionamento do pássaro veja seção 3.6. 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 4.3.

Figura 4.3: 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.

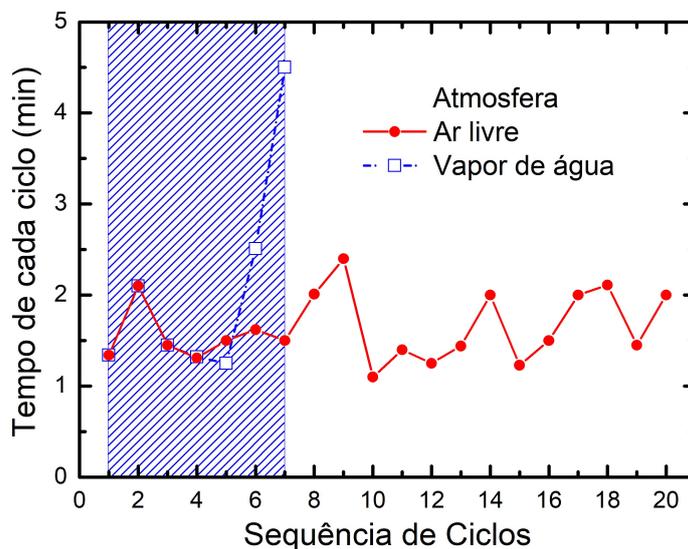


Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo medido de cada ciclo do pássaro é apresentado no gráfico da figura 4.4 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 4.4, com o pássaro cessando o seu movimento no sétimo ciclo.

Figura 4.4: 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 praticamente eliminada, mostrando claramente a influência da mesma no movimento do pássaro e a necessidade de sua existência para o funcionamento de uma máquina térmica. 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 4.5 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 eles perceberam que nem toda máquina que possui uma fonte de energia térmica pode ser considerada como uma máquina térmica. Com o experimento do pássaro sedento eles puderam verificar que uma alteração em um dos reservatórios térmicos do sistema pode modificar de maneira significativa o rendimento da máquina.

Figura 4.5: 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.

4.3 ESTRUTURA DO PRODUTO EDUCACIONAL

Um dos nossos objetivos com esta proposta de sequência didática sobre Termodinâmica é aproximar a teoria discutida em sala de aula com algum procedimento experimental. Partindo dos dois experimentos mencionados foi possível discutir em maiores detalhes com os alunos a Segunda Lei da Termodinâmica, construindo concepções a partir das ideias sobre o rendimento de uma máquina térmica desenvolvida por Nicolas Sadi Carnot, em 1824, e outros conceitos estabelecidos por William Thomson e por Clausius.

A proposta pedagógica utilizada visa contextualizar os aspectos culturais e sociais em que Nicolas Sadi Carnot estava inserido, com o intuito de explorar os problemas encontrados por ele, durante a elaboração de seu trabalho, para possibilitar ao estudante uma melhor compreensão do tipo de desenvolvimento científico e social que estava sendo explorado naquele período histórico. O desenvolvimento do pensamento crítico e criativo está entre os principais objetivos para uma educação científica de qualidade. O processo de ensino/aprendizagem deve preparar o estudante para lidar com as constantes inovações das ciências e tecnologias, além de levá-lo

a compreender a articulação entre os conteúdos científicos e seus usos sociais (OLIVEIRA e SILVA, 2012).

Ainda neste sentido, a contextualização do momento histórico vivido por Carnot na construção de sua teoria, nos permitiu fazer com que o aluno tivesse uma visão mais ampla de como a concepção de uma teoria científica é elaborada, atendendo aos anseios da sociedade da época. O professor tem a oportunidade de valorizar os conhecimentos historicamente construídos ao longo do tempo, possibilitando aos alunos o conhecimento de concepções alternativas. Esse procedimento está em pleno alinhamento com as competências gerais da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para a educação básica:

Valorizar e utilizar os conhecimentos historicamente construídos sobre o mundo físico, social, cultural e digital para entender e explicar a realidade, continuar aprendendo e colaborar para a construção de uma sociedade justa, democrática e inclusiva (Brasil, 2017).

Nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCN) está claro que a inclusão da história e da filosofia da ciência devem ser exploradas:

Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação. Para tanto, é essencial que o conhecimento físico seja explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação e associado às outras formas de expressão e produção humanas. É necessário também que essa cultura em Física inclua a compreensão do conjunto de equipamentos e procedimentos, técnicos ou tecnológicos, do cotidiano doméstico, social e profissional (BRASIL, parte III, 2000, p. 25 e 26).

Neste sentido, esperamos que nosso produto educacional seja uma ferramenta complementar para auxiliar o professor a transmitir para os alunos as ideias de Carnot sobre o rendimento de uma máquina térmica, contrapondo a uma visão excessivamente matematizada e descontextualizada da Física. Isso pode possibilitar a exploração de concepções científicas alternativas. Também temos a possibilidade de discutir questões pertinentes ao desenvolvimento científico em qualquer momento da história e não apenas a Física desenvolvida no século XIX, pois a história da ciência tem dado uma contribuição para o entendimento da relação ciência, tecnologia e sociedade, fornecendo ao aluno a compreensão da ciência como uma atividade cultural (OLIVEIRA e SILVA, 2012).

Mais do que a preparação acadêmica do aluno centralizada apenas em conteúdos especializados das ciências, busca-se a compreensão contextualizada desses saberes, inscritos na complexidade da vida humana. O papel da ciência é importante nessa compreensão, pois o estudo da Física pode contribuir no entendimento da formação do conhecimento humano, na construção da cultura e da sociedade.

Nas próximas seções apresentamos como a nossa sequência didática foi estruturada e aplicada em sala de aula. Como já discutido, nós utilizamos o método de ensino *Flipped Classroom*

(sala de aula invertida) onde o conteúdo foi transmitido aos alunos através de um meio tecnológico, como vídeos para assistirem em casa, para que os mesmos pudessem chegar na sala de aula mais preparados para uma discussão mais aprofundada. Esta proposta é interessante porque 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.

4.3.1 Primeira pré-aula

Essa etapa do produto educacional consistiu em propor aos alunos que assistissem 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 responderam a um questionário on-line com 4 perguntas sobre o tema energia com base no conteúdo do filme. Utilizamos a ferramenta *SurveyMonkey*, que é uma companhia global de software de pesquisa on-line que oferece opções gratuitas de questionários on-line que podemos enviar com facilidade para os destinatários, permitindo ainda fazer uma análise estatística simples das respostas.

O questionário inicial enviado aos alunos tem as seguintes perguntas de múltipla escolha:

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.

O questionário on-line proposto teve como objetivo 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 foi 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 conduzimos a discussão em aula para a elaboração do conceito de calor e energia térmica. E por fim com a quarta pergunta, conduzimos a aula para a discussão da construção realizada por Carnot sobre o funcionamento das máquinas térmicas, que seria mais tarde estabelecida como a Segunda Lei da Termodinâmica. Ao responder o questionário, os alunos fizeram uma breve reflexão sobre o vídeo assistido. Esta fez com que eles chegassem na sala de aula já sabendo o que seria trabalhado, tornando a discussão em sala um pouco mais rica.

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.

4.3.2 Primeira aula

Essa etapa da nossa sequência didática foi destinada a construir o conceito de rendimento térmico proposto por Carnot. Nós iniciamos a aula com uma versão editada de aproximadamente 7 minutos, do minuto 13 até o minuto 20, do vídeo “A história da energia” (STACEY,

2012), a qual estava focada apenas na construção dos principais conceitos sobre o funcionamento de uma máquina térmica de acordo com Carnot. Com essa exibição foi possível resgatar para o tema proposto aqueles alunos que não tinham realizado a atividade solicitada na pré aula.

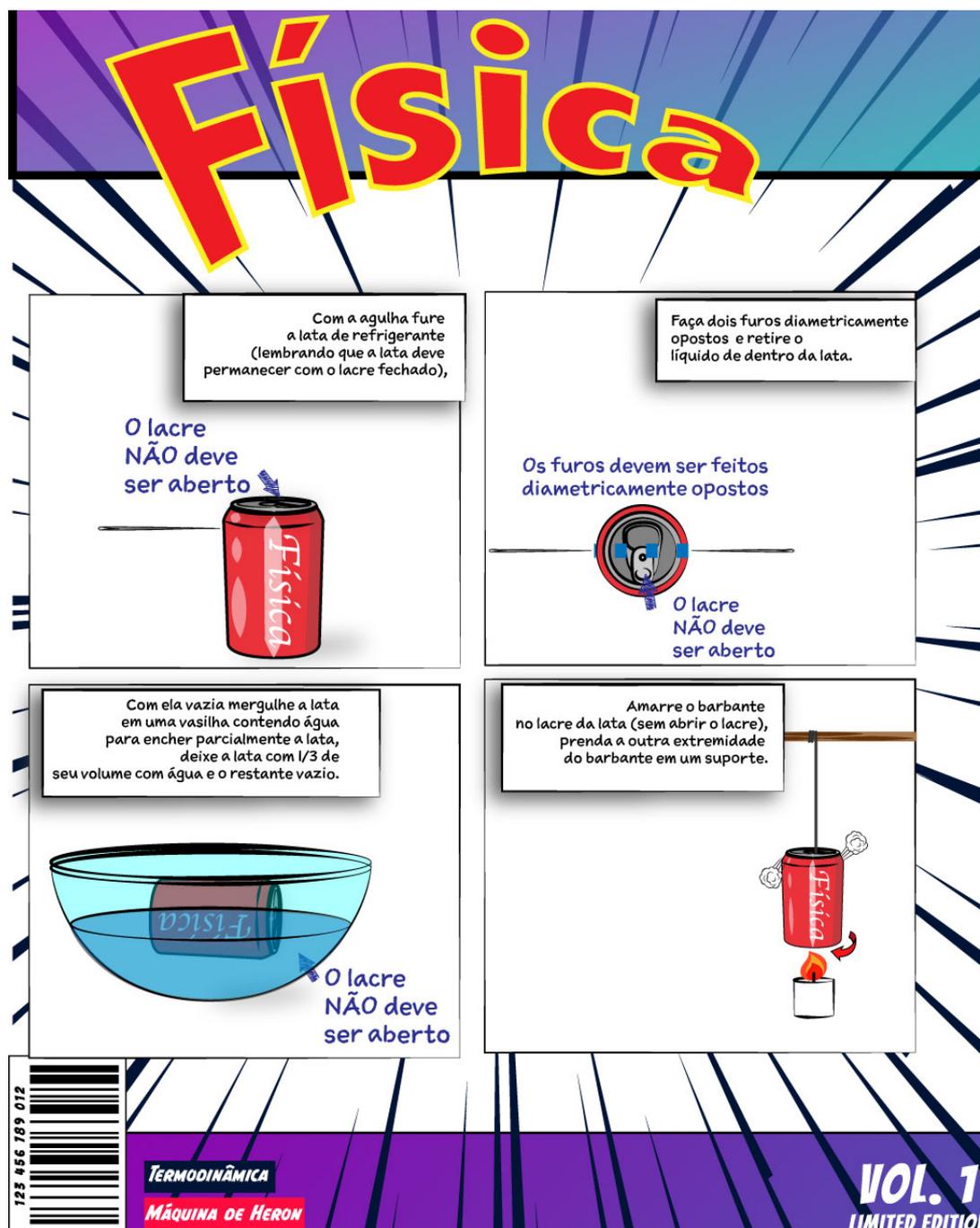
Após a exibição do vídeo, pautado pelas respostas dos alunos no questionário, discutimos a necessidade de trabalhar tal assunto cientificamente na sociedade europeia no final do século XVIII, principalmente na Inglaterra e na França. Até antes desse período não havia ou não era explorada a necessidade desse tipo de tratamento. Muitas ideias físicas relacionadas ao calor já eram definidas desde a antiguidade, mas sem o rigor científico que temos hoje. Um exemplo que foi amplamente explorado é o conceito de temperatura. A palavra temperatura, assim como calor, é comumente utilizada no dia a dia das pessoas, muitas das vezes de maneira equivocada, sendo confundida com calor ou energia. Essa dificuldade também era observada quando tal terminologia foi introduzida, com a temperatura sendo associada às sensações térmicas de quente e frio. A necessidade de dar um significado mais científico para a temperatura e o estabelecimento de uma escala de temperatura absoluta surgiu com o tempo. A escala absoluta foi essencial para que as ideias de Carnot fossem aceitas pela comunidade científica, pois foi possível quantificar muito do que foi estabelecido em seu trabalho.

Neste momento foi possível discutir com os alunos a importância da **Revolução Científica** na concepção da ciência moderna, o que impulsionou a Física naquele período. Trazer esse tipo de perspectiva para os alunos tornou a aula mais interessante. Outro aspecto que discutimos com os alunos foi sobre a importância do estudo de ciências na construção de uma sociedade, quando Nicolas Sadi Carnot em 1824, preocupado com o futuro da França, percebeu a importância de compreender o funcionamento das máquinas a vapor que estavam mudando o mundo. Nós fizemos um paralelo com os tempos atuais e suas transformações.

Um ponto que foi levantado em sala de aula foi o fato de que o calor era considerado por Carnot como uma substância que fluiria de corpos de maior temperatura para corpos de menor temperatura. Lembramos que Antoine Lavoisier acreditava no calor como sendo um fluido imponderável, chamado de **calórico**, cuja quantidade era conservada em todo universo. Mesmo utilizando a teoria do calórico, derrubada posteriormente, Carnot conseguiu explicar o rendimento máximo de uma máquina térmica. A partir destes e outros conceitos da Termodinâmica foi possível mostrar aos alunos, e construir juntamente com eles, de certa forma, a evolução de teorias que levaria ao que é estabelecido hoje como Segunda Lei da Termodinâmica.

Ao final da aula foi proposto aos alunos a tarefa da segunda pré-aula, que consistiu na construção da Eolípila de Heron. Foi entregue para eles um tutorial mostrando todos os passos para a construção de uma Eolípila de maneira bastante simples, utilizando uma latinha de refrigerante e outros materiais de fácil acesso. Com o intuito de tornar o material mais atrativo para os alunos, este foi desenvolvido em uma linguagem visual de história em quadrinhos, veja figura [4.6](#).

Figura 4.6: 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.

4.3.3 Segunda pré-aula

Foi proposto aos alunos que eles formassem grupos de no máximo 5 integrantes para construir em casa, com materiais simples e de baixo custo, uma versão da Eolípila de Heron, como mostrado na figura 4.6. Esse dispositivo é citado em alguns livros didáticos, como no livro “*Experiências de Ciências*” de Alberto Gaspar (GASPAR, 2015), como sendo um exemplo de máquina térmica. Como já discutido anteriormente neste trabalho, nós mostramos que isso não é verdade de acordo com os conceitos estabelecidos na Termodinâmica.

O leitor a essa altura deve estar se perguntando: Por que então estudar um brinquedo

mecânico que não é uma máquina térmica na disciplina de Física, especificamente na parte em que é abordada a Termodinâmica? Usualmente as aulas de laboratório são voltadas para comprovar alguma teoria discutida em sala de aula com roteiros fortemente estruturados, trazendo para o aluno uma ideia de que a ciência é algo pronto e estabelecido. Com a nossa abordagem foi possível criar o conceito de máquina térmica juntamente com os alunos através dos experimentos propostos. Mostrar que nem toda máquina que envolve conceitos sobre energia térmica, calor e trabalho é considerada como uma máquina térmica, de acordo com uma ciência tão poderosa quanto a Termodinâmica, pode ser muito mais significativo para os alunos do que mostrar um experimento que produza dados esperados.

Para a montagem da versão simplificada do experimento da Eolípila os alunos utilizaram uma lata de refrigerante fechada, barbante, uma agulha e velas. Eles produziram vídeos com a máquina funcionando e alguns grupos levaram para a aula no dia da segunda aula.

4.3.4 Segunda aula

Essa aula foi iniciada com a exposição das máquinas e dos vídeos produzidos pelos alunos. Durante essa atividade os alunos tiveram que responder a pergunta: *A Eolípila de Heron pode ser considerada como uma máquina térmica de acordo com o estabelecido nas Leis da Termodinâmica?*

Se considerarmos apenas o funcionamento ordinário da Eolípila essa pergunta não é tão simples de ser respondida. Para realizar os experimentos e testes necessários 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. Para contornar esse problema, exibimos um vídeo sobre os testes que nós realizamos com a Eolípila em diferentes condições de temperatura ambiente. Para maiores detalhes veja a seção 4.1. Como já discutido nós atribuímos a velocidade da rotação da Eolípila diretamente à sua eficiência. No vídeo foi verificado por todos que a mudança da temperatura ambiente, correspondente à temperatura do reservatório frio, não provocou nenhuma alteração significativa no movimento da máquina. Após algumas discussões, lembrando o que foi discutido com os alunos, foi possível concluir junto com eles que a Eolípila não pode ser considerada como uma máquina térmica. Após esta conclusão, os próprios alunos começaram a questionar: *“Como então podemos classificar a Eolípila?”*

Após explicar novamente o que seria uma máquina térmica de acordo com o que é estabelecido na Termodinâmica, nós discutimos e verificamos em detalhes como o movimento da Eolípila acontecia, deixando claro que a mesma se tratava de um protótipo de uma turbina de ação e reação, veja seção 3.5.

Para ilustrar ainda melhor a Segunda Lei e os conceitos da Termodinâmica trabalhados com os alunos nós utilizamos o pássaro sedento. A execução deste experimento foi 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 podem ser realizados em sala de aula em uma única aula. Com os testes realizados, veja seção 4.2, ficou claro para os alunos que se modificarmos a temperatura de

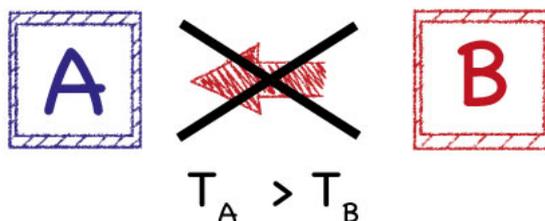
um dos reservatórios térmicos do sistema, o rendimento da máquina térmica pode ser alterado significativamente. Mostrar uma máquina térmica operando sem uma caldeira alimentada por uma chama, vapor de água sendo expelido, como no caso da Eolípila, deixou os alunos intrigados, favorecendo bastante a construção do conceito de máquina térmica e do entendimento da Segunda Lei da Termodinâmica durante as discussões.

A introdução do conceito de **Entropia** foi feita quando o pássaro sedento diminuiu a frequência do seu movimento, devido a atmosfera de vapor de água criada ao redor do experimento. Mostrar que esse conceito pode ser relacionado com o rendimento da máquina foi interessante, porque 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 discutimos alguns exercícios de vestibulares e do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) com os alunos, mostrados no questionário a seguir, abrangendo os conteúdos discutidos nas duas aulas.

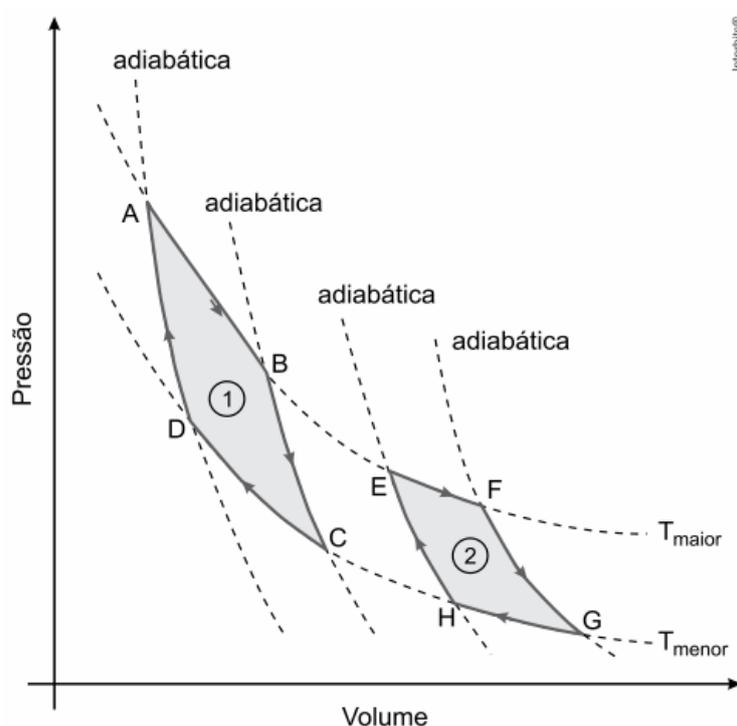
QUESTIONÁRIO FINAL

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*A refere-se à máquina 1 e o ciclo *EFGH*E à máquina 2.



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

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

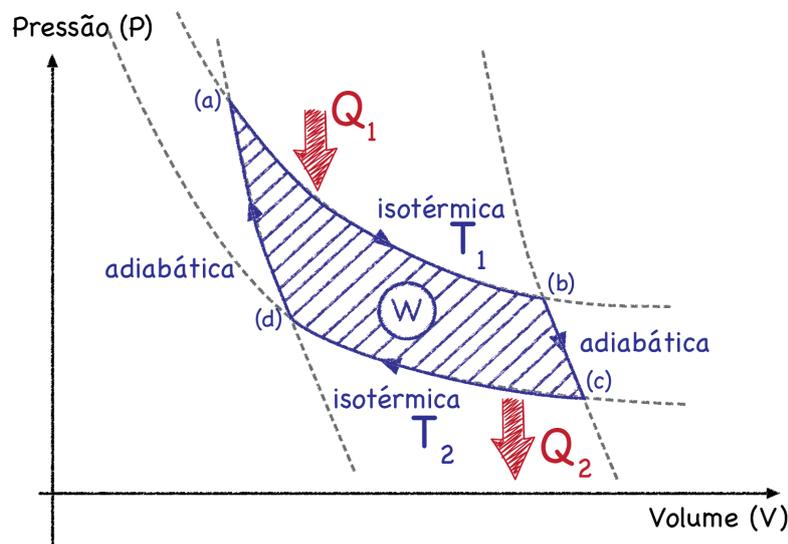
3. (ENEM 2012)

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,

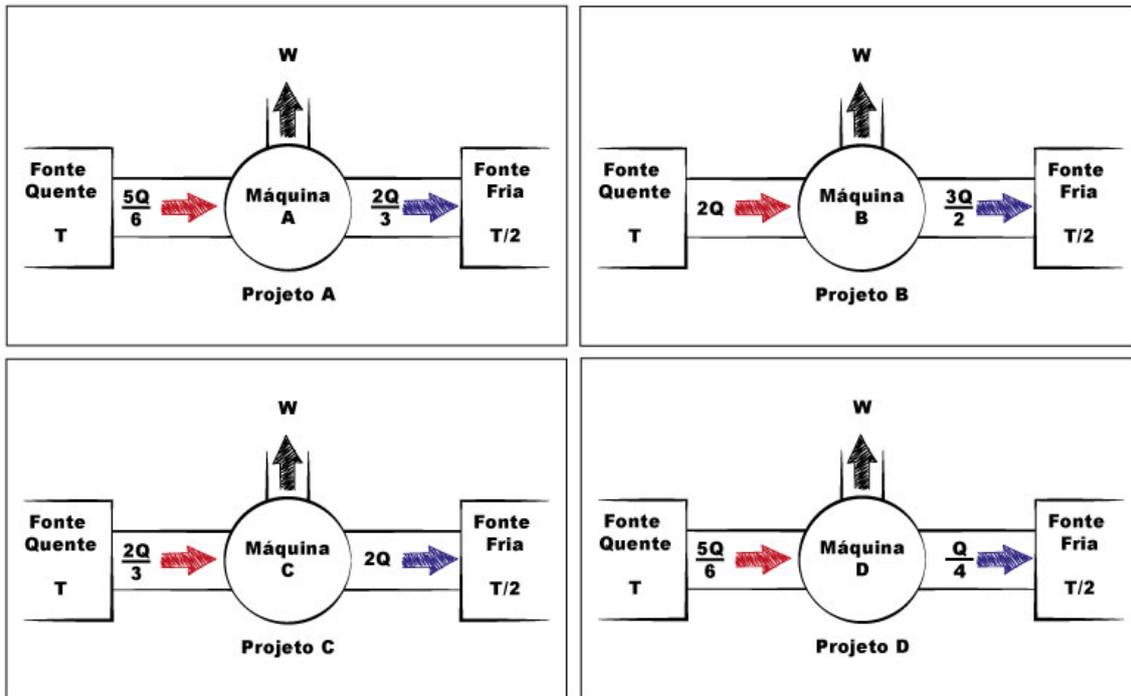
- o tipo de combustível, fóssil, que utilizam. Sendo um insumo não renovável, em algum momento estará esgotado.

- b) um dos princípios da Termodinâmica, segundo o qual o rendimento de uma máquina térmica nunca atinge o ideal.
- c) o funcionamento cíclico de todos os motores. A repetição contínua dos movimentos exige que parte da energia seja transferida ao próximo ciclo.
- d) as forças de atrito inevitáveis entre as peças. Tais forças provocam desgastes contínuos que com o tempo levam qualquer material à fadiga e ruptura.
- e) 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]

4.4 DISCUSSÃO SOBRE A APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Nosso produto educacional foi aplicado em duas turmas do segundo ano do Ensino Médio em duas escolas particulares que adotam um sistema de ensino próprio. As escolas estão sediadas em duas cidades distintas do interior de São Paulo e serão referenciadas neste trabalho como escola α e escola β . No total, contabilizando as duas escolas, tivemos 52 alunos, entre 15 e 17 anos, que participaram de nossas atividades, 32 da escola α e 20 da escola β . Nas duas escolas tivemos oportunidades diferentes para a aplicação do produto educacional. Apesar dos alunos estarem cursando a mesma série (2º ano do Ensino Médio) as escolas possuem públicos diferentes. A preocupação com o conteúdo lecionado nos dias programados é mais perceptível nos alunos da escola β , estes possuem uma inquietação com relação a temas que são mais recorrentes nos vestibulares de tal forma que, para eles a resolução de exercícios é mais importante do que a discussão do fenômeno físico e da teoria envolvida. Na escola α os alunos são mais abertos a novas maneiras de ensinar.

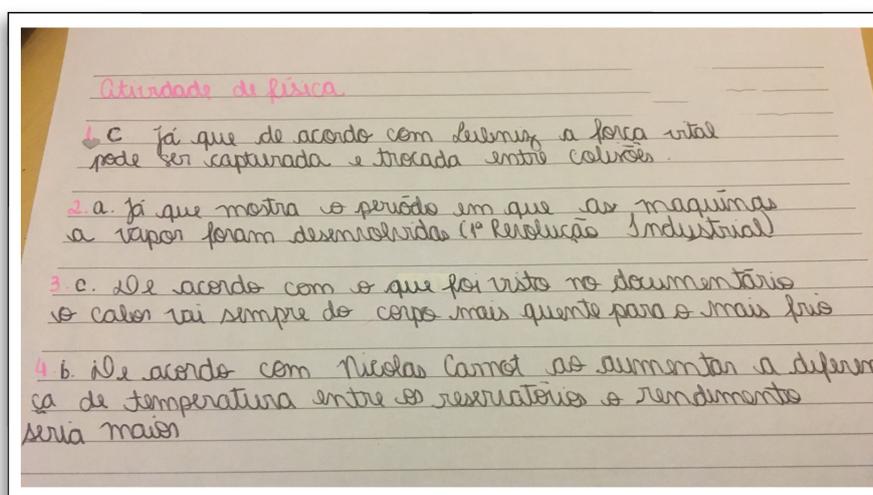
Durante a discussão do contexto histórico em que a Segunda Lei da Termodinâmica foi construída, os alunos da escola β ficaram um pouco dispersos, pois como a aula não envolvia formulismos e técnicas de resolução de exercícios, eles acharam que o conteúdo não seria cobrado

e portanto, não precisavam prestar atenção. Essa postura de só se preocupar com resolução de exercícios, infelizmente, é bem comum nas escolas particulares com sistema de ensino próprio em que eu já trabalhei. Já na escola α a proposta foi aceita com maior interesse, os alunos não diminuíram a atenção durante a aplicação do produto educacional, participando mais ativamente e trazendo mais questionamentos durante a aula.

As turmas tiveram aulas geminadas de 90 minutos com intervalo de uma semana entre as aulas. Esse intervalo foi importante para que os grupos pudessem realizar as tarefas propostas. O tempo em sala de aula foi suficiente para conduzir toda a proposta do produto educacional. A estrutura do material de apoio nas duas escolas foi adequada para a exibição dos vídeos propostos e a realização do experimento do pássaro sedento.

Com relação aos meios digitais das escolas, a aplicação do produto educacional teve ambientes diferentes devido a diferença da estrutura organizacional das duas escolas. Na escola α tivemos como contratempo inicial a recusa da escola em liberar a lista de e-mails dos alunos para enviar as atividades das pré-aulas. O questionário foi distribuído em uma das aulas, os alunos responderam em uma folha de caderno e entregaram no início da aula seguinte. Isso descaracterizou um pouco o método da sala de aula invertida, fazendo com que o questionário on-line, enviado pelo *SurveyMonkey*, se tornasse impraticável. Mas isso não atrapalhou o desenvolvimento da nossa proposta em sala de aula. As perguntas foram planejadas para pautar os assuntos discutidos em sala de aula e não para avaliar os alunos. A figura 4.7 mostra as respostas de um dos alunos referente ao questionário inicial de quatro questões, apresentado na seção 4.3.1. Foi possível perceber um maior engajamento da turma em responder o questionário inicial, pois todos os 32 alunos que participaram desta atividade entregaram suas respostas.

Figura 4.7: Exemplo de uma das respostas dadas pelos alunos da escola α na primeira pré-aula durante a aplicação do produto educacional. As respostas são referentes ao questionário inicial apresentado na seção 4.3.1 e são transcritas na íntegra como: “Atividade de Física. 1.c Já que de acordo com Leibniz a força vital pode ser capturada e trocada entre colisões. 2. a. Já que mostra o período que as máquinas a vapor foram desenvolvidas (1ª Revolução Industrial). 3. c. De acordo com o que foi visto no documentário o calor vai sempre do corpo mais quente para o mais frio. 4. b. De acordo com Nicolas Carnot ao aumentar a diferença de temperatura entre os reservatórios o rendimento seria maior.”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para evitar problemas na escola β , com relação ao fornecimento da lista de e-mails dos

alunos, nós geramos um *QRcode*, conforme figura 4.8, para eles acessarem o questionário. Uma versão impressa do *QRcode* foi fixada no quadro de avisos da sala. Com essa estratégia não foi necessário ter acesso aos e-mails dos alunos. Além desta vantagem, os alunos acharam essa alternativa de comunicação bastante interessante e atrativa, participando ativamente das atividades, provavelmente pela possibilidade de eles poderem utilizar o celular como uma ferramenta de ensino.

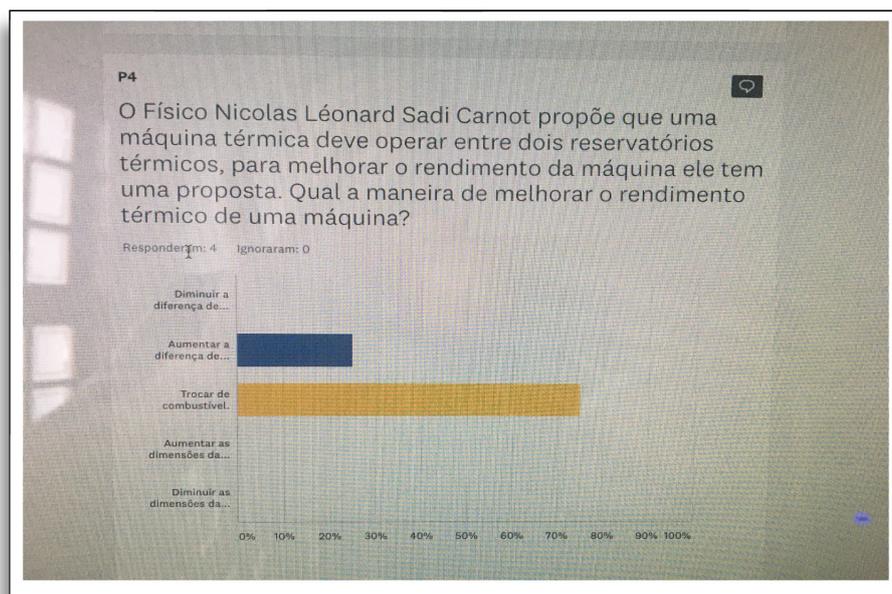
Figura 4.8: *QRcode* utilizado para direcionar o navegador de internet do celular dos alunos para o link <https://pt.surveymonkey.com/r/WG9NJMV>, para realização das atividades das pré-aulas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizar a plataforma de questionário on-line se mostrou uma grande ferramenta na aplicação do produto educacional. Além da facilidade de enviar o questionário, o sistema gera um relatório no site da *SurveyMonkey*. O sistema organiza todas as respostas dos alunos, mas a versão básica de usuário, que é gratuita, não permite exportar os dados gerados. Uma foto da tela do computador é apresentada na figura 4.9 mostrando o gráfico gerado pelo sistema para as respostas da questão 4 do questionário inicial.

Figura 4.9: Foto da tela do computador mostrando o resultado parcial, referente à quarta questão do questionário inicial, da primeira pré-aula na escola β . Nesta, o questionário foi respondido on-line pelos alunos através da plataforma *SurveyMonkey*.



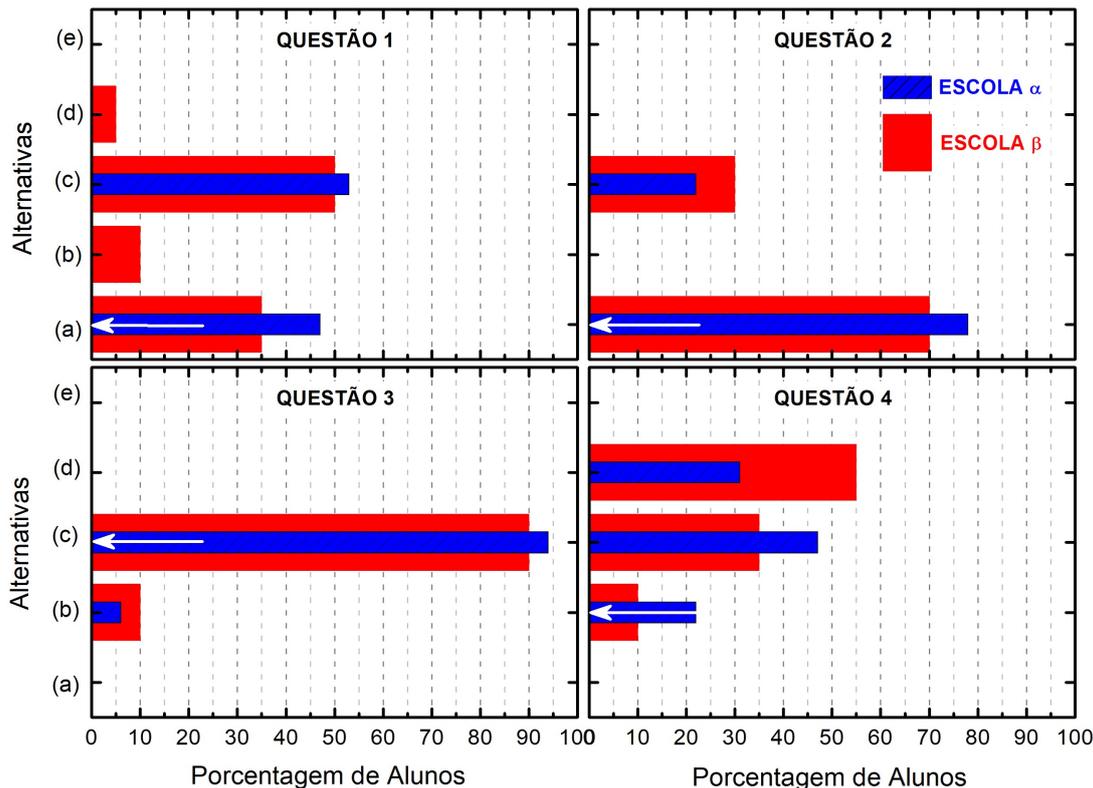
Fonte: Elaborado pelo autor

A diferença da realização dos procedimentos para as pré-aulas nas duas escolas foi útil para

verificar se o formato on-line das atividades seria vital para a aplicação do produto educacional. Foi possível concluir que os dois métodos são eficazes, pois em ambos os casos não houve problemas no seguimento das atividades.

Na primeira pré-aula todos os 32 alunos da escola α e os 20 alunos da escola β que participaram da atividade responderam ao questionário inicial apresentado na seção 4.3.1. Os dados foram organizados no gráfico da figura 4.10 para melhor visualização.

Figura 4.10: Gráficos das respostas dos alunos das duas escolas relacionadas ao questionário inicial apresentado na seção 4.3.1. Cada questão possui cinco alternativas de (a) a (e). 32 alunos da escola α e 20 alunos da escola β participaram da atividade. As setas horizontais indicam as respostas corretas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Note que na primeira questão, Q_1 , as duas turmas ficaram divididas principalmente entre as respostas “Força” e “Conservação de Energia”, dadas pelas alternativas (a) e (c), respectivamente, mesmo a questão trazendo em seu enunciado a referência de “força vital”. Esse tipo de confusão é muito comum nas aulas de física, pois os alunos tem pouca familiaridade com a terminologia científica e geralmente utilizam as mesmas, energia e força, de maneira incorreta no dia a dia. Já nas questões Q_2 e Q_3 , boa parte dos alunos das duas escolas optaram pela resposta correta, considerando, respectivamente, o período em que Carnot viveu, dado pela Revolução Industrial, e que Carnot considerava o calor como uma substância que fluiria naturalmente de um corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. Na questão quatro, Q_4 , é interessante notar que a maioria dos alunos afirmaram de maneira incorreta que Carnot defendia que para melhorar o rendimento de uma máquina térmica seria necessário trocar de combustível ou aumentar as dimensões da máquina, alternativas (c) e (d), respectivamente. No primeiro caso provavelmente os alunos relacionaram a eficiência de uma máquina térmica com a eficiência do motor de um carro com diferentes combustíveis, como

álcool e gasolina, por exemplo. É muito comum discussões entre as pessoas sobre as diferenças de eficiência de um carro *flex* quando é utilizado como combustível álcool ou gasolina. Já no segundo caso, a afirmação de aumentar as dimensões da máquina para aumentar sua eficiência pode ter sido influenciada pela analogia mecânica feita no vídeo “A história da energia”. Nesta analogia Carnot acreditava que o calor fluiria de um reservatório térmico de maior temperatura para outro de menor temperatura como água fluindo de uma altura maior para outra menor. Para aumentar a eficiência da máquina, no vídeo é mostrado o aumento da distância entre os reservatórios para representar o aumento da diferença de temperatura entre os mesmos. Isso, provavelmente, pode ter levado os alunos a associar a ilustração apresentada ao aumento das dimensões da máquina.

De maneira geral é interessante observar que a distribuição de respostas é praticamente a mesma para todas as questões, independentemente da escola em que os alunos estão estudando.

Os procedimentos e a forma de conduzir as demais atividades referentes à primeira aula, a segunda pré-aula e a segunda aula foram semelhantes em ambas as escolas, não havendo diferenças significativas. Na primeira aula abordamos todos os conceitos descritos na seção 4.3.2, explorando trechos do livro de Carnot intitulado “**Reflexões sobre a força motriz do calor**”, sobre a utilização do conceito do *calórico* para explicar o funcionamento de uma máquina térmica e como melhorar o seu rendimento. Adicionalmente, revisamos alguns conceitos vistos em aulas anteriores sobre temperatura e calor e fizemos uma reflexão sobre o papel da revolução industrial no desenvolvimento da Física. Foi traçado um paralelo das mudanças ocorridas na sociedade durante a revolução industrial e as transformações na sociedade provocadas pela revolução digital que vivemos. Ao final da aula vimos a necessidade da formulação da Primeira Lei da Termodinâmica para poder entender melhor as ideias de Carnot em sua obra.

Na segunda pré-aula foi solicitado aos alunos a construção de uma versão simplificada da Eolípila de Heron, conforme descrito na seção 4.3.3. A atividade foi desenvolvida em grupos de 5 integrantes.

Na segunda aula os alunos das duas escolas levaram seus experimentos ou vídeos, feitos por eles mesmos, para verificarmos se a Eolípila podia ser considerada como uma máquina térmica de acordo com o estabelecido na Segunda Lei da Termodinâmica. Na escola α foram formados 6 grupos, onde quatro deles optaram por fazer vídeos do procedimento experimental e 2 grupos levaram a máquina para a sala de aula. Na escola β foram formados apenas dois grupos, e eles optaram por levar um vídeo sobre a montagem experimental realizada por eles. Todos os experimentos funcionaram de maneira satisfatória, mas com a máquina realizando um movimento de rotação com baixa velocidade. Eles verificaram que o movimento da máquina era iniciado imediatamente após a água no interior da lata entrar em ebulição. Um dos experimentos dos alunos é mostrado na figura [4.11](#).

Após discutirmos sobre o funcionamento da Eolípila utilizando os experimentos dos próprios alunos, nós apresentamos um vídeo dos procedimentos realizados por nós para mostrar que a Eolípila não pode ser considerada como uma máquina térmica, mas sim, como uma turbina de ação e reação, conforme exposto nas seções 3.5 e 4.1.

Figura 4.11: Imagem de um dos experimentos da Eolípila de Heron montado pelos alunos a partir das instruções fornecidas pelo professor através do tutorial mostrado na figura 4.6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A demonstração do funcionamento de uma máquina térmica foi feita com o experimento do pássaro sedento. Durante a mudança da atmosfera que envolvia o pássaro, veja seção 4.2, os alunos puderam participar de todo o procedimento, manipulando a caixa e até medindo a frequência do movimento do pássaro, como mostrado na figura 4.12. Eles perceberam que o pássaro cessa seu movimento quando a atmosfera ao redor do pássaro é saturada com vapor de água e retoma seu movimento quando a caixa é retirada.

Figura 4.12: Imagem dos alunos realizando o experimento do pássaro sedento. Em (a) o aluno coloca a caixa sobre o dispositivo para formar uma atmosfera mais densa de vapor de água para fazer com que o pássaro cesse o seu movimento e em (b) o Aluno retira a caixa para que o movimento do pássaro seja restabelecido.



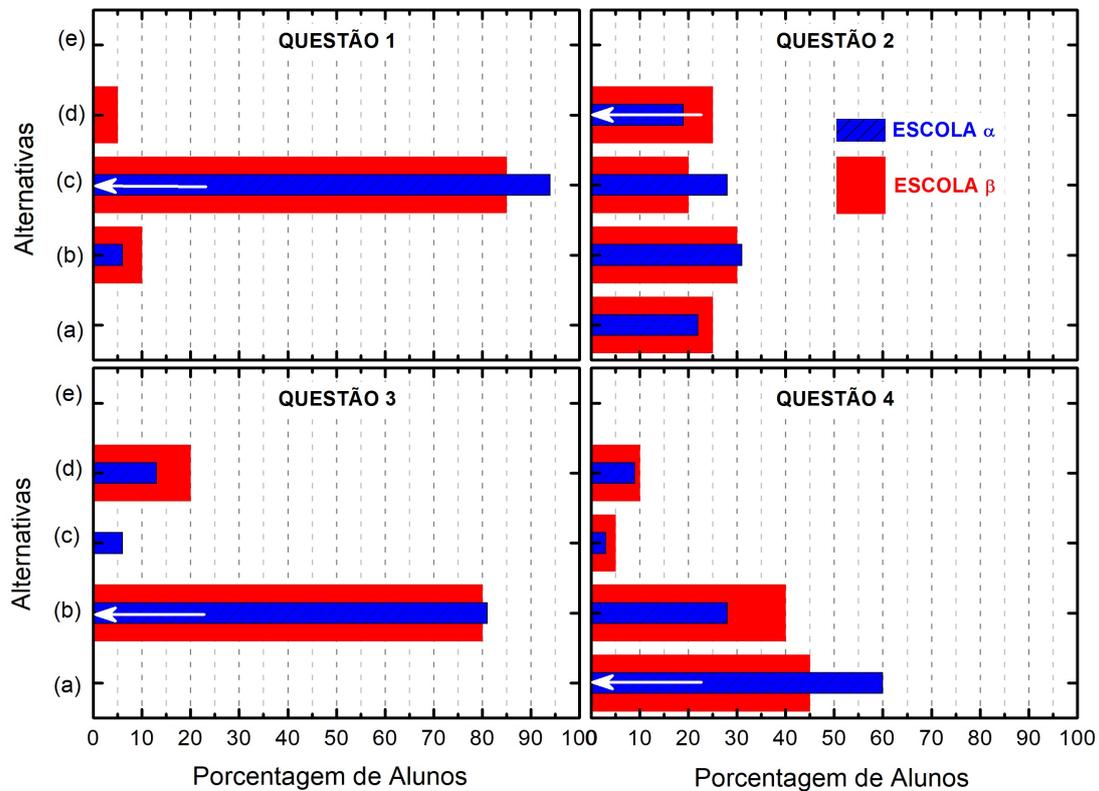
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que os alunos conseguissem estabelecer uma relação entre o movimento do pássaro com o funcionamento de uma máquina térmica, nós explicamos em detalhes como se dá todo o processo para que o movimento do pássaro seja iniciado, conforme descrito na seção 3.6. O conceito de entropia foi introduzido durante a discussão sobre o rendimento do pássaro sedento. Para maiores detalhes veja seção 4.3.4. Em todas as discussões e procedimentos os alunos se mostraram interessados, participando ativamente.

Ao final da segunda aula foi passado aos alunos o questionário final, seção 4.3.4, contendo 4 questões de vestibulares recentes, com cinco alternativas de (a) a (e) cada, em que apenas uma delas é a resposta esperada. Esta atividade foi realizada para mostrar aos alunos como é cobrado o conteúdo discutido nos vestibulares. Todos os alunos das duas escolas participaram

desta atividade. As respostas são apresentadas nos gráficos da figura [4.13](#)

Figura 4.13: Gráficos das respostas dos alunos das duas escolas relacionadas ao questionário final apresentado na seção 4.3.4. Cada questão possui cinco alternativas de (a) a (e). 32 alunos da escola α e 20 alunos da escola β participaram da atividade. As setas horizontais indicam as respostas corretas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A maioria dos alunos das duas escolas responderam de maneira satisfatória as questões 1 e 3. Estas estão diretamente ligadas à teoria discutida insistentemente em sala de aula sobre a Segunda Lei da Termodinâmica. Já nas questões 2 e 4, as respostas foram um pouco divergentes, principalmente na questão 2. Isso se deve, provavelmente, à presença do gráfico na questão 2, mesmo este não possuindo qualquer relevância para a resposta da questão, e a interpretação analítica exigida na questão 4. Os alunos do nível básico de ensino, naturalmente, apresentam um pouco de dificuldade em relacionar o que é discutido teoricamente nas aulas de física com gráficos e equações. É interessante notar que, assim como no questionário inicial, a distribuição de respostas dos alunos é praticamente a mesma no questionário final para as duas escolas.

Capítulo 5

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando a História da Ciência como linha condutora na nossa proposta didática, tendo como tema principal a Segunda Lei da Termodinâmica, que é pouco abordado no Ensino Médio, foi possível reconstruir com os alunos as etapas seguidas por Nicolas Sadi Carnot na elaboração do conceito de rendimento de uma máquina térmica. Com os experimentos da Eolípila de Heron e do pássaro sedento foi possível dar um tratamento mais detalhado sobre os conceitos da Termodinâmica e da Segunda Lei para a definição do que é uma máquina térmica e ainda introduzir o conceito de entropia.

Na aplicação do produto educacional foi verificado alguns dos benefícios da utilização do modelo *Flipped Classroom*. Os alunos participaram de todas as atividades com mais envolvimento do que em outras atividades propostas ao longo do ano. A utilização do celular como ferramenta auxiliar para acessar as atividades das aulas, mesmo que em um breve momento, gerou muito interesse. A construção em grupo da **Eolípila** pelos alunos, fora do período de aula, gerou muito interesse pelo conteúdo discutido em aula. Também foi possível perceber uma participação mais ativa dos alunos com questionamentos mais elaborados em sala de aula.

Durante a primeira aula fizemos uma reflexão sobre o papel da revolução industrial no desenvolvimento da Física, onde discutimos a importância do estudo de ciências na construção de uma sociedade. Isso nos permitiu contextualizar o desenvolvimento da ciência a partir de interesses sociais, principalmente ao falar sobre Carnot que, preocupado com o futuro da França, percebeu a importância de compreender o funcionamento das máquinas a vapor que estavam mudando o mundo. Mostramos as semelhanças entre o tempo que Carnot viveu e os dias atuais, traçando um paralelo das mudanças ocorridas na sociedade durante a revolução industrial e as transformações na sociedade provocadas pela revolução digital que vivemos.

Ao propor estudar o contexto histórico em que os conceitos relacionados à Segunda Lei da Termodinâmica foram estabelecidos, houve um pouco de resistência dos alunos da escola β , pois estes estão mais acostumados com um sistema didático conteudista e de pouca flexibilidade. A impressão que ficou foi que a maioria deles acreditam que “já que não será cobrado, não é preciso prestar atenção”. Essa é uma postura usual, quando o objetivo do aluno é voltado

principalmente para os vestibulares. Já na escola α os alunos se mostraram mais interessados e ativos diante das novidades que a nossa proposta trazia com relação ao conteúdo trabalhado e os procedimentos adotados. Com isso, foi possível verificar possibilidades reais para o professor tentar melhorar o processo de ensino/aprendizagem tornando-o mais eficiente e atraente para os alunos, mesmo diante de sistemas didáticos impositivos e direcionados para os vestibulares.

Uma vez que os novos paradigmas educacionais apontam para um ensino centralizado no aluno, onde o estudante assume o protagonismo com uma participação mais ativa e autônoma, a escolha por novos métodos de ensino está se tornando mandatório. Neste sentido, o método adotado, *Flipped Classroom*, foi muito interessante para dar mais autonomia aos alunos com as atividades propostas nas pré-aulas, fazendo com que os mesmos viessem para as aulas mais curiosos, ativos e interessados no assunto trabalhado.

A nossa proposta se mostrou bastante viável para ser executada em aulas geminadas, de 90 minutos. O intervalo entre as aulas foi de uma semana, sendo muito importante para que os grupos pudessem realizar e refletir sobre as tarefas propostas. Dessa forma todas as tarefas foram concluídas por todos os grupos de estudos. O tempo total de duas aulas geminadas foi adequado e suficiente para conduzir todas as atividades experimentais e o conteúdo teórico relacionado à Termodinâmica e a Segunda Lei, mesmo com o produto sendo aplicado em escolas particulares. Para aplicação dessa proposta em escolas públicas o professor pode ter um pouco mais de flexibilidade com relação ao tempo de execução da mesma, trabalhando o conteúdo de acordo com a realidade dos alunos.

Outro aspecto que foi levado em consideração no planejamento do produto educacional foi a praticidade do procedimento experimental. Em 25 anos que leciono física sempre tive dificuldades em realizar experimentos de Termodinâmica, mas com a montagem dos dois aparatos foi possível promover atividades por descoberta. O experimento de mensuração do rendimento da Eolípila foi trabalhoso, devido a necessidade de criar um ambiente externo a ela para verificar a influência da mudança da temperatura do reservatório frio no rendimento do sistema. Mesmo diante da inviabilidade de conduzir os testes em sala de aula, os recursos de multimídia que temos hoje, me permitiu conduzir uma atividade muito interessante com os alunos através de vídeos dos meus próprios experimentos. Isso foi muito enriquecedor, pois eu sabia tudo o que estava se passando naquela demonstração, tendo controle de todos os parâmetros relacionados à evolução do sistema. Quando propus para os alunos para construírem em grupos uma Eolípila mais simples, mesmo com um roteiro fortemente estruturado, mostrando todos os passos a serem executados, os alunos tiveram a oportunidade, assim como eu tive, de construir um dispositivo que os ajudaram a entender melhor os conceitos que estavam sendo trabalhados sobre a Termodinâmica. Eles ficaram curiosos com o que tinham construído, querendo buscar o entendimento sobre o funcionamento da Eolípila. Ao descobrirem que esta não podia ser considerada como uma máquina térmica de acordo com o que era estabelecido na Termodinâmica, foi um grande incentivo para introduzirmos o experimento do pássaro sedento para eles verificarem do que se tratava tal dispositivo. Os alunos desenvolveram todas as atividades de maneira bastante engajada e com grande motivação.

Esperamos que nossa proposta seja útil para os professores do ensino básico, assim como foi para nós, para tentarem melhorar sua prática docente e mostrar como a física é importante tanto para o desenvolvimento de tecnologia, quanto para o desenvolvimento da sociedade.

REFERÊNCIAS

ATKINS, P. The Laws of Thermodynamics: A Very Short Introduction. Oxford University Press, 2010.

AUSUBEL, D. P. Aquisição e Retenção de Conhecimento: Uma Perspectiva Cognitiva. New York: Paralelo Editora, 2003.

AZEVEDO, H. L., N., M. F., SANTOS, T. P., CARLOS, J. G., TANCREDO, B. O uso do experimento no ensino da física: Tendência a partir do levantamento de artigos em periódicos da área no Brasil. VII ENEPEC-ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS. Florianópolis, 2000.

BAZAROV, I. P. Thermodynamics. Translated by F. Immirzi. Pergamon Press: New York, 1964.

BRASIL, M. d. Parâmetros Curriculares Nacionais – Ensino Médio. Brasília - DF: MEC, 2000.

BRASIL, M. d. Base Nacional Comum Curricular. Proposta Preliminar, 28 de Agosto de 2017. Fonte: basenacionalcomum.mec.gov.br: “Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCCpublicacao.pdf>” Acesso: 10 de Setembro de 2019.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. Revista Brasileira do Ensino de Física v.19, n. 3: p.291-313, dez. 2002. Dezembro de 2002.

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.

CARVALHO, H. e CANDLESS, M. Implementing the flipped classroom. Revista HUPE, v. 13, n. 4, p. 39-45, Rio de Janeiro, 2014. “Disponível em:” <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/revistahupe/article/view/13946> Acesso em: 10 jan. 2020.

CETIC, E. T. Pesquisa sobre o uso das tecnologias de informação e comunicação nas escolas brasileiras [livro eletrônico]. São Paulo: Comitê Gestor da Internet no Brasil, 2017. “Disponível em”: <https://cetic.br/publicacao/pesquisa-sobre-o-uso-das-tecnologias-de-informacao-e-comunicacao-nas-escolas-brasileiras-tic-educacao-2017/>

COLL, C. e SOLÉ, I. O Construtivismo na sala de aula . São Palo -SP: Ática, 2009.

COLLAZOS, C. A. e MENDOZA, J. Cómo aprovechar el “aprendizaje colaborativo” en el aula Educación y Educadores. Universidad de La Sabana Cundinamarca, Colombia, p. 61-76. 2006

FILHO, J. P. A. Regras de transposição didática aplicadas ao laboratório didático. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 17, n. 2, p. 174-182, Agosto 2000.

FILHO, J. B. B. Qual história e qual filosofia da Ciência são capazes de melhorar o ensino de Física? Em PEDUZZI, L. O. Q., MARTINS, A. F. P. e FERREIRA, J. M. H. Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino (p. 65-83). Natal-RN: EDUFRN. 2012.

FLIPPED CLASSROOM FIELD GUIDE. *Portal Flip-ped Classroom Field Guide*. [201-?]. “Disponível em:” <https://docs.google.com/document/d/1arP1QAkSyVcxKYYgTJWCrJf02NdephTVGQltsw-S1fQ/pub#id.suagqb7wve21>. Acesso em: 04 fev. 2020.

FORATO, T. C., MARTINS, R. D. e PIETROCOLA, M. Enfrentando obstáculos na tranposição didática da história da ciência para a sala de aula. Em L. O. PEDUZZI, FERRER, A. F. Martins e J. M. FERREIRA, Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino (p. 123-154). Natal-RN: EDUFRN. 2012.

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.
- HERNANDEZ-SILVA, C. and TECPAN FLORES, S. Aula invertida mediada por el uso de plataformas virtuales: un estudio de caso en la formación de profesores de física. Em Estudios Pedagogicos XLIII n.3, p. 193-204, 2017.
- KOYRÈ, A. Do mundo fechado ao universo infinito. Rio de Janeiro, RJ: Forense Universitária, 2001.
- KUHN, T. S. A Estrutura das Revoluções Científicas. São Paulo-SP: Perspectiva, 2000.
- LEFRANÇOIS, G. R. Teorias de aprendizagem: o que o professor disse. São Paulo - SP: Cengage Learning, 2008.
- LIMA, J. Sequência didática para o ensino da termodinâmica. 2016. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.
- MARTINS, R.; Mayer e a conservação de energia Cadernos de História e Filosofia da Ciência. v. 6, p. 63-84, 1984.
- MORAN, J. Educação Híbrida, um conceito-chave para educação hoje. BACICH, L.; TANZI NETO, A.; TREVISANI, F. M. (orgs.) Ensino Híbrido: personalização e tecnologia na educação. Penso, p. 23-42, 2015.
- MOREIRA, M., MASINI, E. F. S. Aprendizagem significativa - A teoria de David Ausubel. São Paulo - SP: Editora Moraes Ltda, 1982.
- NÓBREGA, Mayane Leite da. Segunda lei da termodinâmica: os caminhos percorridos por William Thomson. 2009. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal da Bahia. Universidade Estadual de Feira de Santana, 2009.
- NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física básica Vol.2 - Fluidos, oscilações, ondas e calor. São Paulo: Edigar Blücher, 1981.
- PEDUZZI, L. O., MARTINS, A. F. e FERREIRA, J. M. Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino. Natal-RN: EDUFRN, 2012.
- 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.

OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. P. B., Hitória da ciência e ensino de física: uma análise meta-historigráfica. Em L. O. PEDUZZI, FERRER, A. F. Martins e J. M. FERREIRA, Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino, p. 41-64. Natal-RN: EDUFRN. 2012.

RIBEIRO, R. J., SILVA S. C. R., KOSCIANSKI, A., Organizadores prévios para aprendizagem significativa em Física: o formato curta de animação. Revista Ensaio v. 14 n. 3 p. 167-183, Belo Horizonte, Setembro 2012.

RIBILOTTA, M. O cinza o branco e o preto- da relevância da história da ciência no ensino de física. Caderno Brasileiro de ensino de física, v.5, n. Especial, p. 7-22, Junho 1998.

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

RONAN, C. A. História ilustrada da ciência da universidade de Cambridge vol IV: A ciência nos séculos XIX e XX. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.

ROTELLAR, C. and CAIN, J. C. Research, Perspectives, and Recommendations on Implementing the Flipped Classroom. American Journal of Pharmaceutical Education, p. 1-9, March 2016.

SANTOS J. C., DICKMAN A. G.; Experimentos reais e virtuais: proposta para ensino de eletricidade no nível médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 41, n. 1, p. e20180161-1 - 12, 2019.

SARMENTO, T. S.; VILLAROUÇO, V.; GOMES, A. S. Arranjos espaciais e especificações técnicas para ambientes de aprendizagem adequados a práticas educacionais com blended learning. Ambiente Construído, v. 20, n. 1, p. 365-390, Porto Alegre, Jan./Mar. 2020.

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.

SILVA, C. C., MOURA, B. A. A natureza da ciência por meio do estudo de episódios históricos: o caso da popularização da óptica newtoniana. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 1, p. 1602-1 - 10, 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.

UNDERWOOD, C., Ciência, tecnologia e a pedagogia da esperança. Em o Desafio de Ensinar ciências no Século XXI. São Paulo: Editour Universidade de São Paulo, 2000.

VALENTE, J. Blended learning e as mudanças no ensino superior: a proposta de sala de aula invertida. Educar em Revista, n. 4, p. 79-95, Curitiba, Edição Especial. Janeiro 2014.

Apêndice A

PRODUTO EDUCACIONAL

Sequência Didática para a Abordagem de Conceitos da Termodinâmica

Termodinâmica

A Eolípila (Máquina de Heron)

Revolução Industrial

Será que a máquina de Heron pode ser considerada uma máquina térmica?

Pássaro Sedendo

123 456 789 012

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

VOL. 1
LIMITED EDITION

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.

A.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.

A.1.1 Máquina de Heron ou Eolípila

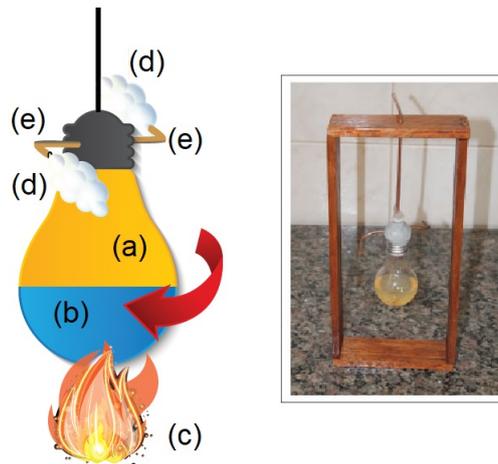
O procedimento experimental realizado com a Eolípila não é fácil de ser reproduzido em sala de aula, pois foi necessário utilizar um forno de cozinha aberto para criar uma atmosfera externa à mesma com uma temperatura de aproximadamente 80°C. Por isso, este foi realizado antes da aula e todo o procedimento 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 [A.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 A.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 [A.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 [A.2](#) para uma comparação qualitativa sobre o comportamento do sistema, experimental e teórico, em função da temperatura da fonte fria T_2 .

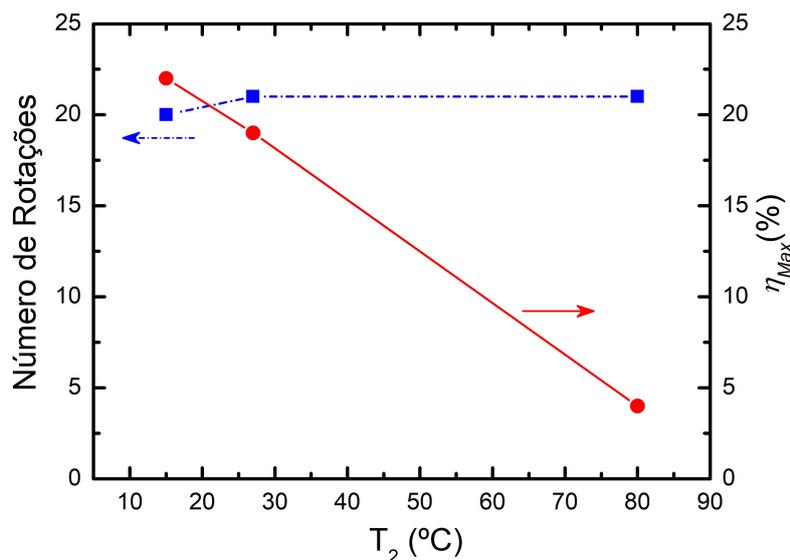
Pelos resultados obtidos nota-se que as médias das rotações são aproximadamente as mesmas para as diferentes temperaturas da fonte fria. Isso significa que a temperatura da atmosfera envolvendo a Eolípila não exerce qualquer influência em sua força motriz. Pelo enunciado de Kelvin da segunda lei “é impossível 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 [A.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 A.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 A.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 [A.2](#) observa-se que para uma máquina reversível quanto menor

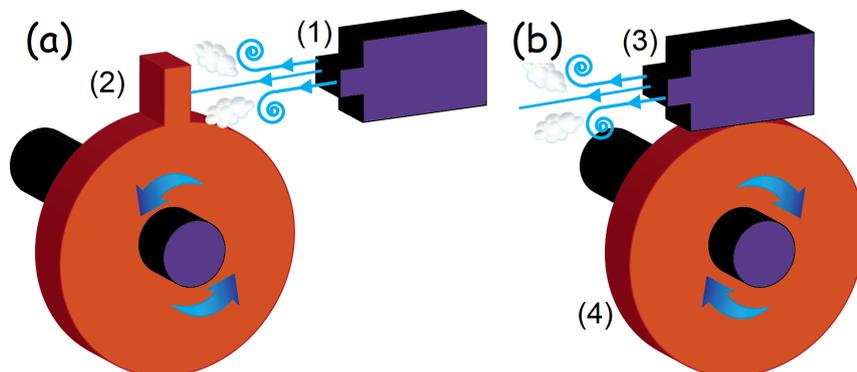
(maior) for a diferença de temperatura entre os reservatórios menor (maior) deve ser o rendimento da máquina. Quando aumentamos a temperatura da fonte fria (T_2) no experimento da Eolípila, diminuindo a diferença de temperatura entre os reservatórios, deveria ser possível observar alguma modificação 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 A.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 A.3 (b).

Figura A.3: Esquema ilustrativo de uma turbina AR. Em (a) um expansor fixo (1) expele 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.

A.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 [A.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 [A.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 [A.6\(a\)](#). O sistema se encontra em

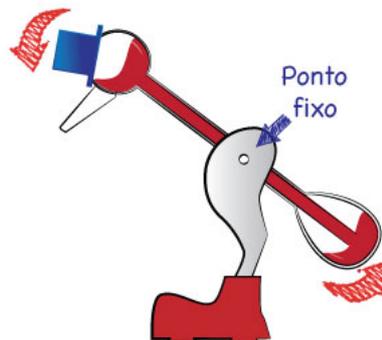
equilíbrio estático, pois a soma de todas as forças se anulam e a soma de todos os momentos também se anulam.

Figura A.4: Fotografia do brinquedo pássaro sedento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

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



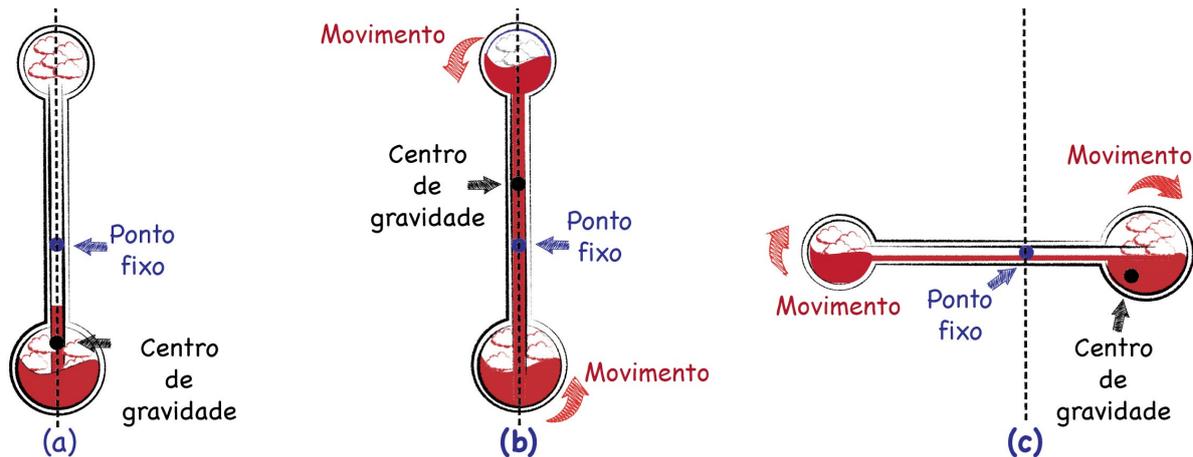
Fonte: Elaborado pelo autor.

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 [A.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 [A.6\(c\)](#). Dessa forma as pressões nos dois bulbos

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

Figura A.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.

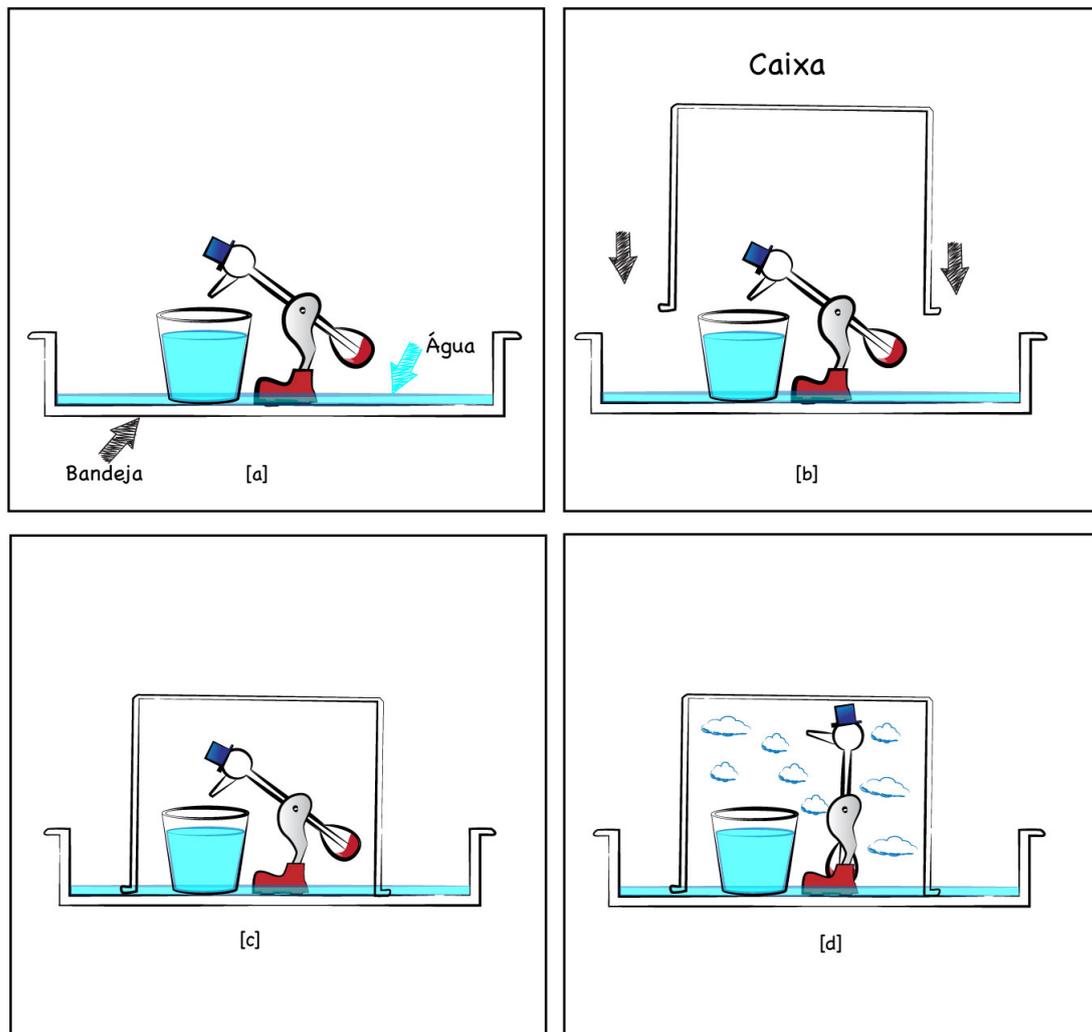
Vemos portanto que o pássaro executa um movimento periódico como em uma máquina térmica. O sistema também possui duas fontes térmicas, uma quente, dada pela atmosfera à volta do experimento, e uma fria, dada pela cabeça do pássaro. A diferença de temperatura entre as duas fontes faz com que o centro 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 [A.7](#).

Figura A.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.

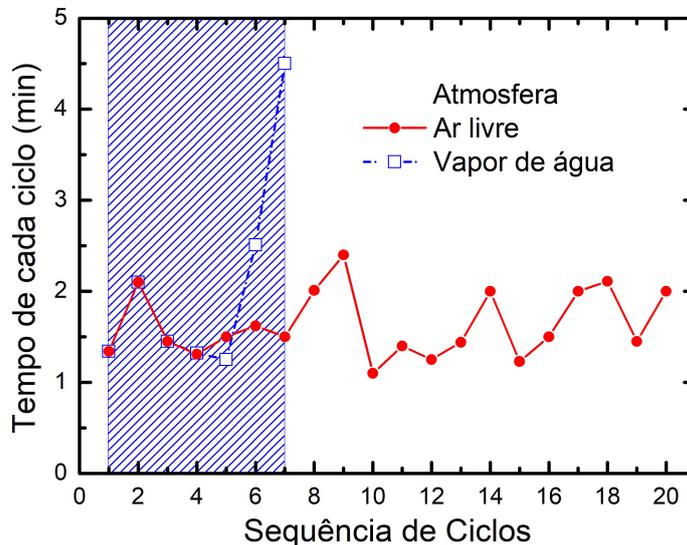


Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo medido de cada ciclo do pássaro é apresentado no gráfico da figura [A.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 [A.8](#), com o pássaro cessando o seu movimento no sétimo ciclo.

Figura A.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 [A.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 A.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.

A.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.

A.2.1 Evolução Histórica do Conceito 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.

A.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.

A.2.3 O Uso Correto da Terminologia Calor

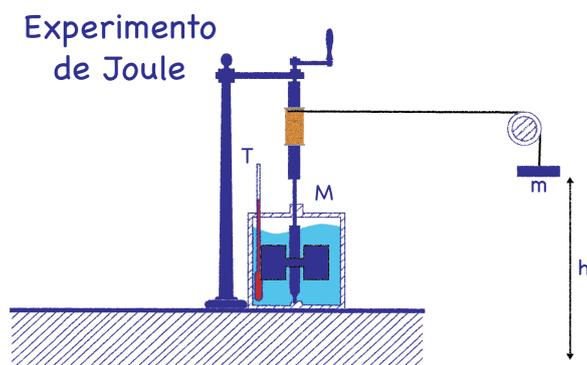
Benjamin Thompson, o conde de Rumford, na primeira metade do século XIX discordava da teoria do calórico com uma importante observação: A quantidade de calor “espremida” para fora de um corpo por atrito deveria ser finita? Ao supervisionar a perfuração de canhões nas oficinas do arsenal de Munique ele 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 [A.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 A.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.

A.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, propele 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 suas 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 (lord Kelvin) de 1851, conduziram a formulação da Segunda Lei da Termodinâmica.

A.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, propele 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 substituto 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:

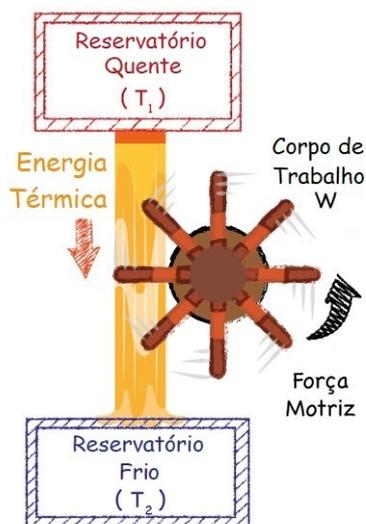
O *calórico* desenvolvido no forno pelo efeito da combustão atravessa as paredes da caldeira, produz vapor e, de alguma forma, incorpora-se a ele. O vapor transporta o *calórico*, primeiro para o cilindro, onde desempenha alguma função, e de lá para o condensador, onde é condensado pelo contato com a 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 propeler 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 [A.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 A.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.

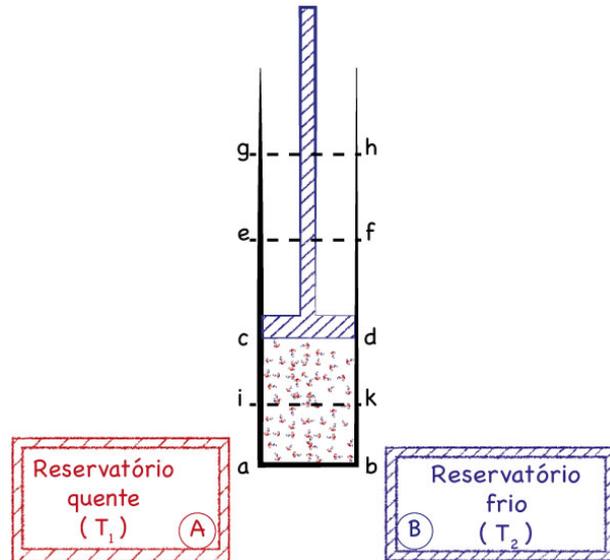
Na busca por uma máquina térmica com eficiência máxima, Carnot imaginou uma máquina perfeita, que não perdesse energia térmica para o meio externo e que os dois reservatórios térmicos permanecessem à temperatura constante. Ele idealizou sua máquina de maneira bastante simples, veja figura [A.12](#), 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 [A.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.

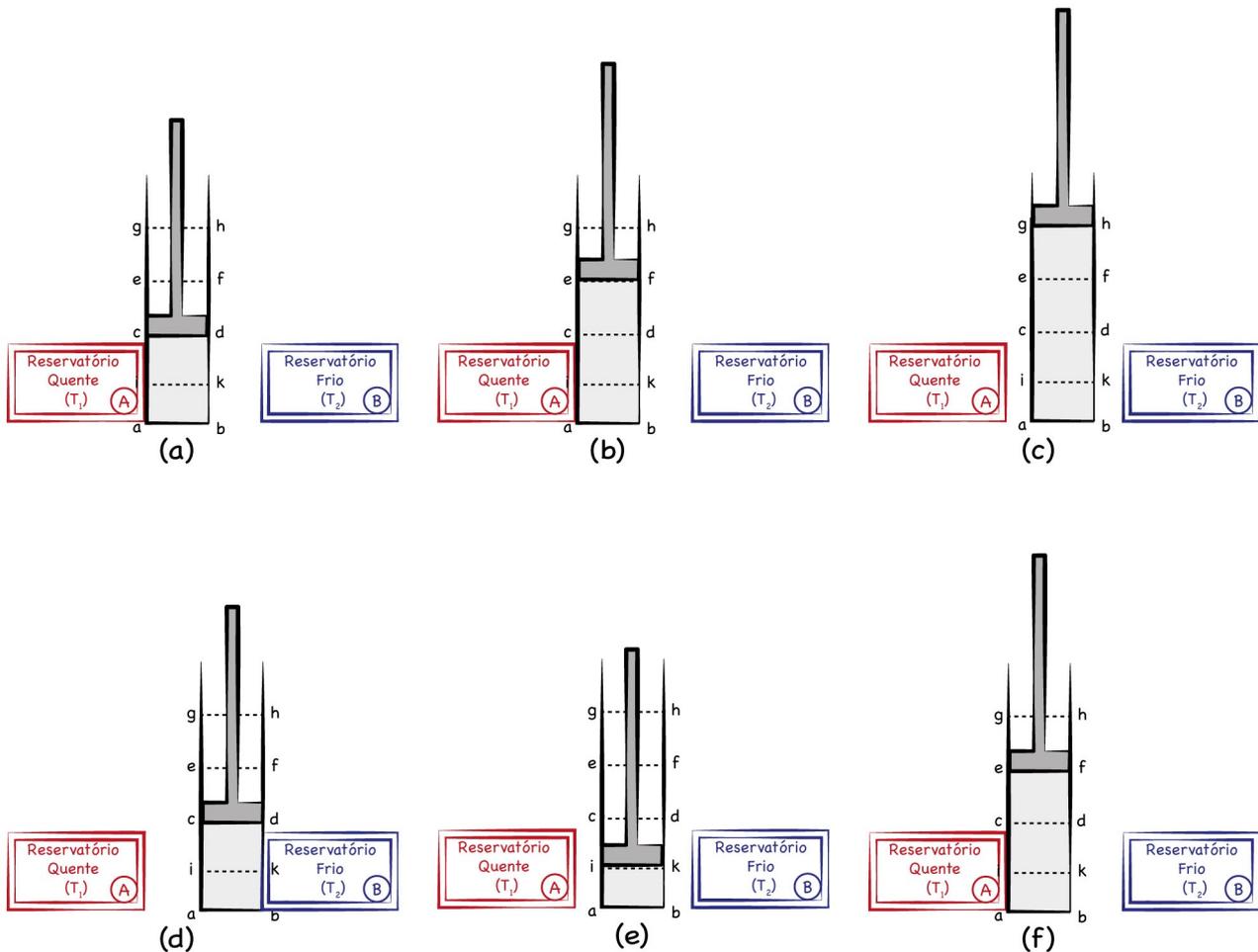
Figura A.12: Máquina idealizada por Carnot, consistindo de um pistão móvel em um cilindro contendo ar como substância de trabalho e dois reservatórios térmicos com temperaturas T_1 e T_2 , com $T_1 > T_2$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2. O pistão agora é movido gradualmente para a posição ef , como ilustrado na figura [A.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 [A.13](#) (c).

Figura A.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 [A.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 [A.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 [A.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 [A.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 [A.13](#), em que não há troca de energia. Este é conhecido como o Ciclo de Carnot e é apresentado na figura [A.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 [A.13](#). Observe que o segundo processo adiabático é descrito neste diagrama por $d \rightarrow a$.

Para entender melhor o ciclo da figura [A.14](#) vamos utilizar a notação e o diagrama de máquina térmica apresentado na figura [A.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,

$$Q_1 = W + Q_2. \quad (\text{A.1})$$

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,

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

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

Da equação [\(A.1\)](#) podemos escrever $W = Q_1 - Q_2$. Substituindo na equação [\(A.2\)](#) obtemos:

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

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

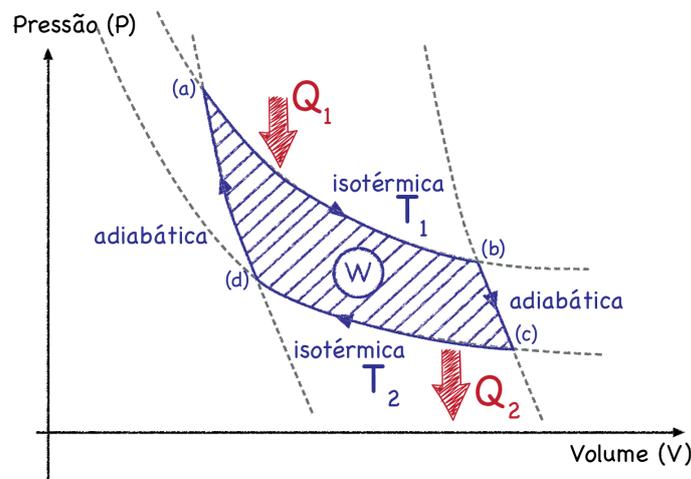
O resultado acima mostra que o rendimento máximo de uma máquina térmica é sempre menor do que 100%, ou seja, $\eta < 1$, uma vez que Q_2 é parte da energia total Q_1 fornecida pelo reservatório quente e portanto, $Q_2 < Q_1$.

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)

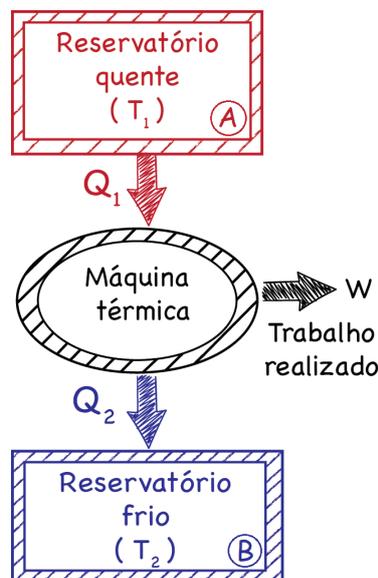
$$\frac{Q_2}{Q_1} = f(T_1; T_2) \rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{f(T_2)}{f(T_1)}. \quad (\text{A.4})$$

Figura A.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 realizadas 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.

Figura A.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

Substituindo esse resultado na equação (A.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 ,

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

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

Carnot estabelece, de certa maneira, o resultado apresentado na equação (A.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 (A.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.

A.2.6 A Termodinâmica

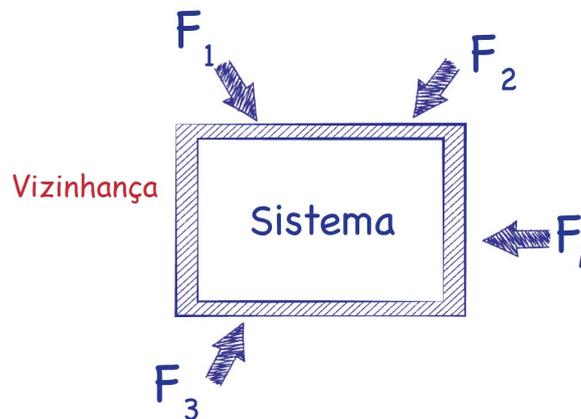
A termodinâmica é uma ciência dedutiva cujos conteúdos principais são derivados a partir de duas leis fundamentais, chamadas de leis da termodinâmica, e de uma série de resultados e observações experimentais. Com base nas primeira e segunda leis, a termodinâmica nos permite investigar as propriedades 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 [A.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 A.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.

A.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.

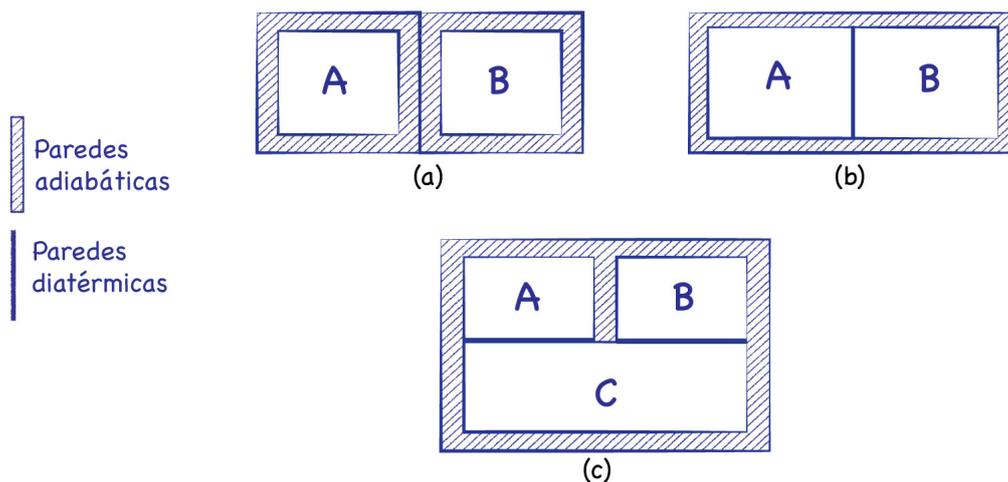
Mas como podemos caracterizar o estabelecimento do equilíbrio interno de um sistema que ocorre ao longo do tempo quando o sistema é isolado? Para responder a essa pergunta vamos considerar dois sistemas isolados A e B . Cada um deles é caracterizado por um estado de equilíbrio independente. Se considerarmos o contato entre os dois sistemas através de uma parede adiabática, como ilustrado na figura A.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 A.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 A.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 A.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.

A.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:

$$\Delta U = Q - W, \quad (\text{A.6})$$

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 (A.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.

A.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 A.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 A.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 A.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,

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

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

pia 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} ,

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

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 [A.18](#), e considerando a variação da entropia, dada pela equação [\(A.8\)](#), 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,

$$\frac{Q_{ab}}{T_{ab}} + \frac{Q_{bc}}{T_{bc}} + \frac{Q_{cd}}{T_{cd}} + \frac{Q_{da}}{T_{da}} = 0. \quad (\text{A.9})$$

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 [\(A.9\)](#) torna-se:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0. \quad (\text{A.10})$$

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

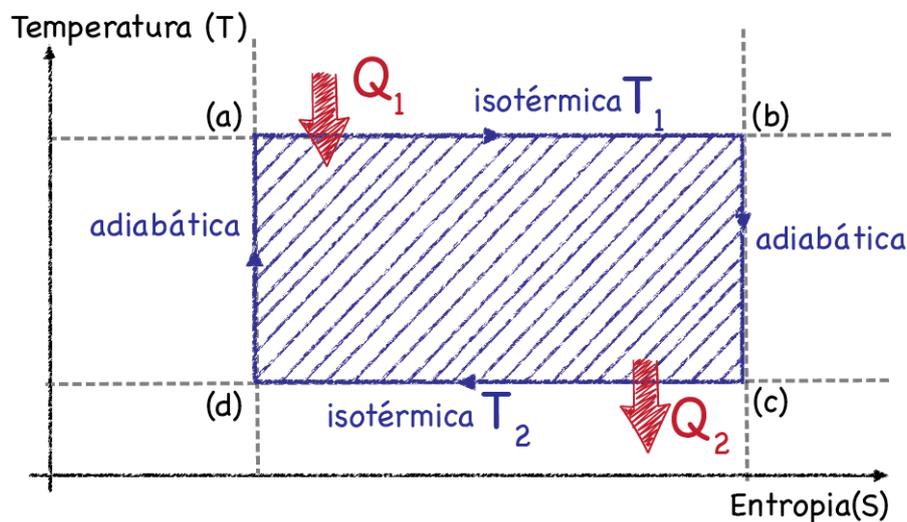
Substituindo o resultado [\(A.11\)](#) na expressão obtida para o rendimento de Carnot na

equação (A.3) obtemos o mesmo resultado apresentado na equação (A.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 A.18: Diagrama da temperatura T em função da entropia S do ciclo de Carnot.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A.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.

A.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 [A.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 A.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.

A.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 A.2.1 a 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.

A.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 [A.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.

A.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 A.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 A.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 A.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.

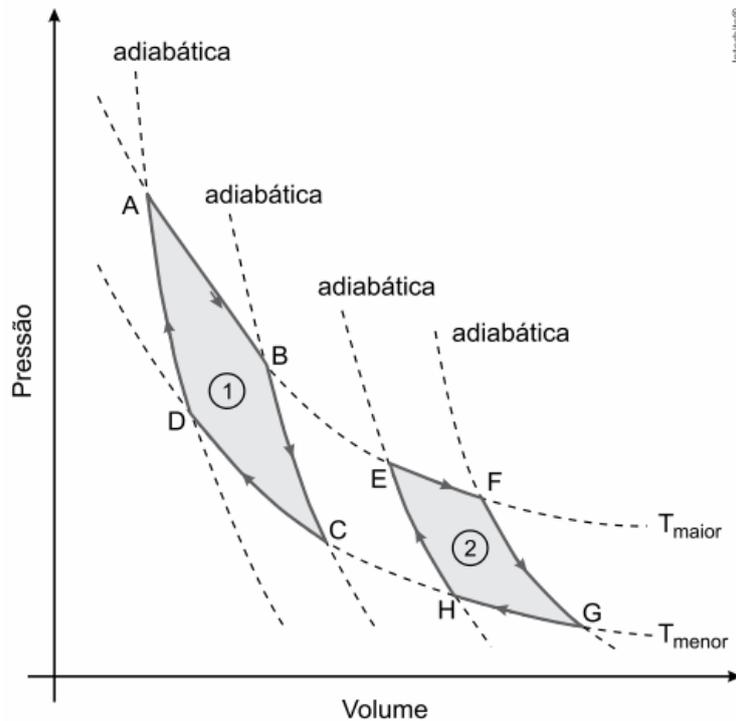
QUESTIONÁRIO FINAL

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-Thomson.
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,

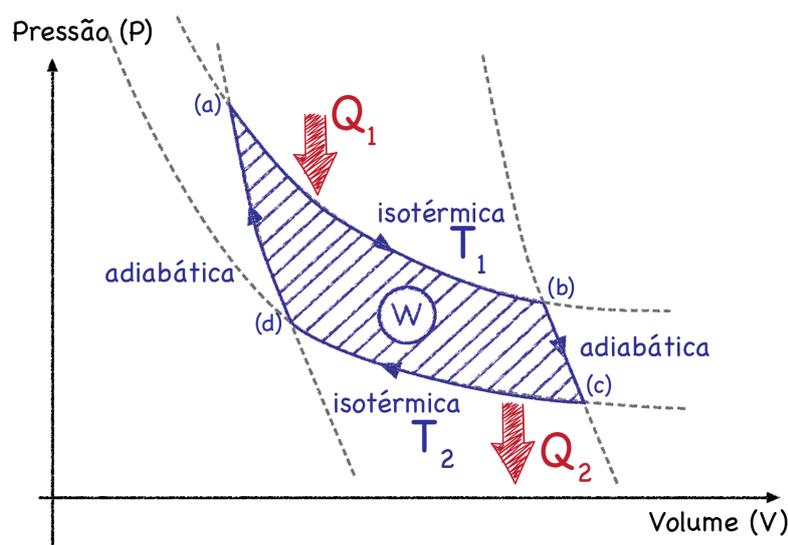
- a) o rendimento da máquina 1 é maior do que o da máquina 2.
- b) a variação de energia interna sofrida pelo gás na máquina 1 é maior do que na máquina 2.
- c) a variação de energia interna sofrida pelo gás na máquina 1 é menor do que na máquina 2.
- d) nenhuma delas transforma integralmente calor em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

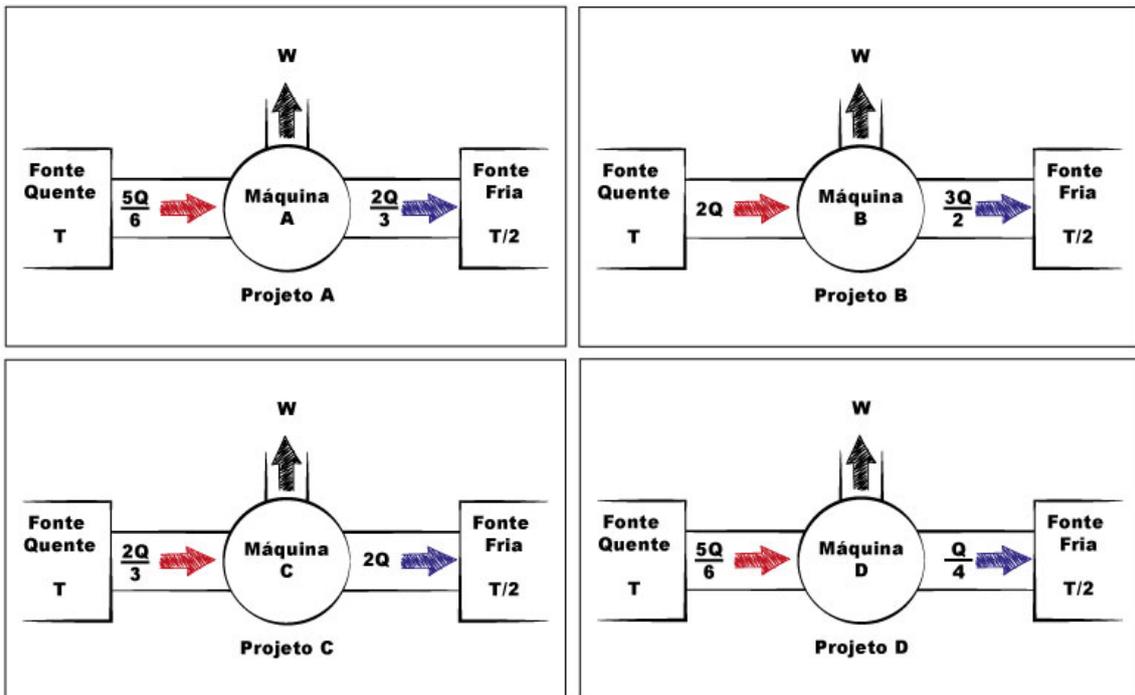
- o tipo de combustível, fóssil, que utilizam. Sendo um insumo não renovável, em algum momento estará esgotado.
 - um dos princípios da termodinâmica, segundo o qual o rendimento de uma máquina térmica nunca atinge o ideal.
 - o funcionamento cíclico de todos os motores. A repetição contínua dos movimentos 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]

Apêndice B

TUTORIAL PARA A MONTAGEM DE UMA VERSÃO SIMPLIFICADA DA EOLÍPILA DE HERON

Física

Com a agulha fure a lata de refrigerante (lembrando que a lata deve permanecer com o lacre fechado),

O lacre NÃO deve ser aberto

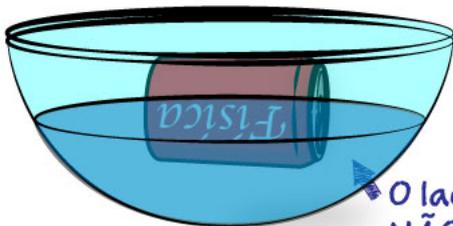


Faça dois furos diametricamente opostos e retire o líquido de dentro da lata.

Os furos devem ser feitos diametricamente opostos



Com ela vazia mergulhe a lata em uma vasilha contendo água para encher parcialmente a lata, deixe a lata com 1/3 de seu volume com água e o restante vazio.



O lacre NÃO deve ser aberto

Amarre o barbante no lacre da lata (sem abrir o lacre), prenda a outra extremidade do barbante em um suporte.



123 456 789 012



TERMODINÂMICA

MÁQUINA DE HERON

VOL. 1
LIMITED EDITION

Apêndice C

RELAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR PELA TEMPERATURA

Este apêndice é destinado à demonstração da expressão 3.11 apresentada na seção 3.4.3.

Para demonstrar que a razão entre a quantidade de energia Q_1 retirada do reservatório térmico de maior temperatura através de calor e sua temperatura T_1 é igual a razão da quantidade de energia Q_2 fornecida ao reservatório de menor temperatura através de calor pela sua temperatura T_2 , vamos utilizar as equações (3.9) e (3.10), obtidas na seção 3.4.3 e dadas respectivamente por:

$$Q_1 = (nRT_1) \ln \frac{V_b}{V_a},$$

$$Q_2 = (nRT_2) \ln \frac{V_d}{V_c}.$$

Estas podem ser reescritas como:

$$\frac{Q_1}{T_1} = (nR) \ln \frac{V_b}{V_a}, \quad (\text{C.1})$$

$$\frac{Q_2}{T_2} = (nR) \ln \frac{V_d}{V_c}, \quad (\text{C.2})$$

Para os processos adiabáticos bc e da do ciclo de Carnot, apresentado na figura 3.5, tem-se a equação de Poisson $PV^\gamma = cte$. Utilizando a equação de estado do gás ideal $PV = nRT$, a equação de Poisson pode ser escrita para os estados b e c como $nRT_1(V_b^{\gamma-1}) = cte$ e $nRT_2(V_c^{\gamma-1}) = cte$. Como os estados b e c pertencem à mesma adiabática tem-se:

$$nRT_1(V_b^{\gamma-1}) = nRT_2(V_c^{\gamma-1}),$$

$$\therefore \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_c}{V_b} \right)^{\gamma-1}, \quad (\text{C.3})$$

Procedendo de maneira análoga para os estados a e d da outra adiabática do ciclo de Carnot

obtém-se:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_d}{V_a}\right)^{\gamma-1}. \quad (\text{C.4})$$

Substituindo a equação (C.4) na equação (C.3) tem-se:

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_d}{V_a}\right)^{\gamma-1} &= \left(\frac{V_c}{V_b}\right)^{\gamma-1} \\ \therefore \frac{V_d}{V_c} &= \frac{V_a}{V_b} \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

Considerando a relação $\ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right) = -\ln\left(\frac{V_a}{V_b}\right)$, utilizando o resultado (C.5) na equação (C.1) e comparando a mesma com a equação (C.2) obtemos finalmente que,

$$\frac{|Q_1|}{T_1} = \frac{|Q_2|}{T_2}, \quad (\text{C.6})$$

que é a expressão que queríamos demonstrar.