



**INSTITUTO FEDERAL**

Sertão Pernambucano

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO  
SERTÃO PERNAMBUCANO  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA  
CURSO LICENCIATURA EM FÍSICA**

**WELLINGTON GONÇALVES DE ANDRADE**

**MÁQUINAS TÉRMICAS EM UMA ABORDAGEM HISTÓRICA E  
EXPERIMENTAL: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DA TERMODINÂMICA**

**SALGUEIRO**

**2023**

WELLINGTON GONÇALVES DE ANDRADE

MÁQUINAS TÉRMICAS EM UMA ABORDAGEM HISTÓRICA E  
EXPERIMENTAL: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DA TERMODINÂMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, campus Salgueiro, como requisito parcial à obtenção do título de Graduado em Licenciatura em Física.

Orientador (a): Prof. Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio.

SALGUEIRO

2023

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

A554 Andrade, Wellington Gonçalves de.

Máquinas térmicas em uma abordagem histórica e experimental: uma proposta para o ensino da Termodinâmica / Wellington Gonçalves de Andrade. - Salgueiro, 2023.

64 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, 2023.  
Orientação: Prof. Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio.

1. Ensino de Física. 2. Experimentação. 3. Termodinâmica. 4. Máquinas Térmicas.  
I. Título.

CDD 530.07

---

WELLINGTON GONÇALVES DE ANDRADE

MÁQUINAS TÉRMICAS EM UMA ABORDAGEM HISTÓRICA E EXPERIMENTAL:  
UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DA TERMODINÂMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, campus Salgueiro, como requisito parcial à obtenção do título de Graduado em Licenciatura em Física.

Aprovado em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio  
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

---

Prof. Getúlio Eduardo Rodrigues de Paiva  
IF Sertão PE – Campus Salgueiro

---

Prof. Antônio Levi Nunes da Silva  
EREM Odorico Melo

SALGUEIRO

2023

**Dedicatória.**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, sem ele eu não teria capacidade para desenvolver este trabalho. A minha família por estar sempre ao meu lado, me incentivando sempre aos estudos não deixando nada me faltar. E a todos os que me ajudaram, de maneira direta ou indireta, ao longo desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que me deu oportunidades, força de vontade e coragem para superar todos os desafios, me proporcionando chegar até aqui.

A minha família, principalmente aos meus pais e meu irmão, por todo apoio, paciência e compreensão.

Ao professor Thiago de Sá Muniz Sampaio, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Getúlio Eduardo Rodrigues de Paiva e Antônio Levi Nunes da Silva pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus amigos e colegas da turma, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

“A termodinâmica, o bom senso e a experiência mostram que se não melhorarmos o que fazemos no nosso trabalho ou na vida pessoal, a desordem só aumenta. Portanto, deveria ser óbvio para todos a necessidade de melhorar em tudo que fazemos mesmo que só conheçamos a termodinâmica, tenhamos apenas a experiência de vida ou o bom senso nato [...]”

Paulo Farias Castro Filho

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta para a elaboração de um experimento simples, de baixo custo e de fácil aquisição e montagem, que contribua com o ensino-aprendizagem de conteúdos relacionados à termodinâmica, abordando principalmente os princípios físicos das máquinas térmicas. A metodologia proposta pode fornecer a construção e discussão do experimento a partir dos conhecimentos históricos e teóricos. Com isso, espera-se que o planejamento e execução da experimentação no ensino de física possam vir como uma melhor forma estratégica para compreensão e adequação de conteúdo, representando a eficiência no processo de ensino-aprendizagem. Este experimento foi desenvolvido a fim de criar um dispositivo baseado na máquina térmica de Heron de Alexandria, para demonstrar e compreender os conceitos físicos da primeira e segunda lei da termodinâmica, sobretudo, das máquinas térmicas.

**Palavras-chave:** Ensino de Física. Experimentação. Termodinâmica. Máquinas Térmicas.



## ABSTRACT

The objective of this work is to present a proposal for the development of a simple, low-cost experiment that is easy to acquire and assemble, which contributes to the teaching-learning of content related to thermodynamics, mainly addressing the physical principles of thermal machines. The proposed methodology can provide the construction and discussion of the experiment based on historical and theoretical knowledge. With this, we hope that the planning and execution of experimentation in physics teaching can come as a better strategic way to understand and adapt content, representing efficiency in the teaching-learning process. This experiment was developed in order to create a device based on Heron of Alexandria's heat engine, to demonstrate and understand the physical concepts of the first and second laws of thermodynamics, especially heat engines.

**Keywords:** Teaching Physics. Experimentation. Thermodynamics. Thermal Machines.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ilustração do Parafuso de Arquimedes, III a.C	21
Figura 2	Ilustração da Eolípila de Heron ou Máquina Térmica de Heron, I d.C	22
Figura 3	Ilustração do motor a vapor criado por Thomas Savery, 1698.	24
Figura 4	Ilustração do motor a vapor criado por Thomas Newcomen, 1712.	25
Figura 5	Ilustração do motor a vapor criado por James Watt, 1765.	26
Figura 6	Ilustração da locomotiva de Richard Trevithick, 1802.	27
Figura 7	Ilustração do automóvel registrado por Benz, 1886.	27
Figura 8	Diagrama esquemático de uma máquina térmica	36
Figura 9	Diagrama de calor e trabalho envolvidos num processo cíclico de uma máquina térmica	39
Figura 10	Diagrama P x V (Pressão x Volume)	40
Figura 11	Materiais necessários para a montagem	46
Figura 12	À esquerda apresentamos o dispositivo montado semelhante à Eolípila de Heron vista na parte frontal. À direita é visto o mesmo dispositivo na parte superior.	47
Figura 13	À esquerda apresentamos o dispositivo posicionado na caldeira para o aquecimento. À direita é visto o dispositivo experimental em funcionamento, veja o movimento giratório após o vapor sair pelos canudos.	48
Figura 14	Ilustração do movimento da máquina de Heron	50
Figura 15	Representação ilustrativa das forças atuantes no canudo.	50
Figura 16	À esquerda apresentamos a ilustração dos vetores atuantes da máquina de Heron. À direita é visto a semelhança dos vetores da máquina diante do dispositivo montado	51
Figura 17	Primeiro princípio da termodinâmica no dispositivo.	52

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1	Lista de materiais necessários para a realização deste dispositivo	45
----------	--	----

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

IFSertãoPE Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Sertão de Pernambuco.

**LISTA DE SÍMBOLOS**

SI	Sistema Internacional de Unidades
$U$	Varição da energia interna
$Q$	Quantidade de calor
$W$	Trabalho
$T$	Temperatura
$P$	Pressão
$V$	Volume
$S$	Entropia
$\eta$	Redimento
$J$	Joule
$^{\circ}C$	Celsius
$K$	Kelvin
$\vec{r}$	Vetor braço de alavanca
$\vec{F}$	Vetor força

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>A TERMODINÂMICA E AS MÁQUINAS TÉRMICAS</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Breve histórico das máquinas térmicas</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Historia da Termodinâmica</b>	<b>29</b>
<b>2.3</b>	<b>Leis da Termodinâmica</b>	<b>31</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Primeira Lei da Termodinâmica</b>	<b>32</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Segunda Lei da Termodinâmica.</b>	<b>34</b>
<b>2.3.2.1</b>	<b>Entropia</b>	<b>37</b>
<b>2.4</b>	<b>Funcionamento das máquinas térmicas: Processos termodinâmicos cíclicos</b>	<b>38</b>
<b>2.5</b>	<b>Rendimento das máquinas térmicas</b>	<b>41</b>
<b>2.6</b>	<b>Utilização das máquinas térmicas</b>	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>PROPOSTA EXPERIMENTAL: MÁQUINA DE HERON</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Montagem</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Resultados e discussões</b>	<b>48</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Uma breve explicação na física básica</b>	<b>48</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Explicação comparativa com a máquina de Heron</b>	<b>47</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Explicando através da 1º Lei da termodinâmica</b>	<b>49</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Explicando através da 2º Lei da termodinâmica</b>	<b>52</b>
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>57</b>
		<b>59</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O modelo de ensino de Física predominante nas escolas brasileiras é baseado na transmissão-recepção, na memorização de fórmulas e terminologias, na resolução excessiva de exercícios matemáticos, na falta de integração com outras disciplinas, na ausência de recursos educacionais e principalmente na falta de informações sobre as implicações dos conteúdos estudados e suas tecnologias na vida social do aluno, o que só faz aumentar o desinteresse e os índices de evasão e reprovação escolar (VIEIRA, 2020). Diante disso, em muitos casos, a física é vista como uma das disciplinas mais difícil de aprender e compreender em sala de aula do ensino médio.

Segundo Moreira (2021, p.1), estudar física não é decorar fórmulas para resolver problemas propostos pelos educadores, mas entender o conceito e a teoria. Nesse contexto, o ensino de física tem enfrentado grandes problemas quanto à compreensão e interpretação dos conteúdos, como também a falta de custeio de equipamentos e de materiais didáticos para dar suporte ao ensino. Com isso, a aula torna-se repetitiva e cansativa, ocasionando a falta de interação e participação dos alunos.

Segundo JOÃO (2018):

“É importante destacar, que apenas as aulas teóricas, por si só, não são mais capazes de despertar o interesse dos alunos. Um dos motivos da desmotivação é a concepção, por parte dos alunos, de que as aulas de física são apenas teóricas, sem qualquer vinculação com a realidade. Ademais, o aluno desmotivado tende a se afastar do conhecimento científico.”

Neste contexto, cabe ao professor de Física, o seu papel de sujeito motivador da aprendizagem, identificar e sanar as dúvidas que permeiam a vida de seus alunos, proporcionando formas alternativas de aprendizagem, tanto quanto possível. Dessa forma, faz com que os discentes interajam em sala de aula, tornando o ensino de física mais proativa, assim atingindo os objetivos metodológicos planejados pelo professor.

Segundo MOREIRA (2021):

“Ensinar e aprender física envolve conceitos e conceitualização, modelos e modelagem, atividades experimentais, competências científicas, situações que façam sentido, aprendizagem significativa, dialogicidade e criticidade, interesse.”

Nesse contexto, o ensino de física não envolve apenas apresentar os conceitos, as fórmulas e/ou teorias, mas demonstrá-la de forma eficiente e compreensível. Para isso, o uso de instrumentos pedagógicos, como a realização de experimentos, pode ser uma importante contribuição (BENFÍCA, 2020).

A experimentação vem ganhando mais espaço na área de Ciências da Natureza (Química, Física e Biologia). Desde Aristóteles, na Grécia Antiga que defendia o empirismo como meio de chegar a conclusões, explicações e formular teorias, passando pelo século XVII, quando a experimentação era a base para conhecimento científico, chegando ao século XXI, em que não se usa mais o método científico da forma como foi proposto inicialmente, mas ainda se reconhece a experimentação como etapa importante do processo (ROVER, 2011).

A experimentação, dissociada de uma estratégia de ensino mais ampla e adequada, não seria suficiente para produzir o desenvolvimento intelectual do educando, mas ainda assim, permitiria a possibilidade de manipulação de coisas e aparelhos além de incentivar o hábito da observação crítica de fenômenos (SANTOS, 2016). Dessa forma, o aluno pode participar e construir o seu próprio conhecimento, desenvolvendo sua capacidade crítica; e o professor passa a ter um papel de mediador do processo de construção do conhecimento. Com esse ponto de vista, acreditamos que esse trabalho pode trazer contribuições tanto para os alunos e professores do ensino médio, como também para a comunidade em geral.

De modo convergente a esse âmbito de preocupações, as atividades experimentais podem ser uma estratégia eficaz para o ensino de física em sala de aula. Mais do que um fenômeno curioso para ser observado e admirado, o experimento constitui-se numa atividade pedagógica desenvolvida pelo aluno que inclui intercaladamente, tarefas teóricas e experimentais, onde o fazer é importante, e o refletir para compreender é fundamental. (MORO, 2016).

No campo da Física, a revolução que engloba história com ciência e tecnologia, e que não possuiu o nome de alguém especificamente, surgiu de um somatório de esforço de muitos, e que perdura até os dias atuais, segundo especialistas, é a Revolução Industrial (LINHARES, 2018). A Revolução



Industrial foi muito importante para o avanço da humanidade, aperfeiçoou o mundo da industrialização e do comércio e, sobretudo, foi o pioneiro do surgimento das primeiras máquinas térmicas. Podemos afirmar que a termodinâmica se desenvolveu a partir da metade do século XVIII por conta da invenção das máquinas térmicas na primeira Revolução Industrial (PADUA, PADUA e SILVA; 2008). As máquinas térmicas é um dispositivo que transforma calor em trabalho mecânico (LINHARES, 2018). Podemos dizer que a termodinâmica surgiu de um interesse puramente prático, qual seja a possibilidade de o calor gerar movimento, por este motivo muitos autores definem a termodinâmica como a parte da física que trata do calor e do trabalho ou que trata da energia e da entropia (PADUA, PADUA e SILVA; 2008).

Segundo Azevedo (2000), experimentos envolvendo Termodinâmica são escassos, existindo poucas publicações de experimentos didáticos em revistas especializadas. Com isso, é muito difícil trabalhar de maneira abrangente o ensino da Termodinâmica no Ensino Médio, e conseqüentemente, vem sendo considerado um componente curricular de física difícil para se ensinar e compreender por professores e alunos. Silva (1998) ressalta que alguns autores consideram a termologia como um dos tópicos do segundo grau mais difíceis para o aluno.

Desta forma, este trabalho propõe a realização e discussão de uma atividade experimental simples e de baixo custo para o ensino de física, principalmente a área da Termodinâmica. Afinal, a Termodinâmica se iniciou como área do conhecimento a partir de um processo puramente experimental, ao contrário de outros ramos da ciência que se apoiam em modelos e teorias para explicar determinados fenômenos (SILVA, 2012). Assim, a proposta se baseia em uma fácil aquisição dos materiais e fácil montagem, permitindo que este tipo de atividade possa ser utilizado por professores ou estudantes da área de física, tanto em espaços formais quanto não formais, e em diferentes níveis de ensino. Também tem a viabilidade de ser aplicada tanto em laboratório de física quanto em laboratórios de ciências escolares ou salas de aula.

O objetivo geral deste trabalho é estudar os conceitos fundamentais da termodinâmica, principalmente das máquinas térmicas, visando um olhar, um ensino em Física mais interessante, experimental e, sobretudo, atrativo para

alunos do Ensino Médio e a comunidade em geral que se interessa pela área. Para isso, foram selecionados os seguintes objetivos específicos:

1. Estudar e planejar o uso de um procedimento experimental como uma alternativa eficaz de ensino-aprendizagem para o estudo da Termodinâmica;
2. Compreender as correlações entre calor e trabalho mecânico;
3. Compreender que a Revolução Industrial foi o pioneirismo do surgimento das máquinas térmicas;
4. Entender a importância do surgimento das máquinas térmicas para os avanços industriais e tecnológicos;
5. Identificar como a Termodinâmica está presente no nosso cotidiano, tais como geladeiras, refrigeradores, ar-condicionados, motores de carro, usinas termoelétricas, etc.;
6. Identificar o calor como uma forma de energia térmica que passa de um corpo de maior temperatura para outro de menor temperatura;
7. Estudar o funcionamento, rendimento e utilização das máquinas térmicas;
8. Compreender o que é entropia e os processos cíclicos de uma máquina térmica.

Este trabalho foi desenvolvido a partir do recorte de um próprio artigo científico publicado na Revista Semiárido Visu 2021, da seção ciências exatas e da terra, nomeado “A Máquina de Heron: Desenvolvimento de um procedimento experimental para o ensino da Termodinâmica a fim de entender as máquinas térmicas”, pensado a partir da elaboração de um seminário da disciplina Oficina de Física II. Visa apresentar a reestruturação elaborada do artigo a partir de uma proposta experimental abrangente, desenvolvido no laboratório de física do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Sertão de Pernambuco (IFSertãoPE) Campus Salgueiro.

Entretanto, o tópico 2 deste trabalho traz uma apresentação da abordagem histórica da termodinâmica e suas leis e a compreensão das máquinas térmicas como recurso para execução da experimentação. A metodologia é descrita no tópico 3, que traz a proposta experimental, onde são

apresentados os materiais e montagem para construção da experimentação. Nesse tópico, são apresentados os resultados e discussões, trazendo a aplicabilidade qualitativa dessa proposta experimental. Por fim, no tópico 4 são apresentadas as considerações finais do presente trabalho e explica tanto a importância da proposta dessa atividade experimental como também o aderir como um possível recurso didático para a sala de aula, a fim de explicar alguns fundamentos da área da termodinâmica, e principalmente, assuntos relacionados às máquinas térmicas, visando uma maneira eficiente de ajudar no desenvolvimento do processo de ensino de física.

Portanto, a finalidade do presente trabalho é propor, elaborar e executar um procedimento experimental para a montagem de um dispositivo de baixo custo que simula os princípios térmicos e conceituais da máquina de Heron, podendo ser usado como recurso didático em sala de aula no conteúdo de termodinâmica, a fim de discutir as correlações de calor, energia e trabalho, estudar conceitos de temperatura, de entropia, das máquinas térmicas e processos cíclicos e, principalmente, testar a teoria da primeira e segunda lei da termodinâmica.

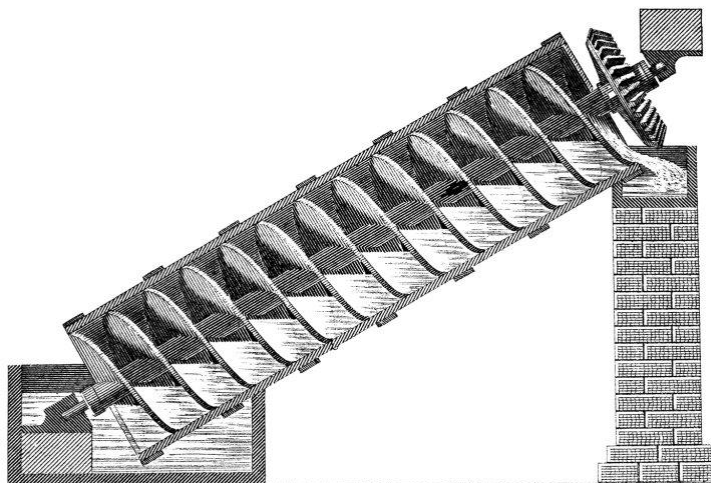
## 2. A TERMODINÂMICA E AS MÁQUINAS TÉRMICAS

### 2.1 Breve histórico das máquinas térmicas

A palavra máquina é um termo derivado do latim *machina*, de origem grega *mekhane*, que significa aparelho, engenho ou meio. Segundo a editora mundial de dicionários, *Oxford Languages*, a definição de máquina é dada por qualquer equipamento que empregue força mecânica, composto de peças interligadas com funções específicas, e em que o trabalho humano é substituído pela ação do mecanismo. A ideia de uma máquina simples enquanto conceito surgiu com o filósofo grego-italiano Arquimedes por volta do século III a.C (NUNES, 2023). Arquimedes era um engenheiro que atuava na segurança da cidade com suas máquinas de destruir embarcações, construídas com base em seus conhecimentos (MOHNSAM, 2014). Com isso, que inventou vários tipos de máquinas para satisfazer e defender a cidade de Siracusa, uma dessas máquinas foi à famosa bomba de parafuso ou Parafuso de Arquimedes, uma espécie de bomba que transportava qualquer tipo de fluidos imersos ou fragmentos sólidos de um local mais baixo até um ponto mais alto.

A Fig.1 mostra o Parafuso de Arquimedes. A máquina consistia em um parafuso giratório colocado dentro de um tubo cilíndrico oco. A extremidade mais baixa era colocada no líquido ou em uma partícula sólida. À medida que o parafuso era girado manualmente, arrastava um determinado volume do líquido ou fragmento para cima, ao longo do tubo oco, até sair pela extremidade mais elevada dele.

Figura 1 – Ilustração do Parafuso de Arquimedes, III a.C.



Fonte: Site inovação tecnológica (2021).<sup>1</sup>

O chamado parafuso de Arquimedes é um mecanismo bastante antigo, que vem sendo utilizado desde as mais remotas civilizações como dispositivo para transportar diversos tipos de materiais de um nível para outro (PIOVEZAN, 2005). Na antiguidade, esta máquina de Arquimedes foi utilizada em sistemas de irrigação, drenagem de minas, remoção de terra durante escavações e transporte de grãos. Embora sua invenção tenha sido sempre atribuída ao filósofo e matemático grego Arquimedes, é bem possível que este dispositivo já fosse utilizado pelos egípcios no transporte de água das minas, dos poços e do rio Nilo para cotas mais elevadas, antes desta época (PIRES, 2005). Atualmente este mecanismo é utilizado no tratamento de esgoto nas áreas urbanas, transporte de ração animal nas indústrias agrícolas e como pequenos geradores das usinas hidrelétricas.

O surgimento das máquinas foi o pioneirismo da Revolução Industrial. Grande marco da substituição do trabalho braçal por máquinas que executavam a mesma tarefa com maior eficiência e qualidade, a Revolução acelerou o processo de transformação e desenvolvimento de tecnologias que teve grandes avanços na tecnologia, economia e sociedade (GOEKING, 2010). A Revolução Industrial foi dividida em três fases, pois cada uma foi responsável por mudança no modo produção e por acontecimentos importantes durante determinado período, que vieram a desenvolver e transformar a sociedade. A primeira fase foi caracterizada pela máquina a vapor, que teve início na

---

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/imagens/010165210201-parafuso-arquimedes-atomos.jpg>. Acesso em mar. 2023.

Inglaterra durante a segunda metade do século XVIII, se espalhando por grande parte da Europa ocidental e América do Norte e terminando em meados do século XIX. Uma das inovações técnicas e produtivas mais importantes durante esta fase foi à utilização do motor a vapor e o desenvolvimento da máquina a vapor e da locomotiva. Essas inovações capazes de converter energia interna de um combustível em trabalho mecânico.

A primeira máquina a vapor, que se tem notícia até hoje, foi feita pelo sábio, matemático e mecânico grego Heron de Alexandria (10 d.C. - 80 d.C.), que fez contribuições significativas para o campo das ciências exatas e, acima de tudo, na geometria (NORONHA, 2020). Heron de Alexandria criou várias invenções. Mas por volta do século I d.C, criou o primeiro dispositivo/máquina a vapor conhecida e documentada, que mais tarde foi considerada a mais importante invenção já feita por ele: a *Eolípila*, ou Máquina de Heron ou Máquina Térmica de Heron. A Fig.2 mostra a máquina de Heron. A máquina consistia numa esfera metálica, pequena e oca com água montada sobre um suporte de cano ligado a uma bacia com água. Na esfera eram fixados dois canos que possuíam duas saídas em forma de “L”. Quando a água era aquecida pelo fogo, produzia um vapor que escapava por essas saídas. A saída do vapor fazia com que a esfera adquirisse um movimento giratório.

Figura 2 – Ilustração da Eolípila de Heron ou Máquina Térmica de Heron, I d.C.



Fonte: Aeolipile illustration.png<sup>2</sup>

Este dispositivo criado por Heron era uma máquina térmica: transforma calor em trabalho mecânico. Contudo, a invenção de Heron não foi utilizada para produzir grandes quantidades de energia mecânica. Apenas no século XVIII que foram construídas as primeiras máquinas capazes de realizar trabalhos industriais e automotivos. A primeira fase da Revolução Industrial foi marcada pelo uso do motor a vapor. O período entre 1760 e 1860 foi conhecido como a era do carvão e do ferro, caracterizado pela utilização de máquinas de vapor constituída por ferro e madeira, movidos principalmente a carvão e pela formação de médias e pequenas empresas, onde o desenvolvimento econômico ficou marcado pela formação do capitalismo industrial (SILVA, 2016). Com a ausência de madeira, e, sobretudo o alto custo, prejudicou-se a produção de armas de ferro, e com isso a Inglaterra não conseguia produzir armas suficientes para atender as próprias demandas. Para solucionar o problema que surgiu, a alternativa foi busca novas fontes de energia: o carvão mineral (DE SOUZA, 2021). Este era um combustível fóssil de fácil acesso e em grandes quantidades.

A utilização do carvão cresceu significativamente, foi utilizado em vários processos de fabricação, tais como, a produção de tijolos, telhas, vidro e sabão como também para o uso residencial como o aquecimento doméstico, e, sobretudo, a fundição de ferro. Mas com a exploração do consumo de carvão aumentou drasticamente, fez com que as escavações das minas de carvão aumentassem e estas apresentassem problemas de inundação. Portanto, houve a necessidade do emprego de equipamentos capazes de retirar a água das minas com segurança, desse modo, o uso do vapor para este fim começou a ser aplicado nas máquinas térmicas (REZENDE, 2021).

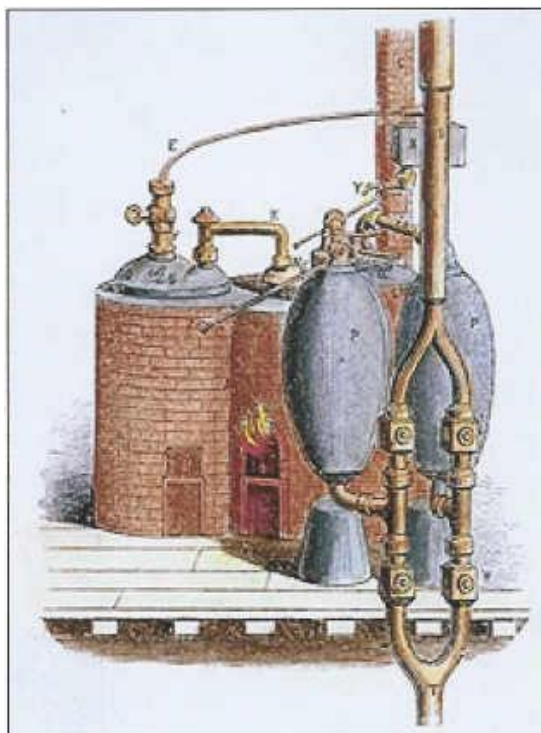
Em 1698, um engenheiro inglês chamado Thomas Savery (1650-1715), criou o primeiro dispositivo prático movido a vapor (Fig.3). De acordo com Kasprík (2021) esta máquina era denominada por Savery de “o amigo dos mineiros” ou “Uma máquina para elevar água pelo fogo” (1698). Consistia em um cilindro composto por vácuo no seu interior, que retirava água dos poços

---

<sup>2</sup> Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aeolipile\\_illustration.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aeolipile_illustration.png). Acesso em mar. 2023.

das minas de carvão. Seu funcionamento se dava por meio de um cilindro que era preenchido de vapor em alta pressão e resfriado rapidamente.

Figura 3 – Ilustração do motor a vapor criado por Thomas Savery, 1698.



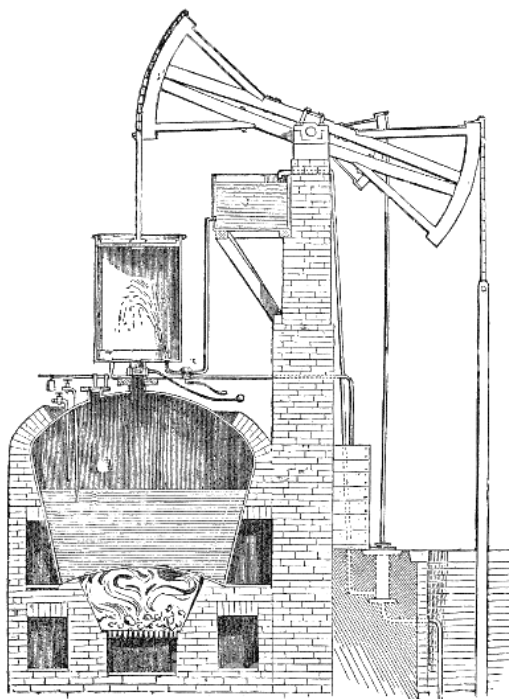
Fonte: Site da Wikipédia<sup>3</sup>.

Quando aquecido, produz um vácuo no interior do cilindro, pela condensação do vapor, fazendo então com que a água percorra uns tubos mergulhados no fundo do poço da mina e, conseqüentemente, preenchesse o espaço vazio do cilindro. Quando estava completamente cheio, retirava a água para fora da mina. Porém, a máquina de Savery tinha seus pontos negativos, pois quando se envolvia vapor em altas pressões (acima de oito atmosferas), causava explosões dela. As máquinas de Savery podiam explodir, colocando a vida dos mineiros em risco, pois havia dificuldade em lidar com o vapor de alta pressão e alta temperatura (NASCIMENTO, 2023). Com isso, por volta de 1712, esse dispositivo de Savery foi aperfeiçoado por um engenheiro de minas nomeado (1664-1729), que fez uma locomotiva de um só cilindro com êmbolo e caldeira na qual carregava barras de ferro das minas de carvão, sendo denominada de “motor de Newcomen”. Na Figura 4, apresenta uma ilustração desse motor. O motor foi o primeiro tipo a vapor a ser amplamente usado (BRAIN, 2008).

<sup>3</sup> Disponível: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Savery](https://pt.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery). Acesso em mar. 2023



Figura 4 – Ilustração do motor a vapor criado por Thomas Newcomen, 1712.



Fonte: Site Istock<sup>4</sup>.

A da máquina de Newcomen teve também suas limitações, ou seja, a do resfriamento do cilindro e do custo de carvão como combustível. Mas em comparação com a máquina de Savery, a de Newcomen apresentou duas vantagens que a colocava à frente nos aspectos de economia e desempenho para o contexto da época (NASCIMENTO, 2023). O aperfeiçoamento dessa máquina por Newcomen, fez com que ela não tivesse perda de calor em contato com a água, pois a máquina disponibiliza de um pistão que garantia o aumento de força, assim tornando sua máquina mais segura para os mineiros.

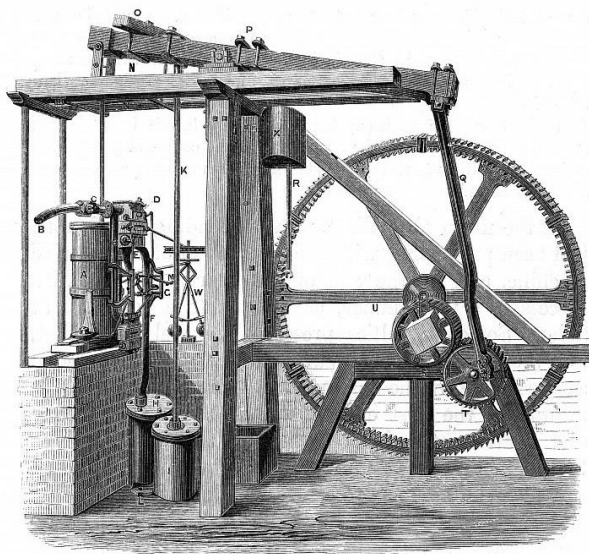
O aperfeiçoamento da máquina de Newcomen se deu no ano de 1765, pelo engenheiro e matemático britânico chamado James Watt (1736-1819). Ele procurava um modo de aumentar a eficiência da máquina e que tivesse menos gasto com o carvão. Tendo como parâmetro a máquina de Newcomen, ele percebeu que ao aquecer diversas vezes o cilindro e resfriar, uma parte do vapor condensado era gerada apenas pelas paredes mais frias do cilindro (DA SILVA, 2023). Foi, então, que ele inventou um dispositivo com um condensador

---

<sup>4</sup> Disponível em: <https://www.istockphoto.com/br/vetor/newcomen-motor-a-vapor-gm186809078-13575111>. Acesso em mar. 2023

(Fig.5) o qual resfria o cilindro com vapor d'água e diminui as perdas de calor, e assim adaptando-se à máquina de Newcomen.

Figura 5 – Ilustração do motor a vapor criado por James Watt, 1765.



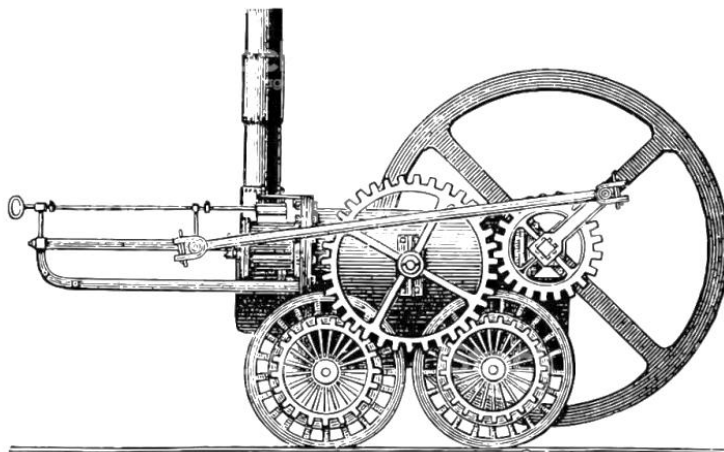
Fonte: Site Gettyimages<sup>5</sup>

Em 1804, as máquinas a vapor foram utilizadas para a locomoção. Uma locomotiva a vapor, chamada Lokomotion (Fig.6) era construída pelo engenheiro inglês Richard Trevithick (1771-1833). Essa locomotiva foi capaz de transportar pessoas e matérias-primas. Ele se dedicou a melhorar a estrutura e a eficiência das máquinas a vapor, tornando-as mais leves e mais potentes, gerando mais alta pressão e conseqüentemente mais energia. Assim, Richard Trevithick criou a primeira locomotiva a vapor usando trilhos. Conseguiu transportar 9 toneladas de carvão por uma extensão de 15 quilômetros de trilhos com sua invenção (VAGMAKER, 2023). A partir do sucesso do transporte de cargas se iniciarem na Inglaterra, as ferrovias para transporte de passageiros se tornaram uma realidade com o surgimento das primeiras ferrovias intermunicipais na Inglaterra em 1830 (NETO, 2011).

Figura 6 – Ilustração da locomotiva de Richard Trevithick, 1802.

---

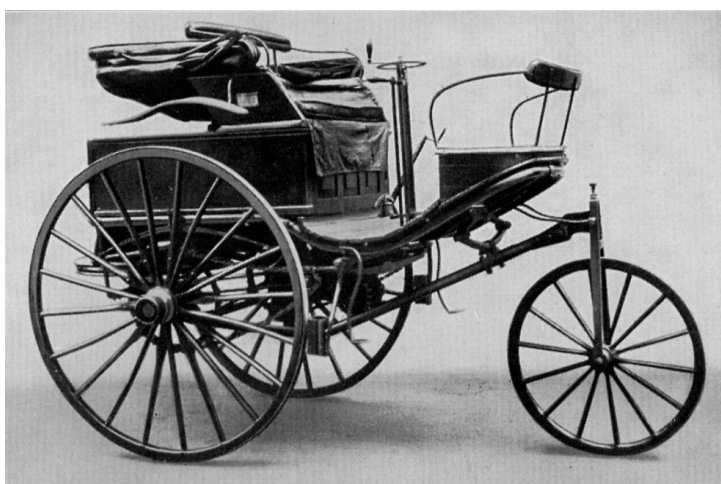
<sup>5</sup> Disponível em: <https://www.gettyimages.com.br/fotos/james-watt>. Acesso em mar. 2023



Fonte: Site Istock<sup>6</sup>

Depois da locomotiva a vapor, vieram os carros. O primeiro automóvel movido à gasolina conhecido atualmente foi produzido em 1886, pelo engenheiro de automóveis alemão Karl Benz (1844-1929). O automóvel, como pode ser visto na figura 7, possuía apenas três rodas grandes, uma tábua de madeira que servia para sustentar o peso de uma pessoa, um motor a gasolina, um banco e uma espécie de manivela, que seria um tipo de volante. Com sistema de arranque a manivela, este primeiro automóvel tinha potência de 0,8 cv, podendo atingir 18 km/h (ALCOFORADO, 2022). Depois disso, o automóvel de Benz ficou conhecido como o marco histórico da invenção do carro moderno.

Figura 7 – Ilustração do automóvel registrado por Benz, 1886.



Fonte: Site Autopapo<sup>7</sup>

<sup>6</sup> Disponível em: <https://www.istockphoto.com/pt/vetorial/locomotiva-gm471216357-11395379>. Acesso em mar. 2023

Ao longo do tempo, as locomotivas a vapor que utilizavam o carvão mineral como combustão interna para os motores, foram sendo aprimoradas e com isso começaram a utilizar o diesel em seus motores. O desenvolvimento de novas tecnologias e a substituição de locomotivas movidas a vapor pelas locomotivas a diesel, foram as principais causas do crescimento da malha ferroviária (BROCKVELD, 2022). Em vista disso, as locomotivas cresceram consideravelmente, e assim então, passaram a ser chamadas de trens.

Em 1912, surgiram as primeiras locomotivas diesel da história. Essas locomotivas movidas por motores diesel foram desenvolvidas a partir do ano de 1893, pelo engenheiro mecânico franco-alemão Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913). A atividade do mecanismo é originada pela compressão do ar e do combustível (LEMOS, 2012). Até hoje, Rudolf é considerado o inventor do motor diesel, onde desenvolveu um motor a combustão interna movida por diesel para movimentação das locomotivas.

Porém, essas locomotivas tiveram suas desvantagens. Além de serem muito barulhentas, consumiam muito óleo, e por isso, elas se moviam a curtas distâncias. Sendo assim, as locomotivas a vapor outra vez voltaram a ter seu espaço nas ferrovias. É a partir de 1830 que podemos pensar no nascimento da arquitetura ferroviária nas cidades industriais, a primeira estação ferroviária foi a estação de Manchester (DE SOUZA, 2016). Contudo, no seu ápice, elas passaram a ser substituídas por locomotivas elétricas, a fim de diminuir a poluição do ar com a queima de carvão.

O primeiro trem elétrico teve início em Berlim no ano de 1879. O trem era movido por motor elétrico alimentado por fios elétricos distribuídos pelas redes da ferrovia. Diante disso, passaram a eletrificar totalmente as redes ferroviárias. O surgimento dos trens foi considerado uma das maiores invenções já feitas na era industrial, e suas aperfeiçoões tornou-se a locomotiva a vapor ideal para transporte de muitas mercadorias e passageiros por longas distâncias ferroviárias.

As máquinas térmicas foram fundamentais para o desenvolvimento tecnológico da humanidade, a começar pela Revolução Industrial, os meios de

---

<sup>7</sup> Disponível em: <https://autopapo.uol.com.br/noticia/patent-motorwagen-karl-benz/>. Acesso em mar. 2023

transporte e a produção de energia (TEIXEIRA, 2023). Com o desenvolvimento das locomotivas a vapor permitiu-se que a produção industrial ultrapassasse longas fronteiras, fazendo com que as áreas comerciais crescessem rapidamente. Por outro lado, houve também vários problemas históricos marcados neste período de revolução, mas um fator marcante em destaque foi o aumento do índice de desemprego; com a maquinofatura, as indústrias necessitavam de um número pequeno de trabalhadores, substituindo, portanto, a mão de obra pelas máquinas movidas a carvão mineral e petróleo.

Segundo Sena (1999, pg. 32):

Uma segunda revolução industrial já se encontra presente, uma vez que a automação com a progressiva substituição do elemento humano pelas máquinas sofisticadas elimina o operário em várias etapas da manufatura e até controlam a qualidade na produção, contribuindo para o crescimento domal do século, o desemprego.

Nesse contexto, a Revolução Industrial marcou o desenvolvimento tecnológico, transformando o estilo de vida da humanidade, não só aperfeiçoando o setor econômico, tecnológico e industrial, como também modificando as relações sociais, provocando alterações no modo de vida das pessoas, nas relações de trabalho, nos padrões de consumo e nos impactos ao meio ambiente. Desde então, as máquinas térmicas evoluíram significativamente, incluindo motores a combustão interna, turbinas a gás, usinas termelétricas e motores de ciclo combinado. Nos dias atuais, elas são amplamente utilizadas em todo o mundo, para gerar eletricidade, movimentar veículos e máquinas industriais, e em muitas aplicações cotidianas, tais como as geladeiras, os refrigeradores e aparelhos de ar-condicionado, dentre outros.

## **2.2 História da Termodinâmica**

O estudo do calor e de suas transformações em energia mecânica é chamado de termodinâmica (que provém de palavras gregas *therme* e *dynamis* que significa “movimento do calor” e “potência”, respectivamente) (HEWITT, 2002). Em outras palavras, a Termodinâmica é uma área da física que analisa os efeitos físicos de calor, energia e temperatura, que podem ocasionar as

trocas, transformações e variações entre eles.

Historicamente, o conteúdo da Termodinâmica se deu com o estudo da compreensão das máquinas térmicas e entender sobre seu funcionamento para consertá-las. Embora a origem da termodinâmica existisse desde os primórdios do universo, a ciência da Termodinâmica teve início no século XIX com o surgimento das máquinas térmicas, durante a Revolução Industrial, com o objetivo de desenvolver máquinas a vapor mais eficientes e potentes. Na época da revolução, as máquinas eram menos valorizadas no campo das indústrias. No entanto, o interesse pelo seu funcionamento permaneceu por muito tempo restrito aos seus aspectos técnicos, estudado por engenheiros para fins de aperfeiçoamento das máquinas e melhor desempenho (TRIVIZOL, 2021).

A história da Termodinâmica surgiu no século XVII, quando um físico alemão chamado Otto Von Guericke (1602-1686), inventou e produziu a primeira bomba a vácuo do mundo. Os primeiros testes com bombas de vácuo foram em 1640, na Alemanha por Otto von Guericke, que para seu primeiro teste utilizou uma bomba da água adaptada para retirar água de um barril (ZANDAVALL, 2019). Este sem dúvida foi um dos experimentos mais importantes dentro da história da tecnologia do vácuo (PAIVA, 2010). Esse experimento foi lido pelo físico e químico irlandês Robert Boyle (1627-1691) juntamente com o cientista experimental inglês Robert Hooke (1635-1703) que projetaram uma nova bomba de ar ou bomba de vácuo (DE LEMOS, 2013). Através dessa bomba, Boyle e Hooke perceberam a relação entre pressão, volume e temperatura (BRITO, 2017). Com isso, foi elaborada a Lei de Boyle, cuja lei definia que em um sistema fechado, a pressão e volume dos gases eram grandezas inversamente proporcionais quando a temperatura dos gases fosse constante.

Baseando-se nesta lei, em 1679, um físico e inventor francês nomeado Denis Papin (1647-1712) criou um forno de pressão, conhecida como marmitta de Papin, que era uma espécie de panela com tampa, a qual quando fechada, gerava um vapor de alta pressão no interior da panela. Papin trabalhou como assistente de Robert Boyle, e foi durante esse tempo que começou a investigar a relação entre o calor e o movimento. Em 1690, ele construiu um dispositivo que usava vapor para acionar um pistão, que então movia um objeto.

Apresentou sua famosa Panela de Pressão, que foi o princípio para o entendimento da existência de uma força elástica no vapor, e que ele poderia produzir movimento (DE SOUZA, 2021). Embora esse dispositivo fosse primitivo e pouco eficiente, ele marcou o começo da era das máquinas térmicas. Apesar de ele ter construído uma máquina térmica, ela não teve uso prático. Contudo seus estudos em torno das máquinas influenciaram futuros inventores (FORBES, 1958). Em 1698, Thomas Savery, baseado nos estudos de Papin, idealizou um motor a vapor cujo objetivo era retirar a água do fundo das minas de carvão, para controlar os alagamentos (DE LEMOS, 2013). Savery foi o primeiro a construir uma máquina a vapor de utilidade prática.

A criação de grandes máquinas de vapor chamou a atenção de muitos cientistas importantes da época. Um destes cientistas renomados se deu do físico e engenheiro mecânico francês Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), popular Sadi Carnot, que hoje é considerado o pai da termodinâmica moderna. Carnot foi responsável por criar máquinas térmicas mais eficientes em questão de qualidade, funcionalidade e segurança. Em 1824 publicou sua famosa tese *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas apropriadas ao desenvolvimento dessa potência), que estabeleceu as características ideais para a eficiência de uma máquina térmica, conhecido como Ciclo de Carnot. Seu trabalho científico trouxe grandes avanços para o desenvolvimento da termodinâmica a qual hoje conhecemos. As contribuições de Carnot foram primordiais para o avanço da teoria do calor, ao englobar aspectos de conceitos de reservatórios de calor, do tipo térmico, reversibilidade e a existência de um diferencial de temperatura, que exerceria trabalho no processo de interação com o calor (DA SILVA, 2019). E com isto marcou o início da Termodinâmica como ciência moderna.

### **2.3 Leis da Termodinâmica**

A ciência da Termodinâmica é caracterizada pelas grandezas fundamentais da termodinâmica, que estuda as variações de temperatura, pressão e volume para compreender as ações físicas dos gases na natureza: a variação isotérmica, a variação isovolumétrica ou isocórica, a variação

isobárica e a variação adiabática

A termodinâmica trabalha também com um conjunto de leis científicas que estudam como o calor e o trabalho atuam num determinado sistema, as chamadas leis da termodinâmica. Essas leis caracterizam sistemas termodinâmicos por meio de variáveis termodinâmicas como energia, calor, trabalho, pressão, volume, temperatura e entropia. São formuladas em quatro leis fundamentais: A Lei Zero basicamente estuda o conceito da grandeza física da temperatura. O princípio da conservação da energia ou a Primeira Lei da termodinâmica, como o princípio já diz, esta lei estuda o conceito da grandeza física energia. A segunda Lei da Termodinâmica estuda o conceito de entropia. E por fim, a Terceira Lei da Termodinâmica, garante que a variação da Entropia seja nula no Zero Absoluto ( $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou  $0\text{ K}$ ).

De acordo com essas leis, as máquinas térmicas precisam receber certa fonte de energia térmica para ser transformada num trabalho mecânico, pois mesmo que toda a energia fornecida à máquina fosse mantida no sistema, uma parte dessa energia seria utilizada para a realização de trabalho, visto que nenhuma máquina térmica é capaz de transformar todo calor fornecido em trabalho, isto significa dizer que uma máquina térmica não tem cem por cento de eficiência.

Toda máquina térmica apresenta os seguintes princípios físicos:

- Recebe calor de uma fonte quente;
- Converte uma parte desse calor em trabalho mecânico;
- Rejeita outra parte para uma fonte fria.

Neste trabalho trataremos somente de duas leis: Primeira e segunda lei da termodinâmica, visto que são estas as mais fundamentais no que se refere ao entendimento das máquinas e nos processos de conversão de energia.

### **2.3.1 Primeira lei da termodinâmica**

A primeira lei da termodinâmica ou o princípio da conservação de energia é uma das leis mais básicas da Física Clássica (SANTOS FILHO,



2021). Como o princípio já diz, esta lei está relacionada com o conceito de energia. Ela estabelece que em um processo termodinâmico, a energia interna de um sistema  $\Delta U$  não pode ser criada nem destruída, apenas transformada de uma forma para outra. Isso significa que essa quantidade de energia em um sistema isolado se mantém constante.

Para verificar como o calor gera trabalho, formulou-se a primeira lei: A variação da energia interna ( $U$ ) de um sistema termodinâmico equivale à diferença entre a quantidade de calor ( $Q$ ) trocada pelo meio externo e a quantidade de trabalho ( $W$ ) realizado durante o processo.

De maneira quantitativa, a primeira lei da termodinâmica é escrita como:

$$\Delta U = Q - W \quad (1)$$

Este é considerado o Princípio da Conservação da energia. Um exemplo volte a imaginar a máquina a vapor, o Princípio da conservação de energia nos diz que a variação da energia total é igual à quantidade de calor restante menos o trabalho mecânico realizado (DA SILVA, 2021). Todas estas grandezas físicas podem ser medidas em Joule ( $J$ ).

Perceba que a quantidade de calor que entra em um sistema é a responsável pela mudança de estado de um gás, e, portanto, pela alteração da pressão, do volume e/ou da temperatura, sempre ocorrendo conservação de energia (LIMA, 2016). Diante disso, a equação (1) descreve a aplicação de quatro transformações termodinâmicas de um gás ideal:

- **Transformação Isotérmica** – A temperatura é constante, conseqüentemente, a variação de energia interna do sistema é igual a zero ( $\Delta U = 0$ ). Logo a quantidade de calor do sistema é igual ao trabalho realizado pelo sistema ( $Q = W$ ).
- **Transformação Isovolumétrica** – O volume é constante, conseqüentemente, o trabalho realizado pelo sistema é igual a zero ( $W = 0$ ). Logo a variação da energia interna do sistema é igual ao calor do sistema ( $\Delta U = Q$ ).
- **Transformação Isobárica** – A pressão é constante. Numa expansão isobárica, o volume e a temperatura aumentam, conseqüentemente, a energia interna do sistema aumenta ( $\Delta U > 0$ ). Já numa contração

isobárica, o volume e a temperatura diminuem, conseqüentemente, a energia interna do sistema diminui ( $\Delta U < 0$ ).

- **Transformação Adiabática** – Não há troca de calor com o meio externo, isto significa dizer que o calor do sistema é igual à zero ( $Q = 0$ ). Logo a variação da energia interna do sistema é igual ao trabalho realizado pelo sistema ( $\Delta U = -W$ ). O sinal negativo significa dizer que se a energia do gás se expandir, o trabalho será positivo, caso a energia do gás se comprima, o trabalho será negativo.

Como já foi mencionado, em uma transformação isobárica, a pressão do sistema permanece constante, com isso, nessa transformação, o trabalho ( $W$ ) realizado em um sistema fechado é calculado pela expressão:

$$W = \int_{V_i}^{V_f} P \, dv = P(V_f - V_i) = P\Delta V \quad (2)$$

Assim, a primeira lei da termodinâmica pode ser dada também por:

$$\Delta U = Q - P\Delta V \quad (3)$$

Se a variação do volume ( $\Delta V$ ) comprime, o gás realiza trabalho negativo ( $W < 0$ ). Se a variação do volume ( $\Delta V$ ) aumenta, o gás realiza trabalho positivo ( $W > 0$ ).

A variação de energia interna ( $\Delta U$ ) depende diretamente da temperatura do sistema, sendo proporcional a mesma. Caso não ocorra uma mudança de temperatura no sistema, sua energia interna também permanecerá inalterada ( $\Delta U = 0$ ). Além disso, é importante dizer que, para as máquinas térmicas que operam em ciclos, a variação da energia interna, ao final de cada ciclo, deve ser nula, pois nesse ponto, a máquina volta a girar com a temperatura inicial (NUSSENZVEIG, 2002, pág. 167).

### 2.3.2 Segunda lei da termodinâmica

Dentre as duas leis da termodinâmica, a segunda é a que tem maior aplicação na construção de máquinas e utilização na indústria, pois trata diretamente do rendimento das máquinas térmicas e nos modos de conservação e utilização da energia (GOERSCH, 2022). Essa lei é caracterizada pela transferência de energia térmica, onde afirma que o calor é transferido de forma espontânea da fonte quente para a fonte fria, caso contrário, o processo de transferência é irreversível.

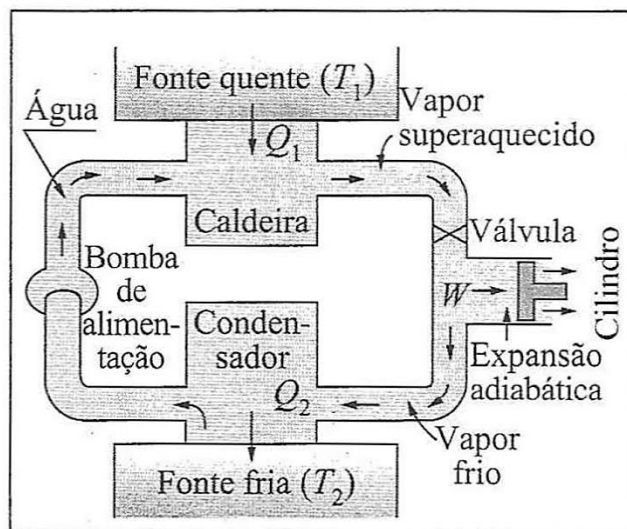
A segunda lei foi enunciada pelo físico e engenheiro mecânico francês Sadi Carnot (1796-1832). Incentivado pela Revolução Industrial, ele estudava a transferência de calor em trabalho nas máquinas térmicas e a possibilidade de aumentar a eficiência delas. Analisando as máquinas térmicas, ele descobriu que elas operavam em um processo cíclico, e que sua eficiência se dava quando havia transferência de calor de temperatura mais quente para a temperatura mais fria. A cada ciclo que a máquina térmica realiza, é retirada uma quantidade de calor da fonte quente, conseqüentemente, uma parte desse calor era transformada em trabalho e o demais era rejeitada para a fonte fria.

As ideias defendidas por Carnot são similares à segunda lei da Termodinâmica, pois a definição inicial desta lei surgiu para demonstrar a lei de conversão de calor em trabalho e de trabalho em calor e é apresentada por dois enunciados: o primeiro afirma que é impossível converter todo calor em trabalho, ou seja, nenhuma máquina térmica é capaz de converter todo o calor recebido durante o processo cíclico em qualquer outro tipo de trabalho ( $Q > W$ ). Já o segundo mostra essa possibilidade, pois se pode converter, por exemplo, uma determinada quantidade de trabalho completamente em calor através do atrito ( $Q = W$ ).

Com base nessas ideias de Carnot, outros físicos contribuíram para a formulação da segunda lei, tais como, Rudolf Clausius (1822-1888), Lord Kelvin (1824-1907) e Max Planck (1858-1947). Segundo Clausius, é perfeitamente possível que na produção de calor... uma certa quantidade de calor possa ser consumida, e uma porção adicional transmitida de um corpo quente para um corpo frio: e que entre ambas as quantidades possa haver uma certa relação bem definida quanto à quantidade de trabalho produzido (HARMAN, 1990, p. 53). Já o enunciado de Kelvin-Planck afirma que não é possível uma máquina térmica ou qualquer dispositivo térmico ter um rendimento de 100%, ou seja,

por melhor que seja uma máquina térmica, nenhuma é capaz de converter em trabalho todo o calor recebido durante o processo cíclico. Diante disso, uma máquina térmica precisa utilizar dois reservatórios térmicos a temperaturas diferentes para produzir trabalho (Fig. 8).

Figura 8 – Diagrama esquemático de uma máquina térmica.



Fonte: NUSSENZVEIG, 2002.

$T_1$  é a temperatura da fonte quente (região que fornece o calor da fonte quente à máquina) e  $T_2$  é a temperatura da fonte fria (região para onde o calor da fonte fria é rejeitado). Observa-se que para toda máquina térmica, a temperatura  $T_1$  da fonte quente é maior do que a temperatura  $T_2$  da fonte fria ( $T_1 > T_2$ ). Seja  $Q_1$  o calor recebido pela fonte quente,  $Q_2$  o calor fornecido pelo sistema a fonte fria e  $W$  é o trabalho realizado pela máquina térmica.

Pelo esquema, a máquina opera em ciclos entre dois reservatórios térmicos: um reservatório quente a temperatura  $T_1$ , e um reservatório frio a temperatura  $T_2$ . Certa quantidade de calor da fonte quente ( $Q_1$ ) é absorvida pela máquina. Em cada ciclo, a máquina retira uma quantidade desse calor da fonte quente, que é parcialmente convertida em uma quantidade de trabalho ( $W$ ), e rejeita para o reservatório da fonte fria a quantidade de calor ( $Q_2$ ) que não foi convertida. Nessa conversão de trabalho, haverá uma expansão adiabática, onde a máquina para de receber calor da fonte quente, e com isso sua energia total é conservada, conseqüentemente, a pressão, temperatura e volume da máquina vão ser alteradas.

Podemos nos utilizar da primeira lei da termodinâmica ( $\Delta U = Q - W$ ) para relacionar as grandezas térmicas geradas por uma máquina térmica da seguinte maneira:

$$W = |Q_1| - |Q_2| \quad (4)$$

Isto significa que o trabalho ( $W$ ) realizado por uma máquina térmica é equivalente à diferença entre a quantidade de calor recebida ( $Q_1$ ) e a quantidade de calor rejeitada ( $Q_2$ ), ou seja, ao calor total transferido para a máquina durante o ciclo. Como os estados inicial e final da máquina para um ciclo completo são iguais, as energias internas iniciais e finais da máquina são iguais, portanto,  $\Delta U = 0$ . (TIPLER, 2014)

Pela equação (4) pode-se ver que foi utilizado o módulo ou valor absoluto nas quantidades de calor, isso significa dizer que a máquina térmica tem como objetivo o resfriamento, conseqüentemente, estes valores serão negativos. Neste caso, o fluxo de calor acontece da temperatura maior para a menor. Vale ressaltar que isso acontece sempre nesta ordem, afinal se sabe que a transferência de energia térmica é um processo irreversível.

### 2.3.2.1 Entropia

A Segunda lei da termodinâmica também é caracterizada pelo conceito de entropia. Segundo Nussenzveig (2002) da mesma forma que a 1ª lei da termodinâmica corresponde à existência da energia interna ( $U$ ) como função do estado, a 2ª lei corresponde à existência da entropia. Para se entender o conceito de entropia, precisam-se saber os conceitos de processos reversíveis e irreversíveis: processos reversíveis são aqueles que o sistema de forma espontânea, pode retornar à condução (ou estado) original (inicial). Já os processos irreversíveis são aqueles em que o sistema não pode de forma espontânea retornar ao estado inicial.

Simbolizada pela letra  $S$ , a entropia é uma medida do seu grau de desorganização, e está relacionada com a desordem de um sistema isolado/fechado, a entropia, quanto maior a organização, menor a entropia. O sentido dos processos é determinado pela variação da entropia, ( $\Delta S$ ). Se um

processo irreversível ocorrer em sistema fechado, a entropia desse sistema aumenta. Caso contrário, o processo seria reversível, assim a entropia iria diminuir cuja ação jamais seria possível.

Para um sistema fechado que sofre uma transformação isotérmica (temperatura permanece constante), a variação da entropia pode ser calculada entre a razão de certa quantidade de calor ( $\Delta Q$ ) - cedido ou recebido - pela temperatura absoluta ( $T$ ). De maneira quantitativa, ela é escrita como:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (5)$$

Para manter constante a temperatura absoluta ( $T$ ) do gás durante a expansão isotérmica de uma quantidade de calor ( $\Delta Q$ ) deve ser transferida da fonte de calor para o gás. Assim,  $Q$  é positivo e a entropia do gás aumenta durante o processo isotérmico e durante a expansão livre (LOPES NETO, 2023). Embora a entropia possa diminuir em uma parte de um sistema fechado, sempre existe um aumento igual ou maior em outra parte do sistema, de modo que a entropia do sistema como um todo jamais diminui (HALLYDAY, PG. 254, 2012). Matematicamente,

$$\Delta S \geq 0 \quad (6)$$

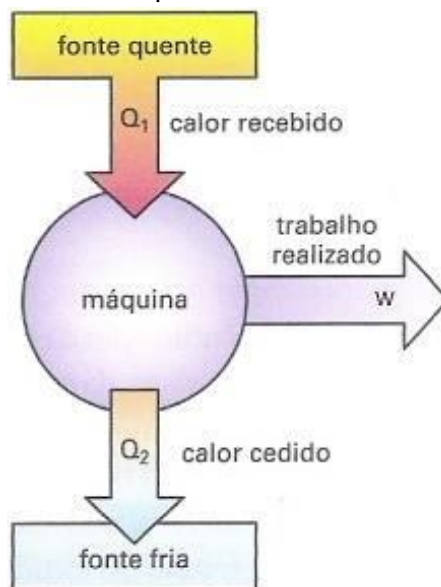
Pela equação (6) nota-se que a variação de entropia em um sistema fechado ( $\Delta S$ ) é sempre positiva ou nula. Positiva quando ocorrem os processos irreversíveis, nula quando ocorrem os processos reversíveis. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de medida de entropia é o Joule por Kelvin ( $J/K$ ).

## **2.4 Funcionamento das máquinas térmicas: Processos termodinâmicos cíclicos.**

As máquinas térmicas têm a capacidade de converter energia em forma de calor em trabalho mecânico ou *vice versa*. De acordo com a formulação da segunda lei da termodinâmica, as máquinas térmicas operam em ciclos termodinâmicos ou processos termodinâmicos cíclicos, de forma espontânea,

trabalhando entre dois reservatórios térmicos (Fig. 9): uma fonte quente ou fonte de calor que precisa ser recebido para o seu funcionamento, e uma fonte fria, onde uma parte do calor recebido é eliminada. Chama-se de trabalho uma parte de calor retirado da fonte quente.

Figura 9 – Diagrama de calor e trabalho envolvidos num processo cíclico de uma máquina térmica.



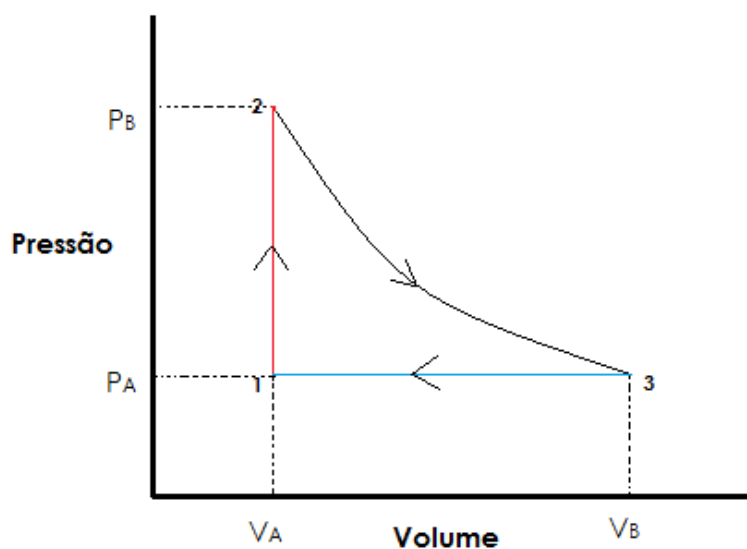
Fonte: Exposição Virtual AMLEF 2022.<sup>8</sup>

Em outras palavras, as transformações cíclicas têm a característica de, ao final de cada ciclo, retornar ao estado inicial (SOUZA, 2019). Desse modo, o fluido de trabalho realizado sempre volta para seu estado inicial ao encerrar um processo - da fonte fria para a fonte quente - ao completar o ciclo. Portanto, esclarece o enunciado anterior da segunda lei da termodinâmica dito que o trabalho ( $W$ ) realizado por uma máquina térmica é igual ao calor total ( $\Delta Q$ ) transferido para a máquina durante o ciclo. Segundo a lei, nenhuma máquina é capaz de transformar todo o calor em trabalho mecânico durante um processo cíclico, ou seja, nenhuma máquina terá um rendimento igual a 100%.

O ciclo termodinâmico é representado por um gráfico de  $P \times V$  (pressão em função do volume), como mostra a Fig. 10. A projeção desses ciclos tem a finalidade de investigar dispositivos térmicos com maiores eficiências, capazes de realizar trabalhos com pouca energia obtida.

<sup>8</sup> Disponível em <https://www.ufrgs.br/amlef/glossario/maquina-termica/>. Acesso em mar. 2023

Figura 10 – Diagrama P x V (Pressão x Volume).



Fonte: Diagrama P x V do ciclo.png.<sup>9</sup>

Através do gráfico P x V, é possível compreender e obter várias informações significativas para cada caso. Um caso seria a determinação do trabalho realizado no ciclo  $W$ , cuja maneira é calcular o interior da área representada no gráfico. Outra informação importante que se pode retirar do gráfico P x V, é o sentido das setas. Elas indicam se o ciclo em questão é uma máquina térmica ou uma máquina frigorífica (refrigerador). Quando as setas estiverem no sentido horário ( $W > 0$ ), significa dizer que o gráfico representa uma máquina térmica. Caso esteja em sentido anti-horário ( $W < 0$ ), representaria uma máquina frigorífica.

No caso do gráfico acima, temos uma máquina térmica, pois está no sentido horário. Também se podem identificar os tipos de processos cíclicos. Por exemplo, na Fig. 10, o caminho  $1 \rightarrow 2$  é um processo isocórico ou isovolumétrico, ao longo do qual o volume permanece constante. O caminho  $2 \rightarrow 3$  indica um processo isotérmico, ao longo da qual a temperatura é mantida constante. Já o caminho  $3 \rightarrow 1$  indica um processo isobárico, ao longo do qual a pressão permanece constante. E, para fechar o ciclo, o gás retorna ao ponto 1.

O sentido irreversível é quando no processo, uma máquina transfere

<sup>9</sup> Disponível em: [https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Diagrama\\_P\\_x\\_V\\_do\\_ciclo.png](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Diagrama_P_x_V_do_ciclo.png). Acesso em mar. 2023



calor da fonte fria para a fonte quente. Podem-se exemplificar esses tipos de processos irreversíveis, as máquinas frigoríficas (ou bombas de calor), como geladeiras e ares-condicionados, que retiram certa quantidade de calor da fonte fria e fornece calor para a fonte quente.

## 2.5 Rendimento das máquinas térmicas

Um dos principais objetivos da construção de uma máquina ou aparelho é saber sua maior eficiência possível, com isso, para entender essa eficiência, utiliza-se um índice chamado de rendimento, cujo símbolo é representado pela letra grega *eta* ( $\eta$ ). Rendimento é uma importante variável para o estudo de sistemas não conservativos, isto é, que apresentam perdas de energia, como nos casos não ideais do nosso dia a dia (HELERBROCK, 2023b). Nesse contexto, o sistema das máquinas não é capaz de aproveitar toda a potência cedida a eles. Assim, uma boa parte desta potência é eliminada em forma de energia, como o calor.

Uma das definições gerais de rendimento de uma máquina pode ser dada pela razão entre o trabalho total realizado por ela ( $W$ ) e a quantidade de calor recebida pela máquina ( $Q_1$ ). Matematicamente, este enunciado é dado por:

$$\eta = \frac{W}{|Q_1|} \quad (7)$$

Isto significa dizer que a máquina térmica é eficiente quando produz mais trabalho consumindo uma menor quantidade de energia.

Substituindo a equação (4) expressada pela segunda lei anteriormente na equação (7), temos que:

$$\eta = \frac{W}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \quad (8)$$

Em princípio, esse índice pode variar entre 0 e 1, ou seja, quando  $0 \leq \eta < 1$ . Se o rendimento for 0, a máquina não opera nenhum trabalho útil, e, se fosse possível o rendimento ser 1, a máquina converteria em trabalho 100%

do calor recebido, mas como visto, isto não é possível, já que sempre em um processo cíclico de uma máquina térmica haverá perdas de energia durante o processo de conversão. Com isso, é impossível de existir um dispositivo térmico com rendimento igual a 1, uma vez que tal violaria o enunciado da segunda lei da termodinâmica para máquinas térmicas:

*“É impossível para uma máquina térmica, operando em um ciclo, produzir como único efeito o de retirar calor de um único reservatório e realizar uma quantidade equivalente de trabalho.” (TIPLER, P; MOSCA, G, 2014, p. 638).*

Como nem toda energia fornecida a uma máquina pode ser utilizada para realizar trabalho, parte dessa energia é gerada ou dissipada por um tempo. Com isso, podemos redefinir o rendimento de uma máquina térmica pela razão entre a potência útil ( $P_U$ ) que a máquina utiliza na realização de um trabalho externo (potência fornecida) pela potência total ( $P_T$ ) recebida durante algum processo (potência consumida):

$$\eta = \frac{P_U}{P_T} \quad (9)$$

Como a potência útil ( $P_U$ ) sempre deve ser menor do que potência total ( $P_T$ ), ou seja, ( $P_U < P_T$ ), o rendimento ( $\eta$ ) é sempre menor que 1 ( $\eta < 1$ ). Além disso, o rendimento é expresso apenas por um número, não possui unidade de medida. E para expressá-lo em porcentagem, basta multiplicar seu valor por 100.

Como a máquina transfere energia durante o ciclo, podemos definir e calcular a potência útil ( $P_U$ ) desta máquina como a quantidade de energia transferida que passa por ela durante uma quantidade de tempo:

$$P_U = \frac{E}{\Delta t} \quad (10)$$

A unidade de medida da potência térmica, dado pelo Sistema Internacional, é o watt ( $W$ ). Já as unidades de energia e tempo são o joule e o segundo, respectivamente. Então watt equivale a joule por segundo:

$$1 W = 1 \frac{J}{s} \quad (11)$$

Já a unidade usual ou na prática, a potência térmica é caloria por segundo ( $\frac{cal}{s}$ ):

$$1 cal = 4,18 J \quad (12)$$

É importante destacar que o rendimento de uma máquina térmica está sendo melhorado com a utilização de tecnologias avançadas e eficientes, como a recuperação ou trocador de calor e sistemas de cogeração de energia. Além disso, a utilização de fontes de energias renováveis tais como a energia solar, a energia eólica, a energia hidráulica, a biomassa e o biogás, pode contribuir para a redução do consumo de combustíveis fósseis e do impacto ambiental das máquinas térmicas.

## 2.6 Utilização das máquinas térmicas

Desde o seu surgimento, as máquinas térmicas desempenharam um papel importante no desenvolvimento econômico global, pois substituíram a carroça utilizada por animais, como bois e cavalos, para a utilização de locomotivas e automóveis a vapor mais eficientes. Depois de muitos estudos e aperfeiçoamentos, elas permitiram um grande avanço na humanidade, mudando o mundo de forma radical. Passaram a ser utilizadas nas mais diferentes frentes de trabalho, acelerando o desenvolvimento econômico, tecnológico e industrial, além de contribuir nas relações cotidianas.

Quando se fala no ensino de física, principalmente na área da termodinâmica, pode-se dizer que os estudos ligados às máquinas térmicas ocupam posições centrais neste conteúdo.

Segundo Sauerwein (2012, pg. 815):

Do ponto de vista da História das Ciências, foram questões subjacentes à busca do aperfeiçoamento das máquinas a vapor que levaram à descoberta (ou síntese) das leis gerais da Termodinâmica.

Aprender sobre as máquinas térmicas no ensino da física nos dão suporte para compreender os assuntos ligados às leis da termodinâmica, e como também seus conhecimentos são primordiais para o entendimento de muitas tecnologias que a humanidade utiliza cotidianamente: tanto no simples uso de uma garrafa térmica para conservar o café, quanto à utilidade de uma turbina potente para impulsionar o voo de um avião a jato.

Atualmente temos em nossa residência, os eletrodomésticos indispensáveis como geladeiras, automóveis, refrigeradores; os recipientes térmicos com a panela de pressão, garrafas térmicas, e dentre outros. Essas tecnologias geralmente procuram aumentar sua eficiência, e para isso, temos que conhecer os conceitos fundamentais por trás das máquinas térmicas.

Embora as máquinas térmicas tenham desempenhado um papel importante no desenvolvimento da sociedade moderna, elas também têm sido criticadas por sua contribuição para as mudanças climáticas e a poluição do ar. Como resultado, muitos pesquisadores e engenheiros estão trabalhando para desenvolver novas tecnologias mais limpas e eficientes, para ajudar a garantir um futuro sustentável para o planeta.

### **3. PROPOSTA EXPERIMENTAL: MÁQUINA DE HERON**

Para conseguir os objetivos estabelecidos neste trabalho, foi desenvolvida uma atividade experimental. Inicialmente, o experimento foi organizado e parcialmente realizado no laboratório de física do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Sertão de Pernambuco (IFSertãoPE) Campus Salgueiro. Antes de iniciar o experimento, foram feitas as pesquisas teóricas da história e leis da Termodinâmica e sobre as máquinas térmicas.

É executado neste trabalho um dispositivo térmico com característica semelhante à máquina histórica de Heron capaz de transformar energia térmica em trabalho mecânico. Por meio deste dispositivo, pode-se trabalhar e compreender os conceitos físicos da primeira e segunda lei da termodinâmica, e, sobretudo, entender como as máquinas térmicas se comportam. Também visualizando, qualitativamente, a eficiência desta máquina térmica, através da teoria e alguns dados necessários do dispositivo.

### 3.1 Materiais

Para a montagem do dispositivo térmico foram usados os materiais listados e descritos na tabela 1 logo a seguir:

Tabela 1 – Lista de materiais necessários para a realização deste dispositivo.

<b>ITEM</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>ESPECIFICAÇÕES</b>	<b>FINALIDADE</b>
<b>Latinhas de alumínio</b>	2	Volume de 350 ml	Serve como recipiente condutor de calor para aquecer a água.
<b>Cola de secagem rápida</b>	1	Adesivo Instantâneo 793	Prender os canudos de alumínio
<b>Linha ou barbante</b>	1	Comprimento de 30 cm	Amarrar na latinha para que fique suspensa.
<b>Massa Durepoxi</b>	1	Massa Epóxi Bicomponente	Revestir os canudos de alumínio e prendê-los ao recipiente.
<b>Álcool gel</b>	1	Álcool Etilico Hidratado 70° 1L INPM	Tem capacidade inflamatória, serve como fonte de calor.
<b>Fita adesiva</b>	1	Fita Adesiva Transparente 12 mm	Para revestir os canudos de alumínio.
<b>Tinta</b>	1	Esmalte Sintético a base de resina alquídica, 112,5 ml.	Para revestir a latinha e manter protegido o uso indevido de qualquer marca da latinha.
<b>Tesoura</b>	1	–	Serve para cortar e furar o alumínio e a fita adesiva.
<b>Caixa de palitos de fósforos</b>	1	–	Fazer faísca do atrito com a caixinha virar chama.
<b>Água</b>	15/20 ml	–	Formando a fonte quente do recipiente (sistema) para gerar vapor.

Fonte: Autoria.

Na figura 11, logo abaixo, se encontram os materiais que foram utilizados para o procedimento da montagem dispositivo experimental. Os materiais podem ser encontrados em qualquer lugar residencial ou em comércio público (mercado).

Figura 11– Materiais necessários para a montagem.



Fonte: Aatoria.

### 3.2 Montagem

Fazem-se dois furos na parte lateral de uma das latinhas de alumínio e se retira todo o líquido (use a ponta da tesoura). O furo deve estar com aproximadamente 8 cm de altura da base da latina. Esvazia-se a outra latinha para fazer os canudos. Com o auxílio da tesoura, se corta a latinha, pega uma parte do alumínio e começa o enrolando pela ponta (utilizam-se luvas para prevenir cortes com o alumínio). Quando for feita uma volta, passa a cola de secagem rápida, e para ficar mais resistente, envolvem-se os canudos com a fita adesiva. Depois da secagem, cortar o canudo em quatro partes (duas partes de 3 cm e duas partes de 2 cm). Com o auxílio da massa epóxi, se faz dois canudos em formato de “L”, prendendo um canudo de 3 cm ao canudo de 2 cm. Em seguida, quando a massa secar, coloca-se uma das extremidades do canudo 3 cm no furo da parte lateral da latina (dois canudos em cada lado), depois prende com massa epóxi, deixando o recipiente secar por completo. Depois da secagem, acopla uma linha ou barbante no dispositivo (a parte superior do corpo da latinha de alumínio,  $\pm 30$  cm de comprimento a linha).

Para fazer o teste, encha a latinha de 15 entre 20 ml com água através do furo (pode ter o auxílio de uma seringa). Para servir de caldeira pega a mesma latinha que foram feitos os canudos, coloca-se um pouco de álcool gel para servir de fornalha para em seguida acender com o palito de fósforo (acompanhamento de um adulto para manusear com álcool, pois é uma

substância inflamável, pode ocasionar queimaduras).

Quanto às limitações, se o diâmetro dos tubos for muito grande, conseqüentemente, o vapor não sairá com quantidade suficiente de velocidade para gerar um torque, ou seja, quanto menor for à área das extremidades dos canudos, maior será a velocidade do vapor pela saída, assim se deve diminuir o diâmetro dos tubos, basicamente achatando as extremidades dos tubos.

Aconselha-se revestir a latinha com uma tinta permanente ou resistente ao calor, para proteger e manter o uso indevido da marca de qualquer tipo de latinha utilizável, evitando que o conteúdo seja violado ou duplicado.

Na figura 12, abaixo, se encontra a visualização precisa do dispositivo montado, com características semelhantes à máquina de Heron.

Figura 12 – À esquerda apresentamos o dispositivo montado semelhante à Eolípila de Heron vista na parte frontal. À direita é visto o mesmo dispositivo na parte superior.



Fonte: Aatoria.

Depois de pronto, para testar o dispositivo que simula a máquina de Heron, posiciona-se a caldeira no suporte com a fornalha embaixo. Acenda o fogo com cuidado, pois o álcool gel é altamente inflamável. Após alguns minutos quando a chama começa a esquentar o dispositivo, a água na caldeira ferverá e o jato de vapor que sairá pelas extremidades fazendo os canudos girarem, como é mostrado na Figura 13.

Figura 13 – À esquerda apresentamos o dispositivo posicionado na caldeira para o aquecimento. À direita é visto o dispositivo experimental em funcionamento, veja o movimento giratório após o vapor sair pelos canudos.



Fonte: Aatoria.

Para uma melhor visibilidade da proposta experimental, o *link* abaixo nos levará ao YouTube para mostrar o vídeo do dispositivo em funcionamento, a fim trazer uma melhor compreensão e retenção do conhecimento sobre as relações entre calor, energia e trabalho: [https://www.youtube.com/watch?v=xJ\\_i7i4a\\_gA](https://www.youtube.com/watch?v=xJ_i7i4a_gA). Após testar e visualizar o experimento, é possível discutir e trabalhar os conceitos relacionados à primeira e segunda lei da termodinâmica e das máquinas térmicas, uma vez que o mesmo discute de forma clara a abordagem física da termodinâmica e do torque; e traz a compreensão de como o calor pode ser utilizado para a realização de trabalho mecânico.

### 3.3 Resultados e discussões

#### 3.3.1 Uma breve explicação na física básica:

Nessa experiência pode-se notar que quando o vapor de água escapava pelos canudos, o dispositivo girava rapidamente. A teoria da



termodinâmica explica a troca de calor entre sistemas fechados e o trabalho realizado por um processo físico, uma vez que, o dispositivo experimental nos mostra de forma compreensível as correlações entre calor, energia e trabalho através da formulação da primeira e segunda lei da termodinâmica, e também nos traz um embasamento de como funciona uma máquina térmica. No experimento, pode ser explicado que, quando aquecemos o frasco, a água que está contida nela se transforma em vapor, e com isso seu volume aumenta. Neste processo de expansão, a pressão interna aumenta. Na região dos canudos a pressão passa a não existir, pois haverá uma saída de ar pelas extremidades dos canudos, e com isso, o vapor é forçado a sair pelos canudos em alta velocidade. Desta forma o recipiente realiza um trabalho mecânico ao girar. Pode-se perceber também que, no momento em que o vapor de água se expande, este tende a aumentar a rotação do dispositivo, com isto, o torque vai ficar maior e conseqüentemente realizará um trabalho para que o mesmo tenha um movimento circular.

O dispositivo experimental funciona a vapor, assim com as mesmas características de uma máquina térmica, podemos identificar esses princípios físicos, comparando com as características de uma máquina térmica:

- A fonte quente é o recipiente aquecido que fornece calor para o fluido de trabalho (vapor d'água);
- Parte desse calor é transformada em trabalho. O trabalho realizado pelo vapor ocorre nos canudos que faz o recipiente girar;
- E a outra parte do calor é rejeitada na atmosfera que envolve o recipiente, que seria a fonte fria.

### **3.3.2 Força de ação e reação, e o Torque – uma explicação comparativa com a máquina de Heron:**

Exemplificando a máquina de Heron como uma máquina histórica, seu funcionamento acontece quando a água recebe energia térmica proveniente da fonte de calor, passando então para a forma de vapor, que sai de forma

rápida pelos canudos (Fig. 14). E isso que acontece o mesmo com o dispositivo experimental, já que ele tem as mesmas características semelhantes da máquina de Heron.

Figura 14 – Ilustração do movimento da máquina de Heron.

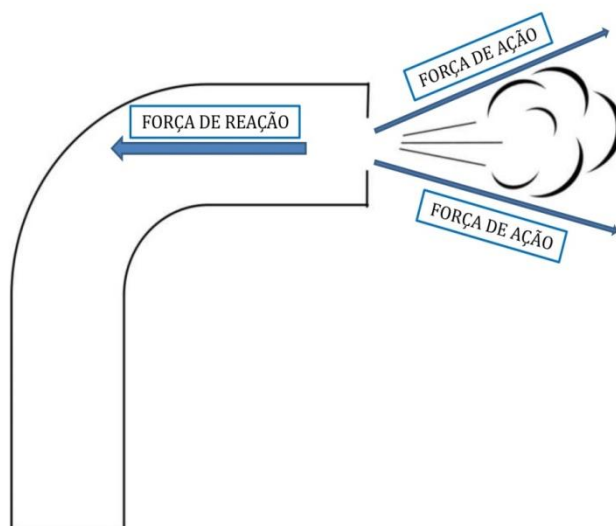


Fonte: In Encyclopædia Britannica. 2000<sup>10</sup>.

A saída do vapor de água por esses canudos é devido à sua expansão exerce uma força de ação, enquanto a força de reação atua empurrando o canudo no sentido contrário ao da ejeção de vapor, assim como nos diz a 3ª lei de Newton, a força de ação do vapor gera uma força de reação ocasionando um movimento circular no dispositivo, como podemos observar diante da Fig. 15.

Figura 15 – Representação ilustrativa das forças atuantes no canudo.

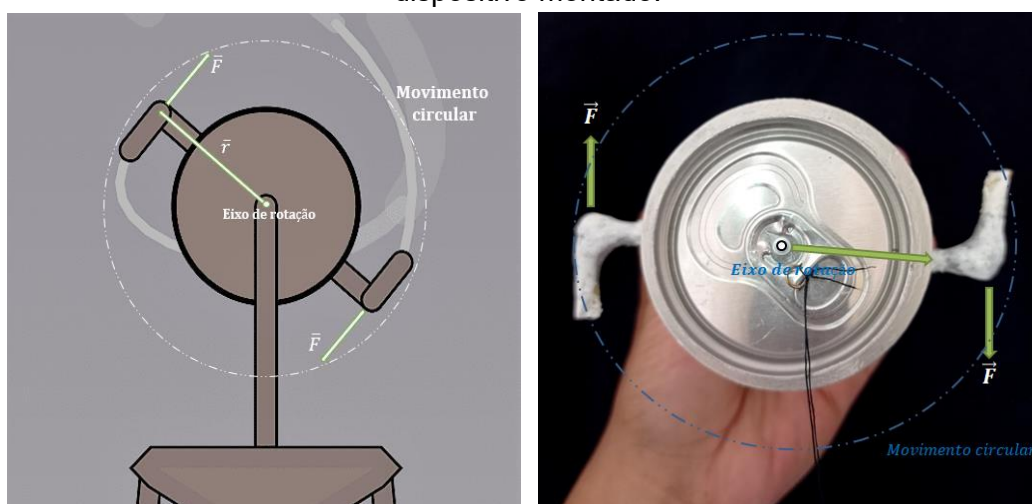
<sup>10</sup> ENCLOSURE. In Encyclopædia Britannica. 2000. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/Heron-of-Alexandria>. Acesso em mar. 2023.



Fonte: Autoria.

Essa transmissão de rotação também se deve predominantemente devido ao torque transmitido. Em outros termos, o torque consiste na ação de girar um corpo em torno do seu eixo de rotação por meio da aplicação de uma força (NUSSENZVEIG, 2013). Podemos demonstrar esse conceito através da Figura 16, onde são mostrados os vetores atuantes na máquina para que o torque resulte em um movimento circular da máquina.

Figura 16 – À esquerda apresentamos a ilustração dos vetores atuantes da máquina de Heron. À direita é visto a semelhança dos vetores da máquina diante do dispositivo montado.



Fonte: Autoria.

Como o vetor torque é o resultado do produto vetorial entre o vetor do braço de alavanca ( $\vec{r}$ ) e o vetor força ( $\vec{F}$ ), sua direção será sempre perpendicular ao plano formado por esses vetores, com o seu sentido dado

pela regra da mão direita. O ângulo entre os vetores  $\vec{r}$  e  $\vec{F}$  é, portanto, fundamental, de modo que, para se obter uma otimização da transformação de energia térmica para energia mecânica, é essencial que os vetores sejam perpendiculares entre si no experimento.

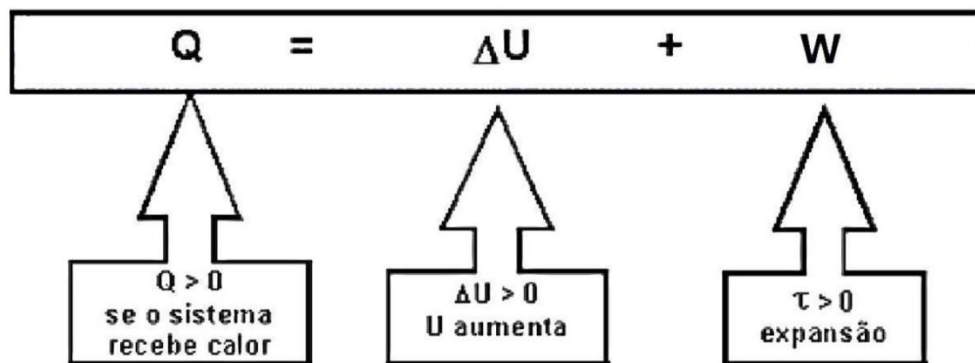
Além disso, na fig. 16, percebe-se que vai existir a presença de dois torques atuantes na máquina, no caso, um torque resultante no sistema, que é determinado pela soma dos dois torques. O dispositivo gira inicialmente devido ao torque resultante nos dois canudos. Se considerarmos os dois canudos, existirá uma soma dos dois torques presentes nos dois lados do dispositivo, que fará o sistema girar. Porém, se a soma desses torques for nula, esse sistema tenderá a permanecer em equilíbrio rotacional: parado ou em movimento circular uniforme, ou seja, girando com velocidade constante (na ausência de forças dissipativas).

### 3.3.3 Explicando através da 1ª Lei da termodinâmica:

Esse dispositivo montado pode ser explicado pela a Primeira Lei da Termodinâmica, porque parte da energia que o dispositivo recebe na forma de calor através da chama é transformada em trabalho útil quando o vapor sai pelos canudos, ou seja, uma parte do calor se transforma em trabalho para movimentar os mesmos, e conseqüentemente, ocorre à diminuição da pressão e da temperatura do vapor. Com isso, o dispositivo volta a girar com a temperatura inicial e o ciclo se repete enquanto ele permanecer sobre a chama.

Fisicamente dizendo, quando a chama da fornalha entrou em contato com o dispositivo de alumínio, que continha água, esta água esquentou (recebeu um calor  $Q$ ) que fez aumentar a energia interna ( $U$ ) do sistema (energia de translação das partículas de água). A água transformou-se então em vapor, que aumentou a pressão interna do dispositivo, procurando um caminho de saída (pelos canudos). Ao sair com velocidade rápida, realizou um trabalho (provocando o giro do sistema). Se o dispositivo recebe certa quantidade de calor, usando parte para aumentar sua energia interna e parte para fazer trabalho, teremos na representação da fig. 17:

Figura 17: Primeiro princípio da termodinâmica no dispositivo.



Fonte: Aatoria.

A variação da energia interna de um sistema ( $\Delta U$ ) pode ser positiva ( $\Delta U > 0$ ) ou negativa ( $\Delta U < 0$ ), ou seja, pode-se fornecer energia térmica para um sistema e aumentar sua energia interna (que é o que foi feito para a Máquina de Heron), mas pode-se também retirar energia térmica de um sistema (resfriá-lo) e diminuir assim sua energia interna, que é o que vai acontecer quando se apagar a chama debaixo do dispositivo.

### 3.3.4 Explicando através da 2ª Lei da termodinâmica:

A 2ª Lei da termodinâmica explica que uma máquina térmica não é capaz de converter todo calor recebido em trabalho durante o processo cíclico, ou seja, não existe nenhuma máquina 100% eficaz. Para comprovar esta tal lei, podemos descobrir o rendimento através do dispositivo montado. Uma vez que, sabemos que o rendimento de uma máquina térmica é dado pela equação (9).

Todavia, sabemos que a potência útil ( $P_U$ ) da máquina é dado pela razão da quantidade de energia transferida de uma fonte quente por unidade de tempo. Como o dispositivo experimentalmente montado tem a simulação da máquina de Heron, por sua vez, está máquina tem um movimento giratório. Se ela tem um movimento de rotação, sua energia dissipada será a energia cinética rotacional ( $E_{CR}$ ), que vai depender do momento de inércia ( $I$ ) e velocidade angular ( $\omega$ ) da máquina. Logo:

$$P_U = \frac{E_{CR}}{\Delta t} \quad (13)$$

Sendo,

$$E_{CR} = \frac{I\omega^2}{2} \begin{cases} I = mR^2 \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{cases} \quad (14)$$

No momento de inércia  $I$ , o  $m$  seria a massa total do dispositivo que é a soma da massa deste objeto com a massa do líquido (que seria água) contido no interior do dispositivo. E  $R$  seria distância do eixo de rotação até o ponto em que o dispositivo se encontra, ou seja, o raio do objeto. Vale ressaltar, que a unidade de medida do momento de inércia, no Sistema Internacional de Unidades (SI) é  $kg.m^2$ , pois envolve o produto da massa (dada em quilogramas,  $kg$ ) com a distância  $R^2$  (dada em metros,  $m$ ).

Já na velocidade angular  $\omega$ , o  $2\pi$  significa um giro completo, já o  $T$  será o período, ou seja, o tempo necessário para que o dispositivo em seu movimento giratório, conclua esse giro no seu próprio eixo. Ressaltando que a unidade da velocidade angular é radianos por segundo ( $\frac{rad}{s}$ ).

E a potência total ( $P_T$ ) da máquina é o calor fornecido à máquina térmica pela fonte quente, ou seja, a potência que a água fornece ao dispositivo em um intervalo de tempo.

Mesmo o foco da discussão não sendo uma análise quantitativa da máquina, o autor realizou algumas estimativas em laboratório com o uso de um calorímetro. Com sua utilização, foi possível estimar o  $P_T$  da fonte de calor utilizada, baseando-se na diferença de temperatura atingida pela água do calorímetro. O dispositivo estava numa temperatura inicial de 25 °C e uma massa de água de 0,1 kg. Também foi encontrado o  $P_U$  utilizando as equações (12) e (13) e alguns dados do dispositivo como sua massa total de 0,115kg (massa da água = 0,1 kg + massa do dispositivo vazio = 0,015 kg), seu raio  $R = 0,033 m$  e seu período de rotação de 0,25 s. Com base nisso, foi encontrada uma eficiência muito pequena para o dispositivo. Todavia, a própria máquina histórica de Heron também possui um rendimento bem baixo, então isso já era esperado, pois, nessa máquina os vapores de água são ejetados para fora, fazendo com que parte do calor seja convertida em trabalho, que seria o

movimento giratório do aparato experimental, e o restante é rejeitado para a fonte fria. Assim, comprovando que o calor nunca é convertido completamente em trabalho, pois uma parte é convertida em trabalho realizado pelos canudos e a outra é rejeitada na atmosfera que reveste o dispositivo. Por isso, a eficiência do dispositivo tende a ser baixa. Segundo Rafael (2023), as primeiras máquinas térmicas operavam com rendimentos menores que 10%, hoje com a evolução da tecnologia podem-se encontrar máquinas térmicas com rendimento próximo de 50%. Segundo Helerbrock (2023), os motores que usam o ciclo Diesel apresentam cerca de 30% de rendimentos. Em contraste, as máquinas elétricas geralmente possuem alto rendimento podendo chegar próximo a 90% (RAFAEL, 2023). Então, vale ressaltar, que o dispositivo experimentalmente montado não tem características ideais para motores industriais, a fim de ter eficiências com porcentagem alta. Porém, a partir da atividade experimental, podemos concluir alguns fundamentos necessários:

- Nenhuma máquina é capaz de transformar todo o calor em trabalho mecânico durante um processo cíclico, ou seja, nenhuma máquina terá um rendimento igual a 100%, pois sempre haverá uma parte energia dissipada na forma de calor que será rejeitada pela máquina térmica, uma vez, provando a segunda lei da termodinâmica. E para isso, podemos exemplificar quando uma parte do calor é transformada em trabalho pelos canudos e outra parte é rejeitada na atmosfera (fonte fria) que reveste o meio externo do dispositivo.
- Segundo o enunciado de Kelvin, para que seja possível a transformação de calor para trabalho mecânico é necessária ocorrer o aumento da entropia no sistema: um exemplo que se pode demonstrar seria a água, quando aquecê-lo, seu volume aumenta, e nesse processo de expansão, temos o aumento de entropia do estado líquido para o estado gasoso. Então para ter o aumento de entropia, precisa-se ter o aumento de desordem do sistema, no caso a desordem das partículas da água.

Então, podemos concluir que com um experimento simples feito em laboratório com materiais de baixo custo, podem-se trabalhar assuntos físicos

abrangentes de forma clara e objetiva. Além disso, podemos perceber que a partir desse experimento, outros tópicos da Física podem ser explorados junto com a Termodinâmica como a terceira lei de Newton, movimento de rotação, torque de uma força, entre outros.



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ausência de capacitação do professor ou a maneira que o mesmo planeja suas aulas se faz com que possibilite a falta de compreensão de terminados assuntos aos alunos, ou até mesmo a ausência de equipamentos didáticos, são algumas possíveis dificuldades que os alunos apresentam no entendimento dos assuntos de física. Isso acaba deixando os alunos bastante desinteressados pelas aulas. Por isso, se faz necessária a realização da experimentação, com uma forma alternativa de ensino-aprendizagem, a fim de despertar o interesse e aguçar a curiosidade dos alunos, sendo então algo de grande importância no desenvolvimento cognitivo do aluno. Além disso, a atividade experimental possibilita aos estudantes uma visualização do contexto de forma clara e objetiva, e contribuindo para o melhoramento do ensino-aprendizagem e incentivando a interação dos alunos na construção de conhecimento.

A experimentação pode abranger princípios que possibilita a aprendizagem, bem como a quebra do paradigma que a disciplina de Física se resume em fórmulas e cálculos. Com isso, foi mostrada neste trabalho que é possível a montagem de um experimento com materiais de baixo custo para a demonstração de alguns dos principais conteúdos da disciplina de Termodinâmica.

Dessa forma, este trabalho tratou de uma proposta experimental para o ensino da termodinâmica para estudantes do ensino básico ou estudantes de formação acadêmica, no qual a essência das estratégias pedagógicas centraliza-se no desenvolvimento de um experimento de baixo custo, que proporciona a compreensão dos alunos acerca da dimensão da termodinâmica, mediante a integração dos conteúdos e a possibilidade de o estudante participar ativamente da investigação a respeito das máquinas térmicas, favorecendo, portanto, a aprendizagem.

Desse modo, percebemos que a atividade experimental pode ser tida como possível recurso didático para a sala de aula, a fim de explicar alguns fundamentos da área da termodinâmica, e principalmente, assuntos relacionados às máquinas térmicas, e pode ser aplicado no âmbito escolar para o ensino de física e na comunidade externa que se interessa pela área, visto

que os materiais utilizados são de fácil acesso e podem ajudar no desenvolvimento do processo de ensino aprendizagem. E vale ressaltar que a proposta experimental possibilita a correlação com o momento histórico, pois atravessa a possibilidade da conformação da história antiga ensinada e repassada de gerações para reconhecer a importância das máquinas térmicas no mundo atual, e assim, entendê-las melhor e perceber a sua aplicabilidade na humanidade. Portanto, o uso dos experimentos é uma possível estratégia para investigar e entender a história da ciência.

## REFERÊNCIAS

ALCOFORADO, Fernando. **As grandes invenções no transporte terrestre e dutoviário da história e sua futura evolução**. 2022. Acesso em: 06 out. 2023.

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.

BENFÍCA, Kátia Ferreira Guimarães; PRATES, Kimelly Hanna Guimarães. **As contribuições do uso de experimentos no ensino-aprendizado da física**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 6, p.33686-33703, 2020.

BRAIN, Marshall. **Como funcionam os motores a vapor**. 2008. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/motor-a-vapor1.htm>>. Acesso em: 05 out. 2023.

BRITO, Jarlison Feitoza. **Entropia e o funcionamento das máquinas térmicas**. 2017. 44f. Monografia. (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Centro, Manaus, 2017.

BROCKVELD JUNIOR, Sergio Luis et al. **Sistema multiporta com controle droop destinado a regeneração de energia em locomotivas diesel-elétricas**. 2022.

CARNOT, S. **Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance**. in R. Fox, Reprodução do trabalho original de Sadi Carnot de 1824. Librairie Philosophique Vrin, 1978, pp. 55-179.

DA SILVA, Geilson Rodrigues; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães. **Termodinâmica e Revolução industrial: Uma abordagem por meio da História Cultural da Ciência**. História da Ciência e Ensino: construindo interfaces, v. 19, p. 71-97, 2019.

DA SILVA, Bruno Gomes. **SEQUÊNCIA DIDÁTICA COM HISTÓRIA DA CIÊNCIA: PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA**. 2021.

DA SILVA, Luan Gabriel Bispo; DE FREITAS, Felipe Alexandre Medeiros. **A INTRODUÇÃO DE TÓPICOS DE HISTÓRIA DA FÍSICA COMO FERRAMENTA FACILITADORA NO ENTENDIMENTO DA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 9, n. 6, p. 2299-2310, 2023.

DE LEMOS, Jorge Luiz Silva. **Ciência-Tecnologia-Sociedade-Ambiente (CTSA)**. Revista Ciências & Ideias ISSN: 2176-1477, v. 4, n. 2, p. i-ii, 2013

DE SOUZA, Debora Samir Conceição; DA CRUZ SILVA, Boniek Venceslau. **Termodinâmica e Revolução Industrial: Uma abordagem por meio da História e da Epistemologia da Ciência**. Latin-American Journal of Physics Education, v. 15, n. 1, p. 14, 2021. Acesso em out. 2021.

DE SOUZA, João Márcio Dias. **Tipologias arquitetônicas nas estações da estrada de ferro sorocabana**. 2016.

GOEKING, Weruska. **Da máquina a vapor aos softwares de automação**. Portal O setor elétrico, Santa Cecília, SP, 2010

GOERSCH, Maria Clara da Silva. **Termodinâmica: conceitos e aplicações**. 2022.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v.2.

HARMAN, G. **The intrinsic quality of experience**. In: Philosophical Perspectives, v. 4, p.31-50, 1990.

HELERBROCK, Rafael. **"Potência"**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/potencia.htm>. Acesso em 19 de outubro de 2023a.

HELERBROCK, Rafael. **"Rendimento das máquinas térmicas"**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/rendimento-das-maquinas-termicas.htm>. Acesso em 23 de outubro de 2023b.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

JOÃO, B. DA SILVA; SALES, GILVANDENYS LEITE. **Atividade experimental de baixo custo: o contributo do ludião e suas implicações para o ensino de Física**. Revista do Professor de Física• Brasília, v. 2, n. 2, 2018.

KASPRIK, Lucas de Abreu. **Máquinas térmicas: uma proposta de abordagem da termodinâmica a partir de máquinas históricas precursoras da Revolução Industrial**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

LEMOS, Eliana GM et al. **Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação**. Coleção PROPe Digital (UNESP), 2012.

LINHARES, Marco Antônio et al. **Conceitos de termodinâmica através de experimentação: simulando uma máquina térmica em sala de aula**. 2018.

LIMA, Joslaine de. **Sequência didática para o ensino da termodinâmica**. 2016. 43 f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

LOPES NETO, Vicente de Paula. **Uma proposta para o ensino da 2ª lei da termodinâmica e entropia por meio das UEPS**. 2023.

MAQUINA. In: **Oxford Languages**. OUP, 2005. Disponível em: <https://languages.oup.com/google-dictionary-pt/>. Acesso em: 01/10/2023.

MOHNSAM, Julio Cesar. **As contribuições de Arquimedes para o cálculo de áreas**. 2014. Dissertação de Mestrado.

MOREIRA, M.A. **Desafios no ensino da física**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, Vol. 43, 2021.

MORO, Fernanda Teresa. **Atividades experimentais e simulações computacionais: integração para a construção de conceitos de transferência de energia térmica no ensino médio**. 2016. Dissertação de Mestrado.

NASCIMENTO, José Rodrigues do. **Sadi Carnot: uma breve discussão sobre sua contribuição para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e para o desenvolvimento da termodinâmica**. 2023. 84 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ensino de Ciências e Educação Matemática) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2023. Acesso em out. 2023.

NETO, Vicente Gerlin et al. **RIGIDEZ DE TRILHOS SOLDADOS POR CALDEAMENTO**.

NORONHA, Gabi. **Heron de Alexandria, quem foi? História, principais invenções e legado**. Conhecimento científico, 2020. Disponível em: <https://conhecimentocientifico.com/heron-de-alexandria/#:~:text=Heron%20fez%20contribui%C3%A7%C3%B5es%20significativas%20para,sendo%20encontrada%20somente%20em%201896.> Acesso em mar. 2023.

NUNES, Cilon Everaldo da Costa. **Aprendizagem baseada em projetos: storytelling imersão através da HQ no ensino das máquinas simples**. 2023.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 1: mecânica** / H. Moysés Nussenzveig. – 5. ed. - São Paulo: Blucher, 2013.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 2: Fluidos, Oscilações e Ondas**, Calor- 4ª edição rev. – São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2002.

PÁDUA B. A.; PÁDUA G. C.; SILVA C. L. J.; MARTINS S. R.; POSTALI B. F.; TIRITAN C. A. L., **Termodinâmica clássica ou termodinâmica do equilíbrio: aspectos conceituais básicos**- Semina: Ciências Exatas e da Terra, Londrina, v. 29, n. 1, p. 57-84, jan./jun. 2008.

PAIVA, Jadilson Alves de. **APPLICATION OF VACUUM TECHNOLOGY IN PRECISION ENGINEERING DESIGN**. 2010. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

PIOVEZAN, P. P., LANDERS, R - **Parafuso de Arquimedes – projeto para instrumentação de ensino**. Campinas: IFGW – Unicamp, 2005.

PIRES, C. S., LIMA, R. P., BOEIRA, R. F - **O PARAFUSO DE ARQUIMEDES**. Santa Catarina: UNIASSELVI, 2016.

RAFAEL, Leonardo Pires. "**Máquina térmica**"; Manual do Enem. Disponível em: <https://querobolsa.com.br/enem/fisica/maquina-termica>. Acesso em 23 de outubro de 2023.

REZENDE, N. R.; PORTO, C. M. **História das máquinas térmicas e o desenvolvimento das leis da Termodinâmica**. 2021. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Produto educacional na forma de paradidático).

ROVER, Karine. **Verificação experimental da Lei de Boyle utilizando materiais alternativos**. 2011. 41 f., il. Monografia (Licenciatura em Química)— Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SENA, A. G. **Trabalho e desemprego no contexto contemporâneo: algumas reflexões**. Rev. Trib. Reg. Trab. 3ª Reg. Belo Horizonte, 29 (59): 99-128, 1999.

SANTOS FILHO, Jailton dos. **As Leis da Termodinâmica: contexto histórico, definições e aplicações**. 2021.

SANTOS, Andresa Maria Dos. **A importância da realização de experimentos de baixo custo no ensino médio**. Anais III CONEDU... Campina Grande: Realize Editora, 2016. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/19887>>. Acesso em: 11/10/2023

SAUERWEIN, Ricardo Andreas; SAUERWEIN, Inés Prieto Schmidt. Objeto de aprendizagem: máquinas térmicas. **Caderno brasileiro de ensino de física**, p. 812-830, 2012.

SILVA, Valdinei De Souza et al. **Máquinas térmicas e revolução industrial, uma análise e suas principais características**. Anais III CONEDU... Campina Grande: Realize Editora, 2016. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/21381>>. Acesso em: 11/04/2022

SILVA, Denilson Antonio Maia da. **Análise dos conteúdos termodinâmicos em livros de Química e Física do ensino médio**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SILVA, D. et alli; **Ensino da distinção entre Calor e Temperatura: uma visão construtivista**. In: Questões atuais no ensino de Ciências. São Paulo: Editora Escrituras, p.62, 1998.

SILVA, Dirceu da; FERNANDEZ NETO, Victoriano e CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Ensino da distinção entre calor e temperatura: uma visão construtivista. *Ciência educ.* [online]. 1997, vol.04, pp.22-39. ISSN 1516-7313.

SOUZA, Robineide Borges de. **Sequência didática para o ensino das leis da termodinâmica e máquinas térmicas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

TEIXEIRA, Mariane Mendes. **"História das máquinas térmicas"**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/historia-das-maquinas-termicas.htm>. Acesso em 09 de outubro de 2023.

TIPLER, P; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. 6 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014, v 1.

TRIVIZOL, Louise; FIGUEIRÔA, Silvia F. de M. **O ensino de História e Filosofia da Termodinâmica como meio para o pensamento complexo**. *Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática*, v. 4, n. 3, 2021.

VAGMAKER, Rafael Vilela et al. **Balanças ferroviárias dinâmicas: estudo de caso da implantação de uma balança instrumentada a partir da recomendação internacional R-106 da OIML**. 2023.

VIEIRA, Wagner da Costa. **O ensino da termodinâmica sob a perspectiva Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) e da interdisciplinaridade dela decorrente**. 2022. 107 f. Dissertação m n n n n n n n n n (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.

YOUNG, Hugh; FREEDMAN, Roger - **Física II-Termodinâmica e Ondas**. 12ª Edição. Pearson, 2008. ISBN: 9788588639331

ZANDAVALLI, Andrei Gustavo; THOMAZ, Maria Regina. **PROPOSTA DE REDUÇÃO DE CUSTOS COM ÓLEO LUBRIFICANTE NA MANUTENÇÃO**

**PREVENTIVA DE BOMBAS DE VÁCUO DE UMA AGROINDÚSTRIA.** Anais da Engenharia Mecânica/ISSN 2594-4649, v. 4, n. 1, p. 167-185, 2019.

[https://www.youtube.com/watch?v=xJ\\_j7i4a\\_gA](https://www.youtube.com/watch?v=xJ_j7i4a_gA)