



**UEPB**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E EDUCAÇÃO  
MATEMÁTICA  
MESTRADO ACADÊMICO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E EDUCAÇÃO  
MATEMÁTICA**

**JOSÉ RODRIGUES DO NASCIMENTO**

**SADI CARNOT: UMA BREVE DISCUSSÃO SOBRE SUA CONTRIBUIÇÃO PARA  
O APERFEIÇOAMENTO DAS MÁQUINAS A VAPOR E PARA O  
DESENVOLVIMENTO DA TERMODINÂMICA**

**CAMPINA GRANDE - PB  
2023**

JOSÉ RODRIGUES DO NASCIMENTO

**SADI CARNOT: UMA BREVE DISCUSSÃO SOBRE SUA CONTRIBUIÇÃO PARA  
O APERFEIÇOAMENTO DAS MÁQUINAS A VAPOR E PARA O  
DESENVOLVIMENTO DA TERMODINÂMICA**

Trabalho de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências e Educação Matemática.

**Área de concentração:** Ensino de Ciências

**Orientador:** Prof. Dr. Marcos Antônio Barros

**CAMPINA GRANDE - PB  
2023**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

N244s Nascimento, José Rodrigues do.

Sadi Carnot [manuscrito] : uma breve discussão sobre sua contribuição para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e para o desenvolvimento da Termodinâmica / José Rodrigues do Nascimento. - 2023.

84 p. : il. colorido.

Digitado.

Dissertação (Mestrado em Acadêmico em Ensino de Ciências e Educação Matemática) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.

"Orientação : Prof. Dr. Marcos Antônio Barros, Departamento de Física - CCT. "

1. Sadi Carnot. 2. Máquina térmica . 3. Revolução Industrial . 4. Termodinâmica . I. Título

21. ed. CDD 536.7

JOSÉ RODRIGUES DO NASCIMENTO

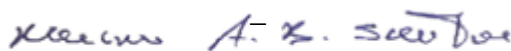
**SADI CARNOT: UMA BREVE DISCUSSÃO SOBRE SUA CONTRIBUIÇÃO PARA  
O APERFEIÇOAMENTO DAS MÁQUINAS A VAPOR E PARA O  
DESENVOLVIMENTO DA TERMODINÂMICA**

Trabalho de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências e Educação Matemática.

**Área de concentração:** Ensino de Ciências

Aprovada em 17 de março de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Marcos Antônio Barros (Orientador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

Profa. Dra. Ana Raquel Pereira de Ataíde  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

Profa. Dra. Karine dos Santos  
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Aos meus pais, pela dedicação,  
companheirismo e amizade, DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento dispensado à pesquisa (O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001).

A todos que passaram pela coordenação do curso, ao longo dos períodos que estive cursando, por seu empenho.

Ao professor Dr. Marcos Antônio Barros, pelas leituras sugeridas ao longo dessa orientação e por sua dedicação.

As professoras Dr<sup>a</sup>. Ana Raquel Ataíde (UEPB) e Dr<sup>a</sup>. Karine dos Santos (IFPI), pelas grandes contribuições dadas para a melhoria desta pesquisa.

Aos meus familiares, pela compreensão por minha ausência nas reuniões familiares.

Aos professores do Programa, que contribuíram, ao longo da integração, por meio das disciplinas e debates, para o desenvolvimento desta formação.

Aos funcionários da UEPB, pela presteza e atendimento quando nos foi necessário.

Aos colegas de classe, pelos momentos de amizade e apoio.

“Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser descoberta.”

**Carl Sagan**

## RESUMO

As investigações de alguns cientistas, geralmente, ganham notoriedade na História, quando os seus estudos estão associados a contribuições relevantes para a Ciência. No entanto, isso não é regra e, em alguns casos, por consequência de análises precárias, superficiais ou até inexistentes, seus nomes são omitidos dos livros textos didáticos e científicos. O exemplo mais emblemático trata-se da relação entre Sadi Carnot e a Termodinâmica. Apesar de toda a sua contribuição para a formação desse novo ramo de estudo, o seu nome é silenciado ou citado discretamente na maioria dos livros textos didáticos e científicos, quando discute a formação histórica desse ramo de estudo da Física. Portanto, objetiva-se, com este estudo, discutir o legado do engenheiro francês Sadi Carnot, no que se refere as suas contribuições para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e para o desenvolvimento dos conceitos científicos iniciais da Termodinâmica. Para atender tal objetivo, metodologicamente, fora realizada uma pesquisa de enfoque qualitativo com uma abordagem historiográfica. Nesse sentido, optou-se por dar ênfase a fontes primárias e secundárias relevantes, almejando ser o mais condizente possível com os feitos e fatos históricos vivenciados pelo engenheiro supracitado. Sadi Carnot foi contemporâneo da Revolução Industrial, iniciada pela Inglaterra, e sofreu influência da Revolução Francesa, ambas ocorridas no século XVIII, as quais trouxeram mudanças radicais à sociedade em que viveu e às futuras gerações. Herdeiro de uma tradição científica e guiado por sentimentos patrióticos, passou a estudar o funcionamento das máquinas a vapor, no intuito de colaborar com seu país, haja vista o avanço industrial e militar. Como fruto de tal ação, aos 28 anos de idade, publicou o seu livro *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 adequadas ao desenvolvimento dessa potência), considerado por muitos autores como uma obra-prima da Engenharia e Ciência, o qual não teve muita adesão na época de sua publicação, por ser muito avançado em relação aos conceitos científicos inovadores que discutia. Como contribuição para as máquinas a vapor e para os conceitos iniciais da Termodinâmica, Carnot deixou como herança, nesse estudo pioneiro que buscava compreender e explicar a teoria das máquinas a fogo: o ciclo de Carnot, o teorema de Carnot, a eficiência de Carnot e os postulados básicos fundacionais da primeira e a segunda lei da Termodinâmica.

**Palavras-chaves:** Sadi Carnot. Máquina a vapor. Revolução Industrial. Termodinâmica.



## ABSTRACT

The investigations of some scientists usually gain notoriety in History, when their studies are associated with relevant contributions to Science. However, this is not the rule and, in some cases, as a result of precarious, superficial or even non-existent analyses, their names are omitted from textbooks and scientific texts. The most emblematic example is the relationship between Sadi Carnot and Thermodynamics. Despite all his contribution to the formation of this new branch of study, his name is silenced or discreetly mentioned in most textbooks and scientific texts, when discussing the historical formation of this branch of study of Physics. Therefore, this study aims to discuss the legacy of the French engineer Sadi Carnot, regarding his contributions to the improvement of steam engines and to the development of the initial scientific concepts of Thermodynamics. To meet this goal, methodologically, a qualitative research with a historiographical approach was carried out. In this sense, we chose to emphasize relevant primary and secondary sources, aiming to be as consistent as possible with the achievements and historical facts experienced by the engineer mentioned above. Sadi Carnot was a contemporary of the Industrial Revolution, started by England, and was influenced by the French Revolution, both of which occurred in the 18th century, bringing radical changes to the society in which he lived and to future generations. Heir to a scientific tradition and guided by patriotic feelings, he began to study how steam engines worked, in order to collaborate with his country, given the industrial and military advance. As a result of this action, at the age of 28, he published his book *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (Reflections on the motive power of fire and on the machines suited to the development of this power), considered by many authors to be a masterpiece of engineering and science, which did not have much adherence at the time of its publication, for being too advanced in relation to the innovative scientific concepts it discussed. As a contribution to steam engines and the initial concepts of Thermodynamics, Carnot left as his legacy, in this pioneering study that sought to understand and explain the theory of fire engines: the Carnot cycle, the Carnot theorem, the Carnot efficiency and the basic foundational postulates of the first and second law of Thermodynamics.

**Keywords:** Sadi Carnot. Steam machine. Industrial Revolution. Thermodynamics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Indústria inglesa no século XVIII.....	22
Figura 2 - Tomada da Bastilha que representa o início da Revolução Francesa, em 1789 .....	24
Figura 3 - Máquina a vapor de Heron de Alexandria .....	32
Figura 4 - Máquina de Savery instalada numa mina de carvão mineral.....	34
Figura 5 - Máquina a vapor de Savery no Museu de Artes e Ofício de Paris .....	34
Figura 6 - Máquina a vapor de Newcomen .....	35
Figura 7 - Réplica da Máquina James Watt.....	37
Figura 8 - Sadi Carnot, aos 17 anos.....	39
Figura 9 - Folha de rosto do livro de Sadi Carnot disponível na Biblioteca Nacional da França .....	42
Figura 10 - Máquina do ciclo ideal do Sadi Carnot.....	54
Figura 11 - Diagrama PressãoxVolume (pxV) do Ciclo de Carnot idealizado por Émile Clapeyron (1834).....	56

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
2	<b>METODOLOGIA</b> .....	13
2.1	Natureza da pesquisa .....	13
2.2	Modalidade de pesquisa .....	14
2.3	Procedimentos de pesquisa .....	15
3	<b>CONTEXTO HISTÓRICO DE SADI CARNOT: A ERA DE TRANSFORMAÇÕES NO VELHO CONTINENTE</b> .....	18
3.1	A Revolução Industrial na Inglaterra .....	18
3.2	Revolução Francesa.....	22
3.3	A França na primeira metade do século XIX: Império, industrialização e crise operária .....	27
4	<b>SADI CARNOT: A EVOLUÇÃO DAS MÁQUINAS TÉRMICAS</b> .....	31
4.1	A evolução das máquinas a vapor antes de Sadi Carnot .....	31
4.2	Trajectoria de vida e influências do Sadi Carnot .....	38
5	<b>A OBRA DE SADI CARNOT</b> .....	42
5.1	Sadi Carnot e as máquinas a vapor .....	43
5.1.1	<i>Motivações</i> .....	43
5.1.2	<i>Estudo das máquinas a vapor</i> .....	46
5.1.3	<i>O ciclo ideal de Carnot</i> .....	52
5.2	Sadi Carnot e as Leis da Termodinâmica .....	56
6	<b>O CONTEXTO CIENTÍFICO APÓS A PUBLICAÇÃO DAS <i>RÉFLEXIONS</i> DO CARNOT</b> .....	62
6.1	A obra esquecida.....	62
7	<b>SADI CARNOT E O ENSINO DA TERMODINÂMICA</b> .....	67
7.1	A História, Filosofia e Sociologia da Ciência na educação científica.....	67
7.2	Contribuições da historiografia do Sadi Carnot para o ensino da Termodinâmica .....	72
8	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	77
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	80

## 1 INTRODUÇÃO

Quando analisamos a História da Ciência, observamos que, em alguns episódios, os feitos de alguns cientistas se sobressaem, no seu campo de atuação, quando coincidem com o surgimento de uma nova teoria. Isso porque são rotulados como os ‘descobridores’ (MARTINS, 1999) ou, de forma cultural, os ‘pais’ do novo conhecimento. Galileu Galilei, por exemplo, ficou conhecido como o pai da Ciência Experimental; Isaac Newton, o pai da Mecânica; Charles Darwin, o pai da evolução das espécies, entre outros. No entanto, percebe-se que isso não é regra e, em alguns casos, há uma omissão por parte dos textos didáticos e científicos, a exemplo do legado do físico e engenheiro francês Sadi Carnot e a sua contribuição para com a Termodinâmica.

Contemporâneo das duas grandes revoluções que marcaram os momentos finais do século XVIII e se desdobraram pela primeira metade do século seguinte - a Revolução Industrial na Inglaterra e Revolução Francesa -, o engenheiro contribuiu, significativamente, para as discussões acerca do aperfeiçoamento das máquinas a vapor, em uma época de grandes turbulências políticas, sociais e econômicas na Europa do século XIX. Em serviço a seu país e aflito com as sucessivas derrotas francesas para o poderio militar inglês, passou a aperfeiçoar as máquinas a vapor, pois acreditava que, através do domínio destas tecnologias, seria possível superar o arsenal militar dos britânicos, o qual julgava ser forte, por causa de seu aprimoramento voltado para fins econômicos e militares (PASSOS, 2003).

Como fruto de seus estudos, Sadi Carnot lançou a obra intitulada *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*<sup>1</sup>, na qual, segundo alguns autores, como Nascimento, Braga e Fabris (2003), estão as bases das Leis da Termodinâmica. Já para Teza (2017), nessa obra, se encontra parte das estruturas, que, aliadas aos fatores econômicos, políticos e sociais vividos na época, causaram a revolução científica da Termodinâmica no século XIX. Segundo Dias (1990), Sadi Carnot “escreveu as 119 páginas mais inspiradas e originais jamais escritas pelo gênio humano” (p. 63).

No entanto, como apontam Nascimento, Braga e Fabris (2003), os textos didático e científicos não abordam tal feito e obra, com a devida relevância, quando discutem a história da Termodinâmica. Diante desse contexto e da importância do estudioso para a ciência do século XIX, este estudo buscará responder a seguinte pergunta de pesquisa: Quais as

---

<sup>1</sup> Tradução: Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas equipadas ao desenvolvimento dessa potência

contribuições do engenheiro francês Sadi Carnot para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e para o desenvolvimento dos conceitos científicos iniciais da Termodinâmica?

Parte-se da hipótese de que o Sadi Carnot contribuiu significativamente para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor, desencadeando o surgimento dos conceitos iniciais da Termodinâmica. No entanto, o caráter inovador de sua obra, contraditoriamente, dificultou a popularização do seu nome como um dos fundadores desse ramo de estudos da Física.

Diante disso, para responder tal questionamento, traçamos o objetivo geral seguinte: discutir o legado do engenheiro francês Sadi Carnot, no que se refere às suas contribuições para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e para o desenvolvimento dos conceitos científicos iniciais da Termodinâmica.

Esse objetivo foi desmembrado nos objetivos específicos que seguem: a) compreender o contexto social, científico e econômico da Europa do final do século XVIII e primeira metade do século XIX; b) discutir a influência de outros cientistas e de fatores extracientíficos da sua época para sua formação e para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor; c) discutir os escritos históricos de Sadi Carnot, buscando evidências acerca de suas contribuições para a formação dos conceitos termodinâmicos; d) refletir sobre o impacto e as mudanças que suas ideias trouxeram para o campo científico da época e e) apresentar uma proposta de estudo da historiografia do Sadi Carnot no ensino da Termodinâmica, através da História Cultural da Ciência.

Nesse sentido, acreditamos que o tema da presente pesquisa apresenta relevante importância, devido à discussão que se propõe a desenvolver, uma vez que buscará aprofundar-se, a partir de um estudo historiográfico, nos feitos científicos de um dos estudiosos mais enigmáticos da História da Física, o qual viveu numa época de grandes revoluções, que moldaram a sociedade como um todo. Além disso, que tem, em seus escritos históricos, a gênese de um dos principais ramos de estudo da Física, a Termodinâmica, mas que, infelizmente, não foi compreendido por físicos e engenheiros de sua época.

Aliado a isso, os documentos produzidos por este estudo podem servir de material de referência, para que professores de ciências possam utilizá-los em suas aulas sobre Termodinâmica, ao tratar a respeito da Natureza da Ciência. Nesse sentido, contribuir-se-á para amenizar uma situação crítica da ausência de materiais traduzidos em Língua Portuguesa que tratam da relação entre Sadi Carnot e a Termodinâmica, como apontam Borges e Forato (2015).

Este estudo encontra-se dividido em 7 capítulos, além desta introdução. No segundo capítulo, apresentamos a nossa metodologia de pesquisa. Trata-se de um estudo de caráter qualitativo com uma abordagem historiográfica. Optamos por tal metodologia para a realização

desta pesquisa, pois acreditamos que tal abordagem nos dará subsídios necessários para compreendermos a realidade econômica, social e política vivida pelo cientista aqui investigado.

O terceiro capítulo está destinado a compreender o contexto social, científico, político e econômico, em que Sadi Carnot viveu, na Europa e França do final do século XVIII e início do século XIX. Com isso, abordaremos a Revolução Industrial na Inglaterra e seus desdobramentos nos campos social e econômico. Em sequência, temos os desdobramentos da Revolução política na França e a ascensão do militar e político Napoleão Bonaparte ao poder. Fatos esses que foram contemporâneos de Sadi Carnot e modificaram profundamente, em diversos aspectos, a sociedade, na qual viveu.

O quarto capítulo apresenta uma discussão acerca da evolução histórica das máquinas a vapor e a influência do contexto, no qual Sadi Carnot estava inserido, em sua formação e realizações acadêmicas. Assim sendo, serão destacadas as principais máquinas a vapor inventadas e aperfeiçoadas, ao longo da história dessa tecnologia, que, certamente, serviram de base para o Carnot (1824) conceber suas concepções técnicas, nos seus escritos históricos, deixados para a posteridade.

No quinto capítulo, encontra-se uma discussão dos manuscritos de Sadi Carnot. Nele, buscaremos evidenciar as contribuições do engenheiro para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e para o desenvolvimento dos conceitos iniciais da Termodinâmica. Para isso, consultamos sua obra seminal, publicada em 12 de junho de 1824, na França, e textos complementares que vieram a público, décadas depois de sua morte, numa segunda edição da sua obra.

No sexto capítulo, apresentamos uma reflexão acerca do impacto e das mudanças que as ideias contidas em sua principal obra, que discutia a respeito da força propulsora do fogo, trouxeram para a comunidade científica de sua época. Percorremos desde seu início conturbado, que passou 23 anos em anonimato quase completo, até a sua redescoberta no final da primeira metade do século XIX, apresentando para o mundo contribuições de grande valia para a formação da Termodinâmica clássica.

No sétimo capítulo, apresentamos uma proposta para o desenvolvimento dos resultados deste estudo no ensino na Termodinâmica. Antes disso expomos uma breve discussão sobre a utilização da História, Filosofia e Sociologia da Ciência na educação científica, enfatizando as contribuições da corrente historiográfica História Cultural da Ciência, a qual apresenta a ciência como uma integrante do arcabouço cultural da humanidade. Por último, apresentamos as nossas considerações finais.

## 2 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentamos a metodologia utilizada em nossa pesquisa, evidenciando as estratégias para atender ao objetivo deste estudo, que se propõe a discutir o legado do engenheiro francês Sadi Carnot, no que se refere às suas contribuições para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e para o desenvolvimento dos conceitos científicos iniciais da Termodinâmica. Inicialmente, destacamos a natureza desta pesquisa. Na sequência, apresentamos a modalidade de pesquisa. Por último, os procedimentos executados para elaboração deste estudo.

### 2.1 Natureza da pesquisa

De acordo com Fonseca (2007), a pesquisa científica pode ser compreendida como atividade nuclear da ciência:

Ela possibilita uma aproximação e um entendimento da realidade a investigar. A pesquisa é um processo permanentemente inacabado. Processa-se através de aproximações sucessivas da realidade, fornecendo-nos subsídios para uma intervenção no real. A pesquisa científica é o resultado de um inquérito ou exame minucioso, realizado com o objetivo de resolver um problema, recorrendo a procedimentos científicos (FONSECA, 2007, p. 20).

Diante disso, com a evolução constante da sociedade, cada vez mais, problemas vão surgindo e demandando procedimentos científicos para serem solucionados. Nesse sentido, Gil (2002, p. 17) diz que “A pesquisa é requerida quando não se dispõe de informação suficiente para responder ao problema, ou então quando a informação disponível se encontra em tal estado de desordem que não pode ser adequadamente relacionada ao problema”.

Ao optar-se por uma nova pesquisa para suprir as lacunas existentes no conhecimento, algumas características serão determinantes e vão ditar o tipo de enfoque que o investigador vai dar para a realidade estudada. De certo modo, as abordagens mais comuns são quantitativa e qualitativa. A primeira vê a realidade como uma construção que se dá através de fatos objetivamente mensuráveis, enquanto a segunda compreende a realidade como constituída de fenômenos socialmente construídos (APPOLINÁRIO, 2006).

Diante disso, para a execução deste estudo, optamos pela realização de uma pesquisa com uma abordagem qualitativa, pois acreditamos que tal abordagem nos dará subsídios necessários para compreendermos a realidade vivida do estudioso aqui investigado. Conforme

nos aponta Fonseca (2007), a pesquisa qualitativa está voltada para a compreensão e explicação das dinâmicas das relações sociais.

Minayo (2001) acrescenta que a pesquisa qualitativa está preocupada em entender as características sobre o fenômeno, por meio de um estudo mais aprofundado sobre o objeto, objetivando obter informações mais detalhadas e chegar a um nível de realidade que não possa ser mensurável. Ou seja, “ela trabalha com o universo de significados, aspirações, crenças, valores e atitudes, o que corresponde a um espaço mais profundo das relações, dos processos e dos fenômenos que não podem ser reduzidos à operacionalização de variáveis” (MINAYO, 2001, p. 22).

Assim, partindo dessa compreensão minuciosa da realidade, seremos capazes de conceber uma discussão acerca da relevância das contribuições de Sadi Carnot para a ciência. Para isso, há uma necessidade em compreender as implicações das transformações políticas, econômicas, sociais e científicas da sua época nas suas escolhas, enquanto um estudioso das máquinas a vapor.

Portanto, por meio de uma pesquisa qualitativa com uma abordagem historiográfica, criaremos um perfil historiográfico do objeto investigado condizente com o contexto sociocultural, em que a sua produção foi criada e publicada, a partir da compreensão dos bastidores em que tudo ocorreu, sem romantizar os dados obtidos, buscando sempre a imparcialidade.

## **2.2 Modalidade de pesquisa**

Este estudo trata-se de uma pesquisa bibliográfica e historiográfica. Enquanto pesquisa bibliográfica, na concepção das autoras Lima e Mioto (2007), se caracteriza como um “conjunto ordenado de procedimentos de busca por soluções, atento ao objeto de estudo, e que, por isso, não pode ser aleatório” (p.38). Nesse sentido, para que uma pesquisa seja classificada assim, deve atender aos seguintes passos:

Definir e expor com clareza o método e os procedimentos metodológicos (tipo de pesquisa, universo delimitado, instrumento de coleta de dados) que envolverão a sua execução, detalhando as fontes, de modo a apresentar as lentes que guiaram todo o processo de investigação e de análise da proposta (LIMA; MIOTO, 2007, p. 39).

De acordo com Gil (2002), a vantagem de executar uma pesquisa bibliográfica consiste no fato de essa metodologia permitir que o pesquisador consiga, em um período curto de tempo, fazer uma grande cobertura dos fenômenos investigados. Fato esse que não pode ser alcançado,



quando pesquisado diretamente. Portanto, essa metodologia se sobressai em relação a outras, porque proporciona ao pesquisador o acesso a um leque muito maior de dados dispersos pelo espaço em pouco tempo.

Para Martins (2005), a História é compreendida como um conjunto de acontecimentos, situações e fatos que ocorreram no passado. Já a historiografia é vista como a produção dos historiadores, a qual é constituída e permite que possamos obter uma interpretação da época estudada: “ela é composta essencialmente por textos escritos e reflete sobre os acontecimentos históricos agregando-lhes um caráter discursivo novo. Procura desvendar aspectos da história, mas não é uma mera descrição da realidade histórica” (MARTINS, 2005, p. 116).

Nesse sentido, a autora supracitada acrescenta acerca da História da Ciência: “Em primeiro lugar, que se trata de um estudo metacientífico ou de segundo nível, uma vez que se refere a um estudo de primeiro nível que é a ciência” (MARTINS, 2005, p. 306). Esse tipo de estudo pode ser realizado a partir de duas abordagens: conceitual e não-conceitual. A abordagem conceitual (também denominada de interna ou internalista) discute os fatores científicos ligados à Ciência, como teorias e conceitos. Já a abordagem não-conceitual (também denominada de externa ou externalista) trata-se de um estudo voltado aos aspectos externos à ciência, como por exemplo, questões sociais, políticas e econômicas, os quais afetam o processo de construção dos conceitos científicos.

Por meio das informações obtidas por essas modalidades de pesquisa, é que obtivemos subsídios para reconstituir os acontecimentos históricos que permearam o Sadi Carnot nas primeiras décadas do século XIX, sem superficialidade e distorções. Como afirma Santos (2010), a investigação histórica exige que o pesquisador se afaste [...] “de visões dicotômicas da realidade social, de hierarquização ou compartimentação do saber e das diversas dimensões da vida.” (p. 13). Além disso, o empreendimento científico em história deve ser concebido longe de olhares preconceituosos e com a disposição de romper com a noção de linearidade, de progresso e evolução (SANTOS, 2010).

### **2.3 Procedimentos de pesquisa**

Para atingir os objetivos propostos deste estudo, remeteremos à coleta de informações, a partir de fontes primárias publicadas por Sadi Carnot, além das secundárias publicadas por outros autores, a exemplo de Mendoza (1981), Pascoal (2016), entre outros. Com isso, através da análise minuciosa desses materiais, poderemos obter uma visão geral sobre os contextos científico, político e econômico, em que o Sadi Carnot viveu na França do final do século XVIII

e início do século XIX. Desse modo, munidos de tais informações, poderemos construir seu perfil historiográfico, ancorado em sua realidade.

No que se refere aos tipos de fontes a serem consultadas para realização de um bom estudo, temos duas: fonte primária e fonte secundária. As fontes primárias consistem nos materiais produzidos pelos próprios cientistas na época da construção de um conceito ou teoria; por outro lado, a fonte secundária volta-se para materiais produzidos, posteriormente, por outros autores que contribuíram com a História da Ciência, produzindo novos conhecimentos (MARTINS, 2005).

Para realização de um bom estudo em História da Ciência, a autora sugere chegar-se o mais próximo possível dos materiais originais produzidos pelos próprios cientistas acerca do conhecimento científico que construíram. Isso dará mais legitimidade ao estudo, pois se está indo diretamente à fonte, sem passar por intermediários, o que, na sua visão, poderia alterar esses materiais.

Diante dessa exposição, a realização desta pesquisa seguiu as 9 etapas, baseada nas concepções de Gil (2002) e Lakatos e Marconi (2003), no que diz respeito aos procedimentos acerca de uma pesquisa bibliográfica: **1) Escolha do tema:** O papel de Sadi Carnot na formação da Termodinâmica enquanto Ciência; **2) Levantamento bibliográfico preliminar** nas bases de dados, com os seguintes descritores: “Sadi Carnot” e “Termodinâmica”, no qual constatamos que havia publicações suficientes a respeito do tema para a produção de um estudo. A partir da leitura desse material coletado, percebemos que estava sendo travada uma discussão a respeito da omissão do nome de Sadi Carnot como um dos fundadores da Termodinâmica em livros-textos didáticos-científicos. Nesse sentido, na **3) Formulação do problema** dessa pesquisa, optamos por investigar as contribuições do engenheiro francês Sadi Carnot para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e para o desenvolvimento dos conceitos científicos iniciais da Termodinâmica.

Na sequência, montamos um plano de trabalho que guiou a nossa pesquisa nas bases de dados e bibliotecas virtuais, resultando na formação do **4) Índice provisório:** a) Contexto histórico de Sadi Carnot: a era de transformações no velho continente; b) Sadi Carnot: a evolução das máquinas térmicas; c) A obra de Sadi Carnot; d) O contexto científico após a publicação das *Réflexions* do Carnot e e) Sadi Carnot e o ensino da Termodinâmica.

A partir dos assuntos estipulados para cada parte deste estudo, partimos para a **5) Busca das fontes**, que foi realizada, separadamente, para cada tópico em bases de dados e bibliotecas virtuais. O a) *Contexto histórico de Sadi Carnot: a era de transformações no velho continente* foi construído a partir de 12 referências que tratavam a respeito da História Geral, com destaque

para os momentos históricos contemporâneos do Sadi Carnot, como a Revolução Industrial, a Revolução Francesa e aspectos internos da França no final do século XVIII e início do século XIX. Essas referências oriundas da busca nas bases de dados, como *DeepDyve* e *Jstor*. Em ambas as plataformas, utilizamos os descritores: “Revolução Industrial”, “Revolução Francesa” e “França século XIX”. Não foi feita nenhuma filtragem por ano ou idiomas, sendo aproveitados todos os que atenderam ao recorte temático proposto no capítulo.

Esse procedimento descrito em relação à busca nas bases de dados foi refeito para os demais assuntos, apenas modificando-se os descritores. Para o b) *Sadi Carnot: a evolução das máquinas térmicas*, utilizamos “Sadi Carnot” e “máquinas térmicas/a fogo/vapor”, resultando na seleção de 14 referências que versavam sobre as máquinas térmicas e discutiam sobre as influências e vida do cientista investigado. Em relação ao assunto c) *A obra de Sadi Carnot*, fizemos uma busca no site da Biblioteca Nacional da França - BNF, na qual encontramos a obra original de 1824 das *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 adequadas ao desenvolvimento dessa potência) digitalizada, como também, no mesmo formato, a segunda edição de seu livro publicado em 1878 com as notas inéditas. Ambas foram lidas em sua língua original -o francês- e, posteriormente, traduzidas para a Língua Portuguesa. Por fim, complementou-se a discussão com 14 referências, oriundas das buscas em base de dados com os seguintes descritores “Sadi Carnot” e “obra”.

Os procedimentos supracitados se aplicam ao assunto d) *O mundo após a publicação das Réflexions do Sadi Carnot*, utilizando-se os descritores “Sadi Carnot” e “Réflexions”. Foram selecionadas 7 referências que abordavam a respeito da repercussão e dos desdobramentos que as ideias do Carnot (1824) obteve no meio científico de sua época e, por último, para o d) *Sadi Carnot e o ensino da Termodinâmica*, utilizamos os descritores “HFSC” e “História Cultural da Ciência”, objetivando buscar referências que abordassem tais assuntos para fundamentar a sugestão de proposta de aplicação deste estudo no ensino de ciências. Foram selecionadas 15 referências.

Com as fontes organizadas, partimos para a **6) Leitura do material coletado**, que aconteceu de forma exploratória com uma abordagem qualitativa. Como resultado dessa pesquisa exploratória, todas as obras passaram por um **7) Fichamento**. Na sequência, houve uma **8) Organização dos fichamentos**, de modo que as fichas foram separadas em conformidade com os assuntos estipulados no índice provisório. Por último, com base nas informações contidas nas fichas, realizou-se a **9) Redação** do texto final.

### **3 CONTEXTO HISTÓRICO DE SADI CARNOT: A ERA DE TRANSFORMAÇÕES NO VELHO CONTINENTE**

Neste capítulo, apresentamos o contexto histórico em que viveu o Sadi Carnot (1796 – 1832), na França, no que se refere aos aspectos econômicos, sociais, políticos e científicos, influenciados pela Revolução Industrial, iniciada pela Inglaterra e pela Revolução política na França, ambas no final do século XVIII, as quais influenciaram a primeira metade do século XIX.

#### **3.1 A Revolução Industrial na Inglaterra**

Nos momentos finais do século XVIII, na Inglaterra, observa-se o início da Revolução Industrial, que, de uma forma desigual, ultrapassou as suas fronteiras, se estendendo para outros países do velho continente e chegando a outras partes mundo. Como nos aponta Landes (2005), essa época ficou marcada como o período de ascensão do:

Complexo de inovações tecnológicas que, substituindo a habilidade humana pelas máquinas e a força humana e animal pela energia de fonte inanimada, introduzem uma mudança que transforma o trabalho artesanal em fabricação em série e, ao fazê-lo, dão origem a uma economia moderna (LANDES, 2005, p. 5).

Esse constitui um fato histórico importante para a sociedade moderna e contemporânea, pois é a partir dele que surgem os pilares fundamentais para a sociedade atual, uma vez que, nesta conjuntura, se deu o fortalecimento do capitalismo moderno e a consolidação da atual estrutura de classe - burguesia e proletariado (MANTOUX, 1988). A sociedade daquela época passou por grandes transformações econômicas, culturais, políticas, sociais e científicas, iniciadas pela Europa e, posteriormente, se estenderam pelo mundo. Tais transformações têm ligação direta com as inovações ocasionadas com o surgimento das máquinas a vapor, melhoria na obtenção e trabalho de novas matérias-primas, por meio dos avanços tecnológicos advindos dos conhecimentos empíricos de inventores e, posteriormente, científicos.

A Revolução Industrial, na visão de Landes (2005), se deu através da sucessão inter-relacionada a mudanças tecnológicas. Essas mudanças foram evidenciadas em três aspectos:

A substituição da habilidade e do esforço humano pelas máquinas – rápidas, constantes, precisas e incansáveis; a substituição de fontes animadas de energia por fontes inanimadas, em especial a introdução de máquinas para converter o calor em trabalho, proporcionando ao homem acesso a um suprimento novo e praticamente ilimitado de energia; e o uso de matérias-primas novas e muito mais abundantes,

sobretudo a substituição de substâncias vegetais ou animais por minerais (LANDES, 2005, p. 43).

Tais fatos fizeram com que a humanidade inaugurasse uma nova era na sua história, ainda não experimentada por outros povos, em séculos passados, que foi permanente, autossustentável, com grandes impactos na vida do homem ocidental, moldando sua sociedade e as futuras gerações.

A Inglaterra foi o primeiro país europeu a dar a largada no processo de industrialização, enquanto seus vizinhos, como a França, Alemanha e Itália viviam turbulências políticas, em seus territórios, por causa da Revolução Francesa e disputas territoriais, respectivamente. A respeito disso, em seu livro *A era das evoluções*, Hobsbawm (2007, p. 52) comenta que, “qualquer que tenha sido a razão do avanço britânico, ele não se deveu à superioridade tecnológica e científica” e nem mesmo à sua máquina térmica mais avançada da época: a máquina a vapor rotativa de James Watt – 1784, pois, naquela época, os conhecimentos disponíveis na Física ainda eram insuficientes para a tão almejada máquina ideal, que aliasse eficiência e consumo em um único aparelho.

O sistema escolar e a ciência dos ingleses eram precários e atrasados, respectivamente, em relação a seus vizinhos do continente, e não dariam suporte necessário para uma grande revolução como aquela. A França, concorrência direta dos ingleses na corrida da industrialização e influência no mundo, em relação à Inglaterra, possuía uma ciência muito mais avançada. Todavia, a Revolução Industrial, para acontecer, não precisou de refinamentos intelectuais, apenas de invenções modestas de inventores arditos, que baseados nas necessidades do meio de produção, construíram equipamentos úteis e funcionais.

No entanto, os autores Silva e Errobidart (2019) sugerem que a Inglaterra, apesar de estar atrasada, se comparada a outras nações, no que se referia à pesquisa científica, aproveitou-se do momento de estabilidade política para dar início à sua ascensão econômica. O pioneirismo inglês, no que diz respeito à industrialização, começou a ser construído um século antes da ‘explosão’ da revolução nas últimas décadas do século XVIII. Desde o século XVII, a sociedade inglesa passou por situações que corroboraram com a sua industrialização. As revoluções inglesas que ocorreram, naquele século, fizeram com que a burguesia emergente ganhasse espaço na política, obtendo cadeiras no parlamento, tornando-se uma força política no país e contrapondo com a aristocracia nas tomadas de decisões. Como consequência, essa força política que emergia passou a pautar as reformas no estado inglês, modernizando-o.

Em face disso, aumentaram cada vez mais o acúmulo de capital e prepararam o contexto da grande revolução. Como conquista desse período, temos a monetização naval, pois, naquela época, apesar de os britânicos serem fortes, no ramo naval, os produtos produzidos pelos ingleses saíam da ilha através de navios holandeses. No entanto, isso mudou com as reformas impostas, que obrigaram qualquer produto da ilha sair em navio inglês. Com isso, criou-se uma demanda e expandiu-se a navegação inglesa. Também temos a privatização das terras coletivas, provocando um êxodo rural para as cidades e, conseqüentemente, inchando os centros urbanos (BRAGA; GUERRA; REIS, 2003; ASHTON, 1971).

Com as cidades populosas e a crescente busca por trabalhos, houve o barateamento da mão-de-obra nestes grandes centros. Nesse sentido, houve um grande estímulo na produção manufatureira local, que se esbarrou na falta de matéria-prima e agravou, ainda mais, a questão da energia. Esses e outros fatores fizeram com que a burguesia inglesa buscasse meios para contornar tais problemas, desencadeando uma série de mudanças (BRAGA; GUERRA; REIS, 2003).

Os primeiros setores que sentiram os efeitos dessas transformações foram: a máquina a vapor, manufatura têxtil (com o surgimento de outras formas de tecelagem – a introdução de máquinas hidráulicas) e a mineração e metalurgia (IGLÉSIAS, 1990). Em pouco tempo, a Revolução Industrial “transformou a vida do homem ocidental, a natureza de sua sociedade, e o seu relacionamento com outros povos do mundo” (LANDES, 2005, p. 6).

Com isso, as novas formas de produção que surgiram, o sistema fabril e o novo contexto social modificaram aquela Inglaterra rural. A produção de bens materiais que eram produzidos, quase de forma artesanal em oficinas e salas de trabalhos domiciliares espalhados pelo país, foi substituída por usinas e fábricas, as quais reuniam, em um só lugar, toda a produção. Nesse sentido, as fábricas tornaram-se mais do que um espaço de trabalho. Tornaram-se um sistema de produção, no qual cada um dos seus integrantes tinha uma função e responsabilidade neste novo processo produtivo (MANTOUX, 1988).

Nesta nova lógica que iniciava, havia dois novos personagens: o empregador e um trabalhador. A função do empregador consistia em contratar mão-de-obra, fornecer equipamentos essenciais para a produção e supervisionar o seu uso; por último, comercializar o produto fabricado. Por outro lado, o trabalhador, que neste novo cenário perdeu a capacidade de possuir e fornecer os meios de produção, teve seu *status* reduzido a um operário a serviço de um contratante. Ambos, a partir deste novo contexto, estavam ligados através de um laço econômico: salário, relação de supervisão e disciplina (LANDES, 2005).

Nesta nova realidade, a disciplina ganhou uma nova dimensão. Antes da Revolução Industrial, os trabalhadores ingleses estavam acostumados com as flexibilidades que tinham com a supervisão feita por humanos. Basicamente, por limitações humanas, os empregados das grandes manufaturas viviam sob uma disciplina considerada frouxa. Todavia, isso mudou no chão da fábrica. Landes (2005) nos conta que as fábricas criaram uma variante de operários, que estavam condicionados ao controle implacável dos relógios e ao ritmo incansável das máquinas movidas por forças inanimadas.

Conforme o mesmo autor, o controle da mão-de-obra implicou na racionalização do trabalho. De certo modo, os donos das fábricas estavam plantando as sementes dos avanços tecnológicos que a Inglaterra usufruía no futuro. Em comparação com os meios de produção anteriores, as fábricas intensificaram as especializações das funções produtivas. Com a restrição de espaços, as dificuldades que surgiram, ao lidar com o homem e materiais de produção, exigiram melhorias na disposição e organização destes ambientes. Dessa maneira, a busca incessante por eficiência, atrelada ao aumento da produção, fez com que houvesse uma demanda nas inovações tecnológicas para suprir as exigências deste novo formato de organização social.

Nesse sentido, ainda na concepção de Landes (2005), as mudanças que ocorriam num setor provocavam modificações em outro. Portanto, muitos avanços e aperfeiçoamentos técnicos ocorreram por causa da interação entre campos distintos. Um bom exemplo disso diz respeito às melhorias e aperfeiçoamento das máquinas a vapor inglesas. Era quase impossível ter na época bons condensadores, se o setor metalúrgico não investisse em pesquisas por melhores métodos na produção de cilindros mais eficazes. Por isso, na Inglaterra do século XVIII, um avanço tecnológico ou uma necessidade em uma área fazia com que todo o sistema passasse por transformações.

A demanda por energia fez com que os ingleses investissem pesado no aperfeiçoamento de suas máquinas. Na época, a busca por carvão mineral fez com as minas chegassem a níveis muito baixos, se comparado ao solo, constituindo-se, assim, em ambientes inseguros para os mineiros por causa das inundações (BRAGA; GUERRA; REIS, 2003). Essa necessidade demandou aperfeiçoamento, para tornar as bombas mais eficientes e impulsionou os estímulos no setor das máquinas a vapor atmosféricas. Isso porque o carvão mineral mostrou-se uma alternativa abundante e barata de energia, para mover as indústrias numa época de falta de combustível. Aliada a isso, a ascensão de máquinas no setor têxtil pressionou, ainda mais, o seu aperfeiçoamento e a demanda por energia barata (LANDES, 2005).

Nessa perspectiva, o crescimento tecnológico desencadeou o avanço das ciências, em especial Física e Química, pois, para que houvesse o avanço das máquinas a vapor, no intuito de torná-las mais eficientes, necessitava-se de investimentos em pesquisas, que beneficiassem tais áreas. Para Baldow e Júnior (2010, p. 4), “A revolução industrial constituiu-se, sem dúvida, num dos principais fatores externalista para o desenvolvimento da física e, em particular, da Termodinâmica nos séculos XVIII e XIX”.

Aos poucos, a Inglaterra, ao longo do final do século XVIII, foi abandonando o seu ar rural e tornando-se um país, no qual sua população baseava-se nas cidades. As cidades inglesas industriais ficaram altamente populosas, com mão-de-obra abundante, e as fábricas se instalaram nesses espaços, formando o cenário ilustrado na Figura 1, típico da 1ª Revolução Industrial.

**Figura 1** - Indústria inglesa no século XVIII



**Fonte:** <http://www.historialivre.com/moderna/industria.htm> Acesso em jun. 2022.

Conforme aponta Hobsbawn (2007), a Inglaterra influenciou e formou a economia do século XIX. Concebeu, ainda, o modelo para as ferrovias e fábricas, causando uma ruptura nas estruturas sociais tradicionais do mundo não europeu. Todavia, foi a França a responsável por conceber a política e ideologia, que serviu de fundamento para o século XIX. Os franceses repassaram para o mundo o nacionalismo o modelo de organização técnica e científica. A sua ideologia ganhou o mundo, de modo que os ideais da Revolução Francesa de 1789 a 1799 se proliferaram por diversos povos ocidentais.

### **3.2 Revolução Francesa**



A Revolução Francesa foi um período marcante na história moderna da humanidade. Os ideais revolucionários almejados e conquistados pela luta do povo francês, guiados por uma burguesia sedenta por mais poder no campo das tomadas de decisões políticas, reverberaram pelo mundo todo. Esse período de revoluções durou 10 anos, entre 1789 e 1799, tendo como resultado principal a derrubada do Antigo Regime e o sistema feudal na Europa.

De acordo com Coggiola (2013), a França, no século XVIII, era o país mais importante e contraditório daquele continente. Apesar de, no final daquele século, ser considerado um país agrário, já tinha dado início a seu processo de industrialização, com diversas fábricas sendo instaladas em seu território, constituindo-se como o país mais populoso da Europa, ultrapassando a marca de 25 milhões de habitantes. Além disso, tinha a cidade de Paris como a capital do mundo, no que se referia às ciências e artes daquele período.

No entanto, era uma nação que vivia uma grande desigualdade, em relação à distribuição de poder e ao financeiro. A sociedade francesa era organizada em Estados. O 1º e 2º Estados eram compostos pelo clero e pela nobreza, respectivamente. Ambos formavam a aristocracia francesa, que tinha uma vida luxuosa, arcada pelos altos impostos cobrados ao 3º Estado, o qual era composto pela nova burguesia capitalista e trabalhadores do campo/fábricas. Esse último grupo vivia sob condições financeiras precárias, pois muitos passavam fome para poder cumprir com os pagamentos de impostos (COGGIOLA, 2013).

Nesse formato de sociedade, o rei ocupava o topo da hierarquia, exercendo poder sobre tudo: justiça, economia, diplomacia, paz, guerra e afins. O 3º Estado, composto por mais de 85% da população, era o responsável por manter a máquina pública funcionando, bem como pelos gastos da nobreza e do clero. No entanto, a ascensão das indústrias pela França fez com que a burguesia almejasse mais poder no cenário político, para ampliar seus investimentos na economia e contestar a vida luxuosa que a aristocracia possuía sem nenhum esforço (SALES; TREVISAN, 2020).

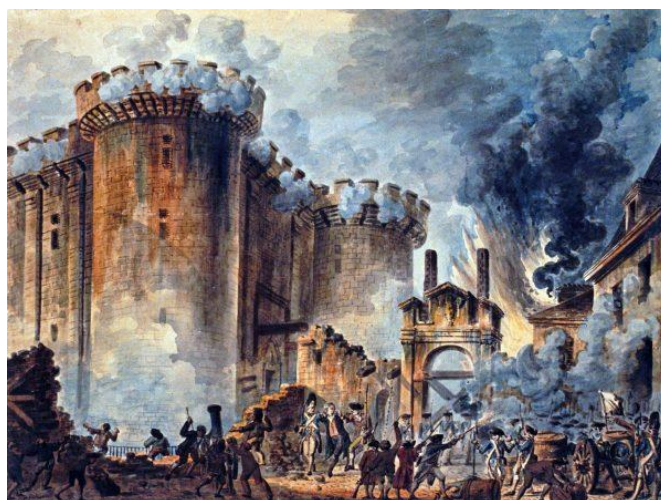
Momentos antes de a revolução explodir na França, o reino vinha sofrendo uma aguda crise orçamentária que respingava na economia, no social e no político. Objetivando contornar essa situação precária, o Rei Luiz XVI convoca assembleias para discutir os problemas e encontrar soluções. A Assembleia dos Notáveis foi a primeira realizada, a qual contou somente com a participação de membros do 1º e 2º Estados, ou seja, apenas os ricos foram convidados para discutir a crise do reino. Como resultado da reunião, houve o aumento de impostos para o 3º Estado pagar, gerando ainda mais revoltas nessa classe (MELLO; DONATO, 2011).

Para acalmar os ânimos, o Rei Luiz XVI convocou outra reunião, a qual, desta vez, teve a participação do 3º Estado, que ficou conhecida como Assembleia dos Estados Gerais. Tal

participação, por si só, não lhes garantiu serem ouvidos, pois, apesar de esse Estado ser composto por mais de 80% da população, o seu peso nas tomadas de decisões equivalia apenas a um voto – os demais Estados também possuíam um voto cada, no entanto, eram unidos, tornando-se, assim, maioria. Para mudar tal situação e ganhar relevância, o 3º Estado pediu ao rei mais deputados e mudanças na política de votos (MELLO; DONATO, 2011).

Essas reivindicações demoraram a ser apreciadas por Luiz XVI. Com isso, os deputados do 3º Estado saem da assembleia e lançam outra, denominada Assembleia Constituinte, na qual criam e impõem uma constituinte ao rei. Paralelamente a essas assembleias, a população enfurecida com a crise geral, toma as ruas de Paris em protestos e invadem a Bastilha, prisão oficial da Monarquia, desencadeando o início da Revolução Francesa com o simbolismo da Queda da Bastilha, como ficou conhecida em 1789, conforme evidenciado na quadro seguinte, do pintor francês Jean Pierre Houel, na Figura 2. A partir desses episódios, temos o início da queda do *Ancien Régime* na França.

**Figura 2** - Tomada da Bastilha que representa o início da Revolução Francesa, em 1789



**Fonte:** <https://www.meisterdrucke.pt/impressoes-artisticas-sofisticadas/Jean-Pierre-Houel/105210/A-tomada-da-Bastilha,-14-de-julho-de-1789.html> Acesso em jul. 2022.

As forças revolucionárias movidas pela burguesia tomam conta do país, provocando uma série de reformas. Em 1791, são publicados os Direitos do homem e cidadão. As terras do clero são tomadas pela burguesia, tornando-se funcionários públicos, de acordo com a constituinte aprovada e a realeza, a qual, acusada de traição, é decapitada pelos revolucionários (COGGIOLA, 2013).

Todo esse frenesi causado pela revolução ultrapassou as fronteiras da França, causando receio em outros reinos. Na tentativa de impedir que esse movimento se espalhasse pela Europa,

outras monarquias, como a Inglaterra, Prússia e Áustria, entram em guerra com aquele país, no intuito de abafar e reestabelecer a ordem. Todavia, não obtiveram sucesso e os revolucionários continuaram impondo a sua nova ordem.

Os Jacobinos, grupo mais ligado ao povo, assumem o poder na Nova República em 1793. Esse grupo, que comandou a França até o ano de 1794, instituiu grandes avanços sociais e políticos à nova república. Estabeleceu o fim da escravidão nas colônias e o fim dos direitos feudais no território francês. No entanto, seu comando ocorreu em um período de muita instabilidade política e, para manter a ordem e evitar a contrarrevolução que estava sendo idealizada fora e dentro das fronteiras, tiveram que radicalizar. Esse período ficou conhecido como o mais sangrento daquele movimento político (SALES; TREVISAN, 2020).

Em 1795, os Girondinos ascendem ao poder, grupo mais voltado para os interesses da burguesia. Eles governaram o país, durante 4 anos, tendo seus mandatos expirados em 1799, quando concretizou-se o fim da revolução. “Esta fase representou o fortalecimento da burguesia e a volta de alguns privilégios, como o voto censitário e o fim das leis sociais do período anterior” (SALES; TREVISAN, 2020). A Revolução Francesa veio ao fim, a partir de um golpe de estado dado pelo militar Napoleão Bonaparte. Tal episódio ficou conhecido na história como o Golpe de 18 Brumário (COGGIOLA, 2013).

A Revolução Francesa, na visão de Sales e Trevisan (2020), caracterizou-se por aspectos e pontos importantes, dentre os quais se destacam o fim do absolutismo e a criação do Estado burguês positivo. No entanto, “a população não adquiriu direitos, serviu apenas como uma manobra para o fortalecimento da França, isentos de qualquer tipo de participação em questões políticas ou econômicas” (SALES; TREVISAN, 2020, p. 142). Mesmo assim, não se pode negar que os dois pontos mencionados contribuíram para França ser uma potência no século XIX e contrapor com a Inglaterra na influência do mundo.

Nesse movimento político, o exército foi reformado e consolidado, o qual perdeu o caráter de voluntarismo. Nesse sentido, Mello e Donato (2011) acrescentam que o voluntarismo era representado pela “nobreza e detentores dos altos cargos da instituição. Com o fim desta política de organização militar, se instalaria na instituição a convocação obrigatória, estendido para todos os homens da nação” (p. 261). Assim sendo, em pouco tempo, a França chegou a ter o maior exército da Europa. Fato esse crucial para impedir a invasão de outras monarquias e dar glórias à França, sob a liderança de Napoleão Bonaparte, após a queda dos Girondinos no poder, nas guerras napoleônicas (COGGIOLA, 2013; HOBSBAWM, 2007).

No que se refere à Ciência, os períodos da pré-revolução e revolução foram uns dos momentos mais frutíferos em investimentos na área científica, pois, como apontam os autores Braga, Guerra e Reis (2003), a revolução representou:

A queda da Bastilha, além de ser o marco inicial do movimento revolucionário, foi também o início de um processo de questionamento das velhas estruturas científicas francesas [...] [...] A partir da Revolução, a ciência passou a ser percebida de forma mais clara como importante aliada do poder e da hegemonia nacional (BRAGA; GUERRA; REIS; 2003, p. 20).

Vale lembrar que antes desse movimento, a ciência francesa estava quase toda baseada na Academia de Ciências de Paris. Era tida como uma instituição altamente burocrática, com suas cadeiras ocupadas por poucos filósofos eleitos. Numa época em que o método científico estava ganhando grande relevância na sociedade pelas imposições econômicas, a Academia de Ciências de Paris não estava acompanhando o seu tempo e relutava contra as tentativas de reformas e a permissão que amadores, inventores e não cientistas pudessem contribuir com os debates científicos.

Entretanto, esse cenário mudou com os desdobramentos da revolução. Braga, Guerra e Reis (2003) contam que um dos atos dos revolucionários foi o fechamento da Academia de Ciências de Paris. Na linha de frente desse movimento político, estavam diversos matemáticos e filósofos naturais, entre eles, destaca-se o matemático Lazare Carnot (1753-1823), pai do Sadi Carnot, e o físico Gaspar Monge (1746-1818). Pessoas ligadas ao mundo científico, com contribuições relevantes em suas áreas, com origens no meio militar, em sua maioria, que já exercia um cargo de destaque no Antigo Regime ou que obtiveram um posto de comando durante o andamento da revolução, foram essenciais para o que ocorreu na França nos aspectos políticos e científicos entre 1789 a 1799.

A participação desses físicos e matemáticos na revolução política da França ajudou na criação e implantação de um projeto que visou democratizar a formação e a produção de conhecimentos no país, dando robustez a uma política que já vinha sendo implantada pela Monarquia diante da valorização da Ciência como uma estratégia para a corrida industrial.

Como resultado disso, em toda a França, verificou-se o surgimento de instituições de pesquisa, voltadas para diversas áreas do conhecimento. Entre essas, destaca-se a fundação da Escola Politécnica de Paris, que tinha como objetivo a formação de engenheiros, baseados nos conhecimentos da Matemática, Física e Química. O modelo de Ciência dos franceses foi adotado em diversos países da Europa continental ao longo da primeira metade do século XIX, como alertam Braga, Guerra e Reis (2003).

De acordo com Hobsbawn (2007), a era revolucionária que a Europa viveu, especialmente, na França, trouxe muitas contribuições para a expansão e fortalecimento da ciência. As imposições provocadas pela realidade de exploração do comércio abriram novos horizontes aos estudos científicos. Neste período, também, a ciência ultrapassou as fronteiras da Europa ocidental e chegou a outros povos e países, ampliando o leque de conhecimento acumulado e contribuições de novos cientistas.

### **3.3 A França na primeira metade do século XIX: império, industrialização e crise operária**

A França inicia o século XIX com um novo regimento político, após a queda da monarquia e os 10 anos de revolução, a qual estava sob os ares de uma República. No final do século XVIII, o militar Napoleão Bonaparte deu um golpe de estado nos Girondinos e assumiu o poder, que ficou, em suas mãos, pelos próximos 15 anos.

A ascensão de Napoleão Bonaparte, como um mito e líder do povo francês no início do século XIX, aconteceu de forma meteórica. Um jovem revolucionário, descontente com política vigente e ambicioso da ilha de Córsega francesa, iniciou a sua carreira militar pelo caminho mais fácil para ser membro do Exército Real, a artilharia. Esse ramo era um dos poucos segmentos da instituição que não precisava de competências técnicas comprovadas para adesão de novos componentes. Com uma carreira de sucesso e lealdade aos revolucionários franceses, chegou ao posto de general. Tal fato o colocou à frente de batalhas importantes que o destacou como um dos grandes soldados da República. De acordo com Hobsbawn (2007, p. 111), “o poder foi meio atirado sobre seus ombros e meio agarrado por ele quando as invasões estrangeiras de 1799 revelaram a fraqueza do Diretório e a sua própria indispensabilidade”. Aproveitando a fraqueza dos revolucionários, Napoleão emergiu ao poder.

Seu governo Napoleão é dividido em duas partes. A primeira consistia em um consulado, entre 1799 a 1804, que era dividido em três, tendo seu cônsul como o principal e mais importante. Esse primeiro governo foi responsável pela consolidação da burguesia como força econômica, permitindo que o processo de industrialização do país avançasse. Como consequência disso, investiu fortemente no setor financeiro, criando o Banco Central da França e código de leis – código napoleônico, que garantia o respeito às liberdades individuais, baseado no princípio iluminista, como também na educação, a qual tornou-se gratuita e obrigatória.

Esses feitos o tornaram muito popular e, em 1804, através de um plebiscito, foi escolhido pela maioria dos votantes para ser o imperador da França. Seu segundo governo, o

império, ocorreu entre 1805 e 1815. O império foi marcado pela expansão militar, período em que a França conquistou muitos territórios pela Europa por meio de invasões, sob os ideais da nova burguesia. No entanto, a Inglaterra capitalista não queria concorrência com a França no continente, aliou-se com Prússia, Áustria e Rússia para combater o governo de Napoleão. Em contrapartida, esse invocou um movimento de isolar a Inglaterra, invadindo todos os países costeiro que faziam negócios e fronteira marítima com ela, já que não podia invadir a ilha. Seu governo começou a ruir, quando tentou invadir a Rússia. Apesar de ter um exército maior e bem mais treinado, perdeu a batalha por interferências climáticas. Fragilizado, numa guerra direta com a Inglaterra, perdeu e foi exilado na ilha de Santa Helena, vindo a falecer no ano de 1820.

Quanto às guerras da França contra o resto do mundo e a sua relação com a Inglaterra, Hobsbawm (2007) comenta que o conflito entre os dois países dominou as relações internacionais europeias por quase um século. Os britânicos compreendiam esse conflito como puramente econômico, por meio do qual buscavam “eliminar seu principal competidor para alcançar o total predomínio comercial nos mercados europeus e o controle total dos mercados coloniais e ultramarinos, que por sua vez implicava o controle dos mares” (HOBSBAWM, 2007, p. 123).

Com o império francês saindo derrotado, os países vitoriosos - Inglaterra, Rússia, Prússia e Áustria - se reuniram para reorganizar as fronteiras da Europa. Tal episódio ficou conhecido como tratado da Santa Aliança, que consistia em um acordo entre os países absolutistas para impedir qualquer tentativa da França de se erguer novamente, através dos ideais burgueses, pois, na época, a Inglaterra não queria outra nação travando sua expansão econômica.

Em se tratando de expansão econômica, apesar de ter registrado avanços na sua industrialização no final século XVIII, a França iniciou o novo século com dificuldades na modernização de seus meios de produção, apesar de a política do consulado ser favorável. De acordo com Perrot (2017), a industrialização na França foi lenta e quase manual, pois diversos obstáculos impediam que o país se entregasse, definitivamente, à modernidade introduzida pelas máquinas. Entre eles, destacam-se a abundância de uma mão-de-obra barata e o custo elevado para arcar com a mecanização da produção, afastando os pequenos burgueses franceses, por muito tempo, da nova realidade europeia. Naquela época, o discurso predominante para a pequena burguesia era a do emprego e não o da produção. O lema para abrir novas empresas no país consistia em “dar trabalhos aos pobres, utilizar os braços ociosos” (PERROT, 2017, p. 17).

No entanto, o discurso mudou com os acontecimentos políticos da Revolução Francesa, que desencadeou a queda do *Ancien Régime* e deu mais poderes à burguesia. Com os fatos anteriores, Revolução e implantação do império, o novo século na França, inicia-se com o país registrando uma diminuição de sua mão-de-obra, forçando os patrões a buscar a auxílio das máquinas para manter a produção. Outros fatores também corroboraram com essa busca: a classe operária existente passou a reivindicar melhores condições de trabalhos nas manufaturas/fábricas e melhores salários. Com isso, para contornar tais situações, os donos dos meios de produção da França optam por uma mecanização forçada, a qual provocou uma série de conflitos entre os patrões e operários ao longo da primeira metade do século XIX (PERROT, 2017).

De um lado, os operários reivindicavam melhores condições de trabalhos e um salário condizente com a excessiva carga horária que passavam nas fábricas. Do outro, a máquina passou a ser vista pela burguesia como uma arma contra a rebeldia daqueles operários, considerados como ‘turbulentos e preguiçosos’, que faziam oposição às condições exploratórias. Nesse sentido, interpretavam que:

Ela (máquina) permite eliminá-los, substituí-los por uma equipe de engenheiros ou técnicos, racionalizadores por natureza, mais ligados à direção das empresas. Ela permite que o patronato se assenhoreie da totalidade do processo de produção (PERROT, 2017, p. 19).

Com isso, o processo de mecanização dos meios da produção avançou. As máquinas são compreendidas como a resolução de todos os problemas do sistema de produção. Havia propagandas de que a modernização era tão revolucionária, que as máquinas não requeriam qualificações para serem operadas, portanto, os patrões podiam contratar mão-de-obra despreparada, mulheres e crianças e abrir mãos dos operários que resistiam às imposições do novo sistema de produção.

Como resistência às implantações das máquinas nos meios de produção e exploração da mão-de-obra em condições inadequadas de trabalho, carga horária excessiva e baixos salários, pela França e Inglaterra, percebeu-se o surgimento de movimentos e grupos que foram uma das bases das revoluções de 1830 e 1848. Dentre esses, destacam-se o Ludismo, movimento de trabalhadores revoltados, organizados politicamente contra a implantação das máquinas nos meios de produção, no início da Revolução Industrial, os quais invadiam as fábricas para quebrar as máquinas, e o Cartismo, grupo que buscava melhorar as condições dos trabalhadores através da política. Na França, o movimento de resistência, Ludismo, era mais perceptível em épocas de crises políticas e econômicas, nas quais era observado um aumento do desemprego,

situação que colocava a massa trabalhadora contra os donos dos meios de produção (HOBSBAWM, 2007).



## **4 SADI CARNOT: A EVOLUÇÃO DAS MÁQUINAS TÉRMICAS**

O presente capítulo apresenta os acontecimentos importantes que ocorreram no processo de evolução histórica do surgimento e desenvolvimento das máquinas a vapor, os quais marcaram o pensamento de Sadi Carnot e constituem a base, na qual ele se ancorou para formular suas concepções acerca do aperfeiçoamento dessas máquinas e o início do desenvolvimento da Termodinâmica. Na sequência, discutimos a respeito de alguns fatos acerca da sua vida pessoal, acadêmica e profissional.

### **4.1 A evolução das máquinas a vapor antes de Sadi Carnot**

Apesar da indiscutível inteligência do ser humano perante os animais irracionais, há fatos que sempre lhe inquietaram na busca por uma explicação, a exemplo dos voos rasantes dos pássaros no céu, com revoadas magníficas. Nesse sentido, a humanidade sempre teve a ambição de obter uma máquina ideal que suprisse suas necessidades e lhe desse mais opções de exploração do seu ambiente (QUADROS, 1996).

Ao longo da história da humanidade, diversas mentes brilhantes, baseadas e limitadas nos conhecimentos de suas respectivas épocas, estiveram na linha de frente, na busca por esses tão almejados aparelhos revolucionários. Quadros (1996) destaca que, no século XVII, a atenção da humanidade, no contexto dos desdobramentos do Renascimento na Europa, estava voltada para duas grandes ambições que acompanhara o ser humano em toda sua trajetória: voar e dominar o fogo.

No que se refere a voar, a humanidade conseguiu, nos séculos seguintes, fazer o seu primeiro voo. Entretanto, naquela época, os benefícios e maravilhas que podiam se obter com o poder do fogo já era de conhecimento público e admirados por todos. No entanto, uma questão ainda precisava ser resolvida. Tratava-se de como o fogo poderia ser dominado para poder controlá-lo (QUADROS, 1996).

Essa ambição da busca por compreender o poder do fogo e controlá-lo é antiga. Dias (1990) apresenta o fogo como uma fonte de calor e luz, sendo esses considerados como os ingredientes da vida, com ‘poder expansivo’, no qual os seres humanos encontraram as condições ideais, para usá-lo e transformar seus mundos. Outros conhecimentos investigados, mas já presentes na bagagem intelectual dos povos antigos é ‘que o ar aquecido expande e o ar esfriado contrai’.

Em seus estudos, a autora supracitada argumenta que muitos filósofos da Grécia Antiga nos deixaram como herança algumas discussões interessantes acerca de fenômenos termopneumáticos. No entanto, só foi perto do final da Antiga Era que começou a ser construída uma concepção mais robusta e com desdobramentos em tecnologia. Os filósofos Filo de Bizâncio (Século III a.C) e seu seguidor Heron de Alexandria (século I a.C.), “entenderam que a expansão e a dilatação do ar só seriam possíveis se o ar fosse constituído por partículas muito pequenas, entre as quais houvesse espaços vazios, o chamado ‘vácuo disseminado’” (DIAS, 1990, p. 61). Esses também se destacavam na engenharia, principalmente o Heron, ao perceber que, através do aquecimento, a expansão do ar poderia ser usada para empurrar objetos. Nesse sentido, o poder expansivo do fogo foi transformado em um tipo de movimento (DIAS, 1990).

Como resultado disso, o Heron de Alexandria criou a primeira máquina térmica movida a vapor, de que se tem conhecimento na história, a qual ficou conhecida como Eolípola (PASCOAL, 2016), ilustrada na Figura 3:

**Figura 3** – Máquina a vapor de Heron de Alexandria



© 2000 Encyclopædia Britannica, Inc.

**Fonte:** Enciclopédia Britânica, 2000.

Esse artefato rudimentar era constituído basicamente por um caldeirão suspenso em três pés, preenchido com água, o qual servia de base para dois canos que estavam ligados a uma pequena esfera de metal e oca, com dois turbos destorcidos, como evidenciado na figura acima. Quando em operação, a queima do combustível acontecia abaixo do caldeirão (madeira ou azeite) e o vapor gerado pela ebulição da água era canalizado para que essa esfera evacuasse o vapor pelas duas válvulas que faziam a esfera girar (SANTOS, 2018, p. 68).

De acordo com Santos (2018), a primeira máquina de que se tem conhecimento na história não tinha nenhuma utilidade aparente, apenas servia para demonstrações públicas de como a energia do fogo era convertida em energia do movimento, ou seja, mostrava como a energia do fogo produzia trabalho mecânico. Questão essa explorada mais a fundo quase 1.600 anos depois.

Referente à compreensão inicial sobre o fogo e desenvolvimento das máquinas movidas a vapor, Cimbliris (1991) comenta o seguinte:

Embora a partir da descoberta do fogo tenha se desenvolvido uma tecnologia do calor inteiramente satisfatória, ela parece ter sido criada por artesãos anônimos. Quando os clássicos, como por exemplo Lucrecio, falam do calor, é na qualidade de fenômeno natural, mas num contexto filosófico e nunca utilitário. Quando Heron constrói dispositivos funcionais, precursores das máquinas térmicas atuais, é na qualidade de brinquedos mágicos destinados a espantar o vulgo (CIMBLERIS, 1991, p. 40).

Contrapondo-se a isso, Dias (1990) destaca que os antigos não tiveram uma ideia clara sobre o funcionamento do fogo, calor, frio e expansão e contração do ar, porque deixaram como herança explicações, na maioria dos casos, obscuras e ambíguas. No entanto, no que se refere aos fenômenos físicos empregados nas máquinas a vapor, Heron construiu uma máquina que nada difere das modernas, criadas no contexto de mudanças no continente europeu dos séculos XVII e XVIII, a exemplo da Máquina de Savery (século XVII) e a Máquina Newcomen (século XVIII).

A autora amplia sua visão, afirmando que é aceitável que a criação das máquinas térmicas é uma invenção dos povos antigos, porém a compreensão de seu funcionamento é uma conquista moderna, a qual serviu de alicerce para a construção da Teoria do Calor e teve como fator impactante o interesse econômico. Ou seja, outros fatores, que acometiam a Europa no século XVIII, foram primordiais para que tais invenções sofressem as melhorias necessárias e houvesse sua inserção no contexto econômico.

Nesse sentido, os maiores avanços no desenvolvimento dessas máquinas ocorreram a partir do século XVII, movidos por uma necessidade energética que enfrentava a Europa, principalmente, a Inglaterra. Por muitos séculos, a principal fonte de energia daquele continente estava baseada na exploração de suas florestas para a produção do carvão vegetal. No entanto, essa fonte entrou em crise no início daquele século, pois quase todas as florestas foram devastadas. Desse modo, os ingleses, para suprir as suas demandas, buscaram novas fontes energéticas, as quais foram suplantadas pela exploração do carvão mineral, que era abundante na Inglaterra.

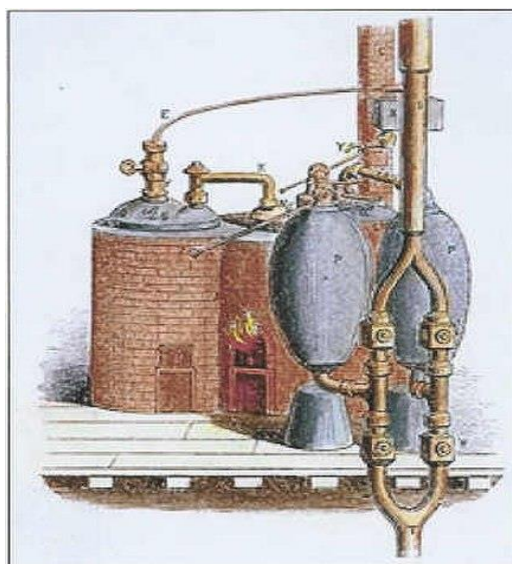
Na fase inicial da exploração do carvão mineral para aquecer a Inglaterra, com as tecnologias limitadas da época, restringindo-se a bombas de sucção movidas por animais, os mineiros não podiam ultrapassar o limite de 10 metros de profundidade da superfície da terra, por causa dos constantes alagamentos e inundações que as minas inglesas sofriam (BRAGA; GUERRA; REIS, 2003).

Assim, ancorado nos conhecimentos disponíveis na época sobre o tema, o militar inglês Thomas Savery (1650–1715) desenvolveu e patenteou, em 1698, um protótipo de máquina, que não dependia de força animal e rapidamente tomou as minas do país, aperfeiçoando a extração do carvão mineral (BRAGA; GUERRA; REIS, 2003).

**Figura 4** - Máquina a vapor de Savery no Museu de Artes e Ofício de Paris



**Figura 5** – Máquina de Savery instalada numa mina de carvão mineral



**Fonte:** [https://stringfixer.com/pt/Thomas\\_Savery](https://stringfixer.com/pt/Thomas_Savery). Acesso em jul. 2022.

Acima, na Figura 4, temos a máquina de Thomás Savery, representada por uma réplica em exposição no Museu de Artes e Ofício de Paris e, na Figura 5, uma ilustração de como tal máquina era instalada nas minas de carvão no final no século XVIII, a qual entrava em operação quando um cilindro grande fabricado de metal era preenchido por completo de vapor, oriundo de um ebulidor. Após isso, uma válvula era acionada para suspender o fornecimento de vapor. Com o vapor suspenso, o cilindro era resfriado com um banho de água à temperatura ambiente. Com essa ação, o resfriamento forçado desencadeava a condensação do cilindro, originando o surgimento de um vácuo em seu interior. Através desse vácuo, a água era bombeada do fundo das minas de carvão por, no máximo, até dez metros. Esse processo era reiniciado por uma outra descarga de vapor no cilindro, a qual expulsava água residual (QUADROS, 1996).

Essas máquinas apresentavam alguns problemas que interferiam negativamente no seu desempenho e segurança. 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. Para que essas máquinas chegassem à sua melhor potência, a pressão tinha que ser elevada, de modo que algumas dessas máquinas chegaram a operar em três atmosferas, atingindo o limite de segurança de sua operação. Como alternativa para extração do carvão de minas profundas, eram usadas duas ou mais máquinas sequenciadas, uma atrás da outra, resultando em uma operação cara e suscetível a vários defeitos (LANDES, 2005, p. 95).

Outro problema sério que deveria ser corrigido na época, como alerta Landes (2005), tratava-se do desperdício de energia que era enorme. Tal desperdício acontecia por causa do aquecimento e resfriamento alternado do receptor, que em conjunto com a ausência de um pistão, o vapor entrava em contato direto com a água fria, ocasionando perda de eficiência.

Assim sendo, as soluções para alguns dos problemas dessa máquina vieram das mãos de outro inglês, o pastor Thomas Newcomen (1664 – 1729), que construiu outra máquina a vapor, resolvendo os principais problemas da máquina anterior. Na invenção do Newcomen, a bomba e o cilindro estavam separados. Na Figura 6, apresentamos uma ilustração desse artefato tecnológico:

**Figura 6** - Máquina a vapor de Newcomen



**Fonte:** <https://pt.demotor.net/maquina-a-vapor/historia> Acesso em dez. 2022.

Quando esse artefato tecnológico estava em operação, de acordo com Santos (2018), o vapor acumulado, que se originava com aquecimento da água através de uma fornalha, era direcionado para dentro do cilindro contendo um êmbolo móvel. Com o vapor enchendo todo o volume do cilindro, o embolo se movimentava até encostar na parte superior do recipiente. Para que o êmbolo retornasse para sua posição inicial, a válvula que permitia a entrada do vapor era fechada e a válvula que ligava o cilindro à cisterna era aberta, permitindo a entrada de água à temperatura ambiente, condensando o vapor no interior do cilindro. Com isso, permitia-se que a pressão atmosférica empurrasse o cilindro para sua posição inicial. Portanto, o ciclo era reiniciado.

Em comparação com a máquina de Savery, a de Newcomen apresentou duas vantagens que a colocava a frente nos aspectos de economia e desempenho para o contexto da época. As mudanças feitas pelo Newcomen possibilitaram que não houvesse uma perda de calor, por causa do contato com água bombeada. A outra consistia na utilização de um pistão. O acréscimo de um pistão resultou em um aumento de força, sem interferir no aumento da pressão do vapor. Essas alterações tornaram as máquinas de Newcomen mais seguras e com uma potência maior em relação à versão anterior (LANDES, 2005).

De acordo com Braga, Guerra e Reis (2003), o Thomas Newcomen se inspirou nos trabalhos do francês Denis Papin (1647 – 1714) para construir a sua máquina a vapor. Papin estudou medicina, no entanto, dedicou boa parte de sua vida à elaboração de equipamentos para fins experimentais. Como seguiu o protestantismo em uma França católica, refugiou-se para a Inglaterra por causa de perseguições religiosas. Na ilha, no final do século XVII, contemporâneo a Thomas Savery, passou a construir máquinas a vapor. Em projetos de máquinas a vapor que envolvia o Christiaan Huygens (1629-1695), quando retorna a Paris, construíram mecanismos que “utilizava a produção de vácuo pela condensação do vapor. Papin e Huygens perceberam que a condensação do vapor produzia o movimento cíclico de um êmbolo e que isso poderia ser aproveitado” (BRAGA; GUERRA; REIS, 2003, p. 25).

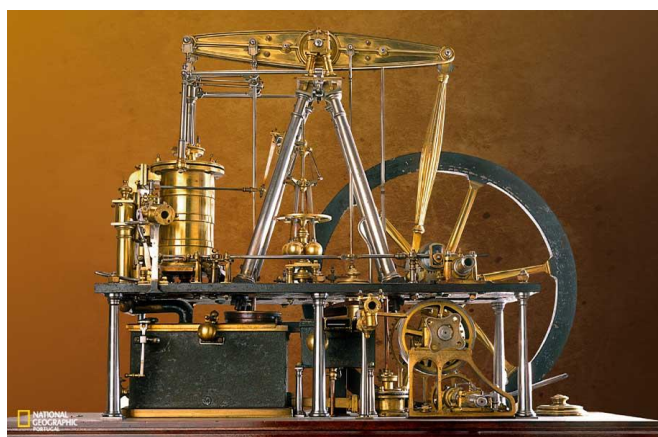
Portanto, a invenção do Newcomen se baseou nesta e em diversas outras ideias que vinham sendo idealizadas na época. De acordo com Silva e Errobidart (2019), o sistema de êmbolo-pistão usado por Newcomen idealizado por Papin, foi adicionado à máquina térmica através do cilindro. Tal dispositivo era móvel apenas ligado a uma barra, que não interferia na sua mobilidade no interior do recipiente. No projeto original, a água era aquecida no interior do cilindro, a qual transformava-se em vapor, que, por sua vez, impulsionava o movimento de subida do pistão até chegar na parte superior do cilindro, o qual seria preso por uma presilha. Na sequência, o cilindro passava por um resfriamento, visando à condensação do vapor no seu

interior. Após isso, o pistão que estava preso à presilha é solto. Por causa da ação da pressão atmosférica, o pistão volta para a sua posição inicial. Esse processo era suficiente para ocasionar movimento na máquina e deslocamento da massa que se desejava levantar (SILVA; ERROBIDART, 2019, p. 78). Uma evolução em comparação à versão anterior.

O aperfeiçoamento da máquina a vapor do Newcomen veio do construtor de instrumentos James Watt (1736–1819), funcionário da Universidade Glasgow. Tal universidade utilizava as máquinas em miniatura para demonstrações em aula de Física e Engenharia. Uma dessas máquinas apresentou defeito e foi enviada para o reparo. Após consertada, o engenheiro percebeu que a réplica fazia poucos ciclos e parava de funcionar de maneira repentina, como também apresentava baixo desempenho em comparação com a máquina original. Watt constatou que a forma como a máquina funcionava não era a maneira mais eficiente, pois havia desperdício de trabalho, por causa que, depois do resfriamento do cilindro, ele era reaquecido, fazendo com que não chegasse ao seu potencial máximo. Nesse sentido, o Watt passou a buscar soluções para corrigir tais limitações, já que não o considerava como defeito (BRAGA; GUERRA; REIS, 2003).

De acordo com Quadros (1996), Watt seguiu um novo caminho para aumentar a eficiência da máquina a vapor de Newcomen, resultando no surgimento de um novo equipamento patenteado em 1765, representado na réplica ilustrada na Figura 7.

**Figura 7** - Réplica da Máquina James Watt



**Fonte:** <https://nationalgeographic.pt/historia/grandes-reportagens/3002-james-watt> Acesso em jul. 2022.

Primeiro, o engenheiro determinou o consumo de vapor ideal para cada ciclo, pois o excedente se perdia quando entrava em contato com o cilindro frio. Tal desperdício era a medida da ineficiência da máquina. Segundo, constatando o desperdício de vapor, buscou maneiras de diminuí-lo. Nesse sentido, se ancorou nos conhecimentos já existentes de calor específico dos

materiais para a variação de suas temperaturas. Com isso, substituiu o metal do cilindro por madeira, que preparou em um processo especial, no entanto, não se mostrou uma boa ideia, pois rachava com facilidade em altas temperaturas. Conforme, Silva e Errobidart (2019), Watt concluiu que o bronze era o mais indicado para a substituição, pois era o melhor condutor de calor conhecido na época.

Por fim, ele procurou a medida exata de água para a condensação do vapor, pois, havendo excesso, resfriaria o cilindro. Após diversas tentativas frustradas, misturando água e vapor, no intuito de encontrar o equilíbrio de temperatura entre essas substâncias. Com explicações científicas oriundas do seu contexto acadêmico, o Watt encontra a medida de água adequada, que evita, em partes, o resfriamento do cilindro. Tais modificações foram suficientes para aumentar a eficiência da máquina. No entanto, comprometeu a potência. A solução veio a partir da introdução de mais um cilindro. Como afirma Quadros (1996), “Dois cilindros, um sempre quente, onde o vapor produz trabalho mecânico, e outro sempre frio, onde o vapor seria condensado, esta era a máquina de Watt” (QUADROS, 1996, p. 29).

O acréscimo de um novo condensador separado fez com que a energia, que era desperdiçada no aquecimento do cilindro, fosse poupada. Essa inovação trouxe grandes contribuições para a ‘era do vapor’, pois, além da economia que tais máquinas proporcionavam em comparação com a versão de Newcomen, Watt e sua máquina a vapor estavam inaugurando uma fase de busca incessante pela eficiência dessas máquinas a vapor. Como consequência, observamos a proliferação desse tipo de máquinas por diversos ramos da economia, configuradas como máquinas motriz universal (LANDES, 2005).

## **4.2 Trajetória de vida e influências do Sadi Carnot**

O Nicolas Léonard Sadi Carnot nasceu em 1 de julho de 1796 na sede do senado francês, *el Palais du Petit-Lexembourg* (GUERRA, 2021), em um período de grandes transformações pelo qual o continente europeu estava passando. De um lado, a revolução política na França estava nos seus momentos derradeiros, chegando ao fim em 1799 e deixando como legado toda a parte ideológica do liberalismo que o mundo absorveu, posteriormente (COGGIOLA, 2013). Do outro, a Inglaterra estava em plena ascensão econômica e militar com os desdobramentos da Revolução Industrial, tornando-se o ‘celeiro do mundo’ e uma potência tecnológica com os aperfeiçoamentos das máquinas a vapor (PASCOAL, 2016).

Neste mundo polarizado entre os franceses e ingleses, cresceu o jovem Carnot. Pouco se sabe acerca dos seus primeiros anos de vida. No entanto, sabemos que cresceu numa época



muito favorável às ciências, pois, com os desdobramentos da Revolução Industrial e as tecnologias emergentes, na Europa, principalmente, na França, por causa da rivalidade com os ingleses no campo econômico e militar, o Estado francês estava consciente da importância do uso da Ciência para tais fins (PASCOAL, 2016). Nesse sentido, havia fortes investimentos para a formação de engenheiros com uma grande base matemática, química e física na Escola Politécnica de Paris, ampliando a cultura tecnológica e científica no país (BRAGA; GUERRA; REIS, 2003).

Nesse sentido, até apresentar a idade mínima para ser admitido na Escola Politécnica de Paris, Carnot teve acesso aos conhecimentos da Matemática e Ciência em casa, através do seu pai, o matemático Lazare Carnot. Aos 16 anos, em 1812, Carnot entrou na instituição, na qual teve como professores Siméon Denis Poisson, André-Marie Ampère e François Arago. No ano seguinte, em 1813, entra para a artilharia do exército francês. Fato esse que o levaria a ser transferido para escola militar da instituição. No entanto, pela pouca idade conseguiu permissão para terminar a sua graduação na Escola Politécnica de Paris. Obteve o título de graduado em 1814, período que coincidiu com o início do declínio do Império de Napoleão Bonaparte (GUERRA, 2021; CARNOT, 1878).

Na Figura 8, temos a imagem do Sadi aos 17 anos de idade, retratado em um quadro pintado pelo famoso artista Bailly (1761 – 1845). Tal obra coincide com a imersão do jovem Carnot no exército:

**Figura 8** - Sadi Carnot aos 17 anos



**Fonte:** [https://pt.wikipedia.org/wiki/Nicolas\\_L%C3%A9onard\\_Sadi\\_Carnot](https://pt.wikipedia.org/wiki/Nicolas_L%C3%A9onard_Sadi_Carnot). Acesso em jun. de 2022.

Essa foi uma fase de turbulência política, na qual Napoleão Bonaparte estava enfraquecendo na liderança da França e vendo, cada vez mais, os seus opositores simpáticos

com um regime monárquico se fortalecendo para a tomada de poder. Os países rivais da França lhe cercavam externamente, esperando o momento adequado para atacar. Em um desses ataques, que culminou no cerco de Paris em março de 1814, o jovem Sadi Carnot lançou-se definitivamente na vida militar, buscando defender a soberania de seu país, como reporta o seu irmão Hipólito Carnot (1878), nas notas biográficas que acompanha a segunda edição das *Réflexions*.

O serviço militar ocupou boa parte da vida de Sadi Carnot, o qual esteve submetido a muitos altos e baixos. Por ser portador de um sobrenome influente nas forças armadas da França, já que seu pai foi um dos mais respeitados estrategistas e Ministro de Guerra de Napoleão, Sadi Carnot era tratado com muita bajulação por partes dos seus superiores e demais colegas. Adepto de uma vida sem holofotes, optou por se refugiar para locais remotos da França, a fim de que pudesse exercer a sua profissão de engenheiro nas missões do exército sem ser reconhecido (PASCOAL, 2016).

Todavia, Sadi Carnot não estava mais satisfeito com a vida militar, pois o ofício que desempenhava de um simples tenente não lhe permitia ter uma vida ativa nos estudos, pesquisa e cultura, a qual deixara quando frequentava a Escola politécnica. Carnot teve a oportunidade de mudar esse quadro no ano de 1818, quando um decreto real autorizou a progressão de patente de soldados de todas as armas através de exames. Nesse ínterim, Sadi Carnot conseguiu o *status* de tenente do estado-maior em 1819, o qual lhe possibilitou pedir licença do serviço militar por tempo indeterminado (CARNOT, 1878).

Fora do exército, o tempo foi bem aproveitado. O Sadi Carnot voltou a seus estudos científicos acerca das máquinas a fogo, alternando com a cultura da Arte, História, Política e Música. Esse período trouxe grandes resultados, pois foi nessa época que escreveu e publicou a sua única obra *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propres a Développer Cette Puissance*, em 1824. Após a publicação de sua monografia, Sadi Carnot continuou se aprofundando nos temas que discutia ao longo de sua obra.

Essa fase de sua vida teve que ser interrompida em 1826, para voltar para o exército. No ano seguinte, pelo tempo de serviço, obteve a patente de antiguidade na tropa e como consequência foi elevado a posto de capitão. Porém, as forças armadas tornaram-se um fardo para Sadi Carnot, o qual optou por uma aposentadoria em 1828. Até a sua morte em 1832, vítima da epidemia da cólera que assolava Paris nessa época, dedicou-se integralmente as suas pesquisas científicas e política.

De acordo com Cimbleiris (1991), os feitos científicos de Carnot eram ancorados no sentimento patriótico e técnico e buscavam o avanço material de forma pragmática,

apresentando ciência do contexto, no qual vivia, onde a Inglaterra, na sua visão, estava tendo sucesso econômico e militar, por causa dos aperfeiçoamentos das máquinas térmicas. Nesse sentido, o Carnot foi inspirado e se propôs a “obter os princípios gerais de uma máquina a fogo, aplicáveis não apenas à máquina a vapor, mas a qualquer máquina de fogo” (CIMBLERIS, 1991, p. 39).

Os seus pensamentos técnicos são profundamente originais para a sua época e podem ter influência de três pessoas que estavam em seu convívio ao longo de sua formação: Lazare Carnot, o seu pai, e seus professores, o cientista e industrial Nicolas Clement e Charles Bernard, como alerta Guerra (2021). Lazare Carnot, o seu pai, teve uma vida muito ativa na política da França no final do século XVIII e início do século XIX. O velho Carnot já havia estabelecido seu nicho na História da Ciência, quando ainda jovem, antes da eclosão da revolução, publicou diversos trabalhos relevantes na matemática e engenharia, tendo como destaque o livro *Princípios de Equilíbrio e Movimento* (1803), que discute a eficiência das máquinas, os conceitos de conservação da energia mecânica e, implicitamente, a impossibilidade de movimento perpétuo (WISNIAK, 2000).

Durante a Revolução Francesa, ocupou cargos administrativos importantes nos altos escalões dos regimes revolucionários que governaram a França, entre 1789 a 1799. Foi o responsável pela nomeação de Napoleão Bonaparte para o primeiro comando do exército que conquistou a Europa. Posteriormente, esteve à frente do Ministério de Guerra do governo napoleônico (WISNIAK, 2000; KERKER, 1960).

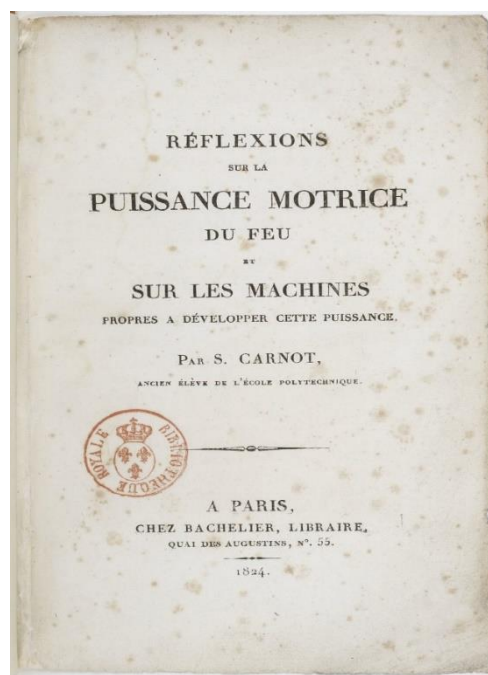
Mas seus feitos não se resumiam ao político. O pai de Sadi Carnot também esteve à frente da fundação da Escola Politécnica de Paris, na qual o seu filho estudou. A influência do Lazare Carnot no trabalho de seu filho pode ser claramente vista, através dos comentários acerca do movimento perpétuo, da ideia de reversibilidade e do estudo de um ciclo, como alerta Guerra (2021).

Após sair pela primeira vez do exército e voltar para Paris, segundo Fox (1970), Sadi Carnot teve seu primeiro contato com os professores, o cientista e industrial Nicolas Clement e Charles Bernard. Ambos eram químicos de notoriedade e, nos primeiros anos do século XIX, publicaram vários artigos conjuntos sobre uma variedade de problemas químicos. No entanto, são mais lembrados como industriais. Clement e Bernard foram os responsáveis por introduzirem Sadi Carnot nas concepções de James Watt, acerca do processo de expansão do vapor (expansão adiabática).

## 5 A OBRA DE SADI CARNOT

Neste capítulo, faremos uma discussão, na qual buscaremos evidenciar as contribuições de Sadi Carnot para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e o desenvolvimento dos conceitos iniciais que formaram a Termodinâmica clássica no século XIX. Os manuscritos, aqui analisados, dizem respeito à sua obra seminal, intitulada *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, publicada em 1824 e a outros textos históricos complementares da sua obra principal que vieram a público décadas depois de sua morte, numa segunda edição do seu manuscrito original, publicado pelo seu irmão Hipólito Carnot, em 1878. A sua obra seminal, que está retratada pela folha de rosto do seu único livro na Figura 9, tinha como objetivo discutir acerca do funcionamento e do aperfeiçoamento das máquinas a vapor, visando a uma melhor eficiência de tais equipamentos, durante os desdobramentos da Primeira Revolução Industrial.

**Figura 9** – Folha de rosto do livro de Sadi Carnot disponível na Biblioteca Nacional da França



**Fonte:** <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b86266609/f11.image>. Acesso em: ago. de 2022.

No primeiro momento, fazemos uma discussão a respeito das motivações que levaram Sadi Carnot adentrar nos estudos a respeito das máquinas a fogo. Na sequência, mostramos as principais conclusões que o estudioso chegou a respeito da compreensão e funcionamento dos

artefatos tecnológicos. Concluímos o capítulo com uma descrição detalhada sobre o seu Ciclo Ideal e uma discussão sobre suas realizações para com as Leis da Termodinâmica.

## 5.1 Sadi Carnot e as máquinas a vapor

### 5.1.1 Motivações

O Sadi Carnot inicia a sua obra seminal com uma reflexão acerca dos fenômenos naturais que têm o calor como uma de suas causas, bem como sobre os benefícios que o calor pode trazer para a vida da sociedade moderna, elegendo, ainda, as máquinas a vapor como os instrumentos essenciais para a obtenção da força motriz do fogo. Ou seja, o físico tinha como um de seus objetivos principais, a partir da divulgação de seu livro, apresentar uma investigação minuciosa acerca da força motora que o fogo fornecia, conforme podemos observar nos recortes de textos extraídos de sua obra-prima, publicada na França em 12 de junho de 1824.

**TODOS sabem que o calor pode produzir movimento. Que ele possui uma vasta força motriz, ninguém pode duvidar, nestes dias em que a máquina a vapor é em todos os lugares tão conhecida.** Ao calor também se devem os vastos movimentos que acontecem na terra. Causa as comoções da atmosfera, a ascensão das nuvens, a queda da chuva e dos meteoros, as correntes de água que canalizam a superfície do globo, e do qual o homem até agora empregou apenas uma pequena porção. Até mesmo terremotos e erupções vulcânicas são resultado do calor (CARNOT, 1824, p. 1, **grifo nosso**, tradução nossa).<sup>2</sup>

E continua argumentando,

**Deste imenso reservatório podemos tirar a força motriz necessária para nossos propósitos.** Natureza, ao nos fornecer combustíveis por todos os lados, nos deu o poder de produzir, em todos os momentos e em todos os lugares, o calor e a força propulsora que é o resultado disso. **Para desenvolver esse poder, para adequá-lo aos nossos usos, é objeto de máquinas térmicas** (CARNOT, 1824, p. 1-2, **grifos nosso**, tradução nossa).<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Personne n'ignore que la chaleur peut être la cause du mouvement, qu'elle possède même une grande puissance motrice: les machines à vapeur, aujourd'hui si répandues, en sont une preuve parlante à tous les yeux. C'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvements qui frappent nos regards sur la terre; c'est à elle que sont dues les agitations de l'atmosphère, l'ascension des nuages, la chute des pluies et des autres météores, les courans d'eau qui sillonnent la surface du globe et dont l'homme est parvenu à employer pour son usage une faible partie; enfin les tremblemens de terre, les éruptions volcaniques, reconnaissent aussi pour cause la chaleur CARNOT, 1824, p. 1).

<sup>3</sup> C'est dans cet immense réservoir que nous pouvons puiser la force mouvante nécessaire à nos besoins; la nature, en nous offrant de toutes parts le combustible, nous a donné la faculté de faire naître en tous temps et en tous lieux la chaleur et la puissance motrice qui en est la suite. Développer cette puissance, l'appropriier à notre usage, tel est l'objet des machines à feu (CARNOT, 1824, p. 1-2).

Conforme Pascoal (2016), ao longo de seu livro, Carnot (1824) não está apenas preocupado em conceber uma explicação teórica e científica acerca das máquinas já difundidas nos parques industriais e usinas de extração mineral da Europa. Ao longo de sua argumentação, ele faz questão de envolver assuntos externalista, dentre os quais se destacam os aspectos econômicos, políticos e sociais que estavam diretamente ligados à evolução de tais equipamentos, como uma das causas da Revolução Industrial. Durante a produção e publicação do seu manuscrito, a máquina a vapor já estava consolidada como umas das principais causas para as transformações que a Europa, principalmente a Inglaterra, vinha passando nos seus meios de produção e para a obtenção de energia a partir do carvão mineral, tornando-se a grande potência econômica do continente (LANDES, 2005).

Ciente desse contexto, o engenheiro, inicialmente, defende a compreensão do funcionamento das máquinas a vapor, pois, para ele:

**O estudo destes motores é do maior interesse, sua importância é enorme, seu uso está aumentando continuamente, e eles parecem destinados a produzir uma grande revolução no mundo civilizado.** Já a máquina a vapor trabalha em nossas minas, impulsiona nossos navios, escava nossos portos e nossos rios, forja ferro, modela madeira, mói grãos, fia e tece nossas roupas, transporta o mais pesado encargo, etc. **Parece que deve em algum dia servir como um motor universal, e ser substituidor da força animal, cachoeiras e correntes de ar** (CARNOT, 1824, p. 2, **grifo nosso**, tradução nossa).<sup>4</sup>

Ao longo das páginas introdutórias, o autor enfatiza os benefícios que tais máquinas a vapor trouxeram para a sociedade em geral e usa como exemplo o bom proveito que a sociedade inglesa soube fazer de tais equipamentos para o seu próprio benefício e enriquecimento de sua nação nas primeiras décadas da Revolução Industrial. Segundo Carnot (1824), o benefício maior que a máquina a vapor prestou à Inglaterra “é, sem dúvidas, o renascimento do trabalho das minas de carvão, que declinou e ameaçou cessar inteiramente, em consequência da dificuldade cada vez maior de drenagem, e de elevar o carvão” (CARNOT, 1824, p. 3, tradução nossa),<sup>5</sup> quando o país estava em busca de combustível para o aquecimento de sua população e indústria.

---

<sup>4</sup> L'étude de ces machines est du plus haut intérêt, leur importance est immense, leur emploi s'accroît tous les jours. Elles paraissent destinées à produire une grande révolution dans le monde civilisé. Déjà la machine à feu exploite nos mines, fait mouvoir nos navires, creuse nos ports et nos rivières, forge le fer, façonne les bois, écrase les grains, file et ourdit nos étoffes, transporte les plus pesants fardeaux, etc. Elle semble devoir un jour servir de moteur universel et obtenir la préférence sur la force des animaux, les chutes d'eau et les courans d'air (CARNOT, 1824, p. 2).

<sup>5</sup> Le service le plus signalé que la machine à feu ait rendu à l'Angleterre est sans contredit d'avoir ranimé l'exploitation de ses mines de houille, devenue languissante et qui menaçait de s'éteindre entièrement à cause de la difficulté toujours croissante des épuisemens et de l'extraction du combustible (CARNOT, 1824, p. 3).

No século XVIII, numa busca desenfreada por energia para aquecer, no inverno, a sua população cada vez mais urbana e suprir as indústrias que estavam se formando pelo país, a Inglaterra viu as floretas, sua principal fonte energética, praticamente, se esgotarem. Nesse sentido, o país se viu obrigado a migrar suas atenções para o carvão mineral, que era abundante em seu território. Inicialmente, o carvão era extraído de forma fácil, pois, praticamente, as minas mais a superfície supriam a demanda. No entanto, o consumo de carvão aumentou consideravelmente, coagindo as minas a serem cada vez mais aprofundadas. Com isso, as inundações eram inevitáveis. Portanto, para corrigir tal problema, ao longo daquele século, diversos inventores lançaram soluções a partir da inserção de máquinas a vapor para o bombeamento da água do ambiente mineiro (LANDES, 2005; BRAGA; GUERRA; REIS, 2003).

A inserção das máquinas térmicas se proliferou pelas usinas de mineração da Inglaterra, conquistando os meios de produção, chegando até a modernização de sua frota marinha, com os navios a vapor, lançando, desse modo, o país no pioneirismo da Revolução Industrial e a hegemonia econômica na Europa e no mundo. No final do século XVIII e início do século XIX, a França era o único país capaz de contrapor contra o poderio econômico e militar da Inglaterra no cenário geopolítico da época. No entanto, apesar do momento glorioso que teve sobre a liderança de Napoleão Bonaparte nos primeiros 15 anos do século XIX, os ingleses sempre estiveram à frente na economia e força bélica (HOBSBAWM, 2007). Nesse sentido, movido por sentimentos patrióticos, Carnot (1824) sugere,

Para tirar hoje da Inglaterra suas máquinas a vapor seriam para levar ao mesmo tempo o carvão e o ferro. Seria para secar todas as suas fontes de riqueza, para arruinar tudo em que sua prosperidade depende, em suma, para aniquilar aquele poder colossal. A destruição de sua marinha, que ela considera sua defesa mais forte, talvez seja menos fatal (CARNOT, 1824, p. 4, tradução nossa).<sup>6</sup>

Ancorado nisso e também nas facilidades que as máquinas já vinham proporcionando para a expansão da indústria e o modo de vida da sociedade, ele destaca, principalmente, o encurtamento das distâncias do globo, facilitando uma comunicação mais rápida entre as nações e o transporte de mercadorias. Consciente de que as máquinas a vapor eram pouco compreendidas em sua época, Carnot (1824) passou a defender a obtenção de uma teoria

---

<sup>6</sup> Enlever aujourd'hui à l'Angleterre ses machines à vapeur, ce serait lui ôter à la fois la houille et le fer; ce serait tarir toutes ses sources de richesses, ruiner tous ses moyens de prospérité; ce serait anéantir cette puissance colossale. La destruction de sa marine, qu'elle regarde comme son plus ferme appui, lui serait peut-être moins funeste (CARNOT, 1824, p. 4).

completa que explicasse o funcionamento de tais instrumentos e a melhor eficiência que pudesse se alcançar nesses equipamentos, independentemente de sua natureza, sendo uma máquina a vapor ou movida por qualquer outro fenômeno. Segundo Carnot (1824), “se, algum dia, a máquina a vapor for aperfeiçoada de modo a poder ser montada e abastecida com combustível a baixo custo, combinará todas as qualidades desejáveis e dará às artes industriais um alcance cuja extensão dificilmente pode ser prevista” (CARNOT, 1824, p. 2-3, tradução nossa).<sup>7</sup>

De acordo com Dass (2013), Sadi Carnot traçou como objetivo responder duas perguntas fundamentais em sua obra: (a) Qual é a natureza precisa do agente térmico que produz trabalho mecânico e nada mais? e (b) Qual é a quantidade de agente térmico necessária para produzir uma determinada quantidade de trabalho? Esse segundo questionamento foi ampliado para saber se havia alguma correspondência entre a quantidade de agente térmico utilizado e a quantidade de trabalho realizado. Diante disso, através de suas reflexões, deixou como legado ideias basais para a melhor compreensão do funcionamento e aumento da eficiência das máquinas a vapor e contribuiu, significativamente, com a fundação da Termodinâmica enquanto Ciência. Ao longo das 119 páginas do texto original, como aponta Salvi e Schettino (2019), a natureza extraordinária de suas reflexões reside na discussão crítica de princípios gerais, sem se ancorar em uma formulação matemática correspondente, de modo que as conclusões resultantes se enquadraram no esquema da teoria da Termodinâmica posterior.

### 5.1.2 *Estudo das máquinas a vapor*

Consciente da relevância que as máquinas a vapor conquistaram no final do século XVIII e início do século XIX, por estarem ocasionando uma revolução no padrão de vida da sociedade de sua época e aliado a uma visão de futuro, na qual almejava experimentar as possibilidades que as máquinas em sua mais alta eficiência podiam proporcionar para somar com tudo aquilo já conquistado, Sadi Carnot, em sua única obra, se lançou a um desafio de não apenas encontrar meios para melhorar o desempenho das máquinas a vapor, mas também unificar todos os conhecimentos disponíveis até então, acerca das máquinas térmicas, em uma única teoria científica geral (RUSSEL *et al.*, 2012).

---

<sup>7</sup> Si quelque jour les perfectionnements de la machine à feu s'étendent assez loin pour rendre la peu coûteuse en établissement et en combustible, elle réunira toutes les qualités désirables, et fera prendre aux arts industriels un essor dont il serait difficile de prévoir toute l'étendue (CARNOT, 1824, p. 2-3).



Segundo Carnot (1824), apesar da presença maciça das máquinas a vapor por intermédio de produção e usinas de extração mineral, o funcionamento de tais equipamentos ainda era quase um mistério. As teorias que as explicavam eram pouco compreendidas. Somado a isso, todas as tentativas de aperfeiçoá-las eram realizadas por acaso, não contando com uma sistematização. Questões importantes sempre foram feitas por pessoas ligadas à sua confecção, todavia, não chegaram a obter as respostas adequadas.

No intuito de resolver tal deficiência, para alcançar a tão almejada teoria científica geral que explicasse as máquinas térmicas, utilizou a Teoria do Calórico, que considera calor como uma fluido material, como a base de suas reflexões, sobre a qual ele apresentava, ainda, muitas dúvidas acerca da sua eficácia para o que estava propondo, como nos alerta Dias (2007). A sua desconfiança é justificada, pois, em sua época, como nos aponta Russel *et al.* (2012), a Teoria do Calórico já vinha perdendo espaço no meio científico para uma Teoria Cinética e Molecular, defendida pelos cientistas Robert Hooke (1635 - 1703), Daniel Bernoulli (1700 - 1782) e Robert Boyle (1627 - 1691), principalmente.

Entretanto, Carnot (1824) inicia as suas reflexões a partir de três perguntas norteadoras, no intuito de compreender o funcionamento das máquinas a vapor: (i) A força motriz do calor é ilimitada? (ii) Existe um limite natural para as melhorias das máquinas a vapor ou essas melhorias podem ser realizadas indefinidamente? (iii) Existe outro agente térmico, além da água, para o funcionamento das máquinas? Essa última pergunta foi estendida para investigar as principais vantagens desse novo elemento em comparação com a água.

O primeiro ponto destacado nas *Réflexions*, visando atender aos seus objetivos, trata-se de uma deficiência a respeito da compreensão do fenômeno da produção de movimento ocasionado pelo calor. Segundo Carnot (1824), o fenômeno da produção de movimento pelo calor ainda não foi estudado a partir de casos gerais. Todos os esforços para entendê-lo estavam apenas direcionados às máquinas a vapor, cujas limitações não permitiram ter uma visão geral das possibilidades e limitações desse fenômeno, pois nessas máquinas o fenômeno ocorre de uma forma incompleta. Com isso, não dá condições necessárias para entender os seus princípios e estudar as suas leis.

Para o engenheiro francês, o princípio do fenômeno da produção de movimento pelo calor devia ser compreendido, independentemente do mecanismo ou agente térmico empregado. Há uma necessidade de que os princípios sejam aplicáveis não só às máquinas a vapor, mas a qualquer máquina imaginável, independentemente da forma como é operada, uma vez que, a partir da obtenção de princípios gerais, todas as máquinas podem ser estudadas até em seus mínimos detalhes pela teoria mecânica. Isto é, por meio de uma teoria completa, “todos

os casos estão previstos, todos os movimentos imagináveis são remetidos a estes princípios gerais, firmemente estabelecidos e aplicáveis em todas as circunstâncias. Este é o caráter de uma teoria completa” (CARNOT, 1824, p. 8, tradução nossa).<sup>8</sup>

Todavia, na sua concepção, a teoria almejada só seria alcançada, quando as leis da Física fossem “suficientemente estendidas, suficientemente generalizadas, para dar a conhecer de antemão todos os efeitos do calor agindo de determinada maneira sobre qualquer corpo” (CARNOT, 1824, p. 9-5, tradução nossa)<sup>9</sup> e se obtivesse um conhecimento aprofundado acerca das funções e de todas as partes que compõem uma máquina a vapor ou térmica em geral.

No caso específico da máquina a vapor, o estudioso salienta que a produção de movimento pelo calor está sempre associada a uma circunstância, a qual denominou como restabelecimento do equilíbrio no calórico, que consiste na passagem de calor de um corpo com temperatura mais elevada para um corpo com a temperatura menos elevada. Para ele,

A produção de força motriz deve-se, então, nas máquinas a vapor, não a um consumo efetivo de calórico, mas ao seu transporte de um corpo quente para um corpo frio, isto é, ao restabelecimento do equilíbrio - equilíbrio considerado destruído por qualquer causa, por ação química, como combustão, ou por qualquer outra (CARNOT, 1824, p. 10-11, tradução nossa).<sup>10</sup>

Para Russel *et al.* (2012), a afirmação acima refuta uma hipótese muito difundida por seus contemporâneos de que as máquinas a vapor consumiam calorias. Tal afirmação mostra o contrário e incitou, ainda mais, o enfraquecimento da Teoria do Calórico.

A aplicação do princípio citado pode ser generalizada, servindo para qualquer máquina que seja operada pela força motora do calor. Como podemos observar, apenas o calor não é suficiente para a produção de força, sendo necessário também o frio<sup>11</sup>. Ou seja, a produção de força estava relacionada, conforme Carnot (1824), a uma associação conjunta entre calor e frio. Se as condições fossem respeitadas, independentemente da natureza da máquina, como a

---

<sup>8</sup> Tous les cas sont prévus, tous les mouvemens imaginables sont soumis à des principes généraux solidement établis et applicables en toute circonstance. C'est là le caractère d'une théorie complete (CARNOT, 1824, p. 8, tradução nossa).

<sup>9</sup> Physique seront assez étendues, asser généralisées, pour faire connaitre à l'avance tous les effets de la chaleur agissant d'une manière déterminée sur un corps quelconque (CARNOT, 1824, p. 8-9).

<sup>10</sup> La production de la puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle da calorique, mais à son transport d'un corps chaud aun cors froid, c'est-à-dire à son rétablissement d'équilibre, équilibre supposé rompu par quelque cause que en soit, par une ction chimique, telle que la combustion, on par toute autre (CARNOT, 1824, p. 10-11).

<sup>11</sup> Os termos calor (quente) e frio eram usados nessa época de forma associada e sem a conotação científica atual. Apesar desses termos estarem corretos para aquela época, hoje em dia são termos que não possuem ligação. Calor trata-se de uma energia em trânsito, enquanto frio está associado a temperaturas baixas.

diferença de temperaturas entre corpos, permitindo que o calórico entrasse em equilíbrio, haveria uma possibilidade da produção de força propulsora.

Tal feito poderia ser alcançado a partir do emprego de qualquer agente térmico, não ficando apenas restrito à água. Carnot (1824) acrescenta,

O vapor é um meio de realizar esse poder, mas não é o único. Todas as substâncias da natureza podem ser empregadas para esse fim, todas são suscetíveis de mudanças de volume, de sucessivas contrações e dilatações, pela alternância de calor e frio. Todos são capazes de superar em suas mudanças de volume certas resistências e, assim, desenvolver o poder propulsor (CARNOT, 1824, p. 12-13, tradução nossa).<sup>12</sup>

O autor destaca as substâncias que podem ter o mesmo desempenho de vapor de água na produção de força motora, como o álcool, o mercúrio, o enxofre, etc. Substâncias essas capazes de mudar de fases, sair do líquido para o gasoso e proporcionar um aumento de volume, ocasionando o movimento da máquina a vapor ou térmica de forma geral.

Com essas reflexões concluídas, lança outra questão: “a força motriz do calor é invariável em quantidade, ou varia com o agente empregado para realizá-la como o elemento intermediário?” (CARNOT, 1824, p. 14-15, tradução nossa)<sup>13</sup>. A sua resolução nos leva à introdução de conceitos primordiais para a sua obra, como a ideia de ciclos e o rendimento máximo.

Com as causas devidamente explicadas sobre a produção do movimento pelo calor, Carnot (1824) parte para a solução do problema acima citado, a partir da premissa de que são necessárias uma quantidade de calor e uma diferença de temperatura, como já salientado anteriormente. Traçando uma situação problema sugerida para seguir seus raciocínios, temos dois corpos: o corpo A com uma temperatura a  $100^{\circ}$  em um corpo B, mantido a uma temperatura de  $0^{\circ}$ . Com isso, lançou as perguntas seguintes, consideradas fundamentais: qual a quantidade de força motriz que pode ser alcançada a partir da transferência de uma determinada quantidade de calórico do corpo A para o corpo B? A força motora é ilimitada? O emprego do agente térmico interfere no resultado final? O vapor d'água é mais vantajoso do que o obtido a partir de outras substâncias, como álcool, mercúrio ou outro gás qualquer? (CARNOT, 1824).

<sup>12</sup> La vapeur d'eau est un moyen de réaliser cette puissance, mais elle n'est pas le seul: tous les corps de la nature peuvent être employés à cet usage; tous sont susceptibles de changemens de volume, de contractions et de dilatations successives par des alternatives de chaleur et de froid; tous sont capables de vaincre, dans leurs changemens de volume, certaines résistances et de développer ainsi la puissance motrice (CARNOT, 1824, p. 12-13).

<sup>13</sup> La puissance motrice de la chaleur est-elle immuable en quantité, ou varie-t-elle avec l'agent dont on fait usage pour la réaliser avec la substance intermédiaire, choisie comme sujet d'action de la chaleur? (CARNOT, 1824, p. 14-15).

A fim de responder tais perguntas, Carnot (1824) partiu da premissa de que é necessário entender como o vapor da água produz calor, o qual, por sua vez, produz movimento. Para isso, sugere mais uma situação-problema: Existem dois corpos denominados A e B, respectivamente, cada qual está com uma temperatura constante, sendo que a temperatura do corpo A encontrasse mais elevada em relação ao do corpo B. Para Carnot (1824), esses corpos desempenham funções de reservatórios ilimitados de calóricos, os quais podem receber ou dar calor, sem que sejam afetadas as suas respectivas temperaturas. Logo, o engenheiro nomeou o corpo A de forno e o corpo B de geladeira.

Se há intenção de produzir força motora, a partir de uma determinada quantidade de calórico do corpo A sendo transferido para o corpo B, tal feito se dará a partir da realização de 3 etapas: Etapa 1: o corpo A cederá calórico para a produção de vapor – vapor produzido terá a mesma temperatura do corpo A; Etapa 2: o vapor é recebido em um espaço, no qual ele possa se expandir, podendo ser um cilindro com a presença de um pistão. Nessa etapa, o vapor vai perder temperatura; Etapa 3: para que o vapor volte a seu estado inicial, o vapor será colocado em contato com o corpo B e, ao mesmo tempo, sofrerá uma pressão constante até chegar ao seu estado inicial – o corpo B apenas condensa o vapor sem se misturar com o gás, assim não tem sua temperatura afetada.

Para Carnot (1824), essas operações citadas acima podem ser realizadas em qualquer direção e ordem inversas, pois ele não viu empecilhos para a formação de vapor com o calórico do corpo B, e à temperatura desse corpo, comprimindo-o, de modo a fazê-lo adquirir a temperatura do corpo A, finalmente, condensando-o pelo contato com este último corpo e continuando a compressão para completar a liquefação.

O autor argumenta,

Pelas nossas primeiras operações teria havido ao mesmo tempo produção de força motriz e transferência de calórico do corpo A para o corpo B. Pelas operações inversas há ao mesmo tempo gasto de força motriz e retorno de calórico do corpo B ao corpo A. Mas se tivermos agido em cada caso sobre a mesma quantidade de vapor, se não houver perda de força motriz ou calórica, a quantidade de força motriz produzida em primeiro lugar será igual àquela que teria sido gasto no segundo, e a quantidade de calórico passada no primeiro caso do corpo A para o corpo B seria igual à quantidade que volta no segundo caso do corpo B para o corpo A; para que um número infinito de operações alternativas desse tipo poderia ser realizado sem, no final, ter produzido força motriz ou transferido calórico de um corpo para outro (CARNOT, 1824, p. 19-20, tradução nossa).<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Par nos premières opérations, il y avait eu à la fois production de puissance motrice et transport du calorique du corps A au corps B; par les opérations inverses, il y a à la fois dépense de puissance motrice et retour du calorique du corps B au corps A. Mais si l'on a agi de part et d'autre sur la même quantité de vapeur, s'il ne s'est fait aucune perte ni de puissance motrice ni de calorique, la quantité de puissance motrice produite dans le premier cas sera égale à celle qui aura été dépensée dans le second, et la quantité de calorique passée, dans le premier cas, du corps

Com essa reflexão, percebemos a introdução de uma nova noção de ciclo da parte do Carnot (1824), conforme argumentado por Dass (2013),

Carnot argumentou que, como o agente térmico não apenas produz trabalho, mas também altera o estado do sistema, em geral não é possível separar os dois aspectos do calor um do outro. Por exemplo, quando aquecemos um gás a temperatura constante, digamos, o gás se expande levando a uma mudança de estado (para uma nova densidade) e ao mesmo tempo o trabalho é realizado pelo gás em expansão contra a pressão. Para contornar isso, Carnot prevê uma sequência de operações que traz o corpo de volta ao seu estado original. Dessa forma, tendo o corpo retornado ao seu estado original, o trabalho realizado pode estar relacionado apenas ao agente térmico. Assim, ele introduziu a nova noção de ciclos (DASS, 2013, p. 3, tradução nossa).<sup>15</sup>

A partir dessa reflexão, Carnot (1824) lança ideia da máquina de movimento perpétuo do tipo 2, conforme nos alerta Singh e Sharma (2019), pois Carnot (1824) argumenta,

Agora, se existisse algum meio de usar o calor preferível àqueles que empregamos, isto é, se fosse possível, por qualquer método, fazer o calórico produzir uma quantidade de força motriz maior do que a que produzimos por nossa primeira série de operações, bastaria desviar uma parte dessa potência para, pelo método que acabamos de indicar, fazer o calórico do corpo B retornar ao corpo A do refrigerador para o forno, restabelecer as condições iniciais e, assim, ficar pronto recomeçar uma operação exatamente semelhante à anterior, e assim por diante: isso não seria apenas movimento perpétuo, mas uma criação ilimitada de força motriz sem consumo de calórico ou de qualquer outro agente. Tal criação é inteiramente contrária às ideias agora aceitas, às leis da mecânica e da física do som. É inadmissível (CARNOT, 1824, p. 20-21, tradução nossa).<sup>16</sup>

Ele conclui tal discussão com a concepção de que o máximo de força motriz gerada pelo uso de vapor é também equivalente à força motriz gerada por qualquer meio. Para Sadi Carnot

---

A au corps B sera égale à la quantité qui repasse, dans le second, du corps B au corps A, de sorte qu'on pourrait faire un nombre indéfini d'opérations alternatives de ce genre sans qu'il y eût en somme ni puissance motrice produite, ni calorique passé d'un corps à l'autre (CARNOT, 1824, p. 19-20).

<sup>15</sup> Carnot argued that as thermal agency not only produces work, but also alters the state of the system, it is in general not possible to disentangle the two aspects of heat from each other. For example, when we heat a gas at constant temperature, say, the gas expands leading to a change of state (to a new density) and at the same time work is performed by the expanding gas against the pressure. To circumvent this, Carnot envisages a sequence of operations that brings the body back to its original state. That way, the body having been returned to its original state, the work performed can be related solely to the thermal agency. Thus he introduced the novel notion of cycles (DASS, 2013, p. 3).

<sup>16</sup> Or, s'il existait des moyens d'employer la chaleur préférables à ceux dont nous avons fait usage, c'est-à-dire s'il était possible, par quelque méthode que ce fût, de faire produire au calorique une quantité de puissance motrice plus grande que nous ne l'avons fait par notre première série d'opérations, il suffirait de distraire une portion de cette puissance pour faire remonter, par la méthode qui vient d'être indiquée, le calorique du corps B au corps A, du réfrigérant au foyer, pour rétablir les choses dans leur état primitif et se mettre par-là en me sure de recommencer une opération entièrement semblable à la première et ainsi de suite: ce serait là, non seulement le mouvement perpétuel, mais une création indéfinie de force motrice sans consommation ni de calorique ni de quelque autre agent que ce soit. Une semblable création est tout-à-fait contraire aux idées reçues jusqu'à présent, aux lois de la mécanique et de la saine physique; elle est inadmissible (CARNOT, 1824, p. 20-21).

(1824), o rendimento máximo sempre vai ocorrer, quando o restabelecimento do equilíbrio calórico estiver acompanhado do fenômeno de produção de movimento. Se, por acaso, tal fenômeno não ocorrer, estará diante de uma perda real, pois “[...] mudança de temperatura que não se deve a uma mudança de volume dos corpos pode ser apenas um inútil restabelecimento do equilíbrio no calórico” (CARNOT, 1824, p. 23, tradução nossa)<sup>17</sup>.

Em relação ao postulado acima de Carnot (1824) sobre o rendimento máximo que uma máquina térmica pode alcançar, Díaz (2014) escreve,

Para que o trabalho seja realizado, é necessária uma mudança no volume, e qualquer mudança no volume devido ao calor envolve uma mudança na temperatura. Suponha um gás contido em um cilindro, se o cilindro for aquecido, o gás se expande e pode realizar trabalho externo. Se a eficiência for entendida como o quociente entre o trabalho externo realizado e o calor transferido pelo agente, então é evidente que a máxima eficiência é obtida quando todo o calor transferido é utilizado exclusivamente na mudança de volume, e não, por exemplo, no aquecimento do recipiente antes da expansão ou contração do gás (DÍAZ, 2014, p. 27, tradução nossa).<sup>18</sup>

Como aponta Laranjeiras (2014), Carnot contrariou muito dos seus contemporâneos, que buscavam aumentar a eficiência das máquinas a vapor através da substituição do agente térmico, no caso da água por outro qualquer, pois acreditava que tal mudança resultaria em ganhos no rendimento. Desse modo, ele seguiu outro caminho, o qual levou à conclusão de que há diferença de temperatura entre as fontes, pois “a potência motriz do calor é independente dos agentes que intervêm na sua realização; sua quantidade é fixada unicamente pelas temperaturas dos corpos entre os quais se faz o transporte do calórico” (CARNOT, 1824, p. 38, tradução nossa)<sup>19</sup>. Nesse sentido, Sadi Carnot estava por inaugurar uma nova era na história da evolução das máquinas térmicas.

### 5.1.3 *O ciclo ideal de Carnot*

---

<sup>17</sup> [...] Un changement de température qui n'est pas dû à un changement de volume du corps peut n'être qu'un rétablissement inutile de l'équilibre calorique (CARNOT, 1824, p. 23).

<sup>18</sup> Para que haya realización de trabajo se requiere de cambio de volumen y todo cambio de volumen debido al calor supone un cambio de temperatura. Supóngase un gas encerrado en un cilindro, si se calienta el cilindro, el gas se expande pudiendo realizar un trabajo exterior. Si se entiende por eficiencia el cociente del trabajo exterior realizado y el calor transferido por el agente, entonces es evidente que la máxima eficiencia se obtiene cuando todo el calor transferido se emplea exclusivamente en el cambio de volumen, y no, por ejemplo, en calentar el recipiente antes de que tenga lugar la expansión o contracción del gas (DÍAZ, 2014, p. 27).

<sup>19</sup> La puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents mis en oeuvre pour la réaliser; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique (CARNOT, 1824, p. 38).

Após ter lançado uma teoria geral que abordava o funcionamento da máquina a vapor, em sequência, Carnot (1824) se propôs a demonstrar como tal equipamento chegaria a sua máxima eficiência. Para isso, a máquina a vapor necessitaria estar operando sob um ciclo especial idealizado, com as seguintes propriedades: a) funcionaria em sucessivos ciclos; b) o agente térmico utilizado nessa máquina a vapor realizaria, sem perdas, a transferência de calor da fonte quente para a fonte fria; c) a máquina em questão operaria reversivelmente, ou seja, ‘de trás para frente’, como nos alerta Laranjeiras (2014).

Sadi Carnot construiu o seu ciclo ideal a partir da observação de um fato já consolidado pela experiência, a respeito do comportamento de um gás, quando submetido à compressão e dilatação, visando alterar a sua temperatura. Pela experiência relatada pelo Carnot (1824), o fluido de um gás tem uma elevação de temperatura, quando é comprimido de forma repentina e sua temperatura cai quando sofre uma dilatação rápida.

Conforme suas palavras, quando se deseja reduzir a temperatura de um gás, fazendo-o voltar à condição inicial, sem modificar o seu volume, após ter a sua temperatura elevada por um processo de compressão, isso se dará através da remoção de parte de seu calórico. Provavelmente, o calórico será removido, na proporção em que a pressão foi aplicada, mantendo a temperatura do gás constante. Caso o gás apresente uma baixa densidade, a oscilação da sua temperatura para baixo pode ser evitada, apenas lhe fornecendo uma certa quantidade de calórico.

Para essa operação, o calórico, quando não ocasionava alteração na temperatura do gás, foi, assim, denominado, devido à mudança de volume ou, em suas palavras: “esta denominação não indica que o calórico pertença ao volume: não se refere a ele mais do que à pressão, e pode ser chamado de calórico devido à mudança de pressão” (CARNOT, 1824, p. 32, tradução nossa)<sup>20</sup>. Tal fato evidencia a obscuridade nessa relação entre calórico e volume, “não sabemos que leis ele segue em relação às variações de volume: é possível que sua quantidade mude com a natureza do gás, sua densidade ou sua temperatura” (CARNOT, 1824, p. 32, tradução nossa)<sup>21</sup>.

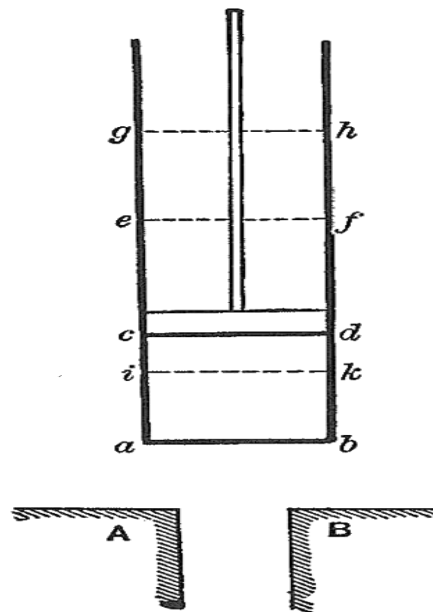
Com base em tais alegações, Carnot (1824), em seu livro, descreveu a operação de uma máquina operando sob um ciclo ideal em 7 etapas. A máquina térmica, como exemplificado na Figura 10 extraída do seu livro, imaginada para a explicação do seu ciclo, tratava-se de um cilindro, marcado com referências ABCD, contendo um gás em seu interior e um êmbolo livre

<sup>20</sup> Cette dénomi- nation n'indique pas que le calorique appartienne au volume, il ne lui appartient pas plus qu'il n'appartient à la pression, et pourrait être tout aussi bien appelé calorique dû au changement de pression (CARNOT, 1824, p. 32).

<sup>21</sup> Nous ignorons quelles lois il suit relativement aux variations de volume: il est possible que sa quantité change soit avec la nature du gaz, soit avec sa densité, soit avec sa température (CARNOT, 1824, p. 32).

capaz de ser movido sem muitas dificuldades. Além disso, completava o sistema dois corpos denominados A e B, com temperaturas constantes, no entanto, a temperatura do corpo A era mais elevada em relação a do corpo B.

**Figura 10** – Máquina do ciclo ideal do Sadi Carnot



**Fonte:** [https://www.wikiwand.com/pt/M%C3%A1quina\\_de\\_Carnot](https://www.wikiwand.com/pt/M%C3%A1quina_de_Carnot). Acesso em: 31 de jun. de 2022.

Usando como exemplo o ar atmosférico, Carnot (1824) descreve as 7 etapas do ciclo que levará a máquina a funcionar em sua máxima eficiência. Na etapa 1, inicialmente, temos o êmbolo na posição CD. Nessa etapa, temos o contato entre o corpo A e o gás contido no interior do cilindro ABCD (ou com a parede capaz de transmitir calórico). Ambos ficaram sobre a mesma temperatura. Na etapa 2, com o corpo A alimentando o cilindro com calor e mantendo a temperatura do gás em seu interior constante, o pistão inicia um movimento ascendente e chega ao ponto EF. Na etapa 3, o gás perde contato com a fonte de calórico do corpo A. O pistão continua seu movimento de ascensão do ponto EF para o ponto GH. Enquanto isso, a temperatura do gás cai (o autor sugere que imaginemos que a temperatura do gás nessa etapa caiu até se igualar ao do corpo B). Na etapa 4, o ar entra em contato com o corpo B. Como é tendência de o pistão voltar do ponto GH para o ponto CD, o gás, com essa ação, sofrerá uma compressão, o qual permanecerá com sua temperatura constante por causa do contato com o corpo B. Em seguida, na etapa 5, o ar perde o contato com o corpo B. Mesmo assim, a compressão continua, mas apesar de isolado da fonte calórica, sua temperatura tende a aumentar



até chegar à temperatura do corpo A. Enquanto isso, o pistão migra do ponto CD para o JK. Na etapa 6, sem alteração de temperatura, o ar volta a ter contato com o corpo A. Simultaneamente, o pistão retorna do ponto JK para o ponto EF e, por fim, na etapa 7, as ações ocorridas na etapa 3 se repetem acompanhadas desta sequência de etapas 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4 e 5 sucessivamente.

Após esse processo, Sadi Carnot (1824) conclui que o ar utilizado na explicação do seu ciclo ideal serviu com uma máquina térmica, a qual operou no seu melhor rendimento, pois, em nenhuma etapa, foi ocasionado o uso indevido do restabelecimento do equilíbrio no calórico, como também, a operação pôde ser realizada a partir de sentidos e ordem inversas.

Segundo Laranjeiras (2014), uma condição essencial para o funcionamento da máquina de Carnot (1824), de forma ideal, consiste na aplicação do princípio geral da conservação do calórico. Todo o calórico da fonte quente foi transferido em sua totalidade para a fonte fria. Tal fato é essencial para permitir que a máquina consiga operar e realizar com ciclos sucessivos.

Traduzindo para uma linguagem moderna e atual, o ciclo ideal do físico ficou popularmente conhecido a partir da alternância dessa simplificação: expansão isotérmica seguida por uma expansão adiabática, alternada com uma compressão isotérmica seguida de uma compressão adiabática. Como demonstrado abaixo no Quadro 1:

**Quadro 1** – O ciclo de ideal de Carnot (1824)

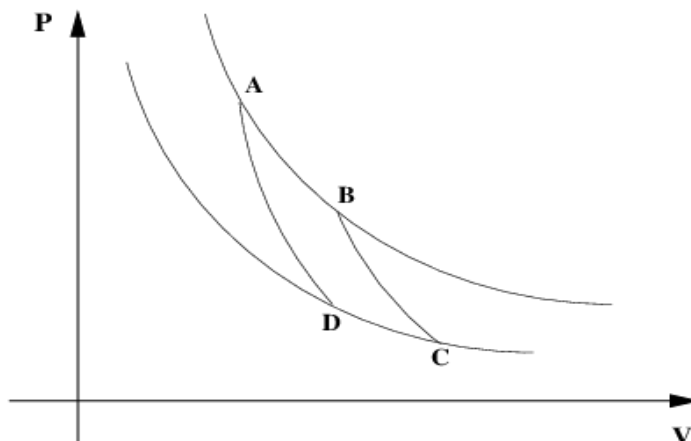
<b>Transformações</b>	<b>Caracterização</b>
<b>1. Expansão isotérmica</b>	A fonte quente e a substância de operação (gás) estão em contato, à mesma temperatura. O gás retira calor da fonte quente e sofre uma expansão isotérmica, empurrando o êmbolo, ou seja, realizando trabalho
<b>2. Expansão adiabática</b>	Isolado termicamente do exterior, o gás se esfria à medida que se expande (ainda realizando trabalho) até atingir a temperatura da fonte fria, quando o processo é interrompido.
<b>3. Compressão isotérmica</b>	Em contato com a fonte fria, à mesma temperatura desta, o gás é comprimido isotermicamente (sofre trabalho), transferindo calor para a fonte fria.
<b>4. Compressão adiabática</b>	Já afastado da fonte fria, isolado termicamente do exterior, o gás é comprimido até atingir a temperatura da fonte quente, reiniciando o ciclo.

**Fonte:** Elaborado pelo autor – Adaptado de Laranjeiras (2014, p. 4)

Uma década após a publicação das *Réflexions*, o Ciclo de Sadi Carnot ganhou este diagrama Pressão  $\times$  Volume (pxV), como pode ser observado na Figura 11, construído pelo

Émile Clapeyron em 1834, o qual, desde sua publicação, é a referência para a análise de problemas estudados termodinâmicos, como acrescenta Díaz (2014).

**Figura 11** – Diagrama PressãoxVolume (p x V) do Ciclo de Carnot idealizado por Émile Clapeyron (1834)



**Fonte:** [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-RepresentacRepresentacRepresentacao-do-ciclo-de-Carnot-no-diagrama-P-V\\_fig1\\_26361320](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-RepresentacRepresentacRepresentacao-do-ciclo-de-Carnot-no-diagrama-P-V_fig1_26361320) Acesso em ago. de 2022.

## 5.2 Sadi Carnot e as Leis da Termodinâmica

Na agitação política, econômica, científica e social, em que vivia a Europa do século XIX, por causa dos efeitos da Revolução Industrial e Revolução Francesa, que instauravam nos países europeus ares modernos e desafiantes, nunca ainda experimentados na história do velho continente, a Física passou por mais uma grande transformação que culminou na fundação da Termodinâmica, com o surgimento de dois dos seus princípios base: a Primeira e a Segunda lei.

O Sadi Carnot foi um dos grandes protagonistas que esteve à frente desses tempos transformadores na História da Física. Na busca por uma teoria científica geral que visava à explicação do funcionamento das máquinas térmicas, o cientista francês abriu caminhos para a construção de alguns postulados básicos que foram fundamentais para o surgimento da Termodinâmica como conhecida atualmente. Ele está indiretamente ligado à formulação da primeira lei e desempenhou papel de destaque na formulação da segunda lei da Termodinâmica, porque a gênese do segundo princípio está de forma explícita na sua monografia publicada em 1824.

Na ordem do tempo, a segunda lei da Termodinâmica foi formulada muito antes dos cientistas da época chegarem a um consenso acerca da conservação de energia, ou seja, antes

da formulação da primeira lei da Termodinâmica. Em linhas gerais, atualmente, o enunciado do primeiro princípio da Termodinâmica trata-se da conservação de energia, a qual não pode ser nem criada e nem destruída, apenas transformada de um tipo em outro. Tal princípio também estabelece a equivalência das interações entre calor e trabalho. A segunda lei da Termodinâmica, por sua vez, constitui as condições em que será possível a transformação de calor e trabalho, a qual serve como um complemento para o primeiro princípio. Nesse sentido, a segunda lei da termodinâmica afirma que não é possível converter todo o calor em trabalho através de um processo cíclico (PINHO; ANDRADE, 2011).

Em relação à primeira lei, após uma análise das *Réflexions*, pode-se garantir que o Sadi Carnot, ao escrever o seu manuscrito tinha conhecimento dos conceitos da conservação de energia e do equivalente mecânico, no que se refere ao calor, como conhecidos hoje, conceitos esses fundamentais para a formulação da primeira lei da Termodinâmica, posteriormente. Tal fato pode ser observado claramente nos seguintes recortes de textos extraídos de seu único livro e notas inéditas publicadas postumamente.

Neste primeiro fragmento, extraído das suas notas inéditas, publicadas 54 anos após sua morte, em 1878, podemos constatar o conceito de conservação de energia, o qual, nas palavras do próprio Carnot (1878), onde houvesse a destruição de calor, haveria a produção de força motriz, ou seja, a produção de trabalho útil, um termo moderno,

Calor é simplesmente força motriz, ou melhor, movimento que mudou de forma. É um movimento entre as partículas dos corpos. Onde quer que haja destruição de força motriz, há, ao mesmo tempo, produção de calor em quantidade exatamente proporcional à quantidade de força motriz destruída. Reciprocamente, onde há destruição de calor, há produção de força motriz (CARNOT, 1878, p. 94, tradução nossa)<sup>22</sup>.

A ideia da conservação de energia pode ser vista mais claramente a partir dos desdobramentos de um experimento mental relatado pelo Carnot (1824), quando busca explicar o funcionamento básico de uma máquina a vapor,

Pelas nossas primeiras operações teria havido ao mesmo tempo produção de força motriz e transferência de calórico do corpo A para o corpo B. Pelas operações inversas há ao mesmo tempo gasto de força motriz e retorno de calórico do corpo B ao corpo A. Mas se tivermos agido em cada caso sobre a mesma quantidade de vapor, se não houver perda de força motriz ou calórica, a quantidade de força motriz produzida em

---

<sup>22</sup> La chaleur n'est autre chose que la puissance motrice, ou plutôt que le mouvement qui a changé de forme. C'est un mouvement dans les particules des corps. Partout où il y a destruction de puissance motrice, il y a, en même temps, production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la quantité de puissance motrice détruite. Réciproquement, partout où il y a destruction de chaleur, il y a production de puissance motrice (CARNOT, 1878, p. 94).

primeiro lugar será igual àquela que teria sido gasto no segundo, e a quantidade de calórico passada no primeiro caso do corpo A para o corpo B seria igual à quantidade que volta no segundo caso do corpo B para o corpo A; Um número infinito de operações alternativas desse tipo poderia ser realizado sem, no final, ter produzido força motriz ou transferido calórico de um corpo para outro (CARNOT, 1824, p. 19-20, tradução nossa).<sup>23</sup>

A partir dessa observação do Sadi Carnot (1824), fica explícito que, para ele, parte do calor fornecido da fonte de maior temperatura é convertido em trabalho útil, sendo que o calor não utilizado para a realização do trabalho é cedido para fonte de menor temperatura. Caso seja aplicada a ideia da reversibilidade, mantendo as mesmas quantidades de calor, as condições iniciais do sistema são reestabelecidas, como nos aponta Nascimento, Braga e Fabris (2004).

Assim sendo, a partir da interpretação do recorte acima, de acordo com Nascimento, Braga e Fabris (2004),

Fica evidente que Carnot conhecia as bases físicas da conservação da energia. Na verdade, seria muito difícil admitir que, se desconhecesse o princípio da conservação da energia, e se não se valesse do equivalente mecânico do calor, pudesse chegar às suas conclusões sobre o funcionamento das máquinas térmicas, como o fez (NASCIMENTO; BRAGA; FABRIS, 2004, p. 514).

No que se refere ao segundo princípio, Carnot (1824) lançou os postulados básicos, a partir da sua busca pela compreensão da mecânica das máquinas térmicas. A obtenção de uma teoria científica completa seria capaz de explicar o funcionamento das máquinas a fogo, como também as máquinas movidas a processos mecânicos, como a cachoeira e moinhos de vento. Na sua visão, essa teoria científica só seria alcançada a partir de um conhecimento aprofundado e generalizado a respeito das leis da física acerca da atuação do calor sobre qualquer corpo, a qual era desconhecida até o presente momento. Ou seja, Sadi Carnot estava reivindicando o surgimento de uma nova ciência. Portanto, a sua obra seminal é a primeira contribuição para esse novo ramo de conhecimento.

As conclusões teóricas a que Sadi Carnot chegou, a respeito das máquinas térmicas no seu livro *Réflexions*, ajudaram a aprimorar o funcionamento de tais artefatos tecnológicos, pois,

---

<sup>23</sup> Par nos premières opérations, il y avait eu à la fois production de puissance motrice et transport du calorique du corps A au corps B; par les opérations inverses, il y a à la fois dépense de puissance motrice et retour du calorique du corps B au corps A. Mais si l'on a agi de part et d'autre sur la même quantité de vapeur, s'il ne s'est fait aucune perte ni de puissance motrice ni de calorique, la quantité de puissance motrice produite dans le premier cas sera égale à celle qui aura été dépensée dans le second, et la quantité de calorique passée, dans le premier cas, du corps A au corps B sera égale à la quantité qui repasse, dans le second, du corps B au corps A, de sorte qu'on pourrait faire un nombre indéfini d'opérations alternatives de ce genre sans qu'il y eût en somme ni puissance motrice produite, ni calorique passé d'un corps à l'autre (CARNOT, 1824, p. 19-20).

a partir da compreensão de como teoricamente elas funcionavam, as intervenções técnicas que buscavam o seu melhor rendimento e eficiência tornavam-se mais úteis.

A primeira inquietação que Sadi Carnot resolveu tratava-se da compreensão acerca da produção de movimento das máquinas a fogo, o qual, na sua visão, estava associado a uma circunstância, que descreveu como o ‘restabelecimento do equilíbrio no calórico’, que consiste na passagem de calórico de um corpo com temperatura mais elevada para um corpo com a temperatura menos elevada (CARNOT, 1824). Tal conclusão trata-se de um princípio geral fundamental das máquinas térmicas, pois essa regra funciona em qualquer máquina, independentemente do motor térmico ou substância empregada.

Ao voltar sua atenção para o ‘restabelecimento do equilíbrio do calórico’, como o propulsor para a produção de movimento nas máquinas a fogo, Sadi Carnot antecipou o segundo princípio da Termodinâmica, ao concluir que o calor flui de um corpo quente para um frio, ressaltando que tal situação não poderia ocorrer ao contrário.

Na concepção de Carnot (1824), o vapor era apenas um meio de transporte do calórico, como demonstra o Princípio de Carnot (1824):

O vapor é aqui apenas um meio de transporte do calórico. Ele preenche a mesma função como no aquecimento de banhos a vapor, exceto que, neste caso, o seu movimento é o rendimento útil. Notemos que esta circunstância é o restabelecimento do equilíbrio no calórico, isto é, a sua passagem a partir de um corpo no qual a temperatura é mais ou menos elevada, para outra em que é inferior (CARNOT, 1824, p. 10, tradução nossa)<sup>24</sup>

Nesse sentido, a produção do movimento de potência motriz não é ocasionada pelo consumo do calórico, mas a partir do seu transporte através do desequilíbrio de temperaturas entre um corpo quente para um frio, como comenta Carnot (1824). O calor por si só não é suficiente para desencadear a produção de força motriz. Para que ocorra a produção de movimento, há a necessidade de que haja a existência de duas fontes com temperaturas distintas, a fim de ocasionar o ‘restabelecimento do equilíbrio do calórico’.

Superado essa discussão a respeito da produção de movimento nas máquinas térmicas, Sadi Carnot (1824) abordou a eficiência desses artefatos tecnológicos na sequência, argumentando haver um limite para a eficiência das máquinas térmicas que não estava ligado a substância de trabalho empregada, mas apenas as temperaturas dos reservatórios entre os quais

---

<sup>24</sup>La vapeur n'est ici qu'un moyen de transporter le calorique; elle remplit le même office que dans le chauffage des bains par la vapeur, à l'exception que dans le cas où nous sommes son mouvement est rendu utile. L'on reconnaît facilement, dans les opérations que nous venons de décrire, le rétablissement d'équilibre dans le calorique, son passage d'un corps plus ou moins échauffé à un corps plus froid (CARNOT, 1824, p. 10).

a máquina operava. Comprovou isso a partir de 2 demonstrações. A primeira aconteceu por via de um experimento mental, no qual o estudioso teve como objetivo demonstrar de forma experimental que a força motriz era produzida a partir da passagem do calórico do corpo ‘quente’ para um corpo ‘frio’. Utilizando água como substância, Carnot (1824) exemplificou o funcionamento de uma máquina a fogo. A segunda, por sua vez, consistiu em uma demonstração mais rigorosa, que ficou, posteriormente, conhecida como o Ciclo Ideal de Carnot. Tal ciclo, utilizando como um gás ideal como substância de trabalho, funciona por meio do revezamento de compressões e expansões isotérmicas e adiabáticas.

A partir destas conclusões, Carnot (1824) passou a ter elementos concretos que lhe ajudaram a formular a teoria científica a que almejava. Nas suas palavras de cientista, quando tal fato fosse alcançado, a nova teoria seria capaz de explicar não só o funcionamento das máquinas com motores térmicos, como também de outras máquinas movidas por meio de fenômenos da natureza, como cachoeiras e moinho de vento. Dito isso, de acordo com as teorias de Carnot (1824), o funcionamento de uma máquina a fogo era semelhante à operação de uma roda d’água. Como podemos observar neste fragmento:

De acordo com as noções estabelecidas até agora, podemos comparar com bastante precisão a força motriz do calor à de uma cachoeira: ambas têm um máximo que não podemos ultrapassar, qualquer que seja a máquina empregada para receber a ação da água e qualquer que seja a substância empregada para receber a ação do calor. A força motriz de uma cachoeira depende de sua altura e da quantidade de líquido; a força motriz do calor depende também da quantidade de calórico empregado, e do que se poderia nomear, do que chamaremos com efeito de altura de sua queda, ou seja, da diferença de temperatura dos corpos entre os quais ocorre a troca de calor (CARNOT, 1824, p. 28, tradução nossa)<sup>25</sup>.

De acordo com Srinivasan (2001), uma roda d’água recebe água de um reservatório hidráulico em um nível superior e descarrega água para um reservatório hidráulico em um nível inferior. Portanto, converte uma parte da energia potencial da água que cai em energia cinética. Na roda d’água, a energia potencial disponível na água pode ser extraída como energia cinética sem nenhuma perda de água.

Paralelamente a isso, Carnot (1824) argumentou que, como a roda d’água, uma máquina térmica recebe calor de um reservatório térmico a uma temperatura mais alta e conduz calor

---

<sup>25</sup> D’après les notions établies jusqu’à présent, on peut comparer avec assez de justesse la puissance motrice de la chaleur à celle d’une chute d’eau: toutes deux ont un maximum que l’on ne peut pas dépasser, quelle que soit d’une part la machine employée à recevoir l’action de l’eau, et quelle que soit de l’autre la substance employée à recevoir l’action de la chaleur. La puissance motrice d’une chute d’eau dépend de sa hauteur et de la quantité du liquide; la puissance motrice de la chaleur dépend aussi de la quantité de calorique employé, et de ce qu’on pourrait nommer, de ce que nous appellerons en effet la hauteur de sa chute, c’est-à-dire de la différence de température des corps entre lesquels se fait l’échange du calorique (CARNOT, 1824, p. 28).

para um reservatório térmico a uma temperatura mais baixa, não havendo perda de calórico nesse processo. Sem aplicar nessas afirmações o princípio da primeira lei, que na época ainda não havia sido formulado, Carnot (1824) chegou aos postulados da segunda lei da Termodinâmica, afirmando que uma máquina térmica não pode converter todo o calor em trabalho em um processo cíclico.

De acordo com Erlichson (1999), Sadi Carnot pode ser considerado como o fundador da segunda lei da Termodinâmica, apesar de ter se baseado na Teoria do Calórico que era dominante na sua época. Na busca por uma teoria científica que explicasse o funcionamento das máquinas a fogo, discutidas em sua primeira e única obra, Carnot (1824) lançou os postulados básicos do segundo princípio.

## 6 O CONTEXTO CIENTÍFICO APÓS A PUBLICAÇÃO DAS *RÉFLEXIONS* DO CARNOT

Neste capítulo, apresentamos uma reflexão a respeito da recepção do único livro de Sadi Carnot, publicado em 1824 no meio científico de sua época. Inicialmente, foi conturbada, pois a obra não conseguiu proliferar entre os cientistas mais renomados da *Academie des Sciences* (Academia de Ciências) de Paris, no momento de sua publicação, caindo em dez anos de anonimato absoluto, até ser resgatado pelo Émile Clapeyron (1799- 1864) em 1834. Esse adicionara uma linguagem matemática aos raciocínios de Carnot (1824), para que suas ideias, conseqüentemente, chegassem a outros cientistas.

### 6.1 A obra esquecida

Tanto Sadi Carnot quanto o seu livro *Réflexions* (1824) ainda permanecem envoltos de muitos enigmas, apesar dos esforços dos pesquisadores da História da Ciência em tentar compreendê-los nas últimas décadas. O historiador Eric Mendoza (1981) nos conta que, quando o livro de Sadi Carnot foi publicado na França, pouquíssimas cópias foram vendidas e lidas por pessoas capazes de compreender o que ele estava expressando ao longo das 119 páginas da versão original. O livro, na sua concepção, foi lançado num formato incomum para a época, se comparado aos textos científicos que eram publicados, passando a impressão de ter sido totalmente criado no interior de seu pensamento.

Em 26 de julho daquele ano, dois dias após a publicação das *Réflexions*, Pierre Girard, um relevante engenheiro da capital francesa e seu amigo pessoal, apresentou o livro para a *Academie des Sciences* (Academia de Ciências) em Paris. Na assembleia, estavam presentes nada menos do que os acadêmicos mais notáveis da ciência francesa da época, como Arago, Fourier, Laplace, Ampère, Fresnel, Legendre, Poisson, Cauchy, Dulong e Navier. A resenha produzida por Pierre Girard conseguiu ser publicada na *Revue Encyclopédique*, revista de cunho literário especializada na divulgação de críticas acerca de obras que se destacavam no meio científico, na literatura e artes plásticas, como nos alerta Wisniak (2000). No entanto, apesar da relevância dos presentes na assembleia, como afirma Dias (2007, p. 493), “o livro caiu em ouvidos moucos e não teve impacto imediato”.

De acordo com Wisniak (2000), provavelmente, a forma como Pierre Girard apresentou as ideias para assembleia não foi a mais acertada possível, apesar de ter explanado sobre os teoremas e as conclusões do manuscrito integralmente. Falhou em não ter dado atenção devida



ao mérito de raciocínio altamente original e inovador que o Carnot havia utilizado para chegar aos seus resultados. Como consequência, *Réflexions*, entre aqueles cientistas ilustres, não ganhou a atenção imediata e o impacto a que almejava.

Cimbliris (1991), a respeito desse episódio, cita alguns motivos que impediram o sucesso imediato do manuscrito de Sadi Carnot. Dentre eles, destaca-se a questão do Paradigma de Thomas Khun (1960), a questão do estilo incomum adotado para a construção da obra e, ainda, um novo elemento, a falta de relevância do Carnot no meio científico, apesar de ser filho do ilustríssimo Lazare Carnot, um dos fundadores do modelo de ciência moderna da França,

Era pouco provável que os físicos parisienses ficassem impressionados pelo livro de Carnot, dado o paradigma científico dominante na época (no sentido de Kuhn). O outro fator foi o estilo adotado, destoante do estilo clássico da Física, exemplificado, por exemplo por Laplace, Poisson, Fourier, Navier. Além disso, apesar do valor científico de Carnot pai, e da atuação proeminente deste na Académie des Sciences, o filho não tinha acesso à Academia, areópago máximo da ciência da época. Não é de admirar, portanto, que apesar de ter sido o livro de Carnot mencionado em uma sessão da Academia, não despertou interesse algum na ocasião, e mesmo depois (CIMBLERIS, 1991, p. 41).

Para Dias (2007), o fracasso momentâneo obtido pelas *Réflexions* perante o público mais especializado deve-se ao fato de que tal obra não foi produzida para esse, e sim, para um público mais geral, com destaque para os construtores e usuários de máquinas a vapor, tendo em vista a forma como Carnot (1824) buscou se expressar: utilizando uma linguagem mais informal, sem recorrer, demasiadamente, a equações matemáticas, tornando, assim, o texto mais acessível a um público menos elitista. Essa visão vai de encontro às concepções de Cimbliris (1991) e nos aponta o verdadeiro público de Sadi Carnot, conforme podemos comprovar a seguir:

A audiência possível de Carnot eram os engenheiros e os técnicos (que hoje diríamos "de grau médio"). Havia na época os extremos educacionais na França, dos "mécaniciens autodidactes" e dos "ingénieurs" alunos da École Polytechnique, de formação ampla e abrangente. Isto antes de 1800; com a criação do Conservatoire des Arts et Métiers em 1800 e da École Centrale des Arts et Manufactures (em 1829, portanto posterior à feita das *Réflexions*), houve formação de engenheiros intermediários (CIMBLERIS, 1991, p. 41-42, grifos do autor).

Aclarada a questão do público, recaímos em outro ponto importante, Sadi Carnot fez suas reflexões acerca do poder motriz do fogo, à luz da Teoria do Calórico, a qual trata o calor como um fluido, natureza de calor defendida pelo seu conterrâneo Lavosier, como nos alerta Pascoal (2016). De acordo com Dias (2007), o manuscrito de Sadi Carnot foi concebido no contexto de crise profunda da teoria do calórico; em 1824,

A teoria, senão morta, agonizava em coma profundo e nem o próprio Carnot acreditava nela, como mostram notas em seu caderno de rascunho; sua teoria dependia de muitos resultados obtidos com o calórico e o desespero era compreensível (DIAS, 2007, p. 493).

Em 1832, oitos anos depois da publicação das *Réflexions*, Sadi Carnot veio falecer sem ter dado outra contribuição para a Física e sem ver o seu livro alcançar o impacto que merecia. Dois anos depois de sua morte, em 1834, sua obra é citada nos trabalhos científicos de Émile Clapeyron (1799- 1864), o qual publicou um texto científico, no qual retomava algumas discussões realizada por Carnot nas *Réflexions*. Segundo Mendoza (1981), foi muita sorte um exemplar do Carnot ter sobrevivido 10 anos, após sua publicação, e ter chegado às mãos do Émile Clapeyron, provavelmente, o único que teve acesso a obra e leu com a compreensão devida. Diante disso, temos uma certeza: os fatos históricos nos mostram que Clapeyron leu e o entendeu. Como resultado, o texto foi reescrito de uma forma expandida e submetido em um jornal especializado, o *Journal de l'Ecole Polytechnique*.

Émile Clapeyron também foi um engenheiro formado pela Escola Politécnica de Paris, da qual também saiu o Sadi Carnot. Após uma temporada trabalhando na Rússia como engenheiro, voltou para a França, onde se dedicou à engenharia ferroviária. No trabalho de Carnot (1824), traduziu-o para uma linguagem mais matemática, tornando-lhe mais compreensível para os engenheiros de sua época. Foi atribuído a ele o gráfico do Teorema de Carnot, baseado no diagrama do indicador do James Watt, como nos aponta Dias (2007),

Clapeyron deu à teoria um tratamento matemático, formal, ausente do livro de Carnot; introduziu gráficos  $p \times V$ ; 3 matematizou o Princípio de Carnot: eficiência =  $\Delta t C(t)$ , onde C - chamada função de Carnot - e uma função desconhecida da temperatura, somente, e independe da substância de trabalho (p. 494).

No entanto, as contribuições do Clapeyron não chegaram a ter um reconhecimento imediato na época de sua publicação. O cenário veio a mudar quase uma década depois, em 1843, quando os artigos foram traduzidos para o alemão. Tal fato permitiu que, de uma forma modesta, o trabalho de Carnot (1824) e suas contribuições comesçassem a ser reconhecidas e servissem de inspiração para que Rudolf Clausius (1822-1888) introduzisse o conceito de entropia (PINTO; SILVA, 2018).

De acordo com Mendoza (1981), o artigo de Émile Clapeyron também foi traduzido para o inglês e o James Joule teve acesso às ideias do Carnot, que, por sua vez, informou a seu amigo Willian Thompson. Como nos aponta Cimblaris (1991), foram necessários 23 anos para que as ideias de Carnot fossem redescobertas. Nessa época, a comunidade acadêmica da Europa

já estava preparada para receber e assimilar as ideias inovadoras do Sadi Carnot. Nesse sentido, Mendoza (1981) comenta,

Após vários anos de luta, foi possível transformar o argumento dele em forma moderna – pois a versão de Sadi Carnot baseava-se na teoria do calórico do calor, inaceitável para a nova geração de físicos e, pela primeira vez, o teorema de Carnot e o ciclo de Carnot tomaram seu lugar. Lugar na corrente principal da Física um quarto de século depois que as *Réflexions* foram escritas (MENDOZA, 1981, p. 77, tradução nossa).<sup>26</sup>

As ideias do Sadi Carnot chegaram a Willian Thompson numa época em que esse último cientista, então estagiário do Laboratório Regnault, dedicava-se à construção de um bom termômetro para suprir uma demanda da teoria do calor que necessitava de dados mais precisos acerca de calor específico, calor latente, etc. O artigo sugerido por Joule tratava-se de *Puissance motrice de la chaleur* (1834), o qual continha uma síntese das principais ideias do Sadi Carnot, publicado pelo Émile Clapeyron. Após concluída a leitura, Thompson percebeu que a solução para os problemas da investigação que estava realizando se encontrava nos manuscritos do Sadi Carnot, publicados quase um quarto de século antes. Portanto, viajou a Paris para ter acesso ao livro original, no entanto, não encontrou uma cópia, mas o pouco das ideias do Carnot, a que teve acesso por terceiros, foram suficientes para o desenvolvimento da teoria do calor (DIAS, 2007).

De acordo com Pinto e Silva (2018), a partir das observações obtidas pelo Carnot, apontando que o trabalho realizado pelas máquinas térmicas estava sujeito apenas à diferença de temperatura entre as fontes, não tendo nenhuma ligação com o agente térmico empregado, o Lorde Kelvin concluiu que o efeito mecânico produzido por uma certa quantidade de calor consistia numa escala absoluta. Desse modo, como aponta as autoras, a definição de escala Kelvin, compreendida como ‘grau de agitação das moléculas’ partiu de um contexto que não considerava a existência dessas.

Portanto, como fruto de tal investigação, baseado nas ideias do Carnot, através das melhorias feitas por Clapeyron, lançou dois artigos fundamentais: o primeiro, trata-se do *On an absolute thermometric scale founded on Carnot's theory of the motive power of heat, and calculated from Regnault's observations* (1849), publicado no periódico *Philosophical Magazine*. Tal artigo, como nos alerta Dias (2007), é compreendido como um ‘Teorema de

---

<sup>26</sup> After several years of struggle, it was possible to turn his argument into modern form – for Sadi Carnot's version was based on the caloric theory of heat, unacceptable to the new generation of physicists, and for the first time, Carnot's theorem and Carnot's cycle took their place. Place in the mainstream of physics a quarter of a century after the *Réflexions* were written (MENDOZA, 1981, p. 77).

existência', sobre o qual, baseado nos princípios de Carnot, Thompson faz uma demonstração teórica da existência da temperatura absoluta. Já o segundo artigo científico, publicado no mesmo ano, em 1849, mas, agora, em outro periódico, com o título *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, An account of Carnot's theory of the motive power of heat; with numerical results deduced from Regnault's experiments on steam*, o Thompson apresentou uma nova síntese da Teoria do Carnot com as modificações do Clapeyron.

Foram necessárias duas décadas, para que as ideias do Sadi Carnot encontrassem terreno propício para poder germinar. Apesar de todo um início perturbado, o principal manuscrito do físico deixou as bases necessárias para a fundação da Termodinâmica clássica, das quais destacam-se a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, que foram construídas a partir de um trabalho coletivo de diversos cientistas, dentre os quais, destacamos Benoit Paul, Émile Clapeyron, William Thomson e Rudolf Julius Emmanuel Clausius, que, direta ou indiretamente, estavam sob a influência das reflexões da força motora do fogo do jovem engenheiro francês (PASCOAL, 2016; NASCIMENTO; BRAGA; FABRIS, 2004).

Apesar desses problemas iniciais, Cimblaris (1991) afirma que Sadi Carnot conseguiu fundar uma Termodinâmica única e original, antecipando, antes do tempo, o surgimento desse importante ramo de estudo da Física, preocupado em estudar as relações entre calor e trabalho. Todavia, tal feito foi ignorado pelos seus contemporâneos e não conseguiu fixar um lugar na História. Mesmo assim, Carnot (1824) pode ser considerado como a ponte da transição das máquinas a vapor para as máquinas de combustão externa, mais, remotamente, para as máquinas de combustão interna.

## **7 SADI CARNOT E O ENSINO DA TERMODINÂMICA**

Neste capítulo fazemos uma breve discussão a respeito da utilização da História, Filosofia e Sociologia da Ciência – HFSC em sala de aula. Vista como uma opção para o ensino tradicional de ciências, baseado fortemente na memorização de equações matemáticas, a utilização da HFSC, através do aporte historiográfico da História Cultural da Ciência, pode contribuir para uma formação mais completa dos discentes, levando esse público a ter acesso também a aspectos da Natureza da Ciência. Fundamentados na sugestão de desenvolvimento deste estudo no ensino de ciências, sugerimos a produção de uma narrativa histórica baseada nas contribuições de Sadi Carnot para as máquinas térmicas e a formação da Termodinâmica, a qual apresenta elementos concretos acerca da Natureza da Ciência e construção do conhecimento científico, para serem explorados pelos professores, no objetivo de ter um ensino problematizador.

### **7.1 A História, Filosofia e Sociologia da Ciência na educação científica**

De uma forma geral, há um consenso construído, há décadas, no debate que envolve historiadores e professores especialistas em educação científica, de que a utilização da História, Filosofia e Sociologia da Ciência – HFSC - no processo de ensino e aprendizagem é altamente benéfica para o Ensino de Ciências, quando visa à formação de indivíduos reflexivos e críticos acerca da sua formação científica, contribuindo, significativamente, para o exercício de sua cidadania (ALVIM; ZANOTELLO, 2014).

Algumas conclusões acerca dessas pesquisas apontam que a utilização correta da HFSC facilita para o aluno a internalização de conceitos e leis científicas, tornando-a mais significativa, possibilitando a compreensão do contexto sociocultural, em que o conhecimento científico é produzido, como também das relações de influências de poder que a ciência exerce e sofre da sociedade e, além disso, o entendimento acerca do método científico e uma visão crítica a respeito da aplicação e implicações sociais da instituição científica (ALMEIDA, 2004; FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011; ALVIM; ZONATELLO, 2014; BRASIL; BRASIL, 2016).

Portanto, o uso da HFSC favorece uma melhor aprendizagem dos conteúdos científicos aliado a uma compreensão profícua acerca da Natureza da Ciência, a qual é definida por McComas (2008), como um conhecimento híbrido destinado a compreender a construção do trabalho científico. Tal conhecimento é formado a partir da contribuição de vários estudos

sociais da ciência, dentre os quais destacamos a HFSC; a Psicologia, com as pesquisas em ciências da cognição; juntamente com uma abrangente descrição da ciência, destacando elementos essenciais, no que diz respeito a seu funcionamento, à forma como os cientistas atuam enquanto um grupo social e à relação de influência entre a sociedade com os empreendimentos científicos.

Apesar dos benefícios citados acima, tal discussão reflete de forma discreta nos documentos oficiais que guiam a Educação Básica no Brasil, com destaque para a Base Nacional Comum Curricular – BNCC, em vigor desde 2018. Das 10 competências gerais destinada ao ensino básico para serem desenvolvidas ao longo de toda formação dos discentes, destacamos a primeira delas que faz referência a HFSC, pois sugere:

Valorizar e utilizar os conhecimentos historicamente construídos sobre o mundo físico, social, cultural e digital para entender e explicar a realidade, continuar aprendendo e colaborar para a construção de uma sociedade justa, democrática e inclusiva (BRASIL, 2018, p. 9).

Para que tal competência seja atingida de forma eficaz, é necessário fazer uso de aspectos da Natureza da Ciência. No entanto, como destaca Kessler (2022), ela utiliza apenas a HFSC, pois a ideia de conhecimento historicamente construído, com o objetivo de entender e explicar a realidade dialogando com visões de ciência para explicar fenômenos cotidianos e a valorização de novas tecnologias e do mundo digital é discutida na seara de tal abordagem. Isso chama atenção, pois das 10 competências gerais da BNCC, essa é a mais ligada a HFSC.

O documento traz outras competências que abrem espaços para a utilização de aspectos da Natureza da Ciência. Exemplo disso são as competências 2 e 4, que focam em elementos mais inerentes à descrição da Ciência, como pode ser visto abaixo:

Exercitar a curiosidade intelectual e recorrer à abordagem própria das ciências, incluindo a investigação, a reflexão, a análise crítica, a imaginação e a criatividade, para investigar causas, elaborar e testar hipóteses, formular e resolver problemas e criar soluções (inclusive tecnológicas) com base nos conhecimentos das diferentes áreas.

Utilizar diferentes linguagens – verbal (oral ou visual-motora, como Libras, e escrita), corporal, visual, sonora e digital –, bem como conhecimentos das linguagens artística, matemática e científica, para se expressar e partilhar informações, experiências, ideias e sentimentos em diferentes contextos e produzir sentidos que levem ao entendimento mútuo (BRASIL, 2018, p. 9).

As competências 2 e 4, respectivamente, apesar de ambas não deixarem explícito aspectos relacionado a HFSC, quando objetiva-se discutir ou compreender aspectos acerca da natureza empírica da ciência ou do conhecimento científico; observação, inferência e entidades teóricas na Ciência; distinção entre teorias e leis científicas; papel da criatividade e da

imaginação na natureza do conhecimento científico; influência das teorias sobre o conhecimento científico e o mito do ‘Método Científico’, elas contribuem para a formação crítica do estudante. Portanto, de certo modo, a HFSC pode contribuir para a aquisição desses conhecimentos, mesmo tais competências não fazendo referência direta a HFSC (KESLLER, 2022).

Entre o que as pesquisas que fomentam os debates dos especialistas evidenciam e os documentos oficiais sugerem ser feito em sala de aula, há obstáculos que dificultam a comunicação entre a teoria e a prática entre os muros das escolas. As dificuldades apontadas que impedem a inserção da História da Ciência na formação científica vão desde a falta de livros didáticos e paradidáticos construído para esse propósito; falta de formação apropriada para os professores que lidam com o ensino dessas disciplinas e a não compreensão das possibilidades que uma metodologia de ensino baseada na História, Filosofia e Sociologia da Ciência pode contribuir para o enriquecimento das aulas, principalmente.

Esses fatores dificultam a inserção mais proveitosa da HFSC no ensino de ciências e contribuem para distorções acerca dos seus objetivos. De acordo com Alvim e Zonatello (2014), existe um conflito em relação à história das ciências e ensino de ciências que se estende há anos, em que a História da Ciência é vista como apenas um dispositivo didático do ensino de ciências. Com essa ideia simplista, frequentemente, a História da Ciência é compreendida como algo acessório dos conteúdos científicos, acionada, apenas, quando se busca ilustrar um determinado conceito ou amenizar o cansaço da aprendizagem em ciências.

Essa visão utilitarista da História da Ciência reflete nos livros didáticos, que, em sua grande maioria, fazem uma tentativa frustrada de narrar um pouco de história, geralmente, por meio de textos fragmentados em aberturas ou no final dos capítulos, destacando os feitos do cientista ligado ao conhecimento científico discutido. A intenção em si não é toda ruim, mas, se não bem executada, pode ser altamente prejudicial para a imagem da ciência, pois podem fazer referências dispersas e sem profundidade sobre o personagem ou tópico científico abordado. De acordo com Silva (2013, p. 24), [...] “Dessa forma, com base nessas referências, estudantes e profissionais se acham participantes de uma longa tradição histórica, o que é absolutamente falso”.

Os textos com fragmentos históricos discutidos nos livros didáticos, segundo Allchin (2004), são vistos como um remédio educacional que objetiva dar a solução para a ineficiente abordagem dos tópicos científicos trabalhados de uma forma descontextualizada, prezando, maciçamente, pelas equações matemáticas, sem ter um aprofundamento considerável acerca da Natureza da Ciência. Nesse sentido, Brito *et al.* (2014, p. 215) alertam que, “compreender os

processos envolvidos na construção do conhecimento científico não se trata de uma tarefa trivial”.

Geralmente, esses textos que permeiam os conteúdos das disciplinas seguem uma arquitetura dos mitos científicos, que pode ser identificada a partir da constatação de pelo menos um desses elementos: a) Monumentalidade: o fragmento atribui uma grandiosidade ao cientista e amplifica a sua descoberta a tal ponto que seus erros são ocultados. Apenas é dado destaque a seus acertos ou pontos positivos de sua pesquisa, passando uma imagem de herói; b) Idealização: há simplificação do desenvolvimento científico, que visa à contação de uma boa história. Nesse sentido, uma determinada contribuição dada a ciência é retirada do seu contexto econômico, social e político, entre outros. Contribuições anteriores e posteriores que ajudaram a formular tal conceito científico são ignoradas; c) Drama-afetivo: recorre-se a artifícios retóricos, como o conflito dramático e a surpresa da descoberta para persuadir o interlocutor. Personagens históricos ou conceitos científicos são colocados em lados opostos, nos quais os dramas e sensacionalismos acerca dos fatos são explorados. Um dos exemplos clássicos trata-se da relação de Galileu Galilei com a Igreja. A descoberta de novos fatos científicos ganha nuances que fogem do método, sendo consideradas como algo do acaso. O prêmio por ter seguido uma série de procedimentos corretos ou, caso falhe, é considerado uma punição do destino (ALLCHIN, 2004).

Por último, na Narrativa explicativa e de justificação, os fragmentos textuais se assemelham às fábulas, na qual está contida, em sua estrutura, uma lição ou uma moral implícita. A narrativa seguida mostra que elencar uma série de eventos leva necessariamente a um resultado ou achado científico relevante. Com isso, simplifica o processo científico, atribuindo-lhe características especiais. A esses fenômenos, Allchin (2004), os chama de pseudo-histórias, compreendidos como “ideias falsas sobre o processo histórico da ciência e a natureza do conhecimento científico, mesmo quando baseados em fatos reconhecidos” (ALLCHIN, 2004, p. 186, tradução nossa)<sup>27</sup>.

Essas situações expostas aqui e aliadas com concepções inadequadas acerca do trabalho científico presentes na formação de alguns professores, como reporta Gil-Pérez *et al.* (2001), colaboram para reforçar visões distorcidas acerca da ciência em sala de aula. Nessas concepções, geralmente, é retirada da ciência a sua dimensão humana, a qual passa a ser vista como neutra em relação ao seu contexto social, além de a-histórica, dogmática, empírico-

---

<sup>27</sup> False ideas about the historical process of science and the nature of scientific knowledge, even if based on acknowledged facts (ALLCHIN, 2004, p. 186).



indutivista, elitista, analítica, acumulativa e linear. Visões ingênuas que não dizem respeito à ciência, portanto, precisam ser combatidas.

Nesse sentido, para contornar tal situação, existe dentro da HFSC diversas abordagens que podem ser usadas com esse propósito, dialogando com as conclusões das pesquisas na área de educação científica e os documentos oficiais. Nesse estudo, ressaltamos as vantagens e contribuições da vertente historiográfica da História Cultural da Ciência para o ensino, que compreende a ciência como integrante da cultura humana, a qual está mais próxima de oferecer subsídios para uma formação científica mais crítica e reflexiva.

De acordo com Alvim e Zonatello (2014), a ciência entendida como cultura vai muito além dessa compreensão que restringe a ciência a um “conjunto de saberes especializados, produtores de teorias e metodologias” (p. 352). Devendo, portanto, ser compreendida como:

[...] uma construção humana sobre os fenômenos do mundo natural a partir de elementos de seu universo cultural, possuindo uma relação dialógica com a sociedade na qual é produzida, uma vez que a ciência sofre e exerce impactos sócio-político-econômicos e culturais na mesma (ALVIM; ZONATELLO, 2014, p. 353)

Nesse sentido, a História Cultural da Ciência tem como objetivo principal a construção de relatos históricos científicos versando com outros aspectos culturais do arcabouço da humanidade, os quais devem trazer, em seu escopo, uma análise dos impactos que tal lei ou conceito científico desencadeou na sociedade que o arquitetou.

Tais análises devem ser exploradas em sala de aula, visando a uma educação científica problematizadora, crítica, que valorize outros conhecimentos humanos essenciais para compreender o contexto social passado, com influências no tempo presente, como a História, Filosofia e Sociologia, como defende Zanetic (2005). Para esse autor, a ciência tem vários componentes culturais que podem ser trabalhados em sala de aula. Deste modo, o ensino de ciências pode ir além das aulas de experimentação e memorização de equações matemáticas. Pode ser também explorada sua relação com outras áreas do conhecimento, suas implicações ideológicas e políticas (ZANETIC, 1998).

Nesse sentido, Alvim e Zonatello (2014, p. 350) defendem que o ensino de ciências seja palco para a construção de uma cultura científica que leve o estudante a criar [...] “noções sólidas sobre o que as ciências produzem, quais seus objetos de estudo, como elas se desenvolvem historicamente e como se relacionam no mundo contemporâneo com as esferas social, econômica e política”. Isso abrirá caminhos frutíferos para uma formação reflexiva e cidadã, como almejam as pesquisas e os documentos oficiais.

Para que isso aconteça, as discussões sobre a Ciência em sala de aula devem ser construídas, visando abranger o máximo possível dessas questões essenciais para a compreensão da sua Natureza. Portanto, as discussões e os materiais pedagógicos devem ser criados na perspectiva de não apenas ser algo introdutório acerca das ideias aceitas e utilizadas pela comunidade com foco nos produtos finais. No seu escopo, devem discutir as influências externas, conflitos, contradições e mudanças de perspectivas, ocasionados pelo desenvolvimento da Ciência.

## **7.2 Contribuições da historiografia do Sadi Carnot para o ensino da Termodinâmica**

Um episódio histórico a respeito da Ciência pode ser levado para a educação científica de diversas formas a partir de diversas abordagens. No entanto, alguns cuidados devem ser tomados, quando se opta por explorar alguns episódios históricos em sala de aula e objetiva-se uma formação mais crítica e reflexiva sobre a Ciência. Destacamos, por exemplo, a seleção do conteúdo histórico a ser trabalhado, o qual o professor deve atentar-se para o fato de realmente esse ter elementos suficientes para os alunos refletirem acerca da Natureza da Ciência e da construção do conhecimento científico. Uma escolha estéril pode não oferecer subsídios suficientes para o propósito e ainda ser prejudicial ao seu trabalho, como também pode reforçar uma imagem não correta a respeito da Ciência junto aos seus alunos, como nos alerta Forato, Pietrocola e Martins (2011).

O episódio histórico discutido, neste estudo, que versa sobre as contribuições de Sadi Carnot para o aperfeiçoamento das máquinas térmicas e a formação da Termodinâmica oferece muitos elementos que podem ser explorados de uma forma crítica e reflexiva nas aulas de ciências. Nesse sentido, sugerimos como proposta de trabalho a confecção de uma narrativa histórica para ser trabalhada no ensino da Termodinâmica. O recurso pedagógico deve ser construído a partir do aporte historiográfico da História Cultural da Ciência, pois é a vertente da HFSC que discute a Ciência como integrante da cultura humana.

Para a confecção de tal recurso pedagógico a partir dessa abordagem, alguns cuidados devem ser tomados, pois como alertam Silva e Errobidart (2019, p. 72), as narrativas históricas “não devem ser concebidas como uma mera descrição linear de fatos e datas, vinculadas a grandes nomes da ciência, mas sim, como uma reconstrução de episódios, que retratam a intrincada relação entre a sociedade e o fazer científico”. Ou seja, as narrativas históricas devem discutir como ocorre a construção do conhecimento científico, contextualizando o processo que

culminou a formação de novas teorias e destacando as modificações que esse empreendimento científico desencadeou na evolução da Ciência e sociedade.

Nesse sentido, destacamos alguns aspectos da Natureza da Ciência e da construção do conhecimento científico presente na historiografia do Sadi Carnot que podem ser explorados pelos professores no ensino de ciências, a partir da utilização de narrativas históricas, tendo como referência a discussão realizada ao longo deste estudo:

**1) A influência social, econômica e política no desenvolvimento científico:** Quando o único livro de Sadi Carnot, *Réflexions*, foi publicado em 1824, o continente europeu encontrava-se efervescente com os desdobramentos políticos, sociais e econômicos, ocasionados pelas duas grandes revoluções que marcaram os últimos anos do século XVIII - A Revolução Industrial que explodiu na Inglaterra e a Revolução Política na França. Ambas as revoluções modificaram a Europa em diversos aspectos, na economia, política e social.

A Ciência também passou por transformações que a moldaram. A partir desses acontecimentos, principalmente a Revolução Industrial, que tinha como um dos seus principais alicerces a máquina a vapor, impulsionou o surgimento de investimentos direcionados a pesquisas, para torná-las mais eficientes, desencadeando um avanço científico mais pragmático e interesse maior da sociedade em um ramo específico da ciência, ligado diretamente ao avanço tecnológico da época (BALDOW; JÚNIOR, 2010).

Como a pioneira da Revolução Industrial foi a Inglaterra, o país se destacou rapidamente no velho continente com as tecnologias oriundas do aperfeiçoamento das máquinas a vapor, que resultaram numa industrialização forte que desencadeou qualidade de vida para a sua população e aperfeiçoamento de sua defesa bélica, que a tornou ainda mais intensa nos mares.

Carnot (1824), nas primeiras páginas de seu livro, recorreu aos grandes feitos que as máquinas a vapor trouxeram para a Inglaterra, no que diz respeito à industrialização e força militar nos mares para justificar a sua busca por uma teoria completa que explicasse o funcionamento das máquinas térmicas. Segundo Carnot (1824), a Inglaterra era forte, porque soube como usar como ninguém as máquinas a seu favor. Caso retirasse as máquinas de seu domínio, era como tirar seu carvão mineral, que foi essencial numa outra época, quando o país estava em crise energética pela exaustão de suas florestas.

As *Réflexions* do Sadi Carnot (1824) também se atentam em relacionar às máquinas a vapor com os avanços na navegação para fins comerciais, que possibilitaram viagens muito mais rápida em comparação a navios a velas e na possibilidade de uma comunicação rápida entre diversos pontos da Europa. Tudo isso Carnot (1824) usou como justificativa para embasar

sua pesquisa a respeito do aperfeiçoamento de tais equipamentos, alegando que o domínio mais aprofundado possibilitaria ganhos imagináveis para a sociedade de sua época.

As máquinas a vapor, o principal objeto estudo do Sadi Carnot, ao longo de sua evolução, teve seu desenvolvimento baseado em influências econômicas, políticas e sociais. Desde a máquina de Savery a uma busca pelo aperfeiçoamento de tais equipamentos, buscando melhor eficiência operacional, visando ganho de tempo nas usinas de carvão e poupar a vida da mão-de-obra e ganhos capitais, impuseram uma nova realidade pragmática à ciência. Os investimentos para a área científica visavam solucionar problemas técnicos do dia a dia das minas de carvão e fábricas (BALDOW; JUNIOR, 2010).

Percebe-se que as influências políticas, econômicas, sociais estavam muito presentes nos feitos dos antecessores de Carnot (1824), como também na sua própria conduta, como ele deixa bem claro nas páginas introdutórias de seu livro que fatores econômicos, sociais e políticos eram também as justificativas de prosseguir na busca por uma teoria completa que explicasse o funcionamento das máquinas térmicas.

Diante disso, temos aqui vários elementos postos que refutam uma visão deformada acerca da construção do conhecimento científico que transmite uma imagem socialmente neutra da Ciência (GIL-PÉREZ *et al.*, 2001), a qual vê a Ciência de forma isolada, sem abordar as complexas relações entre ciência, tecnologia e sociedade.

Tais fatos também nos levam para outra discussão, que consiste na refutação da **2) Ideia de uma Ciência feita por gênio a partir de feitos extraordinários** e na afirmação de uma **3) Ciência desenvolvida a partir da coletividade**. Segundo Gil- Pérez *et al.* (2001), quando se trabalha em sala de aula uma Ciência socialmente neutra, o cientista é visto “como seres “acima do bem e do mal”, fechados em torres de marfim e alheios à necessidade de fazer opções” (p. 133, grifos dos autores). Nesse sentido, a Historiografia do Sadi Carnot oferece elementos que refutam tal afirmação.

De acordo com Cimbliris (1991), Sadi Carnot foi herdeiro de uma grande tradição científica. As máquinas a vapor e a Termodinâmica foram construídas a partir da colaboração de diversas pessoas ao longo da História. Quando Carnot (1824) publica a sua obra seminal, as máquinas térmicas já eram uma realidade presente na vida dos europeus, eram responsáveis, em parte, pelos avanços tecnológicos e qualidade de vida que a sociedade gozava até então. Isso graças à colaboração de diversos inventores que conseguiram registrar seus nomes na História e outros que foram esquecidos por ela. O primeiro protótipo que pode ser considerado como uma máquina a vapor data do ano 1 a.C., construído pelo construtor Heron de Alexandria.

De acordo com Dias (1990), as máquinas podem ser consideradas como uma criação dos povos antigos, mas foi na modernidade, diante do contexto econômico, que foram aperfeiçoadas para os fins desejáveis. Entre aperfeiçoadores que ganham destaque, temos o Thomas Savery (1650-1715), Thomas Newcomen (1663-1729) e o James Watt (1736-1819). Todos são citados nas *Réflexions*, os quais são rotulados pelo Carnot (1824) como os verdadeiros criadores desse artefato tecnológico que tanta alegria trouxeram para a Inglaterra.

No entanto, o Sadi Carnot foi o primeiro que buscou compreender o funcionamento das máquinas a vapor por um método científico, visando à criação de uma teoria que explicasse o funcionamento de tais equipamentos de uma forma generalizada. Nesse ínterim, Sadi Carnot abriu caminhos para a formação do segundo princípio da Termodinâmica, deixou implícito o primeiro princípio nos seus escritos, a partir dos postulados básicos que deixou em sua única obra e serviu de base para que outros cientistas se fundamentassem para dar suas contribuições no novo ramo de estudos que se formara na Física, a Termodinâmica.

A partir desses trechos, observamos a ideia da genialidade sendo colocada em xeque e uma Ciência sendo construída coletivamente a partir da ação de diversos indivíduos, visando a um bem comum. Também se nota a inserção desses personagens na sociedade, os quais faziam as opções investigativas, visando solucionar os problemas que lhe afligiam em diversos aspectos sociais, sobretudo econômicos. Nesse sentido, pode-se discutir sobre **4) A função social da Ciência**, que neste episódio coloca-a como portadora de soluções técnicas para problemas sociais, econômicos e políticos. Nessa relação, ambos saem ganhando, conforme a Ciência mune a sociedade de soluções para os seus problemas, as demandas sociais impulsionam que novos conhecimentos sejam formulados e aperfeiçoadas (BORGES; FORATO, 2015).

Outro ponto que chama atenção, trata-se da **5) Comunicação do conhecimento científico**: Sadi Carnot na escrita da sua monografia teve a preocupação de construir um texto científico acessível para diversos públicos, principalmente, para os não cientistas. Por isso, recorreu explicações sobre as máquinas térmicas sem recorrer a uma linguagem matemática. Apesar dos seus engenhosos raciocínios revolucionários, a ausência de uma linguagem analítica foi um dos fatores que mais receberam críticas e impossibilitou a entrada de suas ideias na Academia de Ciências de Paris. A não proliferação de suas ideias nesse espaço social está associado ao fracasso inicial do seu manuscrito. Isso evidencia o papel determinante que as instituições têm sobre a produção científica.

Aliado a isso, compreendendo os cientistas como um grupo social, observamos por meio do aspecto da **6) Intolerância ao diferente**, o qual percebemos através da não aceitação das

ideias postas pelo Sadi Carnot a comunidade. De acordo com Erlichson (1999), Sadi Carnot teve as portas da Academia de Ciências de Paris fechada, devido às seguintes situações: a) estava fora do meio científico; b) era apenas considerado um ‘consertador de máquinas’; c) a sua formação em engenharia militar e ter servido ao exército não respaldava o Sadi Carnot em ter espaço de fala entre a categoria. Diante disso, como bem ressalta Erlichson (1999, p. 183, tradução nossa) “Era de se esperar que um livro escrito por uma pessoa com essa formação não despertasse interesse de outros cientistas”<sup>28</sup>. Portanto, observam-se aspectos sociais de intolerância comuns na sociedade visto em um determinado grupo.

Discussões como essas no ensino de ciências, ancoradas na historiografia de Sadi Carnot ou outros episódios históricos científicos, podem possibilitar uma formação em que os alunos consigam ver a Ciência como uma construção cultural e que as relações entre a cultura e a Ciência são manifestações bem estreitas, as quais não podem ser discutidas de forma isolada. Nesse sentido, a partir da aquisição dessa percepção de que a Ciência é uma integrante do arcabouço cultural da humanidade, sujeita a exercer e sofrer influências da sociedade, concepções que têm uma Ciência como construção individual, constituída por gênios, neutra a fatores externalista, entre outras, podem ser desconstruídas e substituídas por visões mais críticas e reflexivas.

---

<sup>28</sup> It was to be expected that a book written by a person with this background would not awaken interest from other scientists (ERLICHSON, 1999, p. 183).

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando este estudo se iniciou, verificamos a urgência de uma discussão aprofundada, por meio de um estudo historiográfico, a respeito das realizações científicas do engenheiro e físico francês Sadi Carnot, no que se refere ao seu legado para a Termodinâmica. Tal constatação se deve ao fato de haver omissões ao seu nome em livros didáticos e científicos quando discutem a formação histórica desse ramo de estudo da Física.

Para se atingir uma compreensão do objetivo geral, que consistiu em discutir o legado do engenheiro francês Sadi Carnot, no que se refere às suas contribuições para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e para o desenvolvimento dos conceitos científicos iniciais da Termodinâmica, foram definidos cinco objetivos específicos. No primeiro momento, compreendemos o contexto social, político e econômico, em que viveu Sadi Carnot na Europa e França do final do século XVIII e início do século XIX. Ele foi contemporâneo de grandes transformações ocasionadas por duas grandes revoluções que modificaram profundamente o velho continente e seu país. A Revolução Industrial que iniciou na Inglaterra modificou, principalmente, as relações de trabalho e os meios de produção. Esse último tinha as máquinas a vapor como o carro chefe, as quais necessitavam, cada vez mais, de aperfeiçoamentos para operarem no máximo possível de seus rendimentos e eficiências, demandando que inventores e cientistas aprimorassem suas técnicas para atender a um campo em grande expansão. A Revolução Francesa instaurou um novo regimento político na França e uma nova Ciência. Tais ideias romperam as fronteiras e se espalharam pelo mundo ocidental e, principalmente, foram fatores que influenciaram as pesquisas de Sadi Carnot acerca das máquinas térmicas.

Na sequência, discutimos acerca da evolução histórica das máquinas a vapor e da influência do contexto, no qual Sadi Carnot estava inserido, em sua formação e realizações acadêmicas, fato evidenciado no seu livro *Réflexions*. Antes das contribuições do Sadi Carnot para a compreensão e aperfeiçoamentos das máquinas a vapor, tais artefatos passaram uma grande evolução ao longo da História, a partir da colaboração de diversos inventores por meio de tentativas e erros. Foi com o Sadi Carnot que tivemos a primeira contribuição baseada em um estudo sistematizado. Para alcançar tal feito, Sadi Carnot teve uma sólida formação, iniciada em casa através de seu pai e continuada nas instituições de ciências, formadas na França depois da Revolução Francesa, nas quais obteve o título de engenheiro. Além de engenheiro, Sadi Carnot foi um militar que, por muitos anos, esteve em defesa de seu país. Diante disso, com sentimentos patrióticos, vendo seu país ficar atrasado na corrida industrial e força naval,

recorreu a um estudo sistematizado, visando criar uma teoria geral que explicasse o funcionamento das máquinas a vapor e, com isso, poder aperfeiçoá-las para as necessidades de sua nação.

Sua obra principal publicada em 1824 e algumas notas inéditas que vieram a público em 1878 na segunda edição póstuma de seu livro foram objetos de discussão como uma meta do terceiro objetivo específico. Nos seus escritos, encontra-se um estudo aprofundado a respeito das máquinas a vapor, o qual destinou-se a encontrar uma teoria geral que explicasse qualquer tipo de máquina movidas a vapor ou não. Nessa busca, Sadi Carnot lança os postulados básicos que são a base da segunda lei da Termodinâmica e apresenta um ciclo ideal de como as máquinas deviam operar para chegar a sua melhor eficiência. Ainda discutiu implicitamente acerca do primeiro princípio da Termodinâmica.

O quarto objetivo específico visou discutir a respeito das repercussões que sua obra seminal conseguiu no meio científico da época. De início, Sadi Carnot não foi compreendido por seus entes. Seu trabalho foi ignorado por 10 anos, tendo suas ideias principais resgatadas por Émile Clapeyron em 1834 a partir de um tratamento matemático. Diversos motivos são apontados para esse insucesso de Carnot. Entre eles, destaca-se a ausência de uma linguagem matemática; a ênfase da Teoria do Calórico em suas argumentações e o fato de os cientistas da época não quererem ouvir ideias advindas de uma pessoa do meio militar. Apesar desse insucesso inicial, Sadi Carnot escreveu seu nome na História como um dos grandes personagens da Física e, em suas *Réflexions*, encontra-se a base para a formação da Termodinâmica.

Assim sendo, diante da importância desse estudioso para a Ciência e de seu contexto social, político e econômico, o nosso quinto objetivo foi apresentar uma proposta de desenvolvimento de sua historiografia em sala de aula, visando discussões críticas e reflexivas acerca da Natureza da Ciência. Para atender essa meta, optamos por sugerir a criação de uma narrativa histórica com alguns pontos essenciais, por meio do aporte historiográfico da História Cultural da Ciência, por entendermos tratar-se de uma das melhores formas de proporcionar uma formação científica sólida o fato de ter a Ciência como integrante da cultura humana.

Com isso, foi confirmada a hipótese inicial desta pesquisa de que Sadi Carnot contribuiu significativamente para o aperfeiçoamento das máquinas a vapor, desencadeando o surgimento dos conceitos iniciais da Termodinâmica. O caráter inovador de sua obra fortuitamente dificultou a popularização do seu nome como um dos fundadores desse ramo de estudos da Física porque, apesar de as ideias contidas nas *Réflexions* desencadear o surgimento de uma nova ciência, no meio científico, no primeiro momento, elas foram ignoradas sobre alegação de não possuir uma linguagem analítica, está baseado na Teoria do Calórico e a formação e atuação



profissional do Sadi Carnot divergir do meio científico. Mesmo com um reconhecimento tardio, tanto Sadi Carnot quanto o seu livro permanecem incompreensíveis até hoje.

Normalmente, as pesquisas científicas estão envoltas de dificuldades e não seria diferente na elaboração desse estudo. Algo que chama atenção trata-se dos poucos materiais primários deixados pelo Sadi Carnot. Em vida, publicou apenas um livro que não obteve a repercussão esperada. Com isso, inibiu o estudioso em continuar com mais publicações, apenas fazendo anotações para uso pessoal. Infelizmente, aos 36 anos de idade foi vítima da Cólera. Como protocolo de segurança da época, pessoas vítimas dessa doença também tinham seus pertences enterrados consigo. Portanto, quase tudo que não se tornou público do Sadi Carnot se perdeu.

Tal fato impossibilitou acesso às discussões riquíssimas, a respeito das Máquinas a vapor, seu objeto de estudo. Também ficaremos sem resposta, no que diz respeito até que ponto a indiferença de outros cientistas em relação a sua obra o esquivou em fazer discussões públicas com outros livros ou artigos, a respeito dos seus estudos com as máquinas a vapor. Para essas indagações, provavelmente, nunca tenhamos essas respostas. Tal fato, torna do Sadi Carnot um dos personagens mais enigmáticos da História da Física.

## REFERÊNCIAS

- ALLCHIN, Douglas. Pseudohistory and Pseudoscience. **Science & Education**, v. 13, p. 179–195, 2004.
- ALMEIDA, Maria José Pereira Monteiro. **Discursos da Ciência e da Escola: Ideologia e Leituras Possíveis**. Campinas: Mercado das Letras, 2004.
- ALVIM, Maria Helena; ZONATELLO, Marcelo. História das ciências e educação científica em uma perspectiva discursiva: contribuições para a formação cidadã e reflexiva. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 7, n. 2, p. 349-359, 2014.
- APPOLINÁRIO, Fabio. **Metodologia da Ciência**. São Paulo: Editora Pioneira Thomson, 2006.
- ASHTON, Thomas S. **A Revolução Industrial. 1760-1830**. Lisboa. Publicações Europa América, 2ª ed., Publicações Europa-América, 1971.
- BALDOW, Rodrigo; JÚNIOR, Francisco Nairon Monteiro. Os livros didáticos de física e suas omissões e distorções na história do desenvolvimento da Termodinâmica. **ALEXANDRIA: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 3-19, 2010.
- BORGES, Danielle Beatriz de Sousa; FORATO, Thaís Cyrino de Mello. **Sadi Carnot and the ideal steam machine: thermodynamics and the social, economic and political context in teacher education**. 2015. Disponível em <[https://www.academia.edu/14575808/Sadi\\_Carnot\\_and\\_the\\_ideal\\_steam\\_machine\\_thermodynamics\\_and\\_the\\_social\\_economic\\_and\\_political\\_context\\_in\\_teacher\\_education](https://www.academia.edu/14575808/Sadi_Carnot_and_the_ideal_steam_machine_thermodynamics_and_the_social_economic_and_political_context_in_teacher_education)>. Acesso em: 15 de dez. 2022.
- BRAGA, Marco; GUERRA, Andreia; REIS, José Cláudio. **Breve história da ciência moderna**. Zahar, 2003.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, MEC/CONSED/UNDIME, 2018. Disponível em: <[basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC\\_EI\\_EF\\_110518\\_versaofinal\\_site.pdf](https://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf)>. Acesso em: 8 de out. 2022.
- BRASIL, Cristiano de Barbosa de Moura; BRASIL, Andreia Guerra. História Cultural da Ciência: Um Caminho Possível para a Discussão sobre as Práticas Científicas no Ensino de Ciências? **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 16, n. 3, p. 725-748, 2016.
- BRITO, Nathaly Barbosa de Brito *et al.* História da física no século XIX: discutindo natureza da ciência e suas implicações para o ensino de física em sala de aula. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 7, n. 2, p. 214-231, 2014.
- CARNOT, Sadi. **Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance**. Paris: Chez Bachelier, 1824.

CARNOT, Sadi. **Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance**. Paris: GAUTHIER-VILLARS, 1878.

CIMBLERIS, Borísas. Carnot e a evolução das máquinas térmicas. **Revista da SBHC**, n.6, p.39-45, 1991.

COGGIOLA, Osvaldo. Novamente, a revolução francesa. **Projeto História: Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados de História**, v. 47, 2013.

DASS, N. D. Hari. **A critique of Sadi Carnot's work and a mathematical theory of the caloric**. [2013]. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1306.1939>>. Acesso em: jun. 2022.

DIAS, Penha Maria Cardoso. A procura do trabalho perdido. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 493-498, 2007.

DIAS, Penha Maria Cardoso. Sadi Carnot: pré-história e história. **Revista USP**, setembro-novembro 1990.

DÍAZ, Sandra Milena Forero. **SADI CARNOT Y LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA: La Historia de la Ciencia como Pedagogía Natural**. 2014. Tese (Doutorado). Universidade Pedagógica Nacional: Bogotá – Colômbia, 2014.

ERLICHSON, Herman. Sadi Carnot Founder of the Second Law of Thermodynamics'. **European Journal of Physics**, v. 20, n. 3. p. 183 - 193, 1999.

FONSECA, João José Saraiva. **Metodologia da pesquisa científica** (2007). Disponível em: <<http://www.ia.ufrj.br/ppgea/conteudo/conteudo-2012-1/1SF/Sandra/apostilaMetodologia.pdf>>. Acesso em: jul. 2022.

FORATO, Thaís Cyrino de Melo; PIETROCOLA, Maurício; MARTINS, Roberto de Andrade. Historiografia e natureza da ciência em sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.

FOX, Robert. **Watt's Expansive Principle in the Work of Sadi Carnot and Nicolas Clément** [1970]. Disponível em: <[https://www.jstor.org/stable/531291#metadata\\_info\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/531291#metadata_info_tab_contents)>. Acesso em: jul. de 2022.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed., São Paulo: Atlas, 2002.

GIL-PÉREZ, Daniel *et al.* Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 25-153, 2001.

GUERRA, Dafni Moura. Sadi Carnot: El Padre de la Termodinámica. **Prisma Tecnológico** 2021.

HOBBSAWM, Eric. **A Era das revoluções: 1789-1848**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2007.

IGLÉSIAS, Francisco. **A Revolução Industrial**. 10ª ed., São Paulo: Editora Brasiliense, 1990.

KESSLER, Gustavo Cortazzi Garcia. **Diálogos entre o Exame Nacional do Ensino Médio, a Base Nacional Comum Curricular e a produção científica da História, Filosofia e Sociologia da Ciência**. 2022. 301 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Ensino de Física, 2022.

KUHN, Thomas S. **A estrutura das revoluções científicas**. 12. ed. São Paulo: Perspectiva, 2013.

LANDES, David J. **PROMETEU DESACORRENTADO** –Transformação tecnológica e desenvolvimento industrial da Europa ocidental, de 1750 até os dias de hoje. Rio de Janeiro, 2005.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia científica**. São Paulo, SP: Atlas, 2010.

LARANJEIRAS, Cássio C. 190 Anos do Ciclo de Carnot. **e-Boletim da Física**, n. 3, 2014.

LIMA, Cristiane Sasso de; MIOTO, Regina Célia Tamasso. Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica. **Rev. Katál**. Florianópolis v. 10, p. 37-45, 2007.

KERKER, Milton. **Sadi Carnot and the Steam Engine Engineers** (1960). Disponível em: <[https://www.jstor.org/stable/531291#metadata\\_info\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/531291#metadata_info_tab_contents)>. Acesso em: jul. de 2022.

MANTOUX, Paul. **A Revolução Industrial**. São Paulo: Editora Hucitec, 2ª ed., 1988.

MARTINS, Lilian Al-Chueyr Pereira. História da Ciência: Objetos, Métodos e Problemas. **Ciência & Educação**, v. 11, n. 2, p. 305-317, 2005.

MARTINS, Roberto Andrade. ¿Que es descubrimiento científico de um nuevo fenómeno? *In*: SOTA, Eduardo & URTUBEY, Luis (eds.) **Epistemología e Histotia de la Ciência**. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, v. 5, n. 5, p. 281-288, 1999.

MARTINS, Roberto de Andrade. Ciência versus historiografia: os diferentes níveis discursivos nas obras sobre história da ciência. p. 115-145. *In*: ALFONSOGOLDFARB, Ana Maria & BELTRAN, Maria Helena Roxo (eds.). **Escrevendo a História da Ciência: tendências, propostas e discussões historiográficas**. São Paulo: EDUC / Livraria de Física / FAPESP, 2005.

MCCOMAS, W. F. Seeking historical examples to illustrate key aspects of the nature of science. **Science & Education**, v. 17, n. 2-3, p. 249–263, 2008.

MELLO, Vico Denis; DONATO, Manuella Riane. O pensamento iluminista e o desencantamento com o mundo: Modernidade e a Revolução Francesa como marco paradigmático. **Revista Crítica Histórica**, 2011.

MENDOZA, Eric. A vida e obra de Sadi Carnot. **The British Journal for the History of Science**. v. 14, n. 1, p. 75-78, 1981.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (org.). **Pesquisa Social**. Teoria, método e criatividade. 18 ed. Petrópolis: Vozes, 2001

NASCIMENTO, Cássius K. BRAGA, João P.; FABRIS, José D. Reflexões sobre a contribuição de Carnot à primeira lei da Termodinâmica. Departamento de Química; Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas **Quim. Nova**, v. 27, n. 3, p. 513-515, 2003.

PASCOAL, Alexandre dos Santos. **A evolução histórica da Máquina Térmica de Carnot como proposta para o ensino da segunda lei da Termodinâmica**. 2016. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual da Paraíba, 2016.

PASSOS, Júlio César. **Carnot e a segunda lei da Termodinâmica** (2003). Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/268467/mod\\_resource/content/1/TEXT0%207%20Carnot%20e%20a%202a%20Lei.PDF](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/268467/mod_resource/content/1/TEXT0%207%20Carnot%20e%20a%202a%20Lei.PDF)>. Acesso em: jun. 2022.

PERROT, Michelle. **Os excluídos da história: operários, mulheres e prisioneiros** - 1. ed. - Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2017.

PINHO, Suani Rubim de; ANDRADE, Fernandes Silva. Evolução das idéias da termodinâmica e da mecânica estatística. *In: Origens e evolução das idéias da física*. Org: José Fernando M. Rocha. Salvador: EDUFBA, 2011.

PINTO, Ingrid Kelly Laura dos Santos. SILVA, Ana Paula Bispo da. As leis da termodinâmica, Sadi Carnot e as transformações sociais. **Física na Escola**, v. 16, n. 1, p. 23-27, 2018.

QUADROS, Sérgio. **A Termodinâmica e a invenção das máquinas térmicas** – SP: Scipione, 1996.

RUSSEL, Daniel *et al.* Sadi carnot: une source d'inspiration toujours d'actualité. **2e Colloque International Francophone sur l'Énergétique et la Mécanique**, Burquina, 2012.

SALES, Pedro Alexandre Moura; TREVISAN, Mariana Bonat. Revolução Francesa – Marco da história contemporânea. **Caderno Saberes** - v. 9, n. 21, 2020.

SALVI, Pier Remigio.; SCHETTINO, Vincenzo. Sadi Carnot's Réflexions and the foundation of thermodynamics. **Substantia**. An International Journal of the History of Chemistry, p. 73-96, 2019.

SANTOS, Dayse Lúcida Silva. **Métodos e Técnicas de Pesquisa em História**. Montes Claros – MG: Editora Unimontes, 2010.

SANTOS, Rogério de Souza. **O desenvolvimento do pensamento teórico no ensino da Termodinâmica em situações desencadeadoras de aprendizagem**. 2018. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras, 2018.

SILVA, Djalma Nunes da. **Ensino e aprendizagem da termodinâmica: questões didáticas e contribuições da História da Ciência**. 2013. 259 p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, 2013.

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.

SINGH, Neetu. SHARMA, Umesh Chandra. Thermodynamics as legacy of Sadi Carnot. *In: Gangwar S, Jayswal SC, editors. National Conference on Futuristics in Mechanical Engineering*, Excel India Publishers, New Delhi, 2015.

SRINIVASAN, J. Sadi Carnot and the Second Law of Thermodynamics. **Resonance**, v. 6, n. 11, p. 42-47, 2001.

TEZA, Rogério de Souza. **CARNOT EM UM DEBATE ACALORADO**: a mudança de paradigma no nascimento da Termodinâmica (2017). Disponível em <[https://dadospdf.com/download/a-revoluao-cientifica-da-termodinamica-de-carnot-\\_5a44c0f3b7d7bc891f7fa5f0\\_pdf](https://dadospdf.com/download/a-revoluao-cientifica-da-termodinamica-de-carnot-_5a44c0f3b7d7bc891f7fa5f0_pdf)>. Acesso em: out. de 2021.

WISNIAK, Jaime. Sadi Carnot: His Life and Achievements. Against the Historical Period- a Short Bibliographical Sketch. **Chem. Educator**, v. 5, p. 38-42, 2000.

ZANETIC, João. **Física e cultura. Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 57, n. 3, p. 21-24, 2005.

ZANETIC, João. Literatura e cultura científica. *In: Almeida, Maria José Pereira Monteiro; Silva, Henrique César. (orgs.). Linguagens, Leituras e Ensino de Ciência*. Campinas: Mercado das Letras, 1998.