



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

ALEXANDRE DOS SANTOS PASCOAL

**A EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MÁQUINA TÉRMICA DE CARNOT COMO
PROPOSTA PARA O ENSINO DA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA**

Campina Grande, Agosto de 2016.

PB – Brasil.

ALEXANDRE DOS SANTOS PASCOAL

**A EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MÁQUINA TÉRMICA DE CARNOT COMO
PROPOSTA PARA O ENSINO DA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba como requisito legal para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências e Educação Matemática com especificidade em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Barros

Área de Concentração: Ensino de Física

CAMPINA GRANDE-PB

AGOSTO DE 2016.

É expressamente proibida 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 da dissertação.

P281e Pascoal, Alexandre dos Santos.

A evolução histórica da máquina térmica de Carnot como proposta para o ensino da segunda lei da termodinâmica [manuscrito] / Alexandre dos Santos Pascoal. - 2016. 140 p. : il. color.

Digitado.

Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ensino de Ciências e Educação Matemática) - Universidade Estadual da Paraíba, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Marcos Antônio Barros Santos, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa".

1. Máquina térmica de Carnot. 2. Termodinâmica. 3. Ensino de física. I. Título.

21. ed. CDD 536.7

ALEXANDRE DOS SANTOS PASCOAL

**A EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MÁQUINA TÉRMICA DE CARNOT COMO
PROPOSTA PARA O ENSINO DA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA**

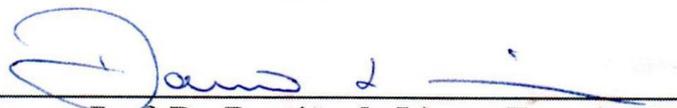
Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba como requisito legal para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências e Educação Matemática com especificidade em Ensino de Física.

Aprovado em 26 de agosto de 2016

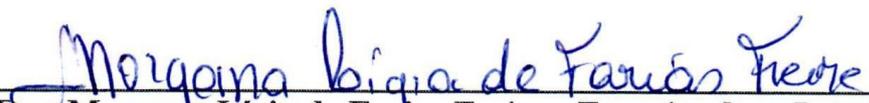
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. **Marcos Antônio Barros Santos** – Orientador
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB



Prof. Dr. **Damião de Lima** - Examinador Externo
Universidade Federal da Paraíba - UFPB



Prof.ª. Dra. **Morgana Lígia de Farias Freire** - Examinadora Interna
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB

CAMPINA GRANDE-PB

AGOSTO DE 2016.

DEDICATÓRIA

Dedico primeiramente este trabalho aos meus pais, pelo apoio em todos os momentos difíceis.

À minha esposa que muito compreendeu meus momentos de solidão de leituras e escrita desde trabalho, sempre fornecendo suporte, confiança e motivação lendo os meus textos.

Aos meus amigos e colegas de curso, pela força e pela vibração em relação a esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que sempre contribuíram para a minha formação acadêmica e aos colegas pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o mestrado e apoio na revisão deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós – Graduação em Ensino de Ciência e Educação Matemática da UEPB, que de forma organizada contribuíram para essa formação acontecer.

Ao meu colega e irmão José Eduardo Ramalho Dantas, doutorando do Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro que contribuiu de forma significativa em momentos de escuridão.

Sou grato ao professor Dr. Damião de Lima da UFPB e a professora Dra. Morgana Lígia de Farias Freire da UEPB que compuseram a banca examinadora, propondo e colaborando com este trabalho de pesquisa, além de sugerir valiosas dicas que foram prontamente atendidas.

E em especial ao meu orientador, professor Dr. Marcos Antônio Barros Santos, pela proposta e temática e pela atenção dada no decorrer da elaboração do presente trabalho, com sua experiência, paciência, humildade e amplo conhecimento que contribuiu significativamente, doutrinando, aconselhando e fornecendo livros, teses, dissertações e artigos científicos para a realização desta obra e que incansavelmente ajudou-me dando valiosas orientações.

RESUMO

A História e Filosofia da Ciência (HFC) tem ganhado espaço como um instrumento facilitador do processo de ensino/aprendizagem para professores e estudantes da área das ciências. Esse fenômeno pode ser explicado pelo grau de dificuldade encontrada para se explicar/entender alguns princípios científicos, quando expostos de maneira descontextualizada. A HFC, ao situar as mudanças científicas no contexto histórico e filosófico, ao mesmo tempo em que facilita o entendimento, possibilita a prática interdisciplinar no ambiente acadêmico. Nosso trabalho se insere nessa nova corrente e a ideia central foi à criação de uma proposta inovadora de ensino a partir de uma problemática que constatamos no campo do ensino da física; a dificuldade de compreensão da Segunda Lei da Termodinâmica. Para tal desiderato, partindo da HFC e do contexto da Revolução Industrial, realizamos uma pesquisa bibliográfica de caráter exploratória e qualitativa sobre a temática e situamos a importância da Máquina de Carnot e a relação desta com a nossa problemática. Como resultados, além do texto acadêmico, construímos um paradidático e uma proposta de aplicação prática em sala de aula e esperamos que estes instrumentos contribuam para a construção de uma proposta inovadora de ensino.

Palavras-chave: Máquina térmica de Carnot. Segunda Lei da Termodinâmica. Ensino de Física.

ABSTRACT

History and Philosophy of Science (HFC) has gained ground as an instrument to facilitate the teaching / learning for teachers and students of the sciences. This phenomenon can be explained by the degree of difficulty to explain / understand some scientific principles, when exposed out of context. The HFCs, to situate the scientific changes in the historical and philosophical context, at the same time it facilitates understanding, enables interdisciplinary practice in the academic environment. Our work is part of this new trend and the central idea was to create an innovative proposal of teaching from a problem that we see in the physical education field; the difficulty of understanding the Second Law of Thermodynamics. To this aim, starting from the HFC and the context of the Industrial Revolution, we conducted a literature search of exploratory and qualitative character on the subject and situate the importance of Carnot machine and its relation to our problem. As a result, in addition to academic text, we built a paradidactic and a proposal for practical application in the classroom and hope that these instruments contribute to the construction of an innovative teaching proposal.

Keywords: heat engine Carnot. Second Law of Thermodynamics. Physics teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Homens trabalhando nas minas de carvão na Inglaterra, aproximadamente,.....	44
Figura 2: Tecnologia representada pela máquina a vapor e fabricas da metade do século XIX.	49
Figura 3: Máquina de Heron de Alexandria.....	50
Figura 4: Bomba de água de Savery.....	51
Figura 5: Máquina a vapor trabalhando nas minas de carvão na Inglaterra no século XVIII.	52
Figura 6: Modelo de máquina a vapor de James Watt.	53
Figura 7: Sadi Carnot com 24 ano de idade (1796-1832).	57
Figura 8: Moinho d'água.....	64
Figura 9: Ciclo idealizado por Carnot.	76
Figura 10: Ciclo de Carnot interpretado por Clapeyron.	81
Figura 11: Aparelho de Joule	83

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
1. METODOLOGIA	14
1.1 Descrição da pesquisa.....	14
1.2 Usando os Parâmetros de Forato	17
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	27
2.1 A História e Filosofia da Ciência e sua relação com o Ensino de Ciência.....	27
2.2 A importância da História e Filosofia da Ciência no Ensino Médio	30
2.3 Possíveis obstáculos à inserção da HFC no Ensino Médio	32
2.4 Considerações educacionais sobre a inserção da HFC no Ensino Médio	34
2.5 Documentos Oficiais	35
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	42
3.1 Carnot e a Revolução Industrial: aspectos sociais e econômicos entre os séculos XVIII e XIX.	42
3.2 Breve histórico da máquina a vapor antes de Carnot	49
3.3 Sadi Carnot: o ambiente intelectual e seus contemporâneos	55
3.4 Sadi Carnot e a Máquina a vapor.....	59
3.5 Carnot e sua contribuição para a Segunda Lei da Termodinâmica	64
3.6 Sadi Carnot e a objetividade do seu trabalho	67
3.7 Sadi Carnot: Caminhos para o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica.....	80
4. DISCUSSÕES E RESULTADOS.....	87
4.1 Plano de Aulas	87
4.1.1 Objetivos gerais.....	88
4.1.2 Objetivos específicos	88
4.1.3 Conteúdos.....	88
4.1.4 Estratégias	89
4.1.5 Avaliação.....	89
4.1.6 Cronograma das aulas	89
4.2 Descrição da sequência didática	91
4.3 Analisando a consistência da sequência didática com alguns parâmetros de Forato.	95
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PARA O PRIMEIRO ENCONTRO	105
APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL.....	106

INTRODUÇÃO

Esta dissertação se situa na temática sobre a evolução histórica da máquina térmica de Carnot no processo de entendimento da segunda lei da termodinâmica¹. A escolha do tema de pesquisa desta dissertação está diretamente relacionada a situações vivenciadas ao longo da nossa vida estudantil e das nossas atividades como professor no Ensino Médio, especificamente, na Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio José Luiz Neto, na cidade de Barra de Santa Rosa-PB, onde leciono. Notadamente, as dificuldades perpassam os aspectos matemáticos inerentes às leis da termodinâmica. No entanto, não podemos afirmar a mesma coisa quando se trata de textos que envolva toda historicidade que há por trás do contexto relativo às ideias de Carnot e o seu papel no processo de evolução das máquinas térmicas. Assim, nasceu o desejo de nos aprofundarmos no manuscrito de Carnot para compreender melhor a temática e elaborar uma proposta de ensino.

Durante a nossa formação em Licenciatura em Física, não tivemos a oportunidade de aprofunda-se nos fundamentos históricos da Física, já que nossos estudos se resumiam apenas aos aspectos da evolução dos conceitos mais importantes para a Física. Notadamente, alguns textos mostravam, de forma breve e esplêndida, que houvera uma revolução científica e que algum cientista, em especial, desvendara tal fenômeno, através de rápidos e mágicos desenvolvimentos de alguns experimentos ou de algumas situações específicas. Ao iniciarmos as preparações das aulas, percebemos que não havia uma ligação com o contexto científico atual ou até mesmo com o rico desenvolvimento das ciências ou as tecnologias que tentávamos compreender durante a nossa graduação. Por outro lado, o ensino padrão ou tradicionalista, com um forte apelo à resolução de questões, eram vertentes consideradas importantíssimas e únicas.

No decorrer da nossa pesquisa, no Mestrado, várias referências bibliográficas lidas – a exemplo de Forato (2009); Vannuchi (1996); Matthews (1994); Carvalho (2014) – apontavam, de forma significativa, para a utilização de textos históricos em sala de aula, por serem capazes de promover uma melhor compreensão das concepções dos métodos científicos. Isto ocorre porque favorecem ao raciocínio do indivíduo com o desenvolvimento das ideias científicas, humanizando os assuntos da Física possivelmente discutidos em sala de aula, tornando-os menos abstratos e mais motivadores para os alunos.

¹ A Segunda Lei da Termodinâmica diz que: “É impossível uma máquina térmica, operando em ciclos, retirar calor de uma fonte térmica e transformá-lo integralmente em trabalho” (THOMSON, apud, NÓBREGA, 2009, p.47).

Em consonância com esses pesquisadores, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) ressaltam que:

O ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação. Para tanto, é essencial que o conhecimento físico seja explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação e associado às outras formas de expressão e produção humanas (BRASIL, 1997, p. 22).

Diante da evidência do conhecimento histórico agregado à cultura e integrado como instrumento pedagógico, tornou-se indispensável à formação da cidadania contemporânea a necessidade de que o conhecimento físico seja explicado com o processo histórico, objeto de contínua mudança e associado às outras formas de expressão e produção humana.

Assim, quando nos propomos a abordar esta temática a partir do uso de textos históricos, fomos buscar na literatura (CASTRO, 2004; FORATO, 2009) no sentido de buscar algumas informações pertinentes, capazes de nos mostrar um caminho mais acentuado e que nos indicassem que o uso da História e Filosofia da Ciência (HFC) como ferramenta metodológica, fossem capazes de construir nos alunos do Ensino Médio situações didáticas inovadoras e pertinentes aos episódios da história do pensamento evolutivo concernente à máquina térmica de Sadi Carnot, levando-os a compreensão da segunda lei da termodinâmica, como ponto de partida para uma possível abordagem em sala de aula.

Percebemos, enquanto professor de Física da escola básica, as dificuldades que os alunos sentem para entender a segunda lei da termodinâmica no campo científico. Inicialmente, para o entendimento dessa lei, faz-se necessário uma compreensão mais acentuada de um contexto científico denominado de sistema termodinamicamente isolado ou fechado. Este conceito, por si só já produz certa dificuldade. Posteriormente, ao evoluirmos para outras situações ainda dentro desse contexto, na tentativa de se chegar à segunda lei da termodinâmica e a sua aplicabilidade às transformações cíclicas, notamos o quanto de embaraço predomina nas inúmeras tentativas de explicações e entendimento, capitaneadas por falta de um material de apoio, de um vídeo ou talvez, de algo que nos abastecesse de uma ideia simples, mas capaz de produzir um entendimento desejado.

Paralelamente a essa premissa, há também as dificuldades fortemente presentes nos alunos, ligadas ao senso comum e que nem sempre condiz com os conceitos científicos. Por outro lado, quem deveria nos dar um apoio didático mais premente, os livros didáticos,

termina por acentuar conceitos errôneos e sem vínculos com o cotidiano dos alunos e professores.

Assim, entendemos que episódios textuais, tomados aqui como planos de aulas, deverão proporcionar aos alunos outra visão da Ciência, favorecendo a uma desejada alfabetização científica². Perante esse quadro, propusemos nossa pergunta de pesquisa: *O uso de textos em sala de aula, relativo à evolução histórica da máquina térmica de Carnot, contribui para o processo de ensino da segunda lei da termodinâmica?*

Para responder a essa questão, inicialmente, recorreremos a alguns autores (CASTRO, 1992; DÍAZ, 2013; NÓBREGA, 2009; SILVA, 2009b; MARTINS, 2006) que mostram a diversidade das práticas para combater o insucesso escolar, particularmente nítido nas ciências exatas, como condutoras do uso crescente e plural de mecanismos para o ensino da Física. Segundo argumenta Martins (2006), fica perceptível que a HFC vêm sendo vista atualmente como uma ferramenta de cunho pedagógico, dentre várias que se propõem a ajudar a resolver os problemas de insucesso das ciências em geral e da Física em particular. Além disso, possibilita a interdisciplinaridade com outras disciplinas, tais como História, Geografia, Filosofia, Biologia, Química, etc.

Associado a essa premissa, o uso de fontes históricas primárias ou originais, mostrando todo o desenvolvimento conduzido na exploração racional de um evento histórico, põe-nos na vanguarda da segurança com relação a textos de má qualidade ou permeados de erros históricos e/ou conceituais. Esses pesquisadores acrescentam ainda que, uma completa e correta discussão de um episódio histórico, permeada por aspectos conceituais e epistemológicos, proporciona uma rica aprendizagem, enquanto auxilia na compreensão da Natureza da Ciência (NdC)³ e nos conceitos científicos envolvidos. Por outro lado, há de se compreender também que uma distorção de um episódio histórico pode se caracterizar numa pseudo-história, levando alunos e professores a ideias erradas sobre o fazer científico e o papel da ciência na sociedade, como aponta Allchin (2004).

² Segundo Sasseron e carvalho (2011) na revista: *Investigações em Ensino de Ciências* – V16(1), pp. 59-77, 2011. Afirma que esse termo é usado para designar as ideias que temos em mente e que objetivamos ao planejar um ensino que permita aos alunos interagir com uma nova cultura, com uma nova forma de ver o mundo e seus acontecimentos, podendo modificá-los e a si próprio através da prática consciente propiciada por sua interação cercada de saberes de noções e conhecimentos científicos, bem como das habilidades associadas ao fazer científico, podemos dizer ainda que é a construção do conhecimento e o entendimento de conceitos científicos, significa que uma pessoa tem a capacidade ler, entender, explicar e de descrever os fenômenos naturais.

³ **N d C**: São conjuntos de informações sobre a Ciência que tratam de seus métodos, objetivos, limitações, influências, etc., sendo sua inclusão no Ensino de Ciências uma das metas atuais da educação.

Dentro dessa perspectiva, faz-se imperativo não apenas uma reestruturação curricular em termos de conteúdos, mas, sobretudo, uma renovação nas metodologias de ensino, para tornar possível a sobrevivência desses saberes como escolares. Assim, quando se busca utilizar a HFC no ensino, antes de tudo, é preciso, segundo Forato (2009), superar ou compensar os obstáculos estruturais da abordagem histórico-epistemológica na educação científica. Dessa maneira, esta pesquisa apresenta uma proposta de ensino de Física fundamentada no uso da HFC para o segundo ano do ensino médio e se norteia pelo objetivo geral de: *Construir um paradidático relativo à narrativa histórica da máquina térmica de Carnot, mostrando sua influência à Segunda Lei da Termodinâmica*. Ademais, pelos objetivos específicos de: a) confeccionar plano de aulas com base em alguns parâmetros apontados por Forato (2009); b) elaborar estratégias de abordagem do conteúdo em questão, utilizando-se da HFC como metodologia de ensino.

Nesse sentido, elaboramos um material paradidático para ser trabalhado em sala de aula pelo viés histórico, considerando a sequência didática via parâmetros apontados por Forato (2009). Na elaboração, tivemos o cuidado, por exemplo, com o processo de produção e adequação dos textos e atividades didáticas em relação ao público-alvo, tempo disponível por aula, possíveis obstáculos à aplicação das atividades e textos.

Do ponto de vista histórico, ao traçarmos o perfil das atividades científicas desenvolvidas por Sadi Carnot, destacando as consequências de seus resultados para o entendimento da segunda lei da termodinâmica, procuramos oferecer uma visão histórica não só internalista⁴, mas também externalista⁵, evidenciando o contexto social e econômico da época. Desse modo, buscamos e analisamos fontes primárias e secundárias que possibilitaram compreender esse episódio, ao tempo em que nos propiciou delimitar o contexto histórico pretendido, evitando o anacronismo ou o whiggismo⁶ tão comum na maioria dos textos didáticos que contemplam este tema.

No percurso teórico-metodológico traçado, a justificativa desta pesquisa reside no fato de que a nossa revisão de literatura aponta que o uso da HFC como ferramenta didática

⁴São fatos ligados a hipóteses e teorias dos cientistas, vida, obra e tecnologia. No nosso estudo, analisamos a teoria Carnot para os motores térmicos em um ensaio escrito em 1824, e sua valiosa contribuição para a Segunda Lei da Termodinâmica.

⁵Referem-se aos acontecimentos na sociedade ligados a: movimentos/transformações sociais, políticos e econômicos em uma dada época. Nesta pesquisa, destacamos um dos acontecimentos marcante nos séculos XVIII e XIX: a Revolução Industrial apontada pelo Historiador Eric Hobsbawm. Tal acontecimento se encaixa perfeitamente no campo externalista da História da Ciência.

⁶Segundo Martins (2010, p.4-7) e Prestes (2010, p.2-4), refere-se à descrição do relato que coloca as coisas fora de seu próprio momento Histórico, e que trata eventos a partir do olhar de seu desenvolvimento subsequente. Pode-se dizer que se trata de um “relato Histórico centrado no presente”. Disponível em: <http://www.abfhib.org/Boletim/Boletim-HFB-04-n3-Set-2010.htm#Whiggismo1>. Acesso, 30 de Julho. 2016.

tem possibilitado uma diversificação dos recursos usados pelos professores, postergando o método tradicional de ensino, melhorando a compreensão do aluno, ao tempo que contribui para seu entendimento.

Em face da relevância apresentada, esta dissertação segue um plano organizacional em Cinco capítulos, contemplando os processos de desenvolvimento sugeridos por seus respectivos objetivos. No primeiro capítulo, Metodologia, descrevemos de forma detalhada os procedimentos metodológicos usados para obtenção dos nossos resultados, priorizando a abordagem qualitativa. A opção por essa abordagem sucedeu em decorrência do contexto a ser investigado, permitindo-nos descrever, compreender e analisar como se dá o processo de investigação, a documentos históricos. Paralelamente, tomamos como apoio pedagógico os parâmetros usados pela pesquisadora Forato (2009), no sentido de construir uma proposta de ensino que objetive uma transposição didática do conteúdo histórico voltado para a compreensão da segunda lei da termodinâmica, a partir do desenvolvimento histórico da máquina térmica de Carnot.

No segundo capítulo, de Revisão de Literatura, recorreremos a recentes artigos publicados que nos fornecem uma visão mais acentuada a respeito do uso da HFC como uma ferramenta didática voltada ao Ensino de Ciências, mais especificamente na Física, mostrando possíveis benefícios, obstáculos e riscos. Ainda neste capítulo, analisamos alguns documentos oficiais brasileiros, no intuito de mostrar suas orientações a respeito do uso da HFC como estratégia para aperfeiçoar essa prática pedagógica.

No terceiro capítulo, de Fundamentação Teórica, realizamos um levantamento histórico acerca do desenvolvimento das máquinas térmicas, em especial a compreensão dada por Carnot na idealização da sua máquina, bem como procuramos entender a sua contribuição à Segunda Lei da Termodinâmica. Para o desenvolvimento deste capítulo, fez-se necessário a utilização do livro publicado por Sadi Carnot, em 1824, em que ele descreve as suas ideias para as transformações cíclicas, por ter mostrado que a eficiência das máquinas termodinâmicas se dava em função das operações reversíveis. Por conseguinte, estes pressupostos se tornaram as bases da segunda lei e permitiram o desenvolvimento da Termodinâmica como ciência.

No quarto capítulo, Discursões e Resultados, mostramos de forma acentuada o desenvolvimento do plano de aulas e como será trabalhado cada encontro. No quinto e último capítulo, apresentamos nossas considerações a respeito da possibilidade da aplicabilidade de nossa proposta, entendendo que a mesma encontra-se aberta a futuras colocações.

1. METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentamos a metodologia utilizada em nossa pesquisa, evidenciando as estratégias para responder à questão investigativa, sobre a possibilidade do uso da HFC, acerca da compreensão da segunda lei da termodinâmica a partir da evolução das ideias de Carnot. Dada a natureza da proposta de pesquisa para esta dissertação, faremos uma rápida descrição quanto à sua natureza e o tipo da abordagem usada. Em seguida, faremos uma descrição a respeito de alguns parâmetros usados pela pesquisadora Thais Forato (2009), no sentido de nos auxiliar na construção de um paradidático, além de planos de aulas, como sequência didática para possível utilização em sala de aula.

1.1 Descrição da pesquisa

Para Gil (2002) a pesquisa pode ser definida como:

[...] o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. 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 possa ser adequadamente relacionada ao problema. A pesquisa é desenvolvida mediante o concurso dos conhecimentos disponíveis e a utilização cuidadosa de métodos, técnicas e outros procedimentos científicos. Na realidade, a pesquisa desenvolve-se ao longo de um processo que envolve inúmeras fases, desde a adequada formulação do problema até a satisfatória apresentação dos resultados (GIL, 2002, p. 17).

Podemos classificar essa pesquisa de mestrado quanto a sua natureza como sendo qualitativa. Segundo Silveira (2009, p. 31-32) a pesquisa qualitativa é vista como uma expressão genérica, no sentido de que ela compreende uma investigação formal, onde se aborda e trabalha-se com os dados dando significado, tendo como base a percepção do fenômeno dentro do seu contexto. A pesquisa qualitativa descreve bem o local em toda a sua essência procurando explicar o fenômeno a nossa volta, desde sua origem. Colaborando com esse pensamento, Triviños (1987) conceitua a pesquisa qualitativa, como sendo:

[...] uma espécie de representatividade do grupo maior dos sujeitos que participarão do estudo. Porém, não é, em geral, a preocupação dela a quantificação da amostragem. E, ao invés da aleatoriedade, decide intencionalmente, considerando uma série de condições (sujeitos que sejam essenciais, segundo o ponto de vista do investigador, para o esclarecimento

do assunto em foco; facilidade para se encontrar com as pessoas; tempo do indivíduo para as entrevistas, etc.) (TRIVIÑOS, 1987, p.132).

Por outro lado, na visão de Gil (2002), a pesquisa qualitativa deve fazer uma descrição das características básicas dos sujeitos investigados, narrando às especificidades do grupo investigado. A pesquisa configura-se ainda como sendo de natureza descritiva, nela, procuramos descrever de forma detalhada as ações de determinados objetivos.

Segundo Kauark et al. (2010) diz que:

A pesquisa descritiva visa descrever as características de determinada população ou fenômeno, ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados: questionário e observação sistemática. Assume, em geral, a forma de Levantamento (KAUARK, et al., 2010, p. 28).

Reforçando esta afirmação sobre a pesquisa descritiva Gil (2002) salienta que ela tem como objetivo primordial:

A descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis. São inúmeros os estudos que podem ser classificados sob este título e uma de suas características mais significativas está na utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados, tais como o questionário e a observação sistemática. Entre as pesquisas descritivas, salientam-se aquelas que têm por objetivo estudar as características de um grupo: sua distribuição por idade, sexo, procedência, nível de escolaridade, estado de saúde física e mental etc. [...]. Também são pesquisas descritivas aquelas que visam descobrir a existência de associações entre variáveis, como, por exemplo, as pesquisas eleitorais que indicam a relação entre preferência político-partidária e nível de rendimentos ou de escolaridade (Gil, 2002, p. 42).

Por outro lado, classificamos também essa pesquisa como sendo de caráter exploratório por mostrar uma maior familiaridade com o problema pesquisado, Gerhard (2009) diz que a pesquisa exploratória:

Tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. A grande maioria dessas pesquisas envolve: (a) levantamento bibliográfico; (b) entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; e (c) análise de exemplos que estimulem a compreensão (GERHARD, 2009, p. 35).

Tanto as pesquisas descritivas como a exploratória são também as mais solicitadas por organizações como instituições educacionais e empresas comerciais (GIL, 2002, p. 43).

Consideramos ainda esta pesquisa sendo uma pesquisa bibliográfica, pois Fonseca (2002) apresenta os seguintes fatos:

A pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. Qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto. Existem, porém pesquisas científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, procurando referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta (FONSECA, 2002, p. 31-32).

A pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, embora em quase todos os estudos seja exigido algum tipo de trabalho dessa natureza. Boa parte dos estudos exploratórios pode ser definida como pesquisas bibliográficas. Nesta pesquisa procuramos reunir fontes necessárias para um bom embasamento teórico. Além disso, realizamos um exame profundo a cerca da literatura tentando responder o problema de pesquisa, para tanto, utilizamos nesta pesquisa livros, artigos de revistas científicas, dissertações e teses.

Complementando este assunto Gil (2002) fala da principal vantagem da pesquisa bibliográfica:

A principal vantagem da pesquisa bibliográfica reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente. Essa vantagem torna-se particularmente importante quando o problema de pesquisa requer dados muito dispersos pelo espaço. [...]. A pesquisa bibliográfica também é indispensável nos estudos históricos. Em muitas situações, não há outra maneira de conhecer os fatos passados se não com base em dados bibliográficos (GIL, 2002, p. 45).

Essa pesquisa visa organizar e descrever uma proposta de ensino sobre a máquina térmica de Sadi Carnot para a compreensão da segunda lei da Termodinâmica. O destaque aqui será dado aos aspectos históricos que tem por finalidade a compreensão e o interesse do aluno do nível médio, provocando no mesmo uma evolução conceitual como aponta Carvalho (2014, p. 19).

Para atingirmos esse fim, confeccionamos um paradidático contendo episódios históricos para ser trabalhado em sala de aula, com o intuito de motivar os alunos a lerem,

discutirem⁷ e argumentarem entre eles e com o professor. Essas discussões serão realizadas com a formação de pequenos grupos de alunos em sala de aula e após isso, a discussão será ampliada de forma geral para os demais alunos da sala, aprimorando o aprendizado e tornando a aula mais dinâmica, proporcionando a oportunidade para os estudantes explicarem e defenderem seus pontos de vista, com isso estimulando a aprendizagem.

1.2 Usando os Parâmetros de Forato

Para o embasamento teórico metodológico dessa pesquisa nos fundamentamos nos parâmetros⁸ de Forato (2009, p. 186-198) que objetiva ajudar a trabalhar textos históricos em sala de aula. Propomos plano de aulas e uma sequência didática para trabalhar nosso material paradidático na escola básica. Na visão de Forato (2009, p. 190) os parâmetros não devem ser vistos como uma receita de sucesso preordenada, mas deve ser visto como aspectos para refletir sobre os conteúdos de um recorte histórico, que podem nos ajudar a atingir os objetivos pedagógicos que buscamos, ou seja, são guias orientadores para o professor trabalhar e melhorar sua prática docente.

Ao olharmos retrospectivamente para todo o processo identificaremos algumas etapas norteadoras do caminho percorrido, capazes de servir como guias para casos semelhantes. Tais guias podem ser entendidos como parâmetros ou pontos de partida para outras pesquisas envolvidas com a história e filosofia da ciência na educação (FORATO, 2009, p. 190).

Neste entendimento, os parâmetros serviram como base para o nosso planejamento pedagógico e elaboração do material paradidático, de plano de aulas e sequência didática. Os parâmetros visam auxiliarem na construção do material didáticos ou atividades didáticas utilizando a história da ciência, buscando favorecer o aprendizado dos alunos, além de dirigir, ou seja, orientar o professor em sala de aula e eles são para ajudar a construir o texto histórico ou a abordagem histórica. Forato (2009) acrescenta que esses parâmetros se apresentam na forma genérica de obstáculos e propostas de enfrentamento abordado e analisado teórica e empiricamente como etapas a serem percorridas na direção da sala de aula (FORATO, 2009, p. 186-190).

⁷ Pequenos seminários, grupo de debates de quinze minutos cada equipe.

⁸ Forato (2009) escreveu de forma genérica cerca de 20 parâmetros para ser aplicado em qualquer realidade educacional.

Por outro lado, sabendo da existência dos desafios a ser enfrentados no âmbito educacional, Gomes (2015) usando os parâmetros de Forato afirma que:

Os parâmetros adotam como ponto de partida a explicitação dos objetivos pedagógicos e dos aspectos epistemológicos que se pretende abordar em ações educacionais que utilizam a HC, por exemplo, em uma proposta didática para a sala de aula. A partir daí, apresentam uma série de reflexões para auxiliar a seleção, omissão, ênfase e simplificação dos conteúdos históricos e epistemológicos, buscando contribuir para a consistência interna da proposta. Tais reflexões não se configuram como regras ou receitas prescritivas, mas sim como ideias orientadoras, que constituem vinte ponderações entre uma concepção sobre a ciência possivelmente fomentada e os objetivos pedagógicos e epistemológicos inicialmente estabelecidos. Sugerem, ainda, alguns aspectos a serem considerados na criação das atividades didáticas, como mobilizar um mesmo objetivo epistemológico em diferentes conteúdos históricos e distintas estratégias pedagógicas (GOMES, 2015, p. 21).

Dentro da perspectiva proposta, utilizamos os parâmetros como suporte para a construção e organização das atividades didáticas metodológicas aqui sugeridas, tomando como aporte teórico o desenvolvimento histórico da máquina térmica de Carnot, a partir do seu o ensaio (manuscrito) de 1824, como elemento norteador para se estudar a segunda lei da termodinâmica. Neste sentido, os parâmetros apresentados por Forato (2009, p. 190-196) são bem pontuais, permitindo que se possam construir propostas didáticas para uso em sala de aula.

Gomes (2013), interpretando os parâmetros de Forato aponta alguns pontos importantes a serem analisados mediante a construção do plano de aulas:

- Selecionar o tema e os conteúdos históricos apropriados;
- Escolher temas que despertem a curiosidade da faixa etária pretendida. A escolha não pode considerar apenas critérios técnicos e objetivos, mas envolver os estudantes é fundamental;
- Definir o nível de profundidade e formulação discursiva dos conteúdos epistemológicos;
- Selecionar os aspectos a enfatizar e a omitir em cada conteúdo da história da ciência;
- Confrontar os aspectos omitidos com os aspectos da Natureza da Ciência objetivados;
- Definir o nível de detalhamento do contexto não científico a ser tratado;
- Mediar às simplificações e omissões, pois enfatizar a influência de aspectos não científicos pode promover interpretações relativistas extremas;
- Avaliar quando é possível superar ou contornar a ausência de pré-requisitos nos conhecimentos matemáticos, físicos, históricos, epistemológicos (GOMES, 2013, p. 53).

Trazendo a realidade desses parâmetros para uma sala de aula da escola básica, devemos compreender pelo menos alguns parâmetros primários extraídos e interpretados dos parâmetros da tese de Forato (2009). Vejamos:

1. Estabelecer os propósitos pedagógicos e epistemológicos para o uso da História da Ciência (HC) no ensino:

Segundo Forato (2009):

A história da ciência configura-se em recursos pedagógicos que permite atingir diferentes objetivos educacionais, assim o primeiro passo necessário é estabelecer os propósitos pedagógicos e objetivos (FORATO, 2009, p. 190).

A pesquisadora ainda complementa discorrendo sobre os parâmetros na perspectiva de quatro pontos delineadores para uma proposta de ensino.

Optar por discutir a natureza da ciência requer esclarecer qual concepção da ciência será adotada e os aspectos epistemológicos que serão trabalhados. Sua seleção depende de característica de cada contexto, por exemplo: i. O propósito pedagógico visado; ii. O tempo didático disponível; iii. O nível de escolaridade enfocado; iv. Os pré-requisitos dos saberes envolvido na proposta (FORATO, 2009, p. 190).

O primeiro parâmetro, inicialmente mostra que para a elaboração do plano de aulas deve ser estabelecido critérios entre os objetivos educacionais e epistemológicos como já analisado em Forato (2009, p. 190-196), pontua-se então o seguinte objetivo. Organizar pedagogicamente um paradidático, plano de aulas. Com o plano de aulas bem elaborado e bem definido espera-se que o aluno compreenda assuntos como: revolução industrial, um breve histórico da máquina a vapor antes de Carnot, vida e obra de Carnot, contribuições de Carnot para o desenvolvimento das máquinas térmicas, e os caminhos percorridos por alguns cientistas, a saber, Sadi Carnot, Clapeyron, William Thomson e Clausius para o enunciado da segunda lei da termodinâmica dentro do contexto histórico. Por outro lado, epistemologicamente, deseja-se que o aluno compreenda a evolução histórica dos acontecimentos e que de certa forma possa também compreender a construção da ciência como sendo um conhecimento científico coletivo e nunca como sendo produto acabado de uma só pessoa.

Tentando alcançar tais objetivos já citados no primeiro parâmetro, optamos por usar a História da Ciência como proposta metodológica para o ensino de física. Nota-se que o texto histórico, a partir do uso de um paradidático pode promover uma melhor compreensão do evento em dada época, além de explicar de maneira mais satisfatória os fenômenos da natureza, isso pode perfeitamente aflorar a curiosidade dos alunos e que possam ser trabalhados e problematizados na sala de aula (CARVALHO, 2014, p. 24). Assim, para provocar a curiosidade no aluno bem como uma problematização sobre determinado assunto da física, Silva (2004) diz que é,

Fundamental que o professor esteja seguro de dois pontos básicos: 1. Que o texto selecionado ofereça condições para se alcançar os objetivos propostos; 2. Que tanto os objetivos como o texto ofereçam motivação para a realização da tarefa. Por motivação não estamos entendendo necessariamente um caráter lúdico da atividade. Mas a garantia de que os alunos possuem conhecimentos prévios que viabilizem a atividade, e que a definição do problema a ser resolvido por meio da leitura lhes seja significativa, isto é, represente de fato um problema para o aluno e não apenas para o professor (SILVA, 2004, p. 80).

2. Aproximar-se de conteúdo da História da Ciência de difícil compreensão para os alunos:

Sobre o segundo parâmetro Forato (2009) ainda afirma:

Tratar conteúdos da história da ciência de difícil compreensão na atualidade requer lidar com uma das facetas do anacronismo: considerar como ridículos ou estranhos certos conceitos, pressupostos e metodologias importantes em outros momentos da história da ciência, mas destacados na ciência atual, neste sentido, outro obstáculo a enfrentar é compreender adequadamente diferentes concepções de ciência e pensamento de distintas épocas (FORATO, 2009, p. 193).

Este segundo parâmetro nos faz refletir sobre a necessidade, ou não, de inserir na proposta algumas hipóteses feitas na época pelo próprio Carnot (1824), usando a teoria do calórico que ele sustentou por um tempo, abandonando-a posteriormente⁹. Por um lado, essa proposta mostra a complexidade da construção da ciência e erros cometidos pelos cientistas, além disso, nos permitem lidar com obstáculos estruturais. Seguindo a afirmação do segundo

⁹ Carnot usa a teoria do calórico ao longo do seu manuscrito para explicar o que acontece de fato nos motores, por não conseguir justificar de forma contundente a dilatação e compressão dos corpos a alta e baixa temperatura, no final de sua vida abandona totalmente essa teoria.

parâmetro proposto por Forato (2009), podemos entender que o estudo da máquina térmica de Carnot tem passado por diversas interpretações, sofrendo, contudo, abandono das ideias primária por parte de livros textos, estas por sua vez passaram por formulações muitas vezes distorcidas ao longo do tempo, neste caso podemos fazer um resgate histórico sobre o manuscrito de Carnot de 1824 e podemos perfeitamente explorar aspectos da natureza da ciência.

3. Combinar estratégias e recursos didáticos distintos que pode compensar a falta de conhecimento em certos conteúdos da história da física:

Neste parâmetro, tem-se o apoio para a construção das atividades e materiais didáticos. Nossa proposta visa trabalhar uma abordagem histórica a partir da utilização de episódios históricos para o ensino de física. Estes episódios podem viabilizar a discussão de aspectos da Natureza da Ciência em sala de aula, uma vez que oferecem um panorama mais amplo dos fatos históricos e da construção da Ciência. Essa abordagem seguida de textos históricos inerentes à máquina térmica de Carnot como fontes originadoras para a construção da segunda lei da termodinâmica, e como os alunos reconhecem os principais aspectos relacionados a esse assunto.

Os textos históricos relativos à máquina térmica de Carnot e sua aplicação em sala de aula de forma coerente podem ser agentes estruturadores na evolução do conhecimento do aluno, além disso, estes textos em forma de episódios podem ampliar a compreensão dos alunos. Segundo (CASTRO 1992; FORATO, 2009) a utilização de textos históricos são fontes geradoras de conhecimento. Podemos encontrar nos Parâmetros Curriculares Nacionais PCN's (BRASIL, 2006) fortes indicadores para o uso de textos históricos em sala de aula, sinalizando assim a sua importância no âmbito do ensino. Para (VANNUCCHI, 1996; FORATO 2009) no que concerne a utilização de textos históricos em sala de aula, as pesquisadoras sustentam que os textos podem provocar o diálogo, fortalecendo a discussão e podendo ser esclarecedor, possibilitando ainda uma alfabetização científica no aluno.

Neste sentido, segundo Forato (2009), os recursos usados pelas atividades didáticas, realizado dentro de um planejamento e de estratégias pedagógicas distintas,

Pode apresentar bons resultados, permitindo ao estudante confrontar-se com um mesmo conteúdo por meio de diferentes provocações e mediante situações didáticas diversas, favorecendo a reflexão e o amadurecimento da relação entre o aluno e o saber (FORATO, 2009, p.196).

Na perspectiva histórica da proposta aqui desenvolvida, diversas estratégias pedagógicas deverão ser contempladas:

- Leitura individual;
- Mini seminários;
- Grupos de Debates;
- Organização de painéis retratando a linha do tempo com fatos envolvendo o tema em estudo.

A elaboração de um paradidático pelo viés da história da ciência envolvendo a máquina térmica de Carnot e todo plano de aulas aqui apresentado tem por fundamento os Parâmetros de Forato (2009), utilizados desde a confecção dos textos até as atividades, passando pela seleção e nível de aprofundamento das informações contidas nos mesmos, até a didatização¹⁰ da proposta de ensino. Evidentemente que o conteúdo foi estrategicamente pensado para ser apresentado em uma turma do segundo ano do ensino médio.

Na descrição do plano de aulas tivemos o cuidado de não carregá-lo com intenso conteúdo para não ser enfadonho tanto para o professor como para o aluno, o que poderia torná-lo inviável. A ênfase deve ser dada aos aspectos ligados a construção científica no período da revolução industrial, isto é, o trabalho de Carnot para a máquina térmica. Respeitando os pioneiros da Ciência em relação à máquina térmica e o pensamento dessa época. Assim, buscamos equilibrar as considerações externalistas (fatos da história) da Ciência com as estritamente internalista, fatos puramente da Física.

Segundo Castro (1992), a leitura promove o conhecimento, razão essa que sem um bom plano de leitura e de escrita não pode haver, por parte dos alunos, uma aprendizagem saudável que os levem a uma alfabetização científica. Considerando que a leitura é uma das possibilidades como fonte de conhecimento, Leite (2008) salienta que:

Muitos estudos apontam para a mudança de postura do professor frente aos alunos ao realizar um trabalho envolvendo textos. Ao invés de se colocar na posição de único e exclusivo detentor do saber, o professor deve estar aberto às interpretações e questionamentos dos alunos e assumir uma postura verdadeira de mediador. Quando não souber responder as perguntas que surgem no decorrer do desenvolvimento das atividades, deve reestruturar o trabalho e juntamente com os alunos realizar pesquisas que possibilitem a elucidação das questões (LEITE, 2008, p. 23).

¹⁰ É a maneira ou processo de tornar mais facilmente compreensível de um determinado assunto.

Trabalhar uma abordagem da Física com textos relativamente de boa qualidade deve ser um dos vários caminhos para o fortalecimento de uma alfabetização científica como nos propõe (CASTRO, 1992, p. 225-237; CARVALHO, 2011, p. 1-22). Nossa expectativa é de que, os estudantes possam vivenciar algo de experiência diferente na sala de aula, para que se engajem na tentativa de compreender tais eventos e suas implicações epistemológicas.

O uso de episódios históricos em sala de aula deve ser atraente por que os educandos terão a oportunidade de dialogar uns com ou outros e colocarem seus pontos de vistas a partir da leitura sugerida. Provavelmente a sala de aula se tornará um campo de discussão. Concordando com essas ideias (CARVALHO, 2014; FORATO, 2009) ao discutir o papel das atividades na construção do conhecimento em sala de aula, estas pesquisadoras mostram como usar os textos históricos na prática docente.

4. Suporte ao professor para intervenção na escola básica em uma turma do Segundo Ano:

- Preparar textos para o professor trabalhar em sala de aula com uma turma do segundo ano médio na escola básica. O material pode ajudar a compensar a falta de preparo do professor para lidar com saberes da HC na sala de aula;
- Indicar livros, mini vídeo e artigos referente ao tema supracitado;
- Trabalhar com episódios da história da ciência, com ênfase na máquina de Carnot no período da revolução industrial e revolução Francesa no final do século XVIII e início do XIX.
- Trabalhar uma sequência didática sobre o tema supracitado. Na proposta de ensino há indicações, sugestões de caminhos pedagógicos que podem ser trilhados para a exploração das ideias e hipóteses levantadas pelos alunos, conforme certas situações didáticas se apresentem.
- O plano de aulas proposto também traz a descrição de todos os momentos didáticos planejados, atividades e textos, relacionando-os aos aspectos da NdC que são trabalhados neles. Além disso, acompanha tal plano o texto histórico suporte para os docentes.

No material paradidático contém recortes de episódios históricos e um material suporte para o professor, nesse material suporte tem: sugestões de textos de HC, artigos e links para mini vídeos. Esse material poderá auxiliar o professor em suas ministrações. O

destaque aqui será dado aos aspectos históricos que tem por finalidade a compreensão e o interesse do aluno do nível médio, provocando no mesmo uma evolução conceitual.

Uma das defesas dessa investigação é o uso de um paradidático contendo episódios da história da ciência para ser usada em sala de aula da escola básica, postergando o método puramente tradicionalizado e possibilitando uma diversificação dos recursos usados pelo professor, poderá promover uma alfabetização científica.

O paradidático traz detalhadamente todos os textos didáticos de forma bem planejadas, e com estratégias de utilização de textos históricas em uma linguagem flexíveis, porém sem perder o rigor da ciência. Esta elaboração é de conformidade com os parâmetros de Forato (2009). Estes parâmetros ajudará o docente a lidar com a HC na sala de aula.

5. Avaliar quando é possível superar ou contornar a ausência de pré-requisitos nos conhecimentos matemáticos, físicos, históricos, epistemológicos:

A assiduidade nas aulas, o trabalho em equipe, as apresentações em forma de mini seminários, apresentação usando painéis, e atividade escrita em fora de questionário, elaboração de pequenos textos juntamente com aulas dialogadas serão fatores importantes nas avaliações contínuas, não usamos aqui nenhum método matemático para os alunos como forma de avaliação, elas serão todas qualitativas.

6. Definir o nível de profundidade e formulação discursiva dos conteúdos epistemológicos:

Trabalhar com textos da história da ciência que tenha como base a narrativa da máquina térmica de Carnot e sua contribuição para a compreensão da segunda lei da Termodinâmica, bem como elaborar um paradidático, levou-se em conta que a proposta tem como participantes alunos do segundo ano do Ensino Médio, neste caso deve ser uma leitura flexível e de fácil compressão.

7. Escolher temas que despertem a curiosidade da faixa etária pretendida. “A escolha não pode considerar apenas critérios técnicos e objetivos, envolver os estudantes é fundamental”.

Entendemos que o estudo referente a máquinas térmicas e a segunda lei da Termodinâmica são assuntos importantes e que requerem dos alunos e professores aptidões

extracurriculares, no sentido de que são temas fortemente analisados e recorrentes no Enem. Além disso, são temas interdisciplinares que podem e devem ser recorrentes em outras disciplinas como história, sociologia, etc... Dessa forma, faz-se necessário a geração de alternativas, enquanto tema gerador, no sentido de resgatar os alunos ao diálogo e as discussões sobre o tema.

8. Ponderar sobre o uso de fontes primárias na Escola Básica: quando e como introduzi-las.

Adaptamos pequenos textos colhidos em Carnot de 1824 para os alunos. Nesta elaboração dos textos utilizamos principalmente fontes secundárias produzidas por historiadores da ciência. Tivemos o cuidado de não carregar o texto com um grau de dificuldade, pois a todo instante era preciso lembrar que o material era para alunos sem nenhuma experiência com textos primários.

Forato (2009) explica que:

Parecem-nos interessante os excertos de fontes primarias virem acompanhadas por explicações, auxiliando suas interpretações e atentando para possíveis preconceitos com relação aos vocabulários, conceitos da ciência e valores de outras épocas. Além disso, é recomendável selecionar trechos inteligíveis ao aluno e capazes de despertar seu interesse e não serem desanimados logo do ponto de vista do nível de escolaridade enfocado (FORATO, 2009, p.193).

O professor que pretende trabalhar em sala de aula com proposta de investigação deve ter o cuidado de organizar seu material didaticamente e pedagogicamente e em se tratando de trabalhar com textos em sala de aula, deve-se ter o cuidado na interpretação e no fato de saber os detalhes para não recair em uma pseudo-história.

9. Permitir aos estudantes vivenciarem aspectos dos debates entre teorias rivais que favorece a compreensão de aspectos epistemológicos:

A proposta busca estimular o debate entre os alunos desde a primeira aula, em que propomos que eles se dividam em grupos e tomem partido na interpretação do texto que sugerimos para cada episódio. Ainda propusemos atividades de debate e discussão sobre temas como revolução industrial, breve histórico de Carnot máquina térmica e aplicações no

seguimento social, teorias do calórico e do calor e o surgimento da segunda lei da termodinâmica.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, revisamos literaturas acerca do uso da HFC como uma ferramenta no processo pedagógico de Física no Ensino Médio. Ao mostrarmos sua importância nesse contexto, apontamos seus possíveis obstáculos e riscos, bem como analisamos documentos oficiais brasileiros, a exemplo de, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), PCN+, as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (DCNEM/ 1998), a Lei de Diretrizes e Base (LDB), as Orientações Curriculares para o Ensino Médio (OCEM), e a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) destacando as estratégias que tais documentos apontam para aperfeiçoar a prática educacional de Ciências.

2.1 A História e Filosofia da Ciência e sua relação com o Ensino de Ciência

A relação da HFC com o ensino de ciência busca ligar acontecimentos históricos de uma sociedade em determinada época. Este pressuposto está vinculado ao desenvolvimento dos aspectos da *natureza da ciência* (NdC), visando sempre buscar fatos históricos e culturais; além disso, permite compreender a construção do conhecimento físico como um processo histórico em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de uma determinada civilização.

Mesmo que modestas, destacam-se algumas abordagens da HFC, que possam contribuir para o ensino de ciências. Segundo Matthews (1994), aponta considerações que a HFC: a) pode humanizar a ciência, vinculando-a a questões pessoais, éticas, culturais e políticas; b) pode e deve ser adotada por pesquisadores, na relação estabelecida com a sala de aula; c) fornece elementos e bases para os debates educacionais contemporâneos, dando uma visão global.

A adoção destas afirmações dentro do contexto histórico, cultural e social, como suporte utilizado para o ensino de ciência, evidencia um crescente interesse de aprendizagem por parte dos alunos, como apresenta Matthews (1994, p.51-54). Outros pontos importantes devem ser levados em conta: a) a História promove uma melhor compreensão das concepções dos métodos científicos; b) uma abordagem histórica conecta o desenvolvimento do raciocínio do indivíduo com o desenvolvimento das ideias científicas; c) a HC é de grande valor intrínseco na vida da humanidade; d) a História, examinando a vida e o tempo dos cientistas, humaniza o assunto da ciência, tornando-o menos abstrato e mais motivador para os alunos.

Respectivamente a essas afirmações, vários historiadores da Ciência (CARVALHO, 2014; MARTINS, 2006; PEDUZZI e PIETRECOLA, 2001) sustentam a HFC como instrumento de ação mediadora para auxiliar o ensino de ciências em toda temática, tornando-a mais prazerosa. Pode-se pensar, também, na importância de se compreender o desenvolvimento histórico da tecnologia e das teorias científicas nos mais diversos campos e suas consequências para o cotidiano de uma sociedade em cada época. Todavia, por meio desse instrumento, identificam-se os avanços tecnológicos que foram modificando as condições de vida e criando novas necessidades, como no caso da evolução da máquina de fogo no século XVIII e XIX. Thomas Kuhn (1998) aponta que esses séculos foram marcados por grandes mudanças e impactos na sociedade, levando ao desenvolvimento tecnológico, marcados por inovações, atraindo muitos homens da ciência, tal como Carnot.

Sendo assim, o uso da HFC tem sido proposto por muitos historiadores da ciência, nacionais e internacionais (FREIRE Jr. 2002; MATTHEWS, 1994; SOUZA, 2008). Estes recomendam que o ensino da ciência, em especial da Física, deve considerar a parte histórica/filosófica em sala de aula, para uma educação científica de qualidade. Nota-se uma deficiência no ensino de ciências, evidenciada pelos altos números de analfabetismo científico, reflexo da falta de professores com uma preparação em HFC para atuarem no Ensino Médio. Neste caso, é preciso ressaltar que não se trata somente de incluir uma abordagem dos processos de construção do conhecimento científico no ensino de Física, mas de considerá-los no contexto histórico, filosófico e cultural em que o aprendizado tem lugar.

Pesquisas mostram que o ensino de Física no Brasil tem passado por intensas mudanças, visando a uma melhoria na qualidade do processo ensino-aprendizagem. Alguns autores, (MARTINS, 2006; PEDUZZI, 2001), têm apontado elementos que podem contribuir no processo educativo, sendo notória uma divergência entre as propostas para uma mudança no procedimento e na prática tradicional do professor em sala de aula. Acerca destas questões conflitantes, Gatti (2010) comenta da seguinte maneira:

Não é necessário fazer uma análise em profundidade sobre o Ensino de Ciências no Brasil para verificar a distância profunda entre as proposta inovadoras, fruto de investigações na área de ensino de Ciências, e as ações desenvolvidas em sala de aula dos cursos de nível médio (GATTI, 2010, p. 8).

Evidentemente, muitas são as propostas para melhoramento do ensino, no entanto, pouco se tem tentado executar tais propostas em sala de aula. Na prática, uma delas é incluir a

HFC no Ensino Médio, para desmistificar essa ciência dura e abstrata, confirmando o posicionamento de Silva (2011):

[...] a inserção da HFC na educação científica pode acarretar melhorias tanto nas aprendizagens de teorias científicas dando, por exemplo, uma melhor significação ao “formalismo” da Física do ensino Médio, até mesmo viabilizando uma discussão mais elaborada na Natureza da Ciência (SILVA, 2011, p. 156).

Contudo, pode-se perceber que o uso da HFC no ensino de ciências, como forma de estabelecer a compreensão dos conceitos científicos e as concepções sobre a natureza das ciências para os estudantes, constitui um objeto de pesquisa baseado em questões a serem investigadas e respondidas. Esta ferramenta pode contribuir para uma melhor compreensão de conceitos, leis, teorias, fenômenos, por exemplo. Assim, é necessária para compreender bem a matéria científica, no sentido de proporcionar uma aprendizagem significativa e superação da aprendizagem mecânica em sala de aula.

Desta forma, alunos podem refletir e dialogar na compreensão dos conceitos de física, embasados nos aspectos histórico e epistemológico no currículo das ciências, para evitar o ensino tradicional. Carvalho (2014) e Vannucchi (1996) concordam, acreditando que a HFC pode influenciar na educação científica, por contribuir para o desenvolvimento de habilidades cognitivas e de argumentação no ensino de ciências, gerando uma alfabetização científica de qualidade.

São inúmeras as dificuldades enfrentadas por professores de nível médio e também conhecidas dos pesquisadores da área. Essas dificuldades são visíveis, tais como, a falta de material pedagógico adequado, as dificuldades de leitura e interpretação de textos por parte de alunos, além de uma boa formação acadêmica, como tem apontado Martins (2007, p. 115). Possivelmente, os professores da educação básica utilizam uma pedagogia centrada em atividades com cálculos repetitivos, memorização de fórmulas, velhas listas de exercícios; dentre outros mecanismos que contribuem para uma descoberta dos educadores e não para o desenvolvimento de um senso crítico em relação aos assuntos trabalhados em Física. Ademais, educadores não são formados na área e metodologias que não enfocam o uso da HFC no ensino de Física têm, em muitos momentos, desanimando o aluno nesta disciplina, por ele não sentir curiosidade e prazer em se aprofundar nas questões da Ciência e da relação desta com o seu dia a dia.

Essa metodologia contrária, centrada na repetição de atividades e simples listas de exercícios, por vezes exaustivas, leva o aluno a criar concepções errôneas acerca da Física,

gerando lacunas dentro do processo de ensino-aprendizagem, prejudicando, assim, o desenvolvimento do educando. De acordo com Ferreira e Martins (2010), a HFC pode valorizar o ensino ao lhe acrescentar mais relevância. Embora a HFC não seja mero instrumento para a compreensão do conteúdo específico, pode ajudar a dar um maior significado às equações e fórmulas que os estudantes associam à Física. É comum ouvirmos estudantes dizerem que decoram algumas equações, por exemplo, mas sem a devida compreensão disso. A História e a Filosofia podem buscar a origem dessas equações e inseri-la na problemática que precisa de uma época e de um contexto, dando sentido ao que, descontextualizadamente, parecia estar solto.

Para ter sucesso no uso dessa ferramenta, segundo Martins (2007), o profissional deve ter uma formação razoável, logo, continuada, para poder reconhecer os fatos históricos e filosóficos intrínsecos a determinados assuntos. Nesta perspectiva processual, o professor auxilia a entender melhor a problemática não só da fórmula matemática, sem sentido, muitas vezes na mente do aluno, mas a desmistificar a pseudo-história e a quase história que, por vezes, existem nos livros didáticos. Portanto, ao acrescentar no aprendizado do aluno e trazer para ele uma visão correta da ciência, a formação continuada provoca a curiosidade do estudante, levando-o a compreender melhor o fenômeno da natureza ou um acontecimento histórico em determinada época.

2.2 A importância da História e Filosofia da Ciência no Ensino Médio

A utilização da HFC possibilita melhorar a qualidade da aprendizagem de Física no Ensino Médio, já que este uso contempla a análise de um evento como um todo contextual. Em todo caso, mesmo sendo uma boa ferramenta auxiliadora no campo de trabalho para o professor, ainda é pouca requisitada nesta situação de ensino. Concordando com essa ideia, Castro (2004), Machado e Nardi (2006) deixam visíveis que a HFC têm estado pouco presente nas atividades de ensino, apesar de ser importante para o entendimento da NdC. Por este motivo, também deveria fazer parte de um currículo reformulado por alguns fatores importantes, quais sejam, a HFC: [I] mostrar o desenvolvimento histórico da ciência, como ela realmente evoluiu, ou seja, como é feita; [II] ajudar a entender melhor os conteúdos, a origem dos conceitos, facilitando o aprendizado das leis, princípios conceitos e a modelagem matemática; [III] dar sentido ao conhecimento, contextualiza-o; [IV] possibilitar e despertar a curiosidade dos alunos e o seu interesse pela ciência, tornando o ensino mais prazeroso; [V] contribuir para desmistificar a ciência, mostrando erros dos grandes pensadores,

proporcionando uma “visão crítica”; [VI] evidenciar a importância da ciência na sociedade, como parte da cultura.

Dentro desses fatores, essa ferramenta tem um imenso potencial e, além disso, pode perfeitamente ampliar um leque de conhecimento dentro de um contexto em análise. Ricardo (2014) salienta que:

A inserção da História e Filosofia da Ciência (HFC) no ensino de ciências da natureza (ECN) tem sido uma temática recorrente nas pesquisas sobre temáticas voltadas ao ensino de ciências da natureza. Este fato justifica-se porque o conhecimento das ciências envolve tanto o conhecimento dos fatos científicos, leis e teorias (os produtos da ciência) quanto dos processos das ciências (meios técnicos, intelectuais e culturais em que as ciências são desenvolvidas e suas hipóteses são testadas e confirmadas). E, além do mais, uma parte das contribuições da HFC consiste em vincular os temas das disciplinas científicas a outros de outras áreas, tais como a matemática, a filosofia, a literatura, a psicologia, a história, a tecnologia, o comércio e a teologia, com o objetivo de demonstrar as interconexões entre ciência e cultura – as artes, a ética, a religião, a política – de forma ampla. Mesmo porque – sustenta o Mathews – as ciências não se constituem desvinculadas do que é desenvolvido em outras áreas. Ora, podemos perceber que há, então, relações de interdependência evolutiva ou inter-relações sistêmicas porque as ciências se desenvolvem e são praticadas dentro de um amplo contexto cultural e social, econômica e político (RICARDO, 2014, p. 944).

Várias razões têm sido apontadas na literatura em defesa de textos com uma abordagem de cunho histórico e filosófico no ensino de ciências (FERREIRA; MARTINS, 2010). Essa inserção contribui positivamente para avanço na qualidade do ensino do educando, facilitando seu aprendizado, desenvolvendo seu pensamento crítico-reflexivo e promovendo um aumento do interesse do educando pela Física.

Covolán (2004) destaca a importância dessa ferramenta para o ensino básico e defende que deve ser utilizada nos cursos de Ensino Médio.

Por se constituírem como instrumentos estratégicos, permitindo que o aluno veja o cientista como um ser humano comum como qualquer um de nós, e a Ciência, como um processo em curso permanente. Esta abordagem permite que o educando reformule as próprias concepções no que se refere ao caráter da produção de conhecimentos, além de mostrar que os conceitos não se resumem simplesmente a um emaranhado de fórmulas matemáticas. Assim sendo, na tentativa de desmistificar a evolução dos conceitos científicos, bem como contribuir para uma mudança de postura diante dos conteúdos, a História da Ciência no Ensino de Ciências adquire um papel muito importante (COVOLAN, 2004, p. 22-23).

Para a inclusão da HFC no ensino de Física, vários pontos podem contribuir para o aprendizado de teorias Físicas. Segundo Silva (2011),

[...] relacionando à aprendizagem de teorias físicas, a inserção da HFC pode: (a) proporcionar o estudo mais adequado de equações relacionadas a conceitos e teorias que, em algumas ocasiões, vêm se mostrar sem significação aos estudantes; (b) servir como uma ferramenta no trabalho das concepções alternativas mostradas pelos alunos; (c) proporcionar o estudo e elaboração de novas estratégias de ensino que possibilitem dar uma maior significação ao estudo de conceitos e teorias físicas e (d) contribuir para o entendimento da relação ciência, tecnologia e sociedade. (SILVA, 2011, p. 156).

Além de HFC poder contribuir para o aprendizado no ensino de Física, possibilita formar uma boa alfabetização científica, haja vista sua inclusão permear diversos campos dos saberes, promovendo um progresso na qualidade do processo educativo, ajudando a trazer mudanças na prática pedagógica do professor, como também, portanto, instigando a pensar.

2.3 Possíveis obstáculos à inserção da HFC no Ensino Médio

Para que a HFC tenha êxito dentro do processo educativo, acreditamos que um dos obstáculos está no currículo de formação, por ser a base desse meio. Assim, entendemos ser necessária uma mudança na formação dos professores, com o currículo a ser melhorado, reformulado, de maneira a incluir, dentro desse processo formativo, um maior número de disciplinas com a HFC. Como bem aponta Martins (2007), usar HFC passa a ser uma necessidade durante a formação, e não simplesmente um acessório que possa ajudar, pois evitaria uma distorção dos conteúdos e do fazer científico, além de que contribuiria para uma intervenção mais qualificada durante a prática em sala de aula.

Sobre essa formação, Linhares e Reis (2008) mencionam a questão da formação de qualidade, enfocando um ensino voltado para o melhoramento desses profissionais da educação:

É grande o desafio da formação de professores capazes de contribuir com a renovação das escolas e das práticas pedagógicas atuais. O papel da universidade enquanto espaço de formação inicial é central para superar deficiências do ensino tradicional. É indispensável oferecer aos professores um desenvolvimento profissional em que eles assumam uma identidade de aprendiz como um aspecto central no processo de mudança educacional. Diversas propostas demonstram preocupação com essa temática e algumas se mostram particularmente interessadas com uma formação diferenciada do ensino tradicional, que vigora tanto nas universidades quanto no Ensino Médio (LINHARES e REIS, 2008, p. 556).

Neste processo de formação, há a preocupação existente com um ensino de qualidade para o aluno. Como podemos ver, o ensino no meio acadêmico tem se preocupado em trazer um melhor conhecimento para esse futuro docente.

Apesar de os cursos de formações terem se aperfeiçoado muito em todo Brasil, ainda precisam avançar bastante. De acordo com Gatti (2010), o quadro atual nos cursos de formação de professores tem de certa forma, deixado uma lacuna na preparação desses futuros professores, vejamos:

Outros problemas e dificuldades também têm sido apontados nos cursos de formação de professores como, por exemplo, a dissociação entre a formação em conteúdos científicos e aqueles de natureza pedagógicas, revelando que a formação limita-se, na maioria dos casos, à soma de conteúdos científicos e outros cunhos pedagógicos, geralmente desvinculados. (GATTI, 2010, p. 8).

Evidentemente, outro fator é o livro-texto do próprio professor. O livro é sua maior ferramenta de trabalho, porque nele estão as orientações das suas atividades diárias. Claro que, por vezes, a formação do escritor do livro deve ser levada em consideração como um obstáculo, pois, caso o escritor não tenha formação na área de ensino, isso, de certa forma, pode ser um agravante. Dito de outra forma, quando o escritor desconhece totalmente da HFC passa uma imagem científica falsa para os alunos, uma pseudo-história. Neste caso, o uso da HFC pode ser um obstáculo no campo de trabalho; notemos o que nos diz Martins (2007):

A maior dificuldade apontada pelos sujeitos para o trabalho com a HFC já era, de certo modo, esperada por nós: a falta de material didático adequado, e a pouca presença desse tipo de conteúdo nos livros existentes, outra dificuldade refere-se à resistência dos alunos e da escola a qualquer “inovação”: um apego ao “tradicionalismo”. Os sujeitos temem romper com práticas estabelecidas e comuns nas escolas, e com isso passarem por “maus professores”. O interessante é que isso mostra certa falta de conhecimento e de convicção em relação ao uso de estratégias didáticas que fujam ao verbalismo e à simples exposição de conteúdos (MARTINS, 2007, p.121-122).

Como se torna evidente, a HFC é importante para a prática pedagógica de Física no Ensino Médio, por possuir uma potencialidade enorme para favorecer ao professor que tenha por interesse alcançar melhores resultados. A autoridade da HFC como instrumento que pode melhorar a qualidade do aprendizado dos educandos, no processo de ensino-aprendizagem, não é negada, não obstante, ainda são visíveis muitos obstáculos e riscos para a utilização

dessa ferramenta em sala de aula. A título de exemplificação: a) a falta de material didático adequado; a pouca presença desse tipo de conteúdo nos livros existentes; b) o currículo escolar, voltado para os exames e Enem com os conteúdos exigidos pelas escolas; c) a resistência dos alunos e da própria escola, apegados ao ensino tradicional; d) a formação e a falta de preparo de professores; e) o planejamento e a execução das aulas em si, considerando a possibilidade de ficarem cansativas ou monótonas; f) a falta de interesse ou vontade do professor; g) o pouco hábito de leitura dos alunos, refletindo na dificuldade de interpretar textos.

Percebe-se que existem muitos obstáculos e riscos a serem vencidos, desde a resistência dos professores para usar a HFC nas aulas de Física do Ensino Médio, o material didático que aborde com seriedade sobre a HFC, o modelo tradicional da educação com suas concepções e crenças, à ausência de atividades associadas à HFC, procurando desenvolver o interesse dos educandos pelo estudo da Física. “Acreditamos que a busca dessas respostas contribui para a reflexão acerca do papel da HFC no ensino de ciências e na aprendizagem do aluno. [...]” (MARTINS, 2007, p.116). Em linhas gerais, estes fatores podem interferir no aprendizado dos educandos, já que a falta de didática, metodologia, abordagem teórica e prática utilizada pelo professor afetam a maneira como os educandos compreendem a ciência e como podem ler e interpretar um fenômeno científico.

2.4 Considerações educacionais sobre a inserção da HFC no Ensino Médio

Ao longo dos anos, o ensino de Física tem tomado uma nova postura, a fim de que educandos tenham melhor desempenho nos processos de aprendizagem. Dos posicionamentos assumidos, atividades com textos históricos são utilizadas em sala de aula e assumem diversas funções, capazes de motivar e desenvolver habilidades em todos os integrantes do processo educacional.

Perante este quadro, a presente pesquisa se justifica por viabilizar maior significado ao conteúdo trabalhado em sala de aula no Ensino Médio. O conteúdo precisa estar articulado ao cotidiano dos educandos, para que possam intervir no mundo em sua volta. Desse modo, além de ser na escola onde podemos encontrar os meios de levar o aluno a ter prazer pela leitura¹¹ e escrita, estes atos são os caminhos norteadores de uma alfabetização científica.

¹¹ Este material visa mostrar que o aluno recebe da escola tanto valores como saberes. Este o acompanhará para a vida. Fonte: IRELAND, Vera Esther (Coordenação). **Repensando a escola**: um estudo sobre os desafios de aprender, ler e escrever. Brasília: UNESCO, MEC/INEP, 2007.

Fora da escola, o aluno não tem rumo certo e nem mesmo um ponto de referência no que diz respeito à educação formal; nela, pode adquirir instruções formais, tanto para progredir nos estudos, como para toda vida. Bezerra e Castilho (2010) fomentam essa ideia, argumentando que:

A escola é responsável pela formação de cidadãos e as atividades práticas bem elaboradas e ligadas à realidade dos alunos despertam o senso crítico diante de situações complexas e conduz às novas descobertas e assim rende resultados satisfatórios na formação de alunos críticos na sociedade. Com isso, diminui-se o número de evasão escolar, aumentando a participação do aluno em sala de aula e o seu envolvimento participativo na escola, fato significativo para o desenvolvimento social (BEZERRA e CASTILHO, 2010, p. 3).

A tendência natural da escola é produzir saberes, de forma que possam ajudar o aluno a progredir na vida acadêmica, bem como no seu contexto social. O Ensino Médio vem sofrendo mudanças decorrentes não apenas da ineficácia do ensino tradicionalmente praticado nas escolas, mas também das profundas mudanças e transformações sociais e econômicas vivenciadas neste século.

2.5 Documentos Oficiais

A análise das Orientações Curriculares para o Ensino Médio (OCEM) evidencia a importância do uso da HFC na ação educativa, como elemento necessário no processo de construção do conhecimento científico, assim como no processo de construção humana. Por outro lado, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) e os PCN+ têm mostrado a importância da discussão relacionada aos aspectos históricos e filosóficos no ensino de Física, com ênfase na contribuição dada através da inserção da HFC no Ensino Médio. Para fortalecer esse pensamento, faz-se necessário verificar que:

O uso da história da ciência para enriquecer o ensino de Física e tornar mais interessante o seu aprendizado, aproximando os aspectos científicos dos acontecimentos históricos, [pois] possibilita a visão da ciência como uma construção humana. Esse enfoque está em consonância com o desenvolvimento da competência geral de contextualização sociocultural, pois permite, por exemplo, compreender a construção do conhecimento físico com um processo histórico em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de uma determinada época (OCEM, 2006, v. 2, p. 64).

Nessa perspectiva, os cursos de formação de professores têm procurado inserir a HFC durante a formação, propondo essa ferramenta como uma mudança de paradigmas dentro do processo educativo. Assim, pretendem que a inserção seja por meio de disciplinas e/ou outros recursos, promovam um maior aprendizado, melhorando a relação entre os conteúdos específicos, a história da ciência e a mudança da prática educativa em sala de aula. Corroborando com essa discussão, Martins (2007) diz que:

Vários cursos de licenciaturas, das áreas científicas, nos últimos anos, têm contemplado essa questão, seja por intermédio de uma disciplina específica que trate do conteúdo histórico e filosófico, seja de um modo mais 'disperso', em que esses elementos encontram-se presentes nos róis de conteúdos de outras disciplinas, em seminário etc. Dessa forma, espera-se dar conta minimamente, dessas necessidades formativas dos professores, com reflexo em suas práticas (MARTINS, 2007, p. 115).

Todavia, devemos notar que a inclusão da HFC, nos cursos de licenciatura e de formação continuada, não garante que a referida abordagem científica histórico-filosófica seja trabalhada nas aulas de Física do Ensino Médio. Por isso, Martins (2007), confirma que:

[...] a simples consideração de elementos históricos e filosóficos na formação inicial de professores das áreas -ainda que feita com qualidade- não garante a inserção desse conhecimento nas salas de aula do ensino básico, tampouco uma reflexão mais aprofundada, por parte dos professores, do papel da HFC para o campo da didática das ciências. As principais dificuldades surgem quando pensamos na utilização da HFC para fins didáticos, ou seja, quando passamos dos cursos de formação inicial para o contexto aplicado do ensino e aprendizagem das ciências (MARTINS, 2007, p.115).

Nessa visão, podemos entender que a HFC procura romper com os conteúdos que, na sua grande maioria, atuam desarticulados com leis, fórmulas matemáticas e com o cotidiano dos educandos. Corroborando com essa situação, os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (BRASIL, 1997) dizem que:

[...] ensino de física tem-se realizado frequentemente mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas de forma desarticulada, distanciada do mundo vivido pelos alunos e pelos professores, mas também por isso, vazios de significados (BRASIL, 1997, p. 48).

Por volta das décadas de 1980 e 1990, o sistema escolar sofreu críticas de diferentes setores da sociedade, assim como de pesquisadores, educadores, professores e estudantes. Essas críticas se referiam ao fato de o Ensino Básico não cumprir objetivos formativos amplos

necessários, tanto para a vida acadêmica, como para o seguimento social, digo, acadêmico; o ensino superior e social para o mercado de trabalho.

No fim dos anos 1990, diversas medidas procuraram alterar esse quadro, ganhou especial destaque a Lei de Diretrizes e Bases (LDB), divulgada em 20 de dezembro de 1996 (Lei nº 9.394/96), que mudou o estilo formativo do Ensino Médio, após um longo período em que o objetivo desse nível de ensino era tão superior para funções básicas, quanto técnicas do mercado de trabalho.

Concordando ainda com Bezerra e Castilho (2010), Menezes (2001) mostra um senso mais crítico sobre o ambiente escolar, que deve ser um lugar de crescimento intelectual e de contribuições sociais:

A nova escola de nível médio, que não há de ser mais um prédio com professores agentes e com alunos pacientes, mas um projeto de realização humana recíproca e dinâmica de alunos e professores. Numa relação que deverá estar mediada não somente por conteúdos disciplinares isolados, mas também articulados com questões reais apresentadas pela vida comunitária, pelas circunstâncias econômicas, sociais, políticas e ambientais de seu entorno e do mundo. Esta nova escola deverá estar atenta às perspectivas de vida de seus partícipes, ao desenvolvimento de competências gerais, de habilidades específicas, de preferências culturais. Para essa escola, de práticas mais solidárias, a permanente formação de seus professores é também a realização de um de seus fins, e não só de um meio. (MENEZES, 2001, p. 5).

Raciocinando sobre o novo público e a nova natureza do Ensino Médio em consideração a estes documentos, Menezes (2001) aponta ainda que:

Para a escola assumir sua dimensão humanista mais ampla, não aceitando um triste papel de depósito de mão-de-obra ociosa, ela precisa garantir, para todos os alunos e com especial atenção à maioria que chega a uma escola não frequentada por seus pais, condições para que desenvolvam confiança e autoestima, valores humanos, interesses culturais, autonomia econômica e consciência social. Se isso já parece tarefa difícil, é preciso acrescentar que o novo desafio se sobrepõe ao antigo, pois a escola, ao aceitar essa nova dimensão de seu trabalho, em princípio não deveria desguarnecer todas as funções que exercia algumas das quais precisa manter e aperfeiçoar. Não basta concordar com esses objetivos, é preciso identificar os pontos de partida para se construir essa nova escola, assim como é preciso conhecer melhor os obstáculos que dificultam sua implementação, para determinar as formas de contorná-los ou os meios para superá-los (MENEZES, 2001, p. 4).

Seguindo essa linha de pensamento, verificamos mudanças significativas no Ensino Médio no Brasil. Os pesquisadores estão preocupados, já que os próprios documentos oficiais

mostram os pontos a serem melhorados e trabalhados. Partindo de princípios definidos na LDB, o ministério da Educação, em um trabalho conjunto com educadores de todo país, chegou a um novo perfil para o currículo, apoiado em competências básicas para inserção de nossos jovens na vida adulta. Antes tínhamos um ensino descontextualizado, compartimentalizado e baseado em acúmulo de informações.

Ao contrário disso, buscamos dar significado ao conhecimento escolar, mediante fatos históricos e filosóficos, levando assim a uma contextualização, incentivando o aluno a um raciocínio crítico capaz de aprender. Esses parâmetros cumprem o duplo papel de difundir os princípios da reforma curricular e orientar o professor a utilizar a HFC como uma nova abordagem metodológica em sala de aula. Com a nova LDB, essa etapa da Educação Básica passou a integrar a formação cidadã do educando, ocupando uma enorme importância na vida do estudante. Nos termos da LDB, conforme Art. 35, o Ensino Médio é etapa final da Educação Básica, com duração mínima de três anos, com seguintes finalidades:

- I. A consolidação e aprofundamento dos conhecimentos adquiridos nos Ensino Fundamental, possibilitando o prosseguimento de estudos;
- II. A preparação básica para o trabalho e a cidadania do educando, para continuar aprendendo, de modo a ser capaz de se adaptar com flexibilidade a novas condições de ocupação ou aperfeiçoamento posteriores;
- III O aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e o pensamento crítico;
- VI. A compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina. (BRASIL, 2000, p.18).

Nessa concepção, o Ensino Médio deve capacitar o aluno a ser um cidadão inserido no mundo, preparado para lidar com desafios pessoais e sociais, possibilitando sua atuação na prática social e no mundo do trabalho. O Ensino Médio tem a finalidade central à consolidação e ao aprofundamento dos conhecimentos adquiridos durante o nível fundamental, no intuito de garantir a continuidade de estudos, mas também a preparação para o trabalho e o exercício da cidadania, a formação ética, o desenvolvimento da autonomia intelectual e a compreensão dos processos produtivos.

Pouco tempo depois da divulgação da LDB, novos documentos foram publicados pelo Ministério da Educação (MEC), com o objetivo de adequar a organização pedagógica e curricular do sistema escolar à legislação e fornecer orientações, propostas e material de apoio à prática das reformas educacionais. Destacam-se, entre esses documentos, as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (DCNEM, 1998), os Parâmetros Curriculares

Nacionais (PCN, 1997, 2000), as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN⁺, 2002) e a BNCC (Base Nacional Comum Curricular).

As DCNEM sistematizam os princípios gerais da LDB, explicitam desdobramento desses princípios, dispõem sobre a organização curricular da formação básica nacional e suas relações à formação para o mercado de trabalho. Por outro lado, os PCNEM e os PCN⁺ tiveram como objetivo esclarecer e orientar educadores na implementação da LDB e das DCNEM, dada a dificuldade de realizar, na prática, o que a legislação preconizava, como, por exemplo, desbastar o currículo enciclopédico, (res) significar os conteúdos disciplinares como meio para a constituição de competência e valores, e não como objetos do ensino em si mesmos¹².

Para que as mudanças na organização curricular do Ensino Médio propostas pelos documentos oficiais ocorram efetivamente, é essencial o envolvimento dos professores e uma mudança nas práticas educativas. Claro que mudar práticas implica sair da zona de conforto, modificar concepções que, em determinadas vezes, estão bem arraigadas. Assim, torna-se necessário desenvolver uma prática de formação continuada do professor, com as ações previstas de compreender, de forma crítica e construtiva, as orientações estabelecidas, bem como de discutir atos que possam ser executados em sala de aula.

Dentro desta análise documental, Domingues e Oliveira (2000, p.3) mostram a necessidade de uma maior implantação de recursos bem como de uma mudança significativa no currículo e nas práticas pedagógicas¹³:

Acreditamos que toda mudança curricular é parte de uma política de desenvolvimento do país, e, portanto, o currículo deve expressar coerência e articulação com esse projeto. Isso explica, em grande parte, porque o planejamento curricular está adquirindo centralidade nas reformas educativas, especialmente na América Latina. No caso brasileiro, isso se evidencia nas reformas curriculares em curso (PCNs do Ensino Fundamental e Média e Diretriz Curricular Nacional para a educação básica e superior) e nos mecanismos de avaliação do sistema (Saeb, Enem, ENC etc.). No Brasil, apesar da importância que os governos dão ao planejamento curricular, a história tem demonstrado que, sucessivamente, as reformas “fracassam”. É o que demonstra a maioria dos estudos acerca, por exemplo, das reformas de 1960 (Lei de nº 4024/61) e 1970 (Lei de nº 5692/71). Por que elas fracassaram? Será que os mesmos equívocos se repetem na atual reforma do Ensino Médio? Naquelas, o insucesso se deveu, basicamente, à ausência de

¹² Este artigo mostra pontos contribuidores na formulação do currículo: DOMINGUES, José Juiz; TOSCHI, Nirza Seabra e OLIVEIRA, João Ferreira de. **A reforma do Ensino Médio**: a nova formulação curricular e a realidade da escola pública. Educ. Soc. [online]. 2000, vol.21, n.70, pp. 63-79. ISSN 1678-4626.

¹³A educação no Brasil está passando por sérias reformas, sobre estas mudanças podemos comprovar no documento oficial BNCC (Base nacional comum curricular). Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br>. Acesso em: 18 jul. 2015.

financiamento do processo de manutenção e investimento e à falta de uma política “agressiva” de formação de professores e de recursos humanos em geral. Deveu-se também à ausência de uma política de adequação do espaço e da infraestrutura pedagógica, além da inexistência de uma política editorial que superasse o passado. Em geral, essas políticas de currículo têm se caracterizado como programas de governo, isto é, com início e fim determinados pelos mandatos. Falta tempo para sua implantação e consolidação no espaço de um governo, acarretando descontinuidade administrativa e pedagógica. O mais grave é que tais políticas levam ao descrédito no âmbito escolar, uma vez que os professores não acreditam nelas, e, portanto, não se engajam efetivamente (DOMINGUES E OLIVEIRA, 2000, p. 3).

Por outro lado, o parecer do conselho nacional de educação, tomando como aporte a LDB, de 8/5/2001, afirma que a formação inicial do professor¹⁴ deve dar conta do desenvolvimento de novas competências docentes, a saber:

Orientar e mediar o ensino para aprendizagem do aluno; comprometer-se com o sucesso da aprendizagem dos alunos; assumir e saber lidar com diversidades existentes entre alunos; incentivar atividades de enriquecimento cultural; desenvolver práticas investigativas; elaborar e executar projetos para desenvolver conteúdos curriculares; utilizar novas metodologias, estratégias e materiais de apoio; desenvolver hábitos de colaboração e trabalho em equipe (BRASIL/ MEC, 2001, p. 4).

Fazendo uma análise, mesmo que modesta, da Base Nacional Comum Curricular, no componente de Física dos três anos básicos, vemos que: A BNCC leva em conta características importantes e pontos de apoio para o ensino. E, ainda, certa preocupação em transmitir a história e filosofia da ciência como ferramenta metodológica para o ensino na escola básica.

A física é uma construção humana e como tal deve ser apresentada. Isso implica considerar a história passada e presente, em suas diversas interpretações possíveis, como caminho para a compreensão da ciência como instrumento social, [...] “a física insere-se no contexto mais amplo da nossa cultura, podendo ser percebida também como cultura”. O conhecimento da cultura representado, por exemplo, em produções da literatura, das artes plásticas, do teatro e da música. Assim o contexto histórico/social e também o contexto cultural se constitui como um cenário para o conhecimento da física (BRASIL/BNCC, 2015, p. 15).

A BNCC, como um dos documentos oficiais brasileiros, apresenta alguns objetivos gerais para ciências da natureza na educação básica:

- Compreender a ciência como um empreendimento humano, construído histórica e socialmente.

¹⁴ BRASIL. Ministério da Educação – Secretaria de Ensino Fundamental. Referenciais para a Formação de Professores. Brasília, 1999.

- Apropriar-se de conhecimentos das Ciências da Natureza como instrumento de leitura do mundo.
- Interpretar e discutir relações entre a ciência, a tecnologia, o ambiente e a sociedade.
- Mobilizar conhecimentos para emitir julgamentos e tomar posições a respeito de situações e problemas de interesse pessoal e social relativos às interações da ciência na sociedade.
- Saber buscar e fazer uso de informações e de procedimentos de investigação com vistas a propor soluções para problemas que envolvem conhecimentos científicos.
- Desenvolver senso crítico e autonomia intelectual no enfrentamento de problemas e na busca de soluções, visando transformações sociais e construção da cidadania.
- Fazer uso de modos de comunicação e de interação para aplicação e divulgação de conhecimentos científicos e tecnológicos
- Refletir criticamente sobre valores humanos, éticos e morais relacionados com a aplicação dos conhecimentos científicos e tecnológicos (BRASIL/BNCC, 2015, p.15).

Também pelo fato de este documento está inteiramente em harmonia com a LDB, educadores e pesquisadores tem se atentado para a relação que este proporciona entre a melhoria e o norteamento da prática pedagógica.

Diante deste quadro até aqui apresentado por estes documentos, entendemos que servem como uma orientação que pode nos auxiliar na reflexão do trabalho em sala de aula e na busca de caminhos diante dos desafios que se colocam hoje para nós. Também os compreendemos enquanto sinalização para guiar nossas práticas quer como educadores, quer como professores. Portanto, a pertinência dessa dissertação consiste no argumento de tentar estreitar os laços entre pesquisa em ensino de Física e as práticas pedagógicas, valendo-se de que é possível fazê-las, de que as expectativas em suas práticas na sala de aula são bastante esperançosas.

3. FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresentamos uma visão histórica externa e internalista de alguns acontecimentos entre o século XVIII e meados do século XIX, período marcado pela Revolução Industrial, levando em consideração a contribuição do Engenheiro francês Leonard Sadi Carnot (1796-1832) para os avanços tecnológicos, bem como para a formulação da Segunda Lei da Termodinâmica. Para esta descrição, faz-se necessária uma análise dos fundamentos teóricos presentes em seu manuscrito, intitulado *Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas equipadas ao desenvolvimento dessa potência*.

3.1 Carnot e a Revolução Industrial: aspectos sociais e econômicos entre os séculos XVIII e XIX.

A ciência não é produto de uma só pessoa, não é somente um conjunto de métodos e conhecimentos prontos e acabados. Ela está em constante desenvolvimento ao longo dos séculos. Thomas Kuhn (1998) apresenta o papel da ciência e do historiador da ciência em *A Estrutura das Revoluções Científicas*.

A ciência é a reunião de fatos, teorias e métodos reunidos nos textos atuais, então os cientistas são homens que, com ou sem sucesso, empenharam-se em contribuir com um ou outro elemento para essa constelação específica. O desenvolvimento tornou-se o processo gradativo através do qual esses itens foram adicionados, isoladamente ou em combinação, ao estoque sempre crescente que constitui o conhecimento e a técnica científicos, [...], o historiador parece ter duas tarefas principais. De um lado deve determinar quando e por quem cada fato, teoria ou lei científica contemporânea foi descoberta ou inventada. De outro lado, deve descrever e explicar os amontoados de erros, mitos e superstições que inibiram a acumulação mais rápida dos elementos constituintes do moderno texto científico (KUHN, 1998, p. 20).

Para estudar qualquer que seja o fato científico, precisamos compreender os aspectos da História em que ele foi desenvolvido, estudar as raízes do evento. Isto não seria diferente com a termodinâmica, ramo da Física que, até então, não tinha nada consolidado. Neste sentido, o período referente aos finais do século XVIII e meados do XIX corresponde a uma fase de profundas mudanças sociais e econômicas na Europa.

A Revolução Industrial, ocorrida inicialmente por volta de 1750, na Inglaterra, o capitalismo começava a completar sua formação, atrelado ao

desenvolvimento da máquina térmica, seguida de aprofundados estudos sobre a natureza da energia, do calor e do trabalho. A Revolução Industrial modificou as relações de trabalho e permitiu a produção em larga escala de inúmeros produtos, oferecendo itens que proporcionaria maior conforto e a um preço menor do que os artesanais (ARTUSO, 2013, p. 113-5).

Essa é a chamada revolução industrial, abrangendo modificações sociais e tecnológicas. Neste período, houve um aumento do uso de máquinas, em substituição/diminuição da mão de obra humana e animal. Este foi um tempo de transformações no sistema artesanal de produção, diante do nascimento do sistema fabril. Segundo Hobsbawm (2007), a chegada da máquina de fogo aumentou os meios de produção e consolidou a tendência de concentração lucros nas mãos de uma pequena parcela da sociedade. Por sua vez, os que se viram desprovidos dos meios de produção foram forçados a vender sua capacidade de trabalho em troca de um salário. É a definitiva separação entre capital e trabalho, entre classe da burguesia e do Proletariado. Bernal (1965) complementa que:

Os setenta anos de 1760 a 1830, e em particular os trinta de 1770-1800, é um ponto de virada decisivo na história mundial. Eles marcam a primeira realização prática das novas competências das máquinas em trabalho do quadro de uma nova indústria capitalista produtiva. Uma vez que estes passos tomou a enorme extensão da indústria e da ciência do século XIX, isso era inevitável (BERNAL, 1965, p. 541).

Mesmo neste período, a revolução industrial também não correspondeu a um processo único, tanto quanto é possível reduzi-la a uma maneira breve. Contudo, a Inglaterra foi competente com o processo de acumulação primitiva de capital, com o seu comércio marítimo bem lucrativo, com a exploração de suas colônias e principalmente com o apoio de seus corsários, piratas legalizados que tinham o apoio da coroa para saquear as embarcações inimigas. Além disso, temos também a ética protestante ligado à doutrina calvinista, os puritanos que pregavam que todo indivíduo deveria ter o espírito de poupança. Esses fatos levaram a Inglaterra a uma acumulação de riquezas, desencadeando uma revolução, para isso acontecer foram necessários pontos centrais¹⁵: I) o aumento da indústria e da agricultura, com a aplicação da força motriz industrial na sociedade; II) o desenvolvimento do sistema fabril, e

¹⁵ Historiadores costumam apontar causas para explicar o pioneirismo inglês na Revolução Industrial: a) acúmulo de capital, levando à expansão do comércio do ferro e da produção de algodão; b) oferta de mão de obra barata; c) aproveitamento das condições naturais, a posições geográficas e os recursos naturais como fonte de energia, assim como das minas de carvão (um importante mineral e matéria prima da época). Fonte: Causa sobre essa Revolução Industrial. Disponível: <http://www.consciencia.org/a-revolucao-industrial-dos-seculos-xix-e-xx>.

E como complemento: <https://cesarmangolin.files.wordpress.com/2010/02/berns-historia-da-ivilizacaooc>. Acesso em: 14 agosto de 2015.

uma rápida velocidade dos transportes e das comunicações; III) o considerável acréscimo do controle por parte de banqueiros sobre quase todos os ramos de atividade econômica e política. Acerca deste intenso calor de uma revolução chamada de Industrial, que inicialmente nasceu na Inglaterra, Hobsbawm (2007) afirma que:

O próprio nome de revolução industrial reflete seu impacto relativamente tardio sobre a Europa. A coisa existia na Inglaterra antes do termo, [...] chamar esse processo de revolução industrial é lógico e está em conformidade com a tradição bem estabelecida, embora tenha sido moda entre os historiadores conservadores, [...] a revolução industrial foi um episódio com um princípio e um fim (HOBBSAWM, 2007, p. 50-51).

Apontamos aqui um período clássico valioso para a história delimitado entre 1760 e 1850-70, o ferro e o carvão eram utilizados como fontes de energia. Inicialmente, isso fazia parte da riqueza da famosa Inglaterra (Cf. Figura 1 ilustra um homem trabalhando em uma das minas de carvão na Inglaterra, por volta de 1814, aproximadamente); esse período ficou caracterizado pelas inovações tecnológicas e profundas mudanças como salienta (MANTOUX, 1927).

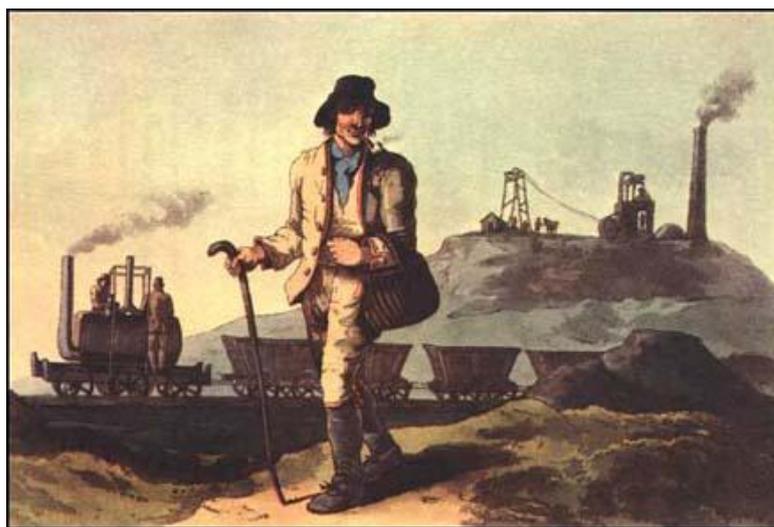


Figura 1: Homens trabalhando nas minas de carvão na Inglaterra, aproximadamente, em 1814¹⁶.

As inovações técnico-científicas desta etapa desarraigaram os resquícios da antiga ordem socioeconômica. As enormes somas necessárias para a implantação da nova maquinaria viabilizaram a concentração do capital, além disso, possibilitaram expansão das indústrias para áreas do mundo ainda decadentes. Romperam-se as fronteiras nacionais; a

¹⁶Disponível em: <http://spartacus-educational.com/RAblenkinsop.htm> . Acesso em: 01 maio de 2015.

sociedade urbana e industrial foi incentivada. O capitalismo foi se tornando ainda mais concentrado, os negócios e os mercados começaram a romper distâncias, inclusive oceânicas; para isso acontecer às máquinas a vapor foram usadas em larga escala, tanto por terra, quanto por mar.

Esse acontecimento histórico iniciou-se na Inglaterra e se alastrou por boa parte da Europa, com uma pequena classe média urbana, e em pequenos focos ao norte da França. Estes, por sua vez, rompem com o modo de trabalho feudal da Idade Média, através de uma produção artesanal e doméstica. Por outro lado, os métodos da Ciência já conhecidos desde o século XVII, com a Revolução Científica¹⁷, passam a ser aplicados às diversas áreas do conhecimento; essas aplicações são utilizadas para o avanço das indústrias para empresas mecanizadas, dando o início ao desenvolvimento do capitalismo industrial.

Em meados do século XVIII, a Inglaterra, em um período de prosperidade desemboca em um processo que viria transformar inteiramente o cenário social e suas relações econômicas e políticas. Na França, por outro lado, surgia a Revolução Francesa que se apoiava nos problemas de natureza política e militar, dificultando a corrida para alcançar a Inglaterra nos anos seguintes. A França tinha interesses no progresso, não só econômico e político, mas também, militar; pelas mãos dos homens que buscavam aperfeiçoar as máquinas militares, surgiram, então, as propostas para as soluções dos problemas do calor, corrente de grande debate nesta época por homens da Ciência, bem como do limite e da eficiência das máquinas. Sobre esse tempo, Hobsbawm (2007) avalia que:

Qualquer que tenha sido a razão do avanço britânico, ele não se deveu à superioridade tecnológica e científica, nota-se ainda que, nas ciências naturais, os Franceses estavam seguramente à frente dos ingleses, vantagem que a Revolução Francesa veio acentuar de forma marcante, pelo menos na matemática e na física (HOBSBAWM, 2007, p.52).

A escola francesa era muito superior a da Inglaterra, como tem mostrado o historiador Hobsbawm, em sua obra *A Era das Revoluções*. Ele diz que os inventos produzidos na França eram superiores em tudo, por serem originais, visto terem uma educação de alto nível:

¹⁷A revolução científica é período que começou no século XVI e prolongou-se até o século XVIII. A partir desse período, a Ciência, que até então estava atrelada à Filosofia, separa-se desta e passa a ser um conhecimento mais estruturado e prático.

Disponível em: <http://cfcul.fc.ul.pt/biblioteca/online/pdf/ruimoreira/revolucao> . Acesso em: 01 maio de 2015.

Ver também: KUHN, Thomas S. A estrutura das revoluções científicas. 5ª. Ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 1997 [1961]. p. 173-181

A educação inglesa era uma piada de mau gosto, embora suas deficiências fossem um tanto compensadas pelas duras escolas do interior e pelas universidades democráticas, turbulentas e austeras da Escócia calvinista, que lançavam uma corrente de jovens racionalistas, brilhantes e trabalhadores, em busca de uma carreira no sul do país: James Watt, Tomas Telford, Loudon Mec Adam, James MuI. Orfort e Cambridge, as duas únicas universidades inglesas, eram intelectualmente nulas, como o eram também as sonolentas escolas públicas (HOBSBAWM, 2007, p. 52).

Adotando como base estas afirmações sobre a educação inglesa, Hobsbawm (op. cit.) faz uma crítica séria sobre os primórdios da revolução industrial, uma vez que as escolas inglesas estavam fadadas ao descaso e fracasso. Notamos ainda que:

Felizmente poucos refinamentos intelectuais foram necessários para se fazer a revolução industrial. Suas invenções técnicas foram bastante modestas, e sob hipótese alguma estavam além dos limites de seus artesões e dos que trabalhavam em suas oficinas ou das capacidades construtivas de carpinteiros, moleiros e serralheiros: a lançadeira, o tear, a fiadeira automática. E nem mesmo máquina cientificamente mais sofisticada, a máquina a vapor de James Watt (1784), necessitava de mais conhecimentos de física do que os disponíveis até então há quase um século, a teoria adequada das máquinas a vapor só foi desenvolvida pelo francês Carnot na década de 1820 e podia contar com várias gerações de utilização para a sociedade, essa prática de máquinas a vapor, utilizada principalmente nas minas de carvão. Dadas às condições adequadas e necessárias, as inovações técnicas da revolução industrial praticamente se fizeram por si mesmas, exceto talvez na indústria química (HOBSBAWM, 2007, p. 53-54).

Na crítica tecida, o historiador, formado na Universidade de Cambridge, faz uma breve análise dos acontecimentos sociopolíticos e econômicos desse período. Volta-se para o período chamado, por ele, de *A Era das Revoluções Marcadas de 1789-1848*, que tinha inventos e inovações tecnológicas relacionadas às máquinas de fogo e aos avanços científicos com propriedade e vasto conhecimento no assunto, conforme apresentamos com a seguinte passagem:

[...] História da chamada dupla revolução não é meramente a história do triunfo da nova sociedade burguesa. É também a história do aparecimento das forças que, um século depois de 1848, viria transformar a expansão em contração. E mais ainda neste mesmo ano, esta extraordinária mudança de destino já era até visível até certo ponto (HOBSBAWM, 2007, p. 18).

É bem compreendido por esse estudioso que um processo revolucionário de expansão, ocorrida na segunda metade do século XVIII, ocasionou um amplo conjunto de mudanças que afetou os modos de trabalhar, morar, relacionar-se e de pensar das pessoas. Uma dessas mudanças foi o aumento da população mundial. Segundo Huberman (1981, p.

155-158) o foco neste período era poder trabalhar nas minas na extração do carvão, matérias primas utilizado em máquinas. Isso representava o investimento de grande soma de dinheiro, e a entrada do capitalista. Também na mineração de metais foi preciso muito dinheiro para atender à procura do ferro, cobre etc. necessários à indústria.

Desde o século XVII e entre 1750 e 1850, a população mundial dobrou, devido à modernização dos avanços da ciência e da tecnologia. O aumento populacional foi seguido também pelo processo do deslocamento da população do campo para a cidade. Segundo Hobsbawm (2007):

A população rural doméstica ou estrangeira (esta sob a forma de imigração, principalmente irlandesa) era a fonte mais óbvia, suplementada pela mistura de pequenos produtores e trabalhadores pobres. Os homens tinham que ser atraídos para as novas ocupações, ou - como era mais provável - forçados a elas, pois inicialmente estiveram imunes a essas atrações ou relutantes em abandonar seu modo de vida tradicional e rural. A dificuldade social e econômica era a arma mais eficiente; secundada pelos salários mais altos e a liberdade maior que havia nas cidades. Por várias razões, as forças capazes de desprender os homens de seu passado sócio-histórico eram ainda relativamente fracas em nosso período, em comparação com a segunda metade do século XIX (HOBSBAWM, 2007, p. 35).

A urbanização jamais vista na história surge de dificuldades como a grande demanda da população em busca de novas ofertas de trabalho. Segundo Soares (2014, p. 28-29) destaca que no período da revolução industrial as sujeiras nas ruas, a falta de água, de esgotos sanitários, tudo isso provocava a ocorrência de doenças como a febre tifoide¹⁸ e a cólera¹⁹, que atingia as massas e, sobretudo, os mais pobres. Mesmo com todos esses problemas, o capitalismo ganhou um forte impulso na Europa, embalado por um desenvolvimento no campo industrial e comercial Hobsbawm (2007) atribuiu a esse fenômeno dois principais fatores:

O primeiro fator é um extraordinário crescimento dos mercados consumidores europeus e segundo fator era os capitais acumulados na

¹⁸ A febre tifoide é uma doença bacteriana aguda de distribuição mundial. É causada pela *Salmonella entérica sorotipo Typhi*. Está associada a baixos níveis socioeconômicos, relacionando-se, principalmente, a precárias condições de saneamento e de higiene pessoal e ambiental.

Disponível em: <http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/>. Acesso em 19 Junho de 2015.

¹⁹ A cólera geralmente surge em contextos que envolvem superlotação e acesso inadequado à água limpa, coleta de lixo e banheiros. A doença causa diarreia profusa e vômitos, que podem levar à morte por desidratação intensa, por vezes, em questão de horas.

Disponível em: <http://www.msf.org.br/o-que-fazemos/atividades-medicas/colera>. Acesso em 26 Agosto de 2016.

Europa na primeira revolução industrial, iniciada em fins do século XVIII (HOBSBAWM, 2007, p. 51).

Seguindo estes fatos históricos por Hobsbawm, em sua obra *A Era das Revoluções*, deixa notado o impacto que possivelmente configurou a revolução industrial na sociedade inglesa, bem como em muitas partes da Europa. De acordo com Santos (2009, p. 45-47), dentre os fatores que permitiram a primazia da Inglaterra na revolução industrial, destacaram-se a ausência de grande império colonial e falta de capacidade de concorrência com a indústria francesa de luxo, com o intuito de rendimento no comércio e o seu fortalecimento, através dos atos de navegação, por exemplo. Um fato importante é a Inglaterra possuir uma localização geográfica estratégica, além de grandes reservas de carvão. Suas colônias forneciam a matéria prima necessária, além de serem uma grande potência naval e controlarem bem o ritmo de produção, de rotas e de possuírem os portos necessários.

Como bem registrado pelo estudioso, não foram necessários altos investimentos, ou seja, o preço pago pela mão de obra, já que os grandes industriais preferiam contratar mulheres e crianças, pois estes eram melhores de lidar. Desse modo, a revolução industrial se deu em torno de medidas simples, de levar muitos trabalhadores à ruína total, e de as fábricas lhes causar perda da autonomia e independência.

Graças à urbanização, foram realizadas inovações na produção de bens, ou seja, de equipamentos que usam como fonte de energia o carvão, aço e ferro. Estas matérias primas, antes do surgimento das ferrovias, em 1828, possuíam uma baixa procura e passaram a ser consumidos também pela siderúrgica. Segundo Hobsbawm (2007) muito dinheiro passou a ser investido, mesmo de forma desordenada, na época das ferrovias.

É evidente que nenhuma economia industrial pode-se desenvolver além de certo ponto se não possui uma adequada capacidade de bens de capital. Eis por que, até mesmo hoje, o mais abalizado índice isolado para se avaliar o potencial industrial de qualquer país é a quantidade de sua produção de ferro e aço. Mas é também evidente que, num sistema de empresa privada, o investimento de capital extremamente dispendioso que se faz necessário para a maior parte deste desenvolvimento não é assumido provavelmente pelas mesmas razões que a industrialização do algodão ou outros bens de consumo. (HOBSBAWM, 2007, p. 70).

O autor deixa claro que esta forma de organização do trabalho, através da divisão e da especialização das tarefas, e com as inovações tecnológicas resultantes do estabelecimento nos métodos da ciência experimental, atinge rapidamente o comércio e a agricultura. Segundo Quadros (1996, p. 21) e Santos (2009, p. 46-47), para o estabelecimento e êxito do que se

chamou a revolução industrial, às inovações tecnológicas tiveram um papel fundamental, destacadamente, a máquina a vapor. Essa se tornou o ponto de partida para o bom êxito da indústria pesada, para o meio de evolução de transporte, conforme exemplificamos a partir da figura (2a-b), apresenta uma máquina a vapor juntamente com as fabricas na Inglaterra, isso mostra que o progresso tecnológico e o impacto na economia da época advinda com a revolução industrial.



Figura 2 a-b: Tecnologia representada pela máquina a vapor e fabricas da metade do século XIX²⁰.

A referida figura exhibe o avanço da tecnologia que vinha a reboque da revolução industrial. A máquina movida a vapor e com as alterações dos meios de produção, nas fabricas se tornaram necessidades primarias na Inglaterra. A figura (2a-b) ainda mostra que essa máquina a vapor é admirada por ser uma aplicação efetiva do processo técnico-científico, estabelecido desde a Revolução Científica, do século XVII, ao primar pelo benefício tecnológico. A mudança se deu através de rendimentos e na forma de organização da produção advindas das fabricas, aliada a uma evolução tecnológica sem precedentes na história da humanidade, da maneira como discutiremos no tópico a seguir.

3.2 Breve histórico da máquina a vapor antes de Carnot

As máquinas a vapor começaram a ser largamente usadas com algum sucesso nos séculos XVII e XVIII. Todavia, sua história remonta a Heron de Alexandria, no século I a.C., que inventou uma máquina conhecida como eolípila. Movida a vapor, ela produzia um movimento por duas saídas, da maneira como ilustra a figura 3:

²⁰ Disponível em: http://crv.sistti.com.br/sistema_crv_dotnet/index . Acesso em 20 ago. de 2015.



Figura 3: Máquina de Heron de Alexandria²¹

Segundo Quadros (1996, p. 15), a eolípila era uma espécie de motor bem simples, formado por um objeto esférico e oco de cobre conectado a um pistão que, quando adicionando água em seu interior, era aquecido por uma caldeira. Por conseguinte, reagia em movimentos giratórios, produzindo ar quente que, a partir da água aquecida, expandia-se rapidamente em decorrência da alta pressão. Tal aparelho era uma categoria de máquina térmica, isto é, um dispositivo que transforma calor em trabalho mecânico. Entretanto, não despertou o interesse comercial, não foi usada com o objetivo prático de produzir grande quantidade de energia mecânica, ficando apenas marcado como um ponto inicial para avanços posteriores das máquinas a vapor. Segundo Soares (2014, p. 32), somente nos séculos XVII e XVIII, vieram a ser construídas as primeiras máquinas térmicas capazes de realizar trabalho em escala industrial.

A partir do final do século XVII, vários inventores aplicaram tempo e engenho na construção de máquinas bombeadoras de água. Segundo Santos (2009, p. 48-49), o militar inglês Thomas Savery (1650-1715) foi o primeiro a construir uma máquina a vapor comercialmente viável em 1698, concebida para a retirada da água dos poços de minas de carvão, que começavam a existir por causa de escassez de fontes de carvão na superfície. Apesar de revolucionária²², esta máquina apresentava a desvantagem de funcionar com alta

²¹ A Figura 3 é uma ilustração a título de modelo didático. Disponível em: <http://www.ijunoon.com/dictionary/Aeolipile/>. Acesso em 11 ago. 2015.

²² Devido intensificação do comércio, a sociedade começava a exigir a produção em larga escala de diversos materiais, como tecidos, carvão e aço. Por isso, a máquina a vapor de Savery foi rapidamente aperfeiçoada com o intuito de ser usada de outras formas além de bombear água dos poços.

pressão. Além disso, consumia grande quantidade de carvão, restringindo seu uso a lugares em que houvesse carvão em abundância.

A máquina de Savery foi desenvolvida na tentativa de resolver um problema técnico importante na época. A mineração de carvão, atividade em franca expansão devido à importância desse mineral como fonte de energia, era bastante profunda e constantemente inundada. Era necessária uma forma eficiente de bombeamento da água, eficiência que a máquina de Savery não possuía (QUADROS, 1996, p. 19).

Outro inconveniente da bomba de Savery era o perigo de explosões da caldeira ou do cilindro causadas pela utilização de vapor a alta pressão. Esse problema foi corrigido, posteriormente, na máquina de Thomas Newcomen (1663-1729). No manual publicado sobre o uso da sua máquina térmica (*The Miner's Friend; or, an engine to raise water by fire*), Savery (1827) propõe que além do seu caráter prático, a máquina é muito econômica, servindo:

“(...) para drenar minas ou depósitos de carvão, o uso da minha máquina se recomenda sozinho, pela facilidade e economia com que permite retirar água, e não duvido que, em poucos anos, este sistema fará duplicar senão até mesmo triplicar a atividade de mineração...” (SAVERY, 1827, p. 27. Tradução nossa).

A figura 4 é uma ilustração da máquina de Savery que de certo modo se resumia em uma bomba para tirar água de poços, das minas inglesas de carvão mineral. Por meio da pressão do vapor gerado por uma fornalha, era possível fazer a água do fundo da mina de carvão ser ejetada para a superfície.

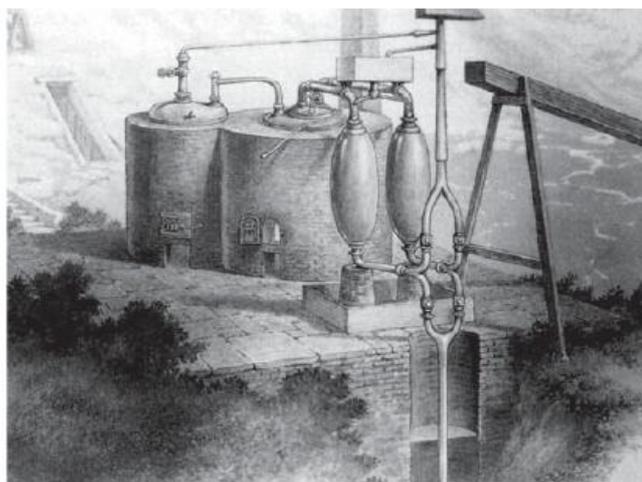


Figura 4: Bomba de água de Savery²³

²³ Disponível em: <http://docplayer.com.br/Caldeiras-manoel-o-a-mendez>. Acesso em: 24 set de 2015.

E que segundo Quadros (1996, p. 19-29) e Soares (2014, p. 32-33), seguiram-se as máquinas a vapor do também inglês Thomas Newcomen, que se destacavam pela diversificação de uso. Faziam mais do que apenas bombear água nas minas, elevavam pesos e a geravam movimento através do vapor de água, da maneira como ilustrada na figura 5:

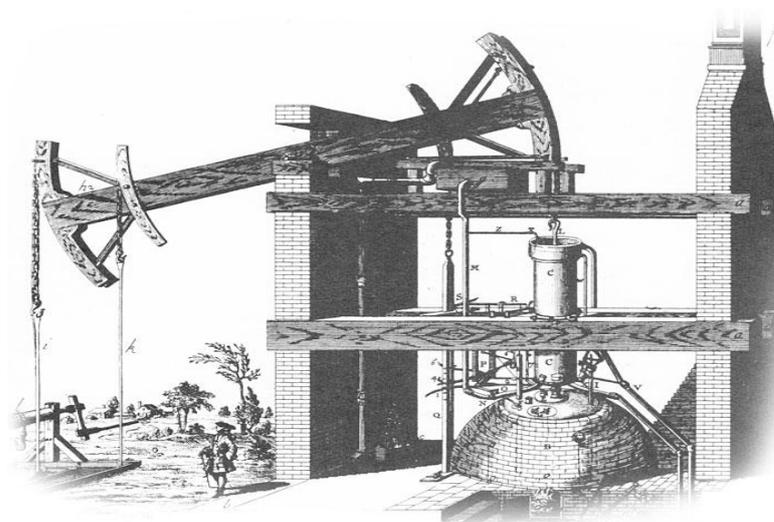


Figura 5: Máquina a vapor trabalhando nas minas de carvão na Inglaterra no século XVIII²⁴.

A figura 5 comprova que a máquina de Newcomen proporcionava realizar várias tarefas, além de tirar água de poços das minas de carvão. Afirma Díaz (2014, p. 13-4), ouvi um melhoramento da máquina Savery por Newcomen, ele introduziu um êmbolo ligado a um braço móvel; quando o vapor entra no cilindro, o êmbolo empurra o braço para cima, fazendo descer o porta-carga. Quando o cilindro é resfriado, a pressão interna diminui e a pressão atmosférica faz o êmbolo descer, elevando o porta-carga. Com o tempo, foram criadas novas máquinas que aproveitavam o movimento mecânico de gangorra do braço móvel para abrir as válvulas A, B e C e acionar novos dispositivos, aumentando o rendimento da máquina. Mesmo com o melhoramento em segurança e rendimento, tais máquinas inventadas no século XVIII ainda eram precárias, por consumirem grandes quantidades de combustível para produzir um trabalho relativamente pequeno (QUADROS, 1996, p. 19-20).

Neste cenário de busca e criação de equipamentos para atender as demandas sociais, posteriormente, James Watt, filho de um carpinteiro que vendia equipamentos para navios,

²⁴ Disponível em: <https://www.asme.engineering-history/newcomen-engine>. Acesso em: 10 de ago. 2015.

tornou-se construtor de ferramentas na Universidade de Glasgow²⁵, nasceu em Greenock, na Escócia. Por volta de 1770, Watt estudou a máquina de Newcomen e apresentou um novo modelo da máquina térmica, a figura 6 apresenta um modelo da máquina desenvolvida por James Watt.

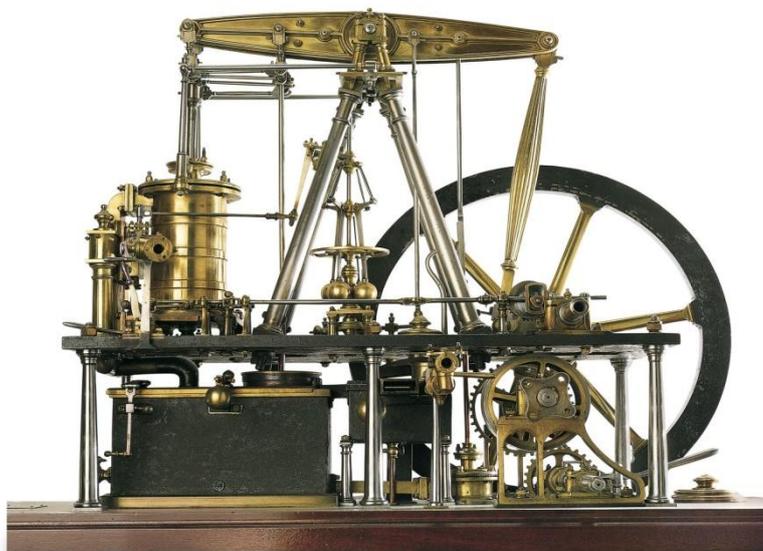


Figura 6: Modelo de máquina a vapor de James Watt²⁶.

A máquina a vapor de James Watt veio substituir, com enormes vantagens, as máquinas até então existentes (SANTOS, 2009, p. 53-4). A máquina apresentada na referida figura 6 tinha várias aplicações tecnológicas, inicialmente empregadas para movimentar moinhos, acionar as bombas que retiravam água de minas subterrâneas, movimentar as locomotivas e barcos a vapor. Além disso, com o tempo, essa máquina passou a ser usada nas indústrias, dando então origem a um grande surto de desenvolvimento na área tecnológica, sendo, por isso, considerado um dos fatores que contribuíram para a revolução industrial no século XVIII.

²⁵ James Watt (1736-1819), matemático escocês e engenheiro. Não era um mecânico simples, suas habilidades lhe permitiram ser classificado como engenheiro da máquina a vapor. A melhoria introduzida no motor atmosférico de Newcomen levou a aprimorar a máquina a vapor, o que seria crítico no desenvolvimento da Revolução Industrial, na Inglaterra e em toda a Europa. Devido principalmente ao seu conhecimento de vapor, ciência aplicada e engenharia, melhorou a economia das máquinas. Seu esforço fora orientado no sentido de aumentar a capacidade das máquinas, com o objetivo de reduzir o custo da operação. A diferença entre estes dois: capacidade é um problema mecânico, enquanto que a economia é um problema do calor.

²⁶ Este dispositivo da figura 6 foi um dos primeiros modelos que permitiram a transformação, em escala industrial, de calor em trabalho mecânico.

Disponível em: <http://www.dkfindout.com/uk/science/amazing-inventions/steam-engine/>. Acesso em: 19 nov. 2015.

Watt sugeria várias mudanças na máquina de Newcomen, seu maior interesse na técnica de funcionamento de uma bomba d'água aumentou quando tentava consertar uma pequena miniatura, utilizada em aulas de física na universidade. Watt não conseguia entender por que aquela pequena máquina, construída na proporção exata do modelo original, funcionava apenas por alguns ciclos e morria. Por que ela não tinha o mesmo desempenho da grande, sucesso absoluto nas minas de carvão? Ele sabia que o metal frio era capaz de condensar o vapor. Também podia verificar como o cilindro de sua pequena máquina ficava quente com a operação, e este aquecimento era certamente um desperdício (QUADROS, 1996, p. 24-6).

Realizando um estudo minucioso nessas máquinas, Watt nota que seria necessário construir um cilindro grande na mesma proporção, já um cilindro grande e um pequeno não guardam a mesma relação de volume e superfície. Como o cilindro pequeno tem proporcionalmente mais superfície, o calor perdido no aquecimento do metal é também proporcionalmente maior. O que ocorria com a pequena máquina réplica, logo, o desperdício de calor em cada ciclo era proibitivo, levando a máquina a parar. Segundo Rocha et al. (2002, p. 152), Watt teve a ideia de separar o condensador do corpo do cilindro principal, também desenvolveu outras melhorias, como válvulas automatizadas e um sistema de engrenagens que permitia aproveitar o movimento de subida e descida do pistão para girar uma roda. Isso permitiu uma grande economia de calor e, portanto, de carvão, abrindo caminho para as máquinas a vapor móveis, como as utilizadas em locomotivas e navios.

Notadamente até o momento, todo o desenvolvimento das máquinas térmicas foi principalmente prático, sem um tratamento teórico. Segundo Santos (2009), só depois de algumas décadas o funcionamento dessas máquinas recebeu um tratamento científico adequado. Em meados do século XVIII²⁷ e o início do século XIX foi um tempo marcante da história para sociedade. Esse foi um período do uso do ferro e do vapor. No momento em que o uso mais importante da nova força motriz nas máquinas para drenar minas de carvão. Esta fonte de energia era desesperadamente necessária para a Inglaterra e França (BEN-DOV, 1996, p. 50).

Uma necessidade básica do ferro/aço era para a fabricação de máquinas e todo tipo de peças e o vapor era usado para gerar movimento nas máquinas de toda espécie, onde a recente invenção de vários tipos se tornara possível. Segundo Rosa (2012, p. 151), ao explorar estas aplicações à Inglaterra, contando com a genialidade de homens como Thomas Savery, Thomas Newcomen, James Watt e outros engenheiros ingleses tornaram seu país famoso e

²⁷ Vale apenas notar que o desenvolvimento das máquinas a vapor ocorreu em época e local bem definido, no final do século XVII e início do século XVIII na Inglaterra. Os nomes marcantes foram Savery, Newcomen e Watt, mas a história aponta outros também, que de alguma forma contribuíram na construção de máquinas.

prospero em toda Europa. Neste calor de desenvolvimento intelectual, tecnológico e guerras, durante o século XIII e meados do século XIX (PASSOS, 2002; ROSA, 2012; SOARES, 2014), com intensa necessidade de um estudo com maior aprofundamento técnico-científico, para melhorar o rendimento da máquina térmica. Aparece neste cenário Sadi Carnot como apresentaremos no tópico seguinte.

3.3 Sadi Carnot: o ambiente intelectual e seus contemporâneos

Sadi Carnot viveu em um período de intensas transformações sociais, econômica e políticas no início do século XIX, se por um lado na Inglaterra, essas transformações eram claramente percebidas com o desenvolvimento e uso da máquina a vapor, esse instrumento levou a Inglaterra a ser uma potência no campo da tecnologia no período da revolução industrial. Carnot apesar de ter nacionalidade francesa, compreendia a grande importância econômica que a máquina a vapor representava para a sociedade inglesa. É neste cenário de intenso poder político e tecnológico que Sadi Carnot sente o desejo de dar uma explicação teórica e científica para a máquina a vapor.

Já por outro lado a França, se preocupando com seu poderio militar e político, mesmo em meio a crises econômicas, houve na França uma grande consciência da importância do uso da Ciência. Contudo, foi feita uma tentativa de dar a engenheiros e técnicos uma formação especializada na Escola Politécnica. Segundo Hobsbawm (2007), esta era uma das mais importantes instituições estabelecidas no curso desse movimento, esta Escola foi fundada em 1794, para treinamento do exército e engenheiros. A Ciência se beneficiou com o surpreendente estímulo dado à educação científica e técnica na França, e com o menos inesperado apoio dado à investigação durante esse período. Aqui, a influência da educação francesa fica evidente. Rosa (2012) afirma que,

No início do século, a França continuava como o principal centro de estudos matemáticos, graças, em boa parte, às pesquisas na Escola Politécnica em Paris. Celeiro dos grandes matemáticos do final do século XVIII (Monge, Carnot, Lagrange, Laplace e Legendre), cujas contribuições se estenderam até os primeiros decênios do século XIX, a França permaneceria, por todo o período, como importante centro de referência, dada a plêiade de seus extraordinários matemáticos e físicos (ROSA, 2012, p. 45).

É compreendida na citação acima que a Escola Politécnica ficou conhecida também como um instituto preparatório que visava promover e melhorar a educação na França e

fortalecer a Ciência como instrumento de conhecimento e de pesquisa. Rosa (2012, p. 35-38) trata desses dois fatos importantes acrescentando que, na Escola Politécnica, passaram muitas mentes que deixaram alguma contribuição para a ciência. Há listas de homens que tiveram nesta escola e associados ao seu período, antes de 1830. Entre os primeiros instrutores, Lagrange, Fourier, Laplace, Berthollet, Ampère, Malus e Dulong; entre os ex-alunos que ficaram como instrutores, Cauchy, Arago, Desormes, Clément, Coriolis, Poisson, Gay-Lussac, Petit e Lamé; além de outros alunos, Fresnel, Biot, Carnot e Clapeyron. Foi essa geração que, em grande parte, formulou as atitudes e os procedimentos de física, engenharia e da matemática (ROSA, 2012, p. 47).

Um dos homens de destaque destas gerações, um personagem importante dessa história, foi Lazare Carnot Marguerite, quase nada sabemos sobre ele. Dias (1990, p. 62) comenta que ele era vitorioso dado à Ciência, homem de respeito, bem educado e treinado no exército. Napoleão o nomeou para seu primeiro comando independente, ele era membro ativo do diretório, que governou a França de 1795 a 1797, é conhecido como o Grande Carnot, por seu papel central na reorganização do Exército francês da Revolução; ele era um ministro da guerra.

Em 1796, quando Lazare Carnot Marguerite ainda era um dos membros do diretório da França, nasceu um filho²⁸, A ele foi dado o nome de Léonard Sadi Carnot, pouco se sabe sobre sua infância, até os 16 anos de idade, a educação de Carnot foi dirigida por seu pai, mas, após esse tempo, passaram a se ver apenas nas ocasiões mais breves; porém a fonte de inspiração para seus estudos fora provavelmente seu pai (NÓBREGA, 2009, p. 27-28).

Sadi entrou na Escola Politécnica em 1812, passou dois anos estudando. Em 1814, a própria Paris estava cercada pelos exércitos inimigos. Os alunos da Escola Politécnica pediram para ser autorizados a participarem na defesa da cidade; muitos deles foram enviados para um conflito contra os prussianos em Vincennes.

Algumas semanas mais tarde, Napoleão abdicou do trono e um rei violentamente antirrepublicano foi colocado em seu lugar. No final do ano de 1814, Sadi deixou a Escola Politécnica para se juntar aos engenheiros, com o intuito de ajudar na revolução. Durante grande parte de sua vida, continuou a ser um oficial do Exército, portador de um nome de família ilustre e ameaçador, de acordo com as acusações desconcertantes da cena política francesa por causa de seu pai.

²⁸Disponível em: <http://www.miniweb.com.br/ciencias/artigos/carnot/carnot.htm>. Acesso em: 01 nov. 2015. Este artigo, elaborado por Vinicius Kapudjian Carabett, mostra uma visão geral da vida e obra desse jovem homem da ciência. Explica, de forma minuciosa, a originalidade do seu ciclo de Carnot e a contribuição de outros cientistas. Este é um estudo teórico com aplicações na tecnologia.

Neste ínterim, Sadi foi resignado a deixar seu quarto de tenente-júnior e foi visitado por oficiais de alta patente; ansioso para bajulá-lo, Carnot viu-se no dever de guarnição, longe de Paris, fazendo os menores trabalhos de rotina. Depois, ele foi transferido para o Estado-Maior, mas quase imediatamente se aposentou, com metade do vencimento, mudou-se para Paris. Isso em 1820, ele tinha 24 anos de idade, na ocasião da foto na figura 7.



Figura 7: Sadi Carnot com 24 ano de idade (1796-1832)²⁹.

O período que se seguiu foi tempo criativo na vida Carnot. Estudou também na Sorbonne, Escola Superior da França, concentrando-se em engenharia, física e economia. Passou grande parte de seu tempo visitando fábricas e a estudar e organizar a economia de várias indústrias; tornou-se um conhecedor delas e de comércios de diferentes países da Europa. Por volta de 1823, Lazare Carnot, seu pai, morreu no exílio e Hippolyte, seu irmão mais novo, voltou a Paris. Os dois irmãos fixaram residência em um apartamento pequeno, onde Sadi começou a escrever seu manuscrito, com o tema em francês: (*Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propres a Développer Cette Puissance*). Traduzindo diz: *Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas equipadas ao desenvolvimento dessa potência*.

Este manuscrito de Carnot tinha 118 páginas que constitui uma importante obra-prima para a História da Física. O seu interesse pelo estudo das máquinas de fogo deve ter sido despertado pelo seu pai, assim como pelo cenário de guerra e força político-econômica em que viveu. Um dia sentiu posição dominante da Inglaterra e que podia ser mudada, desde

²⁹Disponível em: <http://www.geocities.ws/saladefisica9/biografias/carnot.html>. Acesso em: 04 nov. de 2015.

que descobrisse a maneira para que a máquina a vapor fosse a mais eficiente, minimizando perdas e aumentando o rendimento.

Carnot fez seu irmão Hippolyte ler partes do seu manuscrito, para se certificar de que seria inteligível para os cientistas (NASCIMENTO, 2004, p. 513-514; NÓBREGA, 2009, p. 27). O texto desse estudioso não contém argumentos que dependem de um tratamento matemático, cálculos redigidos, mas especialmente uma linguagem cientificamente correta e exata. O assunto principal é a concepção de motores, com ênfase na sua importância para a nação francesa. Alta e baixa pressão em motores a vapor, motores de ar são examinados criticamente pelo próprio estudioso em sua obra.

Cimblérís (1991, p. 40) comenta que a obra de Carnot, na época do escrito teve baixa repercussão e quase nenhuma influência³⁰. É bem verdade que Carnot não conseguiu, inicialmente, convencer a Academia de Ciências da França, visto que sua forma de escrita e de estilo era uma ideia nova para o modelo matemático existente da época. O seu manuscrito revela que Carnot foi um homem preocupado com a ciência, suas ideias estavam além de seu tempo. Passaram-se alguns anos até a redescoberta das reflexões para um debate acalorado, uma vez que seu trabalho estava no campo do esquecimento dos mais ilustres homens da ciência parisiense.

Carnot aparece na história com a revolução industrial, sabendo da necessidade de um avanço das maquinarias e da Inglaterra, até então, inimiga da França tanto na política, como na economia. Era um momento de ideias completamente inovadoras, uma quebra nos paradigmas existentes na ciência. A originalidade do seu pensamento tem desafiado tanto os homens da ciência em Paris, como os historiadores da ciência em todas as épocas, que procuraram por precedentes para suas ideias. Possivelmente, a recusa da Academia de Ciência pelo seu trabalho deveria ser, também, porque quase sempre o seu discurso era para engenheiros e técnicos e sua pouca idade³¹.

Segundo Pires (2011, p. 239), Carnot pensou como um bom patriota, na medida em que poderia contribuir com o seu conhecimento. As primeiras páginas do seu manuscrito Carnot fala do uso da energia e do inevitável calor, capaz de ser uma fonte geradora de movimento, ou seja, de força motriz do fogo. O fogo, em sentido amplo, é central na obra de

³⁰ Segundo Dias (2007, p. 493), *Reflexões* foi lido por um amigo de Sadi, na sessão de 14 de Junho de 1824 na Academia de Ciência de Paris, na presença dos renomados cientistas franceses contemporâneos: Arago, Fourier, Laplace, Ampère, Gay-Lussac, Poisson, Fresnel, Legendre, Poisson, Cauchy, Dulong, Navier e Riche de Prony.

³¹ O estilo e método usado por Carnot, em seu manuscrito fizeram com que este não fosse aceito pela academia francesa. Embora brilhante Carnot era apenas um jovem e um aluno em comparação a Fourier, Poisson, Laplace, Legendre e outros pertencentes à academia.

Carnot. Desse modo, o poder mecânico das armas de fogo não deixou de influenciar Carnot, que se propõe a obter os princípios gerais de uma máquina a fogo, válidos para qualquer máquina a vapor, sua obra representa um elo na cadeia histórica do progresso da ciência e da tecnologia.

Esse estudioso foi um dos primeiros a perceber a importância da tecnologia moderna, dado que seu manuscrito, publicado como um pequeno livro em 1824, não foi vendável. Tomou o exemplo da Inglaterra, afirmando que o poderio militar desse país se fundava em dois fatores: o aço, extremamente necessário à construção dos navios e dos canhões e o carvão, um mineral para o funcionamento dos altos fornos. Como o carvão se encontrava no fundo das minas inundadas, sua extração exigia o bombeamento da água, como a ajuda de uma máquina a vapor. Esta era um elemento indispensável da supremacia militar inglesa (CARNOT, 1824).

No mesmo ano de 1824, a cena política se agravou, com a adesão de um rei que fez melhor para restaurar a monarquia absoluta. Por um tempo, Sadi foi pré-convocado para o serviço em tempo integral, como um capitão de equipe, mas, em 1828, renunciou de forma permanente, dedicando-se à física e a economia. No início de junho de 1832, estava em Paris, quando contraiu a escarlatina, que se transformou em uma febre cerebral. Hippolyte e outros amigos foram para cuidar dele; recuperou-se e foi levado para a Paris. Carnot nesse interim contraiu cólera que logo adoeceu e morreu em pouco tempo, com apenas 36 anos³² (NÓBREGA, 2009, p. 27). O legado deixado por Carnot é *Reflexões*, um manuscrito importantíssimo para o estudo da termodinâmica. Nesta obra esse estudioso faz revisão da importância industrial, política e econômica da máquina a vapor. A continuidade do trabalho de Carnot será dedicada a desenvolver uma base teórica para o funcionamento desse dispositivo, veremos maiores detalhes no tópico seguinte.

3.4 Sadi Carnot e a Máquina a vapor

A máquina a vapor foi um dos instrumentos do desenvolvimento da Revolução Industrial e o motivo principal dos estudos de Sadi Carnot, que pela sua relevância para o

³²Alguns dados importantes da vida e obra de Carnot pode ser encontrar neste artigo que está disponível em: [http://www.lete.poli.usp.br/PME2340 files/carnotSegundaLei.PDF](http://www.lete.poli.usp.br/PME2340_files/carnotSegundaLei.PDF). Acesso em: 15 out. 2015.

processo de Revolução Industrial, mereceram registro do historiador Eric Hobsbawm³³, como segue:

Como podemos explicar este desenvolvimento científico? Como, particularmente, relacioná-lo com as outras mudanças históricas da revolução dupla? É evidente que há correlações óbvias. Os problemas teóricos da máquina a vapor levaram o brilhante Sadi Carnot, em 1824, a mais fundamental percepção física do século XIX, as duas leis da termodinâmica (*Réflexions sur la puissance motrice du feu*), embora não fossem as únicas aproximações do problema. O grande avanço da geologia e da paleontologia devia-se em grande parte ao zelo com que os engenheiros e construtores industriais retalhavam a terra e a grande importância da mineração. [...], é prova suficiente de que o progresso científico de nosso período não pode ser separado dos estímulos da revolução industrial (HOBSBAWM, 2007, p.401-402).

Logo nas primeiras páginas de seu manuscrito, Carnot inicia fazendo uma breve apresentação concernente aos avanços das máquinas, daquelas bem rudimentares até as máquinas de fogo de sua época. Diante da História é possível verificar hoje que Carnot era um homem de visão no futuro, quando dizia que seriam necessários novos conhecimentos para o melhoramento teórico dessas máquinas, cujo movimento dependia inteiramente do calor, diferentemente de outras máquinas manuais (CARNOT, 1824, p. 3)³⁴.

As páginas introdutórias da obra apresenta o calor como a força causadora dos grandes movimentos naturais que se produz na terra. Nesta época, o calor é concebido como uma substância, ou seja, o fluido calórico³⁵, fonte geradora de intensos movimentos. A teoria do calor³⁶ tem um papel importante no trabalho de Carnot. Ademais, sustenta a hipótese de que é impossível produzir trabalho sem diferença de temperaturas.

No seu manuscrito, Carnot não se limitou a dar uma explicação teórica e científica sobre esta máquina a vapor, já famosa na Europa. De fato, estava preocupado em abranger

³³ Eric Hobsbawm em seu livro *A era das Revoluções* (2007, p. 401-402) usa o termo revolução dupla para explicar a revolução francesa e a revolução inglesa.

³⁴ Todas as citações referentes ao manuscrito de Carnot 1824 neste trabalho é tradução nossa.

³⁵ Para tentar manter a fidelidade do texto e da linguagem da época, vamos conservar a palavra “calórico”, como empregado pelo próprio Carnot em sua obra. Ressaltamos que, inicialmente, Sadi Carnot defendia a teoria do calórico, só vindo a abandonar no fim de sua vida. Essa teoria foi proposta no século XVIII, Antoine Laurent de Lavoisier, ao defender o calor como uma substância que fluiria dos corpos quentes para os corpos frios. As variações de calórico estariam relacionadas às de temperatura nos corpos; quanto maior a quantidade de calórico de um corpo, maior a sua temperatura - MORRIS, Robert J. Lavoisier and the Caloric Theory. *The British journal for the History of Science*. V.6, n. 21 (1972, p.32). Segundo Pádua (2008, p. 64), o calórico teve que ser dividido em quantidade de calor, energia e entropia. Tinha de ser mostrado que: o calor e o trabalho eram formas de transferência de energia, a interconvertibilidades entre eles é assimétrica; a energia conservada no calorímetro deve ser também, no Ciclo de Carnot e nos processos de atrito, e a entropia é conservada apenas no limite dos processos reversíveis.

³⁶ Nestes artigos, podemos encontrar bons comentários sobre a natureza do calor em diferentes contextos históricos: I) <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article>; II) <http://wbraga.usuarios.rdc.puc-rio.br/transcal/pdf/Termo/Calorica.PDF>; iii) <http://www.laboratoriodefisica.com.br/gref/termo/> Acesso em: 27 out. 2015.

questões econômicas, políticas e sociais em seus argumentos, abordando os aspectos utilitários dessa máquina, com as transformações advindas da Revolução Industrial.

O estudo destes motores é do maior interesse, a sua importância é enorme, sua utilização está aumentando continuamente, e eles parecem destinados para produzir uma grande revolução no mundo civilizado. A máquina a vapor funciona nas nossas minas, arrasta os nossos navios em nossos portos, escava rios, forjas de ferro, formas de madeira, mói grãos, gira e tece nossos panos, transporta os fardos mais pesados, etc. Parece que ele deve algum dia a servir como um motor universal, substituir a força animal, cachoeiras, e correntes de ar. Durante o primeiro destes motores tem a vantagem da economia, ao longo dos dois outros e a inestimável vantagem de que ele pode ser usado em todos os momentos e lugares sem interrupção (CARNOT, 1824, p. 3).

A máquina a vapor estava em uso no segmento social, era o carro forte da revolução industrial, com ela poderia até mesmo romper distâncias. Carnot, por exemplo, acreditava que, algum dia, a máquina a vapor seria tão aperfeiçoado que poderia ser criada e fornecida com combustível por baixo custo, proporcionando um melhoramento nas indústrias. Essa máquina não é apenas um motor poderoso e conveniente que pode ser adquirido e transportado em qualquer lugar, mas que provoca uma rápida expansão onde é usado. A máquina a vapor era tão necessária para o desenvolvimento da civilização europeia como é hoje a internet e o computador para a sociedade atual.

Para tirar hoje da Inglaterra os motores a vapor seriam tirar, ao mesmo tempo seu carvão e ferro. Seriam a secar todas as suas fontes de riqueza, para arruinar tudo em que ela prosperidade depende, em suma, “para aniquilar esse poder colossal”. A destruição de sua marinha, que ela considera sua defesa mais forte, seria talvez menos fatal (CARNOT, 1824, p. 4).

Complementado este fato, Pádua et al. (2008) vê como sendo uma necessidade extremamente útil essas máquinas a vapor, devido às condições que passavam a poderosa Inglaterra:

As minas de carvão na época eram superficiais, mas com o esgotamento dessas jazidas, começaram a abrir buracos e galerias cada vez mais profundas. Devido aos lençóis subterrâneos, essas minas frequentemente ficavam inundadas de água e era necessário bombear essa água para fora para extrair o carvão. A máquina a vapor foi inventada inicialmente para este fim específico, qual seja bombear a água para esvaziar as minas de carvão. Posteriormente, como já assinalamos, ela foi modificada e aperfeiçoada para gerar trabalho mecânico e girar rodas das máquinas nas indústrias e dos meios de transporte. Até o final do século XVIII, todo desenvolvimento da máquina a vapor foi basicamente tecnológico e prático, faltando-lhe uma

abordagem teórica fundamental. No início do século XIX, entra em cena a figura de Sadi Carnot, cujo objetivo inicial de seus trabalhos era investigar teoricamente as possibilidades de se obter um melhor rendimento de uma máquina térmica e encontrar um limite para tal (PÁDUA et al., 2008, p.61).

Os avanços da máquina a vapor foram intensos que não demoram muito para uma navegação mais rápida e segura. Tal máquina tem permitido o estabelecimento de comunicações rápidas e regulares entre os braços do mar³⁷. Ela tornou possível atravessar regiões, bem como transportar os frutos da civilização em diversas porções do globo. A viagem por mar através dela aproxima as nações mais distantes, diminui o tempo, as fadigas, as incertezas e os perigos do percurso.

A descoberta dessa máquina térmica deveu seu surgimento a tentativas rudimentares, que têm sido atribuídas a pessoas diferentes em várias partes do mundo, enquanto sua verdadeira autoria ainda é uma incógnita. Apesar de as primeiras tentativas consistirem em engenhocas de animação, as melhorias sucessivas trouxeram os motores a vapor para as atuais condições de uso. Segundo Ben-Dov (1996, p. 49-50), pontua que, nos séculos XVII e XVIII, pouco se sabia sobre os aspectos teóricos científicos que envolvem o funcionamento dessas máquinas. O próprio Carnot reconhece que as máquinas inaugurais dos primeiros inventores e artesões contribuíram, em algum grau, para o desenvolvimento social, econômico e político de uma civilização. Dito isto, podemos afirmar o que Carnot complementa:

Se a honra de uma descoberta pertence à nação no qual adquiriu o seu crescimento e todos os seus empreendimentos, esta honra não pode aqui ser esquecida como se recusou a Inglaterra. Savery, Newcomen, Smeaton, o famoso Watt, Woolf, Trevithick, e alguns outros engenheiros ingleses, são os verdadeiros criadores da máquina a vapor. Adquiriu em suas mãos todos os seus graus de melhorias sucessivas. Finalmente, é natural que uma invenção deve ter o seu nascimento e, especialmente, ser desenvolvido, ser aperfeiçoado, no lugar onde a sua falta é mais fortemente sentida (CARNOT, 1824, p. 5).

Inicialmente, Carnot homenageia Savery, Newcomen, Smeaton, Watt, entre outros, como os precursores das máquinas a vapor, reconhecendo os seus relutantes esforços e interesses em suas invenções para o desenvolvimento social e econômico. Apesar da satisfatória contribuição do trabalho desses homens, Carnot revolucionaria com seus estudos

³⁷Para o ano de 1824, a Revolução Industrial tinha atingido o seu máximo, Carnot estava vivenciando na prática esse período de intensa transformação e desenvolvimento, especialmente na Inglaterra e França. O vapor era usado em grandes fábricas, vindo especialmente do uso direto do carvão, esse vapor era o agente comumente usado nas máquinas como fonte de energia gerando movimento, a utilização do carvão a bordo de navios que cruzam os oceanos reduziu a distância entre os continentes, a exemplo também das locomotivas que percorriam os principais pontos entre os países europeus.

teóricos. Em *Reflexões*, Carnot (1842, p. 7) deixa transparecer que tinha um conhecimento sólido de mecânica, ao notar os limites da ciência da época no aprofundamento teórico da máquina de fogo. De forma minuciosa, Carnot estuda essa linha de pesquisa, contemplando desde o funcionamento básico às partes mais abstratas da máquina a vapor. Assim, não poupa esforços a da uma explicação abalizada.

3.5 Carnot e sua contribuição para a Segunda Lei da Termodinâmica

De acordo com as teorias de Carnot, há analogia da operação da máquina a vapor com a de uma roda d'água, conhecida também como moinho de água. Neste particular, a figura 8 ilustra um(a) antigo(a) moinho/ roda d'água dos século XVII e XVIII.



Figura 8: Moinho d'água³⁸.

Segundo Pádua et al (2008, p. 69) e Díaz (2014, p. 26), analisando este evento na perspectiva de Carnot, a água em queda transforma sua potência motriz em trabalho nas pás do moinho. Por conseguinte, é transportada de uma fonte mais elevada para uma menos elevada, uma vez que o fluxo hídrico flui de forma natural. Logo, tal evento realiza trabalho e transforma energia potencial em energia cinética, devido à queda d'água no moinho. Carnot argumenta que este fato não poderia ser diferente com as máquinas a vapor, já que o fluxo de calor deve fluir de uma fonte mais para outra menos elevada. Diante da analogia mecânica norteadora de pesquisa, Carnot deixou imprecisa a natureza do calor, ao ter sugerido uma interpretação para o funcionamento da máquina com base na teoria do fluido calórico, que até então estava em uso por boa parte dos cientistas. Provavelmente, o pesquisador tenha sido influenciado pela teoria do francês Lavoisier.

De acordo com Carnot, uma teoria mecânica já conhecida poderia estudar, detalhadamente, as máquinas que não recebem o movimento do calor, como, por exemplo, as que têm um motor para a força das mãos de animais e também humanas, ou até mesmo da natureza, como uma cachoeira e uma corrente de ar. Todos os casos estão previstos, ou seja,

³⁸ Disponível em: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html>. Acesso em 04 nov. de 2015.

são referidos a estes princípios gerais, os da mecânica, firmemente estabelecidos e aplicados em todas as circunstâncias. Este é o caráter de uma teoria completa, tenta dar uma explicação ao fenômeno. Uma teoria similar é evidentemente necessária para aquecer os motores. Carnot (1824, p. 7) garante: “vamos tê-la apenas quando as leis da Física forem conhecidas a fundo e generalizadas, para sabermos todos os efeitos da atuação do calor, não determinada ainda por ninguém”. Além disso, afirma que era preciso, ao menos, um conhecimento superficial das distintas partes que compõem uma máquina a vapor a mais trivial possível; bem como considera que não é necessário explicar o que sejam fornos, caldeira, vapor, cilindros, pistões, condensador etc. Por sua vez, são partes necessárias para a formação de uma máquina a vapor.

De fato, a teoria de Carnot para aprimorar o rendimento da máquina a vapor era feita por tentativas, a partir de suas observações e anotações. No modelo teórico criado, a gênese da segunda lei da termodinâmica, esse investigador lança as bases científicas do funcionamento básico da máquina térmica, com maior rendimento e melhor eficiência. Para começar seus estudos, ele declara a restauração do equilíbrio do calórico, logo, com pressão e temperatura uniformes em todo o seu volume, atuando entre uma fonte com temperatura mais elevada e outra menos elevada:

A produção de movimento em motores a vapor é sempre acompanhada por uma circunstância em que devemos fixar a nossa atenção. (Esta circunstância é o restabelecimento do equilíbrio do 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). O que acontece de fato em uma máquina a vapor realmente em movimento? O calórico desenvolvido no forno pelo efeito da combustão atravessa as paredes da caldeira, a produção de vapor, e, de alguma forma, se incorpora com ele. Este último transportando-o para longe, leva-o primeiro para dentro do cilindro, onde se realiza alguma função, e dali para dentro do condensador, onde é liquefeito por contato com a água fria que se encontra aí. Em seguida, como resultado final, a água fria do condensador toma posse do calórico desenvolvido pela combustão (CARNOT, 1824. p. 7, **destaque nosso**).

Com base neste trecho, sabemos que Carnot realiza um diagnóstico geral e profundo do funcionamento da máquina a vapor. Considera o fato analisado por uma conjectura, afirmando o princípio de que o calor flui de um corpo a uma temperatura maior para um corpo a uma menor (e não vice-versa). Segundo Erlichson (1999, p. 185-186), nestes termos, o reestabelecimento do equilíbrio calórico só seria possível se não tivesse o atrito, por este ser um dos responsáveis pela ineficiência das máquinas térmicas. Outrossim, parte do calor fornecido nas máquinas somente pode ser convertido em trabalho. Para uma máquina

mecânica ter melhor rendimento, é preciso que sua construção e seu regime de funcionamento sejam tais que choques, atritos e mudanças bruscas de velocidade sejam evitadas ao máximo. Portanto, o princípio observado seria uma antecipação direta da Segunda Lei da Termodinâmica.

Contudo, ressaltamos que Carnot (1824) se refere ao problema do restabelecimento do calórico como promissor e necessário para o movimento e funcionamento básico da máquina, pontuando o transporte do calor. Na fundamentação do que ficou conhecido como *o princípio de Carnot*, este pesquisador postulou:

Aquece-se pela intervenção do vapor, como se tivesse sido colocado diretamente por cima da fornalha. 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. Menos parcialmente, por um lado o ar aquecido, depois de ter realizado a sua função, tendo passado rodada da caldeira, sai pela chaminé com uma temperatura muito inferior à que tinha adquirido como o efeito da combustão; e na máquina por outro lado, a água do condensador, depois de ter liquefeito o vapor, deixa a máquina com uma temperatura mais elevada do que com o qual ele entrou (CARNOT, 1824, p. 8. Grifo nosso).

Analisando este postulado em Carnot, Dias (2001) esclarece:

Carnot raciocina como se calor fosse um fluido muito fino, capaz de penetrar os menores poros da matéria; esse fluido era chamado de calórico. O funcionamento da máquina consiste, pois na transferência de calórico de uma fonte para outra. Findo o ciclo completo, a máquina recupera suas condições iniciais. Como posto por Carnot, este é um princípio de recuperabilidade das condições iniciais da máquina; para isso, a substância de trabalho tem de voltar às suas condições originais, livrando-se do calórico recebido. Neste processo, o calórico é conservado, pois não é utilizado, gasto, “consumido”, é só um “meio de transporte” (DIAS, 2001, p. 229).

Fica demonstrado que a produção de potência motriz, ou seja, de trabalho nos motores a vapor, não é a um consumo real do calórico, mas o seu transporte a partir de um corpo quente a um corpo frio. Isto é, a seu restabelecimento de equilíbrio, o qual é considerado como destruído por qualquer motivo, seja por uma ação química, tais como a combustão, ou por qualquer outro. Logo, este princípio é aplicável a qualquer máquina colocada em movimento pelo calor.

De acordo com este princípio, a produção sozinha de calor não é suficiente para gerar um poder impulsionador da máquina; é necessária a existência das fontes. Sem elas, o calor seria inútil. Nesse sentido, Carnot aclara que, na diferença de temperatura entre duas fontes e no reestabelecimento do equilíbrio do calórico, é possível ter também a produção de energia impulsionando uma máquina de ótimo rendimento. Para todo caso, o vapor é um meio de concretizar este poder, mas é não o único. Todas as substâncias na natureza passam a ser entregues para este fim; são de suscetível alteração de volume, de contrações sucessivas e dilatações, através da alternância de calor e frio. Na visão experimentalista desencadeada, o pesquisador cita, detalhadamente, exemplos para fortalecer a validade de seu princípio:

Um corpo sólido metálico, alternadamente aquecido, pode aumentar e se esfriar, diminuir em comprimento, e pode mover qualquer objeto preso por suas extremidades. Por outro lado, o líquido alternadamente aquecido e esfriado aumenta e diminui em volume e pode superar os obstáculos de maior ou menor tamanho, oposição à sua dilatação. Uma formação de ar, um fluido suscetível de mudança considerável de volume e variações de temperatura. Se ele é colocado em um espaço expansível tal como um cilindro provido de um êmbolo, que irá produzir movimentos de grande amplitude. Os vapores de todas as substâncias capazes de passagem numa condição gasosa, a partir de álcool, de mercúrio, de enxofre, etc., podem cumprir a mesma função como vapor de água. Este último, alternadamente aquecida, produziria força motriz na forma de gases permanentes, isto é, sem nunca voltar para um estado líquido. A maior parte destas substâncias tem sido proposta, muitos ainda foram tentados, embora até este momento talvez sem notável sucesso (CARNOT, 1824, p. 9. Grifo nosso).

Em *Reflexões*, Carnot descreve que, nos motores a vapor, a potência motriz é devido a um reequilíbrio de estabilidade no calórico. Complementa que calor pode ser uma causa do movimento apenas por virtude das mudanças de volume. Estas alterações não são causadas por temperaturas constantes, mas sim por alternâncias de temperatura. Qualquer substância que exija um corpo mais quente, do que aquele a que ele é aquecido, exige um corpo mais frio. Assim, fornecemos calórico para o primeiro destes órgãos, que podem transmiti-lo para o segundo, por meio da intermediária substância (cf. BEN-DOV, 1996, p. 50-51).

3.6 Sadi Carnot e a objetividade do seu trabalho

Carnot era um cientista completo para seu tempo e exemplo para o nosso. Seu manuscrito é uma obra marcante para a termodinâmica, desde a importante pergunta de

pesquisa: *é a força motriz do calor invariável em quantidade, o que faz variar com o agente empregado para realizá-lo como uma intermediária substância?*

Esta pergunta argumentativa, acerca da substância de trabalho usado na máquina térmica, surge de um ponto de vista que o próprio Carnot responde no decorrer do seu manuscrito. Por outro lado, a questão também corresponde a uma visão empírica, evidente para o referido pesquisador, em relação a uma determinada quantidade de calórico e na diferença das temperaturas a serem especificadas. Diante disso, a observação é proposta como um meio de análise experimental e teórica, como um suporte de fundamentação de ideias.

O objetivo principal do trabalho de Carnot (1824) não era construir uma determinada máquina, ela já existia e era sucesso na Europa, mas descrever uma base teórica. De fato, ele tinha em mente uma teoria científica para as máquinas a vapor que permitisse responder a seus anseios; queria saber se, nestas máquinas, existiria um limite na natureza para o rendimento do motor a vapor, como assim a chamava.

Neste ponto, a tecnologia se antecipou à ciência:

A questão foi levantada muitas vezes se a potência motriz do calórico é ilimitada, se as possíveis melhorias no motor a vapor têm um limite de cessão, um limite que a natureza das coisas não permitirá a serem passados por qualquer meio que seja, ou se, pelo contrário, estes melhoramentos podem ser realizados em indefinidamente (CARNOT, 1824, p. 5).

É utilizada aqui a *potência motriz* para expressar o efeito (trabalho útil) que um motor é capaz de produzir. Ainda estão buscando verificar se existe, em um agente, a existência preferível ao vapor de água para desenvolver a potência motriz do calor. Por exemplo, se o ar atmosférico não apresentar grandes vantagens a este respeito, propõe-se estas questões a um exame minucioso.

A potência motor do calor é limitada ou ilimitada? Devemos nos perguntar se esta quantidade de potência motriz é necessariamente limitada? E se ela varia com a substância utilizada para realizá-lo, se o vapor de água oferece mais ou menos do que a vantagem de vapor de álcool, de mercúrio, ou um gás permanente, ou qualquer outra substância? (CARNOT, 1824, p. 9).

A primeira pergunta questiona se as máquinas a vapor teria um limite imposto na natureza, a não ser ultrapassado por qualquer meio; ou se, pelo contrário, esses melhoramentos poderiam ser feitas indefinidamente. Carnot (op. cit.) queria saber qual a máxima quantidade de trabalho mecânico que poderia ser obtida a partir de uma dada quantidade de calor. Por outro lado, passa a acrescentar, propondo responder a segunda

pergunta, que a força motriz do calor independe do agente empregado para realizar calor na máquina.

Assim, passa a refletir sobre as mudanças de volume ocasionadas pelo calor. Existe uma diferença de temperatura por força motriz, que pode ser produzida reciprocamente. Onde quer que possa consumir esse poder, é possível ocasionar destruição do equilíbrio no calórico. Não é o atrito dos corpos, na verdade, significa elevar sua temperatura fazendo chegar, espontaneamente, a um grau mais elevado do que o dos corpos vizinhos, conseqüentemente, à produção de uma destruição de equilíbrio no calórico. É um fato provado pela experiência, em que a temperatura dos fluidos gasosos é elevada pela compressão e reduzida por rarefação. Isto é um método seguro de modificar a temperatura de corpos e destruir o equilíbrio do calórico, como muitas vezes pode ser desejado com a mesma substância.

Carnot (1824) ainda afirma que o vapor de água, entregue de forma inversa àquela em que ele é utilizado em motores a vapor, também pode ser considerado como um meio de destruir o equilíbrio do calórico. Sua imaginação vai além, citando, como exemplo, um ciclo completo e totalmente reversível³⁹. Isto ele estabelece através de uma sequência de operações (isotérmicas e adiabáticas)⁴⁰, como meio pedagógico e facilitador na compreensão de suas observações e investigações de sua teoria. Carnot raciocina com dois corpos, denominados **A** e **B** da seguinte forma:

Sou convencido disso que precisamos, mas de observar de perto o modo pelo qual a força motriz é desenvolvida pela ação do calor sobre vapor de água. Dois corpos **A** e **B**, cada um mantendo a uma temperatura constante, (**A**) superior a de (**B**). Estes dois órgãos, para que possamos dar ou a partir de qual podemos remover o calor sem causar variância em suas temperaturas, exercem as funções de dois reservatórios ilimitados de calórico. Nós vamos chamar o primeiro de forno e o segundo de frigorífico. Se quisermos produzir força motriz através da realização de certa quantidade de calor a partir do corpo **A** para o corpo **B**, vamos proceder da seguinte forma: (i) Para emprestar o calórico do corpo, para fazer um vapor com ele, isto é, para tornar este organismo cumprir a função de um forno, em vez de um metal compondo a caldeira em motores simples, nós aqui conjecturaremos que o vapor é produzido à mesma temperatura que o corpo **A**. (ii) O vapor de água deve ter sido recebido num espaço capaz de expansão, tal como um cilindro equipado com um êmbolo, para aumentar o volume desse espaço, e

³⁹ Nóbrega (2009, p. 31) afirma que a noção de reversibilidade introduzida por Carnot foi um conceito fundamental para a termodinâmica. Todavia, ela lembra que essa noção era totalmente mecânica. Afirma ainda que o conceito de reversibilidade termodinâmica surgiria somente anos depois com os trabalhos de Clausius.

⁴⁰ Refere-se a uma transformação gasosa na qual a pressão **p** e o volume **v** variam sendo que a temperatura **T** é mantida constante (**iso** = igual e **thermo** = calor). Já na transformação adiabática não há trocas de calor com o meio exterior, essa transformação pode ocorrer quando o gás está contido no interior de um recipiente isolado do ambiente.

consequentemente, também a do vapor. Assim rarefeito, a temperatura vai cair espontaneamente, como ocorre com todos os fluidos elásticos; admitir que a rarefação possa ser continuada até o ponto onde a temperatura tornasse, exatamente, o corpo **B**. (iii) Para condensar o vapor, colocando-o em contato com o corpo **B**, e ao mesmo tempo a vantagem sobre ela a uma pressão constante até que seja inteiramente liquefeito. O corpo **B** enche aqui o lugar da injeção de água nos motores comuns, com esta diferença, que se condensa o vapor e se misturando com ela, e sem alterar a sua própria temperatura (CARNOT, 1824, p. 10).

Contudo Carnot argumenta que as intervenções que começou a descrever podem ter sido executadas em uma direção inversa da ordem. Não há nada para impedir a formação do vapor com o calórico do corpo **B**, nem na temperatura desse corpo, comprimindo-o de tal forma a torná-lo adquirir a temperatura de um corpo, finalmente condensando-o em contato com este último corpo e continuando a compressão para Liquefação completa.

Nascimento et al (2004, p. 2) considera ser de fundamental importância a História inicial da Termodinâmica, especialmente, para poderemos examinar a obra de Carnot. A obra faz parte dos fundamentos das bases teóricas da primeira e segunda Lei da Termodinâmica. Apresenta o fato da conservação da energia e do equivalente mecânico do calor, completado nas citações das páginas dez (10) e onze (11), tanto sobre a ideia de reversibilidade, comprovando que a máquina mais eficiente deveria trabalhar desta forma, bem como sobre a ideia de conservação da energia, fundamentada sobre um princípio de economia.

Pelas nossas primeiras operações, não teria havido ao mesmo tempo a produção de potência motriz e transferência de calórico do corpo **A** para o corpo **B**. Pelas operações inversas, há já no mesmo tempo gasto de potência motriz e retorno de calórico do corpo **B** para o corpo **A**. Mas se temos atuado em cada caso, na mesma quantidade de vapor, se produz nenhuma perda quer de força motriz ou de calórico, a quantidade de potência motriz produzida, em primeiro lugar vai ser igual que teria sido despedido no segundo, e a quantidade de calórico passados no primeiro caso seria indefinida (CARNOT, 1824, p. 11. Grifo nosso).

Seguindo a ideia, Carnot (op. cit.) deixa claro que o calor originário da fonte de maior temperatura é transformado em trabalho e o restante do calor é absorvido pela fonte de menor temperatura. Se for realizado o processo no sentido inverso, usando-se as mesmas quantidades, serão restabelecidas as condições iniciais do sistema. O estudioso descreve que a quantidade de calórico do corpo **A** partir para o corpo **B** seria igual à quantidade que passa novamente no corpo **B** para o corpo **A**. Para isso acontecer, seria necessário atuar em cada caso indefinidamente, para não haver perdas; ou seja, ter-se-ia uma conservação de energia em cada ponto. Assim, um número de operações alternativas deste tipo pode se realizar

naturalmente, uma vez que não existe nenhuma perda, tendo força motriz⁴¹ produzida ou o calórico transferido de um corpo para outro.

Por outro lado, Díaz (2014, p. 30-31)⁴² nota que Carnot (1824) já se preocupava com certas proibições estabelecidas pela natureza, como as de qualquer dispositivo, ou mesmo máquinas, se movimentarem continuamente e realizarem trabalho, sem consumo de energia.

Agora, se existisse qualquer meio da utilização de calor preferível àqueles que têm empregado, isto é, se fosse possível através de qualquer método que seja para fazer o calórico produzir uma quantidade de calórico maior do que nós fizemos produzir pela nossa primeira série de operações, e seria suficiente para desviar uma parte desse poder, a fim pelo que seria apenas indicado para fazer o calórico do corpo B retornar. Um corpo A do frigorífico para o forno, para restabelecer as condições iniciais, e, portanto, para ser pronto para iniciar outra vez a operação precisamente semelhante ao anterior, e assim por diante: isso seria não só o movimento perpétuo, mas uma criação ilimitada de potência motriz sem qualquer consumo do calórico ou de qualquer outro agente que seja (CARNOT, 1824, p. 12).

Carnot (op. cit.) enfatiza que não poder haver um movimento perpétuo na natureza, já que seria contrário a qualquer lei conhecida. Neste argumento, uma máquina hipotética poderia se movimentar ininterruptamente sem consumo de energia ou transformar calor integralmente em trabalho. Neste contexto, o autor evidencia a criação de tal movimento perpétuo, de uma máquina que não funciona sem parar, mas que realiza trabalho continuamente, sem consumo de energia, embora isso ainda fosse inadmissível para as leis da mecânica de até então.

Tal criação é totalmente contrária às ideias aceitas agora, às leis da mecânica e da física. É inadmissível. Devemos então concluir que o máximo de força motriz, resultante do emprego de vapor é também o máximo de força motriz realizável por qualquer meio que seja. Em breve, dar uma demonstração segundo mais rigorosa desta teoria. Isto deve ser considerado apenas como uma aproximação (CARNOT, 1824, p. 12. Grifo nosso).

Nestas palavras de Carnot, para ser atingida a condição de máxima eficiência e não haver nenhuma mudança na temperatura de agente que não seja devido a uma modificação no volume. Para executar o trabalho, é necessário alterar o volume devido ao calor em uma

⁴¹ Nota-se que, na linguagem de Carnot (1824, p. 12-13), a força motriz - potência motriz/ o trabalho - não depende da substância durante a expansão e compressão. Ainda, grande parte do manuscrito declara que “a potência motriz do calor é independente dos agentes colocados para a sua realização, ou seja, qualquer que seja a substância, isto é uma proposição geral.” (cf. CARNOT, 1824, p. 20). Contudo, a sua quantidade depende unicamente das temperaturas dos corpos entre os quais ocorre o transporte do calórico.

⁴² Em sua tese de doutorado sobre Carnot (1824) e a segunda lei da termodinâmica, Díaz (2014, p. 29-31) faz uma representação da máquina hipotética de Carnot e sobre o acoplamento de duas máquinas térmicas.

conversão de temperatura. Nestes termos, um gás encerrado em um cilindro, se este estiver aquecido, expande-se e pode realizar um trabalho externo. Se a eficiência significa a razão de trabalho externo e o calor transferido pelo agente, então a eficiência máxima é alcançada quando toda a transferência de calor é utilizada tão-somente na variação. A partir dessa premissa, conclui-se que só o ciclo mais eficiente deve ser composto por processos isotérmicos e adiabáticos. Em uma compressão isotérmica ou expansão, todo o agente de transferência de calor é exclusivamente expressa em variação de volume; o trabalho na expansão isotérmica é máximo e a compressão isotérmica é mínima. Em uma expansão ou uma compressão adiabática, com transferência de calor por definição, a mudança de temperatura é inteiramente por motivo da variação de volume.

Não obstante, Carnot (op. cit.) se propõe a responder a tais perguntas investigativas, usando seu princípio anteriormente citado nas páginas sete (7) e oito (8). Sem perda de generalização, ele começa mostrando as causas da produção de potência motriz:

Uma vez que cada restabelecimento do equilíbrio o calórico pode ser a causa da produção de força motriz, cada restabelecimento do equilíbrio que deverá ser realizada sem produção deste poder e deve ser considerado como uma perda real. Agora, muito pouco de reflexão mostrará que toda a mudança de temperatura que não é devido a uma mudança do volume dos corpos, pode ser apenas um restabelecimento inútil de equilíbrio do calórico. A condição necessária de máximo é, então, que os corpos empregados para realizar força motriz de calor não devem ocorrer qualquer perda de temperatura que não pode ser devido a uma variação de volume. Reciprocamente, toda vez que essa condição se cumpre o máximo será alcançado. Este princípio não deve ser perdido de vista na construção de motores a calor; é a sua fundamental base. Se ele não pode ser estritamente observado, deveria, pelo menos, ser revogado tão pouco quanto possível (CARNOT, 1824, p. 12-13. Grifo nosso).

Esta afirmação imposta por Carnot (op. cit.) evidencia um princípio norteador de sua obra, ele mesmo diz ser necessário e que não pode ser perdido de vista, em uma linguagem mais atualizada. Essa condição corresponde a uma situação de mínima entropia em uma máquina térmica de rendimento máximo; para tanto, não deve haver nenhum contato entre os corpos de diferentes temperaturas durante sua operação. Ainda notamos em Carnot que cada mudança de temperatura é, necessariamente, devido à passagem direta do calórico de um corpo com diferentes temperaturas. Esta passagem ocorre, sobretudo, pelo contato de corpos de diferentes temperaturas. Tais contatos devem, pois, ser evitados tanto quanto possível, para que não haja perdas. Contudo, é provável que isto não possa ser evitado no real. Toda a

seqüência de uma alteração de volume deve, ao menos, ser de tal maneira que os corpos trazidos contatam uns com os outros e diferem tão pouco quanto possível na temperatura.

Quando supomos a demonstração proposta por Carnot, o calórico do corpo é empregado para formar vapor, considerado por gerar a temperatura do corpo A. Assim, o contato ocorreu apenas entre corpos de igual temperatura. A mudança de temperatura a posteriori no vapor era por motivo da dilatação, por conseguinte, de uma alteração do volume. O investigador ainda analisa:

A condensação teve lugar também sem o contato de corpos de diferentes temperaturas. Este fato ocorreu enquanto exerce uma pressão constante sobre o vapor apresentado no contato com o corpo B à mesma temperatura, como suas condições para um máximo são, portanto, encontrado para ser cumprida. Na realidade a operação não é possível continuar exatamente como tem assumido. Para determinar a passagem de calórico de um corpo para outro, é necessário que haja um excesso de temperatura na primeira, mas este excesso pode-se supor que leve o que quisermos. Podemos ainda considerá-lo como insensível em teoria, sem com isso destruir a exatidão dos argumentos (CARNOT, 1824, p. 13).

Estes argumentos defendem uma posição substancial, a ser feita para a demonstração. Quando tomamos emprestado o calórico de A a partir do corpo para produzir vapor, condensado depois por seu contato com o corpo B, analisamos como a primeira temperatura do corpo A a água utilizada para formá-lo, encontrado no fim da operação na temperatura do corpo B. Se quisermos começar novamente uma operação semelhante ao primeiro, se desejarmos desenvolver uma nova quantidade de força motriz com o mesmo instrumento, com o mesmo vapor, é necessário restabelecer a condição inicial para restaurar a água, para a temperatura inicial. Conforme Carnot (1824, p.13), isso pode, sem dúvida, ser feito de uma só vez, ao colocá-lo novamente em contato com o corpo A; mas não haveria, então, contato entre corpos de temperaturas diferentes, logo, teria perda de potência motriz.

Apesar da criação de uma ideia sofisticada para a época, com o simples intuito de aperfeiçoar a máquina a vapor e, talvez, ajudar o país no âmbito de uma intensa revolução industrial, era necessário também acreditar que poderia não haver ferramentas o bastante para ir além; muito embora as teorias e hipóteses fossem um modelo dentro do campo da física até então conhecido. O próprio Carnot, depois de conjecturar os seus argumentos em reflexões, cita uma ideia conclusivamente importante para um ciclo ideal com pequenas diferenças de temperaturas:

[...] Seria impossível para executar a operação inversa, isto é, voltar ao corpo um calórico entregue para elevar a temperatura do líquido. Esta dificuldade pode ser removida, supondo a diferença de temperatura oposta: o corpo A e o corpo B indefinidamente pequeno. A quantidade de calor necessária para elevar o líquido à sua temperatura anterior será também infinitamente pequena e relativamente insignificante para que seja necessário produzir vapor a uma quantidade sempre limitada (CARNOT, 1824, p. 14. Grifo nosso).

Ao discutir este assunto, o autor parece fundamentado em sua proposição, afirmando que:

A proposição encontrada em outros lugares demonstra o caso em que a diferença entre as temperaturas das duas entidades é infinitamente pequena, pode ser facilmente estendida para o caso geral. De fato, se for utilizado para produzir força motriz pela passagem de calórico do corpo A à Z, a temperatura deste último organismo, sendo muito diferente do que a da primeira, deve se imaginar uma série de corpos de B, C, D. ..., de temperaturas intermediárias entre as dos corpos A, Z, e selecionados de modo que as diferenças de A para B, de B para C, etc., podem ser todas indefinidamente pequenas. O calórico proveniente de um não chegaria a Z até depois que tenha passado através dos órgãos B, C, D, etc., e depois de ter desenvolvido em cada uma dessas etapas de potência máxima de calor (CARNOT, 1824, p. 14-15).

Carnot (op. cit.) afirma que estas operações inversas iriam ser perfeitamente possíveis. Para completar a validade, ele generaliza as tomando como importância⁴³, o que seria estritamente aplicável, como vimos. De acordo com os princípios estabelecidos, pode-se fazer, para efeito didático, a comparação com precisão suficiente da potência motriz do calor ao de uma cachoeira. Ainda afirma que cada um tem um máximo que não pode exceder, por um lado, a máquina é posta em prática pela água, qualquer que seja a substância atuada pelo calor. O raciocínio seria aplicável:

⁴³ Carnot, partindo de princípios físicos universalmente reconhecidos, demonstra que é pela descida do calor, de um corpo quente para um corpo frio, através do meio de uma máquina (uma máquina a vapor ou uma máquina a ar, por exemplo), que o efeito mecânico pode ser obtido; e, reciprocamente, ele prova que a mesma quantidade de calor pode, pelo consumo de uma quantidade igual de força de trabalho, ser elevada do corpo frio para o quente (a máquina estando, neste caso, trabalhando ao contrário); assim como efeito mecânico pode ser obtido pela queda da água em uma roda de água, a água pode ser elevada a um nível mais alto, consumindo força de trabalho, pelo giro da roda ao contrário, ou operando uma bomba. A quantidade de efeito mecânico a ser obtida pela transmissão de uma dada quantidade de calor, através do meio de qualquer tipo de máquina, na qual a economia é perfeita, dependerá, como Carnot demonstra, não da natureza específica da substância empregada como meio de transmissão de calor na máquina, mas somente do intervalo entre a temperatura dos dois corpos entre os quais o calor é transferido. Carnot examina, detalhadamente, a construção ideal de uma máquina a ar e de uma máquina a vapor, em que, além da condição de economia perfeita ser satisfeita, a máquina é disposta de tal forma que, ao final da operação completa, a substância (ar em um caso e água no outro) utilizada é restaurada a precisamente a mesma condição física do começo. [Vide: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 487-490. 2007. Seção especial: Centenário da morte de William Thomson (1824-1907)].

De acordo com os princípios estabelecidos na atualidade, podemos comparar com precisão suficiente à força motriz do calor para queda d'água de uma cachoeira. Cada um tem um máximo que não pode exceder qualquer que seja, por um lado, a máquina que é atuada pela água, e que seja, por outro lado, a substância atuada pelo calor. A força motriz de uma queda de água depende da sua altura e sobre a quantidade do líquido; a força motriz do calor depende também da quantidade de calórico utilizado, e em que pode ser chamado, para o que, de fato, que vai chamar o líquido da sua queda, isto é, a diferença de temperatura dos corpos entre os quais a troca do calórico é feita. Na cachoeira, a força motriz é exatamente proporcional à diferença de nível entre os reservatórios superior e inferior. No outono de calórico, sem dúvida, a força motriz aumenta com a diferença de temperatura entre os corpos quentes e frios; o, mas não sabemos se é proporcional a essa diferença. Não sabemos, por exemplo, se a queda do calórico de 100 a 50 graus envolve mais ou menos força motriz do que a queda deste mesmo calórico de 50 para zero. (CARNOT, 1824, p. 15).

Carnot (op. cit.) ainda completa sua analogia e propõe a examinar, dando uma segunda demonstração da proposição fundamental, enunciada na citação da página doze (12), e apresenta esta proposta no âmbito mais geral:

Quando um fluido gasoso é comprimido rapidamente, a sua temperatura sobe. Cai, pelo contrário, quando é rapidamente dilatada. Este é um dos fatos demonstrado pela experiência. Vamos levá-la para a base da nossa demonstração. Se, quando a temperatura de um gás foi levantada por compressão, queremos reduzi-la a sua temperatura sem sujeitar o seu volume a novas alterações, algum do seu calórico deve ser removido. Este calórico pode ter sido removido à medida que a pressão foi aplicada, de modo a que a temperatura do gás permaneceria constante. Da mesma forma, se o gás é rarefeito, podemos evitar a diminuição da temperatura, fornecendo-o com certa quantidade de calórico. Vamos chamar ao calórico empregado em tais ocasiões, quando mudança de temperatura ocorrer no calórico devido à mudança de volume. Esta denominação não indica que o calórico diz respeito ao volume: não pertence a ele mais do que a pressão, e poderia muito bem ser chamado calórico devido à mudança de título de pressão. Não sabemos que a lei que se segue em relação às variações de volume seja possível que a sua quantidade mude tanto com a natureza do gás, da sua densidade, ou a sua temperatura, além do mais, a experiência não nos ensinou nada sobre este assunto (CARNOT, 1824, p. 16).

Do ponto de vista teórico, o autor mostra que este calórico é desenvolvido em maior ou menor quantidade pela compressão do fluido elástico em uma transformação cíclica (a figura 9 extraída de Carnot é um ciclo idealizado para fundamentar seus argumentos). Apresenta uma ideia bastante inovadora para sua época, a de que a máquina mais eficiente possível deve operar entre duas fontes com diferença de temperatura em um ciclo reversível.

Todavia, as operações da máquina poderiam se fazer de traz para frente. No princípio de economia empregado no trabalho do pesquisador, qualquer máquina atuando em um ciclo reversível tem o máximo rendimento. Através deste ciclo específico, calcularia o elevado rendimento das máquinas a vapor em função das fontes das temperaturas.

De acordo com Carnot (op. cit.), o referido ciclo surge da comprovação da ideia já estabelecida de que, por exemplo, um fluido elástico, o ar atmosférico colocado em um cilíndrico fechado $abcd$. Notemos que o pistão na posição $c-d$ é móvel e sem atrito algum, bem como há também dois reservatórios térmicos **A** (T_A) e o **B** (T_B), cada qual mantido a constante temperatura, **A** maior do que a de **B**.

Primeiramente, o gás está em contato e com a mesma temperatura do reservatório **A**, e é expandido até a posição ef , de forma que sua temperatura seja mantida constante. Nota-se que a fonte quente e a substância de trabalho estão em contato, à mesma temperatura, cumprindo uma condição de economia. À medida que a substância recebe calor da fonte quente, ela expande, empurrando o êmbolo.

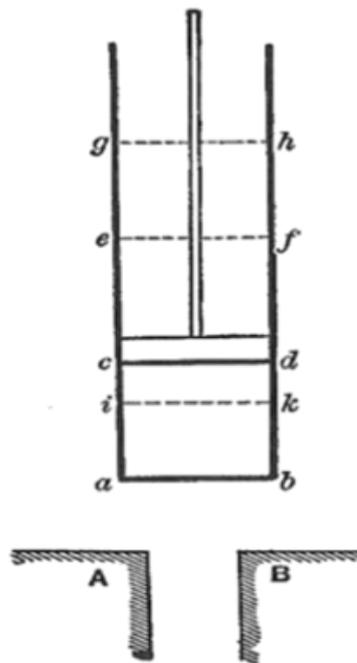


Figura 9: Ciclo idealizado por Carnot⁴⁴.

Depois, o pistão aumenta (expande), gradualmente, o gás agora isolado de **A** e expande da posição ef para a posição gh , em que sua temperatura é igual à de **B**. Como o gás se encontra confinado, ou seja, isolado, o calor não é trocado com o exterior. A substância

⁴⁴ Disponível em: Carnot (1824, p. 17).

esfria à medida que expande. O processo é interrompido, quando a substância atingir a temperatura da fonte fria.

Na sequência, o gás entra em contato com **B** e é comprimido de *gh* para *cd*, com temperatura mantida constante. Verifica-se que, nesta fase, a fonte fria e a substância de trabalho estão em contato, à mesma temperatura, cumprindo a condição de economia. À medida que a substância de trabalho for comprimida, o calor é transferido da substância de trabalho para a fonte fria; quando a substância atingir um dado volume.

O gás é finalmente isolado de **B** e é comprimido de *cd* para *ik*, sendo que sua temperatura final igual à de **A**. Nesta fase, o calor não é trocado com o exterior ou outra qualquer parte e a substância esquentada à medida que for comprimida. O processo é interrompido, quando a substância atingir a temperatura da fonte quente.

Passos (2002, p. 5-6) complementa ao dizer que as várias operações do pistão são sujeitas a um esforço de maior ou menor amplitude, exercidas pelo ar encerrado dentro do cilindro; o fluido elástico, ou certo gás perfeito, varia tanto em virtude das variações de volume, como de alterações da temperatura. No entanto, deve-se observar que, com iguais volumes, isto é, para as posições semelhantes do êmbolo, a temperatura é mais elevada durante os movimentos de dilatação do que durante os movimentos de compressão. Consequentemente, a quantidade de energia produzida pela força de movimentos de dilatação é mais do que considerável, é consumida para produzir os movimentos de compressão.

Segundo o referido autor, (op. cit., p. 6-7), todas as operações acima apresentadas podem ser executadas em um sentido e ordem inversas, como descritas por Carnot (1824, p.18). Este ainda considera que após o último período, isto é, o pistão tendo chegado à posição *ef*, fazemos com que retorne à posição *ik*; que, ao mesmo tempo, mantém o ar em contato com o corpo **A**. O calórico fornecido por este corpo no percurso do quarto período passa a voltar à sua fonte, seu estado inicial. Desse modo, as condições continuariam um novo ciclo, seguindo as etapas iniciais, sem nenhuma perda. O resultado destas primeiras operações tem sido a produção de certa quantidade de potência motriz e a remoção do calórico do corpo **A** e do corpo **B**. O produto das operações inversas é o consumo de potência motriz produzindo à volta do calórico do corpo **B** para o corpo **A**.

Escrevendo tais operações, Carnot (1824) chega ao ponto de afirmar:

Aqui a impossibilidade de fazer o calórico produzir uma maior quantidade de potência motriz do que a que obtivemos dele por nossa primeira série de operações, é agora facilmente provado. O ar que nós usamos para desenvolver a potência motriz é restaurado no final de cada ciclo de

operações exatamente para o estado em que ele estava na fase inicial, enquanto, como já ressaltado este não seria precisamente o caso do vapor de água (CARNOT, p.1824, p. 19).

Em seu ensaio Carnot (op. cit.), escolheu o ar atmosférico como o instrumento que deve desenvolver a potência motriz do calor. Ele observa que teria havido o mesmo raciocínio para todas as outras substâncias gasosas, ao afirmar a mesma validade para todos os outros organismos susceptíveis de variação da temperatura, através de contrações sucessivas e dilatações. Isso compreende todas as substâncias naturais, ou, pelo menos, todos aqueles que são adaptados para realizar a potência motriz do calor. E termina apresentando uma sentença declarativa, dizendo que foi levado a estabelecer esta proposição geral:

A potência motriz do calor é independente dos agentes empregados para realizar; a sua quantidade é fixada unicamente pelas altas temperaturas do corpo oposto. Que é efetuado, por fim, a transferência do calórico (CARNOT, 1824, p. 20).

Um dos embasamentos teóricos da investigação de Carnot (op. cit.) para o aprimoramento da máquina térmica está na afirmação conclusiva da proposição geral que mencionou. Embora seus princípios tenham alavancado pesquisas posteriores, a teoria do calórico era largamente discutida pelos cientistas nos séculos XVIII e XIX. A proposição citada aprecia a descrição de que tal força motriz não depende unicamente da substância. Ademais, cada um dos métodos de desenvolvimento de potência motriz alcança a perfeição de que é capaz. Esta condição é encontrada para ser satisfeita como se observou na proposição supracitada; não é produzida no corpo nenhuma outra alteração de temperatura devido à modificação do volume; em outras palavras, se não houver contato entre corpos sensível a diferentes temperaturas.

Visando a uma explicação com maior clareza sobre a potência motriz do calor, Carnot (1824) deposita sua atenção para as propriedades físicas dos gases, um assunto que havia sido fortemente comentado e estudado nos séculos XVII e XVIII. Nestes períodos, os estudos experimentais já estavam bem acentuados, como, por exemplo, as leis para os gases eram empíricas, assim como estabelecidas a partir de experimentos acerca do comportamento dos gases à pressão próxima da atmosférica. De forma independente, os estudos de Boyle (1662) e Edme Mariott (1676) se aproximam das conclusões em (PASSOS, 2003), ao demonstrarem que nas transformações isotérmicas, logo, em temperaturas constantes, a pressão exercida por um gás ideal vezes o volume do gás é uma constante. Já a lei de Gay Lussac

(1802) sintetiza a relação de dependência entre as variáveis de estado volume e temperatura nas transformações isobárica. Nesta mesma época, além dos testes de vários gases, foi notado que o volume ocupado pelo gás é diretamente proporcional à temperatura.

Tais leis já eram bem conhecidas de Carnot (1824, p. 24-86), quando entende que: a quantidade de calor transferido do corpo A para o corpo B é, evidentemente, a qual é absorvida pelo gás em sua expansão de volume, ou que este gás é o que abandona durante a compressão. Com isso, o estudioso é levado a estabelecer a seguinte proposição:

Quando um gás passa sem mudança de temperatura a partir de um volume determinado e a uma pressão. Obter o volume e outra pressão igualmente definido, a quantidade de calórico absorvidas ou abandonado é sempre à mesma, seja qual for a natureza do gás escolhido como o objeto da experiência (CARNOT, 1824, p. 22).

As questões iniciais sobre máquinas a vapor transpassam todo o manuscrito do pesquisador, que demonstra querer, em algum grau, nos alertar que este é um dos fundamentos de sua teoria. Com alguns dados experimentais extraídos da literatura em curso, ele examina que todos os fluidos causam a mesma quantidade de potencia motriz. Assim, foi capaz de estimar o limite ideal para essa produção, em uma revisão dos tipos mais comuns de máquinas a vapor; buscou aplicar suas descobertas a assuntos práticos de projeto e operação de máquinas a vapor. Sua contribuição, entretanto, torna-se o seu objetivo original.

Em 1823, um considerável conjunto de dados experimentais em processos isotérmicos, adiabáticos e em calores específicos, tinha sido assimilado na teoria calórica do calor e equacionado matematicamente por Laplace e Poisson. Carnot (op. cit.) combina os resultados desta atividade com os conceitos envolvidos em um teorema, apresentado da seguinte maneira:

Quando um fluido elástico passa sem mudança de temperatura, a partir do volume de U para o volume V, e quando uma quantidade ponderável semelhante do mesmo gás passa à mesma temperatura do volume de U' para o volume V', se a relação de U' a V' é encontrado como sendo o mesmo que a relação de U a V, as quantidades de calor absorvido nos dois casos serão iguais (CARNOT, 1824, p. 26).

Em linguagem mais moderna, Carnot (op. cit.) viu com clareza que os fluidos elásticos (gás ou vapor) são os verdadeiros instrumentos apropriados ao desenvolvimento da potência motriz do calor. Isto ficou em seu manuscrito: quando um gás mantido a uma temperatura constante passa de um volume (V_1) e pressão (p_1) para outro volume (V_2) e outra

pressão (p_2), é sempre a mesma quantidade de calor absorvido ou abandonado, independentemente do tipo de gás. O estudioso chama de teorema esta propriedade, apesar de reconhecer que a quantidade de calor absorvida ou liberada nunca havia sido medida por nenhuma experiência direta.

Por outro lado, o teorema é apresentado com a afirmação de que, durante os processos de expansão ou compressão isotérmica:

Quando um gás varia em volume sem mudança de temperatura, as quantidades de calor absorvido ou libertado por este gás estão em progressão aritmética, se os incrementos ou os decréscimos de volume são encontrados para estar em progressão geométrica (CARNOT, 1824, p. 27).

Os resultados encontrados tentam ser fundidos pelo investigador em uma forma algébrica. Porém, este desenvolveu seus teoremas numa maneira sintética tal que, embora clara e logicamente rigorosa, estava em contraste com a análise matemática dominante da comunidade científica. Talvez isso fosse o motivo da rejeição do seu trabalho na academia francesa.

3.7 Sadi Carnot: Caminhos para o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica

Apesar de o trabalho de Carnot (1824) estar no campo tecnológico, o seu caráter teórico, dado de forma abstrata, talvez fosse à razão para o seu não reconhecimento. Conforme já dito, encontra-se em um período em que as teorias científicas, para serem bem aceitas, tinham de ter uma importância empírica e um poderoso formalismo matemático. Contudo, sua obra quebra os paradigmas vigentes, por conseguinte, gera mudanças de concepções com suas ideias e formulações. Em meio à Revolução Industrial, deixa elementos suficientes para os pilares da termodinâmica, continuados por outros cientistas, a exemplo de Benoit Paul Émile Clapeyron, William Thomson e Rudolf Julius Emmanuel Clausius.

Inicialmente, a única pessoa que compreendeu e manteve a memória dos resultados de Carnot foi Clapeyron. Ele regressou a França, em 1830, e publicou uma reformulação do manuscrito daquele cientista. Nóbrega (2009, p. 32-34) comenta que Clapeyron logo após a morte de Carnot, em 1832, respalda-se no trabalho deste e acrescenta em sua pesquisa uma formalização algébrica que transforma a análise verbal de Carnot no simbolismo de cálculo

cheio de derivadas⁴⁵; além de uma representação gráfica do ciclo proposto pelo Carnot e do seu funcionamento, visando conferir ao trabalho original maior clareza. A afirmação de Clapeyron se diferenciava muito, na sua forma de apresentação, embora tenha alcançado os mesmos resultados. Foi sintético em tudo e fez apenas referências superficiais para os problemas do projeto do motor para a aplicação industrial, que tinha sido destaque no trabalho original. Também deduziu novos resultados e fez sua derivação clara, através do uso de diagramas indicadores, que têm validade até hoje. O diagrama *pressão versus volume*, na figura 10, mostra o ciclo de Carnot segundo a interpretação de Clapeyron:

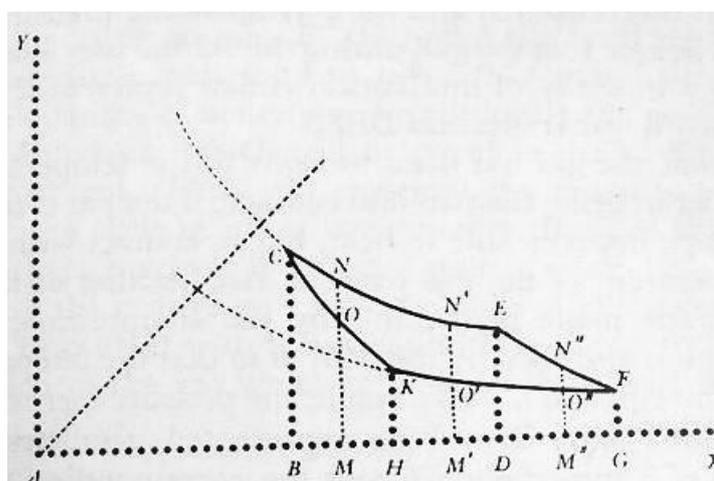


Figura 10: Ciclo de Carnot interpretado por Clapeyron⁴⁶.

Na interpretação gráfica exposta na figura 10, Clapeyron em 1834 descreve os passos do ciclo de Carnot (1824, p. 89), no ramo C-E tem-se uma expansão isotérmica à temperatura da fonte quente (T_q), no ramo E-F tem-se uma expansão adiabática, a substância é isolada da fonte quente, ramo F-K a substância passa por uma compressão isotérmica à temperatura T_f , e no ramo K-C ver-se uma compressão adiabática. Mesmo em um período de crença na teoria do calórico, Carnot e Clapeyron escreveram seus trabalhos na altura de haver nenhuma declaração inequívoca da equivalência de calor e energia. Como resultado, muitas de suas afirmações parecem estar incorretas em primeira leitura. No entanto, a dificuldade em grande parte é de compreender as diferentes maneiras que eles usaram para as palavras calor e calórico. Clapeyron, além de dar vida ao trabalho de Carnot, levaria outros cientistas a estudarem a obra original, a exemplo de W. Thomson (1824-1907) e do físico alemão Rudolf

⁴⁵ O formalismo algébrico e a análise matemática feita por Clapeyron estão além desse trabalho, nos deteremos somente nos fatos históricos.

⁴⁶ Disponível em: Carnot (1824, p. 75).

J. Clausius (1822-1888), que perceberam a importância deste trabalho e a injustiça de suas ideias terem ficado no anonimato por tanto tempo.

Dias (2007) comenta que o William Thomson foi para Paris, após a graduação, para trabalhar e estudar com Regnault, um experimentador cuidadoso e influente; que ao procurar o manuscrito de Carnot, tudo que encontrou foi o artigo de Clapeyron:

Thomson leu um artigo de Emile Clapeyron *Puissance motrice de lachaleur* publicado em 1834, no *Journal de l'Ecole Polytechnique* e, em 1843, no *Annalen der Physik*. Nesse artigo, Clapeyron apresenta um resumo de uma teoria proposta, em 1824, por Nicolas Léonard Sadi Carnot, no livro *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Thomson entendeu que a solução de seu problema estava na teoria de Carnot e procurou o livro em Paris; não achou, naquela ocasião, mas os frutos já estavam ali (DIAS, 2007, p. 493).

A interpretação de Clapeyron foi à contribuição significativa para iniciar-se no processo do estabelecimento da segunda lei da termodinâmica. Por esse meio, Thomson se apropria da teoria de Carnot, na tentativa de organizar uma escala termométrica absoluta. Segundo Dias (2007), Thomson escreve quatro importantes artigos científicos que abriram o caminho para a formulação da segunda lei da termodinâmica. Dentre eles, estes dois são mais bem citados:

Em sequência, Thomson publicou dois artigos que traçaram o destino da teoria do calor: (I) 1849: *On an absolute thermometric scale founded on Carnot's theory of the motive power of heat, and calculated from Regnault's observations* (*Philosophical Magazine*). Esse artigo é mais bem entendido como um “teorema de existência”: Thomson usa a teoria de Carnot para demonstrar (teoricamente) a existência de uma temperatura absoluta. (II) 1849: *An account of Carnot's theory of the motive power of heat; with numerical results deduced from Regnault's experiments on steam* (*Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 16, 571-574). Nesse artigo, Thomson apresenta um resumo da teoria de Carnot, com os acréscimos de Clapeyron (DIAS, 2007, p. 494).

Neste primeiro artigo, Thomson acredita ser necessário estabelecer uma escala de temperatura absoluta; baseia-se inteiramente no manuscrito de Carnot, na afirmação de que uma quantidade de calor, passando entre as duas fontes, a temperaturas diferentes, pode produzir, no máximo, determinada quantidade de trabalho. Neste segundo, logo após sua investigação sobre a escala absoluta, apresenta dúvidas em determinados pontos do trabalho de Carnot e de Joule, propondo-se a investigar o trabalho mecânico (DIAS, op. cit.). Por um lado, Carnot se limitou a descrever o método de produção de efeito do calor

mecânico, meio do calor da contração e expansão, concluindo com o axioma, base de sua teoria, de que o calor era conservado. Por outro lado, Thomson chama a atenção para a descoberta de Joule⁴⁷, de que o calor não era uma substância como proposta em *Reflexões*.

A teoria mecânica do calor se consolida definitivamente com os trabalhos realizados pelo físico inglês James Prescott Joule (1818-1889). Este cientista se interessou pelo ramo do eletromagnetismo e pela termodinâmica, áreas da Física que mais progredia na época. Ele procurava encontrar nelas a fonte mais eficiente de energia para a seu motor elétrico ou máquina a vapor. Segundo Díaz (2014, p. 38-44), por volta de 1843, o artigo que publica, na *Philosophical Magazine intitulado On the Calorific Effects of Magneto-Electricity, na don the Mechanical Value of Heat*, formulou a expressão matemática que relaciona a intensidade da corrente elétrica que passa por um fio e o calor nele gerado. Joule aprofundou seu estudo construindo um motor eletromagnético, por meio do qual conseguiu converter energia mecânica em calor, levando-o a rejeitar completamente a teoria do calórico e a realizar um experimento importante. A figura 11 apresenta o desenho do aparelho construído por Joule, em que sustentava a teoria de que o calor seria gerado por fricção dos fluidos em movimento (QUADROS, 1996, p. 54-58):

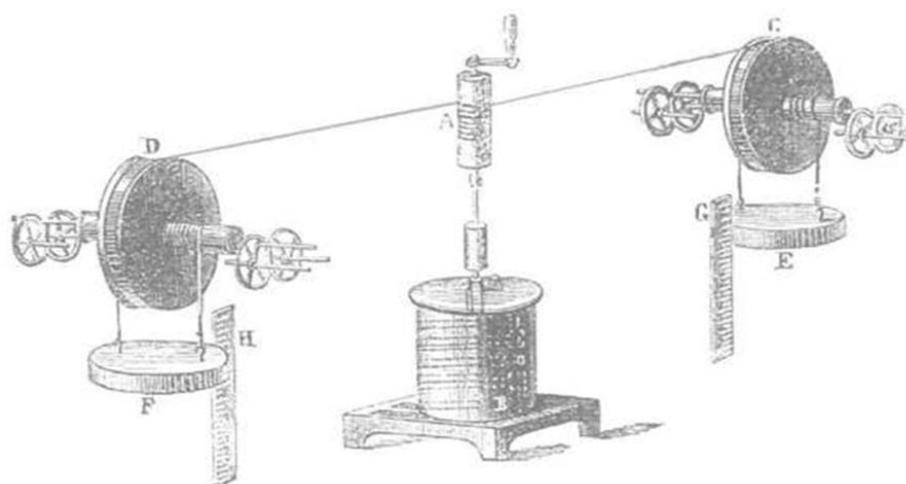


Figura 11: Aparelho de Joule⁴⁸.

A figura 11 mostra o desenho do aparato original de Joule, reproduzido pelo Museu Nacional de Manchester, Inglaterra, onde está exposto⁴⁹. Faz-se necessário uma síntese do

⁴⁷ Para maiores detalhes, ver a tese de doutorado de Díaz (2014, p. 37-45) e a dissertação de Nóbrega (2009, p. 35), sobre as contribuições de James Joules.

⁴⁸ Disponível em: <http://www3.nd.edu/~pdunn/www.ame250/mehjoule.pdf> . Acesso em: 12 dez de 2015.

relato dessa experiência e de seus resultados, publicados em 1850. Acerca das considerações desse experimento, Medeiros et al. (2000) explica:

Dentre os vários experimentos realizados por Joule, sobre a relação trabalho-calor, o mais célebre deles envolvia um calorímetro de pás. Tal calorímetro constituía-se de um recipiente feito de cobre contendo em seu interior um conjunto de pás móveis e outro de pás fixas. As pás móveis eram conectadas a um eixo que girava a partir da queda de dois corpos de mesma massa. As pás fixas eram, por sua vez, conectadas às paredes do calorímetro. Os corpos eram suspensos por fios que, após passarem por um sistema de roldanas, eram enrolados no eixo das pás móveis. No interior do calorímetro, era colocada água, que era então agitada pela rotação das pás. Grande parte da energia de queda dos corpos era transformada em calor dentro do calorímetro. Um termômetro, colocado no recipiente, permitia a medida da elevação da temperatura da água. A partir daí, era possível, determinar a relação existente entre a parcela da energia mecânica resultante da queda dos corpos, convertida em calor, e o valor deste calor produzido no interior do vaso colorimétrico. O problema, no entanto, era fazer uma estimativa precisa do valor da parcela da energia mecânica que efetivamente era convertida em calor. Diante das múltiplas perdas no sistema, abaixo descritas, restavam a Joule dois possíveis caminhos. O primeiro, de execução extremamente difícil, seria conseguir calcular todas aquelas perdas. Diante da dificuldade prática de tal cálculo, Joule optou por uma segunda alternativa, qual seja a de sem poder calcular as perdas com uma boa precisão, minimizá-las ao máximo (MEDEIROS et al., 2000, p. 2).

Ao final do relato pode-se concluir que, em primeiro lugar, a quantidade de calor produzido pelo atrito entre corpos, líquidos ou sólidos é sempre proporcional à quantidade de força. Joule afirma que o calor é energia e não um fluido; se assim fosse, deveria ser inesgotável, pois sempre que os pesos caíam, a temperatura se elevava. Além do mais, medida da quantidade de calor gerada em unidades de energia ficou conhecida como equivalência mecânica do calor, teoria essa que o Thomson, inicialmente, era descrente. Nóbrega (2009) aponta que Thomson entra em um dilema entre as duas teorias, que para ele deveria ter uma aparente contradição,

Estaria mais inclinado para a teoria de Carnot, uma vez que para ele o calor era produzido pela queda de calor de uma temperatura de um nível mais elevado para outro menos elevado, [...] contradição existente entre Carnot e Joule foi evidenciada. E era difícil de visualizar como essas duas proposições contraditórias poderia ser reconciliadas (NÓBREGA, 2009, p. 40).

⁴⁹ JOULE, James Prescott. On the Mechanical Equivalent of heat. **Philosophical Transactions of Royal Society of London**, Londres: Royal Society, n.140, 1850, p. 61-82.

Dias (2007) ainda complementa:

William Thomson, o futuro Lorde Kelvin, colocou o seguinte dilema:

- i) James Prescott Joule demonstrou, por experimento, que calor pode ser transformado em trabalho e vice-versa.
- ii) Portanto, se a máquina realiza trabalho, calor não pode ser todo ele, transportado de uma fonte para a outra. Ele tem de “virar” trabalho, isto, é, ser consumido, usado, gasto.
- iii) Logo, ou Carnot está certo e Joule errado; ou Carnot está errado e Joule certo (DIAS, 2007, p. 230).

Esse dilema de Thomson abre o caminho e quem se propõe a dar uma resposta é Clausius, através do trabalho de Clapeyron, em 1850. Tomando conhecimento da importância do trabalho de Carnot, publica um artigo, intitulado: *On the moving force of heat*. Nóbrega (2009) aponta que este artigo explica a aparente contradição que Thomson tinha apresentado tanto em Carnot como em Joule. Para Clausius, a potência motriz (chamada por Carnot) resulta na transformação de parte do calor, que vai da fonte de maior temperatura para a de menor, pelo que não podia haver conservação de calor. Assim, ele concilia as ideias de que trabalho é produzido pelo calor – de que certa quantidade de calor passa de um corpo quente para um frio, sem que nenhum calor seja perdido nesse processo de transmissão, e que a quantidade permanece inalterada – com a experiência de J. Joule. Outrossim, através desse trabalho, ele clarifica muitos dos conceitos da termodinâmica, dando-lhes a forma atual (DÍAZ, 2014).

Após a aparente contradição ser explicada, Clausius fundamenta os alicerces da matemática para a termodinâmica. Como o princípio de conservação da energia já estava em uso, concluiu que uma máquina a vapor absorve calor de um reservatório de temperatura elevada e converte parte dele em trabalho, o restante é lançado em um reservatório frio. Segundo Díaz (2014, p. 50), ele parte da ideia de Carnot, de que toda máquina a vapor deveria descartar uma quantidade definida de calor, e a denomina de Segunda Lei da Termodinâmica, um fato que deveria ser verificado. Tendo em vista o lado experimental, ele procurou por uma formulação logicamente equivalente a da segunda lei, que fosse mais clara e objetiva.

Quadros (1996) salienta que Clausius formulou a sua expressão teórica em uma conhecida frase: “*É impossível à construção de um dispositivo que, operando em ciclos, produza como único efeito a transferência de calor de um corpo frio a um quente*” (Ibidem, p. 71).

Em 1851, William Thomson melhorou o tratamento desenvolvido por Carnot; com o propósito de expor a irreversibilidade dos processos naturais, chega ao enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica. Dias (2007), analisando o artigo de Thomson, afirma,

Após o artigo de Clausius, Thomson publica mais dois artigos, que mostram o pensador profundo: *On the dynamical theory of heat, with numerical results deduced from Mr. Joule's equivalent of a thermal unit, and M. Regnault's observations on steam (Transactions of the Royal Society of Edinburgh 20, 261-268, 289-298)*. Nesse artigo, Thomson resume a teoria do calor, com as mediações de Clausius. Nele, Thomson enuncia a segunda lei de um modo que, segundo ele, havia formulado antes do artigo de Clausius: É impossível, por meio de agente material inanimado, derivar trabalho mecânico de qualquer parte da matéria, esfriando-a abaixo da temperatura do objeto mais frio, nas redondezas (DIAS, 2007, p. 495. Grifo nosso).

Nóbrega (2009) também a partir do artigo de Thomson (1851) faz referência clara ao enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica, mostrando que Clausius chegou à mesma conclusão, baseado em um axioma diferente: *“É impossível para uma máquina que age sozinha sem ajuda de algum agente externo transportar calor de um corpo para outro com uma temperatura maior”* (THOMSON apud NÓBREGA, 2009, p. 47).

Para esse enunciado, pode-se inferir que não existem máquinas térmicas perfeitas que façam transferência total de calor de um corpo de menor temperatura para de maior. Máquinas térmicas, como locomotivas a vapor, é um tipo de dispositivo que transforma calor em trabalho mecânico por meio de ciclos. De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, não é possível construir máquina a vapor cujo rendimento seja de cem por cento. É uma lei limitante, por não poder ocorrer de forma espontânea, apontando os limites da natureza. Enquanto a Primeira Lei é regida pelo princípio da conservação de energia, a perda de um lado aparece do outro, podendo ser aplicada a processos reversíveis ou não, em qualquer sentido desses processos.

Além do mais, essa Segunda Lei é um princípio poderoso na natureza, por fornecer a regra que rege as transformações de energia na natureza. Portanto, reiteramos a construção dessa lei, como conhecemos hoje, só foi possível através da obra de Carnot, de idealizar um ciclo reversível para qualquer máquina a vapor, sem perdas de calor e com rendimento o maior possível. Logo, essa teoria é a base inicial do que viria a estruturar a termodinâmica como parte da mecânica clássica.

4. DISCUSSÕES E RESULTADOS

Nesta pesquisa nos concentramos em dois pontos valiosos: o primeiro nos voltamos para o campo educacional restrito ao ensino de física, ou seja, em direção da sala de aula, onde acreditamos ser um mundo complexo, variável e cheio de obstáculos para a construção do conhecimento. No segundo nos concentramos em textos canônicos⁵⁰ da Ciência acreditando que este é um ponto pertinente na nossa pesquisa. A realização desse trabalho favoreceu ao autor/pesquisador um leque de possibilidades para aprender e ensinar, logo também nasceu um forte interesse pela utilização da HFC no ensino de física na escola média, esse interesse nos possibilitou construir essa proposta de ensino visando contribuir para o progresso da educação básica.

Os resultados obtidos pela pesquisa são: um paradidático e o plano de aulas para levar a uma turma do segundo ano de uma escola básica. De maneira sistemática apresentamos uma tabela (cronograma) onde é mostrada uma síntese das atividades, conteúdos, objetivos e duração de cada encontro, contemplados ao longo da sequência didática. A função desta sequência didática é mostrar como o professor deve trabalhar o paradidático na sala de aula. Na sequência didática estão descritas todas as atividades para serem trabalhadas em cada momento.

4.1 Plano de Aulas

Planejamos e organizamos pedagogicamente o plano de aulas no tempo didático para facilitar a compreensão, e que possa orientar outros professores que desejarem aplicar esta proposta no ambiente escolar. Logo em seguida apresentamos de forma sintética o plano de aulas.

SÉRIE: 2º ano do Ensino Médio

DISCIPLINA: Física

NÚMERO DE ENCONTRO: 5 encontros

TEMPO DE DURAÇÃO DE CADA ENCONTRO: 90 minutos

Questão norteadora: Qual contribuição Carnot deu para a Segunda Lei da Termodinâmica?

⁵⁰ São textos extraídos da fonte original, em nosso caso, estudamos o manuscrito de Carnot de 1824.

4.1.1 Objetivos gerais

- Investigar se o uso da História da Ciência (HC), tomando como referência a máquina térmica de Carnot, facilita o processo ensino-aprendizado da Segunda Lei da Termodinâmica;
- Favorecer o aprendizado de conteúdos físicos e epistemológicos;
- Favorecer a compreensão da Ciência como uma construção humana;
- Incentivar o aluno a expressar-se oralmente, manifestando seus posicionamentos e estimular o trabalho em equipe.

4.1.2 Objetivos específicos

- Compreender a influência dos fatores sócio/econômicos no período da revolução industrial no Séc. XVIII e meados do XIX;
- Estimular a reflexão e o questionamento sobre o principal objetivo das máquinas a vapor;
- Conhecer o funcionamento das máquinas;
- Reconhecer o processo histórico da criação da máquina a vapor;
- Conhecer a teoria de Carnot para funcionamento básico da máquina a vapor;
- Apresentar fatos históricos para a formulação da Segunda Lei da Termodinâmica;
- Evidenciar que o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica não foi produto de uma só pessoa;
- Fortalecer o ensino e o aprendizado de uma turma do segundo ano do ensino médio utilizando episódios (textos) relacionados à História da Ciência.

4.1.3 Conteúdos

- Carnot e a Revolução Industrial;
- Breve histórico da máquina a vapor antes de Carnot;
- Carnot e a máquina a vapor;
- Carnot: Caminhos para o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica.

4.1.4 Estratégias

- Aula expositiva com recursos audiovisuais;
- Análise e leitura de texto;
- Debates em pequenos grupos;
- Mini seminários;
- Construção de painéis com ideias centrais do texto;
- Discutir o que os alunos já sabiam e o que não sabiam sobre a temática.

4.1.5 Avaliação

Avaliar é a parte mais difícil, pois está ligada a um processo maior que é o processo de ensino-aprendizagem e que deve, quando necessário, passar por reajustes. A avaliação deve ocorrer em diversos momentos da aula de forma a ser contínua e os instrumentos de avaliação também devem ser diversos.

- Organização de seminários;
- Debates acerca da história da máquina térmica e relacionando-a com o contexto sociocultural da época;
- Atividades individuais ou em equipe;
- Exposição e apresentação de painéis;
- Participação direta nas atividades propostas;
- Assiduidade nas aulas.

4.1.6 Cronograma das aulas

Quadro 1 - Descrição da sequência didática para ser desenvolvida em sala de aula.

TÍTULO: A evolução Histórica da máquina térmica de Carnot como proposta para o ensino da Segunda Lei da Termodinâmica					
Problematização Inicial	Conteúdos /Texto	Atividades a serem trabalhadas	Objetivos	Recursos Didáticos	Duração 450 min
Encontro 1 a): Fazer uma breve apresentação da pesquisa para os alunos; b): Aplicação de um questionário para saber dos conhecimentos prévios dos alunos sobre o assunto a ser trabalhado; c): distribuir o paradidático entre os alunos e deverão fazer a leitura em casa, visando subsidiar a discussão programada para a segunda aula.					90min
	Carnot e a Revolução	1. Retomada a aula anterior comentando	1. Compreender a influência dos	Texto 1: Paradidático	90 min

Encontro 2	Industrial	os questionários da primeira aula. 2. Leitura do texto, aula dialogada seguida de trocas de conhecimento com os alunos. 3. Apresentação de um exercício em equipe.	fatores sócio/econômicos no período da revolução industrial no Séc. XVIII e meados do XIX.		
Encontro 3	Breve histórico da máquina a vapor antes de Carnot	1. Inicia a aula falando brevemente da aula anterior; 2. Aula expositiva enfocando a evolução da máquina térmica. 3. Mini seminários por cada equipe de alunos.	1. Conhecer o principal objetivo das máquinas. 2. Compreender a Máquinas a vapor simples. 3. Reconhecer o processo histórico da criação da máquina a vapor	Texto 2: Paradidático	90 min
Encontro 4	Carnot e a máquina a vapor	1. Inicia a aula lembrando a aula anterior; 2. Aula expositiva com slides 3. Leitura do texto, aula dialogada. 4. Organização e apresentação de painéis.	1. Estimular a reflexão e o questionamento sobre o funcionamento das máquinas simples. 2. Reconhecer o processo histórico da criação da máquina a vapor. 3. Conhecer a teoria de Carnot para funcionamento básico da máquina a vapor.	Texto 3: Paradidático	90 min
Encontro 5	Carnot: Caminhos para o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica	Inicia a aula lembrando tópicos da aula anterior. 1. Leitura do texto, Aula dialogada. 2. Procurar no texto o que eles já sabiam e não sabia e um	1. Apresentar fatos históricos para a formulação da 2ª lei da termodinâmica. 2. Evidenciar	Texto 4: Paradidático	90 min

		questionário. 3. Apresentar painéis	que a 2ª lei da termodinâmica não é produto de uma só pessoa		
Atividade em grupo: 1) ler, interpretar e discutir textos do paradidático; 2) completar os exercícios; 3) construir painéis sobre o texto.					
Avaliação de cada encontro: (será de forma contínua e estará descrita em cada momento nas atividades).					

Fonte: Quadro elaborado pelo pesquisador.

4.2 Descrição da sequência didática

A descrição de cada momento segue de forma detalhadamente em uma programação prevista para ser realizada em cinco encontros de noventa minutos (90 minutos) cada, que dá um total de quatrocentos e cinquenta minutos (450 minutos) em sala de aula com os alunos de uma turma do segundo ano da escola básica. Todos os textos e as atividades trabalhadas estarão em Apêndice.

Encontro 1: Problematização inicial

Logo neste primeiro encontro o professor faz uma apresentação geral da pesquisa de como será realizada, em seguida propõe aos alunos um questionário com oito (8) questões abertas e fechadas (o questionário estará no Apêndice A). O objetivo dessa atividade é identificar as concepções prévias dos alunos, concernentes ao assunto a ser trabalhado através dos respectivos textos do paradidático, extraídos da própria Fundamentação Teórica. Este questionário não poderá servir como sistema de avaliação de aprendizagem dos alunos. Devem-se deixar os alunos à vontade para pensarem e responderem. No final do primeiro encontro distribuir para os alunos o paradidático para um primeiro contato. Eles deverão fazer a leitura em casa, visando subsidiar a discussão programada para o segundo encontro. Esta atividade terá duração de noventa minutos (90 minutos).

Encontro 2: Carnot e a Revolução Industrial

Retoma-se a aula anterior comentando de forma geral o questionário do primeiro encontro e logo em seguida apresenta-se o primeiro conteúdo do paradidático, ou seja, o primeiro texto a ser trabalhado em sala de aula:

Conteúdo: “Carnot e a Revolução Industrial” (Texto 1 extraído da Fundamentação Teórica). Deve-se fazer uma leitura compartilhada do texto visando subsidiar a discussão seguido de aula dialogada. Estes procedimentos buscam estimular os alunos e contribuir para a aprendizagem dos conceitos fundamentais previstos para a aula. Ainda no segundo encontro apresenta-se primeira atividade.

Atividade 1:

Divide-se a classe em equipe de três ou quatro alunos para a discussão do texto do paradidático e cada grupo após a leitura deve transcrever do texto as ideias centrais, em seguida uma pessoa de cada grupo deve apresentar (em 15 minutos) para a classe.

Objetivos:

Levar o aluno a compreender a influência dos fatores sócio/econômicos no período da revolução industrial no século XVIII e meados do XIX para a sociedade.

Avaliação:

O professor propõe um questionário com quatro (4) questões abertas e fechadas extraída do texto em estudo, estas servirão como forma de avaliação (o questionário está no Apêndice B). Caso não dê tempo realizar esta atividade, os grupos se prontificarão a se reunirem e realizarem a tarefa, para ser entregue no próximo encontro.

Tempo de duração do encontro:

Este encontro terá duração é de noventa minutos (90 minutos).

Encontro 3: Breve Histórico da máquina a vapor antes de Carnot

Inicia a aula reforçando pontos do encontro anterior para tirar certas dúvidas dos alunos e em seguida apresenta-se o segundo texto.

Conteúdo: “Breve Histórico da máquina a vapor antes de Carnot” (Texto 2 extraído da Fundamentação Teórica). O professor apresenta o texto à turma e abre o dialogo sobre a máquina térmica antes de Carnot, mostrando que todo conhecimento sobre a máquina térmica era apenas no campo da prática.

Atividade 1: Em equipe de três alunos o professor sugeriu para que cada equipe leia e interprete o texto visando se familiarizar. Em seguida uma pessoa de cada equipe apresenta seu ponto de vista.

Atividade 2: Cada grupo deve resolver um questionário de cinco questões com perguntas abertas referente a máquina térmica antes de Sadi Carnot (veja apêndice B).

Objetivos:

1. Conhecer o principal objetivo das máquinas;

2. Compreender a máquinas a vapor simples;
3. Reconhecer o processo histórico da criação da máquina a vapor.

Avaliação:

Organizar e apresentar um mini seminários com duração de quinze minutos (15 minutos) para cada equipe, no final o professor faz as considerações.

Tempo de duração do encontro:

O encontro está previsto para noventa minutos (90 minutos).

Encontro 4: Carnot e a máquina a vapor

Inicia o quarto encontro comentando brevemente o texto proposto no encontro anterior e o questionário, faz-se necessário ainda relembrar alguns pontos da aula anterior para fortalecer ainda mais o conhecimento dos alunos sobre os fatores que levaram a desencadear a revolução industrial. Em seguida apresenta-se o novo conteúdo do paradidático, ou seja, o terceiro texto:

Conteúdo: “Carnot e a máquina a vapor” (Texto 3 extraído da Fundamentação Teórica).

Apresentação da apostila digital (slides): nesta etapa o professor deverá apresentar uma aula expositiva usando data show, este tipo recurso ajuda a mostrar as ilustrações que foram extraídas do texto do paradidático. Neste encontro o professor comenta a importância do trabalho de Carnot e sobre a máquina térmica para o processo da formulação da segunda lei da Termodinâmica.

Atividade 1:

Sugerir que a classe faça uma leitura individual do terceiro texto do paradidático para as discussões. A leitura esclarecerá o assunto como um todo, permitindo mostrar os aspectos da natureza da ciência, em seguida o professor necessitará dialogar com os alunos explicando o texto, parte por parte, para tirar certas dúvidas caso tenham.

Atividade 2:

O professor deve propor que cada grupo organize um painel mostrando as ideias de Carnot para a máquina térmica.

Objetivos:

- i) Estimular a reflexão e o questionamento sobre o funcionamento da máquina a vapor;
- ii) Reconhecer o processo histórico da criação da máquina a vapor;
- iii) Conhecer a teoria de Carnot para funcionamento básico da máquina a vapor.

Avaliação:

Cada grupo deve apresentar seu painel para a classe. Esta servirá como avaliação. O professor será o intermediador entre os alunos e o texto esquematizado no painel.

Tempo de duração do encontro:

Noventa minutos (90 minutos).

Encontro 5: Carnot: Caminhos para o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica.

Inicia-se a aula fazendo um breve comentário do encontro anterior e da atividade proposta, em seguida apresenta-se o quarto texto do paradidático a ser trabalhado.

Conteúdo: “Carnot: Caminhos para o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica” (Texto 4 extraído da Fundamentação Teórica).

O professor deverá apresentar o texto à classe e dialogar com os alunos sobre os caminhos percorridos pelos Físicos para chegarem à formulação da segunda lei da termodinâmica. Em seguida solicitar a turma para ficar em forma circular. O professor pode problematizar a aula com um questionamento provocativo, por exemplo, quais contribuições que Sadi Carnot deu para a formulação da segunda lei da termodinâmica? Essa pergunta pode ser pertinente para abrir o diálogo do professor com os alunos, após o diálogo.

Atividade 1:

Propõe-se que os alunos construam tópicos da discussão da aula, o que não sabiam e o que já sabiam sobre o texto quatro (4).

Atividade 2:

Propor a turma para organizar um painel, este deve ser feito em equipe pelos alunos onde devem ser levados em conta os caminhos percorridos para se chegar ao enunciado da segunda lei da Termodinâmica.

Objetivos:

- i) Apresentar fatos históricos para a formulação da segunda lei da termodinâmica;
- ii) Evidenciar que a segunda lei da termodinâmica não é produto de uma só pessoa;
- iii) Fortalecer o conhecimento adquirido nas aulas anteriores;
- iv) Avaliar o aprendizado do aluno e, conseqüentemente, avaliar as contribuições dos textos históricos.

Avaliação:

Cada grupo deve apresentar o painel à classe e responder um questionário com cinco (5) questões discursivas e fechadas (vide apêndice – B), o questionário será trabalhado de forma individual podendo consultar o texto no paradidático.

Tempo de duração do encontro:

Este encontro está proposto para noventa minutos (90 minutos).

4.3 Analisando a consistência da sequência didática com alguns parâmetros de Forato.

Para a construção do plano de aulas tomamos como ponto de apoio alguns parâmetros de ações educacionais. As atividades propostas foram averiguadas constantemente pelo autor/pesquisador para ver se de fato estava coerente com os objetivos pedagógicos estabelecidos pelos parâmetros (FORATO, 2009, p. 186-196). A proposta foi desenvolvida em função, ou seja, via parâmetros para que de alguma forma ficasse coerente com o embasamento teórico metodológico desenvolvido aqui (na seção, 1.2). A seguir confrontaremos os parâmetros com as atividades a serem desenvolvidas na sequência didática e como estes parâmetros orientam o planejamento pedagógico de cada atividade, objetivos, estratégias e as avaliações (FORATO, 2009, p. 190).

No encontro 1, deve ser a apresentada a proposta de ensino para os alunos mostrando de forma breve como vão ser trabalhadas as atividades visando um contato inicial, e em seguida é aplicado um questionário (vide apêndice A) para saber os conhecimentos prévios dos alunos (P.6⁵¹; P.1), além de servir como dados para uma futura análise, esta ideia parte de um planejamento pedagógico, de maneira que o aluno se familiarize com o assunto a ser abordado (P.1). O objetivo do questionário na problematização inicial é diagnosticar (P.3) os conhecimentos prévios dos alunos, provocando desconforto e conflitos (FORATO, 2009, p. 194) podendo ainda despertar a leitura gerando curiosidade acerca do assunto dentro da faixa etária pretendida (P.3; P.7), ou seja, para alunos do segundo ano médio de uma escola da rede pública de ensino.

No encontro 2, usar textos (P.2; P.3; P.8) que enfoque a História da Ciência em sala de aula também é uma ferreamente sustentada por (FORATO 2009; CARVALHO, 2014), reforçando esta ideia a BNCC (BRASIL, 2015, p. 15) também aceita que a física é uma construção humana e assim sendo devemos recorrer a fatos históricos para que o conhecimento científico tenha sentido (FORATO, 2009, p. 191, 192), (P.2; P.6).

⁵¹ A utilização da letra “P”. Seguida de um número é para representar cada parâmetro que foi proposto na seção 1.2.

No encontro 3, trabalhar com textos em sala de aula requer cuidado e estratégias (P.8; P.3; P.6), Forato (2009) complementa dizendo que: “Uma estratégia pedagógica pode se apresentar bons resultados é a problematização de cada mensagem acerca da natureza da ciência pretendida em distintas atividades pedagógicas e em diferentes conteúdos históricos (P.1; P.9). Permite ao aluno confrontar-se com um mesmo conteúdo por meio de diferentes provocações e mediante situações didáticas diversas, favorece a reflexão e o amadurecimento da relação entre o aluno e o saber”(FORATO, p. 196).

No encontro 4 sugerimos uma aula expositiva usando recursos visuais, ou seja, data show sobre o seguinte tema: “*Carnot e a máquina a vapor*”, planejar a aula usando os recursos digitais é um fator claro visão auxiliar o professor em sua ministração (P.1; P.3; P.4; P.8), a atividade trabalhada com os alunos deve ser um ponto de evolução conceitual, explicando os onde cada grupo pode construir um painel mostrando de forma breve a teoria de Carnot para a máquina térmica(FORATO, 2009, p. 196). Esta atividade promove o trabalho em equipe podendo fortalecer a aprendizagem dos alunos acerca do tema abordado (P.5; P.6), além de favorecer o exercício da autonomia e a formação crítica (P.1).

Já no encontro 5, que é a situação final, será trabalhado o texto: “*Carnot: Caminhos para o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica*”(P.1; P.3; P.8) em seguida deve ser solicitado para organizarem painéis por cada equipe, e deve ser apresentado em forma de mini seminários(P.3; P.5). Esta atividade visa mostrar que a Ciência é uma construção Humana, portanto, ao trabalhar esta atividade devem-se levar em consideração os caminhos percorridos por outros cientistas para se chegar ao enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Construir o conhecimento não é algo simples, por vezes é doloroso e requer atenção e concentração por parte do pesquisador. O fazer ciência implica em retornar muitas vezes ao ponto de origem para reanalisar o processo de construção. Além disso, a construção dos saberes na ciência se dão num processo complexo, carregado de influências pessoais, sociais, religiosas, políticas e econômicas.

Assim, tentamos entender com base na literatura, as dificuldades de professores e alunos, respectivamente, na disciplina de Física. É fato que algumas dessas dificuldades estão relacionadas com as características própria da disciplina e outras com o modo pelo qual se dá o processo de ensino-aprendizagem. Como abordagem facilitadora desse processo, recorreremos ao uso direto de textos de boa qualidade para melhor compreender a temática.

Procuramos neste trabalho desenvolver uma proposta de ensino que pretende contribuir para o ensino de Física na escola básica e como resultado final, deixamos um produto educacional, ou seja, um paradidático composto por um conjunto de textos, visando oferecer uma maior clareza ao processo histórico relacionado ao desenvolvimento da Segunda Lei da Termodinâmica. Além do mais, propomos um plano de aulas e atividades seguidas de estratégias, que deverão dar suporte para o professor trabalhar em sala de aula junto aos alunos. Para guiar e dar sustentação a proposta de ensino aqui sugerida, utilizamos os parâmetros de ações educacionais (FORATO, 2009, p. 186-198) mediante o entendimento de que o ambiente educacional tem inúmeros obstáculos de enfrentamento a ser superados pelo profissional da educação básica.

As atividades desenvolvidas nesta pesquisa residem na tentativa de contemplar os aspectos formativos voltados para uma temática da Física entrelaçado com outros saberes para a construção dos conhecimentos científico do aluno. Nossa preocupação maior foi favorecer no aluno entendimento científico a partir do ensaio escrito por Sadi Carnot em 1824, para isso usamos textos, digo, um paradidático que construímos para uma ação reflexiva do conhecimento como propõe Carvalho (2014). Portanto, esta ação reflexiva acontecerá a partir das leituras e dos debates dos textos, devendo promover nos alunos a oportunidade de poder expressar seu entendimento, ao tempo que evolui seus conhecimentos, tornando este assunto menos abstrato. Por fim, como pressuposto para futuras pesquisas, esperamos que os professores de Física ao ler este material possam desfrutar e utilizá-lo, na tentativa de subsidiar os conhecimentos e informações nele contido, objetivando uma perspectiva

histórica, rica em detalhes, capaz de promover um ganho conceitual mais significativo e interdisciplinar.

REFERÊNCIAS

- ALLCHIN, D. Pseudohistory and Pseudoscience. **Science and Education** 13: 179-195-2004.
- ARTUSO, Alysson Ramos. **Física para o Ensino Médio**. v. 2. Curitiba: Positivo, 2013.
- BEM-DOV, Yoav. **Convite à física**. Tradução de Maria Luiza X. de A. Borges. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1996.
- BERNAL, J. D. **Desenvolvimento das Ciências nos Séculos XVIII e XIX**. Ciência na História. Lisboa; LTD, 1965, 541, p., v. 2.
- BEZERRA SILVA, Isa Michelle; CASTILHO SILVA, Weimar. **Experimentação: uma alternativa para o progresso Educacional e desenvolvimento social**. In: 1ª JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO DO IFTO, 2010. ANAIS ELETRÔNICOS. TOCANTINS, JICE, 2010.
- BRASIL. **Orientações Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**; volume 2 - Brasília: Ministério da Educação, SEMTEC, 2006.
- _____. **Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio**. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC; SEMTEC, 2002.
- _____. **Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**. Brasília: Ministério da Educação e Cultura, SEMETEC, 1997, 2000. Disponível em: < <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/blegais.pdf> >. Acesso em: 28 dez. 2015.
- _____. **Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**. Brasília: Ministério da Educação. Secretária da Educação Média e Tecnológica. Brasília, 2006. Disponível em < <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/blegais.pdf> > acessado e 28/12/2015.
- _____. **Lei e diretrizes para a educação básica**. Brasília, 2000. Ministério da Educação e Cultura; Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Disponível em < <http://portal.mec.gov.br/par/323-secretarias-112877938/orgaos-vinculados-82187207/12992-diretrizes-para-a-educacao-basica> > acessado em 10/01/2016.
- _____. **Base Nacional Curricular Comum (BNCC)**. Ministério da Educação e Cultura; Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Brasília, 2015. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br>. Acesso em: 18 jul. 2015.
- _____. **Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (DCNEM)**. Ministério da Educação e Cultura. SEMETEC, 1998. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/res0398.pdf>. Acesso em 20 de Jul. 2015.

_____. **Diretrizes Curriculares Nacionais para a Formação de Professores da Educação Básica.** Ministério da Educação e Cultura. Brasília, 2001. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/009.pdf>. Acesso em: 04 de ago. de 2015.

CARNOT, Sadi. **Reflections on the motive power on the motive power of Fire and other Papers on the Second Law of Thermodynamics by 1824.** E. Clayperon and R. Clausius. 2 ed. Mineola, Ny: Dover, 1890.

CARVALHO, A. Maria Pessoa de. Visão sobre a Natureza da Ciência construída a partir do uso de um texto histórico na sala de aula média. **REEC. Revista Electrónica de Enseñaza de las Ciências**, v. 10, p. 1-22, 2011.

_____. **Calor e Temperatura: um ensino por investigação.** São Paulo: Livraria da Física, 2014.

_____. **Ensino de Física.** Ed. Adilson Pereira, São Paulo, 2010. BEZERRA SILVA (1), Isa Michelle e CASTILHO SILVA Weimar (2): Experimentação: uma alternativa para o progresso Educacional e desenvolvimento social. ANAIS ELETRÔNICOS - 1ª JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO DO IFTO - (2010).

CASTRO, A. D. Prefácio. In: CARVALHO, A. M. P. (Org.). **Ensino de Ciências: unindo a pesquisa e a prática.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. p. 3-21.

CASTRO, R. S. História da Ciência: Investigando como usá-la num curso do segundo grau. **Cadernos Catarinenses de Ensino de Física.** Florianópolis, 1992. v. 9, n. 3, p. 225-237.

CAVALCANTE, Anderson Brasil Silva. **Energia nuclear no ensino médio: uma análise dos livros didáticos de Física dos programas PNLEM 2007 e PNLD 2012.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Belo Horizonte, 2013.

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

COVOLAN, Silvia Cristina Teodoro. **O conceito de entropia num curso destinado ao Ensino Médio a partir de concepções prévias dos estudantes e da História da Ciência.** 2004. Campinas - SP: [s.n.],. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação, 2004.

DIAS, Penha Maria Cardoso. A (Im) Pertinência da História ao Aprendizado da Física (um Estudo de Caso). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 2, jun. 2001.

_____. A procura do trabalho perdido. Instituto de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física.** Rio de Janeiro - RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 29, n. 4, p. 493-498, 2007.

_____. Sadi Carnot: pré-história e história. **Revista USP**, setembro-novembro 1990.

DÍAZ, Sandra Milena Forero. **Sadi Carnot e a Segunda Lei da Termodinâmica** (Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Doctoren Educación). Departamento

de Física, Faculdade de Ciência y Tecnologia, Universidade Pedagógica Nacional, Bogotá, Colômbia, 2014.

_____. Sadi Carnot, el ciclo ideal. Departamento de Física, Faculdade de Ciência y Tecnologia, Universidade Pedagógica Nacional, Calle 72 No. 11-86, Bogotá, Colômbia. El ciclo ideal, **Lat. Am. J. Phys. Educ.** Vol. 7, No. 3, Sept, 2013.

DOMINGUES, José Juiz; TOSCHI, Nirza Seabra e OLIVEIRA, João Ferreira de. A reforma do Ensino Médio: a nova formulação curricular e a realidade da escola pública. **Educ. Soc.** [online]. 2000, vol.21, n.70, pp. 63-79.

ERLICHSON, Herman. Sadi Carnot, Founder of the Second Law of Thermodynamics, Department of Engineering Science and Physics, College of Staten Island, City University of New York, Staten Island, NY 10314, USA, **Eur. J. Phys.** 20 (1999) 183–192. Printed in the UK.

FERREIRA, Juliana Mesquita Hidalgo; MARTINS, André Ferrer P., **História e Filosofia da Ciência**. Natal, RN: EDUFRN, 2010.

FONSECA, José Saraiva da. **Metodologia da Pesquisa Científica**, UECE/ Centro de Educação. 2002.

FORATO, Thaís Cyrino de Mello. **A natureza da ciência como saber escolar, um estudo de caso a partir da história da luz**. Tese (Doutorado). Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, 2009.

FREIRE JR, Olival. A relevância da filosofia e da história das ciências para a formação dos professores de ciências. In: SILVA FILHO, W. J. et al. **Epistemologia e Ensino de Ciências**. Salvador: Ed. Arcádia, 2002, p. 13-30.

GATTI, Sandra Regina Teodoro; NARDI, Roberto; SILVA, D. da. História da ciência no ensino de Física: um estudo sobre o ensino de atração gravitacional desenvolvido com futuros professores. **Investigações de Ciências**, v. 15, p. 7-59, 2010.

GERHADT, Tatiana Engel. **Metodologia da pesquisa científica**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Secretaria de Educação a Distância. Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural. 2009.

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

GOMES, TUAN GARCIA. **Uma história da radioatividade para a escola básica: desafios e propostas**. São Paulo, 2015. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências.

GOMES, J. L. A. M. C. **Conceito de Calor: contexto histórico e proposta para a sala de aula**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia. Campina Grande, 2013.

HUBERMAN, L. **História da riqueza do homem**. Rio de Janeiro, RJ: Editora Zahar, 1981.

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

KAUARK, Fabiana Silva da. et al. **Metodologia da pesquisa um guia prático**, editora: via Litterarum, Itabuna/ Bahia, 2010.

KUHN, Thomas S. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. 5. ed. São Paulo: Perspectiva, 1998.

LEITE, Emílio Álvaro. **Leitura no ensino de Física: concepções, sentidos, possibilidade e dificuldades segundo o olhar de professores**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

LINHARES, P. Marília e REIS, M. Ernesto. Estudo de caso como estratégia de ensino na formação de professores de física. **Ciência & Educação**, v. 14, n. 3, p. 555-74, 2008.

MACHADO, D. I.; NARDI, R. Construção de conceitos de física moderna e sobre a natureza da ciência com o suporte da hipermídia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 473-485, out.-dez. 2006.

MANTOUX, Paul. **A Revolução Industrial**. São Paulo: Editora Hucitec, 2ª edição, 1927.

MARTINS; R. A. A história das ciências e seus usos na educação. In: SILVA, C. C. (Org.). **Estudos de História e Filosofia das Ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

MARTINS, André Ferrer P. História e Filosofia da Ciência no ensino: **há muitas pedras nesse caminho**. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, p. 112-131, 2007.

MATTHEWS, M. **Science Teaching: the role of history and philosophy of science**. New York: Routledge. 1994.

MEDEIROS, Alexandre et al. Distorções conceituais em imagens de livros textos: o caso do experimento de Joule com o calorímetro de pás. VII Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física, 2000. Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: EPEF, 2000.

MENEZES L. C, de: O novo público e a nova natureza do ensino médio. **Estudos Avançados**. V.15, nº42, 2001.

NASCIMENTO, Cássius K. et al. 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, 2004.

NÓBREGA, Mayane Leite da. **Segunda lei da termodinâmica: os caminhos percorridos por William Thomson**. 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Bahia, [2009].

PÁDUA, Antônio Braz de. et al. Termodinâmica clássica ou termodinâmica do equilíbrio: aspectos conceituais básicos. **Ciências Exatas e da Terra**. Londrina, v. 29, n. 1, p. 57-84, jan./jun. 2008.

PASSOS, J.C. (2002). **Em torno de Carnot e sobre a segunda lei da termodinâmica**. Disponível em: CONEM-2002, CD-ROM, 2002. p.1-10.

_____. **A Importância do trabalho de Carnot para o Ensino da Termodinâmica**. Disponível em: CONBENGE-2003.

PEDUZZI, L. Q. Sobre a utilização didática da História da Ciência. In: PIETROCOLA, Maurício (Org.). **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia em uma concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001. p. 151-170.

PIRES, Antônio S. T. **Evolução das ideias da Física**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

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

RICARDO, E. Carlos. Categorias da inserção da História e Filosofia da Ciência no ensino de ciências da natureza: Educação em Ciências e Matemática. **R. Educ. Públ.** Cuiabá, v. 23, n. 54, p. 943-970, set./dez. 2014.

ROCHA, José Fernando M. et al. **Origens e evolução das ideias da física**. Salvador: EDUFBA, 2002.

ROSA, Carlos Augusto de Proença. **História da ciência: o pensamento científico e a ciência no século XIX**. 2. ed. Brasília: FUNAG, 2012.

SAVERY, T. **The Miner's Friend; or, an engine to raise water by fire**. S. Crouch, London, 1827.

SANTOS, Zononi Tadeu Saraiva dos. **Ensino de Entropia: um enfoque histórico e epistemológico**. 2009. Tese. (Doutorado). Universidade Federal de Rio Grande do Norte, [2009].

SILVA da Cruz, V. B. **A História e Filosofia da Ciência no Ensino Médio: a visão dos futuros professores de Física**. Universidade Federal do Piauí (UFPI), 2011.

SILVA, B. V. C. Discutindo modelos de visão utilizando a história da ciência. **Holos**, v.3, p.180-190, 2009b.

SILVA, V. R. Estratégias de leitura e competência leitora: contribuições para prática de ensino de História. **História**. SP, n. 23, p. 69-83, 2004.

SILVEIRA, Tatiane E. Gerhardt. **Métodos de pesquisa**. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

SOARES, Tatiane Felix. **Livros didáticos e o desenvolvimento da termodinâmica**: a Era das máquinas térmicas. 2014. Trabalho de conclusão de curso. (TCC). Universidade Estadual da Paraíba, 2014.

SOUZA, J. A. **Uma abordagem histórica para o ensino do princípio da inércia**. Tese (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

TRIVIÑOS, Augusto Nivaldo Silva. **Introdução à Pesquisa em Ciências Sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.

VANNUCH, A. I. **História e Filosofia da Ciência**: da teoria para a sala de aula. Dissertação (Mestrado apresentado no Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo). São Paulo, 1996.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PARA O PRIMEIRO ENCONTRO

1. O que é Termodinâmica? E quais são suas leis?

2. Você poderia dizer alguns fatores que levaram a primeira revolução industrial?

3. No seu entendimento a física contribuiu de alguma forma com desenvolvimento da primeira revolução industrial?

Sim [] Não []

Explique de forma breve.

4. Se seu professor lhe perguntasse qual a principal função de uma máquina térmica, o que você responderia?

5. É possível que uma máquina consiga transformar toda a energia que ela recebe da fonte quente em trabalho?

Sim [] Não []

6. Você conhece a teoria de Sadi Carnot para a máquina térmica?

Sim [] Não []

Se sua resposta foi sim, Justifique usando seu entendimento?

7. Se seu professor lhe perguntasse o que diz o enunciado da segunda lei da termodinâmica, o que você responderia.

8. Você conhece algum cientista que tenha contribuído com o desenvolvimento da segunda lei da termodinâmica? Se sim, Quais?

APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL



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

ALEXANDRE DOS SANTOS PASCOAL

**A EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MÁQUINA TÉRMICA DE CARNOT COMO
PROPOSTA PARA O ENSINO DA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA**

Campina Grande, Agosto de 2016.

PB – Brasil.

ALEXANDRE DOS SANTOS PASCOAL

**A EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA MÁQUINA TÉRMICA DE CARNOT COMO
PROPOSTA PARA O ENSINO DA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA**

Produto da dissertação apresentado ao programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito legal para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências e Educação Matemática com especificidade em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Barros

Área de concentração: Ensino de Física

Campina Grande, Agosto de 2016.

PB – Brasil

INTRODUÇÃO

No século final do XVIII e meados do século XIX foi um tempo marcante para a Europa com o desenvolvimento tecnológico da máquina a vapor. Estes foram períodos de transformações onde representam a era do vapor e do ferro. O vapor e o ferro apontam claramente para a utilização das máquinas térmicas que tinham a finalidade inicial de drenar água das minas de carvão. Ao explorar estas fontes de energias a Inglaterra passou por um processo de enriquecimento contando com a genialidade de engenheiros, estes estavam bem à frente da França com o uso de suas máquinas térmicas. Em passo acelerado os franceses perceberam que a prosperidade da Inglaterra era devido à sua industrialização.

Surge neste cenário na França um jovem por nome de Nicolas Léonard Sadi Carnot, ele estudou na Escola Politécnica e concentrou seus estudos em física, engenharia e economia. Com apenas 28 anos publicou um manuscrito tendo por título *Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas equipas ao desenvolvimento dessa potência*. Baseou seu estudo teórico numa máquina a vapor ideal, em que todas as transformações deveriam ser reversíveis.

É sobre esse período, a teórica criada por esse cientista e a relação desta com a segunda lei da termodinâmica que ora apresentamos esse material paradidático que está dividido em quatro capítulos. No primeiro capítulo apresentamos uma rápida visão dos eventos inerente à revolução industrial relacionado aos aspectos econômico, sociais e tecnológicos. No segundo capítulo, faremos um breve histórico da máquina térmica antes de Sadi Carnot, mostraremos que essa máquina térmica tinha muitas aplicações no seguimento econômico, todavia o conhecimento sobre ela ainda era puramente prático.

No terceiro capítulo contemplamos a teoria científica de Carnot que explica o funcionamento da máquina térmica, por conseguinte também é através do seu manuscrito que outros cientistas encontram as raízes para formulação do enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica. No capítulo quatro procuramos traçar uma linha Histórica da obra de Carnot e caminhos para o enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica. Demonstramos a importância e os desdobramentos dos estudos de Carnot em obras de Cientistas Importantes tais como Clapeyron, William Thomson e Clausius que perceberam a importância daquela obra para a formulação da Segunda Lei da Termodinâmica.

CAPÍTULO 1: REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

1.1 Aspectos econômicos e avanços tecnológicos

O período referente aos finais do século XVIII e meados do XIX corresponde a uma fase de profundas mudanças e transformações econômicas e avanços tecnológicos na Europa. A Revolução Industrial, ocorrida inicialmente por volta de 1750, na Inglaterra, neste período o capitalismo começava a completar sua formação, atrelado ao desenvolvimento da máquina térmica, seguida de aprofundados estudos sobre a natureza da energia, do calor e do trabalho. A revolução industrial modificou as relações de trabalho e permitiu a produção em larga escala de inúmeros produtos, oferecendo itens que proporcionaria maior conforto e a um preço menor do que os artesanais.

Neste período, houve um aumento do uso de máquinas, em substituição a mão de obra humana e animal. Era um tempo de mudanças no sistema artesanal de produção, diante do nascimento do sistema fabricas. A chegada da máquina de fogo aumentou os meios de produção e consolidou a tendência de concentração de lucros nas mãos de uma pequena parcela da sociedade.



Figura 1: Maria fumaça do início do século XIX.

Fonte: <http://olhares.sapo.pt/maria-fumaca-foto3133127.html>

Mesmo neste período, a revolução industrial também não correspondeu a um processo único, tanto quanto é possível reduzi-la a uma maneira breve. Contudo, a Inglaterra foi competente com o processo de acumulação primitiva de capital, com o seu comércio marítimo, com a exploração de suas colônias e principalmente com o apoio de seus corsários, piratas legalizados que tinham o apoio da coroa para saquear as embarcações inimigas, além disso, temos também a ética protestante ligado à doutrina calvinista, os puritanos, pregavam que todo indivíduo deveria ter o espírito de poupança, estes fatos levou a Inglaterra a uma acumulação de riquezas desencadeando pontos centrais para uma revolução⁵²: I) o aumento da indústria e da agricultura, com a aplicação da força motriz industrial na sociedade; II) o desenvolvimento do sistema fabril, e uma rápida velocidade dos transportes e das comunicações; III) o considerável acréscimo do controle por parte de banqueiros sobre quase todos os ramos de atividade econômica e política. Acerca deste intenso calor de uma revolução chamada de industrial, inicialmente em determinados pontos da Europa.

As inovações técnico-científicas desta etapa desarraigaram os resquícios da antiga ordem socioeconômica. As enormes somas necessárias para a implantação da nova maquinaria viabilizaram a concentração do capital, além disso, possibilitaram expansão das indústrias para áreas do mundo ainda subdesenvolvidas. Romperam-se as fronteiras nacionais; a sociedade urbana e industrial foi incentivada. O capitalismo foi se tornando ainda mais concentrado, os negócios e os mercados começaram a romper distâncias, inclusive oceânicas; a utilização da máquina a vapor foi crescendo em larga escala, tanto por terra, quanto por mar.

Podemos afirmar que em meados do século XVIII, a Inglaterra, em um período de prosperidade desemboca em um processo que viria transformar inteiramente o cenário social e suas relações econômicas e políticas. Na França, por outro lado, surgia a Revolução Francesa que se apoiava nos problemas de natureza política e militar, dificultando a corrida para alcançar a Inglaterra nos anos seguintes. A França tinha interesses no progresso, não só econômico e político, mas também militar; pelas mãos dos homens que buscavam aperfeiçoar as máquinas militares, surgiram, então, as propostas para as soluções dos problemas do calor, corrente de grande debate nesta época por homens da Ciência, bem como do limite e da eficiência das máquinas.

⁵² Historiadores costumam apontar causas para explicar o pioneirismo inglês na Revolução Industrial: a) acúmulo de capital, levando à expansão do comércio do ferro e da produção de algodão; b) oferta de mão de obra barata; c) aproveitamento das condições naturais, a posições geográficas e os recursos naturais como fonte de energia, assim como das minas de carvão (um importante mineral e matéria prima da época). Fonte: *Causa sobre essa Revolução Industrial*. Disponível: <http://www.consciencia.org/a-revolucao-industrial-dos-seculos-xix-e-xx>. E como complemento: <https://cesarmangolin.files.wordpress.com/2010/02/burns-historia-da-ivilizacaoc>. Acesso em: 14 ago. 2015.

Sobre esse tempo podemos avaliar da seguinte forma: Qualquer que tenha sido a razão do avanço britânico, ele não se deveu à superioridade tecnológica e científica, os Franceses estavam seguramente à frente dos ingleses, vantagem que a revolução francesa veio acentuar de forma marcante, pelo menos na matemática e na física. Poucos refinamentos intelectuais foram necessários para se fazer a revolução industrial. Suas invenções técnicas foram bastante modestas, e de maneira alguma estavam além dos limites de seus artesões e dos que trabalhavam em suas oficinas ou da capacidade construtiva de carpinteiros, moleiros e serralheiros.

Diante deste cenário de busca e desenvolvimento tecnológico houve uma migração da população do campo para a cidade. Desde o século XVIII a população mundial dobrou, devido à modernização dos avanços da ciência e da tecnologia. O aumento populacional foi seguido também pelo processo do deslocamento da população do campo para a cidade. A população rural doméstica ou estrangeira (esta sob a forma de imigração, principalmente irlandesa) era a fonte mais óbvia, suplementada pela mistura de pequenos produtores e trabalhadores pobres. Os homens tinham que ser atraídos para as novas ocupações, ou - como era mais provável - forçados a elas, pois inicialmente estiveram imunes a essas atrações ou relutantes em abandonar seu modo de vida tradicional e rural. A dificuldade social e econômica era a arma mais eficiente; em busca de salários mais altos e a liberdade maior que havia nas cidades.

É evidente que nenhuma economia industrial pode-se desenvolver além de certo ponto se não possui uma adequada capacidade de bens de capital. Para o estabelecimento e êxito do que se chamou a revolução industrial, às inovações tecnológicas tiveram um papel fundamental, destacadamente, a máquina a vapor. Esse instrumento se tornou o ponto de partida para o bom êxito da indústria pesada, para o meio de evolução de transporte. Para ano de 1824 a revolução industrial tinha atingido o seu máximo, a europeia estava vivenciando na prática esse período de intensa transformação e desenvolvimento, especialmente na Inglaterra.

Neste tempo o carvão era uma grande matéria prima, ele serviria como combustível para ser usado tanto nas fabricas quanto nas as máquinas. O vapor era usado em grandes fábricas, vindo especialmente do uso direto do carvão como podemos comprovar na figura 2. O vapor era o agente comumente usado nas máquinas como fonte de energia gerando movimento, a utilização do carvão a bordo dos navios que cruzam os oceanos reduzindo as distâncias entres os continentes, a exemplo também das locomotivas que percorriam os principais pontos entre os países europeus.



Figura 2: Carvão, uma das fontes de energia da Inglaterra no século XVIII.

Fonte: <https://ru.dreamstime.com/%8B%D0%B5%B5-image27063358>

1. Sugestões de leitura

- QUADROS, Sérgio. **A Termodinâmica e a invenção das máquinas térmicas** – SP: Scipione, 1996.
- Landes, David S. **Prometeu desacorrentado:** transformações tecnológicas e industriais na Europa ocidental, de 1750 até os dias de hoje. Rio de Janeiro: Campus / Elsevier, 2005.
- HUBERMAN, L. **História da riqueza do homem.** Rio de Janeiro, RJ: Editora Zahar, 1981.
- HOBBSAWM, Eric. **A Era das revoluções: 1789-1848.** Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2007.

2. Sugestões de vídeos / repositório de objetos educacionais:

- As consequências da revolução industrial – documentário da rede BBC.
Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=dYLNQyeDMwg>
https://www.youtube.com/watch?v=rW4CR_WM-AA
- Revolução Industrial – documentário. Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=TtDgBoky3fo>
<https://www.youtube.com/watch?v=1ReeVqNUoB4>
<https://www.youtube.com/watch?v=UFW4c8u-to>

3. Sugestão de atividade em equipe para o encontro 2.

1. Transcrever do texto as ideias centrais, em seguida uma pessoa de cada grupo deve apresenta-las (em 15 minutos) para toda a classe.

AVALIAÇÃO

Questionário:

1. Após ter lido o texto 1 você poderia citar alguns fatores para o desenvolvimento da primeira revolução industrial?

2. A revolução industrial foi importante para o desenvolvimento de alguns conceitos da termodinâmica tais como calor, trabalho e energia?

Sim [] Não []

Diga o por quê?

3. Você acredita que a máquina térmica trouxe algum benefício para a sociedade? Cite dois.

4. Você conseguiria citar algum interesse por parte da Inglaterra em usar em larga escala a máquina a vapor no período da revolução industrial?

Sim [] Não []

Justifique?

CAPÍTULO 2: BREVE HISTÓRICO DA MÁQUINA A VAPOR ANTES DE CARNOT

2.1 Máquina de Heron de Alexandria

As máquinas a vapor começaram a ser largamente usadas com algum sucesso no século XVII e XVIII. Todavia, sua história remonta a Heron de Alexandria, no século I a.C., que inventou uma máquina conhecida como eolípila. Movida a vapor, ela produzia um movimento por duas saídas.



Figura 3: Máquina de Heron de Alexandria
Fonte: <http://www.ijunoon.com/dictionary/Aeolipile/>

A eolípila era uma espécie de motor bem simples, formado por um objeto esférico e oco de cobre conectado a um pistão que, quando adicionando água em seu interior, era aquecido por uma caldeira. Por conseguinte, reagia em movimentos giratórios, produzindo ar quente que, a partir da água aquecida, expandia-se rapidamente em decorrência da alta pressão. Tal aparelho era uma categoria de máquina térmica, isto é, um dispositivo que transforma calor em trabalho mecânico. Entretanto, não despertou o interesse comercial, não foi usada com o objetivo prático de produzir grande quantidade de energia mecânica, ficando apenas marcado como um ponto inicial para avanços posteriores das máquinas a vapor. Somente nos séculos XVII e XVIII, vieram a serem construídas as primeiras máquinas térmicas capazes de realizar trabalho em escala industrial.

2.2 Máquina de Thomas Savery

A partir do final do século XVII, vários inventores aplicaram tempo e engenho na construção de máquinas bombeadoras de água. O militar inglês Thomas Savery (1650-1715) foi o primeiro a construir uma máquina a vapor comercialmente viável, concebida para a retirada da água dos poços de minas de carvão, que começavam a existir por causa de escassez de fontes na superfície. Apesar de revolucionária na época, aproximadamente 1698, a máquina apresentava a desvantagem de funcionar com alta pressão. Além disso, consumia grande quantidade de carvão, restringindo seu uso a lugares em que houvesse carvão barato e em abundância. A máquina de Savery foi desenvolvida na tentativa de resolver um problema técnico importante na época. A mineração de carvão, atividade em franca expansão devido à importância desse mineral como fonte de energia, era bastante profunda e constantemente inundada. Era necessária uma forma eficiente de bombeamento da água, eficiência que a máquina de Savery não possuía.

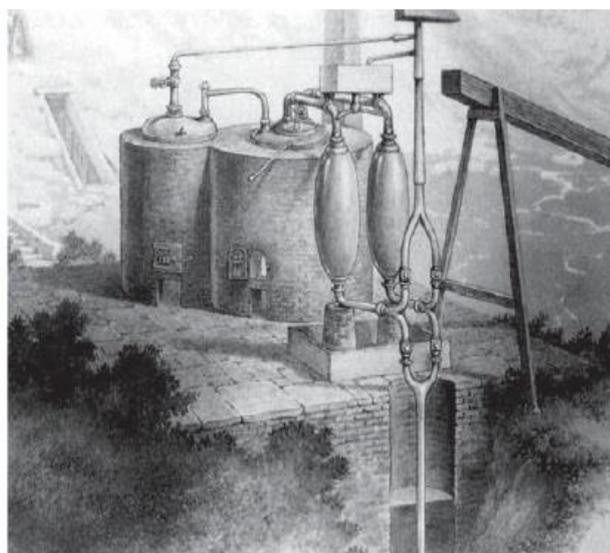


Figura 4: Bomba de água de Savery.

Fonte: <http://docplayer.com.br/Caldeiras-manoel-o-a-mendez>

2.3 Máquina de Thomas Newcomen

Seguiram-se as máquinas a vapor do também inglês Thomas Newcomens, que se destacavam pela diversificação de uso. Faziam mais do que apenas bombear água nas minas, elevavam pesos e a geravam movimento através do vapor de água, da maneira como ilustrada a seguir:

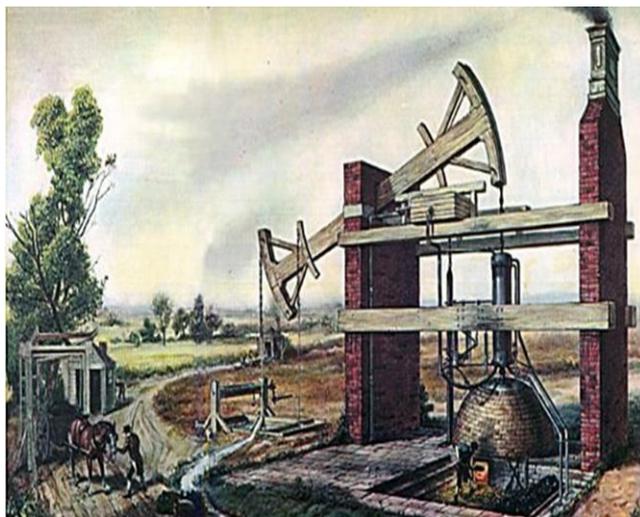


Figura 5: Máquina a vapor trabalhando nas minas

Fonte: <https://www.asme.engineering-history/newcomen-engine>

A figura 5 comprova que a máquina de Newcomen proporcionava realizar várias tarefas, além de tirar água de poços das minas de carvão. Ele introduziu um êmbolo ligado a um braço móvel; quando o vapor entra no cilindro, o êmbolo empurra o braço para cima, fazendo descer o porta-carga. Quando o cilindro é resfriado, a pressão interna diminui e a pressão atmosférica faz o êmbolo descer, elevando o braço móvel. Com o tempo, foram criadas novas máquinas que aproveitavam o movimento mecânico de gangorra do braço móvel para abrir as válvulas A, B e C e acionar novos dispositivos, aumentando o rendimento da máquina. Mesmo com o melhoramento em segurança e rendimento, tais máquinas inventadas no século XVIII ainda eram precárias, por consumirem grandes quantidades de combustível para produzir um trabalho relativamente pequeno.

2.4 Máquina de James Watt

Neste cenário de busca e de desenvolvimento de instrumentos, aparece James Watt, filho de um carpinteiro que vendia equipamentos para navios, tornou-se construtor de ferramentas na Universidade de Glasgow⁵³, nasceu em Greenock, na Escócia. Por volta de

⁵³ James Watt (1736-1819), matemático escocês e engenheiro. Não era um mecânico simples, suas habilidades lhe permitiram ser classificado como engenheiro da máquina a vapor. A melhoria introduzida no motor atmosférico de Newcomen levou a aprimorar a máquina a vapor, o que seria crítico no desenvolvimento da Revolução Industrial, na Inglaterra e em toda a Europa. Devido principalmente ao seu conhecimento de vapor, ciência aplicada e engenharia, melhorou a economia das máquinas. Seu esforço fora orientado no sentido de aumentar a capacidade das máquinas, com o objetivo de reduzir o custo da operação.

1770, Watt estudou a máquina de Newcomen e apresentou um novo modelo de máquina térmica, como mostra a figura 6:

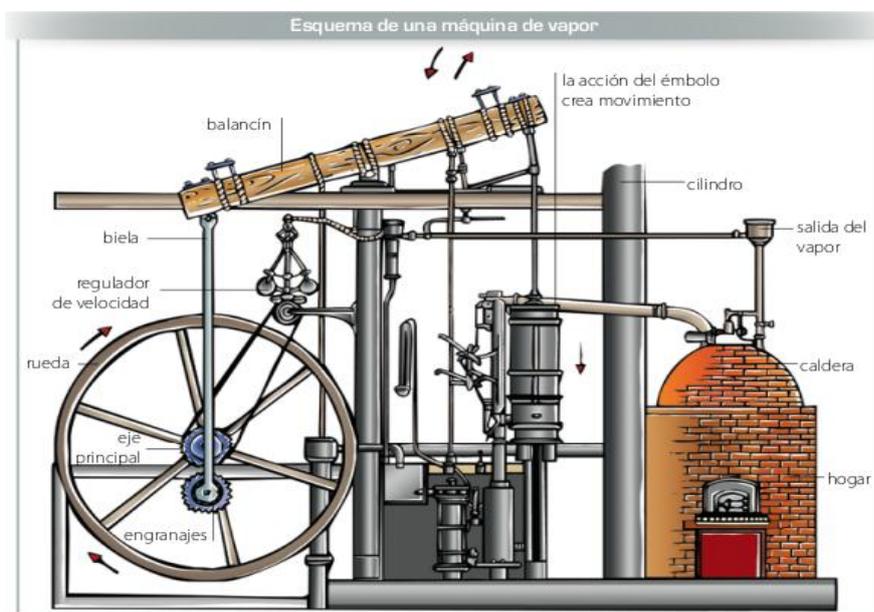


Figura 6: Modelo de máquina a vapor de James Watt

Fonte: <https://indiracorrealvareztecno.wordpress.com/autor/indiracorrea/>

A máquina a vapor de James Watt veio substituir, com enormes vantagens, as máquinas até então existentes. Foi inicialmente empregada para movimentar moinhos e acionar as bombas que retiravam água de minas subterrâneas e, posteriormente, nas locomotivas e barcos a vapor. Além disso, com o tempo, passou a ser usada nas indústrias, dando então origem a um grande surto de desenvolvimento na área tecnológica, sendo, por isso, considerada um dos fatores que provocaram a revolução industrial no século XVIII. Watt sugeria várias mudanças na máquina de Newcomen, seu maior interesse na técnica de funcionamento de uma bomba d'água aumentou quando tentava consertar uma pequena miniatura, utilizada em aulas de física na universidade. Watt não conseguia entender por que aquela pequena máquina, construída na proporção exata do modelo original, funcionava apenas por alguns ciclos e morria. Por que ela não tinha o mesmo desempenho da grande, sucesso absoluto nas minas de carvão? Ele sabia que o metal frio era capaz de condensar o vapor. Também podia verificar como o cilindro de sua pequena máquina ficava quente com a operação, e este aquecimento era certamente um desperdício.



Figura 7: James analisando uma réplica miniatura da máquina de Newcomen de 1767.

Fonte: <http://www.gettyimages.es/detail/ilustraci%C3%B3n/james-watt-james-watt-1736-1819-trying-to-improve-the-gr%C3%A1fico-de-stock/118155065>

Realizando um estudo minucioso nessas máquinas, Watt nota que seria necessário construir um cilindro grande na mesma proporção, já um cilindro grande e um pequeno não guardam a mesma relação de volume e superfície. Como o cilindro pequeno tem proporcionalmente mais superfície, o calor perdido no aquecimento do metal é também proporcionalmente maior. O que ocorria com a pequena máquina réplica, logo, o desperdício de calor em cada ciclo era proibitivo, levando a máquina a parar. Watt teve a ideia de separar o condensador do corpo do cilindro principal, também desenvolveu outras melhorias, como válvulas automatizadas e um sistema de engrenagens que permitia aproveitar o movimento de subida e descida do pistão para girar uma roda. Isso permitiu uma grande economia de calor e, portanto, de carvão, abrindo caminho para as máquinas a vapor móveis, como as utilizadas em locomotivas e navios.

Todo o desenvolvimento das máquinas térmicas foi principalmente prático⁵⁴, sem um tratamento teórico. Só depois de algumas décadas o funcionamento dessas máquinas recebeu um tratamento científico adequado.

⁵⁴ Vale apenas notar que o desenvolvimento das máquinas a vapor ocorreu em época e local bem definido, no final do século XVII e início do século XVIII na Inglaterra. Os nomes marcantes foram Savery, Newcomen e Watt, mas a história aponta outros também, que de alguma forma contribuíram na construção de máquinas.

1. Sugestões de Leitura

- PIRES, Antônio S. T. **Evolução das ideias da Física**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.
- SAVERY, T. **The Miner's Friend; or, an engine to raise water by fire**. S. Crouch, London, 1827.
- ROCHA, José Fernando M. et al. **Origens e evolução das ideias da física**. Salvador; EDUFBA, 2002.

2. Sugestões de vídeos / repositório de objetos educacionais:

Lendas da Ciência: Queimar – as máquinas que mudaram a história – TV- escola

Disponível em:

- <https://www.youtube.com/watch?v=0-VIYTgXE9Y>
- <https://www.youtube.com/watch?v=aU0E4FSAqw>
- <https://www.youtube.com/watch?v=CfZ2bnqFS88>

3. Sugestões de atividades para o encontro 3.

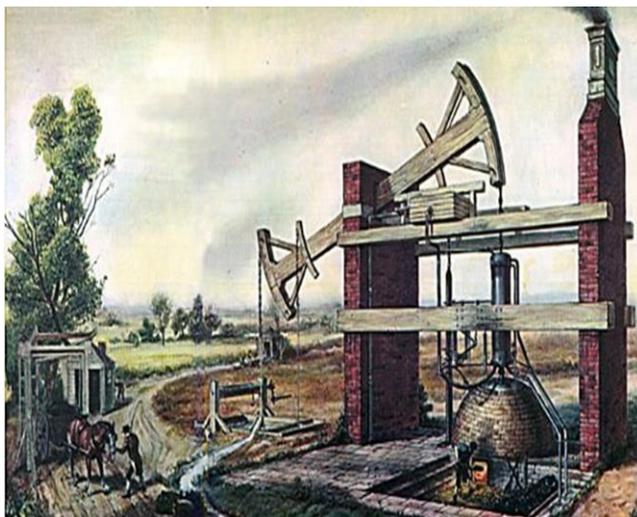
ATIVIDADE [1]:

Em equipe de três alunos o professor pede para que cada equipe leia e interprete o texto visando se familiarizar. Em seguida uma pessoa de cada equipe apresenta seu ponto de vista.

ATIVIDADE [2]:

Questionário

1. A figura abaixo é uma ilustração da máquina de Newcomen. É uma máquina a vapor trabalhando em um poço de água na Inglaterra no século XVIII. Tomando como base esta máquina térmica, responda:



Fonte: <https://social.stoa.usp.br/articles/0031/0392/MaquinasVapor.pdf>

- a) você poderia informar dois ou três aspectos utilitários da máquina a vapor de Newcomen?
 - b) lendo o texto 2 você poderia explicar o funcionamento da máquina de Newcomen? (no máximo dez linhas).
2. Você pode citar o nome de três construtores de máquinas térmicas que se destacaram no período da primeira revolução industrial?
 3. Você acha que a revolução industrial colaborou de alguma forma para o desenvolvimento da termodinâmica? Explique.
 4. Após ter realizado a leitura do texto 2 você poderia falar qual o papel de James Watt na construção de máquinas a vapor para a revolução industrial?
 5. Você notou algum detalhe importante sobre as máquinas a vapor que você ainda não sabia? Você saberia listar?

AVALIAÇÃO

O professor deve solicitar que os alunos em grupo organizem uma breve apresentação (de 15 minutos) o que você compreendeu do texto?

CAPÍTULO 3: SADI CARNOT E A MÁQUINA TÉRMICA

3.1 Carnot e a Máquina térmica

A máquina a vapor foi um dos instrumentos do desenvolvimento da Revolução Industrial e o motivo principal dos estudos de Sadi Carnot, como comprovamos na figura 8, mostra de forma acentuada um manuscrito que o jovem engenheiro Sadi Carnot escreve intitulado de *As Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas equipadas para desenvolvimento dessa potência*.



Figura 8: Capa do manuscrito de Carnot 1824

Fonte: <http://www.scielo.br/scielo.php>

Logo nas primeiras páginas de seu manuscrito, Carnot inicia fazendo uma breve apresentação concernente aos avanços das máquinas, daquelas bem rudimentares até as máquinas de fogo de sua época. Diante da História é possível verificar que Carnot era um homem de visão no futuro, quando dizia que seriam necessários novos conhecimentos para o melhoramento teórico dessas máquinas, cujo movimento dependia inteiramente do calor, diferentemente de outras máquinas manuais.

Nesta época, o calor é concebido como uma substância, fonte geradora de intensos movimentos. A teoria do calor tem um papel importante no trabalho de Carnot. Ademais, sustenta a hipótese de que é impossível produzir trabalho sem diferença de temperaturas. Esse estudioso não se limitou a dar uma explicação teórica e científica para a máquina a vapor, já

famosa na Europa. De fato, estava preocupado em abranger questões econômicas, políticas e sociais em seus argumentos, abordando os aspectos utilitários dessa máquina, com as transformações advindas da Revolução Industrial.

3.2 Carnot e os aspectos utilitários da máquina térmica.

Carnot afirmava que o estudo destes motores é do maior interesse, a sua importância é enorme, sua utilização está aumentando continuamente, e eles parecem destinados para produzir uma grande revolução no mundo civilizado. Já a máquina a vapor funciona nas nossas minas, arrasta os nossos navios em nossos portos, escava rios, forjas de ferro, formas de madeira, mói grãos, gira e tece nossos panos, transporta os fardos mais pesados, etc. Parece que ele deve algum dia servir como um motor universal, e substituí a força animal, cachoeiras, e correntes de ar. Durante o primeiro destes motores ele tem a vantagem da economia.

A máquina a vapor estava em uso no segmento social, era o carro forte da revolução industrial, todos estavam preocupados em melhorar o rendimento da máquina, e com ela poderia até mesmo romper distâncias. Carnot, por exemplo, acreditava que, algum dia, a máquina a vapor seria tão aperfeiçoado que poderia ser criada e fornecida com combustível por baixo custo, proporcionando um melhoramento nas indústrias. Não é apenas um motor poderoso e conveniente que pode ser adquirido e transportado em qualquer lugar, mas que provoca uma rápida expansão onde é usado.

3.3 Carnot e sua contribuição para a Segunda Lei da Termodinâmica

Carnot lança as bases científicas do funcionamento básico da máquina térmica, com maior rendimento e melhor eficiência. Para começar seus estudos, ele declara a restauração do equilíbrio do calórico⁵⁵, esse estudioso completa dizendo que produção de movimento em motores a vapor é sempre acompanhada por uma circunstância em que devemos fixar a nossa atenção. (Esta circunstância *é o restabelecimento do equilíbrio do 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). O que acontece de fato em uma máquina a vapor realmente em movimento? O

⁵⁵ Era uma teoria proposta no século XVIII por Lavoisier, ele afirmava que o calórico seria um fluido imponderável e que penetrava as menores partes da matéria. Essa substância fluiria dos corpos quentes para os corpos frios. As variações de calórico estariam relacionadas às de temperatura nos corpos; quanto maior a quantidade de calórico de um corpo, maior a sua temperatura.

calórico desenvolvido no forno pelo efeito da combustão atravessa as paredes da caldeira, a produção de vapor, e, de alguma forma, se incorpora com ele. Este último transportando-o para longe, leva-o primeiro para dentro do cilindro, onde se realiza alguma função, e dali para dentro do condensador, onde é liquefeito por contato com a água fria que se encontra aí. Em seguida, como resultado final, a água fria do condensador toma posse do calórico desenvolvido pela combustão.

Contudo, ressaltamos que Carnot (1824) se refere ao problema *do restabelecimento do equilíbrio do calórico* como promissor e necessário para o movimento e funcionamento básico da máquina, pontuando o transporte do calor. Na fundamentação do que ficou conhecido como *o princípio de Carnot*, este pesquisador postulou: Aquece-se pela intervenção do vapor, como se tivesse sido colocado diretamente por cima da fornalha. 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.

Carnot raciocina como se o calor fosse um fluido muito fino, capaz de penetrar os menores poros da matéria; esse fluido era chamado de calórico. O funcionamento da máquina consiste, pois na transferência de calórico de uma fonte para outra. Findo o ciclo completo, a máquina recupera suas condições iniciais. Como posto por Carnot, este é um *princípio de recuperabilidade das condições iniciais da máquina*; para isso, a substância de trabalho tem de voltar às suas condições originais, livrando-se do calórico recebido. Neste processo, o *calórico é conservado, pois não é utilizado, gasto, “consumido”, é só um “meio de transporte”*.

De acordo com este princípio, a produção sozinha de calor não é suficiente para gerar um poder impulsor na máquina; é necessária a existência das fontes. Sem elas, o calor seria inútil. Nesse sentido, Carnot declara que, *na diferença de temperatura entre duas fontes e no reestabelecimento do equilíbrio do calórico, é possível ter também a produção de energia impulsionando uma máquina de ótimo rendimento*.

3.4 Sadi Carnot e a objetividade do seu trabalho

Carnot questiona se a potência motriz do calor é ilimitada, se as possíveis melhorias no motor a vapor têm um limite em que a natureza das coisas não permitirá a serem passados por qualquer meio que seja, ou se, pelo contrário, estes melhoramentos podem ser realizados

em indefinidamente. É utilizada aqui *a potência motriz* para expressar o efeito (trabalho útil) que um motor é capaz de produzir. Ainda estão buscando verificar se existe, em um agente, a existência preferível ao vapor de água para desenvolver a potência motriz do calor.

Carnot (1824) ainda afirma que o vapor de água, entregue de forma inversa àquela em que ele é utilizado em motores a vapor, também pode ser considerado como um meio de destruir o equilíbrio do calórico. Sua imaginação vai além, citando, como exemplo, um ciclo completo e totalmente reversível⁵⁶. Isto ele estabelece através de uma sequência de operações (isotérmica e adiabática). Esse estudioso raciocina da seguinte forma: “*Sou convencido disso que precisamos observar mais de perto o modo pelo qual a força motriz é desenvolvida pela ação do calor sobre vapor de água*”.

Esse estudioso deixa claro que o calor originário da fonte de maior temperatura é transformado em trabalho e o restante do calor é absorvido pela fonte de menor temperatura. Se for realizado o processo no sentido inverso, usando-se as mesmas quantidades, serão restabelecidas as condições iniciais do sistema. O estudioso descreve que *a quantidade de calórico do corpo A que sai para o corpo B seria igual à quantidade que passa novamente no corpo B para o corpo A. Para isso acontecer, seria necessário atuar em cada caso indefinidamente, para não haver perdas*; ou seja, ter-se-ia uma conservação de energia em cada ponto. Assim, um número de operações alternativas deste tipo pode se realizar naturalmente, uma vez que não existe nenhuma perda, tendo força motriz⁵⁷ produzida ou o calórico transferido de um corpo para outro.

A partir dessa premissa, conclui-se que só o ciclo mais eficiente deve ser composto por processos isotérmicos e adiabáticos. Em uma compressão isotérmica ou expansão, todo o agente de transferência de calor é exclusivamente expressa em variação de volume; o trabalho na expansão isotérmica é máxima e a compressão isotérmica é mínima. Em uma expansão ou uma compressão adiabática, com transferência de calor por definição, a mudança de temperatura é inteiramente por motivo da variação de volume.

Do ponto de vista teórico, o autor mostra que este calórico é desenvolvido em maior ou menor quantidade pela compressão do fluido elástico em uma transformação cíclica (a figura 9 extraída de Carnot é um ciclo idealizado para fundamentar seus argumentos).

⁵⁶ Segundo Nóbrega (2009, p. 31) a noção de reversibilidade introduzida por Carnot foi um conceito fundamental para a termodinâmica. Todavia, ela lembra que essa noção era totalmente mecânica. Afirma ainda que o conceito de reversibilidade termodinâmica surgiria somente anos depois com os trabalhos de Clausius.

⁵⁷ Nota-se que, na linguagem de Carnot (1824, p. 12-13) que a força motriz - potência motriz/ o trabalho - não depende da substância durante a expansão e compressão. Ainda, grande parte do manuscrito declara que “a potencia motriz do calor é independente dos agentes colocados para a sua realização, ou seja, qualquer que seja a substância, isto é uma proposição geral.” (cf. CARNOT, 1824, p. 20).

Apresenta uma ideia bastante inovadora para sua época, a de que a máquina mais eficiente possível deve operar entre duas fontes com diferença de temperatura em um *ciclo reversível*. Todavia, as operações da máquina poderiam se fazer de traz para frente. No princípio de economia empregado no trabalho do pesquisador, *qualquer máquina atuando em um ciclo reversível tem o máximo rendimento*. Através deste ciclo específico, calcularia o elevado rendimento das máquinas a vapor em função das fontes das temperaturas.

De acordo com Carnot, o referido ciclo surge da comprovação da ideia já estabelecida de que, por exemplo, um fluido elástico, o ar atmosférico colocando-se em um cilíndrico fechado abcd. Notemos que o pistão cd é móvel e sem atrito algum, bem como há também dois corpos A (T_A) e o corpo B (T_B), cada qual mantido a constante temperatura, A maior do que a de B.

Primeiramente, o gás está em contato e com a mesma temperatura de A, e é expandido até a posição *ef*, de forma que sua temperatura seja mantida constante. Nota-se que a fonte quente e a substância de trabalho estão em contato, à mesma temperatura, cumprindo uma condição de economia. À medida que a substância recebe calor da fonte quente, ela expande, empurrando o êmbolo.

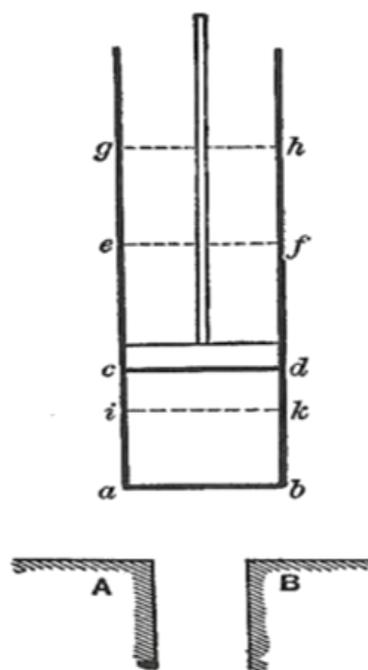


Figura 9: Ciclo idealizado por Carnot
Fonte: Carnot, 1824, p.17.

Depois, o pistão aumenta (expande), gradualmente, o gás agora isolado de **A** e expande da posição *ef* para a posição *gh*, em que sua temperatura é igual à de **B**. Como o gás se encontra confinado, ou seja, isolado, o calor não é trocado com o exterior. A substância esfria à medida que expande. O processo é interrompido, quando a substância atingir a temperatura da fonte fria.

Na sequência, o gás entra em contato com **B** e é comprimido de *gh* para *cd*, com temperatura mantida constante. Verifica-se que, nesta fase, a fonte fria e a substância de trabalho estão em contato, à mesma temperatura, cumprindo a condição de economia. À medida que a substância de trabalho for comprimida, o calor é transferido da substância de trabalho para a fonte fria; quando a substância atingir um dado volume.

O gás é finalmente isolado de **B** e é comprimido de *cd* para *ik*, sendo que sua temperatura final igual à de **A**. Nesta fase, o calor não é trocado com o exterior ou outra qualquer parte e a substância esquenta à medida que for comprimida. O processo é interrompido, quando a substância atingir a temperatura da fonte quente.

As várias operações do pistão são sujeitas a um esforço de maior ou menor amplitude, exercidas pelo ar encerrado dentro do cilindro; o fluido elástico, ou certo gás perfeito, varia tanto em virtude das variações de volume, como de alterações da temperatura. No entanto, deve-se observar que, com iguais volumes, isto é, para as posições semelhantes do êmbolo, a temperatura é mais elevada durante os movimentos de dilatação do que durante os movimentos de compressão. Consequentemente, a quantidade de energia produzida pela força de movimentos de dilatação é mais do que considerável, é consumida para produzir os movimentos de compressão.

Todas as operações acima apresentadas podem ser executadas em um sentido e ordem inversas, como descritas por este estudioso. Este ainda considera que após o último período, isto é, o pistão tendo chegado à posição *ef*, fazemos com que retorne à posição *ik*; que, ao mesmo tempo, mantém o ar em contato com o corpo **A**. O calórico fornecido por este corpo no percurso do quarto período passa a voltar à sua fonte, seu estado inicial. Desse modo, as condições continuariam um novo ciclo, seguindo as etapas iniciais, sem nenhuma perda. O resultado destas primeiras operações tem sido a produção de certa quantidade de potência motriz e a remoção do calórico do corpo **A** e do corpo **B**. O produto das operações inversas é o consumo de potência motriz produzindo à volta do calórico do corpo **B** para o corpo **A**.

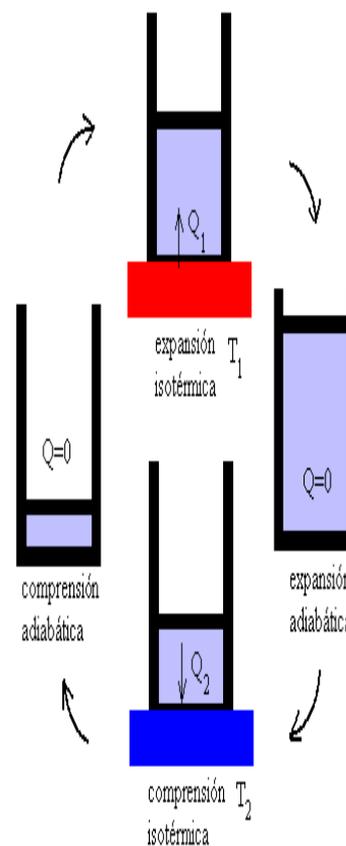


Figura 10: fases do ciclo de Carnot.

Fonte: <http://arquivos.ufs.br/carnot/carnot>.

1. Sugestões de Leitura

- CARNOT, Sadi. **Reflections on the Motive Power of Fire, and other papers on the second law thermodynamics by (1824)**. E. Clayperon and R. Clausius. 2 ed. Mineola, Ny: Dover, 1890.
- CIMBLERÍS, Borísas. Carnot e a evolução das máquinas térmicas. **Revista da SBHC**, n.6, p.39-45, 1991.
- DÍAZ, Sandra Milena Forero. **Sadi Carnot e a Segunda Lei da Termodinâmica** (Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Doctoren Educación). Departamento de Física, Faculdade de Ciência y Tecnologia, Universidade Pedagógica Nacional, Bogotá, Colômbia, 2014.
- ERLICHON, Herman. Sadi Carnot, Founder of the Second Law of Thermodynamics, Department of Engineering Science and Physics, College of Staten Island, City University of New York, Staten Island, NY 10314, USA, **Eur. J. Phys.** 20 (1999) 183–192. Printed in the UK.

2. Sugestão de vídeo / repositório de objetos educacionais:

- Documentário sobre Máquinas Térmicas. Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=fvFEqEmekzk>
<https://www.youtube.com/watch?v=mM4DGcTdJbs>
<https://www.youtube.com/watch?v=C0IMfTRzUAo>
- Documentário – tempos modernos. Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=7RHtkFhfJqI>
- Rendimento térmico. Disponível em:
http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/19082/open/file/03_laboratorio_frame.htm
- Ciclo de Carnot (Flash). Disponível em:
<http://www.ba.infn.it/~fisi2005/animazioni/animazione060.html>

3. Sugestões de atividades para o encontro 4.

ATIVIDADE [1]:

1. De acordo com a teoria de Carnot-1824, o fluido térmico não deve entrar em contato com os corpos de temperaturas diferentes quando houver transferência de calor. Além disso, a máquina de Carnot trabalha de forma cíclica entre dois reservatórios (fonte quente e fria), desenvolvendo processos reversíveis. Notando estas condições, descreva cada fase do ciclo de Carnot.

FASE 1:

FASE 2:

FASE 3:

FASE 4:

ATIVIDADE [2]:

2. Cada grupo deve organizar um painel mostrando de forma clara os estudos teóricos de Carnot sobre a máquina térmica de Carnot apontando pontos centrais do texto (cada apresentação deve durar 15 minutos).

3. Após ter lido o texto, o que podemos concluir quando Carnot afirma *o restabelecimento do equilíbrio do calórico?*

AVALIAÇÃO:

Cada grupo deve apresentar seu painel sobre as ideias de Carnot para a classe. Esta servirá como avaliação. O professor será o intermediador entre os alunos e o texto esquematizado no painel.

CAPÍTULO 4: SADI CARNOT: CAMINHOS PARA O ENUNCIADO DA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

4.1 Clapeyron e o descobrimento do trabalho de Carnot

Apesar de o trabalho de Carnot (1824) estar no campo tecnológico, o seu caráter teórico, dado de forma abstrata, talvez fosse à razão para o seu não reconhecimento. Conforme já dito, encontra-se em um período em que as teorias científicas, para serem bem aceitas, tinham de ter uma importância empírica e um poderoso formalismo matemático. Contudo, sua obra quebra os paradigmas vigentes, por conseguinte, gera mudanças de concepções com suas ideias e formulações. Em meio à Revolução Industrial, deixa elementos suficientes para os pilares da termodinâmica, continuados por outros cientistas, a exemplo de Benoit Paul Émile Clapeyron, William Thomson e Clausius.

Inicialmente, a única pessoa que compreendeu e manteve a memória de resultados de Carnot foi Clapeyron. Ele regressou a França, em 1830, e publicou uma reformulação do manuscrito daquele cientista. Clapeyron (1834), logo após a morte de Carnot, em 1832, respalda-se no trabalho deste e acrescenta em sua pesquisa uma formalização algébrica que transforma a análise verbal de Carnot no simbolismo de cálculo cheio de derivada; além de uma representação gráfica do ciclo proposto pelo Carnot e do seu funcionamento, visando conferir ao trabalho original maior clareza. A afirmação de Clapeyron se diferenciava muito, na sua forma de apresentação, embora tenha alcançado os mesmos resultados. Foi sintético em tudo e fez apenas referências superficiais para os problemas do projeto do motor para a aplicação industrial, que tinha sido destaque no trabalho original. Também deduziu novos resultados e fez sua derivação clara, através do uso de diagramas indicadores, que têm validade até hoje. O diagrama *pressão versus volume*, na figura 11, mostra o ciclo de Carnot segundo a interpretação de Clapeyron.

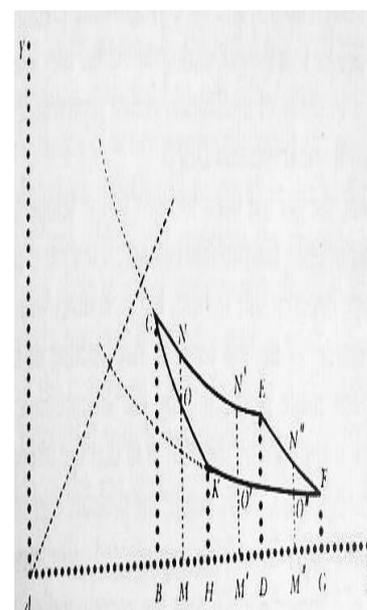


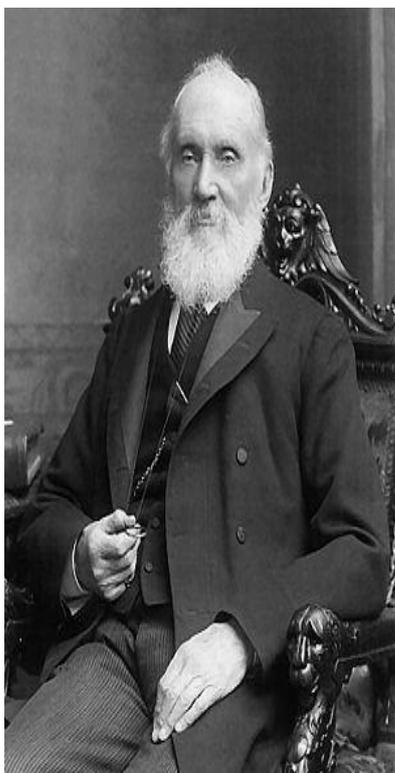
Figura 11: Ciclo de Carnot interpretado por Clapeyron.

Na interpretação gráfica, Clapeyron descreve os passos do ciclo de Carnot. No ramo C-E isotérmico à temperatura T_q , ramo E-F adiabática, ramo F-K isotérmica à temperatura T_f , ramo K-C adiabática. Mesmo em um período de crença na teoria do calórico, Carnot e Clapeyron escreveram seus trabalhos na altura de haver nenhuma declaração inequívoca da equivalência de calor e energia. Como resultado, muitas de suas afirmações parecem estar incorretas em primeira leitura.

No entanto, a dificuldade em grande parte é de compreender as diferentes maneiras que eles usaram para as palavras calor e calórico. Clapeyron, além de dar vida ao trabalho de Carnot, levaria outros cientistas a estudarem a obra original, a exemplo de W. Thomson (1824-1907) e do físico alemão Rudolf J. Clausius (1822-1888), que perceberam a

importância deste trabalho e a injustiça de suas ideias terem ficado no anonimato por tanto tempo.

4.2. William Thomson e o dilema entre teorias



William Thomson foi para Paris, após a graduação, para trabalhar e estudar com Regnault, um experimentador cuidadoso e influente; que ao procurar o manuscrito de Carnot, tudo que encontrou foi o artigo de Clapeyron: Thomson leu um artigo de Emile Clapeyron - *Memória sobre propulsão do Calor* - publicado em 1834, no Jornal da escola Politécnica em 1843, no *Annalen der Physik*. Nesse artigo, Clapeyron apresenta um resumo de uma teoria proposta, em 1824, por Nicolas Léonard Sadi Carnot, no seu livro *Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre máquinas equipadas a essa potência*. Thomson entendeu que a solução de seu problema estava na teoria de Carnot e procurou o livro em Paris; não achou, naquela ocasião, mas os frutos já estavam ali.

Figura 12: William Thomson

Fonte: <http://ciencias.casadasciencias.org/William>.

A interpretação de Clapeyron foi à contribuição significativa para iniciar-se no processo do estabelecimento da segunda lei da termodinâmica. Por esse meio, Thomson se apropria da teoria de Carnot, na tentativa de constituir uma escala termométrica absoluta. Thomson escreve quatro importantes artigos científicos que abriram o caminho para a formulação da segunda lei da termodinâmica. Dentre eles, estes dois são mais bem citados: Em sequência, Thomson publicou dois artigos que traçaram o destino da teoria do calor: (I) 1849: *On an absolute thermometric scale founded on Carnot's theory of the motive power of heat, and calculated from Regnault's observations* (*Philosophical Magazine*).

Esse artigo é mais bem entendido como um “teorema de existência”: Thomson usa a teoria de Carnot para demonstrar (teoricamente) a existência de uma temperatura absoluta. (II)

1849: An account of Carnot's theory of the motive power of heat; with numerical results deduced from Regnault's experiments on steam (Transactions of the Royal Society of Edinburgh 16, 571-574). Nesse artigo, Thomson apresenta um resumo da teoria de Carnot, com os acréscimos de Clapeyron.

Neste primeiro artigo, Thomson acredita ser necessário estabelecer uma escala de temperatura absoluta; baseia-se inteiramente no manuscrito de Carnot, na afirmação de que uma quantidade de calor, passando entre as duas fontes, a temperaturas diferentes, pode produzir, no máximo, determinada quantidade de trabalho. Neste segundo, logo após sua investigação sobre a escala absoluta, apresenta dúvidas em determinados pontos do trabalho de Carnot e de Joule, propondo-se a investigar o trabalho mecânico. Por um lado, Carnot se limitou a descrever o método de produção de efeito do calor mecânico, meio do calor da contração e expansão, concluindo com o axioma, base de sua teoria, de que o calor era conservado. Por outro lado, Thomson chama a atenção para a descoberta de Joule, de que o calor não era uma substância como proposta em *Reflexões*.

4.3 A explicação de Joule para o calor

A teoria mecânica do calor se consolida definitivamente com os trabalhos realizados pelo físico inglês James Prescott Joule (1818-1889). Ele se interessou pelo eletromagnetismo e pela termodinâmica, áreas da Física que mais progredia na época. Esse pesquisador procurava encontrar nelas a fonte mais eficiente de energia para a seu motor elétrico ou máquina a vapor. Por volta de 1843, o artigo que publica, na *Philosophical Magazine intitulado, Sobre os Efeitos caloríficos da Eletricidade - Magnetismo, sobre o Valor mecânico do calor*, formulou a expressão matemática que relaciona a intensidade da corrente elétrica que passa por um fio e o calor nele gerado. Joule ainda aprofundou seu estudo construindo um motor eletromagnético, por meio do qual conseguiu converter energia mecânica em calor, levando-o a rejeitar completamente a teoria do calórico e a realizar um experimento importante. A figura 13 apresenta o desenho do aparelho construído por Joule, em que sustentava a teoria de que o calor seria gerado por fricção dos fluidos em movimento.

Esse aparato original de Joule foi reproduzido pelo Museu Nacional de Manchester, Inglaterra, onde está exposto. Faz-se necessário uma síntese do relato dessa experiência e de seus resultados, publicados em 1850.

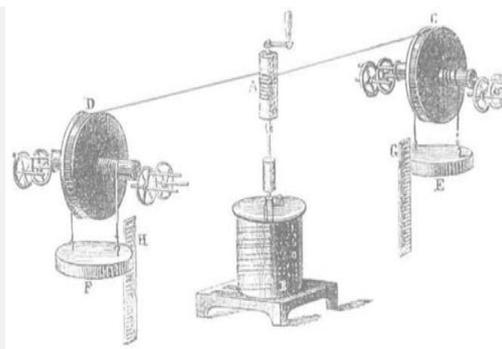


Figura 13: Aparelho de Joule

Fonte: <http://www3.nd.edu/~pdunn/www.ame250/>



Figura 14: James (1818-1889).

Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Joule>

Acerca das considerações desse experimento: Dentre os vários experimentos realizados por Joule, sobre a relação trabalho-calor, o mais célebre deles envolvia um calorímetro de pás. Tal calorímetro constituía-se de um recipiente feito de cobre contendo em seu interior um conjunto de pás móveis e outro de pás fixas. As pás móveis eram conectadas a um eixo que girava a partir da queda de dois corpos de mesma massa. As pás fixas eram, por sua vez, conectadas às paredes do calorímetro. Os corpos eram suspensos por fios que, após passarem por um sistema de roldanas, eram enrolados no eixo das pás móveis. No interior do calorímetro, era colocada água, que era então agitada pela rotação das pás. Grande parte da energia de queda dos corpos era transformada em calor dentro do calorímetro. Um termômetro, colocado no recipiente, permitia a medida da elevação da temperatura da água. A partir daí, era possível, determinar a relação existente entre a parcela da energia mecânica resultante da queda dos corpos, convertida em calor, e o valor deste calor produzido no interior do vaso colorimétrico. O problema, no entanto, era fazer uma estimativa precisa do valor da parcela da energia mecânica que efetivamente era convertida em calor. Diante das múltiplas perdas no sistema, abaixo descritas, restavam a Joule dois possíveis caminhos.

O primeiro, de execução extremamente difícil, seria conseguir calcular todas aquelas perdas. Diante da dificuldade prática de tal cálculo, Joule optou por uma segunda alternativa, qual seja a de sem poder calcular as perdas com uma boa precisão, minimizá-las ao máximo.

Ao final do relato pode-se concluir que, a quantidade de calor produzido pelo atrito entre corpos, líquidos ou sólidos é sempre proporcional à quantidade de força. Joule afirma que o calor é energia e não um fluido; se assim fosse, deveria ser inesgotável, pois sempre que os pesos caíam, a temperatura se elevava. Além do mais, medida da quantidade de calor gerada em unidades de energia ficou conhecida como equivalência mecânica do calor, teoria essa que o Thomson, inicialmente, era descrente.

4.4 As preocupações de William Thomson o Lorde Kelvin

Thomson entra em um dilema entre as duas teorias, que para ele deveria ter uma aparente contradição, Estaria mais inclinado para a teoria de Carnot, uma vez que para ele o calor era produzido pela queda de calor de uma temperatura de um nível mais elevado para outro menos elevado, [...] contradição existente entre Carnot e Joule foi evidenciada. E era difícil de visualizar como essas duas proposições contraditórias poderia ser reconciliadas.

William Thomson, o futuro Lorde Kelvin, colocou o seguinte dilema: **I.** James Prescott Joule demonstrou, por experimento, que calor pode ser transformado em trabalho e vice-versa. **II.** Portanto, se a máquina realiza trabalho, calor não pode ser todo ele, transportado de uma fonte para a outra. Ele tem de “virar” trabalho, isto, é, ser consumido, usado, gasto. Logo, ou Carnot está certo e Joule errado; ou Carnot está errado e Joule certo.

Esse dilema de Thomson abre o caminho e quem se propõe a dar uma resposta é Clausius, através do trabalho de Clapeyron, em 1850. Tomando conhecimento da importância do trabalho de Carnot, publica um artigo, intitulado: *sobre a força motriz do calor*. Este artigo explica a aparente contradição que Thomson tinha apresentado tanto em Carnot como em Joule. Para Clausius, a potência motriz (chamada por Carnot) resulta na transformação de parte do calor, que vai da fonte de maior temperatura para a de menor, pelo que não podia haver conservação de calor. Assim, ele concilia as ideias de que trabalho é produzido pelo calor – de que certa quantidade de calor passa de um corpo quente para um frio, sem que nenhum calor seja perdido nesse processo de transmissão, e que a quantidade permanece inalterada – com a experiência de J. Joule. Outrossim, através desse trabalho, ele clarifica muitos dos conceitos da termodinâmica, dando-lhes a forma atual.

4.5 Contribuições de Thomson e Clausius para a Segunda Lei da Termodinâmica

Após a aparente contradição, Clausius fundamenta os alicerces da matemática para a termodinâmica. Como o princípio de conservação da energia já estava em uso, concluiu que uma máquina a vapor absorve calor de um reservatório de temperatura elevada e converte parte dele em trabalho, o restante é lançado em um reservatório frio. Clausius parte da ideia de Carnot, de que toda máquina a vapor deveria descartar uma quantidade definida de calor, e a denomina de Segunda Lei da Termodinâmica, um fato que deveria ser verificado. Tendo em vista o lado experimental, ele procurou por uma formulação logicamente equivalente a da segunda lei, que fosse mais clara e objetiva.

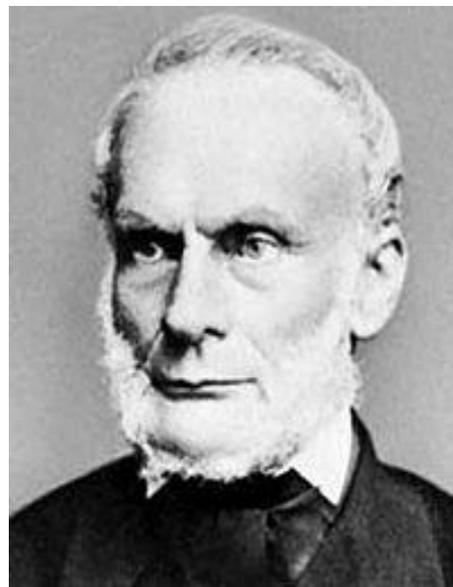


Figura 15: Rudolf J. Clausius (1822-1888).

Fonte:

<http://www.geocities.ws/saladefisica6/termodinamica/termodinamica2lei.html>

Clausius formulou a sua expressão teórica em uma conhecida frase: “*É impossível à construção de um dispositivo que, operando em ciclos, produza como único efeito a transferência de calor de um corpo frio a um quente*”.

Em 1851, William Thomson melhorou o tratamento desenvolvido por Carnot; com o propósito de expor a irreversibilidade dos processos naturais, chega ao enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica. O artigo de Thomson, afirma, Após o artigo de Clausius, Thomson publica mais dois artigos, que mostram o pensador profundo: (sobre a teoria dinâmica do calor, com resultado numérico deduzido a partir do equivalente do calor do senhor Joule e as observações de M. Regnault em vapor). Nesse artigo, Thomson resume a teoria do calor, com as mediações de Clausius. Nele, Thomson enuncia a segunda lei de um modo que, segundo ele, havia formulado antes do artigo de Clausius: *É impossível, por meio de agente material inanimado, derivar trabalho mecânico de qualquer parte da matéria, esfriando-a abaixo da temperatura do objeto mais frio, nas redondezas.*

A partir do artigo de Thomson (1851) faz referência clara ao enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica, mostrando que Clausius chegou à mesma conclusão, baseado em um axioma diferente: “*É impossível para uma máquina que age sozinha sem ajuda de algum agente externo transportar calor de um corpo para outro com uma temperatura maior*”.

Para esse enunciado, pode-se inferir que não existem máquinas térmicas perfeitas que façam transferência total de calor de um corpo de menor temperatura para de maior. Máquinas térmicas, como locomotivas a vapor, é um tipo de dispositivo que transforma calor em trabalho mecânico por meio de ciclos. De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, não é possível construir máquina a vapor cujo rendimento seja de cem por cento. É uma lei limitante, por não poder ocorrer de forma espontânea, apontando os limites da natureza. Enquanto a Primeira Lei é regida pelo princípio da conservação de energia, de a perda de um lado aparece do outro, podendo ser aplicada a processos reversíveis ou não, em que qualquer sentido desses processos.

Além do mais, essa Segunda Lei é um princípio poderoso na natureza, por fornecer a regra que rege as transformações de energia na natureza. Portanto, reiteramos a construção dessa lei, como conhecemos hoje, só foi possível devido à obra de Carnot, de idealizar um ciclo reversível para qualquer máquina a vapor, sem perdas de calor e com rendimento o maior possível. Logo, essa teoria é a base inicial do que viria a estruturar a termodinâmica como parte da mecânica clássica.

1. Sugestões de Leituras:

- NÓBREGA, Mayane Leite da. **Segunda lei da termodinâmica: os caminhos percorridos por William Thomson**. 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Bahia, [2009].
- PÁDUA, Antônio Braz de. et al. Termodinâmica clássica ou termodinâmica do equilíbrio: aspectos conceituais básicos. **Ciências Exatas e da Terra**. Londrina, v. 29, n. 1, p. 57-84, jan./jun. 2008.

2. Sugestões de vídeos / repositório de objetos educacionais:

Segunda Lei da Termodinâmica: Ciclo de Carnot. Disponível em:

<http://www.fisica.ufpb.br/~romero/objetosaprendizagem/Rived/15bCarnot/index.html>.

3. Sugestões de atividades para o encontro 5.

ATIVIDADE [1]:

Propõe-se que os alunos construam tópicos da discussão da aula, o que não sabiam e o que já sabiam sobre o texto 4.

ATIVIDADE [2]:

Propor aos alunos para organizarem um painel, este deve ser feito em equipe pelos alunos onde se devem levar em conta os caminhos percorridos para se chegar ao enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica.

AVALIAÇÃO:

Cada grupo deve apresentar o painel à classe e responder um questionário com cinco (5) questões discursivas e fechadas, o questionário serão trabalhados de forma individual sem consultar o texto do paradidático.

QUESTIONÁRIO

1. Segundo o texto quais as contribuições de Clapeyron ao tomar conhecimento da obra de Carnot.

2. Como os cientistas citados no texto chegaram ao enunciado da segunda lei da termodinâmica?

3. A obra de Sadi Carnot foi importante para descoberta da segunda lei da termodinâmica?

Sim [] Não []

Justifique?

4. Segundo o texto como o Clausius e o Willian Thomson enunciaram a segunda lei da termodinâmica?

CLAUSIUS: _____

WILLIAM THOMSON: _____

5. Você poderia citar por que William Thomson entrou em um dilema ao tomar conhecimento dos trabalhos de Joule em comparação com obra de Carnot?

