

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS DE ABREU KASPRIK

**MÁQUINAS TÉRMICAS: UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM DA
TERMODINÂMICA A PARTIR DE MÁQUINAS HISTÓRICAS PRECURSORAS DA
REVOLUÇÃO INDUSTRIAL**

CURITIBA

2021

LUCAS DE ABREU KASPRIK

**MÁQUINAS TÉRMICAS: UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM DA
TERMODINÂMICA A PARTIR DE MÁQUINAS HISTÓRICAS PRECURSORAS DA
REVOLUÇÃO INDUSTRIAL**

**Thermal machines: a proposal for an approach to thermodynamics based on
historical machines which have proceeded the industrial revolution**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Licenciado em Física da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Veronica Ferreira Bahr Calazans.

Coorientador(a): Diógenes Borges Vasconcelos.

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUCAS DE ABREU KASPRIK

**MÁQUINAS TÉRMICAS: UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM DA
TERMODINÂMICA A PARTIR DE MÁQUINAS HISTÓRICAS PRECURSORAS DA
REVOLUÇÃO INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Licenciado em Física da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 13 de dezembro de 2021

Veronica Ferreira Bahr Calazans
Prof^a. Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba

Alex Calazans
Prof. Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba

Nestor Cortez Saavedra Filho
Prof. Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba

CURITIBA

2021

AGRADECIMENTOS

Dentro da trajetória da minha formação como licenciando em física, muitas pessoas foram importantes, sejam minha família, meus amigos e os professores que me ajudaram nesta jornada. Em especial eu gostaria de agradecer o professor Adilson Camilo de Barros, o qual me orientou em iniciação científica voluntária, na qual produzi o meu primeiro artigo acadêmico, já relacionado a história e filosofia da ciência.

Aos professores Veronica Ferreira Bahr Calazans e Diógenes Borges Vasconcelos pela orientação para a realização deste TCC e também ao professor Alex Calazans, que junto com a prof^a Veronica foi fundamental para a minha formação em História e Filosofia da Ciência por meio dos grupos de estudos e eventos da área por eles organizados.

Agradeço também à UTFPR e a CAPES pela oportunidade que tive de ser bolsista nos programas PIBID e Residência pedagógica que foram essenciais na minha formação educacional e profissional. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A presente pesquisa apresenta uma proposta de abordagem das leis da Termodinâmica e dos conteúdos de máquinas térmicas a partir da exposição do funcionamento de máquinas históricas, utilizando-se de desenhos didáticos e de seu contexto histórico, buscando uma aprendizagem significativa dos conceitos de física e permitindo a alfabetização tecnológica, fundamentada a partir das relações entre ciência, tecnologia e sociedade.

Palavras-chave: máquinas térmicas; revolução industrial; história da ciência; ciência, tecnologia e sociedade.

ABSTRACT

This research presents a proposal to approach the laws of Thermodynamics and the contents of thermal machines from the exposition of the operation of historical machines, using didactic drawings and their historical context, seeking a meaningful learning of the concepts of physics and allowing technological literacy, based on the relationships between science, technology and society.

Keywords: steam engines; industrial revolution; history of science; science, technology and society.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNCC	Base nacional comum curricular
CTSA	Ciência, tecnologia e sociedade
DCE	Diretrizes curriculares estaduais
HFC	História e filosofia da ciência
MNC	Máquina de Newcomen
MW	Máquina de Watt
PCN	Parâmetros curriculares nacionais
PNLD	Plano nacional dos livros didáticos
TD	Termodinâmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	JUSTIFICATIVA.....	10
3	OBJETIVOS	12
3.1	Geral	12
3.2	Específicos	12
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
4.1	Um ensino significativo de física	13
4.2	O ensino de termodinâmica	15
5	METODOLOGIA	18
6	DESENVOLVIMENTO	20
6.1	Contexto histórico.....	20
6.2	A Máquina de Savery	20
6.3	A Máquina de Newcomen	22
6.4	A Máquina de Watt	24
6.5	Os inventos posteriores de Watt e o início da revolução industrial	27
7	DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA DE ENSINO.....	29
7.1	As grandezas físicas envolvidas e a Primeira Lei da TD	29
7.2	A Segunda Lei da TD e o rendimento de máquinas térmicas.....	31
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
	REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, pesquisadores de todo o mundo relataram uma crise no ensino de ciências, evidenciada pela grande evasão de alunos dos cursos e pelos elevados índices de analfabetismo científico (Vide MATTHEWS, 2000 e MATTHEWS, 1995). É possível salientar que essa problemática é pior no campo da Física. Segundo Rangel (2017), Pozo e Gómez Crespo (2001) atribuem isto, principalmente, à falta de atitude ou predisposição favorável dos alunos em relação ao seu ensino. Em termos mais simples, pode-se dizer que as aulas de física se tornaram desinteressantes e desestimulantes para os alunos, tal problema é amplamente apontado no contexto brasileiro, como se pode observar em Ricardo (2010) e Dias & Penido (2021), dentre outros autores que discorrem sobre o tema.

Dentre as soluções mais comuns propostas por diversos autores, tanto em relação à crise apontada por Matthews quanto em relação à falta de interesse ou atitude frente ao ensino de Física, está tornar o ensino de ciências mais contextualizado. Entre as principais formas de ensinar física de forma contextualizada destacam-se a História e Filosofia da Ciência (HFC) e o ensino por meio de abordagens com enfoque CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente). Tais abordagens são amplamente citadas e incentivadas em diversos documentos curriculares nacionais, uma boa síntese disto está no seguinte trecho da Base Nacional Comum Curricular (BNCC):

A contextualização social, histórica e cultural da ciência e da tecnologia é fundamental para que elas sejam compreendidas como empreendimentos humanos e sociais. Na BNCC, portanto propõe-se também discutir o papel do conhecimento científico e tecnológico na organização social, nas questões ambientais, na saúde humana e na formação cultural, ou seja, analisar as relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente (BRASIL, 2018, p. 549).

Para Palácios et al. (2001), a perspectiva CTS visa a formação de pessoas capazes de compreender como a Ciência, a tecnologia e a sociedade se influenciam mutuamente e de utilizar tais conhecimentos para a tomada de decisões na vida diária (apud ÉVORA, 2011, p. 2). O movimento CTS consolidou-se por volta dos anos 60 do século passado e em 1991 foi definida pela NSTA (National Science Teachers Association) como sendo “o ensino e a aprendizagem da ciência [e da] tecnologia dentro do contexto da experiência humana” (YAGER, 1994, p. 5, apud ÉVORA, 2011).

Já as abordagens baseadas em HFC são incentivadas desde a primeira metade do século passado, como evidenciado por Matthews (1994) ao citar Westaway (1929) e outros autores.

Segundo A.F.P. Martins (2007), no Brasil, ao longo das últimas décadas, a pesquisa em ensino de ciências tem evidenciado a relevância do papel desempenhado pela HFC no ensino e aprendizagem das ciências. Porém mesmo com o passar de décadas, ainda existem longos e árduos desafios para a utilização da HFC. Dentre eles, R.A Martins (2006) destaca a carência de um número suficiente de professores com a formação adequada para pesquisar e ensinar de forma adequada a história das ciências, a falta de material didático de qualidade e equívocos a respeito da própria natureza da história da ciência e seu uso na educação. Atualmente, mais de dez anos após o referido texto de Martins (2006), estes problemas ou desafios permanecem, além de diversos mais, tal como expostos por Scheid (2018) e outros autores.

2 JUSTIFICATIVA

Segundo Hacking (2012, p.65), dentre outras coisas, Thomas Kuhn afirmava que “a ciência está no tempo e é essencialmente histórica”. Segundo o autor, a nova visão da ciência representada por Kuhn, trouxe uma crise na racionalidade [científica], que abriu uma ampla rede de debates que levaram a ciência a transformar-se [também] em um fenômeno histórico e não em um produto apenas da lógica e racionalidade humanas, como era vista anteriormente. Essa última visão é mais conhecida como internalismo, na qual, para Condé (2017) vê-se a ciência como não dependente dos contextos sociais e tecnológicos, mas essencialmente pela teoria.

Ao outro lado deste embate epistemológico, que ocorreu principalmente no período entre o final da 2ª guerra mundial e o fim da guerra fria, encontra-se a visão externalista da ciência, na qual, assim como também fazia Thomas Kuhn¹, valorizam-se os aspectos históricos e sociais na construção do conhecimento científico. Condé (2017) destaca na defesa do externalismo nomes como o de Zilsel e Grossman e no internalismo Alexandre Koyré como protagonista. Segundo o autor:

Para ele [Koyré], ideias científicas não são influenciadas por práticas sociais e desenvolvimentos tecnológicos, mas [principalmente] por uma atitude metafísica. Ao contrário do que se pretendeu a perspectiva externalista, para Koyré seria exatamente a teoria que teria a função de guiar o processo tecnológico e, por consequência, suas implicações sociais. (CONDÉ, 2017, p. 25).

Nas últimas décadas é comum, nos artigos de ensino de física das mais diversas vertentes, criticar-se que o ensino da disciplina no Brasil é extremamente técnico, no qual a ciência é apresentada de forma puramente internalista, ou seja, como algo abstrato e distante da realidade dos alunos. Atualmente situamo-nos em uma sociedade amplamente dependente da tecnologia, cercados por ela em todos os contextos, mas sem que se questione como e porque elas funcionam. Segundo Angotti et al. (2001):

Muitas vezes desconhecemos as regras de funcionamento dos objetos tecnológicos; além disso, por estarmos tão próximos de alguns deles, não os problematizamos. Não questionamos seu funcionamento nem como foram fabricados, ou as causas e/ou consequências da sua inserção no nosso meio (ANGOTTI et al., 2001, p. 185).

O presente trabalho tem como escopo a criação de uma proposta de abordagem dos conteúdos de termodinâmica relacionados às máquinas térmicas a

¹ Pode se dizer que Kuhn defendia igualmente a importância dos fatores internos e externos a ciência, diferenciando-se dos demais autores abordados, que em geral defendiam mais uma destas perspectivas.

partir da história e funcionamento das primeiras máquinas a vapor, responsáveis pela automação do trabalho manual, que marcou o início do período da I Revolução Industrial (1760-1830), buscando-se uma forma de se ensinar física de forma significativa a partir de uma ampla contextualização histórica, social e tecnológica.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Desenvolver uma proposta de ensino que auxilie na formação dos alunos como cidadãos conscientes das relações entre os contextos científico, sociocultural e tecnológico e da sua importância, a partir do uso da História e Filosofia da Ciência e da Tecnologia no contexto CTSA, aplicados dentro de uma metodologia ativa no ensino de conteúdos de termodinâmica.

3.2 Específicos

1. Construir esquemas didáticos do funcionamento de máquinas históricas, que podem ser usados por professores de forma que não leve a um ensino puramente técnico;
2. Propor uma nova abordagem para a exposição e dedução da Primeira e a Segunda Lei da termodinâmica a partir do contexto de funcionamento das máquinas de Savery, Newcomen e Watt, respeitando assim a cronologia dos fatos históricos.
3. Oferecer condições para a compreensão dos princípios de funcionamento das máquinas (antigas ou não) a partir da contextualização dos fenômenos físicos com os objetos tecnológicos.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Um ensino significativo de física

Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais, ou PCN (BRASIL, 2000), o ensino de Física tem-se realizado frequentemente a partir da apresentação de forma desarticulada de conceitos, leis e fórmulas, distanciados da realidade vivida pelos alunos e professores, tornando-se assim vazios de significado. Sendo assim, é necessário que se busquem formas significativas de se ensinar física, ainda segundo o documento:

Não se trata, portanto, de elaborar novas listas de tópicos de conteúdo, mas sobretudo de dar ao ensino de Física novas dimensões. Isso significa promover um conhecimento contextualizado e integrado à vida de cada jovem. (...) Uma Física cujo significado o aluno possa perceber no momento em que aprende, e não em um momento posterior ao aprendizado (BRASIL, 2000, p. 23).

Sanches e Neves (2011, p. 97) destacam que o ensino de forma descontextualizada de Física não permite que os alunos conheçam as novas e velhas tecnologias, além do processo de construção científica. Segundo Sequeira e Leite (1998, p. 157), a partir do ensino de física e utilizando-se da história da ciência, é possível “refletir sobre o passado para compreender o presente e se preparar para o futuro, numa sociedade científica e tecnologicamente avançada como, cada vez mais, é a que estamos vivendo” (apud PARANÁ, 2008, p. 70). Os PCN+ (Parâmetros curriculares nacionais complementares, desenvolvidos em 2002) ressaltam que a Física deve ser ensinada de forma a tornar os alunos capazes de perceber e lidar tanto com os fenômenos naturais quanto os tecnológicos, o que está presente no cotidiano e também o que não está.

Para Carvalho (1998, p. 4) “A construção do conhecimento em ciências tem como um dos principais campos de pesquisa o processo de mudança conceitual, que deve levar em conta, de um lado, o processo histórico da construção desse conceito e, de outro, uma teoria que explique como o conceito é construído” (apud RANGEL, 2017, p. 14).

No mesmo trecho do texto e também citado por Rangel (2017), Carvalho (1998) também destaca a importância de os professores levarem em conta a forma como os alunos compreendem o mundo e qual a lógica das concepções prévias dos mesmos. Sobre tais concepções, que geralmente são classificadas como concepções alternativas por não condizerem com as explicações científicas vigentes. Martins (2006, p. xxv) diz que “se eles não forem reconhecidos e gradativamente

transformados podem continuar a existir, paralelamente às concepções científicas impostas pelo professor, interferindo constantemente com sua efetiva compreensão, aceitação e aplicação”, tal interferência é classificada por Gaston Bachelard como “obstáculo epistemológico”. Ainda sobre isso, o autor incentiva os professores a aproveitarem destas concepções, comparando-as com concepções antigas (e hoje vistas como equivocadas, mas não menos científicas) da Ciência, segundo ele:

O processo pelo qual o aluno precisa passar é semelhante ao processo de desenvolvimento histórico da própria ciência (Barros & Carvalho, 1998). As suas resistências são semelhantes às dos próprios cientistas do passado; e mesmo as suas ideias, por mais "absurdas" que pareçam, podem ser semelhantes às que foram aceitas em outros tempos por pessoas que nada tinham de tolas (MARTINS, 2006, p. xxvi).

Segundo a teoria da Aprendizagem Significativa, elaborada por David Ausubel, tal como exposta por Moreira (2012), estas concepções podem corresponder a subsunções. Segundo o autor, subsunção:

é o nome que se dá a um conhecimento específico, existente na estrutura de conhecimentos do indivíduo, que permite dar significado a um novo conhecimento que lhe é apresentado ou por ele descoberto. (...) a atribuição de significados a novos conhecimentos depende da existência de conhecimentos prévios especificamente relevantes e da interação com eles (MOREIRA, 2012, p. 2).

De forma resumida, para que um novo conhecimento surja, e o aluno aprenda algo, é necessário que as novas informações interajam com conceitos anteriormente presentes em sua estrutura cognitiva, tal interação é não-litera e não arbitrária. A estrutura cognitiva pode ser considerada, de forma simplificada, uma estrutura de subsunções inter-relacionados. Ressalta-se que tal estrutura é dinâmica, havendo mudanças na “hierarquia” de subsunções, ou seja, o desenvolvimento e “englobamento” dos subsunções não é linear. O fato de uma aprendizagem ser significativa, ou seja, não mecânica, não significa necessariamente que a aprendizagem se deu de forma correta. É possível que uma pessoa aprenda significativamente um conceito ou uma informação equivocada. Também é necessário enfatizar que para que a aprendizagem significativa ocorra, o sujeito deve estar predisposto a aprender, pois o significado está nas pessoas, não nos materiais.

Não faltam referenciais quando se trata da necessidade de se trabalhar de forma contextualizada, mas não basta apenas o conhecimento histórico. Segundo os PCN+, as competências para lidar com o mundo físico passam a ter sentido (e significado) quando articuladas com as competências de outras áreas, de forma integrada (BRASIL, 2002). Uma boa forma de se trabalhar com o ensino de Física de forma articulada, é a utilização do chamado enfoque CTSA (Ciência, Tecnologia e

Sociedade e Ambiente), que é amplamente incentivado, como, por exemplo, na Base Nacional Comum Curricular (BNCC):

A contextualização social, histórica e cultural da ciência e da tecnologia é fundamental para que elas sejam compreendidas como empreendimentos humanos e sociais. Na BNCC, portanto propõe-se também discutir o papel do conhecimento científico e tecnológico na organização social, nas questões ambientais, na saúde humana e na formação cultural, ou seja, analisar as relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente. (BRASIL, 2018).

Segundo Martins (2006), é a partir de episódios históricos que se pode compreender as inter-relações entre ciência, tecnologia e sociedade, também demonstrando para os alunos que a Física e as ciências não são coisas isoladas, mas que fazem parte de um desenvolvimento histórico e cultural, de um mundo humano. Além disso, trabalhando desta forma é possível (e fundamental) que se exponha aos alunos que a Ciência não está pronta e nunca estará, que é um processo humano, que envolve grandes acertos e também grandes erros e que não foi construída apenas por grandes gênios, mas também por muitas pessoas desconhecidas, tornando-se claro que estes sujeitos podem participar do desenvolvimento científico e tecnológico (vide HÜLSENDEGER, 2007 e MARTINS, 2006).

4.2 O ensino de termodinâmica

Ao se pensar em CTS no ensino de Física e buscando-se trabalhar com os temas a partir da História e Filosofia da Ciência (HFC), a Termodinâmica acaba se mostrando como uma boa opção de conteúdo programático, principalmente ao se pensar nas máquinas térmicas e todo o seu impacto histórico, social, cultural, filosófico e tecnológico dentro da Revolução Industrial e que reflete no funcionamento da sociedade até os dias de hoje.

A leitura do Guia PNLD (Plano Nacional do Livro Didático) 2018 (BRASÍLIA, 2017) evidencia a continuidade da cultura dos conteúdos de Física, a nível de ensino médio, serem divididos em 4 principais áreas, são estas i) a Mecânica, ii) a Termodinâmica (TD), iii) o Eletromagnetismo (EM) e iv) a Física Moderna. Geralmente i) é abordado no 1º ano do EM, ii) no 2º ano, juntamente com Ótica, Ondas e acústica e iii) e iv) no 3º ano.

Segundo os PCN (BRASIL, 2000), a TD abre espaço para uma construção ampliada do conceito de energia ao se investigar os fenômenos que envolvem calor, troca de calor e transformação de energia térmica em mecânica. Segundo o documento:

Nessa direção, a discussão das máquinas térmicas e dos processos cíclicos, a partir de máquinas e ciclos reais, permite a compreensão da conservação de energia em um âmbito mais abrangente, ao mesmo tempo em que ilustra importante lei restritiva, que limita processos de transformação de energia, estabelecendo sua irreversibilidade. A omissão dessa discussão da degradação da energia, como geralmente acontece, deixa sem sentido a própria compreensão da conservação de energia e dos problemas energéticos e ambientais do mundo contemporâneo. (BRASIL, 2000, p. 25).

Em seu artigo “Algumas considerações sobre o ensino e a aprendizagem do conceito de energia”, Assis (2003) aponta que:

A importância do conceito de energia tem sido apontada por vários autores como um elemento de ligação entre diferentes partes da física, destacando a importância desse conceito, tanto do ponto de vista científico, quanto tecnológico (ASSIS, 2003, p. 41).

Angotti (1993) classifica a energia como um conceito unificador e supradisciplinar. Segundo ele, a energia “é uma ponte segura que conecta os conhecimentos específicos de C&T” e pode e deve, mais do que qualquer outra grandeza física, enquadrar “as tendências de ensino que priorizam hoje as relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade” (ANGOTTI, 1993, p. 195). Ainda em relação a energia, Solbes & Tarin (1998) classificam o conceito como “um dos mais potentes, frutíferos e unificadores da física clássica” (apud ASSIS, 2003 p. 41). Para Mostacchio (2014):

É necessário que os alunos entendam que a Termodinâmica é capaz de lhe proporcionar uma compreensão além dos conceitos de calor e temperatura, permitindo um conhecimento desde o desabrochar de uma flor, até a utilização de um refrigerador para armazenar alimentos, colaborando para sua alfabetização científica, estabelecendo assim a relação entre a ciência e mundo cotidiano. (MOSTACCHIO, 2014, p. 6).

Neste mesmo trabalho, o autor faz uma citação direta a A.S.T Júnior (1981, p. 29), que aponta que “em particular, duas leis da termodinâmica regulam, sem exceção conhecida, todos os fenômenos que envolvem transformações ou transferências de energia”. Nas DCE-PR é levantada a possibilidade de se ensinar TD a partir de suas leis e das primeiras formulações da conservação de energia. Neste contexto são destacados os trabalhos de Mayer, Helmholtz, Maxwell e Gibbs. Destrinchando cada uma das Leis da Termodinâmica, o documento sugere que:

- A Primeira Lei da Termodinâmica, que também porta a ideia de calor como forma de energia, permite identificar sistemas termodinâmicos postos a realizar trabalho;

- O estudo da Segunda Lei da Termodinâmica é importante para a compreensão das máquinas térmicas, mas vai além, pois conduz ao conceito de entropia.

Foi a partir dos experimentos de Joule, principalmente o do equivalente térmico do calor, que o princípio de conservação de energia, fundamentado principalmente por Mayer, começou a ser construído, sendo esta a base da Primeira Lei da Termodinâmica, enunciada matematicamente pela primeira vez por Clausius (1822-1888). Outro fator fundamental para o desenvolvimento da TD foi o trabalho de Sadi Carnot, “Reflexões Sobre a Potência Motriz do Fogo”, do qual o denominado “Princípio de Carnot” derivou a Segunda Lei da Termodinâmica.

A Segunda Lei afirma que é impossível a existência de ciclos perpétuos e, além disso, não é possível construir um refrigerador ideal. Esta última afirmação fica clara no Enunciado de Kelvin-Planck:

É impossível, por meio de um agente material inanimado, derivar efeito mecânico de uma porção de matéria resfriando-a abaixo da temperatura do mais frio dos objetos adjacentes. (THOMSON, 1975, apud. NÓBREGA et al., 2013, p. 3).

Em termos mais práticos, é impossível que uma máquina térmica, operando em ciclos, tenha como único efeito a extração de uma certa quantidade de calor de um corpo quente e a conversão desta quantidade integralmente em trabalho mecânico.

Conforme os objetivos desta pesquisa, iremos, a partir da exposição do funcionamento das máquinas trabalhadas, fazer a proposta de como trabalhar as leis da termodinâmica aqui citadas.

5 METODOLOGIA

A proposta aqui desenvolvida não tem como objetivo a aplicação direta em sala de aula, sendo assim, a metodologia a ser utilizada se refere a pesquisa bibliográfica a ser realizada para a fundamentação teórica dos conteúdos a serem trabalhados. Segundo Bocatto (2006), a pesquisa bibliográfica:

busca a resolução de um problema (hipótese) por meio de referenciais teóricos publicados, analisando e discutindo as várias contribuições científicas. Esse tipo de pesquisa trará subsídios para o conhecimento sobre o que foi pesquisado, como e sob que enfoque e/ou perspectivas foi tratado o assunto apresentado na literatura científica. (BOCCATO, 2006, p. 266).

. Segundo Moraes (1999, p. 2), a análise de dados qualitativos “parte de uma série de pressupostos, os quais, no exame de um texto, servem de suporte para captar seu sentido simbólico”. Devido a tais pressupostos, o enfoque da análise pode variar de diversas maneiras, de acordo com a intenção de seu executor, além disso, é importante se destacar que toda a análise sempre será uma interpretação dos dados por parte do pesquisador, devido a não neutralidade em sua leitura.

Ainda segundo o autor, o contexto da análise dos dados deve ser explicitado em qualquer análise de conteúdo, pois os dados sempre serão apresentados dentro do contexto dado pelo pesquisador. A metodologia de análise proposta por ele é dividida em 5 etapas: i) a preparação das informações, ii) a unitarização dos conteúdos, iii) a categorização, iv) a descrição e v) a interpretação.

A etapa de preparação consiste na leitura de diversos referenciais teóricos, seguida da seleção de quais destes estarão efetivamente de acordo com os objetivos de pesquisa. Feito isto, os materiais devem passar por um processo de codificação, no qual o autor da pesquisa os organiza da melhor forma para sua posterior análise.

O processo de unitarização pode ser simplificado pela criação de unidades de análise, estas que consistem em códigos (escritos ou numéricos) que definem ou classificam os diferentes elementos a serem posteriormente categorizados. A classificação destes elementos consiste na categorização dos mesmos, ou seja, no agrupamento de diferentes unidades de análise com semelhanças em certos critérios estabelecidos pelo pesquisador. Essas categorias representam o resultado de um esforço de síntese, no qual são destacados os aspectos mais importantes de cada unidade previamente organizada. Além disso, as categorias devem ser válidas, exaustivas e homogêneas e a classificação de qualquer elemento do conteúdo deve ser mutuamente exclusiva.

Uma vez definidas as categorias e identificado o material constituinte de cada uma delas, inicia-se o processo de descrição, este que consiste na síntese, geralmente de forma escrita, do conjunto de significados presentes em cada uma das diversas unidades anteriormente criadas. Feita a descrição de cada grupo de análise, inicia-se o processo de interpretação dos dados analisados, esta que pode consistir na formulação de novas teorias ou hipóteses por parte do autor.

Nesta pesquisa, a interpretação dos dados implicará na forma com que a proposta didática será construída, abrangendo diferentes abordagens e metodologias para se desenvolver o processo de ensino-aprendizagem de diferentes conteúdos, estes definidos a partir dos processos ii e iii.

6 DESENVOLVIMENTO

Iniciaremos agora o desenvolvimento dos conteúdos desta proposta de ensino, desta forma, todo o contexto histórico e tecnológico desenvolvido a seguir, faz parte do conteúdo proposto a ser trabalhado em sala de aula, servindo assim não apenas como subsídio teórico para o professor, mas sim como conteúdos que devem ser transpostos e trabalhados em sala de aula.

6.1 Contexto histórico

A revolução industrial não é um período consensual entre os historiadores, tanto no que se refere ao seu início e final, quanto no que se refere se de fato o que ocorreu no período, que aqui delimitaremos entre os anos de 1760 e 1830², pode ser considerado uma revolução e não uma mudança gradual consequente da revolução agrícola dos séculos XVII e XVIII. Segundo Ashton (1977), no período entre 1700 e 1760 a Inglaterra não experimentou qualquer revolução na técnica de produção, na estrutura da indústria ou na vida econômica e social do povo. Ainda segundo ele, nesse período haviam obstáculos para a grande curva de desenvolvimento industrial que marcou o período posterior, entre eles, falta de materiais nos setores metalúrgico e têxtil, na indústria do ferro a falta de um combustível adequado e nas minas a ausência de um invento eficiente para remover a água, que causava a interdição de várias minas devido aos alagamentos causados pela extração de carvão e outros minérios. Ao mesmo tempo, o transporte, o comércio e o crédito sofriam devido aos monopólios que eram favorecidos pela legislação vigente.

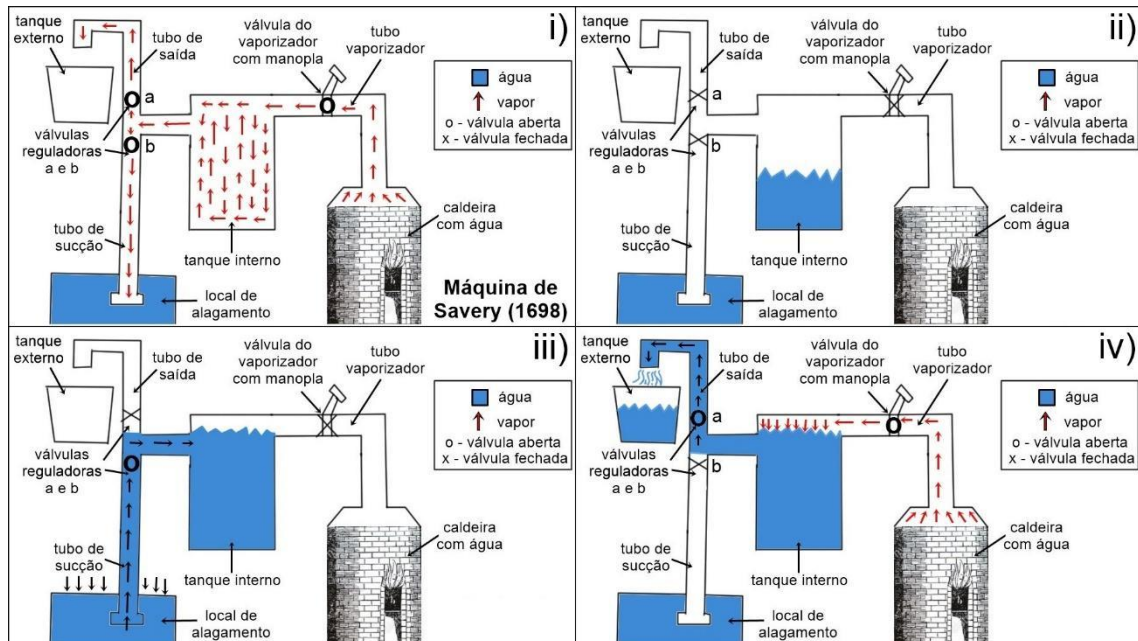
6.2 A Máquina de Savery

A fim de remover a água das minas de carvão, vários técnicos buscaram por desenvolver máquinas, sendo a primeira patente atribuída ao capitão Thomas Savery (1650-1715), em sua máquina, chamada por ele de “A Amiga dos Mineradores” ou “Uma máquina para elevar água pelo fogo” (1698), que utilizava da diferença de pressão interna e externa à ela, gerada pelo vácuo produzido pela condensação da água em seu tanque, para sugar água das minas aproveitando o trabalho realizado

² Esse é o período considerado por Ashton (1977) como o da I Revolução Industrial, provavelmente por estes anos representarem respectivamente a ascensão de Jorge III à coroa inglesa e a morte, e consequente saída do poder, de Jorge IV.

pela pressão atmosférica. Ao apresentar sua máquina, Savery teve a ideia de comparar o seu “poder” ou potência com o de cavalos³, pois estes eram os responsáveis por, a partir de cordas, carregar o carvão que era extraído das minas⁴. O Funcionamento desta máquina pode ser simplificado pelo esquema a seguir.

Figura 1 – Esquema simplificado da máquina de Savery (1698)



Fonte: Autoria Própria (2021)

- i) O operador da máquina acende a caldeira e abre manualmente a válvula do tubo vaporizador. Assim o vapor da água irá empurrar todo o ar da máquina para fora;
- ii) Feito isso, o operador deve fechar todas as válvulas da máquina presentes na imagem, e acionar uma torneira que resfria a superfície externa do tanque. A diminuição da temperatura irá fazer com que o vapor d'água dentro da máquina condense, criando vácuo no resto do seu volume;
- iii) A ausência de pressão interna no tubo de sucção da máquina fará com que a água do local de alagamento (geralmente minas de carvão) seja empurrada para dentro da máquina devido à pressão atmosférica externa, fazendo com que a válvula b seja aberta e a água encha o seu reservatório interno;

³ É o que diz Lardner (1851, p.44), porém outros autores como Ashton (1977) atribuem a autoria desta ideia a Watt.

⁴ Mesmo com a utilização da máquina de Savery e posteriormente das outras máquinas aqui citadas, por um bom tempo a função de retirar o carvão continuou sendo realizada por cavalos, posteriormente substituídos por carros. As máquinas inicialmente eram empregadas apenas para a retirada da água das minas.

- iv) Uma vez com que o tanque interno esteja cheio, abre-se novamente a válvula do vaporizador. Desta vez a pressão da expansão do vapor irá realizar o trabalho de empurrar a água para fora da máquina através do tubo de saída, que tem sua válvula a aberta devido ao fluxo de água.

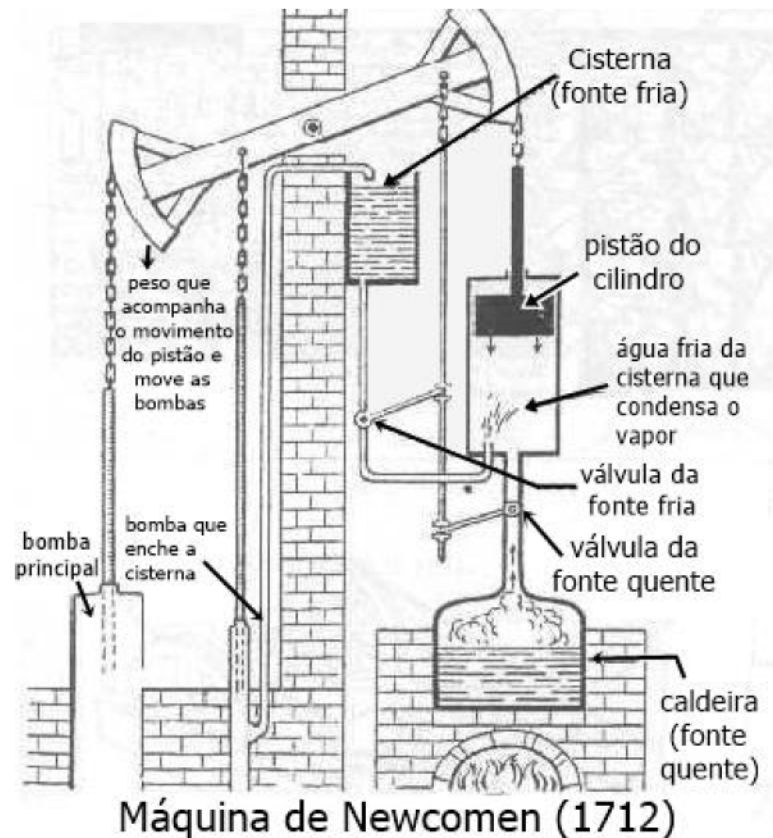
Já era sabido na época que esta máquina tinha a limitação de erguer a água à uma altura de 34 pés, que equivalem a aproximadamente 10,36 metros, valor equivalente a 760mm de mercúrio, obtido como o valor da pressão atmosférica por Evangelista Torricelli em 1643. Com a profundidade das minas estando cada vez maior, seria necessária a associação de várias máquinas, o que não seria viável devido as suas limitações e seu grande custo de produção e funcionamento. A interdição de minas devido a alagamentos já era um problema comum.

6.3 A Máquina de Newcomen

Tendo tomado conhecimento da máquina de Savery e de seus defeitos e também o modelo da máquina atmosférica proposto por Denis Papin por volta de 1690, ao qual Savery alegava não conhecer⁵, Thomas Newcomen (1664-1729) se propôs a criar uma Máquina Atmosférica, mais barata, eficiente e segura que a de Savery. A Máquina Atmosférica de Newcomen era composta por um cilindro ligado a uma caldeira, com um pistão preso a uma haste, fixada por correntes em uma grande estrutura sólida (como a do esquema abaixo). A outra extremidade desta estrutura estava ligada também por correntes a duas bombas, uma responsável por tirar a água da mina de carvão e outra responsável por encaminhar parte desta água para a cisterna, que quando ativada, resfriava o cilindro com jatos de água para condensar o vapor, gerando o vácuo responsável pela descida do pistão devido à pressão atmosférica. Este ciclo está melhor representado no esquema a seguir (que carece de uma válvula de saída para encaminhar a água do cilindro principal para a caldeira).

⁵ Savery descreveu uma situação em que descobriu um fenômeno parecido com o explorado em sua máquina em uma taverna, que o teria inspirado a criar sua máquina. Para saber mais ver Lardner (1851, p. 32).

Figura 2 – Esquema simplificado da máquina de Newcomen (1712)



Fonte: Adaptado de Hogben (1938, p. 555)

- i) O operador da máquina acende a caldeira e abre manualmente a sua válvula, de forma com que o vapor empurra o pistão para cima, consequentemente fazendo com que a outra extremidade do peso desça o êmbolo das bombas para o fundo do ponto de alagamento.
- ii) Feito isso, o operador fecha a válvula da caldeira e a válvula da cisterna é aberta, fazendo com que a água fria liberada resfrie o cilindro, de forma com que o vapor condense. Com isso, o pistão é empurrado para baixo devido à pressão atmosférica, movendo o peso novamente para sua posição inicial, assim fazendo com que a bomba principal eleve a água para fora da mina e a bomba secundária encaminhe parte desta água até a cisterna.
- iii) Desta forma a máquina volta para o seu “estado inicial” e o ciclo pode ser reiniciado.

Este mecanismo com hastes sustentando as bombas, que também são externas permitia com que a máquina pudesse ser instalada mais longe do fundo das minas em relação a máquina de Savery, além disso, ela era mais segura por trabalhar a menores pressões (até 30 vezes menores) e temperaturas e duráveis. Segundo

Lardner (1851), mesmo com a criação das máquinas mais eficientes, a máquina de Newcomen continuou a ser usada devido ao seu preço reduzido. Apesar da concorrência entre as máquinas de Savery e Newcomen, Savery recebia parte dos ganhos de Newcomen e seu associado John Calley com sua máquina, devido a sua patente relacionada ao princípio de condensação utilizado em ambas as máquinas.

6.4 A Máquina de Watt

A máquina de Newcomen fez grande sucesso e com o passar dos anos vários engenheiros buscaram fazer melhorias, tendo inicialmente se destacado, em 1717, Henry Beighton (1687-1743) por suas contribuições⁶, e após décadas de apenas pequenas melhoras estruturais, em 1759, James Brindley (1716-1772) que descobriu melhores materiais para as peças da máquina e patenteou um meio de automatizar o nível de água da caldeira.

Em 1763, um professor da Universidade de Glasgow enviou um modelo da máquina de Newcomen para a oficina de James Watt (1736-1819) para que este fizesse alguns reparos. Ao realizar estes reparos, Watt percebeu que o cilindro ficava extremamente quente, porém este calor não era utilizado pois o cilindro precisava ser resfriado para continuar o ciclo da máquina e, após consertar a máquina, ele passou a fazer diversos experimentos para tentar aumentar o desempenho da Máquina de Newcomen, que chamaremos a partir de agora de MNC.

Outra percepção de Watt, a partir da noção descrita por William Cullen (1710-1790) de que a temperatura necessária para evaporar água no vácuo era menor do que para fazer o mesmo na atmosférica, foi a de que na MNC, a água fria da cisterna era aquecida pelo vapor condensado no cilindro, sendo em parte vaporizada e criando um vapor de baixa temperatura e pressão, reduzindo a potência do motor e fazendo necessária a injeção de mais água para seu funcionamento. Da mesma forma, também era necessário mais vapor para se erguer o pistão, pois este havia sido previamente resfriado para ser rebaixado. Concluiu-se então, que uma forma de melhorar o desempenho da máquina seria resfriar todo o cilindro, e não apenas o vapor abaixo do pistão.

⁶ Beighton foi um engenheiro da Royal Society que em 1717 fez o primeiro desenho esquemático da Máquina de Newcomen e calculou a pressão efetiva que o pistão poderia suportar, tabelando a massa de água que essas máquinas poderiam bombear com base no tamanho de seus cilindros. Para mais informações vide o volume 1 do Biographical Dictionary of Civil Engineers vol. 1, de Sir Alec Skepton (2002).

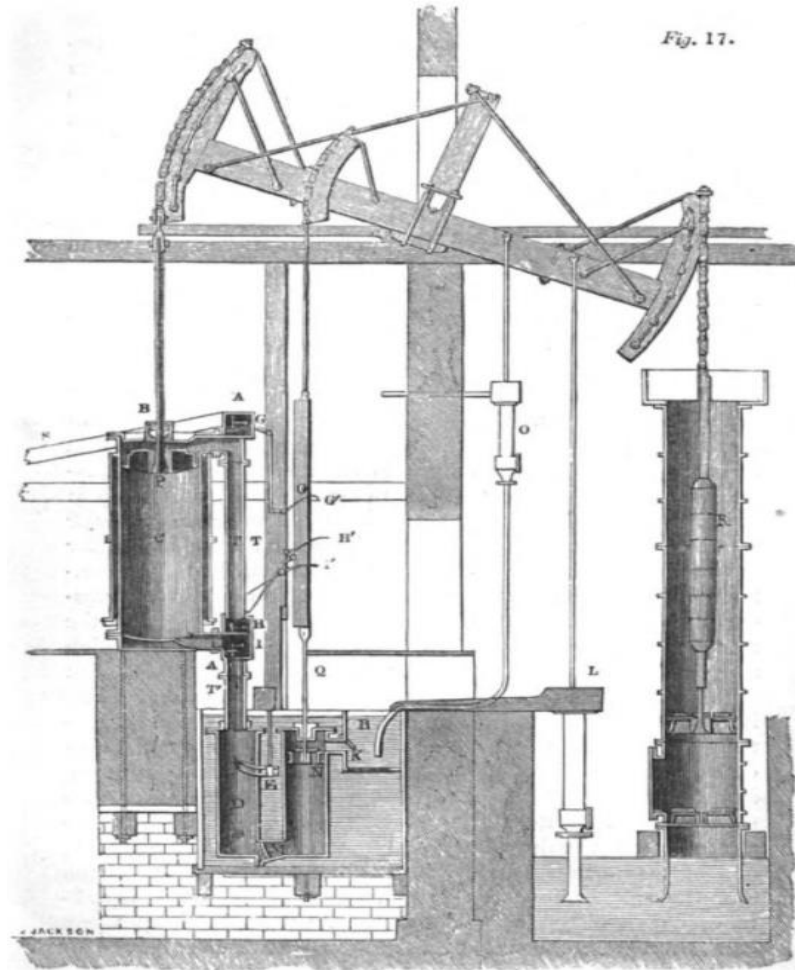
Com a realização de mais experimentos buscando dados quantitativos relacionados aos processos de operação da máquina, Watt obteve a relação de que a água (líquida) ocupava 1800 vezes menos volume que seu vapor e então, com dados numéricos, calculou-se que eram utilizados 75% a mais do que o necessário de água tanto para erguer quanto para descer o pistão. Ao comunicar sobre essa descoberta para seu amigo, Joseph Black (1728-1799), este o informou de sua teoria sobre o fenômeno denominado de calor latente.

Esse grande percentual desperdiçado de combustíveis fez com que ele passasse a buscar uma forma de fazer o pistão descer sem que fosse necessário resfriar o cilindro, ou em outras palavras, Watt desejava encontrar uma forma de criar vácuo no cilindro sem resfriá-lo. Foi então, em 1765 que Watt descobriu que a produção de vácuo poderia ser igualmente eficiente mesmo que a condensação ocorresse fora do cilindro, para isso, bastava conectar o cilindro com o pistão, a partir de um tubo, a outro tanque (resfriado) onde ocorra a condensação do vapor, desta forma, o vapor do tanque quente escoava para o tanque frio devido a diferença de pressão e também é condensado devido a temperatura do tanque frio, assim gerando vácuo também no cilindro do pistão, sem precisar resfriá-lo. Segundo Lardner:

Ele [Watt] costumava dizer, que no momento em que teve a ideia da condensação avulsa, todos os detalhes da sua máquina aprimorada surgiram sucessivamente em sua mente, de forma tão rápida que, no decorrer de um dia, sua invenção já estava completa o suficiente para ser submetida a experimentos. (LARDNER, 1851, p. 68 – tradução própria).

Outra criação de Watt para sua famosa máquina a vapor, foi a de uma bomba, responsável por remover a água (aquecida após a condensação) e o ar de dentro do condensador, criando o vácuo necessário para o funcionamento do condensador. Além disso, posteriormente Watt preferiu fechar a parte de cima do cilindro, conectando-o, juntamente com seu entorno, com a saída da caldeira, deixando-o mais quente e fazendo com que o pistão fosse movido para baixo com o vapor, não mais dependendo do trabalho da atmosfera. Pode-se dizer então que a Máquina de Watt, que agora será abreviada como MW, não era uma máquina atmosférica, mas legitimamente uma máquina a vapor. Seguiremos agora com o esquema de funcionamento da Máquina de Watt, porém nos limitaremos a descrevê-la comparando-a com a Máquina de Newcomen.

Figura 3 – Esquema simplificado da Máquina de Watt (1765)



Fonte: Lardner (1851, p. 80)

Assim como na MNC, a MW tinha, na extremidade oposta à do cilindro principal, duas bombas, uma destinada a remover a água da mina, e outra destinada a abastecer a fonte fria da máquina, neste caso o condensador. Diferente da MNC, o pistão não era levantado pelo vapor, mas sim pelo peso da bomba principal da máquina (que geralmente tinha massas adicionais fixadas). Além dele, era levantado o pistão da bomba do condensador, removendo a água quente e o ar para o tanque separado (B na imagem), que também tinha uma bomba que levava esta água quente novamente para a caldeira.

O levantamento do pistão da bomba do condensador, abria a válvula que conectava a caldeira a parte superior do pistão do cilindro principal, e a válvula do tubo que conectava o cilindro principal ao do condensador, desta forma a diferença de pressão entre os cilindros fazia com que a pressão interna do cilindro principal diminuísse pelo processo descrito anteriormente, de forma com que a pressão do vapor em cima do pistão o empurrasse para baixo, erguendo as bombas do outro lado

da máquina, drenando assim a água da mina. Ao mesmo tempo, o pistão da bomba do condensador era empurrado para baixo, e este continha um mecanismo para erguer a água abaixo dele⁷. Feito isso, as válvulas abertas eram fechadas, e vice-versa e, devido ao fechamento da válvula da caldeira, o peso da bomba principal excedia a força exercida pela pressão interna do cilindro, assim recomeçando o ciclo.

Apesar de sua criação em 1765, a Máquina de Watt só pode ter seus primeiros passos para uma produção em larga escala em 1768, tendo sua patente⁸ registrada em 1769 e seu primeiro protótipo construído funcionando perfeitamente. No decorrer das próximas décadas, dezenas de engenheiros, incluindo Watt buscaram desenvolver a máquina para novas aplicações, principalmente utilizando de mecanismos de movimento circular, permitindo uma gama de novas possibilidades. De acordo com Ashton (1977), a máquina de Watt “tinha uma eficiência quatro vezes maior do que a de Newcomen e era usada na extração de água, nas salinas, nas fabricas de cerveja, nas destilarias e nas minas de metal”, porém, ainda segundo ele, ela não era tão usada nas minas de carvão, pois neste setor a economia de combustível (que era a principal diferença entre as duas) não era tão relevante. Já na indústria do ferro, o invento era usado para fazer subir água, girar grandes rodas para movimentar foles, martelos de forja e laminadores.

6.5 Os inventos posteriores de Watt e o início da revolução industrial

Ainda segundo Ashton (1977), o movimento de rotação das máquinas e a ampliação de seus usos foi possível graças a novos inventos, principalmente de Watt e Boulton, entre elas destacaram-se a máquina chamada em português de sistema solar, originalmente chamada de “sun and planet” patenteada por eles em 1781, o engenho rotativo de ação dupla, patenteado no ano seguinte e a invenção chamada de “o governador”, que tornava os movimentos mais leves e regulares, essencial para os processos industriais mais delicados e complexos. Para ele,

Quando, em 1783, se montou o primeiro dos novos engenhos para fazer mover um martelo na oficina de John Wilkinson em Bradley, tornou-se claro que se tinha dado, na Grã-Bretanha, uma revolução tecnológica. (ASHTON, 1977, p. 93).

⁷ Este mecanismo pode ser compreendido ao se observar a Fig. 18 da p. 85 de Lardner (1851) e se realizar a leitura do texto subsequente.

⁸A patente foi registrada em parceria com John Roebuck, que havia tomado conhecimento dos projetos de Watt e inicialmente o contratado como engenheiro civil, tornando-se mais tarde financiador do projeto. Em 1773, Matthew Boulton comprou de Roebuck seu direito a patente e se associou a Watt em novas patentes relacionadas a sua homônima máquina.

Ainda segundo o autor, a nova forma de energia (motriz) e os maquinismos de transmissão, que faziam máquinas realizarem atividades antes feitas pela força muscular foram a via pela qual a indústria entrou na idade moderna.

Na década de 1760 já era possível observar uma vasta quantidade de patentes surgindo nas mais diversas áreas, com inovações na agricultura, nos transportes, no comércio e nas finanças surgindo com uma “rapidez para a qual é difícil encontrar paralelo em qualquer outra época ou região”. Observa-se que este período era propício a invenção e ao progresso, visto a baixa taxa de juros coincidentes com a expansão dos mercados interno e externo. Como efeito, segundo Ashton (1977), “assim como [antes] um obstáculo no caminho de qualquer indústria havia conduzido ao congestionamento de outras, assim também a remoção dos obstáculos suscitava uma libertação progressiva”.

7 DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA DE ENSINO

O ensino da física, a nível superior, no Brasil é marcado por uma tradição em relação aos conteúdos trabalhados, a ordem com que são abordados e os livros didáticos que são utilizados. Segundo Zanotello & Fagundes (2012), os principais livros utilizados nas ementas das disciplinas de física são Halliday e Resnick (2009), Serway e Jewett (2007), Tipler e Mosca (2009), Young e Freedman (2004), que são “adotadas como bibliografias básicas pela maioria das instituições de ensino brasileiras”. Além disso, segundo estes autores, esta tradição de livros didáticos é refletida nos livros didáticos de ensino médio e também na forma como os professores organizam seus conteúdos na educação básica.

Neste trabalho, não buscaremos ir contra esta tradição, desta forma, em relação aos conteúdos de física (em si) a serem trabalhados nesta abordagem, não serão apresentadas inovações. O enfoque estará então na abordagem destes conteúdos de forma contextualizada com base na historiografia levantada na sessão anterior, buscando atribuir significado a eles.

7.1 As grandezas físicas envolvidas e a Primeira Lei da TD

Para o desenvolvimento desta proposta de ensino, iremos nos basear nas grandezas e fenômenos físicos como descritos por Tipler & Mosca (2009), e como descrito anteriormente, partiremos do funcionamento das máquinas previamente expostas para a dedução e explicação da Primeira e da Segunda lei da termodinâmica. Segundo os autores:

A relação entre calor transferido para um sistema, o trabalho realizado sobre ele e a variação de sua energia interna é a base para a primeira lei da termodinâmica. (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 599).

Essas grandezas são definidas por eles da seguinte forma (com pequenas adaptações minhas):

Calor (Q): é a energia transferida em razão de uma diferença de temperatura;

Trabalho (W): é a transferência de energia por uma força em movimento. Neste caso em especial, no contexto das máquinas térmicas é preferível definir o trabalho realizado a partir de sua definição matemática, ou seja, como o produto da força aplicada sobre o pistão pelo deslocamento por ele sofrido.

Energia interna (U): é a energia total de um corpo no referencial de seu centro de massa.

Finalmente, tendo introduzidos estes conceitos podemos passar ao enunciado da Primeira Lei da Termodinâmica, que pode ser sintetizada como um enunciado da conservação de energia: “a soma da transferência de calor para o sistema com o trabalho realizado sobre o sistema é igual à variação da energia interna do sistema.”. Ou, matematicamente:

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

É importante que aqui os alunos saibam que Q será positivo caso o calor seja absorvido pelo sistema e negativo caso seja rejeitado por ele, enquanto o trabalho realizado pelo sistema é positivo e o realizado sobre ele é negativo. Ao se estudar sobre máquinas térmicas, é interessante separar os calores absorvido e rejeitado, chamando-os respectivamente de calor da fonte quente (Q_q) e calor da fonte fria (Q_f). Outro detalhe importante ressaltado pelos autores é que a energia interna é uma função de estado, enquanto o calor e o trabalho não o são. Segundo os autores:

Calor não é algo que esteja contido em um sistema. O calor é uma medida da energia que é transferida de um sistema para outro em razão de uma diferença de temperatura. trabalho é uma medida da energia que é transferida de um sistema para outro porque o ponto de aplicação de uma força exercida por um dos sistemas sobre o outro sofre um deslocamento com uma componente que é paralela à força. (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 608).

Devido à falta de dados técnicos relativos as máquinas a vapor aqui descritas, não iremos propor a realização de cálculos relacionados a elas, seja em relação a Primeira Lei da termodinâmica ou ao seu rendimento. Segundo dados da Enciclopédia Britannica, o rendimento das máquinas de Newcomen e de Savery não chegavam a 1% e a máquina de Watt passava em pouco os 2% de eficiência. Em seu produto educacional “Uma Abordagem CTS das Máquinas Térmicas na Revolução Industrial Utilizando o RPG como Recurso Didático”, Sabka et al. (2016) utilizaram dados *ad hoc* para que seus alunos calculassem a eficiência das máquinas de Newcomen e de Watt. Este recurso é aberto e pode ser usado por professores interessados.

Buscando uma aprendizagem significativa, priorizaremos então, ao invés de uma abordagem técnica focada na utilização quantitativa de equações, o destaque de onde essas grandezas podem ser observadas nas máquinas trabalhadas em nossa proposta. Como as máquinas térmicas operam em ciclos, ou seja, no decorrer dos processos descritos elas voltam as condições iniciais, a variação da energia interna do sistema é nula ($\Delta U=0$), desta forma, decorre da primeira lei que $Q_{\text{ciclo}} = W_{\text{ciclo}}$.

Na máquina de Savery, a água da caldeira, nossa substância operante, absorve o calor ($Q>0$) da queima do carvão da caldeira, passando por uma mudança de fase

se tornando vapor, este vapor realiza um trabalho ($W > 0$) empurrando o ar para fora da máquina. O sistema será então resfriado até que o vapor perca calor ($Q < 0$) até que seja condensado. Posteriormente a máquina receberá calor da caldeira novamente, e a expansão deste vapor realizará o trabalho de empurrar a água, agora sugada do ponto de alagamento da mina, para fora, através do tubo de saída. É necessário que fique claro para os alunos que a Primeira Lei abrange o calor e trabalho trocados pela substância operante, sendo assim, o trabalho realizado/recebido pela máquina, seja pelo seu peso ou pela atmosfera não deve ser contemplado na equação.

No caso da máquina de Newcomen, o vapor realiza o trabalho de empurrar o pistão para cima e perde calor ao ser condensado devido a sua interação com o jato de água fria vindo da cisterna. Neste aspecto o fenômeno da máquina de Watt se assemelha ao da MNC, porém nela o vapor empurra o pistão para baixo e a diferença de temperatura que faz com que o vapor perca calor é originada pela abertura da válvula entre o cilindro principal (fonte quente) e o do condensador (fonte fria).

7.2 A Segunda Lei da TD e o rendimento de máquinas térmicas

Existem várias versões para os enunciados da Segunda Lei da Termodinâmica, a saber, os enunciados de Kelvin e de Clausius. Para os fins de nossa proposta (realizar uma explicação didática e contextualizada da física no funcionamento das máquinas expostas), nos referiremos as versões modernas do enunciado de Kelvin⁹, como propostos por Tipler & Mosca (2009):

- “Nenhum sistema pode absorver calor de um único reservatório e convertê-lo inteiramente em trabalho sem que resultem outras variações no sistema e no ambiente que o cerca”;
- “É impossível para uma máquina térmica, operando em um ciclo, produzir como único efeito o de retirar calor de um único reservatório e realizar uma quantidade equivalente de trabalho”.

Estes enunciados podem ser bem evidenciados ao se pensar sobre os ciclos da máquina aqui descritos, visto que para as máquinas operarem a água que se torna vapor, deve ser condensada para que o ciclo seja completo, além disso, como já

⁹ Na versão original são utilizados termos como “efeito mecânico” e “agente inanimado”, que se usados em sala de aula podem se tornar obstáculos epistemológicos.

destacado, a mudança de estado ocorre com a perda de calor do vapor para a fonte fria. Sendo assim, matematicamente podemos sintetizar esta relação na Primeira Lei, aplicada a máquinas térmicas como:

$$W_{ciclo} = Q_q - Q_f \quad (2)$$

A partir da análise da história da Máquina de Watt, é possível perceber que Watt atribuiu a maior parte da falta de eficiência ou desempenho da máquina de Newcomen ao grande desperdício de calor (e conseqüentemente de combustível) devido ao resfriamento e aquecimento da água ocorrerem no mesmo cilindro, sem que este calor fosse aproveitado antes do resfriamento. Tendo isso em mente, não se torna difícil compreender a definição de rendimento, que é justamente “a razão entre o trabalho realizado pela máquina e o calor retirado do reservatório de alta temperatura [fonte quente]”.

A Segunda Lei da TD, como citado anteriormente, possui um papel importantíssimo aplicando restrições a Primeira Lei, pois, pode se dizer que a Primeira Lei apenas afirma a conservação de energia, sem impor restrições aos ciclos possíveis de serem realizados. Um bom exemplo didático é dado também por Tipler & Mosca (2009):

Imagine que você empurre repetidamente um bloco em cima de uma mesa em uma trajetória circular, o atrito entre o bloco e a mesa irá fazer com que estes se aqueçam. Parte do trabalho realizado por você será convertido em energia mecânica e parte em energia térmica. Devido a este aquecimento, o sistema bloco-mesa não estará mais em equilíbrio térmico com o ambiente e parte do calor obtido pelo trabalho realizado será rejeitado pelo sistema até que este entre em equilíbrio térmico com o seu entorno. Como o sistema opera em um ciclo, a Primeira Lei afirma que a transferência de energia para o ambiente na forma de calor é igual ao trabalho realizado por você sobre o sistema, porém, a primeira lei não exclui a possibilidade de o bloco e a mesa, aquecidos, convertam seu calor em trabalho para mover sua mão para trás em trajetória circular. Neste caso, o sistema que se encontra em equilíbrio térmico iria esfriar espontaneamente e transformar todo o seu calor em trabalho, o que é evidentemente impossível. Daí surge a importância fundamental da Segunda Lei, que evidencia a não simetria entre os papéis desempenhados pelo calor e pelo trabalho e a conseqüente irreversibilidade dos mais diversos fenômenos físicos.

Outro bom exemplo didático, que explora o conhecimento empírico dos alunos e também é utilizado pelos autores, é o de dois copos um ao lado o outro, um com

água quente e outro com água fria. Já é sabido que eventualmente o copo com água quente irá esfriar e o com água fria irá esquentar, até que ambos atinjam a temperatura ambiente; mas jamais observaremos dois copos com água à temperatura ambiente, espontaneamente trocando calor de forma com que um copo tenha sua água aquecida e o outro sua água resfriada. Estas restrições são sintetizadas pelo enunciado de Clausius, adaptados por Tipler & Mosca (2009) como “É impossível um processo cujo único resultado seja o de retirar calor de um reservatório frio e liberar a mesma quantidade de calor para um reservatório quente”.

De fato, não se observa na máquina de Watt a água evaporando dentro do condensador e este vapor subindo para o cilindro principal empurrando o pistão para cima.

Como descrito anteriormente nos referenciais teóricos, as Leis da Termodinâmica foram postuladas somente no século XIX a partir de conclusões vindas do funcionamento de máquinas térmicas, sendo assim, propomos que esta abordagem seja aplicada na ordem com que os conteúdos foram aqui abordados. Desta forma o professor pode deixar claro que nem sempre a técnica e a tecnologia evoluem a partir do desenvolvimento das teorias científicas, podendo, como neste caso, ocorrer na ordem inversa. Para uma aprendizagem ainda mais significativa, também é possível que o professor use fotos e vídeos de como as máquinas aqui abordadas realmente eram e funcionavam.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dessa proposta de ensino buscou-se, por meio de uma exposição histórica e didática das primeiras máquinas a vapor, apresentar os subsídios necessários para um ensino significativo dos conteúdos de Termodinâmica relacionados a máquinas térmicas, apontando, por meio de um enfoque CTS a profundidade das relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade no período da revolução industrial, demonstrando a importância dos fatores externos à ciência e também da contextualização para agregar significado ao conteúdo a ser ensinado.

REFERÊNCIAS

ANGOTTI, J. A. P. et al. Educação em física: discutindo ciência, tecnologia e sociedade. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 7, n. 2, p. 183-197, 2001. DOI <https://doi.org/10.1590/S1516-73132001000200004>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-73132001000200004&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 18 out. 2020.

ASSIS, A.; TEIXEIRA, O. P. B. Algumas considerações sobre o ensino e a aprendizagem do conceito de energia. **Ciência & Educação**, Bauru, ano 1, v. 9, p. 41-52, 25 out. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/S151673132003000100004>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151673132003000100004&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 01 nov. 2020.

AURANI, K.M. As ideias iniciais de Clausius sobre entropia e suas possíveis contribuições à formação de professores. **Revista Brasileira de História da Ciência**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 155-163, 2018.

BOCCATO, V.R.C. Metodologia da pesquisa bibliográfica na área odontológica e o artigo científico como forma de comunicação. **Revista de Odontologia da Universidade Cidade de São Paulo**, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 267-274, 2006.

BRASIL. Ministério da Educação. Governo Federal. **Base Nacional Curricular Comum**. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf >. Acesso em: 14 out. 2020.

BRASIL. Ministério da Educação. **Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+)**: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. MEC, Brasília, 2002. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2020.

BRASIL. Ministério da Educação. **Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio) Parte III.** Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2020.

BRASIL. Ministério da Educação. **PNLD 2018: Física.** SEED, Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.fnde.gov.br/pnld-2018/>>. Acesso em: 14 out. 2020.

CONDÉ, M. L. L. **Um papel para a história:** O problema da historicidade da ciência. 1. ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2017. 171 p. ISBN 978-85-8480-116-9.

COVOLAN, S. C. T.; SILVA, D. A entropia no Ensino Médio: utilizando concepções prévias dos estudantes e aspectos da evolução do conceito. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 11, n. 1, p. 97-117, 2005. DOI <https://doi.org/10.1590/S151673132005000100009>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151673132005000100009&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 15 out. 2020.

DIAS, M. B.; PENIDO, M. C. M. A MOTIVAÇÃO PARA OS ESTUDOS DE FÍSICA. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 23, p. 1-12, 2021. DOI <https://doi.org/10.1590/1983-21172021230119>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epec/a/vqT4sqDCg9fTJMJqQm5jLKm/>. Acesso em: 15 dez. 2021.

ÉVORA, C. Q. **Ensino da “Energia” em Contexto CTSA. Um Estudo com Alunos do 7º Ano de Escolaridade.** Orientador: Mónica Baptista. 2011. 172 p. Relatório da Prática de Ensino Supervisionada (Mestrado em Ensino de Física e Química para o 3º Ciclo do Ensino Básico e Ensino Secundário) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/4065>. Acesso em: 1 nov. 2020.

HACKING, I. **Representar e intervir:** tópicos introdutórios de filosofia da ciência natural. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora da Universidade do estado do Rio de Janeiro, 2012. 400 p. v. 1. ISBN 978-85-7511-236-6.

HOGBEN, L. **Science for a Citizen: A Self-Educator Based on the Social Background of Scientific Discovery**. Ilustração: J. F. Horrabin. Londres: George Allen and Unwin Ltd., 1938. 1120 p.

HÜLSENDEGER, M. J. V. C. A História da Ciência no ensino da Termodinâmica: um outro olhar sobre o ensino de Física. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Minas Gerais, v. 9, n. 2, p. 1-16, 2007. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=129516654005>. Acesso em: 5 ago. 2020.

LARDNER, Dionysius. **The steam engine, steam navigation, roads, and railways**. 8. ed. Londres: Taylor, Walton & Maberly, 1851. 422 p. E-book.

MARTINS, A. F. P. História e Filosofia da Ciência no ensino: Há muitas pedras nesse caminho... **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 24, n. 1, p. 112-131, 2007. DOI <https://doi.org/10.5007/%25x>. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6056/12761>. Acesso em: 1 nov. 2020.

MARTINS, R. A. Introdução: a história da ciência e seus usos na educação. In: CIBELLE CELESTINO SILVA. **Estudos de história e filosofia das ciências: Subsídios para aplicação no Ensino**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2006. p. 3-21. ISBN 85-88325-57-8.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis**, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995. DOI <https://doi.org/10.5007/%25x>. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7084/6555>. Acesso em: 1 nov. 2020.

MATTHEWS, M. R. **Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science**. Nova Iorque: Routledge, p. 3-20, 1994.

MORAES, Roque. Análise de conteúdo. **Revista Educação**, Porto Alegre, v. 22, n. 37, p. 7-32, 1999.

MOREIRA, M. A. **O que é afinal Aprendizagem significativa?** Aula Inaugural do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais, Instituto de Física, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 23 de abril de 2020. Aceito para publicação, Qurrriculum, La Laguna, Espanha, 2012.

MOSTACCHIO, Wilson Rogério. **Uma sequência didática para o ensino de máquinas térmicas.** In: PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. Superintendência de Educação. Os Desafios da Escola Pública Paranaense na Perspectiva do Professor PDE, 2014. Curitiba: SEED/PR., 2016. v.1. (Cadernos PDE). Disponível em: http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospde/pdebusca/producoes_pde/2014/2014_uem_fis_artigo_wilson_rogerio_mostacchio.pdf. Acesso em: 05 ago. 2020. ISBN 978-85-8015-080-3.

NOBREGA, M.L. et al. **Max Planck e os enunciados da segunda lei da termodinâmica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 35, n. 3, p. 1-9, 2013. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/S180611172013000300026>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S180611172013000300026&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 15 out. 2020.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. **Diretrizes Curriculares da educação básica (Física).** Curitiba: SEED, 2008. Disponível em: http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/diretrizes/dce_fis.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

RANGEL, C.S. **Uma intervenção didática diferenciada sobre conservação de energia e a atitude dos alunos frente ao ensino de Física.** Orientador: Pierre Schwartz Augé. 2017. 121 p. Dissertação (Mestrado em ensino de física) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, [S. I.], 2017. Disponível em: <https://docplayer.com.br/54796215-Mestrado-nacional-profissional-em-ensino-de-fisica-sociedade-brasileira-de-fisica-instituto-federal-de-educacao-ciencia-e-tecnologia-fluminense.html>. Acesso em: 6 ago. 2020.

Ricardo, E.C. **Problematização e contextualização no ensino de física**. In: A. M. P. Carvalho et al. Ensino de Física. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

SABKA, D. R. et al. **Uma Abordagem CTS das Máquinas Térmicas na Revolução Industrial Utilizando o RPG como Recurso Didático**. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <http://www.lief.if.ufrgs.br/~skywalker/>. Acesso em: 25 nov. 2021.

SANCHES, M. B.; Neves, M. C. D. S. **A Física moderna e contemporânea no ensino médio: uma reflexão didática**. Maringá: Eduem, 2011.

SCHEID, M. J. **História da ciência na educação científica e tecnológica: contribuições e desafios**. Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia. v. 11, n. 2, 2018. DOI 10.3895/rbect.v11n2.8452. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect/article/view/8452/pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 788 p. v. 1. ISBN 978-85-216-1892-8.

ZANOTELLO, M.; FAGUNDES, M. B. Ensino de Física Moderna e Contemporânea: análise de uma disciplina para ingressantes na educação superior. **Educação: Teoria e Prática**, v. 22, n. 40, 2012.