

INSTITUTO FEDERAL
AMAZONAS

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS PRÓ-REITORIA DE ENSINO CAMPUS MANAUS CENTRO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

JARLISON FEITOZA DE BRITO

ENTROPIA E O FUNCIONAMENTO DAS MÁQUINAS TÉRMICAS

MANAUS - AM

2017

JARLISON FEITOZA DE BRITO

ENTROPIA E O FUNCIONAMENTO DAS MÁQUINAS TÉRMICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS PRÓ-REITORIA DE ENSINO CAMPUS MANAUS CENTRO, como requisito parcial à obtenção do grau de em Engenharia Mecânica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Márcio Gomes da Silva (Orientador)
INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS (IFAM)

Prof. Sidney Assis Chagas (Co-Orientador)
INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS (IFAM)

Prof. Raimundo Mesquita Barros
INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS (IFAM)

Prof. Me. Elcivan dos Santos Silva
INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS (IFAM)

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir.

“O sonho é que leva a gente para frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”

(Ariano Suassuna)

RESUMO

Essa monografia procura abordar os conceitos e história da termodinâmica, proporcionando um entendimento maior do conceito de entropia e do conhecimento das máquinas térmicas. Inicia-se com os conceitos e definições da termodinâmica, depois explica-se os conceitos da lei zero da termodinâmica. A primeira lei, com detalhes advindos de sua fórmula como a variação da energia interna, trabalho e suas aplicações. Iniciou-se as condições da segunda lei. Foram apresentadas as ideias de reversibilidade e irreversibilidade de um sistema mostrando os pensamentos de Sadi Carnot (1824) para a construção de sua máquina perfeita e o rendimento máximo que ela poderia alcançar. Mostrou-se o que é a entropia e a desordem que ela causa em um sistema, bem como uma análise estatística de suas configurações e por fim mostramos o desenvolvimento das máquinas térmicas através de todo esse conceito construído e conclui-se relacionando a aplicação dos conceitos com a evolução das máquinas.

Palavras-chave: leis da termodinâmica. Entropia. Ciclo de Carnot . Máquinas térmicas.

ABSTRACT

This monograph seeks to approach the concepts and history of thermodynamics, providing a greater understanding of the concept of entropy and knowledge of thermal machines. It begins with the concepts and definitions of thermodynamics, then the concepts of the zero law of thermodynamics are explained. The first law, with details coming from its formula as the variation of internal energy, work and its applications. The conditions of the second law began. We presented the ideas of reversibility and reversibility of a system showing the thoughts of Sadi Carnot for the construction of his perfect machine and the maximum yield that it could achieve. We have shown what is the entropy and the disorder that it causes in a system, as well as a statistical analysis of its configurations and finally we show the development of the thermal machines through this whole constructed concept and concludes by relating the application of the concepts with the evolution of machines.

Keywords: Laws of thermodynamics. Entropy. Carnot cycle. Thermal machines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo cilindro pistão.	16
Figura 2 – Máquina industrial com cilindro hidráulico	17
Figura 3 – Máquina siderúrgica	18
Figura 4 – Turbinas eólicas	22
Figura 5 – Baterias	23
Figura 6 – Transferência de calor para o ambiente	24
Figura 7 – Etapas do ciclo de Carnot	27
Figura 8 – Máquina de Carnot	27
Figura 9 – Ciclo com quatro tempos - Otto	28
Figura 10 – Lançamentos de três moedas	33
Figura 11 – Análise de microestados e macroestados em um sistema	34
Figura 12 – Máquina a vapor de Thomas Savery	36
Figura 13 – Máquina a vapor de Newcomen	37
Figura 14 – Máquina a vapor de James Watt	39
Figura 15 – Locomotiva a vapor	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resultados das pesquisas sobre o tema em artigos, revistas e periódicos. . .	11
Quadro 2 – Possibilidades para dois dados	33

LISTA DE SÍMBOLOS

\int	Integral
C_v	Capacidade térmica a volume constante
F	Força
H	Enttalia
J	Joule
k_B	Constante de Boltzmann
n	Número de mols na amostra gasosa
N	Número de partículas
P	Pressão
Q	Calor
Q_q	Calor da fonte quente
R	Constante universal dos gases perfeitos
S	Entropia
T	Temperatura
U	Energia interna
V	Volume
w	Multiplicidade
W	Trabalho

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	10
1	FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA	13
1.1	Trabalho e calor	14
<i>1.1.1</i>	<i>Aplicações de calor e trabalho</i>	16
<i>1.1.2</i>	<i>Temperatura</i>	18
<i>1.1.3</i>	<i>Lei zero da termodinâmica</i>	19
<i>1.1.4</i>	<i>Primeira lei da termodinâmica</i>	19
<i>1.1.5</i>	<i>Variação da energia interna</i>	20
<i>1.1.6</i>	<i>Processos termodinâmicos</i>	20
<i>1.1.7</i>	<i>Aplicações da primeira lei</i>	22
<i>1.1.8</i>	<i>Segunda lei da termodinâmica</i>	22
2	METODOLOGIA	25
2.1	Processo reversível e processo irreversível	25
2.2	Ciclo de Carnot	26
<i>2.2.1</i>	<i>Rendimentos de uma máquina de Carnot</i>	27
2.3	Ciclo Otto	28
2.4	Entropia	29
<i>2.4.1</i>	<i>Entropia e desordem</i>	29
<i>2.4.2</i>	<i>Comportamento estatístico da entropia</i>	32
<i>2.4.3</i>	<i>Macroestado e microestado</i>	32
<i>2.4.4</i>	<i>Multiplicidade</i>	33
2.5	História do desenvolvimento das máquinas térmicas	35
<i>2.5.1</i>	<i>Máquina de Thomas Savery</i>	36
<i>2.5.2</i>	<i>Máquina de Newcomen</i>	37
<i>2.5.3</i>	<i>Máquina de James Watt e a produção em massa</i>	38
<i>2.5.4</i>	<i>Locomotiva a vapor</i>	40
3	DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	43

INTRODUÇÃO

Máquinas são dispositivos inventados pelo homem para facilitar suas tarefas e desenvolver muitas atividades às quais ele seria incapaz concluir. A análise de seus movimentos, cálculos de funcionamento e as melhorias em seus rendimentos vêm sendo discutidos por interessados há séculos. O homem percebeu que apesar de desenvolvido, estava cercado de limitações e precisava elaborar novas formas de trabalho que não o muscular, sistemas que pudessem realizar tarefas de muitas pessoas, chegassem onde eles não poderiam ir, transportassem água do fundo de minas de carvão da maneira mais eficaz possível e fizessem a locomoção de commodities e pessoas como nenhuma carruagem jamais seria capaz. Nas primeiras tentativas de construir máquinas, quisera-se imitar os pássaros, voar! Foram inúmeras as tentativas de tornar-se alado e foram feitos desastrosos. Como afirma (QUADROS, 1996).

Em 1698, o capitão Thomas Savery obteve sucesso ao criar uma bomba de água à vapor, na tentativa de impulsionar a busca cada vez mais profunda por carvão dentro das lucrativas minas de carvão inglês, Newcomen melhorou essa máquina através da adição de um pistão em seu cilindro produzindo trabalho e James Watt em 1769 foi responsável pelos estudos de melhorias e disposição dessa máquina, proporcionando grande eficiência dessa e economizando muito mais combustível para geração de trabalho. Esse foi o marco propulsor do desenvolvimento do fogo em paralelo à atividade humana. Na realidade esse foi um desencadeamento de uma era que dura até hoje, e certamente irá permanecer por muito tempo enquanto houver possibilidade da queima, de geração de vapor e de produção de metais. A era das máquinas térmicas trazia grande desenvolvimento e enriquecimento de muitos empresários. Ela trouxe o modelo atual de trabalho, onde o homem sai de sua casa e vai ao trabalho em troca de um salário mensal e assim se formou um novo modelo de economia.

Ao longo dos tempos esses equipamentos vieram sendo aprimorados, passou-se a analisar sua melhor maneira de funcionamento, pesquisá-los cientificamente e estabelecendo suas primeiras leis básicas. Esses dispositivos mostravam-se tão úteis que estudiosos os criaram mesmo antes das leis da termodinâmica serem estabelecidas, não havia sequer a definição de calor, nem de suas propriedades. Com o surgimento das leis, foi possível analisar o comportamento dos seus ciclos e suas estruturas internas como o fluido de trabalho e seu processo de desordem causado por uma nova análise já verificada por Clausius e Kelvin-Planck; a entropia.

A entropia foi a última das leis da termodinâmica a ser estabelecida. Ela surgiu após a percepção de uma seta (um sentido) para a expansão e desordem em um sistema termodinâmico.

Ao observar a primeira lei que estabelece a transformação de energia, abria-se brechas para a ocorrência de eventos impossíveis como por exemplo o ambiente perder calor para um copo de café e o líquido atingir temperaturas cada vez mais elevadas. Sabe-se que o processo normal é o café perder calor para o ambiente e suas temperaturas atingirem um equilíbrio, assim como o milho que pelo aquecimento do sistema e agitação das moléculas transforma-se em pipoca, mas não se espera que a pipoca volte a ser milho. Essa é a ordem natural das transformações, não se pode voltar ao que era antes de maneira natural. É impossível fazer as transformações voltarem. Algumas podem com adição de alguns métodos desenvolvidos ou aplicação de trabalho, porém o processo natural dos acontecimentos é a desordem sem retorno. Essa é a chamada entropia ou desordem, que tende sempre a aumentar nos sistemas.

Nesse sentido, procuramos analisar o papel entrópico nas máquinas térmicas. Em que consiste a variação de entropia em um sistema termodinâmico? Qual o papel da troca de calor entre os corpos envolvidos no funcionamento de uma máquina? Porque as máquinas atingem uma eficiência na maioria das vezes menor que a metade da máxima que poderíamos obter? Essas e outras respostas que nos motiva fazer uma análise desse assunto e querer estudá-lo de maneira mais sistemática. Essa pesquisa visa a um estudo aprofundado da termodinâmica, em especial a entropia e suas aplicações nas máquinas térmicas. A escolha do tema se deu por sua importância no entendimento do funcionamento de máquinas e análise de seu comportamento no dia a dia, auxílio no entendimento do poder do fogo para gerar movimento e desenvolver utensílios que superasse as limitações humanas e diminuísse seu esforço de trabalho.

Logo, um estudo detalhado nessa área será de bastante relevância para a investigação do tema. Também será bastante enriquecedor no sentido de agregar conhecimento à minha formação como engenheiro mecânico, uma vez que nessa área muito do conteúdo estudado é o da formação das máquinas e soluções de seus problemas.

Fonte	Entropia	Máq. térmicas	Entropia e máq. térmicas
DOAJ - http://www.doaj.org/	7.198	411	8
SciELO - http://www.scielo.br	154	0	0
SEER - http://seer.ibict.br/	0	11	0
CAPES - http://www.periodicos.capes.gov.br/	4.279	93	3
OAIster - http://oaister.worldcat.org/	1.115	107	4
Google – http://scholar.google.com.br/	52.600	52.200	4

Quadro 1 – Resultados das pesquisas sobre o tema em artigos, revistas e periódicos.

A partir desses resultados, temos como objetivos:

Objetivos gerais:

Entender e analisar a entropia no mundo real e suas aplicações em máquinas térmicas.

Objetivos específicos:

- 1) pesquisar as lei da termodinâmica;
- 2) entender os fundamentos da entropia;
- 3) Analisar o ciclo de Carnot;
- 4) Analisar os tipos de máquinas térmicas.

Esta monografia está dividida como segue: neste capítulo vimos o contexto histórico, a importância do assunto e o que buscamos no decorrer do assunto.

No capítulo 1, apresentamos a fundamentação teórica, onde abordamos as bases da termodinâmica.

No capítulo 2, apresentamos a metodologia que foi um estudo aprofundado dos conceitos de termodinâmicas, bem como a explanação de fórmulas e seus comportamentos no dia a dia.

No capítulo 3, temos as discussões e considerações finais.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A termodinâmica teve como objeto inicial entender o funcionamento das máquinas térmicas, mas com o passar dos anos muitos outros sistemas são estudados por esse conceito, como afirma (YAMAMOTO, 2010)

O objetivo inicial da termodinâmica era estabelecer as relações entre calor e trabalho, além de estudar transformações gasosas particulares sob ponto de vista energético, assim como o funcionamento das então denominadas máquinas térmicas. Hoje a termodinâmica se ocupa com quaisquer transformações de energia [...].

Os engenheiros de alimentos estudam o aquecimento de alimentos, como o de pizzas em fornos de micro-ondas, e o resfriamento, como no caso dos alimentos congelados. Os meteorologistas analisam a transferência de energia térmica nos eventos associados ao fenômeno El Niño e ao aquecimento global. Os engenheiros agrônomos investigam a influência das condições climáticas sobre a agricultura. Os engenheiros biomédicos estão interessados em saber se a medida da temperatura de um paciente permite distinguir uma infecção viral benigna de um tumor canceroso. (HALLIDAY, 2016, p. 414).

Para Halliday (2013, pág. 439), O processo de levar o sistema do estado inicial ao estado final é chamado de processo termodinâmico.

Para Van Wylen a termodinâmica relaciona as mudanças de estado detectadas num sistema com as quantidades de energia na forma de calor e trabalho que são transferidas no processo.

Pode então ser definida como o estudo das trocas de energia entre os corpos de modo a produzir trabalho, é o ramo da física que se dedica ao estudo das relações entre o calor e as restantes formas de energia. Analisa, por conseguinte, os efeitos das mudanças de temperatura, pressão, densidade, massa e volume nos sistemas.

E ainda, como afirma (GREGIO, 2016) “Poderíamos dizer que a termodinâmica estuda como um sistema troca energia com sua vizinhança, através da transferência de trabalho e/ou de calor. A termodinâmica estuda como um sistema, um corpo ou uma máquina, transformam calor em energia mecânica e vice-versa”.

O estudo desse ramo parte das Leis da Termodinâmica, leis essas que postulam que a energia pode ser transferida de um sistema para outro na forma de calor ou trabalho. E ainda postulam a existência de uma quantidade denominada de entropia, a qual pode ser determinada para todos os sistemas. É o ramo da física que estuda as relações de troca entre o calor e o trabalho realizado na transformação de um sistema físico, quando esse interage com o meio externo. Ou seja, ela estuda como a variação da temperatura, da pressão e do volume interfere nos sistemas físicos. O estudo e o desenvolvimento da termodinâmica surgiram da necessidade

de criar máquinas e de aumentar a eficiência das máquinas existentes naquela época, as máquinas a vapor.

A termodinâmica teve início em 1650, com Otto Von Guericke. Ele foi o responsável pela criação da primeira bomba a vácuo do mundo, além de criar o primeiro vácuo artificial através das esferas de Magduberg. Anos mais tarde Robert Boyle ficou sabendo dos experimentos de Otto, e em parceria com Robert Hooke, construiu uma bomba de ar. Através dessa bomba, Boyle e Hooke perceberam a relação entre pressão, volume e temperatura, e através dessa descoberta Boyle formulou uma lei que estabelece que a pressão e o volume são inversamente proporcionais. Essa lei ficou conhecida como Lei de Boyle. Estudos posteriores, baseados nos conceitos de pressão, temperatura e volume, fizeram por surgir a primeira máquina a vapor, com Thomas Savery.

As máquinas daquela época eram muito grandes e robustas, mas atraíam a atenção de muitos cientistas, como foi o caso de Sadi Carnot. Denominado de o “pai da termodinâmica” em 1824 fez a publicação de “Reflexões sobre a Potência Motriz do Fogo”, nessa sua publicação ele fazia um discurso sobre o calor, a eficiência e a potência das máquinas a vapor. Esse fato marcou o início da Termodinâmica como ciência moderna.

1.1 Trabalho e calor

Trataremos as descrições de calor como Q e trabalho como W , como a maioria dos livros descreve.

Trabalho e calor são formas de transferência de energia de um corpo para o outro, eles estão diretamente relacionados ao funcionamento das máquinas térmicas conforme explica (WYLEN, 2009) em seu livro “Fundamentos da Termodinâmica”:

Trabalho e calor são formas de transferência de energia de um sistema para outro e, por isso, são importantes na análise de sistemas e equipamentos termodinâmicos. Para analisar esses sistemas precisamos modelar o calor e o trabalho como funções das propriedades e parâmetros característicos do sistema ou do modo como eles funcionam.

Para (HALLIDAY RESNICK, 2009), calor e trabalho podem ser relacionados ao deslocamento de um peso em um cilindro de um estado inicial “ i ” para um estado final “ f ”.

O processo de levar o sistema do estado inicial ao estado final é chamado de processo termodinâmico. Durante o processo, energia pode ser transferida do reservatório térmico para o sistema (calor positivo), ou vice-versa (calor negativo). Além disso, o sistema pode realizar trabalho sobre as esferas de chumbo, levantando o êmbolo (trabalho positivo) ou receber trabalho das esferas de chumbo (trabalho negativo).

Em sua definição de trabalho (WYLEN, 2009) o define como uma força F agindo em ao longo de um deslocamento x , sendo esse deslocamento na direção da força, assim:

$$W = \int_1^2 F dx \quad (1.1)$$

Sabe-se que força é a pressão exercida por um corpo em uma determinada área, então:

$$W = \int_1^2 P(A) dx \Rightarrow W = \int_1^2 PdV \quad (1.2)$$

Ele também define trabalho da seguinte maneira:

Um sistema realiza trabalho se o único efeito sobre as vizinhanças (tudo externo ao sistema) puder ser o levantamento de um peso [...]. Em geral o trabalho é uma forma de energia em trânsito, isto é, energia sendo transferida através da fronteira do sistema. (VAN WYLEN, 2009, pág. 68 - Traduzido).

Quando o sistema realiza trabalho, seu valor será positivo, quando é realizado trabalho sobre o sistema, há compressão e seu valor será negativo. Há também os casos em que o trabalho é nulo, quando não há variação no volume ocupado pelo gás no recipiente.

A unidade no SI é o joule (J) em homenagem ao físico britânico James Prescott Joule, que demonstrou a equivalência entre trabalho e calor, ao medir o aumento da temperatura de uma amostra de água quando uma roda de pás é rotacionada dentro dela.

O calor corresponde à transferência de energia térmica de um sistema para outro. O Calor também pode ser positivo, negativo ou nulo, como afirma (FREEDMAN, 2008)

Um valor positivo de Q significa uma transferência de calor para dentro do sistema, com um componente fluxo de energia para o interior do sistema; Q negativo significa uma transferência de energia para fora do sistema

Para Van Wylen o calor é a forma de transferência de energia através da fronteira de um sistema:

O calor é definido como a transferência de energia através da fronteira de um sistema, numa dada temperatura, a outro sistema (ou ambiente), que apresenta uma temperatura inferior, em virtude da diferença entre as temperaturas dos dois sistemas (VAN WYLEN, 2009, pág. 79 - Traduzido).

A unidade de calor no SI, assim como a de trabalho (ou qualquer outra forma de energia) é o joule (J) por também se tratar de uma transferência de energia ao sistema.

Há três formas específicas de transferência de calor entre os corpos, ele pode ser transferido às moléculas vizinhas por:

Condução:Esse tipo de transferência de calor ocorre pela colisão de átomos com um alto grau de agitação das moléculas (superfície mais quente) com os átomos de uma superfície mais fria. Nessa colisão ocorre a transmissão de energia térmica chamada condução.

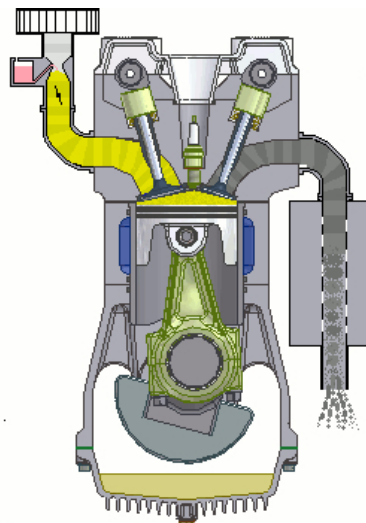
Convecção:

A convecção é a transferência de calor ocorrida pelo movimento da massa de uma região. Exemplos familiares incluem o sistema aquecimento de água em residências, o sistema de refrigeração do motor de um automóvel e o fluxo de sangue pelo corpo (YOUNG,2008, p. 203).

Radiação: é um tipo muito comum de troca de calor entre os corpos, ela não precisa necessariamente de matéria para se propagar, como no caso da radiação solar que percorre o espaço até à terra, outro exemplo bastante comum é o aquecimento de nossas mãos em uma lareira, onde nos aquecemos pela radiação emitida pelas chamas.

Radiação é a transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas, como a luz visível, a radiação infravermelha e a radiação ultravioleta [...]. Qualquer corpo, mesmo que a uma temperatura normal emite energia sob a forma de radiação eletromagnética (YOUNG,2008, p. 204).

1.1.1 Aplicações de calor e trabalho



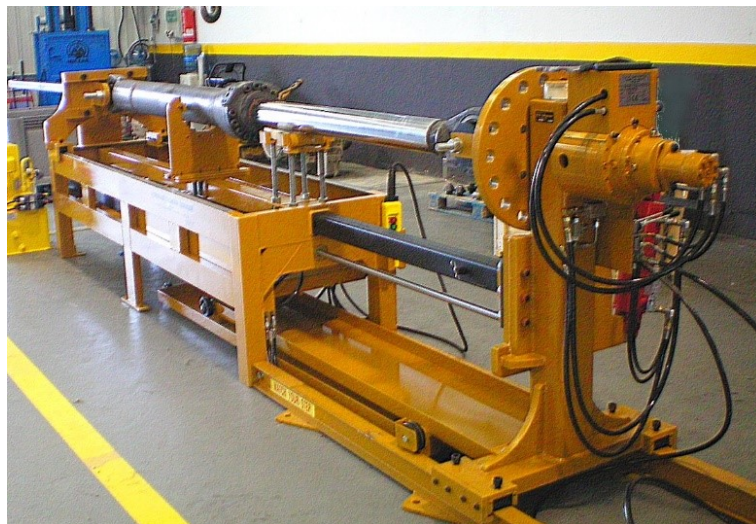
Fonte: <https://imgur.com/gallery/aycdX>
 Figura 1 – Exemplo cilindro-pistão.

Um caso típico de aplicação de trabalho e calor é o cilindro-pistão, onde sua substância interna sofre um processo de combustão, como nos motores a gasolina e diesel. Os segmentos

encontram-se alojados em sulcos na superfície exterior e são fabricados num material menos duro que o material que constitui o bloco do motor de forma a que sejam aqueles e não este a desgastarem-se com o uso como mostra a figura 1. Como afirma (WYLEN, 2009) em seu tópico sobre aplicações na engenharia se a substância que produz movimento é um gás, trata-se de um sistema pneumático,

se a substância for um líquido, trata-se de um sistema hidráulico. Gás ou vapor são usados geralmente quando o movimento tem de ser rápido ou a variação do volume deve ser grande e as pressões moderadas. Para deslocamentos com alta pressão (força elevada) é usado cilindro hidráulico (exemplos incluem grandes tratores, empilhadeiras, pás carregadeiras para construção civil e escavadeiras.

Alguns desses exemplos são observados como o da figura 2:



Fonte: <https://http://www.mtgsind.com.br/>

Figura 2: Máquina industrial com cilindro hidráulico

Ciência dos materiais: Uma das aplicações da termodinâmica está ligada à ciência dos materiais, que estuda meios para obtenção de novos tipos de materiais, que possuam propriedades químicas e físicas bem definidas. A termodinâmica, podemos assim dizer, é uma das bases da engenharia dos materiais, pois os processos de fabricação de novos materiais envolvem bastante a transferência de calor e trabalho para as matérias primas.

Uma peça cerâmica necessita passar por um processo de cozimento com temperaturas muito elevadas, que chegam a ser superiores a 1.000°C. Suas propriedades físicas finais dependerão do tempo e da temperatura aos quais ela foi submetida.

Para cada situação prática sempre existe um tipo de material mais adequado: a utilização de ligas de alumínio com titânio permitiu a construção de aviões maiores, mais leves e resistentes; os automóveis modernos usam, em grande parte, materiais plásticos e ligas especiais;

os médicos cirurgiões fazem uso de bisturis com lâmina especial muito afiada e bastante resistente etc.

Nas indústrias: Os processos industriais transformam matéria-prima em produtos acabados usando máquinas e energia. Na indústria de laticínios, a transferência de calor é usada na pasteurização e na fabricação de queijos e manteiga. Nas siderúrgicas (figura 3), as altas temperaturas dos fornos causam a fusão de várias substâncias, permitindo a sua combinação e produzindo diferentes tipos de aço.



Fonte: http://www.lookfordiagnosis.com/mesh_info.php?term=Industria+Procesadora+Y+De+Extracci%C3%B3n&lang=2
Figura 3 – Máquina siderúrgica

1.1.2 Temperatura

O estudo dessa propriedade da termodinâmica se iniciou há vários séculos, Galileu foi um dos cientistas influentes na tentativa de medir essa propriedade e foi também criador do primeiro termômetro que funcionava sob a dilatação do ar contido em seu interior, porém este era constituído com água semipreenchida e um bulbo imerso e não possuía boa variação controlada quando havia mudanças sazonais.

A temperatura também mede o grau de agitação das moléculas em um material e não possui um limite superior apesar de saber-se que seu menor valor é o zero kelvin que também é a grandeza utilizada no SI como para a medida do ponto triplo da água.

1.1.3 Lei zero da termodinâmica

Apesar de ser chamada zero, essa lei foi a última a ser postulada, já no ano de 1930, após a primeira, segunda e terceira lei terem sido anunciadas, definida como necessária para uma estrutura lógica da transformação de uma energia em outra.

Ela define a condição de equilíbrio térmico entre os corpos, quando um objeto A está em equilíbrio com B e B está em equilíbrio com outro corpo C, então esses objetos estão em equilíbrio entre si.

Todo corpo possui uma propriedade chamada temperatura. Quando dois corpos estão em equilíbrio térmico, suas temperaturas são iguais, e vice-versa. (HALLIDAY, 2016, p. 416)

Quando um corpo C está em equilíbrio térmico com A e B, então A também está em equilíbrio com B. Esse fenômeno é conhecido como lei zero da termodinâmica”. [...] “Dois sistemas estão em equilíbrio térmico se e somente se possuem a mesma temperatura (YOUNG, 2008, p. 204).

1.1.4 Primeira lei da termodinâmica

O homem sempre procurou um conforto para seus músculos trabalharem menos, e após se conscientizar que a espécie mais inteligente do planeta não podia realizar muitas coisas e ficar no chão vendo as aves voarem não lhes era confortável. Como seria possível a criação de um objeto capaz de lhes tirar da superfície por exemplo, começou-se a estudar possibilidades para desenvolvimento de forças que ele não possuía. Foi aí que começaram a surgir os meios facilitadores para a criação de movimentos e desenvolvimentos das máquinas.

Vários foram os nomes notáveis de épocas para se aproximar cada vez mais das definições da primeira lei, James Prescott Joule (1818-1889) fez os mais proveitosos estudos da época sobre a natureza do calor, observando hipóteses que foram rejeitadas inicialmente pois nesse tempo era tida como certa a ideia de o calórico se tratar de um fluido, no entanto, Joule afirmava que o calor era apenas uma forma de energia. Também estudou a relações do trabalho mecânico, direcionando-o para a lei da conservação de energia, cuja formulação é atribuída ao cientista alemão Hermann von Helmholtz (1821-1894) que mostram que as diferentes formas de energia podem ser transformadas umas nas outras, mas nunca criadas ou destruídas. O princípio da conservação de energia ficou conhecido como a primeira lei da termodinâmica sendo comprovado experimentalmente por diversas vezes e assim ganhando status de lei universal.

Assim a primeira lei da termodinâmica se trata de um balanço de energia inicial e final de um sistema, onde a energia inicial é dada na forma de calor e transformada em trabalho e variação da energia interna, como ocorre com um gás aquecido em um cilindro, onde há uma expansão devido a agitação das partículas, realizando trabalho e aumento na sua energia interna.

Dessa maneira podemos dizer que a lei da conservação da energia se dá pela transformação de calor em uma variação de energia interno no sistema com a realização de trabalho.

$$Q = \Delta U + W \quad (1.3)$$

Nesse sentido, há uma parte de transformação do calor em energia interna e outra em trabalho. De acordo com a equação 1.3, se o êmbolo no qual o gás está inserido tem seu volume diminuído, o trabalho será negativo (houve compressão do gás), ou seja, houve ação do meio sobre o sistema, o trabalho será negativo. Se o volume é aumentado, o trabalho será positivo, pois o gás realizou trabalho sobre o êmbolo (houve expansão do gás). Se não houver variação de volume, não há movimento do pistão, ou seja, não é possível verificar efeitos de trabalho no sistema.

1.1.5 Variação da energia interna

A variação de energia interna de um gás é dada pela soma da energia que contêm as partículas do sistema, na equação 1.3, temos:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

ou seja, é a representação da energia de início e fim de uma transformação no sistema.

A matéria é constituída de átomos e moléculas, que são partículas que possuem energia cinética e energia potencial. Uma tentativa de definir a energia interna é simplesmente dizer que ela é a soma das energias cinéticas de todas as partículas constituintes acrescida da soma de todas as energias potenciais decorrentes das interações entre as partículas do sistema (YOUNG,2008, p. 274).

1.1.6 Processos termodinâmicos

1- Processos adiabáticos: há determinados processos termodinâmicos que não ocorrem com todos as variáveis da equação da primeira lei. Eles são muito comuns tanto na natureza quanto nos cálculos. Esse processo pode ocorrer para um sistema bem isolado, onde

não possa haver troca de calor entre o meio e o sistema ou quando ocorre de maneira tão abrupta que não há tempo para a troca de calor com o ambiente, como afirma Young, 2008, p. 261 “Um processo adiabático é aquele no qual não ocorre a transferência de calor nem para dentro nem para fora do sistema; $Q=0$ ” e Halliday, 2016, p. 445 “Processo adiabático é aquele que acontece tão depressa ou em um sistema tão bem isolado que não há trocas de calor entre o sistema e o ambiente. Fazendo $Q = 0$ ” Aplicando a primeira lei da termodinâmica, percebe-se que:

$$\Delta U = -W \quad (1.4)$$

Essa equação nos mostra que o sistema realiza trabalho sobre o ambiente, pois há diminuição na variação da energia interna. No caso de o trabalho realizado sobre o sistema a variação da energia interna aumenta, uma vez que suas partículas internas estarão em maior agitação no cilindro.

2 - Processo isocórico ou isovolumétrico: O termo deriva da língua grega iso, "igual", e Khora, "lugar", nesse caso o volume permanece o mesmo, logo, de acordo com a Eq. 2.2, não haverá trabalho. Isso implica dizer que teremos somente troca de calor no sistema; logo:

$$\Delta U = Q \quad (1.5)$$

3 - Processo isobárico: O termo deriva da língua grega iso, "igual" e baros, "pressão", logo, a pressão será a mesma ao longo processo, logo só haverá variação de volume no trabalho.

$$Q = \Delta P(V_2 - V_1) \quad (1.6)$$

4 - Processo isotérmico: esse processo ocorre quando a temperatura do sistema não varia ao longo de um processo, para a análise da primeira lei ela permanece inalterada.

5 - Processos cíclicos:

Existem processos nos quais, após certas trocas de calor e de trabalho, o sistema volta ao estado inicial. Nesse caso, nenhuma propriedade intrínseca do sistema (incluindo a energia interna) pode variar (HALLIDAY, 2016, p. 446).

Fazendo

$$\Delta U = 0$$

temos:

$$Q = W \quad (1.7)$$

6 - Expansões livres:

Para Halliday, 2016, p. 446: “São processos nos quais não há troca de calor com o ambiente e nenhum trabalho é realizado. Assim, $Q=W=0$ e, de acordo com a primeira lei”

$$\Delta U = 0 \quad (1.8)$$

1.1.7 Aplicações da primeira lei

Como se pode ver através de seu enunciado, a primeira lei conserva a energia, transformando-a em outra. Há várias aplicações nesse sentido, como é o caso da energia eólica que transforma a energia cinética, adquirida nas hélices figura 4, pelo vento em energia elétrica. Outro exemplo são as baterias fig. (5) que armazenam energia através de um processo químico e podem ser usadas a qualquer momento para utilização de sua potência armazenada.



Fonte: //br.sputniknews.com/portuguese.ruvr.ru/2014_04_18/Cientistas-estao-beira-de-uma-revolucao-na-energia-eolica-3784/

Figura 4 – Turbinas eólicas

1.1.8 Segunda lei da termodinâmica

A Segunda lei estabelece condições para que os processos termodinâmicos ocorram, enquanto a primeira estabelece apenas sua conservação sem se preocupar como irá ocorrer. Não vemos na natureza, por exemplo, calor sendo passado espontaneamente de uma fonte fria a uma



Fonte: <http://www.eletraquila.net/pilhas-e-baterias-10971.html>
 Figura 5 – Baterias

fonte quente. É claro que existem refrigeradores e condicionadores de ar que realizam trabalho de refrigeração jogando calor quente para a fonte fria, mas com auxílio externo de um motor para que essa transformação ocorra.

De acordo com Van Wylen, a segunda lei da termodinâmica indica um sentido para os processos, não sendo possível ocorrer no sentido oposto.

Em sentido amplo, a segunda lei indica que todos os processos conhecidos ocorrem num certo sentido e não no oposto. Uma xícara de café quente esfria em virtude da transferência de calor para o ambiente que apresenta temperatura mais baixa do que a do café, para a xícara (fig.6). Consome-se gasolina quando um carro sobe uma colina, mas o nível de combustível do tanque de gasolina não pode ser reestabelecido ao nível original na descida da colina. Observações cotidianas como essas, juntamente com várias outras, são evidências da validade da segunda lei da termodinâmica. (VAN WYLEN, 2009, pág. 175 - Traduzido).

Para Young, com outras palavras, diz que a segunda lei também diz respeito ao sentido dos processos termodinâmicos:

Essa lei determina limites fundamentais para a eficiência de uma máquina ou de uma usina elétrica. Ela também estipula limites fundamentais para a energia mínima que deve ser fornecida a um refrigerador. Logo, a segunda lei é diretamente relevante para muitos problemas práticos importantes. (YOUNG, 2008, p. 278).

Outra análise é a não ocorrência de transformação total de calor em trabalho (W). Em um ciclo quando o calor da fonte (Q_H) quente é fornecido, almejando sua transformação em trabalho sempre haverá perdas de calor para o ambiente (Q_F), como é o caso das inúmeras máquinas térmicas. Geralmente podemos sentir esse calor que é rejeitado no final do processo, ele é a outra parcela de Q_H após a o fim do processo como podemos verificar na equação:

$$Q_Q = W + Q_F \quad (1.9)$$



Fonte: <http://canalvanessaendringer.com/estilo-de-vida/2016/04/os-beneficios-do-cale-com-oleo-de-coco/>
 Figura 6 – Transferência de calor para o ambiente

Tendo por base os contextos anteriores, os enunciados da segunda lei podem ser explanados. O primeiro se trata das observações feitas por Kelvin-Plank 1852 e diz:

É impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e troca de calor com um único reservatório térmico.

Já o enunciado de Clausius 1850 afirma que

É impossível construir um dispositivo que opere em um ciclo e que não produza outro efeito além da troca de calor de um corpo à baixa temperatura para um corpo à alta temperatura.

Ambos os enunciados nos trazem a ideia de impossibilidade de construção de um dispositivo perfeito. Para Kelvin-Plank num processo termodinâmico o motor com rendimento de 100% não pode existir, podemos dizer que um motor térmico não pode apenas receber calor de uma fonte quente e transformá-lo todo em trabalho. Logo, temos a possibilidade de calcular o calor rejeitado e o trabalho fornecido através do fornecimento de calor por uma fonte.

Dessa maneira, um ciclo só pode produzir trabalho se estiverem envolvidos dois níveis de temperatura e o calor for transferido do corpo a alta temperatura para o corpo a baixa temperatura. Isso significa que é impossível construir um motor térmico que apresente eficiência térmica igual a 100%.” (VAN WYLEN, 2009, pág. 180 - Traduzido).

Ambos os enunciados são equivalentes, pois a verdade de um implica na verdade do outro e se violar-se um ao outro também será violado. A segunda lei afirma a impossibilidade de um moto-perpétuo de segunda espécie. Esse dispositivo não é possível existir, uma vez que não haveria atrito nas partes constituintes desse motor. Um motor perpétuo de primeira espécie é aquele cuja energia é criada pela irreversibilidade do processo, isso viola a primeira lei.

2 METODOLOGIA

2.1 Processo reversível e processo irreversível

Para Clausius vemos um enunciado mais relacionado com o refrigerador ou bomba de calor e afirma que é impossível construir um refrigerador que opere sem receber trabalho. Se torna mais fácil a averiguação desse enunciado, uma vez que nas comprovações diárias vemos sua reprodução com frequência, não sendo possível a troca de calor de um corpo de baixa para um de alta temperatura sem que haja intervenção externa, ou seja, trabalho. O que nos remete à conclusão de que não pode haver um refrigerador perfeito.

Imaginemos a preparação de café, o bule é colocado com água no fogão, em seguida teremos a adição de açúcar, depois é inserido o pó do café dentro da mistura. Com o tempo a energia térmica transferida por radiação ao sistema faz com que as partículas da mistura se agitem até que o ponto de ebulição da mistura seja atingido.

Imaginemos agora que o fogo foi apagado, sabemos por nossas experiências diárias que a mistura estará homogênea após o processo. Seria possível a mistura de água, açúcar e café voltarem ao seu estado original? Seria possível os ingredientes se tornarem independentes novamente sem a necessidade de intervenção no sistema? Obviamente não, por estarmos falando de um princípio não ideal da segunda lei; o processo irreversível.

Os processos termodinâmicos que ocorrem na natureza são todos processos irreversíveis. Esses processos são aqueles que ocorrem em um determinado sentido, porém não ocorrem em sentido contrário. [...] quando um livro desliza sobre uma mesa, sua energia mecânica é convertida em calor pelo atrito; esse processo é irreversível, pois ninguém jamais observou o processo inverso (no qual o livro em repouso sobre a mesa começasse a se mover espontaneamente e a temperatura do livro e da mesa começasse a diminuir. (YOUNG, 2008, p. 278).

Já no processo reversível o sistema agirá de maneira a voltar para seu estado inicial, nesse caso teríamos as propriedades separadas na mistura água, açúcar e pó de café. O processo reversível é todo aquele cujas propriedades do sistema retornam ao seu estado inicial, sem haver intervenção no sistema, esse processo só acontece quando levamos em conta uma transformação termodinâmica ideal, quando não há atrito, troca de calor com o ambiente, expansão não resistida e outras formas que podem não deixar a flecha do tempo retornar à origem, como explicam:

Um processo reversível, para um sistema, é definido como aquele que, tendo ocorrido pode ser invertido e depois de realizada esta inversão. Não se notará algum vestígio no sistema e nas vizinhanças. (VAN WYLEN, 2009, pág. 182 - Traduzido).

Um processo reversível é, portanto, um processo de equilíbrio, no qual o sistema está sempre em equilíbrio termodinâmico não pode ocorrer nenhuma mudança no estado do sistema. O calor não poderia fluir nem para dentro nem para fora do sistema que tivesse uma temperatura rigorosamente constante em todos os seus pontos, e um sistema que estivesse realmente em equilíbrio mecânico não poderia realizar nenhum trabalho. (YOUNG,2008, p. 278).

2.2 Ciclo de Carnot

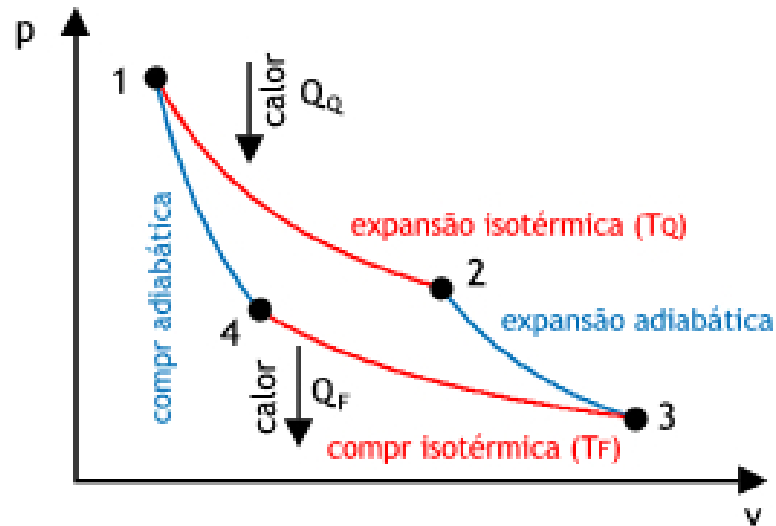
O Ciclo de Carnot é o ciclo executado pela máquina de Carnot, idealizada pelo engenheiro francês Sadi Carnot (1796-1832). Funcionando entre duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas alternadamente, permite menor perda de energia (Calor) para o meio externo (fonte fria). O rendimento da Máquina de Carnot é o máximo que uma máquina térmica trabalhando entre dadas temperaturas da fonte quente e da fonte fria pode ter (Mas o rendimento nunca chega a 100%). De todas as máquinas térmicas, a máquina de Carnot é a que utiliza o calor com a maior eficiência para gerar trabalho útil (fig 7).

Admitamos que esse motor térmico, que opera entre os dois dados reservatórios térmicos, funcione segundo um ciclo no qual todos os processos são reversíveis. Se cada processo é reversível, o ciclo também é reversível e, se o ciclo for invertido, o motor térmico se transforma num refrigerador. Esse ciclo é conhecido como ciclo de Carnot, em homenagem ao engenheiro francês Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832) que estabeleceu as bases da segunda lei da termodinâmica em 1824. (VAN WYLEN, 2009, pág. 185 - Traduzido).

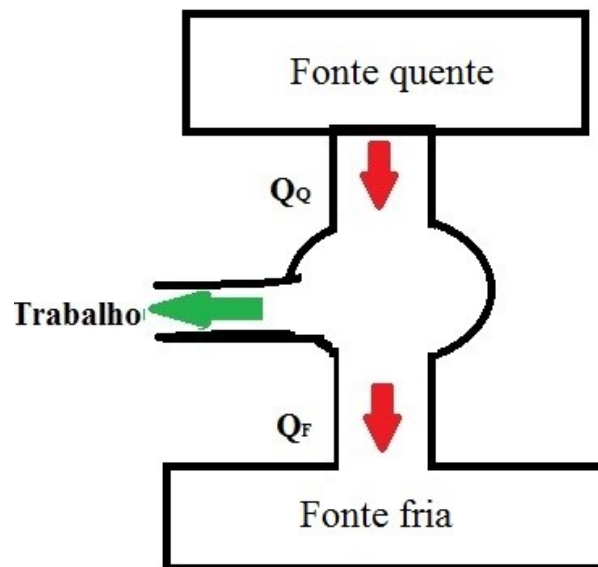
Carnot pensou em uma máquina cujo ciclo seria o mais eficiente possível, ela deveria operar entre uma fonte quente e uma fonte fria em um processo reversível e que qualquer máquina operando em um ciclo reversível tivesse o mesmo rendimento. Ele calculou que essa máquina teria o máximo rendimento e que qualquer outra máquina operando em um ciclo irreversível teria rendimento inferior.

Seu funcionamento se desenvolve através de quatro etapas (fig. 7) como explica (WYLEN, 2009):

Um ponto importante que deve ser observado, é que o ciclo de Carnot, independente da substância de trabalho tem sempre os mesmos quatro processos básicos. São eles: 1 Um processo isotérmico reversível no qual calor é transferido para ou do reservatório a alta temperatura. 2 Um processo adiabático reversível, no qual a temperatura do fluido de trabalho diminui desde a do reservatório a alta temperatura até a do outro reservatório. 3 Um processo isotérmico reversível no qual calor é transferido para o (ou do) reservatório a baixa temperatura 4 Um processo adiabático reversível, no qual a temperatura do fluido de trabalho aumenta desde a do reservatório de baixa temperatura até a do outro reservatório.



Fonte: <http://polemicascomm.blogspot.com.br/2012/09/ciclo-de-carnot.html>
 Figura 7 – Etapas do ciclo de Carnot



Fonte: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/ciclo-carnot.html>
 Figura 8 – Máquina de Carnot

2.2.1 Rendimentos de uma máquina de Carnot

Como todo rendimento, o que se busca no ciclo de Carnot é a energia produzida sobre a energia utilizada, logo, tem-se trabalho produzido pelo calor aplicado da fonte quente:

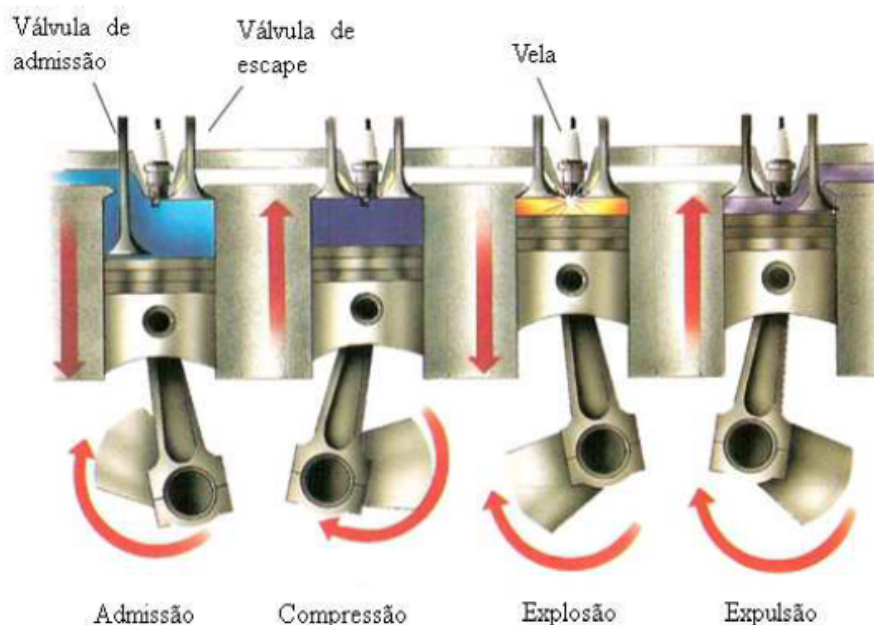
$$\varepsilon = \frac{\text{trabalho realizado}}{\text{energia utilizada}} \Rightarrow \varepsilon = \frac{|W|}{|Q_Q|} \quad (2.1)$$

2.3 Ciclo Otto

Este ciclo foi idealizado pelo alemão Augusts Nikolaus Otto em 1878 apresentamo-lo como modelo ideal que se aproxima do motor de combustão interna de ignição por centelhamento. Pode existir tanto na forma de dois tempos como quatro tempos. Seu funcionamento se dá pela mistura de ar e combustível onde uma vela de ignição aciona a combustão interna do motor fazendo o pistão realizar trabalho com sua variação de volume. Depois o gás queimado (CO_2) é liberado pela válvula de escape.

Seus tempos são divididos da seguinte maneira:

1. Admissão: a mistura de ar e gasolina flui para o cilindro através da abertura da válvula de admissão enquanto a outra válvula (escape) permanece fechada.
2. Compressão: a válvula de admissão se fecha (as duas estão fechadas nesse momento) e a mistura é comprimida à medida que o pistão sobe até o ponto morto superior (PMS).
3. Ignição: nesse momento temos a inserção de calor produzido pela explosão da centelha de uma vela no PMS, transmitindo trabalho às rodas pela expansão dos gases e dando sustentação para a permanência do ciclo através da rotação.
4. Exaustão: após a queima sobram os gases dentro do sistema e nesse momento ocorre a abertura da válvula de escape, jogando o produto para o ambiente.



Fonte: Adaptado de Costa et al, 2005.

Figura 9 – Ciclo com quatro tempos - Otto

2.4 Entropia

Mencionamos anteriormente o conceito de reversibilidade e irreversibilidade, eles estão relacionados à ordenação de um sistema termodinâmico. Quando aquecemos as moléculas de um gás, estamos fazendo essas moléculas seguirem caminhos cada vez mais aleatórios, aumentando a desordem do sistema. No exemplo da mistura de café, tivemos a mistura das moléculas de água, açúcar e café. Vimos que seria muito difícil sua separação, mas não impossível. As moléculas se movem em direções aleatórias, chocam-se umas com as outras aumentando ainda mais a desordem do sistema. Analisando as moléculas de maneira microscópica, verifica-se a tendência natural dessas moléculas moverem-se em direções opostas, fazendo um emaranhado cada vez mais forte e de difícil hiato entre as moléculas do sistema. Essa é a tendência natural do universo, estar sempre em expansão, misturando, colidindo, causando a desordem, isso é o princípio da entropia.

O fluxo de calor irreversível faz a desordem aumentar porque inicialmente as moléculas estavam arrumadas em regiões quentes e frias; essa arrumação desaparece quando o sistema atinge o equilíbrio térmico. O calor fornecido a um corpo faz sua desordem aumentar porque ocorre um aumento de velocidade média de cada molécula e, portanto, o estado caótico aumenta. A expansão livre de um gás faz aumentar sua desordem porque as posições das moléculas tornam-se mais aleatórias do que antes da expansão. (YOUNG,2008, p. 293).

2.4.1 Entropia e desordem

Conforme proposta por Boltzmann a definição da entropia em escala microscópica é a escala de desordem e sua maior medida se dá pela contagem do número de estados acessíveis a um determinado sistema. Um sistema com entropia elevada trata-se de um sistema com alto grau de desordem.

Cosmólogos nos falam da entropia na formação do nosso universo; Antes do Big Bang, toda a energia que hoje se transforma de maneira altamente desordenada estava contida em um pequeno maciço menor que uma partícula. Essa energia estava compactada e ordenada. Com a grande explosão o universo vem sofrendo uma expansão cada vez maior em seu volume, passando por várias transformações, explosões e resfriamento e prossegue em expansão. "Sabe-se ainda que essa expansão se dá devido à grande força que a explosão produziu, porém, um dia essa força será cessada e supõem-se que no final da expansão teremos uma desordem máxima no sistema e cresce em processos irreversíveis.", Nussenzveid, 1981.

Considerando a ação da entropia em um gás ideal numa expansão isotérmica

adicionando-se uma quantidade infinitesimal de calor dQ . Como a energia interna de um gás ideal é dada por:

$$pV = nRT \quad (2.2)$$

Sabendo que

$$dQ = dW = pdV$$

Então:

$$pdV = \frac{nRTdV}{V} \Rightarrow \frac{dV}{V} = \frac{dQ}{nRT} \quad (2.3)$$

Para uma relação aproximada de um processo reversível infinitesimal, usamos a relação:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (2.4)$$

“O termo dQ é usado como calor absorvido pelo sistema em um processo reversível. Se dQ é negativo, então a variação de entropia do sistema tem um valor negativo, significando que a entropia do sistema diminuiu.” (TIPLER, 2008, p. 651).

Se for fornecida uma quantidade de calor Q no processo isotérmico reversível, então a variação de entropia será dada da seguinte forma:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} \quad (2.5)$$

Como a variação de entropias está relacionada à desordem no sistema, o quociente Q/T nos informa o quanto essa desordem cresce com a entrada de calor no sistema, podendo ser calculada apenas sabendo seu estado final e inicial, sem levar em consideração o caminho percorrido, conforme (TIPLER, 2008).

Como a entropia é uma função de estado, a variação da entropia quando o sistema se move de um estado inicial para um estado final depende apenas do estado inicial e final do sistema, e não do processo através do qual a variação ocorreu. Isto é, se S_1 é a entropia do sistema quando ele está no estado 1 e se S_2 é a entropia do sistema quando ele está no estado 2, então calculamos a diferença de entropia $S_2 - S_1$ através da integral

$$\int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

para qualquer caminho (processo) reversível que leve o sistema do estado 1 para o estado 2.

Supusemos que a entropia, como a pressão, a energia e a temperatura, é uma propriedade do estado de um sistema e não depende do modo como esse estado é atingido. O fato de que a entropia é realmente uma função de estado (como costumam ser chamadas as propriedades de estado) pode ser demonstrado apenas por meio de experimentos. (HALLIDAY, 2016, p. 556).

Pela equação 1.3

Podemos fazer:

$$dQ = dU + dW$$

Sabendo que:

$$dW = pdV$$

e que

$$dU = nCvdT$$

temos:

$$dQ = nCvdT + pdV$$

Pela equação dos gases ideais(2.2) temos;

$$PV = nRT \quad p = \frac{nRT}{V}$$

Então:

$$dQ = nCvdT + nRT \frac{dV}{V}$$

Dividindo-se ambos os lados por T, temos;

$$\frac{dQ}{T} = \frac{nCvdT}{T} + \frac{nRdV}{V}$$

Fazendo a integração da equação de um estado inicial (i) até um estado final (f), termos:

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = \int_i^f \frac{nC_v dT}{T} + \int_i^f \frac{nR dV}{V}$$

Sabendo da Eq.2.5, então:

$$S_2 - S_1 = nC_v \ln \frac{T_f}{T_i} + nR \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (2.6)$$

Essa é a equação da variação de entropia para processos reversíveis em um gás ideal de um estado inicial i para um estado final f, mostrando a independência do caminho, dependendo das propriedades do gás no início e no final do processo.

2.4.2 *Comportamento estatístico da entropia*

Com o advento da Mecânica Estatística e da Teoria Cinética dos Gases, algumas grandezas físicas passaram a ser analisadas numa escala microscópica e, assim sendo, outras variáveis deveriam ser levadas em conta, sobretudo devido aos sistemas serem compostos por um número muito elevado de partículas. A partir dessa tentativa de visualizar o comportamento de algumas grandezas físicas num universo de milhares de partículas em sistemas isolados ou não é que surge a concepção de microestado e macroestado os quais foram definidos quantitativamente por Ludwig Boltzmann (1844-1896), que descreveu a entropia em termos probabilísticos.

Assim como para muitos casos de estatística, o movimento das moléculas que causam a desordem em um determinado sistema pode ser averiguado e analisadas as configurações possíveis de entropia. Como é o caso de um jogo de quebra cabeça por exemplo, se pegarmos um com 100 peças por exemplo e o dispusermos no chão para a montagem das peças, podemos analisar que a desordem será total, porém, há algumas possibilidades de peças já virem próximas umas das outras e ser montada mais facilmente. É essa a análise que nos dispomos a fazer, verificar essa desordem através de seus macroestados e microestados.

2.4.3 *Macroestado e microestado*

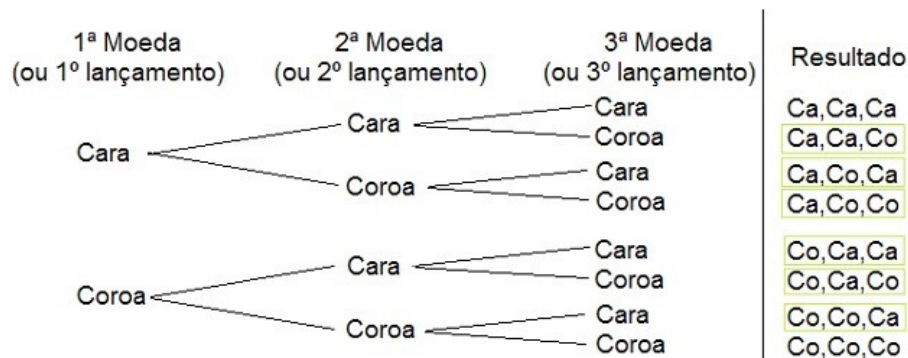
A análise de combinações possíveis em uma amostra nos leva a definição desses termos. Em um lançamento de dois dados, por exemplo, quando se deseja saber quantas vezes tivemos a soma 4, há três possibilidades (3+1, 2+2 e 1+3). Nesse caso o número quatro é o

macroestado e as três possibilidades de obtermos esse resultado é o microestado, uma soma detalhada das possibilidades para o número quatro dentro do sistema de dois dados.

Face	1	2	3	4	5	6
1	1	3	4	5	6	7
2	3	4	5	6	7	8
3	4	5	6	7	8	9
4	5	6	7	8	9	10
5	6	7	8	9	10	11
6	7	8	9	10	11	12

Quadro 2 – Possibilidades para dois dados

Já para o cara ou coroa, existem várias possibilidades quando se lança três moedas para cima. Existem oito microestados definidos se quisermos saber apenas quantas moedas vieram com coroa como face e para esse macroestado.



Fonte: <http://daquepensar.com/2012/05/exame-nacional-do-9o-ano-parte-2-estatistica-e-probabilidades/>

Figura 10 – Lançamentos de três moedas

2.4.4 Multiplicidade

Para Haliday, a multiplicidade é o fator que calcula o arranjo ou combinação do comportamento das moléculas em um sistema. Ela mostra as possíveis configurações para um conjunto e é representada pela letra w para cálculos. Para (MOURA, 2016)

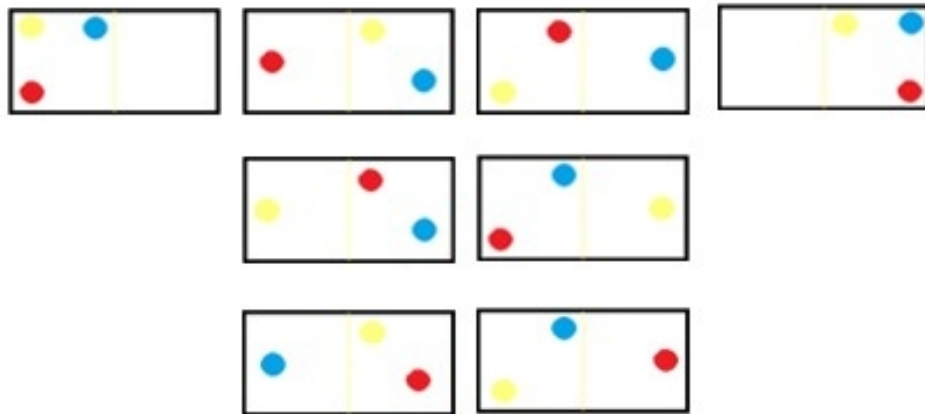
A multiplicidade está relacionada à proporcionalidade do macroestado com os microestados possíveis em uma configuração. É fácil perceber que probabilidade de se encontrar um determinado macroestado é proporcional ao número de microestados que podem ser associados a esse macroestado. A esse número de microestados chamamos de multiplicidade do macroestado.

Já sabemos como ocorre a multiplicidade nos macroestados e como os microestados se dão em um sistema, vamos agora considerar o sistema com o funcionamento de partículas no interior de

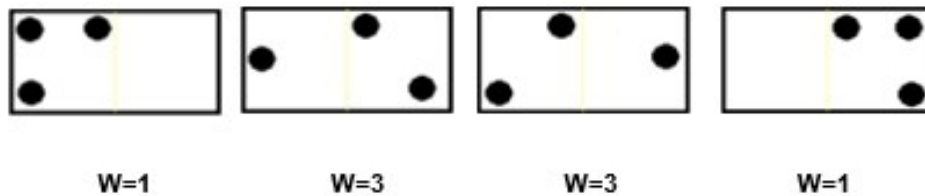
um recipiente. Consideraremos várias partículas em um recipiente. Essas partículas terão livre movimento no recipiente e usaremos uma fronteira imaginária para a separação de partículas no lado esquerdo e direito.

Consideremos um recipiente contendo 3 partículas em seu interior. Nesse caso há seis configurações possíveis mostradas abaixo:

MICROESTADOS:



MACROESTADOS:



W=1

W=3

W=3

W=1

Figura 11 – Análise de microestados e macroestados em um sistema

Quando analisamos partículas em movimento em um determinado sistema, vemos que a possibilidade (macroestado) de elas estarem divididas entre dois lados do sistema é muito maior. Isso para o caso de apenas três partículas, agora fazemos uma análise mental. Se tivéssemos milhares de partículas, como acontece em um sistema real de uma máquina, como no caso do conjunto cilindro-pistão, seria pouco provável a possibilidade de os microestados estarem todos agrupados do lado esquerdo ou direito do recipiente.

Num sistema físico mais típico, como um objeto macroscópico composto por muitas partículas, o microestado especificaria a posição e velocidade de cada partícula individualmente. Já o macroestado seria dado pelo volume, temperatura e outras grandezas macroscópicas necessárias para descrever a situação desse objeto. (MOURA, 2016, p. 20).

Na análise acima (fig. 11), temos oito microestados arranjados nos recipientes. Cada retângulo possui uma configuração diferente, mas dispendo de posições semelhantes.

Os macroestados, no caso do sistema com três partículas possuem configurações específicas; Para três partículas do lado esquerdo ou direito temos multiplicidade $w=1$, enquanto a do macroestado para duas partículas do mesmo lado e uma do outro temos $w=3$. Para um sistema com n_1 partículas de um lado e n_2 partículas do outro, temos uma combinação de um total de N partículas para ser analisadas as disposições possíveis no sistema.

$$w = \frac{N!}{n_1!n_2!} \quad (2.7)$$

Em 1877, o físico austríaco Ludwig Boltzmann encontrou uma relação para a entropia de um gás ideal e sua multiplicidade w , definiu entropia como proporcional ao logaritmo neperiano do número de microestados que um gás pode ocupar a entropia do sistema, S , cresce à medida que cresce o número de arranjos possíveis para os elementos do sistema, w . Quanto mais arranjos possíveis para os elementos do sistema, menor a probabilidade de o sistema retornar espontaneamente ao estado inicial:

$$S = k_B \ln w \quad (2.8)$$

Onde S é a entropia do sistema

k_B é a constante de Boltzmann

w a multiplicidade.

2.5 História do desenvolvimento das máquinas térmicas

Na arrancada da revolução industrial do século XVIII ascendeu-se a procura pela matéria inflamável, uma vez que a única alternativa naquela época era a madeira retirada diretamente da floresta e esta estava em escassez. Então foi adotado de maneira definitiva o carvão para a produção de energia térmica, como afirma (PASCOAL, 2016):

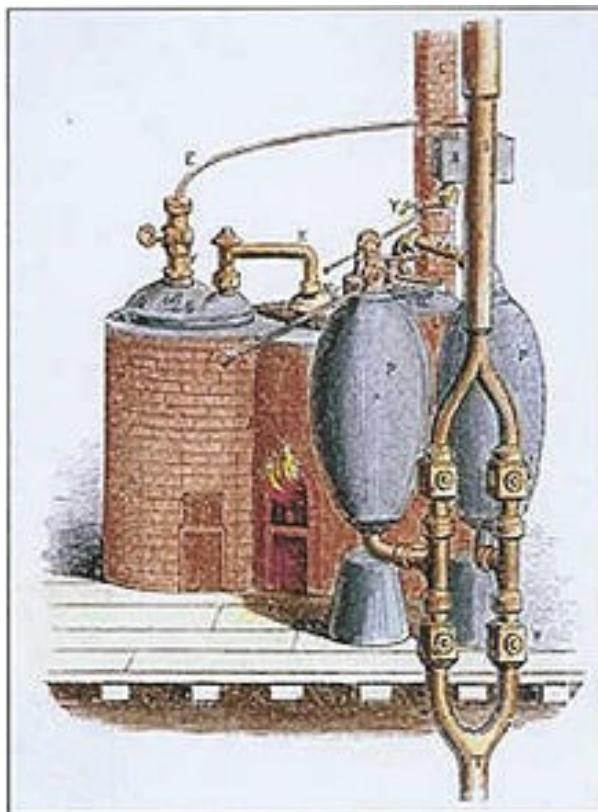
O uso do carvão na Inglaterra foi intensificado já na segunda metade do século XVI com a crescente escassez de madeira e conseqüente elevação de seu preço. Embora o carvão fosse um combustível que as pessoas evitassem usar devido ao mal cheiro que exalava quando queimado, não houve alternativa. Pequenas e médias indústrias como vidraçarias, cervejarias e olarias e até mesmo consumidores domésticos, tiveram que aderir ao combustível fóssil mais barato e abundante.

Logo depois, a Inglaterra iniciou seu império do fogo por ser um país sobre diversas minas de carvão. O país é autossuficiente nesse produto e foi exportador para muitos outros. Porém,

quanto mais se cava, maior a possibilidade de encontrar água e assim são as minas de carvão. Nesse país, podia-se encontrar água já nos primeiros 10 metros de escavação. Cerca de 50 animais baixos como pôneis e mulas trabalhavam para puxar a água dessas escavações, depois de algum tempo, já não se podia mais prosseguir com as escavações, devido à grande quantidade de líquido que surgiam das fontes.

2.5.1 *Máquina de Thomas Savery*

Com o tempo a água passou a ser retirada com a bomba de água do capitão Thomas Savery, relatada como a primeira máquina a vapor criada, segundo (PASCOAL, 2016) Essa máquina era capaz de retirar vários litros a muitos metros de profundidade. Porém, apesar de genial, essa máquina apresentava algumas desvantagens, para elevar a água até a superfície, ela era acionada por vácuo advindo do vapor de água. O vapor de água era conduzido a um êmbolo que ficava totalmente preenchido pelo volume do vapor. Após isso o êmbolo era resfriado, condensando o vapor de dentro do êmbolo, isso gerava vácuo dentro do êmbolo devido à diminuição de área ocupada e fazia com que esse vácuo “sugasse” a água de dentro da mina até a superfície.



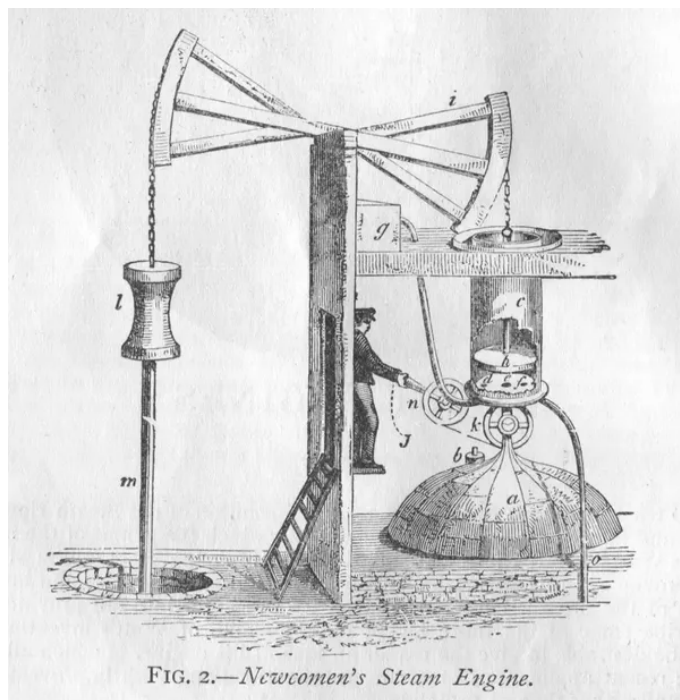
Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/1698>

Figura 12 – Máquina a vapor de Thomas Savery

Essa máquina chegara a ser pouco eficiente e por trabalhar com alta pressão, causara diversas explosões nas minas em que eram utilizadas.

2.5.2 *Máquina de Newcomen*

Newcomen era arrumador de máquinas e quando descobriu a máquina desenvolvida por Savery, conseguiu um emprego como serralheiro, com a obrigação de forjar os motores das máquinas, dessa maneira ele conseguiu autorização para tentar melhorar o equipamento que ajudara a montar. Essa máquina apresentava uma melhoria tanto em consumo de carvão, quanto em profundidade de sucção, ela não só poderia “secar” as minas, como também fornecer água para comunidades em escassez em épocas de seca. Ela era constituída de peças simples e com um avanço ponderável em automação.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_a_vapor_de_Newcomen
 Figura 13 – Máquina a vapor de Newcomen

Conforme (BORGES, 2016)

constituída por elementos comuns, tais como, válvulas, pistões e cilindros. Tinha como elemento principal um cilindro em cujo interior se movia um pistão. O cilindro era ligado por uma válvula a uma caldeira a carvão cheia de água. Essa água, levada à ebulição, transformava-se em vapor que penetrava sob o pistão, enquanto este se elevava dentro do cilindro sob a ação de um peso externo. Fechava-se então a válvula que liga o cilindro à caldeira e esfriava-se o cilindro pelo lado externo com água fria. O vapor que estava dentro do cilindro condensava-se bruscamente, reduzindo a pressão sobre o pistão. A pressão do ar no lado de fora impelia, então, o pistão para o fundo do cilindro,

e o movimento vigoroso do pistão era utilizado para bombear água por meio de uma alavanca. Depois se abria a válvula, o pistão se elevava no cilindro e o processo recomeçava.

E para (QUADROS, 1996)

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.

Essa máquina proporcionou muitos anos de soberania para a Inglaterra por ser simples e genial, porém ainda havia possibilidades de melhorias devido a perdas de rendimentos, foi nesse sentido que a mais famosa e sofisticada máquina térmica da época se formou; a máquina de James Watt.

2.5.3 Máquina de James Watt e a produção em massa

“A máquina de fogo que inventei se desenvolve agora e dá resposta muito melhor do que qualquer outra já inventada.”

(James Watt)

Watt, foi sem dúvidas a linha divisória entre a época pré-industrial e a produção em massa na indústria, ele estava no lugar certo, pois nessa época tinha como principais aliados a ciência em ascensão e a busca pelo carvão, em minas profundas, disposta a pagar qualquer preço. Sabia muito bem como “vender” suas ideias, conseguindo patrocinadores para pôr os planos em ação.

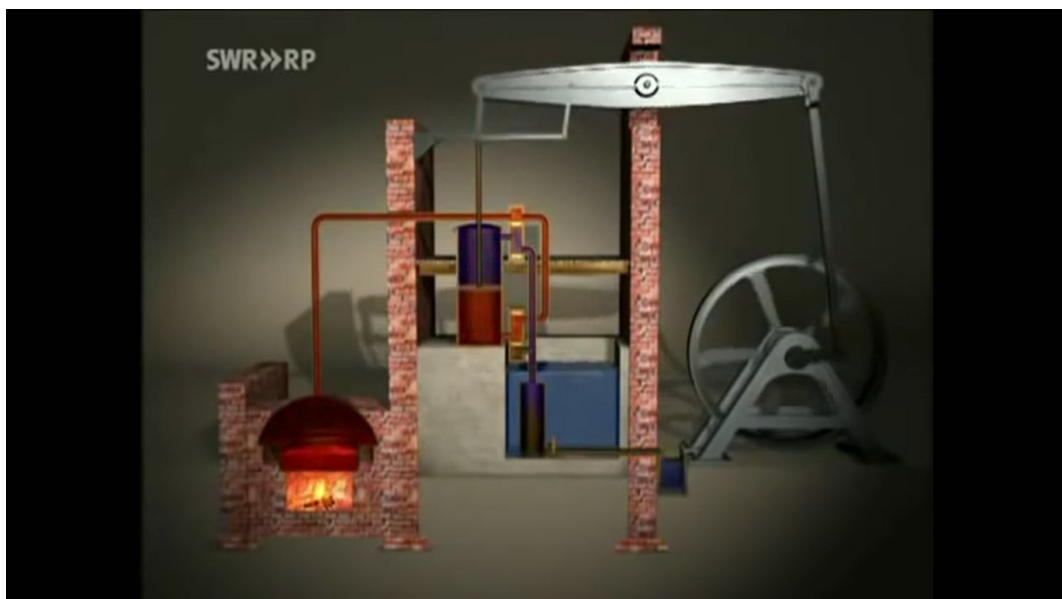
James Watt nasceu na Escócia, quando criança sofria de problemas de saúde e por isso não pudera ir à escola, sua educação foi obtida através de seus pais, que lhe ensinaram a ler e a fazer cálculos. Seus brinquedos eram bússolas e equipamentos de medição da época, trazidos por seu pai que trabalhava na área pluvial. Relata-se que James montara fácil e precisamente seus brinquedos.

Em 1757 começou a trabalhar na Universidade de Glasgow e certo dia teve como tarefa de consertar um motor Newconiano. Ele estudou cuidadosamente a máquina, mediu a quantidade exata de vapor necessário para preencher o cilindro, de maneira que não houvesse desperdício, vendo várias possibilidades de melhoria na máquina, Watt começou sua pesquisa.

Dois cilindros, um sempre quente, onde o vapor produz trabalho mecânico, e outro sempre frio, onde o vapor seria condensado, esta era a máquina de Watt. O primeiro cilindro, ou cilindro de trabalho, continha o pistão e era conectado ao segundo, ou condensador, por um tubo ligado à sua base. Quando o vapor do cilindro de trabalho precisava ser condensado, uma válvula abria-se no tubo e o vapor era conduzido ao condensador. Watt também notou que a atmosfera em contato com o êmbolo do cilindro era mais uma fonte de resfriamento. Incrementou ainda mais sua máquina, fazendo com que o próprio vapor fosse responsável pela descida do êmbolo, e não mais o ar. (QUADROS, 1996, p. 14).

A natureza revolucionária do desenvolvimento feito por James Watt na máquina a vapor se deu a partir de um problema fundamental da máquina de Newcomen. O vapor, ao chegar ao cilindro, recebia um jato de água fria para condensar-se e produzir o vácuo. Portanto, quanto mais fria fosse esta água e quanto mais frio o cilindro estivesse, melhor para o rendimento da máquina. No próximo ciclo, o novo vapor que chegava ao cilindro precisaria encontrá-lo quente para produzir a máxima expansão possível. Entretanto, iria encontrá-lo frio. Isto levava à condensação parcial do vapor antes mesmo dele empurrar o pistão para continuar o ciclo, ou seja, parte do vapor condensava antes de realizar o trabalho, reduzindo sensivelmente o rendimento da máquina, como foi constatado por Watt. Se quisermos resumir isto na forma de um problema técnico podemos dizer que para se obter o rendimento máximo o mesmo cilindro deveria estar bem frio em um dado momento e bem quente, logo imediatamente depois. (SANTOS, 2009, p. 49)

Sua solução foi simples, ele resolveu separar dois cilindros na máquina, um funcionando como pistão, responsável pela transmissão de movimento e recebimento de calor da fonte quente, responsável pela geração de vácuo e outro responsável pela condensação do calor à uma temperatura de aproximadamente 37°C. A máquina de Watt rapidamente se espalhou pela



Fonte: https://www.youtube.com/watch?v=qvS_Y1cyXPst=319s
 Figura 14 – Máquina a vapor de James Watt

Europa e foram substituídas por muitas de Newcomen. Elas eram de precisão e de montagem

tão boas que até hoje seus modelos são empregados com poucas distinções. Essas máquinas também foram adaptadas na indústria rapidamente e então deu-se início a uma grande revolução no modo de trabalho e da forma de vida humanidade. Em 1800 Watt, muito rico, se aposentou e seus filhos passaram a administrar seus empreendimentos.

2.5.4 Locomotiva a vapor

As mercadorias produzidas pelos ingleses tanto de minério quanto de outros utensílios eram carregadas pelas chamadas locomotivas, porém, seu deslocamento era feito por tração animal e humana, essa era uma maneira de transporte não muito eficiente e demorada. Começou-se a cogitar uma adaptação da máquina a vapor também para fins de transporte das mercadorias produzidas.

Após a aposentadoria, Watt dedicou-se a outros inventos, fora avisado, mas não deu importância ao avanço de sua máquina térmica para uma nova categoria; a locomotiva. Após a expiração de sua patente iniciou-se a construção dos primeiros protótipos, como informa (MILANI, 2010)

Em um primeiro momento, James Watt, especialista em máquinas a vapor, não se interessou em fornecer ajuda para tal ideia. Entretanto, quando a validade de sua patente expirou, o engenheiro Richard Trevithick, inventou um engenho de alta pressão e, já em 1803, uma viatura a vapor realizava várias viagens pelas ruas de Londres.

Nesse primeiro momento, a adaptação dessa máquina não se sucedeu, haviam dificuldades nas vias de transporte, para (MILANI, 2010) somente em 1829 começou a exportação em larga escala pela força motriz das locomotivas;

Durante esse período houve tentativas constantes de melhorar o sistema de caminhos-de-ferro, porém, só em 1829, quando a locomotiva construída por George Stephenson, o “Foguete”, como era então chamada, venceu a corrida em Rainhill, é que a potencialidade do transporte a motor foi entendida e a locomotiva a vapor se transformaria no novo triunfo para a revolução tecnológica.

Já para (STEFANI, 2007):

Mas é somente entre 1822/1825 que entra em funcionamento a primeira locomotiva a vapor, puxando vagões de carga num pequeno trecho ferroviário ligando o porto de Stockon às minas da cidade de Darlington e em 1832, o primeiro trecho para transporte de carga e passageiros, ligando Liverpool à Manchester, na Inglaterra.

Sem dúvidas esse foi um dos passos para a evolução na maneira de transportar bens materiais e pessoas e passou a ser exportada para vários países. Relata-se que nessa época houve uma grade

quantidade de ferrovias em construção em todo o mundo. Após a chegada nos Estados Unidos, fora aplicada uma série de melhorias, de acordo com a necessidade das estradas para o número de eixos.

Entre 1847-1848, mais de 2.000 milhas de linhas ferroviárias foram abertas no Reino Unido, absorvendo quase meio milhão de toneladas de ferro em trilhos e coxins, sendo que durante sua atividade máxima, empregou cerca de 300.000 mil homens. Em 1860, as linhas férreas já haviam se expandido para mais de 10.000 milhas, número que ainda aumentaria no período de 1860-1870. Na Rússia e na América, a construção das ferrovias seguia em ritmo acelerado. Porém, ao criar uma forte demanda pelo ferro da Inglaterra nos anos seguintes a 1860, e apesar de a malha ferroviária alemã estar quase no fim, a Rússia só conseguiria atingir seu apogeu em linhas nos anos seguintes a 1890, quando cerca de 16.000 milhas foram construídas. Ao mesmo tempo, na América, o trabalho seguia muito forte até quase a última quadra do século e, em 1887, 13.000 milhas de leitos ferroviários foram lançados nos Estados Unidos. (MILANI, 2010, p. 9).

No início do século XX essas máquinas passaram a ser muito requisitadas e melhoradas cada vez mais devido às inúmeras guerras civis que houvera e os Estados Unidos obteve maior sucesso devido as suas máquinas serem robustas e mais adaptadas com destaque para as Big Boys (fig.14) que eram enormes máquinas contendo 35,1m de comprimento e a capacidade de produção de 7000hp. Por volta de 1950, a maior energia de máquinas a vapor tinha aproximadamente três vezes o esforço tracionado daqueles 50 anos precocemente.

Após a segunda guerra mundial o carvão se tornou caro e com os novos motores desenvolvidos a diesel elas foram aposentadas, dando espaço aos trens movidos a motores a diesel e os turbinados.



Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Pony_Express_Union_Pacific_locomotive_844.JPG

Figura 15 – Locomotiva a vapor

3 DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tem-se observado o desenvolvimento de máquinas, o tempo seguindo sua seta, energia sendo transformada e o aumento da desordem no mundo cada vez mais perceptível. Todos resultantes do conceito de entropia.

A formulação desse conceito surgiu com base na segunda lei da termodinâmica e recebeu toda a carga de conteúdo que se vinha buscado entender desde a formulação dos conceitos de Carnot e suas teorias sobre a reversibilidade e irreversibilidade em um processo termodinâmico. Porém esse autor não conseguiu elaborar a formulação dos enunciados fundamentais de Kelvin-Plank e Clausius, que através de suas teorias experimentadas expuseram suas ideias complementares, deu-se, dessa maneira, sentido ao comportamento do calórico, a possibilidade de avanços para as hipóteses da época e o desenvolvimento de máquinas térmicas com uma eficiência melhor analisada e a noção de que não seria possível a construção de um moto-perpétuo.

Essa dissertação buscou abordar todos os passos da termodinâmica e suas aplicações para chegar a um conceito bem elaborado de desordem e entropia. Desenvolveu-se conteúdo das três leis, suas especificações foram verificadas, bem como seus processos e aplicações práticas.

No decorrer da elaboração, verificou-se poucos autores dedicados no desenvolvimento do assunto, através de teses e dissertações. Por se tratar de um tema pouco estudado durante esse período, há um interesse em difundir o tema na formação da nova geração de estudantes do ensino médio no Brasil, de acordo com a percepção de muitos pesquisadores.

O tema foi elaborado com a utilização de muitas citações de outros autores voltados para o ramo da física e engenharia, possui uma quantidade de pensamentos e teorias variados, mas sempre no mesmo sentido, logo, é muito rico em informações e formação de conhecimento de entropia e máquinas térmicas.

Outras aplicações foram inseridas a fim de se ter uma formação completa do conteúdo proposto, logicamente, na atualidade, a entropia se tornou objeto de estudo de muitas áreas como meio ambiente e economia, porém aqui tivemos uma combinação com o desenvolvimento das máquinas movidas pela força do calor.

Então apresentamos nossas ideias construídas e abrimos mais um ponto de partida para discussões e análise da teoria do calórico e sua construção. Espera-se deixar a colaboração para estudiosos do assunto e continuar na busca pelo conhecimento em um próximo passo para um mestrado nessa área.

REFERÊNCIAS

- BORGES, D. B. d. S. **A construção de uma abordagem histórica para o ensino de termodinâmica: Sadi Carnot e o estudo da máquina térmica**, 2016.
- FREEDMAN, Y. **Termodinâmica e ondas**. 12^aed.. ed. [S.l.: s.n.], 2008.
- GREGIO, N. S. **Termodinâmica, um tutorial para entendimento do conceito de entropia**, 2016.
- HALLIDAY RESNICK, W. **Fundamentos de Física.v.2.**: Livros técnicos e científicos editora. [S.l.: s.n.], 2009.
- MILANI, R. M. **a importância do sistema ferroviário para o desenvolvimento capitalista: uma análise do caso brasileiro – da implantação ao avanço industrial nos anos 50**, 2010.
- MOURA, M. **Entropia Estatística e o Ensino da Segunda Lei da Termodinâmica**, 2016.
- PASCOAL, A. S. **A evolução histórica da máquina térmica de Carnot como proposta para o ensino da segunda lei da termodinâmica**, 2016.
- QUADROS, S. **A Termodinâmica e a invenção das máquinas térmicas**, São Paulo, 1996.
- STEFANI, C. R. B. **fundamentos da Termodinâmica Clássica**, 2007.
- TIPLER, P. A. **Física para cientistas e engenheiros**, 6^aed, v.2, 2008.
- WYLEN, V. Ed. edgard blücher ltda. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**, São Paulo, v. 10, n. 1, 2009.
- YAMAMOTO, K. F. L. F. **Física para o Ensino Médio.Saraiva 3v**. [S.l.: s.n.], 2010.