

**MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE - EFOMM**

PAULO ROBERTO PENNA JUNIOR

**A APLICABILIDADE DA TERMODINÂMICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA**

**RIO DE JANEIRO
2018**

PAULO ROBERTO PENNA JUNIOR

**A APLICABILIDADE DA TERMODINÂMICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas, especializado em Máquinas Marítimas, do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador(a): OSM Ramesses Cesar da Silva Ramos

RIO DE JANEIRO

2018

PAULO ROBERTO PENNA JUNIOR

**A APLICABILIDADE DA TERMODINÂMICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Formação de oficiais de Máquinas como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas, especializado em Máquinas Marítimas ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: OSM Ramesses Cesar da Silva Ramos

Assinatura do (a) Orientador (a)

Assinatura do (a) Aluno (a)

RESUMO

A Termodinâmica é hoje um dos ramos interdisciplinares da Ciência, e constitui um instrumento fundamental na interpretação e previsão dos fenômenos da Física, da Química, da Bioquímica e da Engenharia. Tendo sido iniciada com uma componente essencialmente macroscópica (a que muitas vezes se chama Termodinâmica Clássica), engloba hoje um corpo de conhecimentos integrados totalmente individualizados das ciências mãe (a Física e a Química), graças ao desenvolvimento da teoria atômica e molecular. *James Clerk Maxwell* (1831-1879) escreveu (1) um dia que a Termodinâmica Clássica era “A Science with the secure foundations, clear definitions and distinct boundaries”. O desenvolvimento tecnológico acaba sendo uma consequência de um complexo estudo devido à necessidade humana de evolução. E foi o que aconteceu no século XVIII com a Revolução Industrial, a partir da qual foram desenvolvidas máquinas térmicas que realizavam trabalho com o vapor que era obtido pela queima do carvão em grandes caldeiras. Em busca de aumentar a produção, reduzir os custos, melhorar os meios de transporte e facilitar a comunicação entre as pessoas, diversos estudos e pesquisas levaram à descoberta dos motores à combustão, substituindo as máquinas à vapor e, obtendo assim, um aumento do rendimento e do trabalho. Essa evolução do setor industrial se deu graças aos conceitos da termodinâmica, e acabou por promover uma melhoria na qualidade de diversos outros setores como mecânica, medicina e inclusive da área alimentícia, elevando assim a qualidade de vida da população.

Palavras-chave: Termodinâmica. Indústria Naval. Evolução.

ABSTRACT

Thermodynamics is today one of the interdisciplinary branches of Science, and constitutes a fundamental instrument in the interpretation and prediction of the phenomena of Physics, Chemistry, Biochemistry and Engineering. Having started with an essentially macroscopic component (which is often called Classical Thermodynamics), it now encompasses a fully integrated body of integrated knowledge of the mother sciences (Physics and Chemistry), thanks to the development of atomic and molecular theory. James Clerk Maxwell (1831-1879) wrote (1) one day that Classical Thermodynamics was "A Science with the secure foundations, clear definitions and distinct boundaries". The technological development ends up being a consequence of a complex study due to the human need of evolution. And that was what happened in the eighteenth century with the Industrial Revolution, from which were developed thermal machines that worked with the steam that was obtained by the burning of coal in large boilers. In order to increase production, reduce costs, improve transport facilities and facilitate communication between people, a number of studies and research have led to the discovery of combustion engines, replacing steam engines and, thus, increasing yield and work. This evolution of the industrial sector was due to the concepts of thermodynamics, and ended up promoting an improvement in the quality of several other sectors such as mechanics, medicine and even food, thus raising the quality of life of the population.

Keywords: Thermodynamics. Shipbuilding. Evolution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES/FIGURAS

Figura 1:	Termômetros da <i>Academia del Cimento</i>	10
Figura 2:	Termômetro de mercúrio	10
Figura 3:	Escala Centígrada e Escala <i>Fahrenheit</i>	11
Figura 4:	Lei zero da Termodinâmica	11
Figura 5:	Calorímetro de <i>Antoine-Laurent Lavoisier</i>	12
Figura 6:	Primeira máquina à vapor	14
Figura 7:	A queda de água de <i>Maurits Escher</i>	15
Figura 8:	O ciclo de <i>Carnot</i> representado no artigo de <i>Clapeyron</i>	16
Figura 9:	Representação esquemática da determinação do equivalente mecânico do calor com dois pesos	18
Figura 10:	Bloco do motor a combustão	26
Figura 11:	Cabeçote do motor à combustão	26
Figura 12:	Carter do motor à combustão	27
Figura 13:	Partes do pistão	28
Figura 14:	Eixo de manivelas	29
Figura 15:	Engrenagens da distribuição	30
Figura 16:	Fases do ciclo diesel	31
Figura 17:	Soprador mecânico	33
Figura 18:	Turbina	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	HISTÓRIA DA TERMODINÂMICA	8
2.1	Termometria	9
2.2	Da natureza do calor	12
2.3	A contribuição de Sadi Carnot	13
3	TERMODINÂMICA E SUAS LEIS	17
3.1	O surgimento da 1ª lei da termodinâmica	17
3.2	Entropia e a 2ª lei da termodinâmica	20
3.3	A 3ª lei da termodinâmica	21
4	MOTORES DE COMBUSTÃO	23
4.1	Noções básicas	23
4.2	Evolução dos motores	23
4.2.1	Motores à combustão interna	25
4.3	Componentes de um motor	26
4.4	Ciclos dos motores térmicos	30
4.5	Disposição do cilindros de motores de combustão interna	32
4.6	Motores superalimentados	33
4.7	Comparativo entre motores diesel e motores otto	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda um tema de grande importância para os oficiais de máquinas da Marinha, pois trata-se da aplicação da termodinâmica no ramo da indústria naval.

Abordaremos à princípio o surgimento da termodinâmica, contextualizando o cenário de desenvolvimento industrial da época. O âmbito científico também será altamente abordado, sendo contada um pouco de sua história e citados alguns de seus principais colaboradores, cientistas esses que viriam a se tornar mundialmente conhecidos por suas contribuições ao desenvolvimento da ciência e da tecnologia.

Conceitos básicos da termodinâmica também serão expostos, a fim de facilitar o entendimento e a leitura deste estudo. E em seguida será abordada a aplicação da termodinâmica no mundo real. Citaremos exemplos de motores mais utilizados no meio naval, e faremos algumas comparações a fim de demonstrarmos a importância e a aplicabilidade desta matéria que é indispensável ao desenvolvimento humano.

2 HISTÓRIA DA TERMODINÂMICA

Das mais variadas transformações de energia, talvez a que mais fascinava os cientistas em meados do século XIX era a possibilidade de converter calor em movimento através das Máquinas Térmicas. A base do funcionamento das máquinas térmicas é simples: quando se aquece um gás, ele expande. Possivelmente a primeira máquina térmica que se tem notícia foi uma máquina a vapor desenvolvida por *Herón* de Alexandria, por volta do ano 50 D.C. *Herón* descobriu que ar se expandia no aquecimento e poderia ser usado para produzir uma força mecânica e com isto, acionar diversos mecanismos (ele conseguia abrir portas de templos “misteriosamente” a partir de fornos colocados nos altares. Os trabalhos de *Herón* foram perdidos e só por volta de 1600, *Giovanni Della Porta* os recuperou com grande sucesso (mas mediante de ar por vapor). *Leonardo da Vinci* foi outro que usou vapor de água para produzir movimentos.

Vários inventos importantes de da Vinci não foram executados por falta de equipamentos mecânicos capazes de produzir trabalho. Afinal, a capacidade de trabalho de homens ou animais é bastante limitada, lenta e irregular. Algo mais sistemático era necessário. A invenção da pólvora pelos chineses foi absorvida e transformada em fonte de potência de armamentos pelos europeus. Uma arma é, essencialmente, um motor que converte a força expansiva de uma explosão em movimento mecânico (da bala). Devido às inerentes dificuldades do aproveitamento deste movimento, a pólvora não foi usada, apesar de idéias de cientistas como *Christian Huygens* no século XVII.

Por volta do ano de 1700, *Thomas Savery* produziu, com base nas propriedades do vapor d'água, uma bomba para retirar a água das minas de carvão da Inglaterra, minimizando um dos grandes problemas da época. O equipamento de *Savery* não era, rigorosamente falando, um motor, pois não possuía partes móveis. Esse mérito teve o equipamento desenvolvido por *Thomas Newcomen* em 1705, no qual já se observa a existência de um pistão móvel. Foi um grande sucesso comercial, embora as válvulas devessem ser abertas e fechadas manualmente o tempo todo.

Em 1763, o escocês *James Watt*, um brilhante engenheiro, recebeu uma dessas máquinas para conserto e percebeu que havia um grande desperdício de vapor (que custava dinheiro para ser produzido). *Watt*, trabalhando na Universidade

de *Glasgow*, teve a oportunidade de conhecer um cientista famoso, *Joseph Black* que o ajudou a entender as propriedades do vapor d'água. Os dois fizeram inúmeras alterações nos projetos anteriores produzindo assim máquinas melhores, que foram usadas para acionar moinhos, movimentar trens, teares (máquinas têxteis), além, é claro, de bombear água.

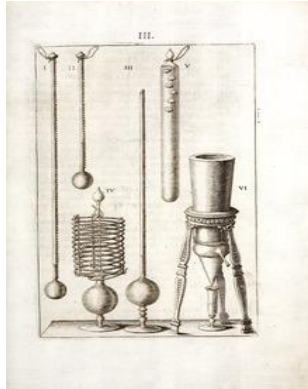
O sucesso da primeira Revolução Industrial na Grã-Bretanha se deve, em grande parte, ao uso dessas máquinas térmicas a vapor. A busca pelo aperfeiçoamento das máquinas térmicas levou o cientista francês *Sadi Carnot* (1796-1832) a desenvolver em 1824 toda uma teoria para explicar o rendimento, ou seja, o quanto de calor a máquina transformava em trabalho. Foi um momento histórico. Antes disso, as tentativas de melhorar o rendimento das máquinas eram na base da tentativa e do erro. O trabalho de Carnot teve como fundamento o método científico.

A partir das suas observações e nas de outros cientistas, Carnot criou um modelo teórico para as máquinas térmicas e descobriu qual deveria ser a maneira mais eficiente de transformar calor em movimento, e deu certo. A prática confirmou a teoria.

2.1 Termometria

Desde a antiguidade que o homem se preocupa em quantificar a realidade que o rodeia. Tal necessidade levou-o à construção do termômetro. Graças às experiências realizadas por *Gallileu* no início do século XVII, desenvolvimentos significativos foram efetuados neste instrumento. Deste modo, foram construídos novos modelos do termômetro da *Accademia del Cimento* (Figura 1), os quais podem hoje ser admirados no Museu da Ciência da cidade de Florença. Estes instrumentos de medida utilizavam como líquidos termométricos o álcool, ou misturas desta substância com água. Tais líquidos não só limitavam o intervalo de temperatura que era possível medir, como criavam problemas de reprodutibilidade nas medidas.

Figura 1: Termômetros da *Academia del Cimento*



Fonte: Wikipedia (2018)

Progressos significativos neste domínio foram realizados posteriormente por *Daniel Fahrenheit* (1686-1736), graças à utilização do mercúrio (Figura 2), para o qual descobriu um método especial de purificação. Com este líquido termométrico conseguiu-se ultrapassar as duas limitações anteriormente focadas e estabelecer a escala de temperatura, que tem hoje o seu nome. Para tal usou como pontos de referência as temperaturas de fusão do gelo (32° F) e de ebulição da água (212° F) à pressão atmosférica e dividiu este intervalo (212-32) em 180 partes (grau Fahrenheit).

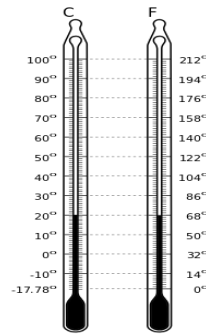
Em 1743 *Anders Celsius* introduziu uma nova escala de temperatura, usando os mesmos pontos de referência, aos quais atribuiu respectivamente o valor 0° C e 100° C. Dividindo este intervalo em 100 partes iguais obteve o grau centígrado, atualmente designado por *Celsius* (Figura 3).

Figura 2: Termômetro de mercúrio



Fonte: Wikipedia (2018)

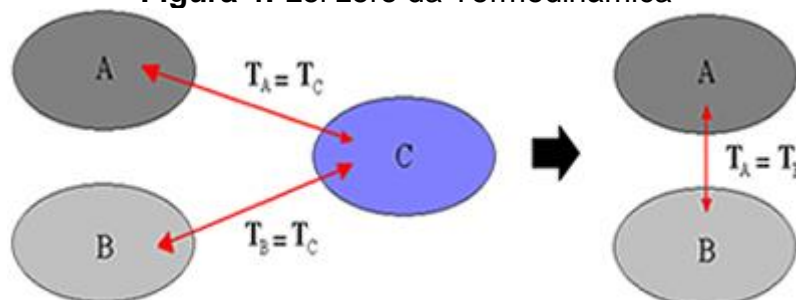
Figura 3: Escala Centígrada e Escala *Fahrenheit*.



Fonte: Wikipedia (2018)

Este domínio continuou a ser objeto de estudo até ao fim do século XVIII. Pode afirmar-se que, no âmbito da Termodinâmica, o período de 1600 a 1800 se caracterizou por estudos no domínio da termometria, os quais tiveram várias consequências. Assim, permitiram chegar à conclusão de que quando se colocam em contato dois corpos, a temperaturas diferentes, o sistema evolui espontaneamente para uma situação de equilíbrio. Este estado de equilíbrio térmico significa que um termómetro, em contato com ambos os corpos, indicará a mesma temperatura. Esta conclusão é extremamente importante e exprime aquilo que hoje se designa por lei zero da Termodinâmica, canonizada, graças aos esforços de *Fowler* (1920), após a 1ª., 2ª. e 3ª. leis terem sido formuladas. Como do ponto de vista conceitual é muito mais simples que as outras, tomou a designação de lei zero da termodinâmica¹ (Figura 4).

Figura 4: Lei zero da Termodinâmica



Fonte: Alunos Online (2018)

Por outro lado, esses estudos permitiram também uma clarificação da distinção entre calor e temperatura. Para tal contribuiu, de uma forma significativa, o trabalho realizado por *J. Black*. Com efeito, as suas experiências, baseadas na simples mistura de água quente com fria, levaram-no a introduzir o conceito de calor latente de transição (hoje designado por entalpia de transição), para o qual inventou

¹ 2 corpos (A e B) em equilíbrio térmico com um terceiro (C) estão em equilíbrio térmico entre si.

um método de medida. Finalmente, realizou estudos sistemáticos sobre calores específicos de diferentes substâncias. Estes estudos experimentais sugeriram que substâncias diferentes apresentavam calores específicos diferentes. Apesar dos estudos de *Black* sobre o calor específico das substâncias, este conceito só foi convenientemente clarificado graças a um trabalho realizado por *A. Lavoisier* e *P. Laplace* (1749-1827) apresentado à Academia das Ciências em 18 de junho de 1783: *Mémoire Sur la Chaleur*.

O calorímetro (Figura 5) por eles construído tinha seu funcionamento baseado no fato de o calor liberado no processo, que nele ocorre, ser determinado a partir da quantidade de água produzida por fusão de gelo. Este aparelho foi usado na determinação dos calores específicos de várias substâncias e dos calores de formação de diferentes compostos. No entanto, do ponto de vista experimental, o grande sucesso na sua utilização residiu nos estudos sobre a respiração de cobaias. Com eles foi possível concluir, pela primeira vez, que a respiração não era mais do que um processo de combustão muito lento e que o calor animal era o resultado desse fenômeno.

Figura 5: Calorímetro de *Antoine-Laurent Lavoisier* (1743-1794).



Fonte: Antoine Lavoisier Defense Squad (2015)

2.2 Da natureza do calor

As experiências de *Lavoisier* e *Black* conduziram a um maior interesse na interpretação da natureza do calor. Em finais do séc. XVIII existiam 2 teorias sobre o assunto:

1. A primeira baseava-se em um fato bem conhecido desde a antiguidade de que o calor podia ser produzido pela fricção de 2 corpos. Afirmava-se que o calor era um modo de movimento, possivelmente uma vibração.

2. A segunda apoiava-se no fenômeno de mistura de 2 substâncias que se encontram a temperaturas diferentes. Tal fenômeno podia ser interpretado facilmente se se considerasse que o calor era um fluido elástico, indestrutível e imponderável, designado por calórico.

Perante a existência destas duas teorias, cujos adeptos se degladiavam, havia a necessidade de realização de novas medidas experimentais, que permitissem tirar conclusões mais corretas sobre a natureza do calor. E foi exatamente o que aconteceu através das experiências de *Benjamin Thompson* no Arsenal de Munique, do qual foi responsável como ministro da guerra do Eleitor da Baviera, *Karl Theodor*.

Os valores dos seus serviços nesta função levaram o Eleitor a distingui-lo com o título de Conde *Rumford*, designação com que é habitualmente conhecido.

A ideia de realizar estas experiências foi sugerida pela verificação da grande quantidade de calor gerada no processo de fabricação de um canhão com uma broca. Esse calor podia ser determinado com base no tempo necessário a que uma certa quantidade de água, em que o cilindro metálico a ser brocado estava mergulhado, levava a ferver.

Os resultados dessas experiências sugeriram que se podia gerar calor sem limites, o que estava em contradição com a teoria do calórico, uma vez que um dos seus postulados estabelece a sua conservação. Deste modo, estas experiências representavam um suporte importante de que a causa do calor era o movimento.

2.3 A contribuição de *Sadi Carnot*

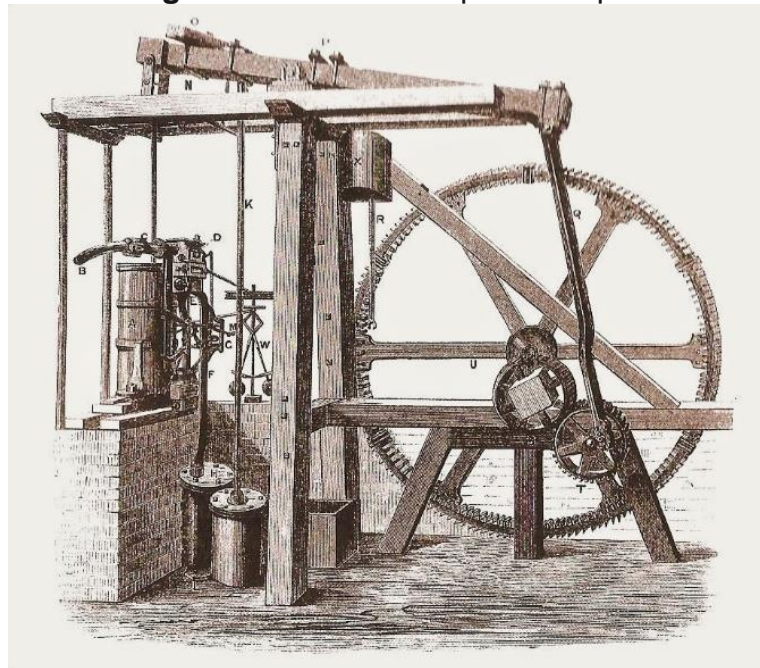
O trabalho de *Sadi Carnot*, “*Reflexions sur la puissance motrice du feu*” publicado em 1824, constitui hoje uma das obras-primas da História das Ciências.

O aparecimento deste trabalho resultou do fato de *Carnot* ser um engenheiro militar com interesses no domínio do desenvolvimento industrial. Por esse fato, apercebeu-se que a posição de hegemonia da Inglaterra, à época, resultava da utilização da máquina à vapor, como elemento essencial da Revolução Industrial

(Figura 6). *Carnot* sentiu que a que a posição dominante da Inglaterra podia ser alterada, desde que ele construísse máquinas a vapor mais eficientes.

Com o objetivo de melhorar o seu rendimento, *Carnot* tentou interpretar o seu funcionamento numa base teórica. Para tal serviu-se da analogia entre a máquina à vapor e o moinho de água. Assim, tal como a queda de água de um nível superior para um inferior faz mover a roda do moinho² (trabalho), também a máquina a vapor realiza trabalho quando o calor passa da fonte quente (caldeira) para a fonte fria (condensador) (Figura 7). No seu estudo, *Carnot* admitiu como correta a teoria do calórico, o que implicava que, no processo que ocorre na máquina à vapor, haja conservação de calor. Simplesmente, como se provaria mais tarde, tal premissa não era verdadeira. Com efeito, o calor, ao contrário da quantidade de água que passa no moinho, não se conserva, transformando-se parcialmente em trabalho.

Figura 6: Primeira máquina à vapor



Fonte: Tecfolha (2014)

² Transformação de energia potencial em trabalho. No tempo de Carnot o trabalho era designado por potência motriz.

Figura 7: A queda de água de *Maurits Escher*



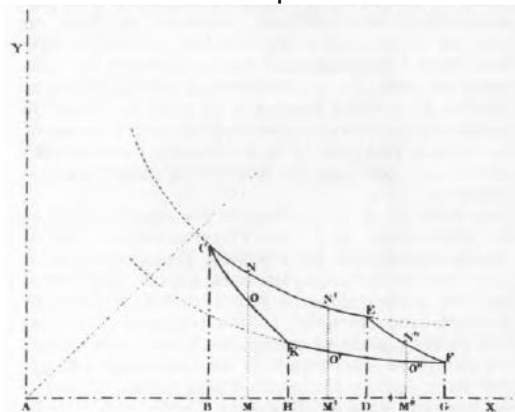
Fonte: Arte fonte de conhecimento (2011)

Para além de admitir a validade da teoria do calórico, considerou também a impossibilidade do movimento perpétuo. Com base em ambos os postulados ele deduziu o chamado teorema de *Carnot*, que numa linguagem atual pode ser enunciado da seguinte maneira: “Máquinas térmicas reversíveis apresentam a mesma eficiência, desde que sejam iguais as temperaturas das fontes quente e fria, a qual é máxima nessa situação (reversibilidade)”.

Carnot morreu em 1832 durante uma epidemia de cólera, e de acordo com o costume da época, os seus objetos pessoais foram queimados ou colocados de quarentena. O mesmo aconteceu naturalmente com o que havia escrito após a publicação em 1824 da “*Reflexions sur la puissance motrice du feu*”. O que restou foi publicado em 1878 por seu irmão *Hippolyte*.

Uma análise destes seus estudos permite concluir que ele tinha posto de lado a teoria da calórico e sugeria que o que havia era conservação de energia e não de calor. Porém, talvez devido à sua natureza abstrata, os engenheiros da época dedicaram pouca atenção ao seu trabalho. No entanto, em 1834, *Emile Clapeyron* torna-o mais acessível através do artigo (Figura: 8) “*Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur*”, no qual dá uma expressão matemática às ideias de *Carnot*. Simultaneamente, apresenta no mesmo trabalho o chamado ciclo de *Carnot* numa forma a que os engenheiros estavam habituados — o diagrama de *Watt*.

Figura 8: O ciclo de Carnot representado no artigo de *Clapeyron*.



Fonte: Science direct (2013)

Neste diagrama de *Watt*, a ordenada representa a pressão, enquanto que a abcissa o volume.

A leitura do artigo de *Clapeyron* levou *William Thompson* a aperceber-se da importância do trabalho de Carnot, levando-o a escrever vários trabalhos sobre o assunto, num dos quais em 1849, sob o título “An Account of Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, With Numerical Results Deduced from Regnault's Experiments on Steam” aparece pela primeira vez a palavra TERMODINÂMICA.

Uma outra consequência importante do efeito das ideias de Carnot sobre Thompson manifesta-se no primeiro artigo desse conjunto, publicado em 1848, no qual ele define uma escala absoluta de temperatura. Esta tinha a particularidade de, ao contrário das existentes até então, ser independente da substância termométrica. Esta escala baseava-se na ideia de Carnot de que no seu ciclo havia conservação de calor. No entanto, como se verá mais tarde, o que existe é conservação de energia, pelo que ela teve de ser posteriormente adaptada.

Foi também através do mesmo artigo de *Clapeyron* que *Rudolf Clausius* toma conhecimento da importância das ideias de Carnot. Possuidor de uma intuição física notável, refina e desenvolve essas ideias num trabalho importante sobre a teoria do calor, no qual nega pela 1.ª vez que na máquina a vapor haja conservação de calor. Para ele a chamada potência motriz, a que Carnot se referia, resultava da transformação de parte do calor que ia da fonte quente para a fonte fria, pelo que não podia haver conservação de calor. Deste modo, conciliava as ideias de Carnot com as experiências rigorosas de *J. Joule*, como se verá adiante. É também através deste trabalho que ele clarifica muitos dos conceitos da Termodinâmica dando-lhes a forma atual.

3 TERMODINÂMICA E SUAS LEIS

3.1 O surgimento da 1ª. lei da termodinâmica

Esta lei é essencialmente um princípio de conservação de energia. O trabalho experimental que conduziu à sua formulação iniciou-se com o conde Rumford (acima citado). Com efeito, as suas experiências permitiram tirar conclusões sobre a existência de uma relação quantitativa entre o trabalho efetuado na agitação de uma vareta contra uma base de bronze e o correspondente calor liberado.

O interesse de Julius Robert Von Mayer (1814-1878) em relacionar o calor e o trabalho surgiu durante uma viagem que efetuou como médico de bordo de um navio às ilhas holandesas de Java. Em Jacarta teve de realizar uma sangria a um dos marinheiros, que supunha afectado de uma doença pulmonar. Durante a operação verificou que o sangue venoso do doente tinha um tom vermelho vivo, bastante diferente da cor a que estava habituado a observar nos climas mais frios. Discutindo com médicos locais tal “anomalia” verificou que essa tonalidade era típica dos trópicos. Isso devia-se ao fato de a temperatura ambiente dessa zona do globo ser elevada, pelo que os seus habitantes necessitavam de usar menos oxigênio para manter a temperatura dos seus corpos. Refletindo no fato de o calor gerado por oxidação dos alimentos servir não apenas para manter a temperatura dos seres vivos, mas também para permitir o seu trabalho manual, estimou um primeiro valor de J . (A relação quantitativa entre o trabalho e o calor é habitualmente expressa pela relação $W = J Q$, em que J é designado por equivalente mecânico do calor).

Consciente da importância das conclusões a que chegara, Mayer tentou publicá-las em uma revista de grande importância na época, no entanto, Johann Poggendorf (1796-1877), que era responsável pela revista, recusou-lhe o artigo em virtude de ser pouco claro e de apresentar incorreções no ponto de vista físico. Posteriormente, Mayer dedicou o resto da sua vida à clarificação da relação entre o calor e o trabalho. Assim, verificou que essa relação existia também entre outras formas de energia, como sejam a química, a elétrica, etc.

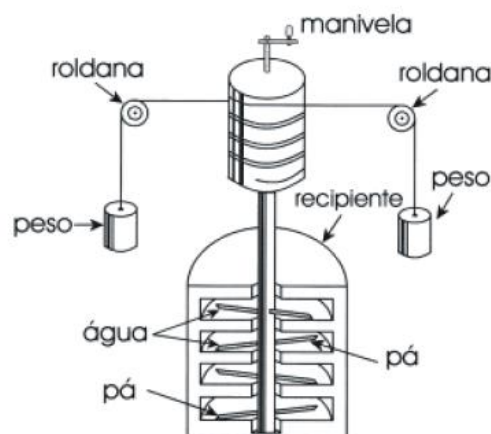
Uma determinação mais correta do valor de J foi realizada por James Prescott Joule (1816-1889), um físico inglês que, dotado de fortuna pessoal, pode dedicar-se à ciência sem ter de depender do suporte económico de instituições científicas ou de departamentos governamentais.

Um dos processos utilizado por Joule para a determinação de J consistia na utilização de um calorímetro. (Figura 9).

O trabalho mecânico correspondente à queda do peso de massa m de uma altura h_1 para h_2 , [$mg(h_1 - h_2) = \text{variação de energia potencial}$], era transformado em calor através do movimento das pás no banho de água em que se encontram. Este calor pode ser determinado com base na variação da temperatura do mesmo.

Em 1849 Joule apresentou os seus estudos e o valor de J por ele determinado com base nas suas experiências foi de $J = 4,154 \text{ Joule/cal}$, o qual é próximo do valor atualmente estabelecido. Ele concluiu também que o calor e o trabalho eram conversíveis um no outro e em 1840 começou a investigar com objetivo de estabelecer proporcionalidade entre eles. A primeira experiência era de gerar energia a cabo num laboratório privado consistindo em gerar energia elétrica com um raciocínio constante ao passar uma corrente elétrica através de uma resistência imersa em água. Com o desenvolvimento de pesquisas na determinação do trabalho do gerador elétrico e do calor desenvolvido na dissipação da energia elétrica pela resistência, foi determinada a proporcionalidade entre o trabalho mecânico e o calor.

Figura 9: Representação esquemática da determinação do equivalente mecânico do calor com dois pesos



Fonte: Wikipedia (2018)

Estabeleceu-se a lei que tem o seu nome, “Lei de Joule”, que relaciona a energia dissipada em um condutor que possui uma resistência e é percorrido por uma corrente elétrica.

Em 1847 *Herman von Helmholtz* publica um artigo baseado nos trabalhos de *Carnot*, *Clapeyron* e *Joule*, no qual ele expõe as bases científicas e filosóficas do

princípio da conservação de energia. O seu interesse por este assunto resultou do fato de, após a sua tese de doutoramento sobre fibras nervosas em 1842, ter-se dedicado a estudos sobre o calor animal.

No entanto, ao contrário dos seus colegas de medicina, teve a ideia de explicar os fenômenos fisiológicos com base nos conceitos da Química e da Física. Influenciado pelas concepções *Kantianas* sobre Ciência, sente necessidade de explicar os fenômenos através de princípios universais. Idêntica influência sofreu *Mayer*, embora à data de publicação do artigo anteriormente focado, *Helmholtz* desconhecesse o trabalho do seu colega. Neste estudo ele consegue provar que a primeira lei tem uma validade universal.

O que *Helmholtz* fez de verdadeiramente inovador em relação aos trabalhos de *Joule* e de *Mayer* foi o de ter estabelecido a 1ª. lei com base em um formalismo matemático. Sabendo-se que para todo e qualquer sistema termodinâmico há uma função característica, que é conhecida como energia interna, podemos enunciar essa primeira lei da seguinte maneira: a variação da energia interna entre dois sistemas pode ser determinada pela diferença entre a quantidade de calor e o trabalho trocado com o meio ambiente.

Matematicamente essa lei pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta U = Q - T$$

Onde:

Q é a quantidade de calor recebida ou cedida;

T é o trabalho realizado pelo sistema ou que é realizado sobre o mesmo;

ΔU é a variação da energia interna do sistema.

Essa lei tem aplicação prática em três transformações particulares de um gás perfeito. Lembrando que um gás perfeito ou ideal é um modelo idealizado para o comportamento de um gás, o qual obedece às leis de *Gay Lussac*, lei de *Boyle Mariotte* e a lei de *Charles*.

As transformações que são estudadas na primeira lei da termodinâmica são:

Transformação isobárica: ocorre à pressão constante, podendo variar somente o volume e a temperatura; Transformação isotérmica: ocorre à temperatura constante, variando somente as grandezas de pressão e volume;

Transformação isocórica ou isovolumétrica: ocorre à volume constante, variando somente as grandezas de pressão e temperatura;

Transformação adiabática: é a transformação gasosa na qual o gás não troca calor com o meio externo, seja porque ele esteja termicamente isolado ou porque o processo que ocorre de forma tão rápida que o calor trocado é desprezível.

3.2 Entropia e a 2ª lei da termodinâmica

As muitas máquinas que vemos diariamente como, por exemplo, o motor de uma geladeira ou um motor de um veículo automotivo, são máquinas térmicas, pois elas realizam o processo de conversão de calor em trabalho, operando sempre em ciclos como o descrito por Carnot.

Carnot, através dos ciclos ideais e da idéia de transformações reversíveis, alcançou grandes resultados de fundamentos de máquinas térmicas. Com seu trabalho *Reflexion sur la puissance motrice du feu*, em 1824, modificou a teoria cinética dos gases e da lei da conservação da energia.

As descobertas de Carnot, juntamente com as de Willian Thomson, mais conhecido por Lord kelvin (1824-1907), e de Rudolph Julius Emanuel Clausius (1828-1888), constituíram a base para a formulação da segunda lei da termodinâmica, enunciada pela primeira vez em 1854.

Carnot desenvolveu as suas investigações principalmente sobre a teoria mecânica do calor e a teoria cinética dos gases, os seus trabalhos de termodinâmica e sobre a noção de entropia foram de grande importância. Segundo Carnot, para que ocorra conversão contínua de calor em trabalho, uma máquina térmica deve realizar ciclos contínuos entre a fonte quente e a fonte fria, as quais permanecem em temperaturas constantes. A cada ciclo realizado é retirada uma quantidade de calor da fonte quente, parte desse calor é convertida em trabalho e a outra parte é rejeitada para a fonte fria.

Clausius e Thomson formularam a segunda lei da termodinâmica separadamente em 1854, estabelecendo que, todos os processos naturais levam um aumento na entropia no sistema interno envolvido. A entropia de uma substância é função da condição da substância. O exemplo considerando um sistema em duas condições diferentes, ou seja, um quilo de gelo a 0 °C. Quando o calor é removido, a entropia diminui e quando o calor é adicionado, a entropia aumenta. Esta é a definição de entropia numa máquina ideal e reversível e que não sofre atrito, como supôs Carnot.

A capacidade de dedução de Clausius, baseada em análises matemáticas relativamente simples, permitiu-lhe chegar à relação:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad [1]$$

Para um ciclo de Carnot reversível. A função S, que num processo reversível satisfaz a expressão:

$$dS = \frac{dQ}{T} \text{ (reversível)} \quad [2]$$

Designou-a no seu artigo publicado em 1865 por entropia, que significa transformação.

E afirmou ainda que, se o processo que ocorre for irreversível, a equação [2] transforma-se numa desigualdade:

$$dS > \frac{dQ}{T} \text{ (irreversível)} \quad [3]$$

As expressões [2] e [3] são no fundo um desenvolvimento do teorema de Carnot e permitem concluir que: “Um sistema isolado evolui espontaneamente para um estado de equilíbrio, que corresponde à um máximo da função entropia”.

Esta é uma das formas de exprimir atualmente a chamada 2ª. Lei da Termodinâmica. Apesar de ser designada por 2ª. Lei, ela é considerada habitualmente a primeira a ter sido formulada. Tal é compreensível quando se admite o teorema de Carnot como uma forma menos elaborada de exprimi-la. Por sua vez, a 1ª. Lei, que está implícita também no trabalho de Carnot, foi estabelecida posteriormente.

3.3 A 3ª lei da termodinâmica

A terceira lei foi desenvolvida pelo químico alemão Walther Nernst durante os anos 1906–1912, e por isso é muitas vezes referida como o teorema de Nernst ou postulado de Nernst. Esse teorema propõe que, em qualquer reação envolvendo somente sólidos cristalinos, a variação da entropia é nula. Nernst propôs um

princípio em que afirma que a entropia de um sistema em equilíbrio termodinâmico tende a uma constante S_0 finita quando a temperatura tende ao zero absoluto³,

$$S \rightarrow S_0 \text{ quando } T \rightarrow 0$$

A constante S_0 é a mesma para qualquer estado de um sistema à temperatura nula. Em outros termos, S_0 é independente das grandezas termodinâmicas.

Com tal afirmação constitui-se o primeiro enunciado, menos geral, da terceira lei da termodinâmica, que veio a ser reformulada em 1913 por Planck, que atesta em seu princípio que:

$$S_0 = 0$$

Desta forma, de acordo com Planck, a constante $S_0 = 0$ é universal, ou seja, é a mesma para qualquer sistema. Este trabalho resultou, no entanto, dos trabalhos anteriores que foram capazes de mostrar que a máxima eficiência é obtida quando todas as operações são conduzidas de uma forma reversível.

Em 1921 a hipótese do calórico foi completamente abandonada, com o enunciado do primeiro princípio da termodinâmica, integrando a uma definição de quantidade de calor por Max Born. Max foi um físico alemão, nascido em 1882, que veio a receber o prêmio Nobel de física em 1954, através de seus estudos sobre as funções de ondas e aplicações da teoria quântica aos problemas da estrutura atômica e molecular, nomeada da teoria das perturbações, à problemas de difusão de partículas, à teoria cinéticas dos fluidos e ao estudo das redes cristalinas.

Pela teoria cinética, consegue-se explicar os fenômenos térmicos pelo movimento desordenado das moléculas e desta forma, o conceito de calor é classificado de energia cinética das moléculas que constituem um corpo, que também pode aparecer como energia radiante, ou seja, energia eletromagnética.

O estudo do calor pode ser encarado como um ramo da mecânica estatística que estuda as consequências resultantes do conhecimento imperfeito de um sistema que pode ser estudado, e classifica suas características, não alcançando resultados satisfatórios. Sendo assim considerado um sistema mecânico complexo.

³ Numa escala progressiva, o **zero absoluto** seria a temperatura de menor energia possível.

4 MOTORES DE COMBUSTÃO

Motor de combustão interna é uma máquina térmica que transforma a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica. O processo de conversão se dá através de ciclos termodinâmicos que envolvem expansão, compressão e mudança de temperatura de gases.

4.1 Noções básicas

A combustão é uma reação química com desprendimento de luz e de calor. Para que se processe essa reação, dois agentes químicos têm que estar presentes: o combustível e o comburente. Além disso, é indispensável que a temperatura do combustível corresponda pelo menos à do seu ponto de ignição.

Combustível é tudo aquilo que é capaz de entrar em combustão: óleo diesel, gasolina, carvão, estopa e óleo pesado.

Comburente é todo elemento que, associando-se quimicamente ao combustível, é capaz de fazê-lo entrar em combustão. O oxigênio, presente no ar atmosférico, é o comburente mais facilmente encontrado na natureza. O ar atmosférico é constituído de aproximadamente 76% de Nitrogênio, 23% de oxigênio e 1% de outros gases. O Nitrogênio é, na realidade, um gás inerte, ou seja, um gás que não queima.

Ponto de ignição é a temperatura mínima na qual o combustível desprende vapores capazes de se inflamarem e continuarem queimando mesmo quando se lhe retira a fonte externa de calor. Cada combustível tem a sua própria temperatura de ignição. A temperatura de ignição não deve ser confundida com o ponto de fulgor do combustível, que é a temperatura mínima na qual o combustível desprende vapores capazes de se inflamarem quando em contato com uma fonte externa de calor, mas uma vez retirada essa fonte, a combustão extingue-se.

4.2 Evolução dos motores

Os primeiros motores à combustão externa apareceram no século XVIII e o combustível utilizado era a lenha, naquela época abundante e de baixo custo. Estes motores a vapor eram geralmente utilizados em máquinas estacionárias.

No século XIX apareceram os primeiros motores à combustão interna. Nestes, o combustível é queimado dentro do próprio motor e seu aparecimento provocou um rápido desenvolvimento mecânico. Estes motores levaram vantagem sobre as máquinas a vapor pela sua versatilidade, eficiência, menor peso por cavalo vapor, funcionamento inicial rápido e possibilidade de adaptação a diversos tipos de máquinas.

O primeiro motor à combustão interna foi construído pelo mecânico alemão Lenoir, em 1860, e tinha a potência de 1 cv, trabalhando com gás de iluminação.

Em 1861, Otto e Langen, baseando-se na máquina de Lenoir, construíram um motor que comprimia a mistura de ar e gás de iluminação, com ignição feita por uma centelha elétrica.

Em 1862, o engenheiro francês Beau de Rochas publicou estudos teóricos e estabeleceu alguns princípios termodinâmicos baseado no motor de Otto. Este, por sua vez, baseado no estudo de Rochas, desenvolveu um motor: o motor de ciclo Otto. Apresentado em 1872. Estes motores usavam como combustível o gás de carvão ou o gasogênio, com ignição feita por centelha elétrica.

Em 1889, fez-se a primeira aplicação do motor de ciclo Otto em veículos, utilizando-se como combustível a gasolina.

Em 1893, o engenheiro alemão Rudolf Diesel descreveu um novo motor, no qual a ignição da mistura ar mais combustível era feita por compressão. Este motor, que Diesel denominou “motor térmico racional”, acabou ficando conhecido como motor Diesel.

Os motores modernos são derivados dos construídos por Otto e Diesel e as características básicas dos mesmos são as seguintes:

a) Motores de ciclo Otto: utilizam combustível de baixa volatilidade, como a gasolina e o álcool. Para ignição necessitam de centelha produzida pelo sistema elétrico.

b) Motores de ciclo Diesel: utilizam como combustível o óleo diesel. A inflamação do combustível injetado sob pressão na câmara de combustão ocorre pela compressão de ar e consequente elevação da temperatura.

As máquinas de combustão também são classificadas em duas categorias: as de combustão externa e as de combustão interna.

Máquina de combustão externa é aquela em que a queima do combustível ocorre fora dela ou, mais precisamente, numa caldeira onde o calor da combustão é

utilizado para produzir o vapor d'água que vai movimentar a máquina. Como exemplo podemos citar a turbina a vapor.

É bom lembrar que a primeira máquina alternativa de combustão externa foi patenteada pelo engenheiro James Watt no ano de 1769. Na realidade, as máquinas alternativas a vapor foram utilizadas por muito tempo na propulsão e nos sistemas auxiliares dos navios, sendo também bastante utilizadas em locomotivas.

Repare que o vapor d'água produzido na caldeira era enviado para acionar a máquina de combustão externa principal que acionava o eixo propulsor do navio. Após acioná-la, ele era recolhido num condensador onde retornava ao estado líquido, sendo reenviado à caldeira por meio da bomba de alimentação que também era acionada por uma máquina alternativa a vapor.

Máquina de combustão interna é aquela em que a queima do combustível se processa no interior da própria máquina. Como exemplo podemos citar a turbina a gás, o motor à explosão e o motor Diesel.

4.2.1 Motores à combustão interna

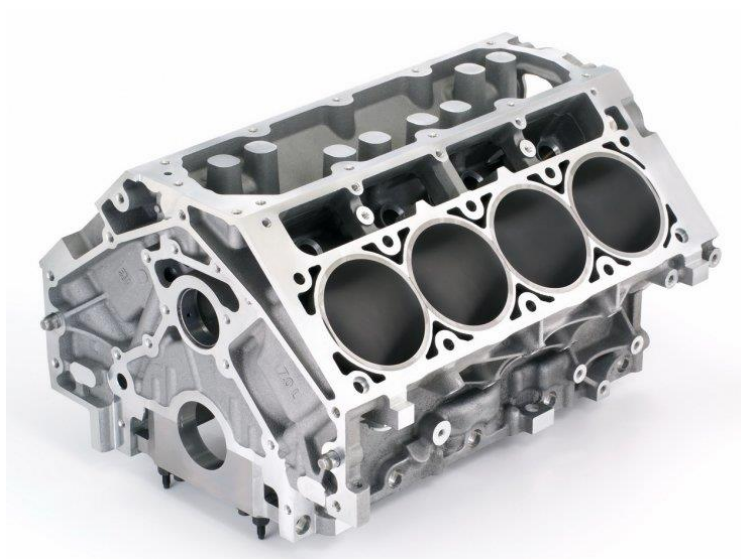
No mundo de hoje as máquinas de combustão interna assumem uma posição de grande destaque. Os Motores *Diesel*, por exemplo, são muito empregados em ônibus, caminhões, tratores, usinas geradoras de eletricidade, navios, etc. Sem medo de errar, podemos dizer que o motor *Diesel* é o campeão em aplicações navais, seja em navios de pequeno, de médio ou de grande porte.

Motores de combustão interna também são popularmente chamados de motores à explosão. Esta denominação, apesar de frequente, não é tecnicamente correta. De fato, o que ocorre no interior das câmaras de combustão não é uma explosão de gases. O que impulsiona os pistões é o aumento da pressão interna da câmara, decorrente da combustão (queima controlada com frente de chama). O que pode-se chamar de explosão (queima descontrolada sem frente de chama definida) é uma detonação dos gases, que deve ser evitada nos motores de combustão interna, a fim de proporcionar maior durabilidade dos mesmos e menores taxas de emissões de poluentes atmosféricos provenientes da dissociação de óxido nítrico.

4.3 Componentes de um motor

Bloco é a maior parte do motor e sustenta todas as outras partes. Nele estão contidos os cilindros, geralmente em linha nos motores de tratores de rodas. São normalmente construídos de ferro fundido, mas a este podem ser adicionados outros elementos para melhorar suas propriedades. Alguns blocos possuem tubos removíveis que formam as paredes dos cilindros, chamadas de camisas. Estas camisas podem ser úmidas ou secas, conforme entrem ou não em contato com a água de refrigeração do motor.

Figura 10: Bloco do motor à combustão.



Fonte: WM1 (2016)

Cabeçote é o componente que fecha o bloco na sua parte superior, sendo que a união é feita por parafusos. Normalmente, é fabricado com o mesmo material do bloco. Entre o bloco e o cabeçote existe uma junta de vedação.

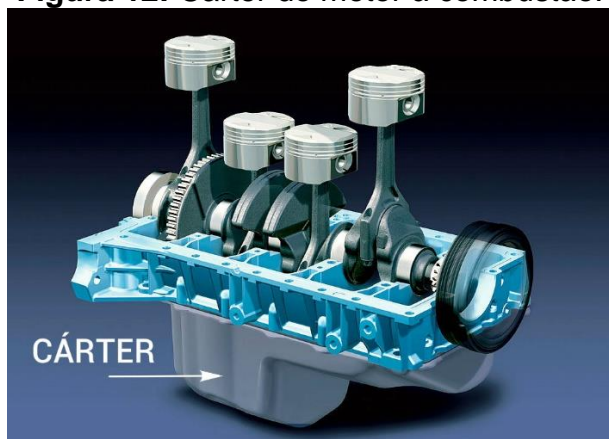
Figura 11: Cabeçote do motor à combustão.



Fonte: InfoMotor (2009)

O cárter fecha o bloco na sua parte inferior e serve de depósito para o óleo lubrificante do motor. Normalmente, é fabricado de chapa dura, por prensagem.

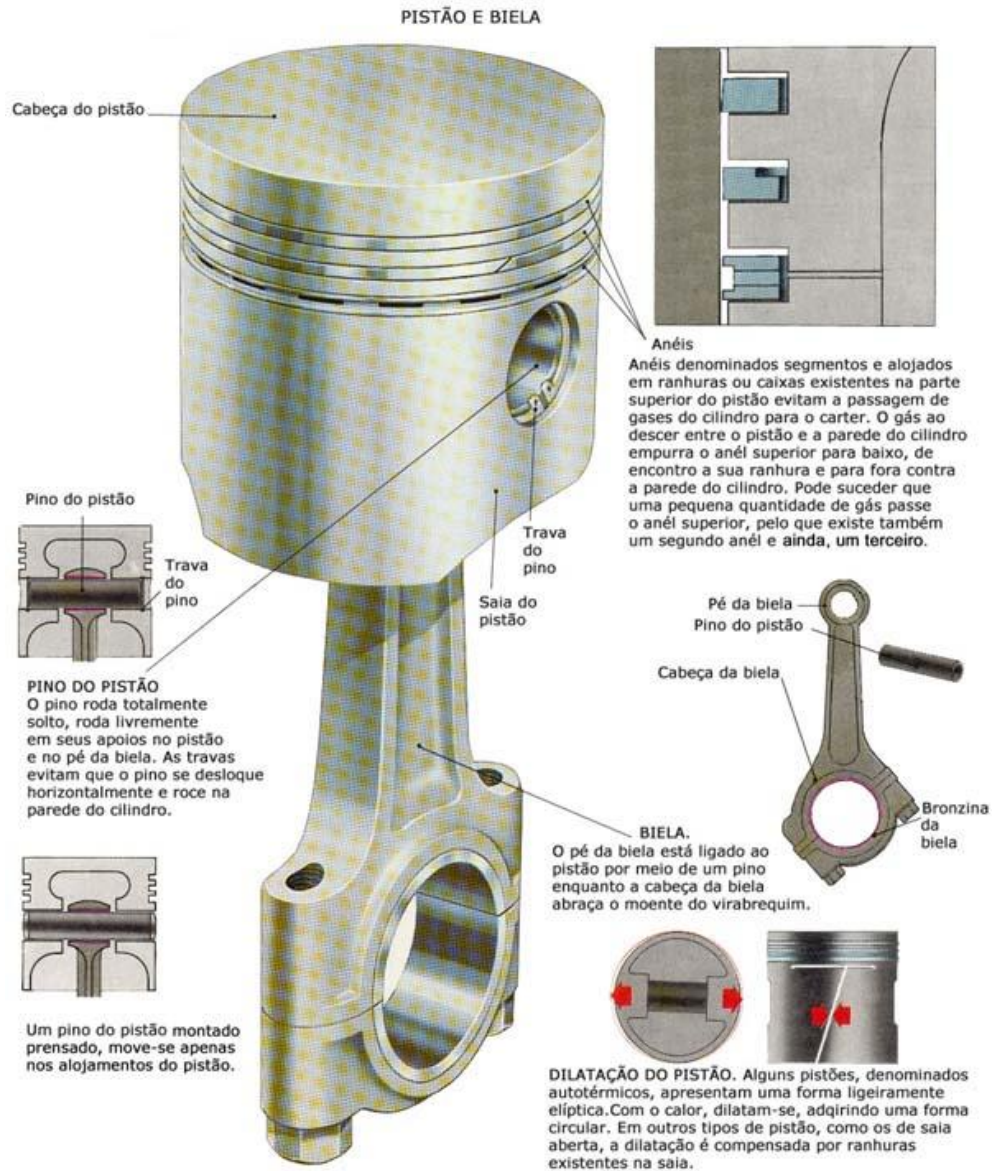
Figura 12: Carter do motor à combustão.



Fonte: Automo Web (2016)

Pistão, também chamado de êmbolo, é a parte do motor que recebe o movimento de expansão dos gases. Normalmente, é feito de ligas de alumínio e tem um formato aproximadamente cilíndrico. No pistão encontram-se dois tipos de anéis: os anéis de vedação, que estão mais próximos da parte superior (cabeça) do pistão e os anéis de lubrificação, que estão localizados na parte inferior do pistão e têm a finalidade de lubrificar as paredes do cilindro. O pistão liga-se à biela através de um pino. O pino é normalmente fabricado de aço cimentado.

Figura 13: Partes do pistão.



Fonte: Costa (2001)

Biela é a parte do motor que liga o pistão ao virabrequim. É fabricado de aço forjado e divide-se em três partes: cabeça, corpo e pé. A cabeça é presa ao pistão pelo pino e o pé está ligado ao virabrequim através de um material ant-fricção, chamado casquilho ou bronzina.

Virabrequim, também chamado de girabrequim ou eixo de manivelas. É fabricado em aço forjado ou fundido. Possui mancais de dois tipos: os excêntricos, que estão ligados aos pés das bielas; e os de centro, que sustentam o virabrequim ao bloco.

Figura 14: Eixo de manivelas



Fonte: Mecânica Industrial (2018)

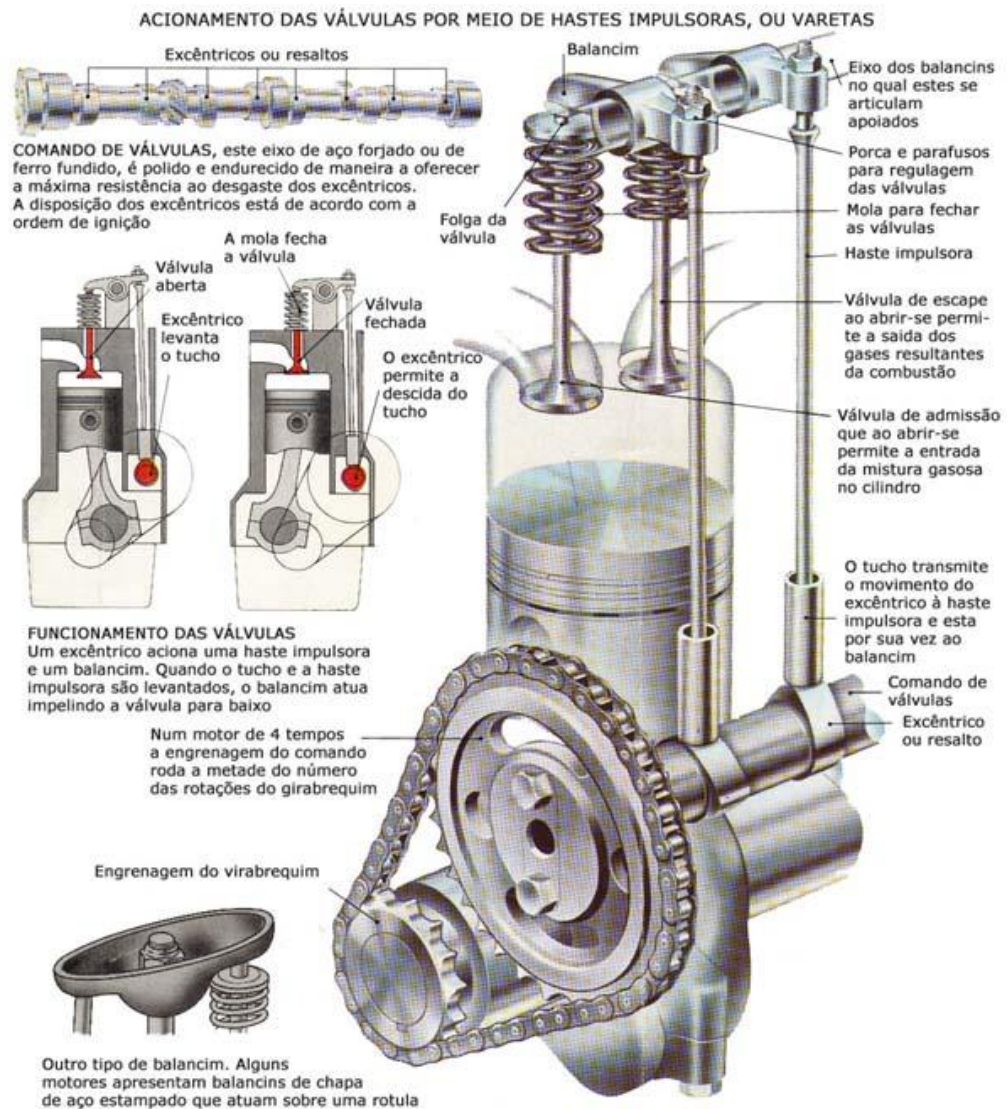
O volante é constituído por uma massa de ferro fundido e é fixado no virabrequim. Ele acumula a energia cinética, propiciando uma velocidade angular uniforme no eixo de transmissão do motor. O volante absorve energia durante o tempo útil de cada pistão (expansão devido à explosão do combustível), liberando-a nos outros tempos do ciclo (quando cada pistão não está no tempo de potência), concorrendo com isso para reduzir os efeitos de variação do tempo do motor.

Um motor é também constituído por dois tipos de válvulas: as de admissão e as de escape. Elas são acionadas por um sistema de comando de válvulas. O movimento do virabrequim é transmitido para o eixo de comando de válvulas por meio de engrenagens. O eixo de comando de válvulas liga-se por uma vareta ao eixo dos balancins. Este, por sua vez, é que acionará as válvulas.

A abertura e o fechamento das válvulas estão relacionadas com o movimento do pistão e com o ponto de injeção, de modo a possibilitar o perfeito funcionamento do motor.

As engrenagens da distribuição podem ter uma relação de 1:2, o que significa que cada rotação da árvore de manivelas corresponde a meia rotação da árvore de comando de válvulas.

Figura 15: Engrenagens da distribuição



Fonte: Costa (2001)

Por fim, mas não menos relevante, há as partes elementares do motor, que são os sistemas auxiliares indispensáveis ao seu funcionamento: sistema de alimentação de combustível, sistema de alimentação de ar, sistema de arrefecimento, sistema de lubrificação e sistema elétrico.

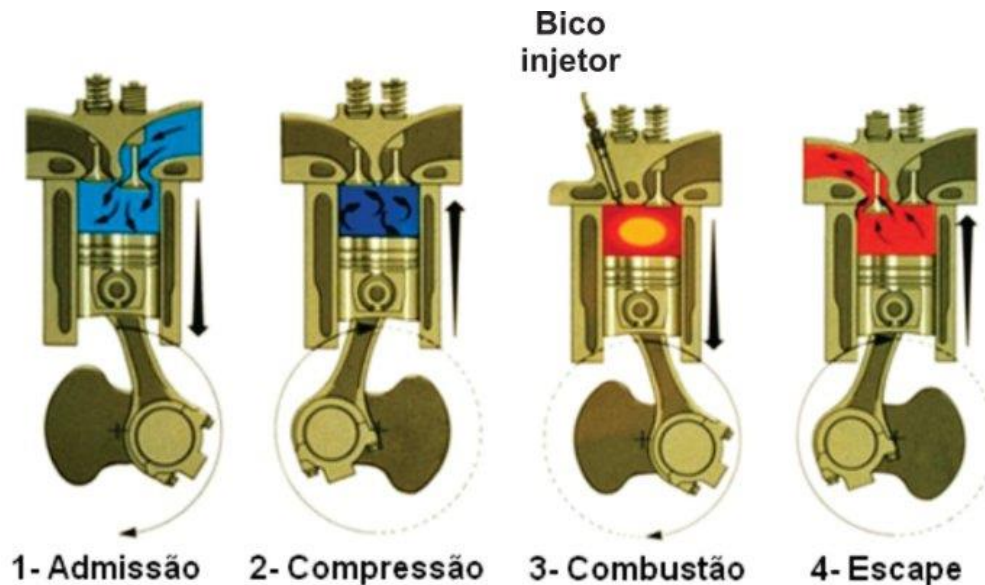
4.4 Ciclos dos motores térmicos

A palavra ciclo pode ser definida como o conjunto de transformações que se sucedem na mesma ordem e se repete com lei periódica. No caso do motor térmico, pode ser melhor entendido como a evolução da massa gasosa no interior do cilindro,

com variação de pressão, volume e temperatura. Tanto o motor *Otto*, quanto o *Diesel*, funcionam segundo os ciclos de dois e de quatro tempos.

Os motores de quatro tempos necessitam de duas voltas completas (720°) do eixo de manivelas, também chamado de Virabrequim, para a realização de um ciclo; isso equivale à quatro cursos do êmbolo. A figura abaixo mostra as fases do ciclo.

Figura 16: Fases do ciclo diesel



Fonte: Coutinho (2016)

1º Tempo- Admissão – A válvula de admissão se abre, movida pelo came do eixo comando de válvulas, e o pistão desce aspirando apenas ar, com o giro do Virabrequim completando seu primeiro 180° .

2º Tempo- Compressão – O pistão sobe dentro do cilindro, fazendo 360° do eixo Virabrequim, comprimindo apenas ar e o elevando a temperaturas próximas a 600° graus C.

3º Tempo- Combustão – Com a compressão o ar fica aquecido. Quando o pistão chega ao PMS (Ponto morto superior) uma quantidade de “Diesel” é injetada e inflama dentro da câmara, por encontrar o ar extremamente quente e a geração de força acontece com o deslocamento do pistão e do eixo Virabrequim em 540° .

4º Tempo- Escape – a válvula de escape se abre, em função do comando, o pistão sobe expulsando os gases de descarga no escapamento e conseqüentemente na atmosfera. O ciclo se completa com duas voltas 720° no eixo de Manivelas ou Virabrequim.

Em um motor de 2 tempos a admissão e o escape ocorrem ao mesmo tempo da compressão e expansão. A parede do cilindro de um motor de 2 tempos contém uma fileira de janelas de admissão de ar.

No 1º tempo, o pistão está em seu movimento descendente, e descobre as janelas de admissão, dando entrada ao ar, que está sendo empurrado por um soprador. O ar que entra expulsa os gases queimados, que sairão através da passagem aberta pelas válvulas de escape. O fluxo de ar em direção às válvulas de escape causa um efeito de limpeza, deixando o cilindro cheio de ar limpo, por isso, muitas vezes esse processo é chamado de “lavagem”.

No 2º tempo, o pistão está em seu movimento ascendente e cobre as janelas de admissão (fechando-as) ao mesmo tempo em que as válvulas de escape fecham-se. O ar limpo admitido é submetido à compressão.

Um pouco antes de o pistão alcançar sua posição mais alta, uma certa quantidade de óleo diesel é atomizada na câmara de combustível pela unidade injetora de combustível. O intenso calor, causado pela alta compressão do ar, inflama imediatamente o combustível atomizado no cilindro.

A pressão resultante força o pistão para baixo, no curso de expansão. As válvulas de escape vão se abrir quando o pistão estiver na metade do curso descendente, permitindo que os gases queimados saiam pelo coletor de escape.

Quando o pistão, em seu curso descendente, descobre as janelas de admissão, o cilindro é novamente “lavado” pelo ar limpo.

O ciclo completo de combustão é concluído em cada cilindro durante cada volta do virabrequim, ou em outras palavras, em 2 tempos.

4.5 Disposição dos cilindros de motores de combustão interna

Os motores de combustão interna podem também ser classificados de acordo com a disposição de seus cilindros.

São chamados de motores em linha aqueles em que os cilindros são dispostos verticalmente numa mesma linha.

Os motores em V são constituídos por dois blocos de cilindros em linha dispostos entre si segundo um determinado ângulo (45°, 60° ou 90°).

Motores radiais são aqueles em que os cilindros são dispostos radialmente a intervalos angulares iguais, em torno de um mesmo eixo de manivelas.

Motores de cilindros opostos são constituídos por dois ou mais cilindros dispostos em lados opostos a um mesmo eixo de manivelas sob um ângulo de 180°

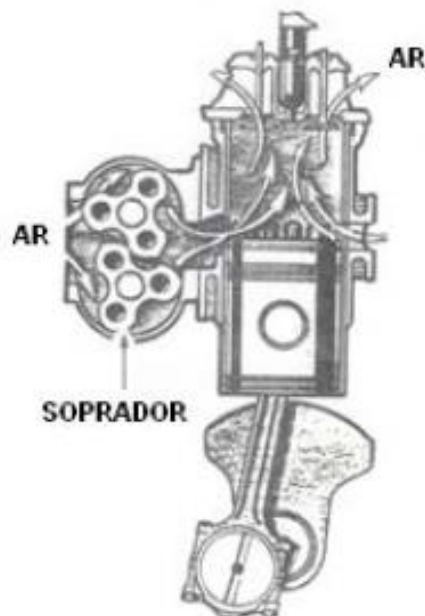
Motores de êmbolos opostos caracterizam-se por possuírem um só cilindro para cada dois êmbolos em oposição, sendo a câmara de combustão formada pelas faces dos dois êmbolos no final da compressão.

4.6 Motores superalimentados

A potência desenvolvida por motores a combustão interna pode ser aumentada com a elevação da pressão de admissão. Este fenômeno é obtido com aplicação da superalimentação. Este processo consiste em forçar o ar para o interior do cilindro, de modo que o peso da carga aumente. Os superalimentadores são de dois tipos: sopradores e turbinas.

O soprador é um dispositivo que tem por finalidade manter um fluxo de ar contínuo e forçado para o interior do cilindro. É acionado pelo próprio motor.

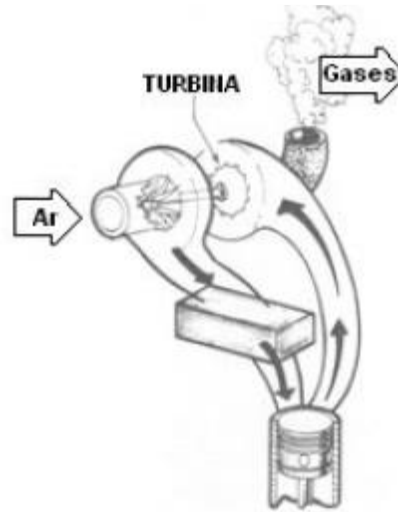
Figura 17: Soprador mecânico.



Fonte: Máquinas Missão (2018)

Já a turbina é um dispositivo composto de dois rotores, ligados entre si por um eixo. É acionado pela energia cinética dos gases queimados.

Figura 18: Turbina.



Fonte: Maquinas Missão (2018)

4.7 Comparativo entre Motores Diesel e Motores Otto

Desde que foram inventados, há mais de um século, os motores Diesel e Otto sempre dividiram espaços no campo das aplicações. Naturalmente, cada um deles com suas vantagens e desvantagens pode oferecer maior ou menor adequação a um determinado tipo de trabalho, levando-se em conta principalmente os fatores economia e praticidade.

As vantagens mais significativas do motor Diesel sobre o Otto são:

- O motor Diesel queima combustível mais barato;
- O combustível utilizado no Diesel é menos volátil e, portanto, oferece maior segurança no transporte e no armazenamento;
- O rendimento total do motor Diesel é maior, ultrapassando hoje os 40%;
- Menor número de peças;
- Não necessita de um sistema elétrico de ignição;
- Melhor adaptação e economia ao ciclo a dois tempos por fazer a lavagem apenas com ar;
- Maior durabilidade.

As principais desvantagens são:

- Necessita de maior robustez porque trabalha com pressões mais elevadas;
- Seu sistema de combustível é mais complexo;
- Funcionamento mais ruidoso;

- Partida mais difícil;
- Maior número de peças;
- Maior preço por unidade de potência.

De um modo geral podemos dizer que o motor Diesel é mais adequado às grandes potências, sendo amplamente utilizado na indústria naval. O motor Otto, por sua vez, é mais adequado às pequenas potências, sendo aderido à indústria automobilística.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste trabalho foi mostrar a origem histórica da termodinâmica, procurando relatar os conceitos, as técnicas e aplicações das descobertas científicas no campo da física, e o desenvolvimento social que facilitou a vida da humanidade, com ênfase na área da indústria naval, a qual acabou por se tornar uma máquina da pesquisa científica de grande transformação tecnológica, econômica e social.

Estudos realizados provaram que os trabalhos de muitos pesquisadores fizeram da termodinâmica uma ciência que alavancou a economia e o desenvolvimento industrial, tornando assim, a pesquisa uma grande contribuição à ciência que consideramos importante. Também relatamos o trabalho de cada cientista, e suas grandes descobertas e comprovações que foram se desenvolvendo até se tornarem teorias comprovadas, dando respostas aos vários comportamentos naturais que às vezes eram ignorados.

Todos os ramos da medicina têm se desenvolvido muito, mas o segmento que nos interessa é a saúde térmica humana e animal, onde observamos a importância do calor e da vida em seu estado de equilíbrio, preenchendo assim, mais uma lacuna que os estudos termodinâmicos têm trabalhado para expandir em todas as áreas afins.

Poucas invenções foram tão importantes para a história da humanidade como a máquina a vapor. Primeiro dispositivo capaz de transformar o calor em energia mecânica com eficiência suficiente para substituir a tração animal, e que pode ser considerada uma das grandes responsáveis pela Revolução Industrial no século XIX. As mercadorias passaram a ser transportadas com maior rapidez e facilidade, os novos navios transportavam cargas cada vez mais pesadas, a distâncias cada vez maiores, com um custo cada vez menor, o que dinamizou e mudou radicalmente a economia do mundo todo.

REFERÊNCIAS

ALUNOS ONLINE. **Lei zero Termodinamica**. Disponível em: <<http://alunosonline.uol.com.br/fisica/lei-zero-termodinamica.html>>. Acesso em 10 abr. 2018.

ANTOINE Lavoiser Defense Squad. Disponível em: <<https://lavoisierdefensesquad.tumblr.com/post/127213599633>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

ARAGÃO, Maria José. **História da física**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

ARTE FONTE DE CONHECIMENTO. Disponível em: <<http://artefontedeconhecimento.blogspot.com.br/2011/05/maurits-cornelis-escher-artista-grafico.html>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

AUTOMO WEB. **Conhecimentos básicos de motores**. Disponível em: <<http://www.automoweb.com/conhecimento-basico-de-motores>>. Acesso em: 05 mai. 2018.

BASSALO, José Maria F. **Crônicas da Física, Tomo 3**. Belém: Editora UFPA, 1992

COSTA, Paulo G. **Bíblia do Carro**, 2001. Disponível em: <<http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro/biblia.asp?status=visualizar&cod=5>> Acesso em: 05 mai. 2018.

COUTINHO, Marcos. **Funcionamento básico do motor diesel 4 tempos**, 2016. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/funcionamento-b%C3%A1sico-do-motor-diesel-4-tempos-marcos-coutinho>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

CURSO de termodinâmica: Primeira lei da termodinâmica. Disponível em: <https://pt.wikibooks.org/wiki/Curso_de_termodin%C3%A2mica/Primeira_lei_da_termodin%C3%A2mica> Acesso em: 22 mai. 2018.

INFO ESCOLA. **Máquinas térmicas**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/fisica/maquina-termica/>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

INFO MOTOR. **Principais Componentes do Motor a Combustão Interna Ciclo Otto**. Disponível em: <<http://www.infomotor.com.br/site/2009/01/principais-componentes-do-motor-a-combustao-interna-ciclo-otto>> Acesso em: 25 maio. 2018.

MANUTENÇÃO de Equipamentos Navais e Offshore. Disponível em:

<<http://www.manutencaooffshore.com.br>>. Acesso em: 20 outubro 2018.

MÁQUINAS MISSÃO. Disponível em: <<http://maquinasmissao.blogspot.com.br/>>.

Acesso em 12 mai. 2018.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **O que é um virabrequim.** Disponível em:

<<https://www.mecanicaindustrial.com.br/363-o-que-e-um-virabrequim>> Acesso em: 05 mai. 2018.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Motor de Combustão Interna Reversa.** Disponível em:

<<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/funcionamento-motor-combustao-interna.htm>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

OLIVEIRA, Mário J. de. **Contribuições de Nernst e Planck para a Terceira Lei da Termodinâmica.** Seminário de Física Estatística. Instituto de Física Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 29 nov. 2007

RONAN, Colin A. **História Ilustrada da Ciência.** Cambridge: Zahar, 1987.

SÓ FÍSICA. **Termodinâmica.** Disponível em:

<<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Termodinamica>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

TEC FOLHA. Disponível em: <<http://tecfolha.blogspot.com.br/2014/06/grandes-invencoes-tecnologicas-conheca.html>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

WIKIPEDIA. **Accademia del cemento.** Disponível em:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Accademia_del_Cemento>. Acesso em 10 abr. 2018.

WIKIPEDIA. **Ciclo de Carnot.** Disponível em:

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_Carnot>. Acesso em: 22 mai. 2018.

WIKIPEDIA. Disponível em:

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Equivalente_mec%C3%A2nico_do_calor>. Acesso em: 15 abr. 2018.

WIKIPEDIA. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_a_vapor>. Acesso em: 20 mai. 2018.

WIKIPEDIA. **Escalas Termométricas**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Escalas_termom%C3%A9tricas>. Acesso em: 10 abr. 2018.

WIKIPEDIA. **Máquina à vapor na Revolução Industrial**. Disponível em:

WIKIPEDIA. **Origem dos motores a combustão**. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Motor>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

WIKIPEDIA. **Termodinâmica**. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Termodin%C3%A2mica>>. Acesso em: 20 abril 2018.

WIKIPEDIA. **Termômetro de mercúrio**. Disponível em: <https://es.wikipedia.org/wiki/Term%C3%B3metro_de_mercurio>. Acesso em: 10 abr. 2018.

WM1. **Conheça as partes básicas de um motor**. Disponível em: <<https://wm1.com.br/graxa/conheca-partes-basicas-de-um-motor>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

WYGLEN, Van Sountag, F. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. Van Wyglen & Sountag - Tradução da ed. 4. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1995