



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

MÍRIAN CUSTÓDIO

UMA BREVE ABORDAGEM DAS MÁQUINAS TÉRMICAS

Campina Grande PB
2014

MÍRIAN CUSTÓDIO

UMA BREVE ABORDAGEM DAS MÁQUINAS TÉRMICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento à exigência para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Orientadora Morgana Lígia de Farias Freire

Campina Grande PB
2014

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

C987b Custódio, Mírian.
Uma breve abordagem das máquinas térmicas [manuscrito] /
Mírian Custódio. - 2014.
22 p.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 2014.

"Orientação: Profa. Dra. Morgana Lígia de Farias Freire,
Departamento de Física".

1. Termodinâmica. 2. Máquinas térmicas. 3. Física. I.
Título.

21. ed. CDD 536.7

MÍRIAN CUSTÓDIO
UMA BREVE ABORDAGEM DAS MÁQUINAS TÉRMICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento à exigência para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Aprovada em 28 /11 /2014



Prof.ª Dr.ª Morgana Lígia de Farias Freire / UEPB
Orientadora



Prof. Elialdo Andriola Machado / UEPB
Examinador



Prof. Jardél Lucena da Silva / UEPB
Examinador

UMA BREVE ABORDAGEM DAS MÁQUINAS TÉRMICAS

CUSTÓDIO Mírian,¹

RESUMO

A Termodinâmica Clássica é uma das poucas áreas bem consolidadas da Física. O desenvolvimento das máquinas térmicas coincidiu paralelamente com o desenvolvimento da primeira lei da termodinâmica, pois primeiro foram desenvolvidas as máquinas para depois vir sua teoria e aperfeiçoamento. O presente estudo apresenta algumas considerações do desenvolvimento das máquinas térmicas, bem como as leis que aprimoram o funcionamento e o rendimento dos motores.

PALAVRAS-CHAVE: Física. Termodinâmica. Máquinas térmicas.

1. INTRODUÇÃO

A Termodinâmica Clássica também denominada de Termodinâmica do Equilíbrio é uma das poucas áreas bem consolidadas da Física. Esta afirmação é devido à sintetização de uma estrutura de conhecimento bem definida e auto consistente (PÁDUA et al., 2008). O trabalho quantitativo de Joule que estabeleceu a equivalência da energia mecânica, elétrica e química com o calor provocou vários desenvolvimentos que:

[...] aconteceram numa sucessão relativamente rápida que começou em torno de 1850 com Clausius e prosseguiram com as contribuições importantes de Kelvin, Maxwell, Boltzmann, terminando com os brilhantes Gibbs e Planck no final do século (PÁDUA et al., 2008, p. 64).

A essência da estrutura teórica da Termodinâmica Clássica é um conjunto de leis naturais que governam o comportamento de sistemas físicos macroscópicos. As leis foram derivadas de generalizações de observações experimentais e são, em grande parte, independentes de quaisquer hipóteses relativas à natureza microscópica da matéria (PÁDUA et al., 2008, p. 64)

Heron, inventor grego, construiu um primeiro dispositivo funcional, precursor das máquinas térmicas atuais, no entanto, na qualidade de brinquedo destinado a espantar o vulgo. As máquinas térmicas usadas consumindo grandes quantidades de combustível, tendo um baixo rendimento (CIMBERIS, 1991). “Em meados de 1770, o inventor escocês James Watt criou um novo *modelo de máquina térmica de grandes vantagens em relação as que já existiam na época*” (SILVA, 2014, s/p).

Por ser mais econômica e com capacidade para realizar trabalhos muito maiores, a máquina de Watt foi empregada também nas indústrias (SILVA, 2014). Neste período já se discutia acerca da primeira lei da termodinâmica. Em 1824 Sadi Carnot (1796-1832) estuda do ponto de vista teórico a máquina a vapor (tentando aumentar a sua eficiência). Propõe a ideia de motor de combustão interna, analisa o ciclo do gás ideal e define trabalho termodinâmico. Por ser mais econômica e com capacidades para realizar trabalhos muito maiores, a máquina de Watt foi empregada também nas indústrias (NÓBREGA, 2009). O dispositivo criado por Watt foi utilizado tanto para movimentar moinhos e bombas, como também para mover locomotiva e barcos a vapor (SILVA, 2014).

¹ Graduanda em Licenciatura em Física. Universidade Estadual da Paraíba. mirian.custodio@hotmail.com

Somente no século XIII foram construídas máquinas térmicas capazes de produzir energia mecânica em escala industrial (SILVA, 2014). O desenvolvimento das máquinas térmicas se davam em paralelo com o aprimoramento de termômetros, escalas e os conceitos de calor e trabalho.

Em 1847, Helmholtz estabeleceu definitivamente a ideia do calor como uma forma de energia, sob o formato de um Princípio da Conservação da Energia, que atualmente denominamos de Primeira Lei da Termodinâmica. Entre 1846 a 1848 – Lord Kelvin, ao trabalhar no laboratório do químico francês Henri Victor Régnault (1810 – 1878) e estudar as obras de Carnot e de Clapeyron, propôs a adoção de uma escala absoluta de temperatura. 1850 – Clausius modificou o tratamento desenvolvido por Carnot, com o objetivo de descrever a irreversibilidade dos processos naturais. 1856 – Kelvin estabeleceu definitivamente a escala do gás ideal, chamada de escala absoluta de Kelvin ou escala termodinâmica de temperatura. 1865 – Clausius propôs uma formalização teórica para um ciclo reversível qualquer, construindo-o a partir de uma sucessão de ciclos de Carnot. Para isso, introduziu uma nova função de estado, que foi por ele denominada de entropia. Este termo tem origem na palavra grega ‘*entropé*’, que quer dizer mudança volta ou transformação (PÁDUA et al., 2008, NOBREGA, 2009; SILVA, 2014).

Máquinas térmicas são dispositivos capazes de transformar calor em trabalho mecânico. Trataremos aqui de um breve histórico sobre o desenvolvimento das máquinas térmicas, dos conceitos de calor e trabalho na termodinâmica como as duas leis utilizadas para se aprimorar o rendimento e o funcionamento das máquinas térmicas. O desenvolvimento de tais dispositivos foram fundamentais para o crescimento tecnológico e econômico da humanidade, a começar pela revolução industrial, seguindo com os meios de transporte e a produção de energia.

Dessa forma, nosso objetivo é apresentar de forma introdutória alguns tipos de dispositivos que temos e como estes realizam trabalho. Também apresentaremos a classificação dos motores e a maneira como cada motor realiza trabalho. Exploraremos os motores de combustão interna e maneira como os motores realizam trabalho, segundo o ciclo que opera e a comparação com os ciclos ideais. A comparação dos motores a gasolina e a diesel. Os ciclos de Carnot, Rankine, Otto, a Diesel e o de Brayton (Joule). E, o motor onde atua cada ciclo a maneira de combustão. Por fim trataremos dos refrigerados e as bombas de calor. Princípio de funcionamento para o refrigerador e o ciclo que melhor descreve seu rendimento.

Por isso, podemos dizer que nosso trabalho foi introdutório, pois delimitamos singelamente o objeto de estudo. E sua classificação quanto aos meios de investigação foi à pesquisa bibliográfica e quanto aos fins foi à investigação exploratória.

2. PRINCIPAIS TIPOLOGIAS DE ENGENHO PARA TRANSFORMAR CALOR EM TRABALHO

Os dispositivos foram tratados por este estudo como tipologias de engenho por se tratar dos principais tipos de mecanismos capazes de transformar calor em trabalho, ou seja, máquinas térmica, que do grego o nome *machene*, significa dispositivo engenhoso ou invenção (SANTOS, 2010).

A transformação completa de trabalho em calor é possível. Quando um automóvel freia, o trabalho que foi realizado para colocá-lo em movimento se transforma integralmente em calor pelo atrito nos freios e pelo atrito entre os pneus e a superfície da estrada por exemplo.

Já a de calor em trabalho, ou seja, a transformação inversa, nem sempre é possível. Essa transformação está sujeita a algumas condições: o segundo princípio da termodinâmica - que estabelece, basicamente, quais são essas limitações.

Em termos de máquinas térmicas tem-se que não é possível construir uma máquina térmica que transforme integralmente calor em trabalho. Pois, uma parte do calor que um sistema recebe deverá de ser jogado fora.

Um motor de um automóvel é considerado uma máquina térmica que troca calor com duas fontes a temperaturas diferentes. Recebe calor da fonte a alta temperatura, constituída pelo cilindro no qual ocorre à combustão da mistura ar-gasolina. Parte do calor é cedida ao ar (a fonte de calor com temperatura mais baixa), em que são despejados o gás de descarga e o calor do radiador. O restante da energia liberada pela combustão da gasolina serve para movimentar o automóvel. O calor arremessado para o ar atmosférico não é utilizado, tendo apenas o efeito de aquecer o ambiente. Por tais motivos, tem-se que o rendimento de uma máquina térmica é inferior a 100%. Na realidade, os rendimentos das máquinas térmicas estão situados muito abaixo desse limite. Em termos de valores de rendimento, tem-se: nas locomotivas a vapor o rendimento é em torno de 10%, nos motores a gasolina nunca ultrapassa 30% e nos motores Diesel, que estão entre as máquinas mais eficientes, o rendimento situa-se em torno de 40% (KNIGHT, 2009).

Transformar trabalho em calor é fácil. Tire duas pedras do oceano e as esfregue vigorosamente até as duas ficarem quentes. Trata-se de uma interação mecânica na qual o trabalho aumenta a energia térmica das pedras... A seguir, jogue-as de volta no oceano, onde retornarão às suas temperaturas iniciais à medida que a energia térmica for sendo transferida das pedras, ligeiramente mais quentes, para a água mais fria... A conversão de trabalho em calor em 100% eficiente, ou seja, toda a energia fornecida ao sistema como trabalho foi transformada em calor (KNIGHT, 2009, p. 569).

Dispositivo Ciclo G-L Fechado

Dispositivo ciclo G-L, onde circula gás e líquido, o líquido é comprimido e sofre variações de pressão e calor até chegar a vapor, este se expande produzindo trabalho sofre variações de pressão é condensado e volta a líquido novamente (SILVA, 2012).

Essa classe de dispositivo faz um fluido circular, aquecendo-o e vaporizando-o a alta pressão, expandindo-o e, então, resfriando-o e condensando-o, tudo feito de tal modo que possa gerar trabalho.

Tais equipamentos precisam tanto de caldeiras como de refrigerador-condensador; Grandes plantas de geração de energia elétrica, estacionárias, movidas a carvão, são desse tipo e usam água líquida e água em vapor como fluido de trabalho.



Figura 1: Esquema do dispositivo Ciclo G-L Fechado.

Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/1864109/>

Dispositivos de Único passe G-L, Ciclo Aberto

Esse tipo de máquina comprime, aquece e vaporiza um líquido, expande-o para realizar trabalho e, finalmente, rejeita-o como vapor a baixa pressão (LEVENSPIE, 2002; SILVA, 2012)



Figura 2: Esquema do dispositivo de único passe G-L, ciclo aberto.

Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/1864109/>

Como o fluido de trabalho é usado uma única vez e então rejeitado, esse tipo de dispositivo torna-se prático apenas quando o fluido utilizado for de baixo custo. Esse equipamento não tem resfriador-condensador, por isso é bem menor que o tipo I. Um exemplo desse tipo de dispositivo é a locomotiva a vapor (LEVENSPIE, 2002).

Dispositivos a Gás de um Único Passe, Ciclo Aberto.

O dispositivo a gás dispensa tanto a caldeira quanto o refrigerador-condensador. Ele gera o gás quente a alta pressão por meio de reações químicas – combustão.

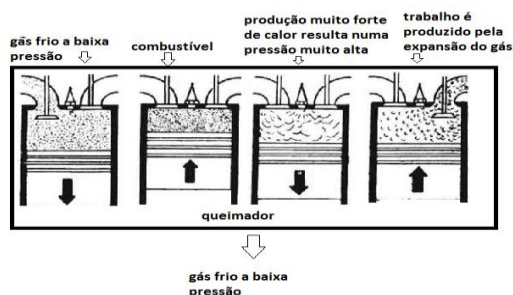


Figura 3: Diagrama de um dispositivo a gás.

Fonte: <http://amantesdofusca.blogspot.com.br/>

Existem muitas maneiras de realizar essa combustão: dentro de cilindros providos de pistões, turbinas e outros dispositivos. Esse tipo de máquina pode ser muito pequeno e compacto, mas exige que se utilize combustível líquido para gerar calor – gasolina, diesel, querosene de aviação. O automóvel, o motor a jato, o foguete são exemplos desses produtores de trabalho (SCHULZ, 2009a).

3. CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES

Motores 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 termomecânicos que envolvem expansão, compressão e mudança de temperatura de gases. São considerados motores de combustão interna aqueles que utilizam os próprios gases de combustão como fluido de trabalho. Ou seja, são estes gases que realizam os processos de compressão, aumento de temperatura (queima), expansão e finalmente exaustão.

Motores de combustão externa- ou motor Stirling este tipo de motor nos quais os processos de combustão ocorrem externamente ao motor, os gases de combustão transferem calor a um segundo fluido que opera como fluido de trabalho, como ocorre nos ciclos Rankine² foi inventado em 1816 pelo reverendo Robert Stirling, na Escócia, e apresentou na época, a vantagem de ser um motor mais seguro comparado com os motores a vapor utilizado até então, principalmente pelo menor nível de pressão utilizado pelo motor, teve um uso comum até os anos de 1920, quando os motores de combustão interna e os motores elétricos o tornaram redundante. O motor Otto foi inventado em 1877 e o motor diesel em 1893, e estes apresentavam maior potência comparado aos motores Stirling da época. Além disso, requeriam uma atenção especial em sua manufatura, que tinha uma tolerância mais estreita do que a requerida pelos motores de combustão interna. A combinação de um menor custo de manufatura e uma maior potência gerada pelos motores de combustão interna levaram ao desaparecimento comercial do motor Stirling. (SCHULZ, 2009b).

3.1 CICLO DE CARNOT

O ciclo de Carnot é o mais eficiente modo de produzir trabalho a partir do fluxo de calor proveniente de uma fonte de alta temperatura T1 para uma temperatura T2. Em geral a eficiência de produção de trabalho é definida como (ZEMANSKY, 1978; NUSSENZVEIG, 2002):

$$\eta = \frac{\text{trabalho realizado}}{\text{calor da fonte de alta temperatura}} = \frac{|W|}{|q_1|} = \frac{|q_2| - |q_1|}{|q_1|},$$

onde η é rendimento, W é o trabalho realizado, q_1 = calor ou energia térmica que entra no dispositivo e q_2 é o calor ou energia térmica que sai do dispositivo.

² Disponível em <http://vARIOSCARROS2011.xpg.uol.com.br/motor.htm> pesquisado no dia 18 de novembro de 2014 as 11:25 am.

Para o Ciclo de Carnot, a eficiência depende somente da temperatura da fonte de calor e da baixa temperatura do reservatório. Ou seja:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

onde η é o rendimento, T_1 é a temperatura da fonte quente, em Kelvin (K) e T_2 é a temperatura da fonte fria (K). O Ciclo de Carnot é representado pelo diagrama Temperatura x Entropia (T-s), de acordo com a Figura 4. O ciclo de Carnot pode ser bem aproximado pelo dispositivo a gás, mas não pelo dispositivo G-L

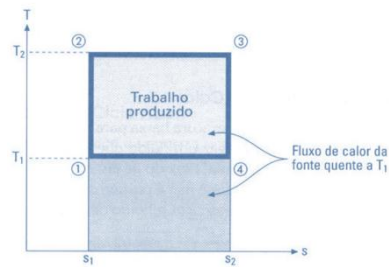


Figura 4: Ciclo de Carnot num diagrama $T - s$.

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Carnot_cycle#mediaviewer/File:Carnot_Cycle2.png

Ciclos G-L Práticos: O ciclo de Rankine.

Vamos tentar operar o Ciclo de Carnot com um fluido real (á gás /vapor). Absorver ou rejeitar calor em temperatura constante só pode ser feito na região de duas fases, como indica a Figura 5. Temos que: Passos 2→3: Absorve calor e os Passos 4→1: Rejeita calor.

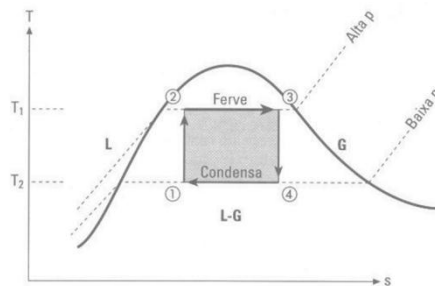


Figura 5: Diagrama $T \times S$, para o ciclo de Carnot.

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Carnot_cycle#mediaviewer/File:CarnotCycle1.png

Mas problemas como a cavitação e erosão de pás de turbinas torna impossível operar na região de duas fases. Então somos forçados a operar a etapa de produção de potência desses dispositivos na região de uma única fase de vapor. Isso é feito através do Ciclo de Rankine. Vamos olhar as diversas formas do Ciclo de Rankine. O caminho 1-2-3-4-5-6-1, da Figura 6 a seguir representa este ciclo de forma ideal.

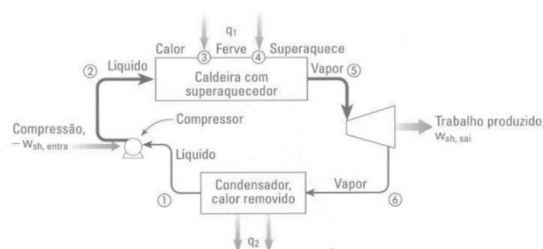


Figura 6: Esquema do dispositivo de único passe G-L fechado, ciclo seis tempos.
 Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/1864109/>

Desprezando as contribuições de energia potencial e cinética, a eficiência desse ciclo (tal como a de Carnot), é dada por:

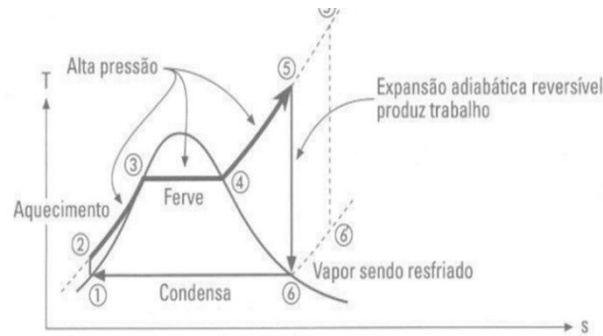


Figura 7: Diagrama Temperatura x Entropia (T x S) para o ciclo de Rankine
 Fonte: <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/pr4/htm/c17/p381.html>

Temos o rendimento do ciclo de Rankine, dado por:

$$\eta = \frac{|q_2| - |q_1|}{|q_1|} = \frac{(h_5 - h_2) - (h_6 - h_1)}{(h_5 - h_2)}$$

Como as entalpias $h_1 \approx h_2$ (para se comprimir um líquido bem pouco trabalhado é requerido) obtém-se,

$$\eta = \frac{(h_5 - h_6)}{(h_5 - h_1)}$$

onde η corresponde ao rendimento da máquina em (%), q_1 o calor (energia térmica que entra no dispositivo, q_2 o calor (energia térmica que sai do dispositivo e h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 e h_6 são valores de entalpia específica no diagrama T x S. Sendo a entalpia a quantidade de energia do processo.

3.2 CICLO OTTO

O motor comum à gasolina, de cilindro e pistão, completa um ciclo a cada quatro deslocamentos do pistão, por isso é chamado de motor de combustão interna de quatro tempos (ZEMANSKY, 1978; NUSSENZVEIG, 2002). Alguns motores pequenos de motocicletas, motosserras, ultraleves, etc. completam um ciclo a cada dois deslocamentos e, por tanto, são chamados de motores de dois tempos. Esses motores são analisados pelo Ciclo Otto. Para determinar a eficiência desse motor, considere um mol de um gás ideal de cv constante independente da temperatura. A Figura 8 apresenta o comportamento do gás em um ciclo.

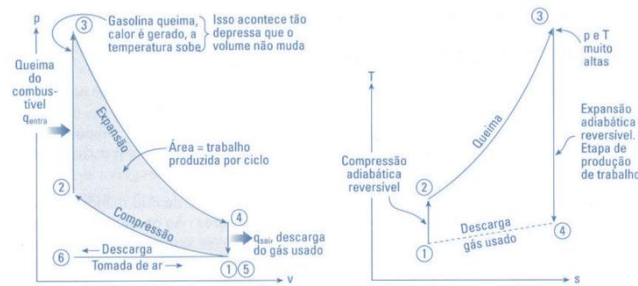


Figura 8: Diagrama P x V e diagrama T x S para o ciclo de Otton

Fonte: <http://www.aviacionulm.com/definicionytipos.html> e em <https://jasf1961.wordpress.com/tag/macroskopicas/>

Assim, Passo 1-2: Compressão adiabática reversível. Passo 2-3: $q = 0$, $|W_{entra}| = \Delta U_{21}$, $\Delta S = 0$, aquecimento a volume constante. Passo 3-4: Expansão adiabática a temperatura constante. Passos 4-5-6-1: $|q_{sai}| = C_v(T_4 - T_1)$, $W = 0$, $\Delta S < 0$, perda de calor a volume constante. Combinando todos esses termos, obtemos a eficiência do motor Otton, ou seja:

$$\eta = \frac{|q_{entra}| - |q_{sai}|}{|q_{entra}|} = \frac{C_v(T_3 - T_2) - C_v(T_4 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2)}$$

E, para um gás ideal, temos:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{K-1} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{K-1} = \frac{T_3}{T_4}$$

Portanto,

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - r_c^{1-k}$$

Onde $r_c = V_1/V_2 = V_4/V_3$ é a taxa de compressão. A eficiência de um motor a gasolina é determinada pela taxa de compressão. Quanto a maior a r_c maior será a eficiência. Esse é o motor padrão a gasolina ar. Os motores reais se aproximam desse ideal (ZEMANSKY, 1978).

Onde o coeficiente k é a relação entre o calor específico à pressão constante e o calor específico a volume constante: ($k = \frac{C_p}{C_v}$).

3.3 CICLO DIESEL

Nos motores, a mistura ar combustível é comprimida e inflamada praticamente de uma forma instantânea sob a ação de uma centelha. Desse modo, assume-se que a adição do calor é feita instantaneamente (ZEMANSKY, 1978). Nos motores a diesel o ar é comprimido sozinho, e só então, o combustível é introduzido, inflamado à medida que se mistura com o ar quente comprimido. Essa combustão é mais vagarosa do que nos motores de gasolina, de modo que o pistão se desloca durante a combustão.

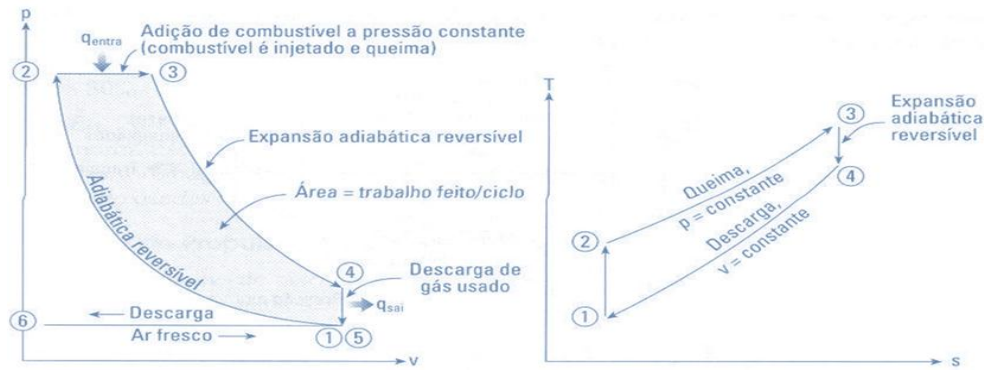


Figura 9: Diagrama P x V e diagrama T x S para o ciclo a diesel
Disponível: <http://www.alguimaraes.com.br/ciclo-diesel-e-otto.html#.VGs85SPF9qU>.

Vamos analisar a eficiência do motor diesel (ZEMANSKY, 1978). Para isso vamos definir duas relações: razão de compressão (r_c) e razão de expansão (r_e), dadas, respectivamente, por:

$$r_c = \frac{V_1}{V_2}$$

e

$$r_e = \frac{V_4}{V_3}$$

Então, com considerando o gás ideal, temos:

$$T_1 = T_2 \left[\frac{1}{r_c} \right]^{k-1} \quad \text{e} \quad T_4 = T_3 \left[\frac{1}{r_e} \right]^{k-1}.$$

Combinando a expressão acima com a expressão da eficiência, obtemos:

$$\eta = \frac{|W|}{|q_{entra}|} = \frac{|q_{23}| - |q_{41}|}{|q_{23}|} = \frac{c_p(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{k} \left[\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \right]$$

Ou seja:

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{\left(\frac{1}{r_e} \right)^k - \left(\frac{1}{r_c} \right)^k}{\frac{1}{r_e} - \frac{1}{r_c}}.$$

A Figura 10 compara os ciclos Otto e Diesel para as mesmas e diferentes taxas de compressão.

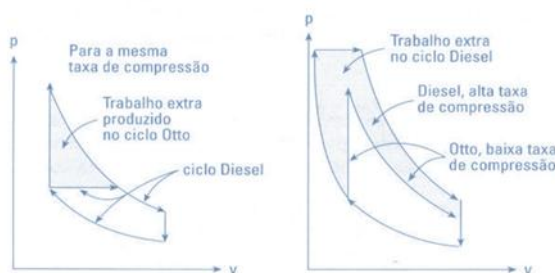


Figura 10: Diagramas P x V para os ciclos Otto e Diesel.

Fonte: <http://www.aviacionulm.com/definicionytipos.html>

O ciclo a Diesel tem combustão mais lenta e por esse motivo a energia é melhor aproveitada, a combustão é espontânea, ou seja, a compressão do ar com injeção de Diesel gera automaticamente a combustão, enquanto que nos motores do ciclo de Otto a queima acontece de forma mais rápida e para aproveitar melhor a energia do combustível o curso dos pistões são menores, gerando mais giros e pelas características diferentes do combustível são necessárias velas para produzirem faíscas e realizar a combustão.

Nos motores reais, os vários passos não são distintos como mostrado na Figura 10, porque os processos adiabáticos não realmente adiabáticos; ocorre atrito e assim por diante e que por esse motivo, as eficiências são menores que as fornecidas pelas equações anteriores.

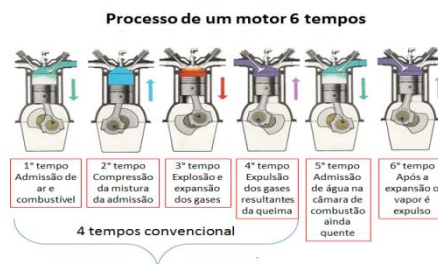


Figura 11: Detalhes do ciclo a Diesel.

Fonte: <http://fogonferro.blogspot.com.br/2013/05/o-motor-de-6-tempos.html>

3.4 TURBINA A GÁS: CICLO DE BRAYTON OU JOULE

Uma turbina numa instalação estacionária de produção de energia (ciclo de Rankine) é mais eficiente (em termo de atrito) que um motor de movimento alternativo. Por outro lado motores de combustão interna têm vantagens em relação aos que têm fonte de calor externa (motores menos complicados). Tenta-se com as turbinas de combustão combinar as vantagens dos dois tipos de motor. A Figura 12 apresenta esquematicamente os principais elementos de uma turbina de combustão (Turbina a gás – Ciclo de Brayton ou Joule). A Figura 13 apresenta os diagramas ideais P x V e T x S por mol de ar que passa por esse motor.

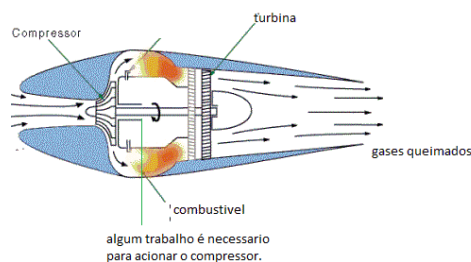


Figura 12: Esquema de uma turbina a gás
 Fonte: http://herdeirodaecio.blogspot.com.br/2010_07_01_archive.html

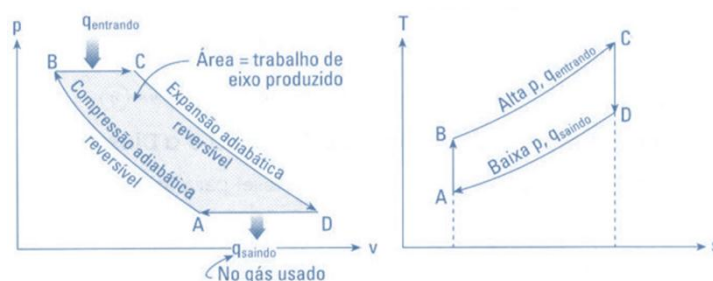


Figura 13: Diagramas ideais P x V e T x S por mol de ar de uma turbina a gás
 Fonte: <http://fogonferro.blogspot.com.br>

A eficiência desse motor é:

$$\eta = \frac{|W_{CD}| - |W_{AB}|}{|q_{AD}|} = \frac{|q_{BC}| - |q_{AD}|}{|q_{BC}|}$$

Para um gás ideal:

$$\eta = \frac{c_p (T_C - T_B) + c_p (T_A - T_D)}{c_p (T_C - T_B)}$$

E, para expansão e compressão reversíveis e adiabáticas, entre $P_B = P_C$ e $P_A = P_D$, temos:

$$\frac{T_B}{T_A} = \left[\frac{P_B}{P_A} \right]^{\frac{(k-1)}{k}} = \left[\frac{P_C}{P_D} \right]^{\frac{(k-1)}{k}} = \frac{T_C}{T_D}$$

Combinando as duas expressões dadas acima, obtemos:

$$\eta = 1 - \frac{T_A}{T_B} = 1 - \left[\frac{P_A}{P_B} \right]^{\frac{(k-1)}{k}}$$

A partir desta equação temos que, quanto maior a temperatura de combustão, mais eficiente será o motor. Essa temperatura é limitada pela resistência do material que são feitas as pás das turbinas. Pás de turbinas feitas de cerâmicas resistem a altas temperaturas e estão sendo usadas nas turbinas mais modernas.

Nos motores de propulsão a Jatos – Ciclos de Brayton e Joule, o trabalho de eixo de turbinas de combustão a gás é substituída pela energia cinética dos gases de saída. Existem vários tipos de motores a jato; discutiremos alguns a seguir.

Motores tubo-jato: Esses motores empregam turbinas a gás e usam a energia cinética dos gases de saída (Figura 14)³.

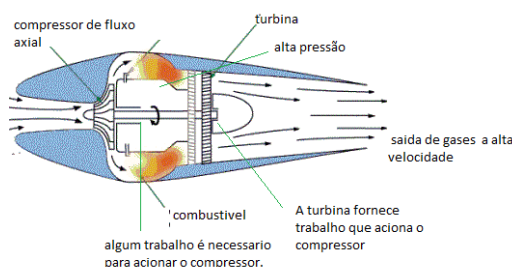


Figura 14: Turbina a gás

Fonte: http://herdeirodeaecio.blogspot.com.br/2010_07_01_archive.html

*Estoreatores*⁴: Se o ar entrar na turbina a uma velocidade bem alta, a pressão crescerá o suficiente para podermos dispensar tanto a turbina quanto o compressor. Esse motor oferece boa eficiência velocidades supersônicas, mas em outras condições ele não se mostra muito útil (Figura 15).

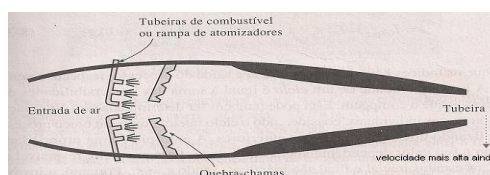


Figura 15: Turbina a gás de um moto supersônico

Fonte: <http://dc399.4shared.com/doc/hu4KkiA4/preview.html>

Vamos traçar rapidamente os conceitos usados para analisar esses motores a jato. Da terceira lei de Newton, a força de propulsão chamada de empuxo, é dada por:

$$F = \frac{(\dot{m}V)_{saindo} - (\dot{m}V)_{entrando}}{g}$$

Onde: \dot{m} é massa de gás do sistema, v é velocidade do ar que entra e que sai da turbina e g corresponde à aceleração da gravidade.

Desprezando a massa do combustível que passa pelo motor, pois ela é muito pequena à massa de ar com seu nitrogênio. Da primeira lei, temos:

$$F = \frac{\dot{m}_{ar}(\dot{m}V)_{saindo} - (\dot{m}V)_{entrando}}{g} = \frac{\dot{m}\Delta V}{g}$$

Onde: \dot{m} é fluxo de massa de gás do sistema (kg/s), \dot{m}_{ar} é fluxo de massa de ar (kg/s), que entra na turbina, V é velocidade de ar (m/s) que entra e que sai da turbina e g corresponde à aceleração da gravidade (m/s^2).

³ ALMEIDA et al. (2008)

⁴ Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_a_rea%C3%A7%C3%A3o

De onde obtemos que:

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{2} + q - W.$$

Onde: Δh é a variação de entalpia, ΔV é a variação da velocidade (m/s) do ar que entra e sai da turbina, q corresponde ao calor fornecido na turbina (J) e W trabalho realizado pelo sistema em (J).

Isso evidencia que a temperatura dos gases determina sua velocidade, ou seja:

$$F \propto (\sqrt{T_{\text{saindo}}} - \sqrt{T_{\text{entrando}}}).$$

O empuxo (F) é diretamente proporcional à temperatura (T) dos gases que entram e saem da turbina.

O significado dessa expressão é que, quanto maior a variação de entalpia Δh do combustível, maior será o empuxo do motor.

Motor de foguetes: Temos aqui um comportamento similar aos dos motores a jato, exceto que não há compressão (Figura 16) e o fluido de trabalho é levado pelo próprio foguete⁵.

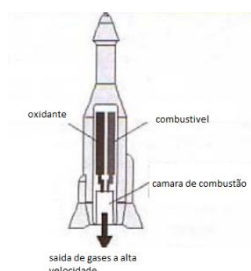


Figura 16: Esquema de um motor de foguetes.

Fonte: <http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/reacao-de-empuxo-como-os-foguetes-se-locomovem.htm>.

No motor de foguetes, como não há entrada de ar, façamos $V_1 = 0$ e obtemos que.

$$F = \frac{\dot{m}_{ar}(\dot{m}V)_{\text{saindo}} - (\dot{m}V)_{\text{entrando}}}{g} = \frac{\dot{m}\Delta V}{g}.$$

Ou seja,

$$F = \frac{\dot{m}_{ar}(\dot{m}V)_{\text{saindo}}V_{\text{saindo}}}{g}.$$

A medida importante da eficiência do motor de foguete é o impulso específico que no sistema internacional de unidades é o segundo (s).

Assim, a velocidade ou a temperatura dos gases de saída é tudo o que importa na determinação do impulso específico, da máxima potência, da eficiência e assim por diante.

⁵ Disponível em: <http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/reacao-de-empuxo-como-os-foguetes-se-locomovem.htm>

3.5 REFRIGERADORES E BOMBAS DE CALOR

Para bombear calor de uma temperatura baixa para uma temperatura ambiente não se pode usar água/vapor. Deve se empregar um fluido que evapore e condense a baixas temperaturas. Ex.: Dióxido de enxofre, amônia, ou mais recentemente os HFC⁶. A operação de um único passe não é prática com esses fluidos, de modo que é necessário o uso de dispositivos que não descarte o fluido de trabalho, mas que evapore e condense repetidas vezes.

Frigorífico ou geladeira é um utensílio eletrodoméstico utilizado na conservação de alimentos. Consiste em um armário metálico com prateleiras e gavetas e uma porta isolante, para manter o frio no interior do utensílio. O frio é produzido por um compressor, normalmente movido por um motor elétrico. Na maior parte dos casos, o frigorífico doméstico possui um compartimento para fabricar gelo e congelar produtos frescos, embora uma cozinha possa ter um destes eletrodomésticos e ainda um congelador separado.

O funcionamento de um frigorífico baseia-se na transferência do calor das zonas quentes para as zonas frias (ou menos quentes). A pressão é proporcional à temperatura. Ou seja, aumentando a pressão, aumenta-se a temperatura. A evaporação de um líquido retira calor. Fenómeno análogo à sensação de frescura sentida pela evaporação de álcool sobre a pele, ou pela transpiração. No interior de cada refrigerador existe uma serpentina oculta (evaporizador) onde circula um gás muito frio (-37 °C). O calor dos alimentos é transferido para este gás que vai aquecendo à medida que percorre a serpentina. Para transferir esse calor para o exterior usa-se um compressor que ao aumentar a pressão ao gás, aumenta-lhe a temperatura. Este gás aquecido segue para o condensador (a serpentina visível na parte traseira do frigorífico), onde troca calor com o ar exterior, arrefecendo o gás e condensando-o. O líquido refrigerador passa então por uma válvula de expansão ou garganta, que provoca um abaixamento brusco na pressão e conseqüente evaporação instantânea e auto arrefecimento. Este gás frio entra no frigorífico e completa-se o ciclo termodinâmico.

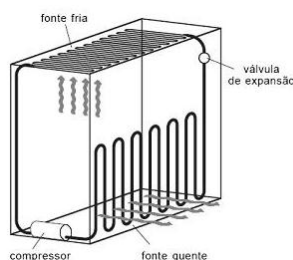


Figura 17: Esquema de uma serpentina de refrigerador.

Fonte: <http://www.projetofisica.blogspot.com.br/>

O funcionamento está baseado no princípio dos gases perfeitos (ou gás ideal) e na Lei de Boyle-Mariotte. Seguindo estas regras, se um gás for comprimido (aumentando sua pressão), o mesmo irá aquecer. O efeito contrário ocorre quando esta pressão diminui, isto é, o gás sofre uma queda de temperatura. A finalidade do compressor é basicamente esta, comprimir o gás para aquecê-lo e empurrá-lo para a serpentina onde ocorre a troca de calor. Quando chega à placa evaporadora, onde está a válvula de expansão, ocorre uma queda brusca da pressão, acompanhada também de uma queda na temperatura.

Alguns frigoríficos não utilizam energia elétrica, mas energia térmica, queimando querosene, diesel ou qualquer forma de geração de calor. Essas máquinas são extremamente silenciosas,

⁶ Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/~castro.silva/disciplinas/REFRIG/REFRIGERANTES.pdf>

pois não tem partes móveis além dos líquidos e gases que passam em seu interior. Muito comumente são utilizados em áreas onde energia elétrica não é facilmente disponível como trailers e regiões rurais ou em situações onde o barulho do compressor pudesse incomodar, como quartos de hospital ou hotéis de luxo. O ciclo termodinâmico nesses casos é chamado de Refrigeração por absorção. Essas máquinas são relativamente sensíveis à inclinação.

O princípio de funcionamento deste tipo de aparelho está relacionado à Lei de Dalton. Segundo a lei de Dalton, a pressão de uma mistura de gases e/ou vapores que não reagem quimicamente entre si é igual à soma das pressões parciais de cada, ou seja, das pressões que cada um teria se ocupasse isoladamente o mesmo volume, na mesma temperatura.

O ciclo por absorção usa amônia como gás refrigerante e hidrogênio e água como substâncias auxiliares. A pressão total é teoricamente a mesma em todos os pontos do circuito. O que muda são as pressões parciais. Em um trecho, a pressão parcial da amônia é menor que a do hidrogênio e o contrário em outro trecho. Assim, ambos os gases circulam pelo sistema. Tal diferença de pressões parciais é produzida pela água, que tem grande afinidade pela amônia e quase nenhuma pelo hidrogênio.

Em funcionamento, o vaporizador recebe solução concentrada de amônia em água. O vaporizador é aquecido por meio de uma chama alimentada por GLP ou querosene. Este aquecimento vaporiza a solução e a amônia, por ser mais volátil, é separada da água no separador. Assim, a água que sai do mesmo é uma solução diluída de amônia em água. O vapor de amônia é liquefeito no condensador e, ao sair, se mistura com hidrogênio. Portanto, a pressão da amônia diminui devido à presença de outro gás na mistura. A mistura de amônia e hidrogênio passa pelo evaporador, produzindo o resfriamento. Em seguida, se encontra com a água quase pura do separador e ambas passam pela serpentina do absorvedor. Conforme já dito, a água tem elevada afinidade com a amônia e quase não tem com o hidrogênio. Assim, na saída do absorvedor, a amônia está dissolvida na água e o hidrogênio está livre, retornando ao evaporador. A solução concentrada de amônia em água retorna ao vaporizador, reiniciando o ciclo. Como mostra na figura abaixo.

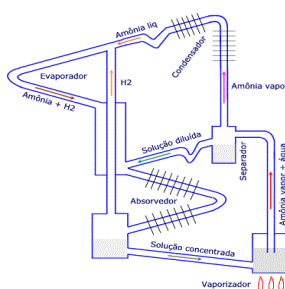


Figura 18: Esquema de uma serpentina de refrigerador.

Fonte: <http://portal.macamp.com.br/portal-conteudo.php?varId=19>

A existência de sifões nas saídas do condensador e do separador serve para impedir a passagem do hidrogênio. Portanto, no lado do condensador/separador, a pressão total é praticamente a pressão parcial da amônia. A diferença de pressões parciais entre as partes mantém o fluxo do ciclo enquanto houver aquecimento. A eficiência destes sifões, e o perfeito funcionamento deste tipo de equipamento estão diretamente relacionados a um bom nivelamento do mesmo no piso.

4. CONSIDERAÇÃO FINAIS

O desenvolvimento das máquinas térmicas foi muito importante para o desenvolvimento econômico e tecnológico da sociedade, suas leis e teorias nasceram da observação da natureza microscópica da matéria e aplicada à natureza macroscópica da matéria.

Cada tipo de motor opera melhor segundo o seu ciclo, não iguais dependendo do seu dispositivo GL. Sendo seus rendimentos baseados na primeira e segunda lei um da termodinâmica, além dos conceitos de entalpia e entropia.

Um motor é uma máquina térmica que transforma calor em trabalho e tem um rendimento menor que a máquina termina de (ciclo) Carnot.

Que este trabalho é importante por apresentar os principais ciclos de análise de motores, como os dispositivos nos quais estes ciclos operam que pode servi de objeto de estudos para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.; EYROSA, L; F.; FERREIRA, R. Motores turbo-jato: concepção, funcionamento e aplicação na aviação. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Tecnologia e Manutenção de Aeronaves. Faculdade de Ciências Aeronáuticas Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba, 2008.
- CIMBERIS, B. Carnot e a evolução das máquinas térmicas. Revista SBHC, n. 6, p. 39-45, 1991.
- KNIGHT, R. D. Termodinâmica. Ótica. Física: uma abordagem estratégica, v. 2, 2ª Edição. Bookman. São Paulo-SP, 2009.
- LEVENSPIE, O. Termodinâmica amistosa para engenheiros. Editora Blucher, 2002.
- NÓBREGA, M. L. Segunda lei da termodinâmica: os caminhos percorridos por William Thomson. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências. Universidade Federal da Bahia/Universidade Estadual de Feira de Santana, 2009.
- NUSSENZVEIG, H. Moysés. Curso de Física Básica. Vol. 2. 4ª edição rev. São Paulo 2002.
- PÁDUA, A. B. de; PÁDUA, C. G. de; SILVA J. L. C.; MARTINS, R. S.; POSTALI, F. B.; TIRITAN, L. A. C. Termodinâmica clássica ou termodinâmica do equilíbrio: aspectos conceituais básicos. Semina: Ciências Exatas e da Terra, Londrina, v. 29, n. 1, p. 57-84, 2008.
- SANTOS, P. do N. História da termodinâmica e sua evolução tecnológica. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Física de Ji-Paraná, Universidade Federal de Rondônia, Campus De Ji-Paraná. Curso de Licenciatura em Física, 2010.
- SCHULZ, D. Aprendizagem significativa de termodinâmica no ensino médio através de estudo de máquinas térmicas como tema motivador. UFRGS. 2009a. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/combustao_interna.htm,
- SCHULZ, D. Aprendizagem significativa de termodinâmica no ensino médio através de estudo de máquinas térmicas como tema motivador. UFRGS. 2009b. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_stirling.htm.
- SILVA, M. A. da. Máquina Térmica – A aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica, 2014. Disponível em: <http://www.brasilecola.com/fisica/maquina-termicaaplicacao-segunda-lei-termodinamica.htm>.
- SILVA, O. H. M da. Secretaria de Estado da Educação. Superintendência de Educação do Paraná. Departamento de Educação Básica. Coordenação de Ensino Médio. Equipe Disciplinar de Física, 2012.
- ZEMANSKY, Mark W. Calor e Termodinâmica. Editora Guanabara Dois S.A. Rio de Janeiro-RJ. 1978.

ABSTRACT

The Classical Thermodynamics is one of the few well established areas of physics. The development of thermal machines in parallel coincided with the development of the first law of thermodynamics, since it was first developed machines for later processing and to come his theory. This study presents some considerations of the development of thermal machines, as well as laws that improve the functioning and efficiency of the motors.

KEYWORDS: Physics. Thermodynamics. Thermal machines.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter chegado até aqui, a Jesus seu filho e meu Senhor, Ao Espírito Santo que quem me inspira em todos os meus caminhos e a Maria Santíssima minha mãe.

As minhas filhas Emanuelle, Anna Rafaele e Lara Mariana que são a minha razão de viver, por quem dedico meus dias vividos e meus trabalhos em geral.

A minha orientadora Morgana Ligia, que dedicou seu tempo a me ajudar nesse projeto e me fez com essa atitude chegar até o presente momento especial com relação aos estudos, meu carinho e admiração.

Aos meus pais Manoel e Carmelita (**in memoria**), pela vida e no incentivo aos estudos, minha mãe em especial, pois mesmo doente viu minha vontade de estudar e antes mesmo de falecer deixou tudo preparado para que eu pudesse estudar no ano seguinte.

A minha irmã Elizabeth que me educou e cuidou de mim, sendo mãe, após o falecimento de minha mãe, a mesma também se responsabilizou pela minha filha Lara para que eu pudesse pagar algumas cadeiras, amo demais, minha segunda mãe.

Aos professores em geral do curso, não vou citar nomes, pois foram importantes todos com quem paguei cadeiras e até outros que não paguei cadeira com eles, mas ajudaram de alguma forma.

A João da coordenação pelas vezes que vim fazer matrícula, pedi informação diversas e te pelas conversas, quando passamos pela coordenação, é importante a cordialidade como fui tratada durante todo este tempo de curso.

Aos meus amigos de sala, alguns que merecem destaque por incentivo ao longo dos anos, como Deusalete Câmara, Járdel Lucena que tenho o prazer do mesmo esta em minha banca, Daniel Soares e Tatiane Santos com quem respondi tantas listas de exercício, aos que me forneceram xerox de listas e de texto essencial para pagar algumas disciplinas.

A Elialdo Andriola e Jardél Lucena por terem aceitado o convite de fazerem parte minha banca, pessoas que admiro demais, Elialdo pela pessoa de grande coração, ótimo professor, incentivador e Járdel que me ajudou muito durante o curso.

E a todos que de alguma forma contribuíram para este momento fosse possível.