

Ciclos

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
2PFG/DE/FEM/UNICAMP

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 1

Ciclos motores

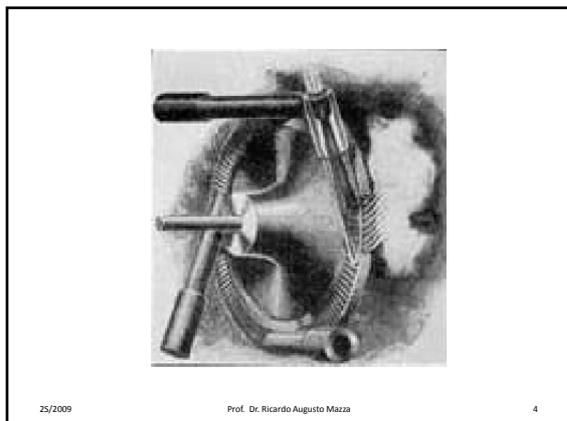
- Os ciclos motores são subdivididos em:
– *Ciclos motores a vapor e padrão ar;*
- O ciclo motor a vapor é o mais antigo que já se pensou, sendo idealizado em 150 a.C - chamado "**Aeolipile**";
- Em 1500, Leonardo da Vinci adaptou um sistema de hélice que girava com o fluxo dos gases quentes em uma **chaminé**;
- No final do século XIX, Gustav De Laval (Suécia) e Charles Parsons (Inglaterra) desenvolveram as turbinas a vapor, praticamente com os mesmos princípios das que são construídas hoje;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 2

Turbina de De Laval (1883)

- Sua característica mais importante é a utilização de um bocal convergente-divergente, que produz uma alta aceleração no vapor;
- Saindo do bocal, o vapor bate nas palhetas alocadas no contorno de um disco;
- A transformação de energia térmica para energia cinética acontece no bocal e posteriormente, a transformação para energia mecânica acontece no momento em que o vapor bate nas palhetas, mudando a direção de escoamento e impulsionando o rotor;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 3



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

4

Ciclo Rankine

- É o ciclo de motor considerado ideal e consiste de quatro processos termodinâmicos distintos:
 - **processo de expansão (3-4):**
 - esse processo é considerado como sendo adiabático e reversível;
 - o fluido de trabalho se encontra na região de saturação e apresenta parte da massa na fase líquida e parte na de vapor;
 - **processo de rejeição de calor (4-1):**
 - esse processo é necessário porque não é recomendável que a bomba receba uma mistura líquido mais vapor
 - **processo compressão (1-2):**
 - esse processo é considerado adiabático e reversível ;
 - **recebimento de calor (2-3):**
 - esse processo ocorre a a pressão constante.

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

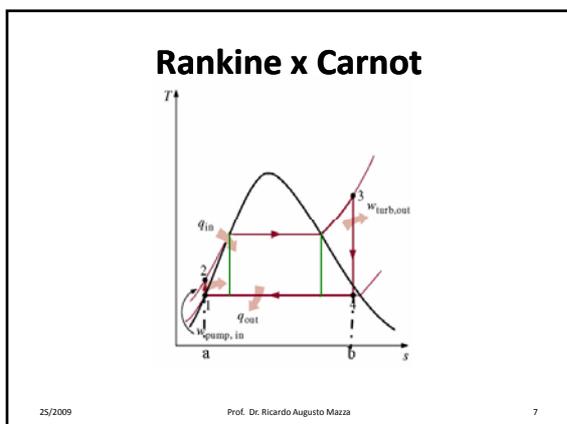
5

$$\eta_t = \frac{w_{liq}}{q_H} = \frac{\text{área } 1-2-3-4}{\text{área } a-1-2-3-4-b}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

6



- ### Parâmetros que influenciam o ciclo de Rankine
- **Temperatura**
 - *Condensação*
 - Por ser saturação, está associada a pressão
 - *Aquecimento do vapor*
 - **Pressão**
 - *Vaporização*
- 25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 8

- ### Efeito da pressão e temperatura
- A temperatura e pressão de recebimento e rejeição de calor afetam o rendimento do ciclo;
 - Como nesses processos ocorre mudança de fase, não se pode alterar a pressão sem alterar a temperatura e vice-versa;
 - A influência da temperatura e da pressão pode ser determinada facilmente analisando-se o diagrama T-s do ciclo de Rankine;
 - A influência da temperatura e da pressão no rendimento então pode ser determinada pelas nova relação de áreas.
- 25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 9

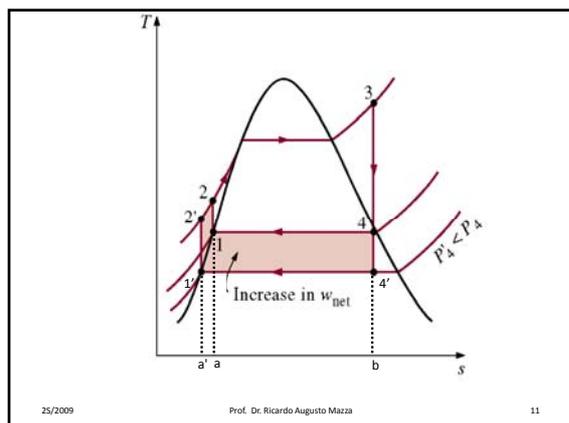
Influência da pressão de condensação ($P_{4,1}$)

- A pressão caindo de P_4 para $P_{4'}$ há uma diminuição da temperatura na qual o calor é rejeitado;
- O trabalho líquido e o calor fornecido aumenta;
- Como a área do aumento do calor é muito menor que a do trabalho líquido, há um aumento no rendimento;
- Essa diminuição de pressão tem limites como:
 - não fazer com que haja mais 10% de teor de umidade na saída da turbina;
 - não pode ser menor que a pressão de saturação na temperatura do meio;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

10



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

11

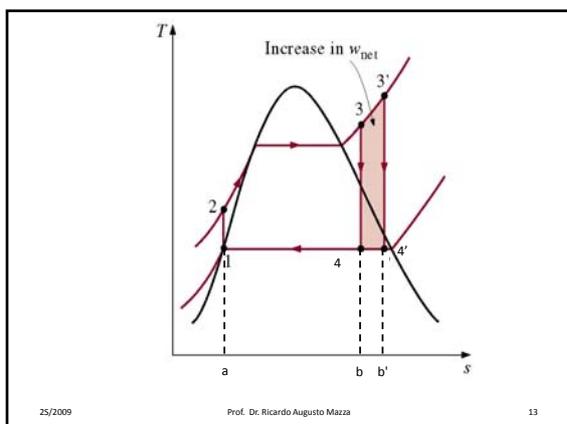
Influência da temperatura de aquecimento do vapor (T_3)

- O trabalho e o calor transmitido na caldeira aumenta;
- Como a temperatura média em que o calor é adicionado aumenta há um aumento da eficiência;
- Com o aumento da temperatura também há um aumento do título do vapor na saída da turbina;
- A temperatura no qual o vapor pode ser superaquecido é limitada por questões metalúrgicas em cerca de 620°C;

25/2009

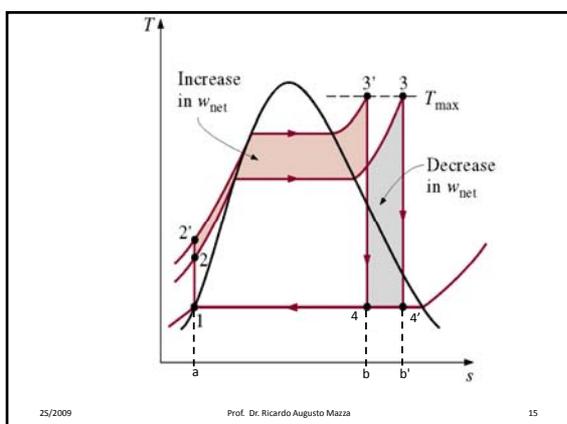
Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

12



Influência da pressão de vaporização ($P_{2,3}$)

- Nas análises será mantida constante a temperatura máxima do vapor e a pressão de saída da turbina;
- Para esse caso, o calor rejeitado diminui da área 4-4'-b-b';
- O trabalho líquido tende a permanecer o mesmo (área 2-2'-3'-4'-3-4) e o calor rejeitado diminui, portanto há um aumento do rendimento
- A temperatura média na qual o calor é fornecido também aumenta com o aumento da pressão;
- O título do vapor que deixa a turbina diminui quando a pressão máxima aumenta;



Resumindo

- **Pode-se dizer que o rendimento de um ciclo de Rankine aumenta:**
 - *Pelo abaixamento da pressão de saída da turbina;*
 - *Pelo aumento da pressão no fornecimento de calor;*
 - *Pelo superaquecimento do vapor;*
- **O título do vapor que deixa a turbina:**
 - *Aumenta pelo superaquecimento do vapor;*
 - *Diminui pelo abaixamento da pressão na saída da turbina e pelo aumento da pressão no fornecimento de calor.*

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

16

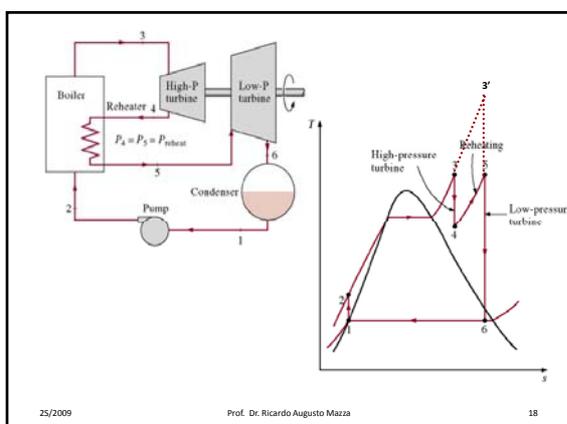
Ciclo de Rankine com reaquecimento

- **O aumento da pressão no processo de fornecimento de calor aumenta o rendimento do ciclo de Rankine, mas provoca o aumento do teor de umidade do vapor nos estágios de baixa pressão da turbina;**
- **Para evitar esse problema desenvolveu-se o ciclo com reaquecimento;**
- **Nesse ciclo o vapor expande na até turbina uma pressão intermediária e depois volta para a caldeira;**
- **Após o reaquecimento, o vapor expande-se totalmente na turbina até a pressão de saída;**

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

17



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

18

Vantagem do ciclo com reaquecimento

- Há um pequeno ganho de rendimento neste ciclo uma vez que a temperatura média, no qual o calor é fornecido, não é alterada significativamente;
- Há uma diminuição do teor de umidade no estágio de baixa pressão da turbina, levando-o a um valor seguro;
 - *Pode-se observar também que se existisse materiais que possibilitassem um superaquecimento do vapor até 3', o ciclo de Rankine simples seria mais eficiente que o ciclo com reaquecimento e não haveria necessidade do ciclo com reaquecimento.*

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

19

Ciclo regenerativo

- É caracterizada pelo pré-aquecimento do condensado antes de entrar na caldeira;
 - *A temperatura média no qual o fluido recebe calor aumenta e a eficiência do ciclo também;*
- Há duas formas distintas de se fazer esse pré-aquecimento:
 - *A água após sair da bomba circula pela carcaça da turbina, no sentido contrário à corrente de vapor:*
 - *Esse é o ciclo regenerativo tido como ideal;*
 - *Aquecimento tipo "flash" pela extração de uma fração do vapor que expande na turbina:*
 - *Esse é o ciclo regenerativo factível;*

25/2009

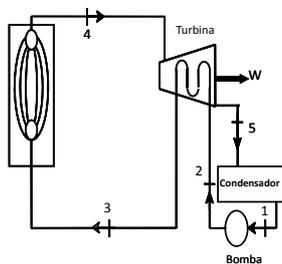
Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

20

• Ciclo regenerativo ideal

– **Esse ciclo não é prático pois:**

- É impossível de se efetuar a troca de calor necessária do vapor à água líquida de alimentação;
- O teor de umidade do vapor que deixa a turbina aumenta consideravelmente em consequência da troca de calor;



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

21

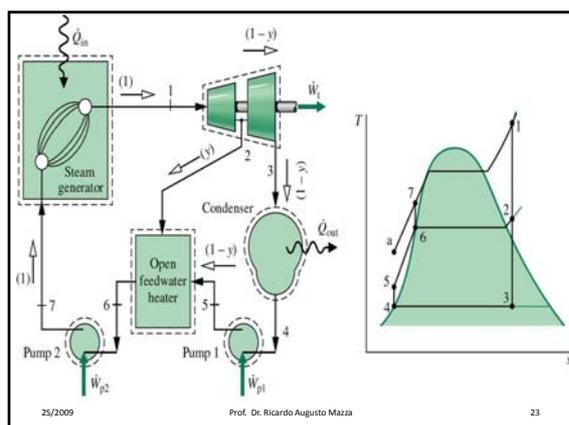
Ciclo regenerativo factível

- Uma parte do vapor é extraída e entra no aquecedor da água de alimentação;
 - *Só é extraído vapor suficiente para que o líquido esteja saturado na entrada da bomba da caldeira;*
- O condensado é bombeado até a pressão intermediária e entra no aquecedor de mistura onde encontra o vapor extraído da turbina;
- O ponto significativo é o aumento da temperatura média na qual o calor é fornecido, o que acarreta no aumento da eficiência do ciclo.

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

22



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

23

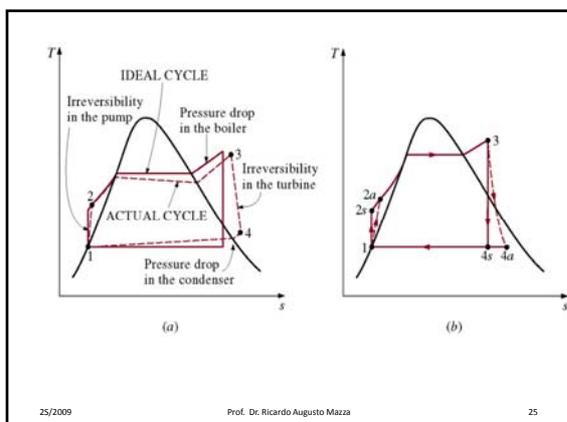
Afastamento dos ciclos reais

- Antes de encerrar o assunto de ciclo motores a vapor, deve-se fazer alguns comentários sobre as formas pelas quais um ciclo real se afasta do ciclo ideal;
- Aqui não serão consideradas as perdas associadas ao processo de combustão;
- As perdas neste ciclo motor ocorrem principalmente:
 - nas tubulações;
 - na turbina;
 - na bomba;
 - no condensador.

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

24



Perdas nas tubulações

- A perda de carga devido aos efeitos de atrito e a transferência de calor ao meio envolvente são as perdas na tubulação mais importantes;
- Tanto a perda de carga como a troca de calor provoca uma diminuição da disponibilidade energética do vapor que entra na turbina;
- Uma perda semelhante ocorre na caldeira e, devido a essa perda, a água que entra na caldeira deve ser bombeada até uma pressão mais elevada do que a pressão desejada do vapor que deixa a caldeira e isto requer trabalho adicional de bombeamento;

Perdas na turbina

- São principalmente as associadas com o escoamento do fluido de trabalho através da turbina;
- A transferência de calor para o meio também representa uma perda, porém esta perda é secundária;
- Essas perdas são estimadas pela eficiência da turbina, definida como:

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{w_t}{h_3 - h_{4s}}$$

Perdas na bomba

- As perdas na bomba são análogas àquelas da turbina e decorrem principalmente da irreversibilidade associada com o escoamento do fluido;
- A troca de calor usualmente é uma perda secundária;
- A eficiência da bomba é definida como sendo:

$$\eta_{\text{bom}} = \frac{h_{2s} - h_1}{w_b}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

28

Perdas no condensador

- As perdas no condensador são relativamente pequenas;
- Uma das perdas é o resfriamento abaixo da temperatura de saturação do líquido que deixa o condensador;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

29

Exemplo

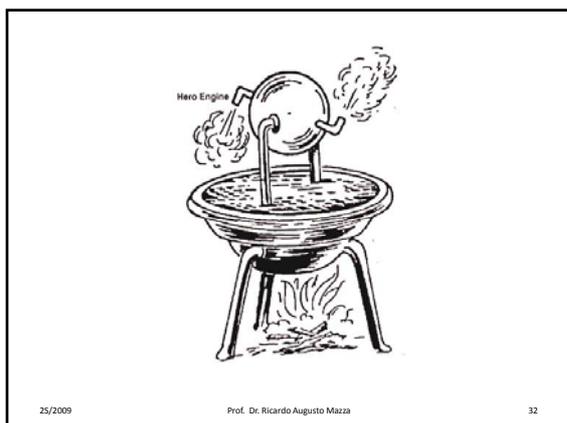
- A caldeira de um ciclo de potência a vapor opera sobre o ciclo de Rankine ideal. Sabendo que o vapor sai da caldeira a 4 MPa e 500C e a temperatura na seção de descarga da turbina é de 45C, calcule:
 - A potência gerada na turbina (específica);
 - O calor trocado na caldeira e no condensador (específico);
 - A eficiência do ciclo;
 - Calcule a eficiência do ciclo considerando um rendimento isentrópico na turbina de 85%;

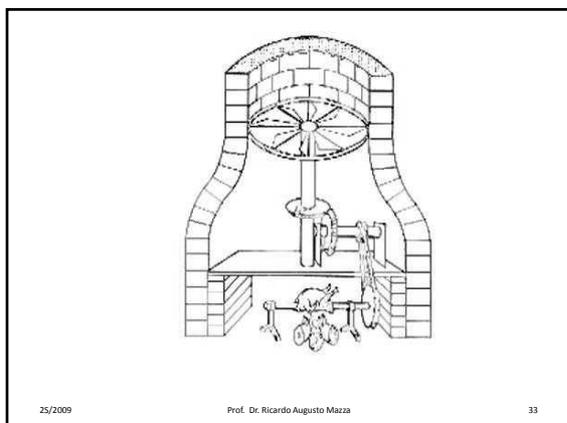
25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

30







Ciclo Padrão Ar

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
2PFG/DE/FEM/UNICAMP

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

34

Características

- **Massa fixa de ar;**
 - *Não há processo de entrada ou saída;*
 - *Ar é sempre um gás perfeito;*
- **O processo de combustão é substituído por um processo de transferência de calor;**
- **O calor é perdido com a transferência de calor ao meio envolvente;**
 - *Em contraste com o processo de saída e entrada;*
- **Todos os processos são internamente reversíveis;**
 - *Usualmente é feita uma hipótese adicional de que o ar tem calor específico constante.*

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

35

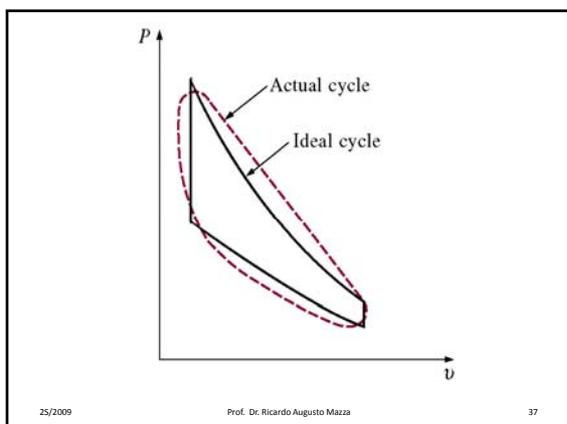
Análise dos ciclos padrão ar

- **Permitir examinar qualitativamente a influência de várias variáveis no desempenho;**
 - *Os resultados obtidos do ciclo padrão a ar diferirão consideravelmente daqueles do motor real;*
- **Os resultados obtidos com essa análise são:**
 - *Rendimento;*
 - *Pressão média efetiva;*
 - *É definida como a pressão que, ao agir no pistão durante todo o curso do motor, realiza uma quantidade de trabalho igual ao realmente efetuado sobre o pistão;*
 - *O trabalho em um ciclo é determinado pela multiplicação da pressão média efetiva pela área do pistão*

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

36



Ciclo Aberto x Fechado

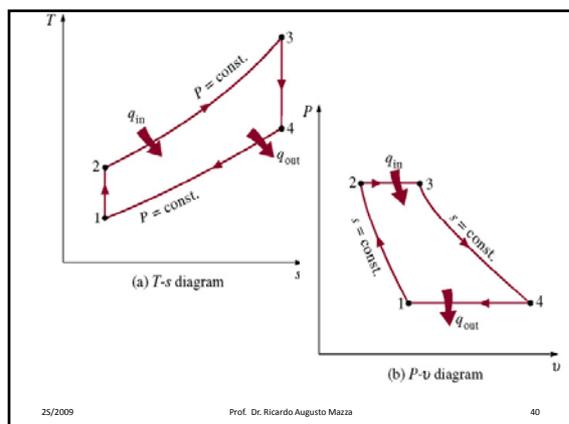
- O ciclo de trabalho do fluido de trabalho (mistura ar-combustível) de um MCI não é um ciclo termodinâmico completo;
 - O motor opera sob um ciclo mecânico;
 - Ciclo aberto;
 - A mistura ar-combustível, uma vez queimada, é expulsa para a atmosfera;
- Para a análise dos motores de combustão interna é vantajoso conceber ciclos fechados que se aproximem dos abertos.

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 38

Ciclo Brayton

- É parecido com o Rankine, mas não há mudança de fase do fluido de trabalho;
 - O fluido sempre se encontra na fase de vapor superaquecido
- É o ciclo ideal para turbina a gás simples;
- Pode funcionar como um ciclo **aberto** ou **fechado**;
 - Ciclo aberto o processo de combustão é interno;
 - Ciclo fechado o processo de combustão é externo;
- Como no ciclo de Rankine, o ciclo Brayton pode ser representado em diagramas de transformação de fase;
 - Usualmente são utilizados dois diagramas, o T-s e o P-v

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 39



Eficiência do Ciclo de Brayton

- Como um motor térmico, a eficiência do ciclo pode ser escrita como:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

- Como os processos 1-2 e 3-4 são processos isentrópicos, pode-se escrever que:

$$\frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 41

Eficiência do Ciclo de Brayton

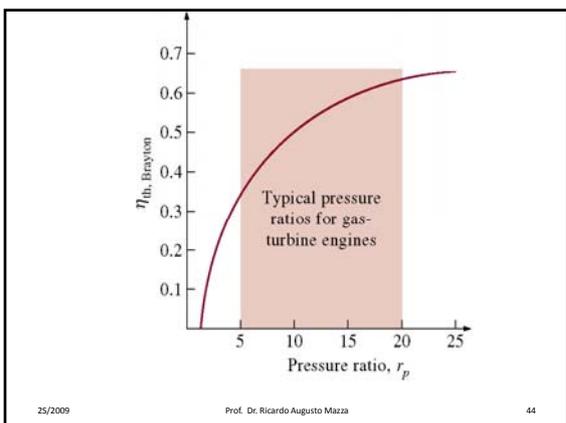
$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \text{ e } \eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(p_1/p_2)^{(k-1)/k}}$$

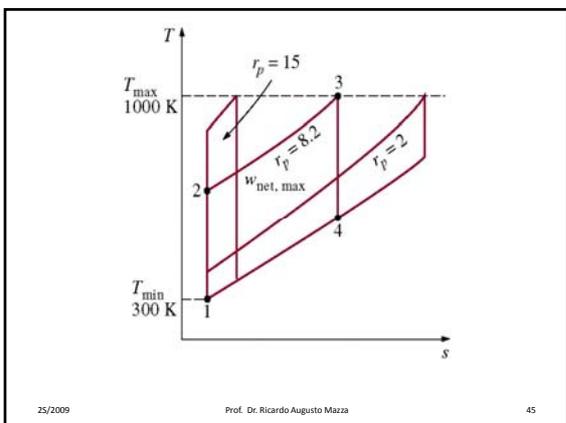
25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 42

Observações sobre o rendimentos

- **Pode-se notar que o rendimento depende somente da relação de compressão;**
 - *Quanto maior a relação de compressão (r_p), maior será o rendimento;*
- **Quanto maior o p_3 , maior será T_3 ;**
 - *T_3 será limitada por questões metalúrgicas*
- **Fixando T_3 e aumentando r_p , também haverá um aumento de rendimento;**
 - *Há uma mudança do trabalho por quilograma de fluido que escoa no equipamento*

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 43





Ciclo real

- Uma turbina real difere da ideal devido às irreversibilidades no compressor e na turbina
 - *Oriundas das perdas de carga na passagem do fluido e na câmara de combustão;*
- As eficiências do compressor e da turbina são definidas de forma similar ao do ciclo de Rankine:

$$\eta_{\text{comp}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad \eta_{\text{turb}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

46

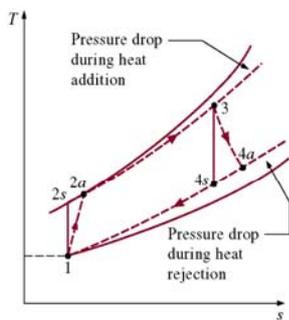
Observações

- Outra características importante do ciclo é que o compressor utiliza de 40 a 80% da potência desenvolvida na turbina;
 - *A eficiência do sistema cai muito com a diminuição da eficiência do compressor e da turbina.*

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

47



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

48

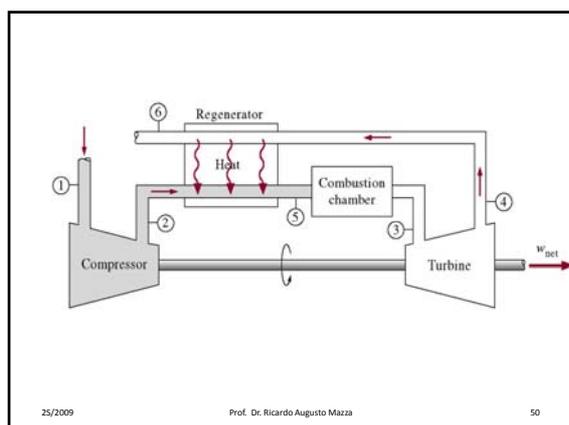
Ciclo com regenerador

- Tem o objetivo de aumentar a eficiência do ciclo;
- O regenerador aproveita os gases quentes da saída da turbina para aquecer os gases a alta pressão na saída do compressor;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

49



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

50

Eficiência do ciclo com regenerador

- Nesse caso, a eficiência do ciclo pode ser escrita como:

$$\eta_t = \frac{W_{liq}}{q_H} = \frac{W_t - |W_c|}{q_H} \text{ onde } q_H = c_p (T_3 - T_5) \text{ e } w_t = c_p (T_3 - T_4)$$

- Para o regenerador ideal, $T_4 = T_5$ e $q_H = w_t$.

Desta forma:

$$\eta_t = 1 - \frac{|w_c|}{w_t} = 1 - \frac{c_p (T_2 - T_1)}{c_p (T_3 - T_1)} = 1 - \frac{T_1 (T_2/T_1 - 1)}{T_3 (1 - T_1/T_3)} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \frac{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} - 1}{1 - (T_3/T_1)^{(k-1)/k}}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_3} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

51

Eficiência do regenerador

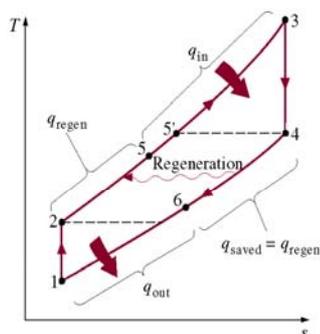
- No regenerador, haveria apenas uma diferença infinitesimal de temperatura entre as duas correntes;
- Com isso o gás a alta pressão entraria na câmara de combustão com $T_5 = T_4$;
- Para um regenerador real, o gás entra na câmara de combustão a T_5 ;
- Desta forma, a eficiência do regenerador será;

$$\eta_{\text{regenerador}} = \frac{h_5 - h_2}{h_{5'} - h_2}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

52



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

53

Ciclo padrão ar de Otto

- É o ciclo ideal que se aproxima do ciclo do MCI com ignição por centelha (gasolina, álcool e gás natural);

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

54

Processos

- **Compressão isentrópica do ar (processo 1-2):**
 - *O pistão se move, do ponto morto inferior ao superior;*
- **Fornecimento de calor a volume constante (processo 2-3):**
 - *O pistão está momentaneamente em repouso;*
 - **No ponto morto superior;**
 - *Esse processo corresponde à ignição da mistura combustível-ar pela centelha, e a queima subsequente em um motor real;*
- **O processo expansão isentrópica (processo 3-4);**
- **Processo de rejeição de calor (processo 4-1):**
 - *Ocorre enquanto o pistão está no ponto morto inferior*

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 55

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 56

Motor de combustão interna de dois tempos

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 57

Rendimento do ciclo Otto

- Determina-se o rendimento térmico deste ciclo, admitindo-se constante o calor específico do ar, como:

$$\eta_t = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{mc_v(T_3 - T_2)}{mc_v(T_4 - T_1)} = 1 - \frac{T_1(T_3/T_1 - 1)}{T_2(T_4/T_2 - 1)}$$

- Além disso, observa-se que:

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

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

58

Rendimento do ciclo Otto

- Portanto,

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - (r_v)^{1-k} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}}$$

$$r_v = \text{razão de compressão} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

59

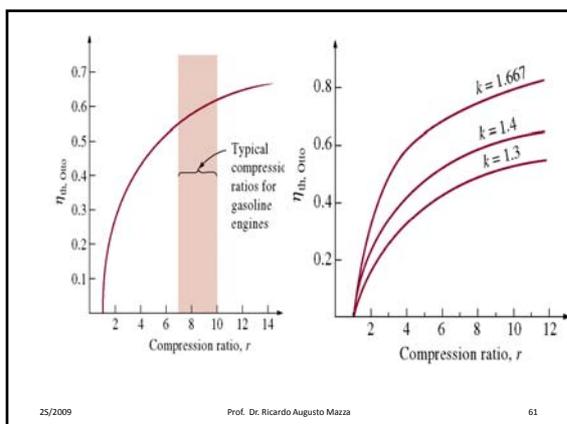
Observações sobre o rendimento

- É função apenas da razão de compressão;
- Aumenta com o aumento desta razão;
- É observado em um motor de ignição por centelha real;
 - Em um motor real há a detonação do combustível quando se aumenta a razão de compressão;
 - A detonação do combustível é caracterizada por uma queima do combustível extremamente rápida e pela presença de fortes ondas de pressão no cilindro do motor, que origina as chamadas batidas;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

60

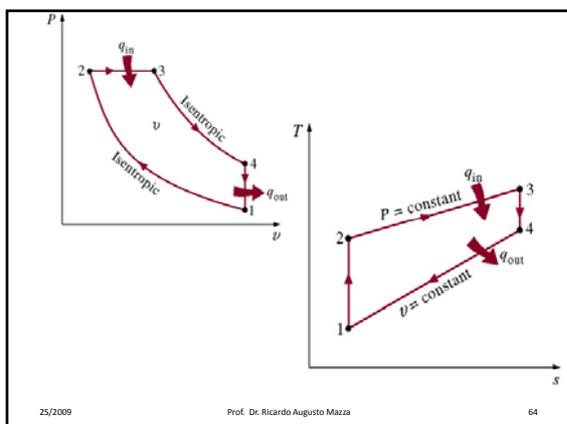


Ciclo real

- Os calores específicos não são constantes;
- O processo de combustão substitui o processo de troca de calor à alta temperatura;
 - *Combustão pode ser incompleta;*
- É necessário trabalho para alimentar o motor e descarregar os produtos da combustão;
- Há troca de calor considerável entre os gases no cilindro e as paredes do cilindro;
- Há irreversibilidades associadas aos gradientes de pressão e temperatura.

Ciclo Diesel

- O ar é comprimido até uma temperatura maior que a de auto-ignição do combustível;
- A combustão começa quando se injeta combustível no ar quente;
 - *Não há necessidade de centelha;*
- Só se comprime o ar, o que permite trabalhar com taxas de compressão elevadas (12-24) sem que haja "batida";
- Combustíveis mais "pesados" podem ser utilizados;
- A combustão ocorre durante um longo tempo do ciclo e pode ser aproximada como sendo um processo de adição de calor com a pressão constante;



Rendimento do ciclo Diesel

- O rendimento do ciclo Diesel pode ser determinado como:

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)}$$

- Definindo o razão de corte como sendo a razão entre o volume antes e depois do processo de combustão:

$$r_c = \frac{v_3}{v_2}$$

Rendimento do ciclo Diesel

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} \left(\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right),$$

onde $r_v = \frac{v_1}{v_2}$ e $r_c = \frac{v_3}{v_2}$

Otto x Diesel

- As eficiências desses dois ciclos são:

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} \quad \eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} \left(\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right)$$

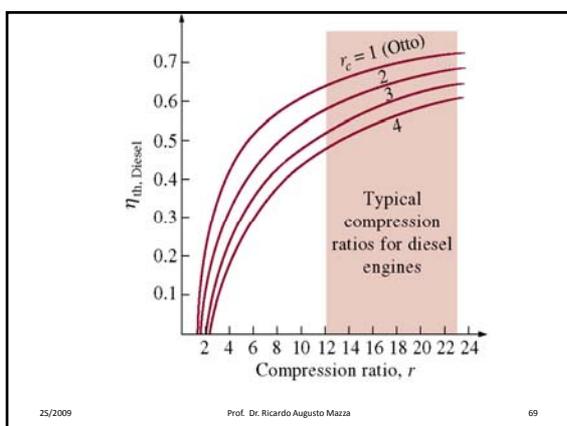
- Como r_c é sempre positivo e k maior que 1, o termo $\left(\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right) \geq 1$ e faz como que $\eta_{\text{Otto}} > \eta_{\text{Diesel}}$;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 67

Otto x Diesel

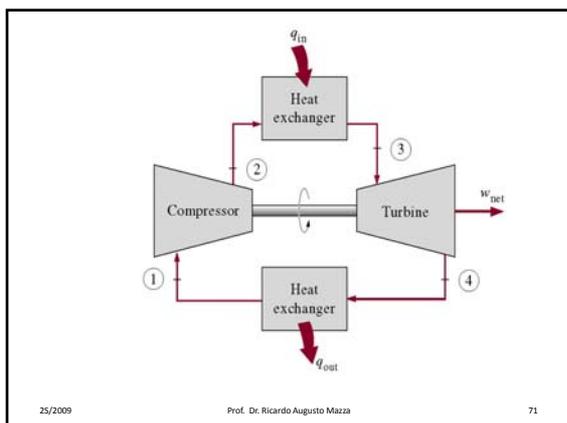
- Se $r_c = 1 \Rightarrow \eta_{\text{Otto}} = \eta_{\text{Diesel}}$;
- Como nos motores diesel a taxa de compressão é maior que no Otto, $\eta_{\text{Diesel}} > \eta_{\text{Otto}}$;

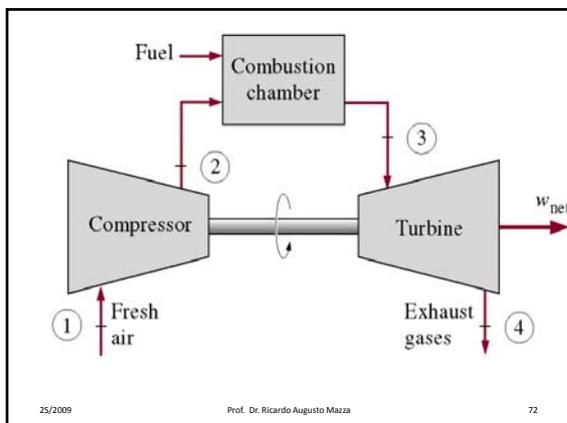
25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 68



FIM !

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 70





Ciclo de Refrigeração

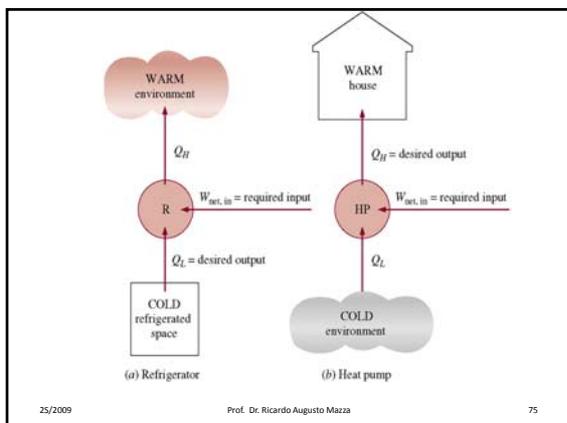
Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
2PFG/DE/FEM/UNICAMP

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 73

Ciclo de refrigeração

- **Utiliza um fluido especial e uma série de processos para retirar calor do ambiente;**
 - *Fluido refrigerante;*
 - Vaporizar em pressões relativamente baixas;
 - Retira calor no processo;
- **Retira calor de um ambiente a baixa temperatura é possível devido à característica particular do fluido refrigerante;**
- **É necessário fornecer trabalho ao sistema;**

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 74



Bombas de calor e refrigeradores

- São essencialmente os mesmo dispositivos
 - *Mudam a finalidade*
- Finalidade do refrigerador
 - *Manter um espaço refrigerado a baixa temperatura, removendo calor;*
 - Rejeitar calor para um reservatório de alta temperatura é consequência;
- Finalidade da bomba de calor
 - *A bomba de calor tem como finalidade manter aquecido um espaço a alta temperatura;*
 - Retirar calor de um reservatório de baixa temperatura é consequência;

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 76

Ciclo de Carnot para refrigeração

- É o que apresenta a maior eficiência possível;
- É importante devido a vários motivos como:
 - *Representa o limite máximo de eficiência;*
 - *Pode-se avaliar a influência das temperaturas de operação.*
- Os componentes e processos nesse ciclo são:
 - *Compressão e expansão adiabática reversível no compressor e no motor térmico, respectivamente;*
 - *Rejeição e remoção de calor isotérmicos no condensador e evaporador, respectivamente;*

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 77

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 78

Ciclo de compressão de vapor ideal

- Muitas dos problemas associados ao ciclo de refrigeração de Carnot podem ser eliminados por este tipo de ciclo;
- As principais características desse ciclo são:
 - O refrigerante é completamente vaporizado no evaporador antes de entrar no compressor;
 - Utilização de um válvula de expansão ou capilar no lugar da turbina;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

79

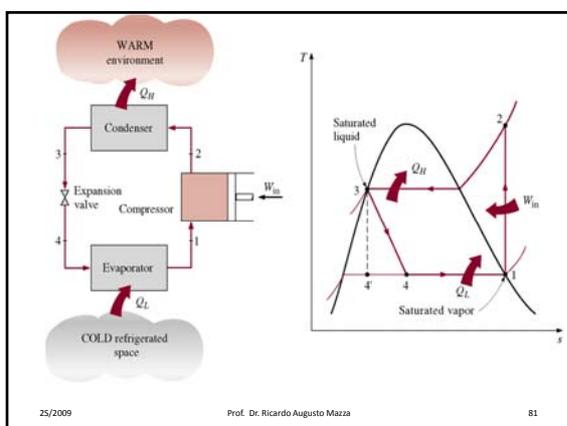
Processos do ciclo de Refrigeração

- Os processos envolvidos nesse ciclo são:
 - Compressão isentrópica no compressor;
 - Rejeição de calor a pressão constante no condensador;
 - Expansão isentálpica em uma válvula ou capilar;
 - Remoção isobárica de calor de um ambiente a baixa temperatura no evaporador;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

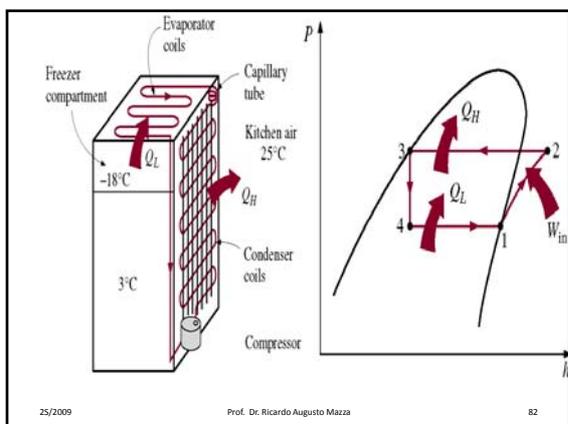
80



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

81



Coeficiente de Eficácia - Refrigeradores

- É a eficiência dos refrigeradores;
- É determinado por:

$$\beta = \text{COP} = \frac{Q_L}{W} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Coeficiente de Eficácia - Bombas de Calor

- É chamado de HPPF, pode ser determinada como:

$$\text{HPPF} = \frac{Q_H}{W} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

- Analisando as duas expressões, pode-se notar que:

$$\text{HPPF} = \text{COP} + 1$$

Ciclos compressão de vapor reais

- Os ciclos reais diferem dos ideais principalmente devido as irreversibilidades do processo devida a:
 - Atrito do fluido com as paredes da tubulação;
 - Perdas de calor para e do ambiente;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

85

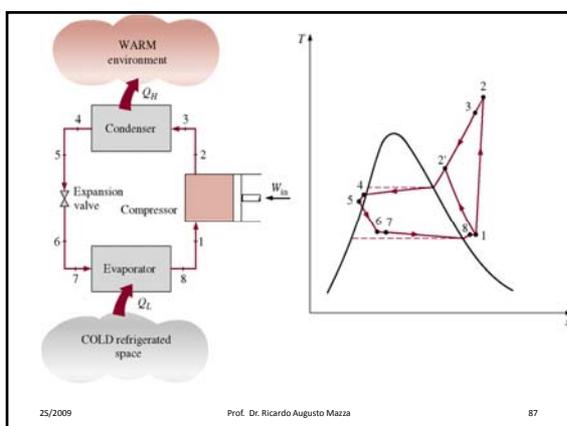
Outros fatores de perdas

- O fluido não deixa o evaporador como vapor saturado;
 - O evaporador é dimensionado para que em sua saída haja somente vapor superaquecido;
- A linha do evaporador ao compressor é longa:
 - Aquecimento do fluido refrigerante pelo meio;
 - Perda de pressão devido o atrito;
- Causa aumento do trabalho consumido no compressor;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

86



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

87

Parâmetros que influenciam a eficácia do ciclo de refrigeração

- Os parâmetros principais que influenciam a eficácia do ciclo de refrigeração são:
 - Temperatura de vaporização;
 - Temperatura de condensação;
 - Sub-resfriamento do líquido;
 - Superaquecimento útil;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

88

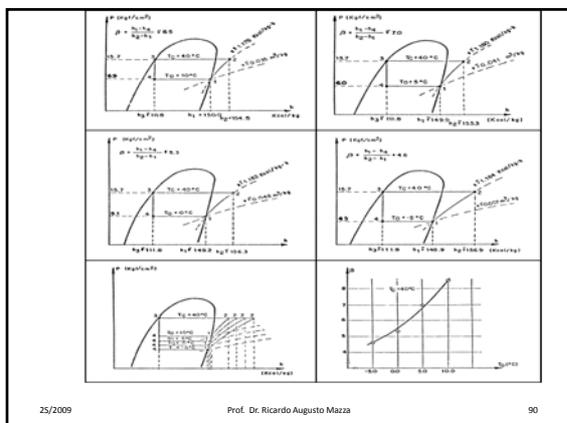
Temperatura de vaporização

- Alterando-se a temperatura de vaporização e mantendo constante a temperatura de condensação, pode-se observar que:
 - Quanto maior a temperatura de vaporização, maior será o coeficiente de eficácia do ciclo;
 - O coeficiente de eficácia aumenta com o aumento da temperatura de vaporização de forma exponencial;
 - Isso ocorre porque a temperatura de condensação permanece constante;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

89



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

90

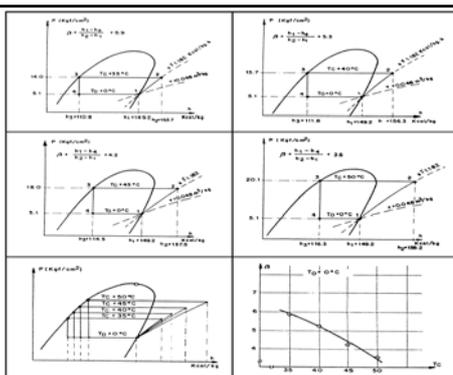
Temperatura de condensação

- Alterando-se a temperatura de condensação (TSE) e fixando-se a de vaporização, observa-se que:
 - Sua influência é diferente da de vaporização;
 - O coeficiente de eficácia diminua com o aumento da temperatura de vaporização;
 - Isso ocorre devido ao fato que a entalpia na saída do compressor aumenta com o aumento da temperatura de condensação;
- O coeficiente de eficácia é mais sensível a uma variação da temperatura de vaporização do que da temperatura de condensação;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

91



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

92

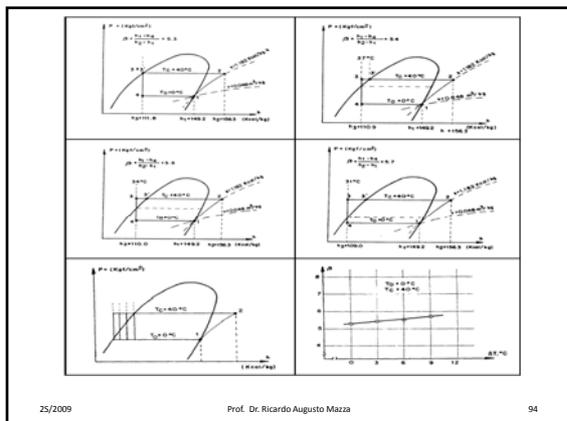
Sub-resfriamento do líquido

- Fixando-se a pressão de condensação e alterando-se a temperatura do líquido na saída do condensador, pode-se observar que:
 - O coeficiente de eficácia altera muito pouco;
 - Com uma diminuição de 9°C na temperatura de condensação do líquido, a eficácia aumenta cerca de 7,5%;
 - Este pequeno não justifica os problemas técnicos de sub resfriar o líquido no circuito de alta.

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

93



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

94

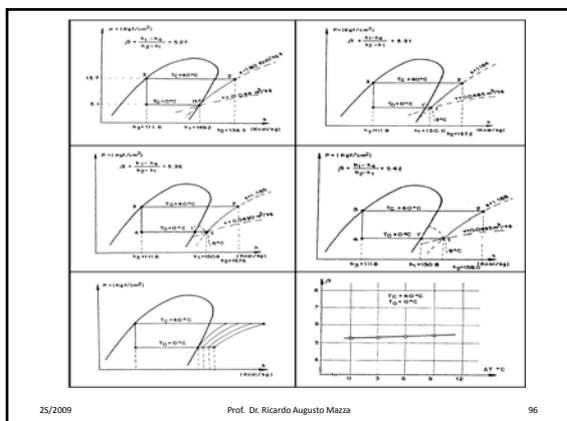
Superaquecimento útil

- O superaquecimento do fluido refrigerante deve ser realizada aumentando-se a temperatura na saída do condensador;
 - Isso se faz retirando mais calor do meio que se deseja resfriar;
 - Há uma leve tendência de aumentar a eficiência do sistema
- Quando este superaquecimento não é realizado dessa forma, normalmente há uma diminuição da eficácia;

25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

95



25/2009

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza

96

Ciclo de refrigeração por absorção de amônia

- O ciclo de refrigeração por absorção de amônia difere do de compressão pela forma com que a compressão é realizada;
 - *Aumenta-se a pressão da solução líquida de amônia com uma bomba de líquido;*
 - *Isso resulta em um consumo muito pequeno de trabalho;*

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 97

Aplicações

- Deve-se dispor de uma fonte térmica de temperatura relativamente alta (100 a 200°C);
- Há uma maior quantidade de equipamentos;
- Só pode ser justificado onde há disponível uma fonte térmica adequada e que, de outro modo, seria desperdiçada.

25/2009 Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza 98

