

MÁQUINAS TÉRMICAS

CICLOS TERMODINÂMICOS

MOTORES E REFRIGERAÇÃO

Capítulo 11 – Van Wylen

Ciclo (“fechado”): o fluido de trabalho sofre uma série de processos e finalmente retorna ao estado inicial – Central com turbina a vapor, geladeira, etc.

No motor de combustão interna, o fluido de trabalho não passa por um ciclo termodinâmico propriamente dito.

O fluido de trabalho, no final do processo, apresenta uma composição química diferente ou está num estado termodinâmico diferente do inicial.

Diz-se “incorretamente” que tais equipamentos operam segundo um ciclo aberto.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Será analisado o desempenho do ciclo fechado ideal, semelhante ao ciclo real, para os equipamentos que operam com ciclo aberto ou fechado.

O procedimento é vantajoso na determinação da influência das variáveis no desempenho dos equipamentos.

Exemplo: O motor de combustão interna, com ignição por centelha, é modelado como um ciclo Otto. Da análise do ciclo Otto (ideal) conclui-se que o aumentando a relação de compressão obtemos um aumento no rendimento. Isso também é verdadeiro para o motor real, embora rendimentos dos ciclos Otto possam se afastar significativamente dos rendimentos dos motores reais.

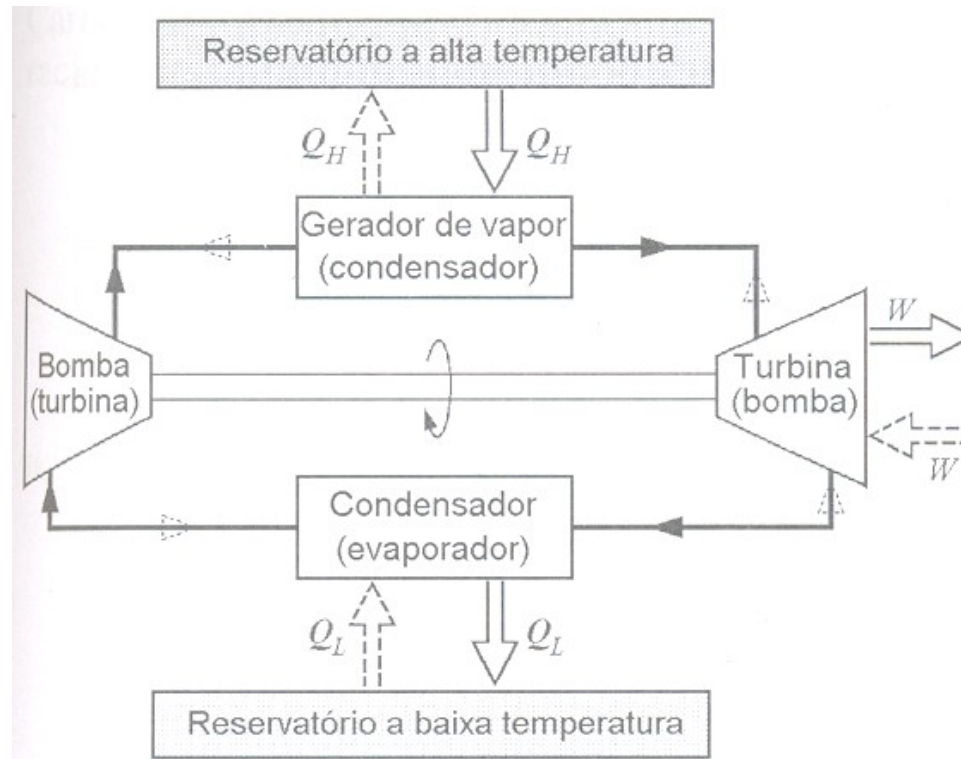
Quais os motivos que levam os ciclos reais a se desviarem dos ideais?

Existem modificações dos ciclos básicos que objetivam o aumento do rendimento do ciclo. Essas modificações são realizadas com a introdução de certos equipamentos (regeneradores, compressores e expansores de múltiplos estágios e resfriadores intermediários) no ciclo original.

MÁQUINAS TÉRMICAS

CICLOS MOTORES

Produz-se trabalho em máquinas com processos que envolvem escoamentos em dispositivos, produzindo trabalho na forma de rotação de eixo. O fluido de trabalho pode apresentar mudanças de fase durante a execução do ciclo ou permanecer numa única fase (normalmente na fase vapor).



MÁQUINAS TÉRMICAS

CICLOS MOTORES

Da primeira lei:

$$q + h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e = h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s + w$$

Um processo adiabático reversível, em regime permanente, com uma seção de entrada e uma de saída e desprezando as variações de energia cinética e potencial, o trabalho por unidade de massa é dado por:

$$h_e = h_s + w$$

$$\text{Como: } Tds = dh - vdp \Rightarrow dh = vdp$$

$$w = h_e - h_s = - \int_e^s vdp$$

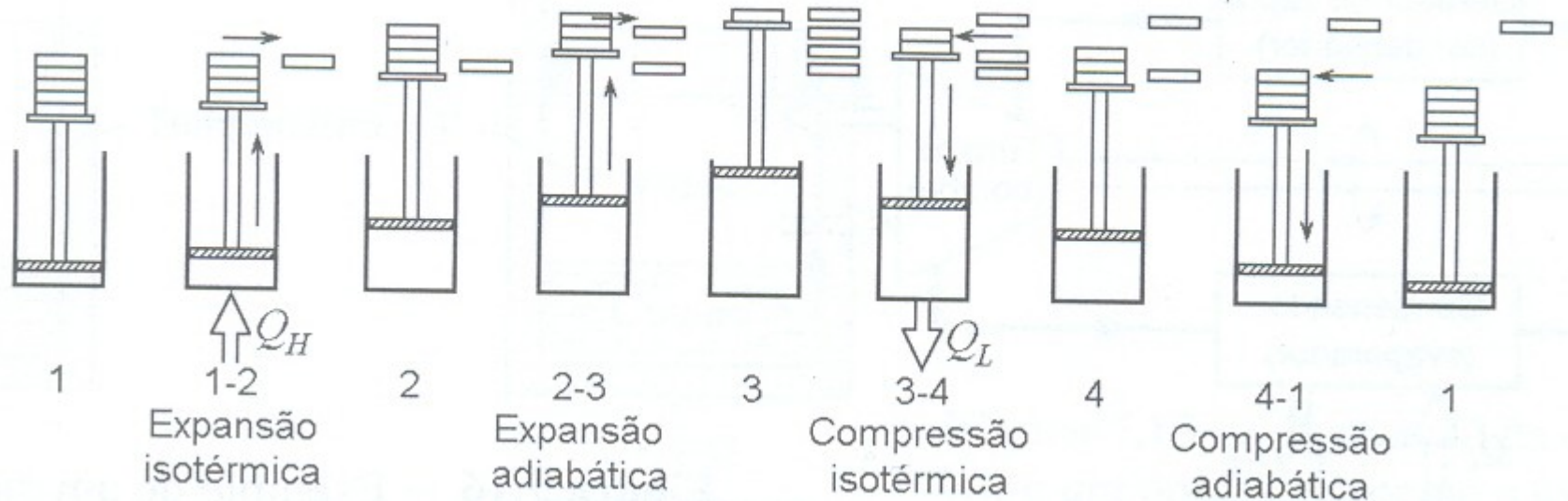
Esse trabalho não envolve processos a pressão constante.

MÁQUINAS TÉRMICAS

CICLOS MOTORES

Produz-se trabalho a partir de processos que ocorrem em sistemas. A produção de trabalho é devida ao movimento de um pistão num cilindro

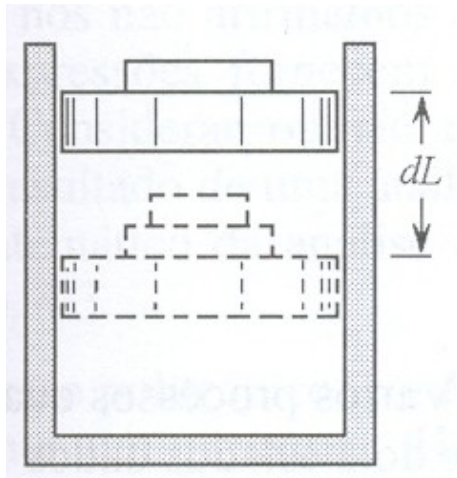
O fluido de trabalho usualmente permanece na fase vapor em todos os estados percorridos pelo ciclo.



MÁQUINAS TÉRMICAS

CICLOS MOTORES

O trabalho de movimento da fronteira, por unidade de massa, num processo reversível para um sistema:



A força total sobre o êmbolo é pA , onde p é a pressão no gás e A é a área do êmbolo.

Assim, o trabalho δW é:

$$\delta W = p A dL$$

porém, $A dL = dV$, que é a variação de volume do gás.

Portanto: $\delta W = p dV$

$$w = \int p dv$$

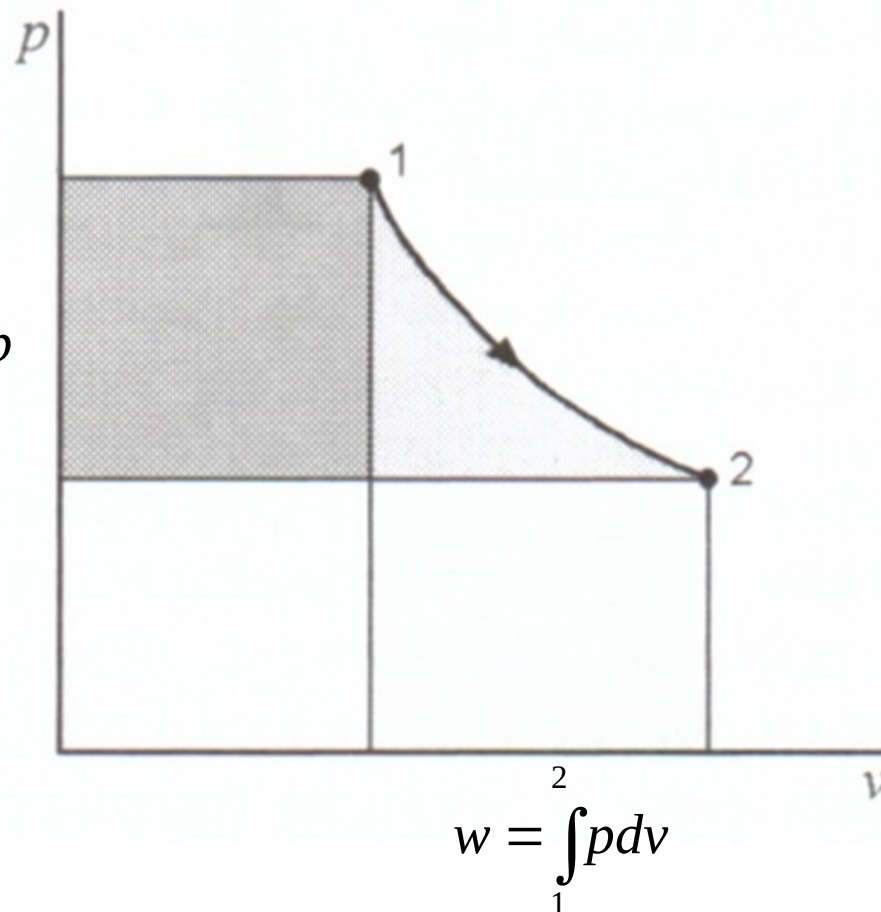
O trabalho não envolve processos a volume constante.

MÁQUINAS TÉRMICAS

As áreas relativas as duas integrais estão mostradas na figura.

$$w = - \int_1^2 v dp$$

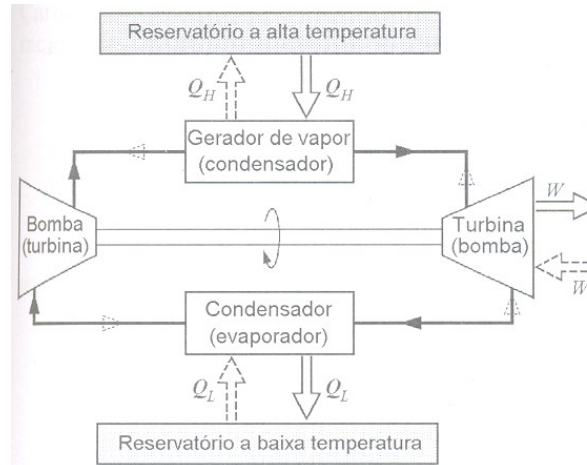
Dispositivos
Volume Controle



$$w = \int_1^2 p dv$$

Pistão/cilindro
Sistemas

MÁQUINAS TÉRMICAS



O ciclo acima é baseado em quatro processos que ocorrem em regime permanente e todos os equipamentos envolvidos apresentam uma única seção de alimentação e uma única de descarga.

Vamos admitir que os processos são internamente reversíveis e que não apresentem variações significativas de energia cinética e potencial.

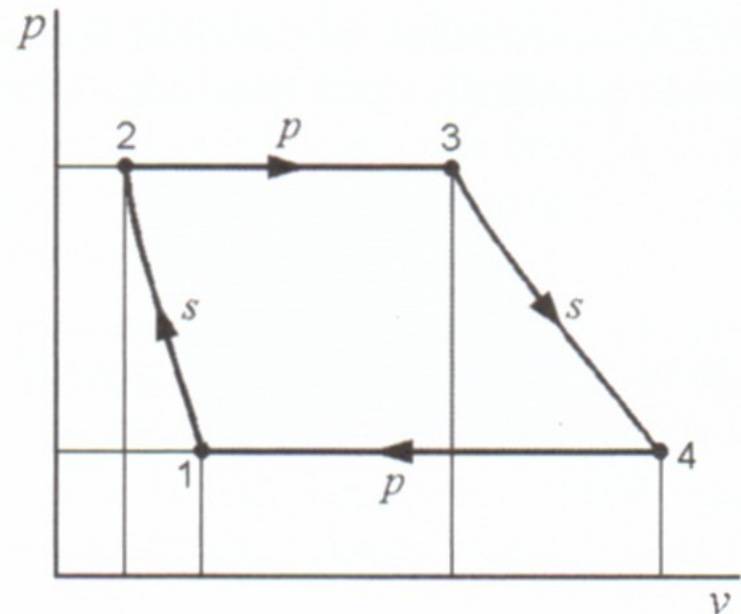
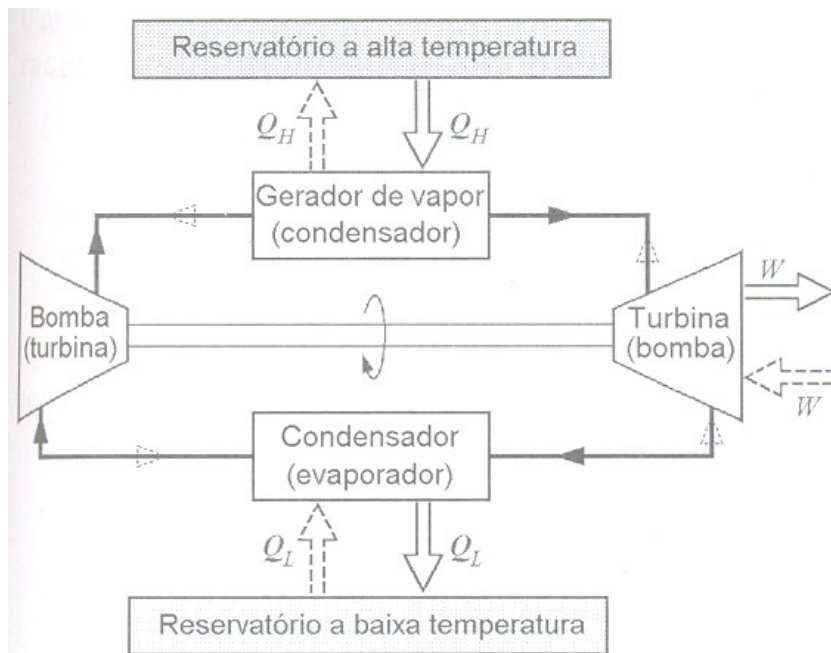
O trabalho por unidade de massa, em cada processo pode ser calculado como:

$$w = - \int_e^s v dp$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

Admitindo que os processos de transferência de calor ocorrem a pressão constante (sem realização de trabalho) e tanto a turbina quanto a bomba são adiabáticas.

Como a hipótese de que os processos são internamente reversíveis, os processos na turbina e na bomba são isentrópicos.



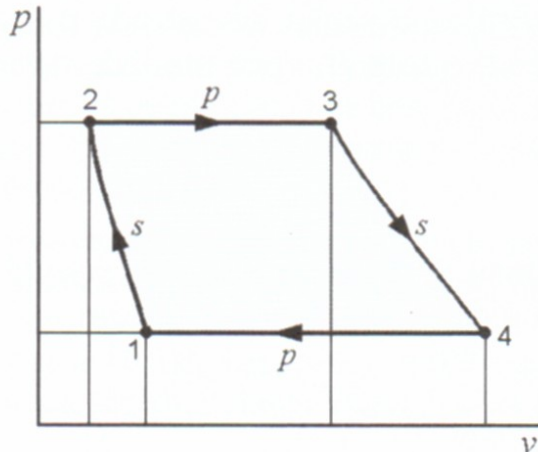
MÁQUINAS TÉRMICAS

Se os estados percorridos pelo fluido de trabalho durante o ciclo pertencerem a região de saturação líquido-vapor, o ciclo será um ciclo de Carnot.

Isto porque as transferências de calor ocorrem a pressão constante e, nesta região, os processos a pressão constante também são processos isotérmicos.

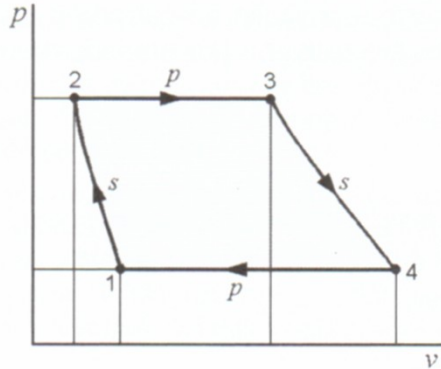
Se ocorrer variação de temperatura na caldeira, ou no condensador, o ciclo não será mais um ciclo de Carnot.

Nestas duas situações, o trabalho líquido por unidade de massa é:



$$w_{liq} = - \int_1^2 v dp + 0 - \int_3^4 v dp + 0 = - \int_1^2 v dp + \int_4^3 v dp$$

MÁQUINAS TÉRMICAS



$$w_{liq} = - \int_1^2 v dp + 0 - \int_3^4 v dp + 0 = - \int_1^2 v dp + \int_4^3 v dp$$

Como $p_2 = p_3$, $p_1 = p_4$, e considerando que os volumes específicos do fluido de trabalho no processo de expansão (estado 3 ao estado 4) são maiores dos que os referentes ao processo de compressão (estado 1 ao estado 2), conclui-se que o trabalho realizado pelo ciclo é positivo.

Esta conclusão também pode ser obtida analisando as áreas da figura.

Conclui-se a partir desta análise, que o trabalho líquido fornecido pelo ciclo é função da diferença entre os volumes específicos das fases.

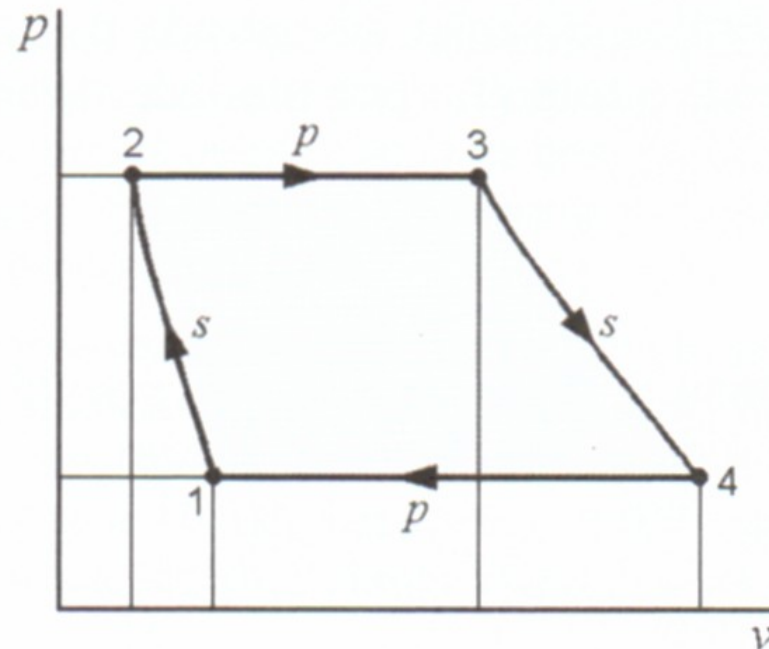
Para se ter mais trabalho, o fluido de trabalho deve apresentar a maior variação de volume específico possível .

IMPORTANTE!

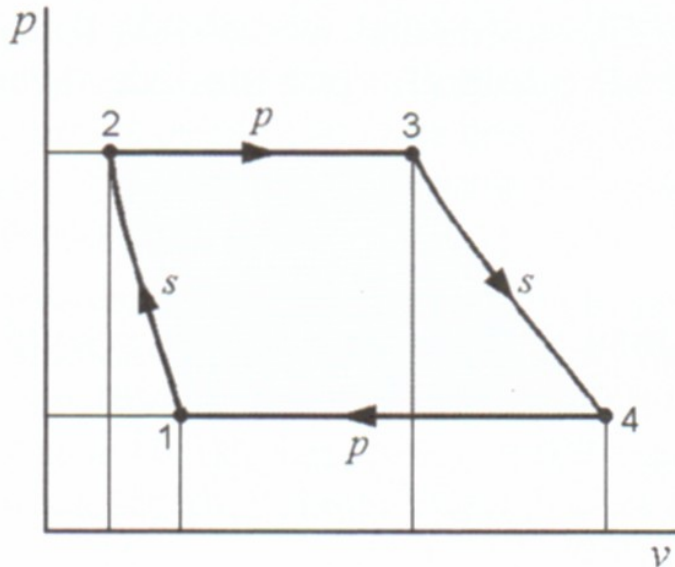
MÁQUINAS TÉRMICAS

Se o ciclo for realizado num conjunto cilindro-pistão, o trabalho será realizado pelo movimento de fronteira. Neste caso:

$$w_{liq} = \int_1^2 p dv + \int_2^3 p dv + \int_3^4 p dv + \int_4^1 p dv$$



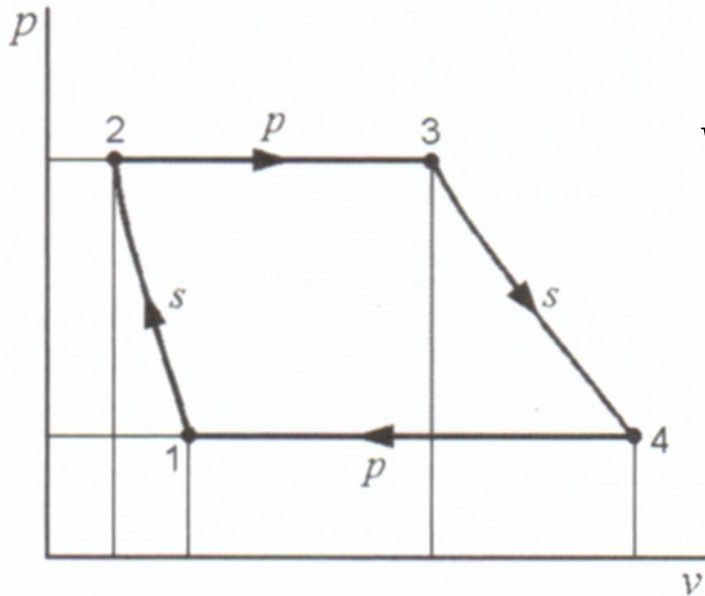
MÁQUINAS TÉRMICAS



$$w_{liq} = \int_1^2 p dv + \int_2^3 p dv + \int_3^4 p dv + \int_4^1 p dv$$

Analisando a figura, nota-se que as áreas relativas aos processos de expansão (do estado 2 ao 3 e do estado 3 ao 4) são maiores que as áreas relativas aos processos de compressão (estado 4 ao 1 e do estado 1 ao 2). A área líquida e o trabalho líquido produzido pelo ciclo são positivos.

MÁQUINAS TÉRMICAS



$$w_{liq} = - \int_1^2 v dp + 0 - \int_3^4 v dp + 0 = - \int_1^2 v dp + \int_4^3 v dp$$

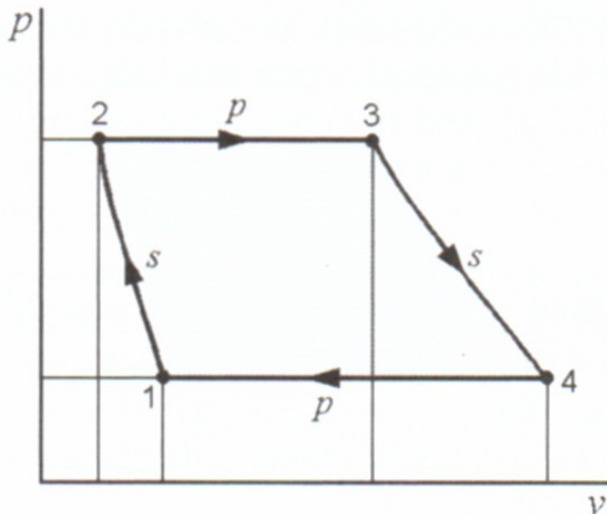
$$w_{liq} = \int_1^2 p dv + \int_2^3 p dv + \int_3^4 p dv + \int_4^1 p dv$$

A área delimitada pelas linhas que representam os processos 1-2-3-4-1 no diagrama representa o trabalho líquido produzido nos dois casos analisados.

O trabalho líquido fornecido pelos dois ciclos é o mesmo apesar dos trabalhos realizados nos processos que compõe os dois ciclos serem diferentes.

MÁQUINAS TÉRMICAS

O **ciclo de Rankine** é constituído por quatro processos que ocorrem em regime permanente e opera na região de saturação. Isto é feito para maximizar a diferença entre os volumes específicos relativos aos processos de expansão e compressão.



$$w_{liq} = - \int_1^2 v dp + 0 - \int_3^4 v dp + 0 = - \int_1^2 v dp + \int_4^3 v dp$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

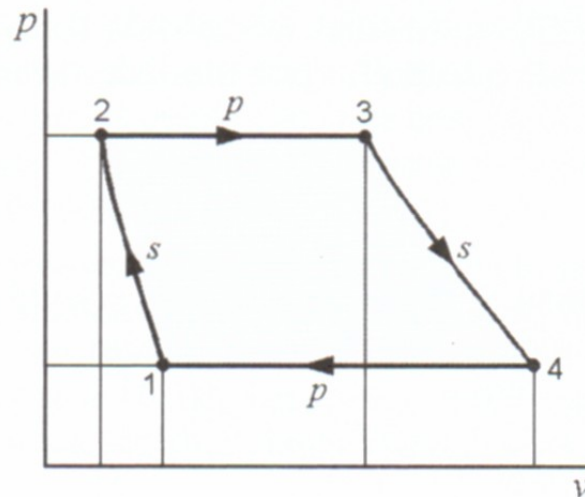
O CICLO RANKINE

FLUIDO COM MUDANÇA DE FASE

Considere um ciclo baseado em quatro processo que ocorrem em regime permanente (figura).

Admita que o estado 1 seja líquido saturado e que o estado 3 seja vapor saturado ou superaquecido.

Este ciclo recebe a denominação ciclo de Rankine e é o ideal para uma unidade motora simples a vapor.



MÁQUINAS TÉRMICAS

O CICLO RANKINE

A figura apresenta o diagrama T - s referente ao ciclo e os processos são:

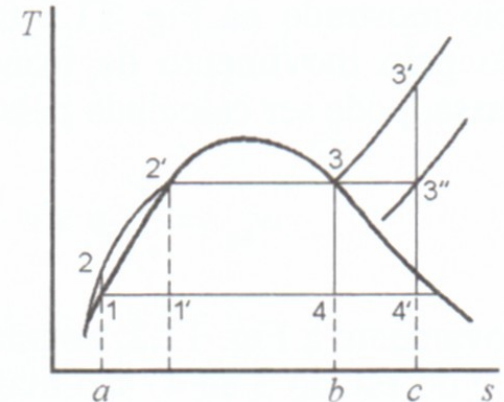
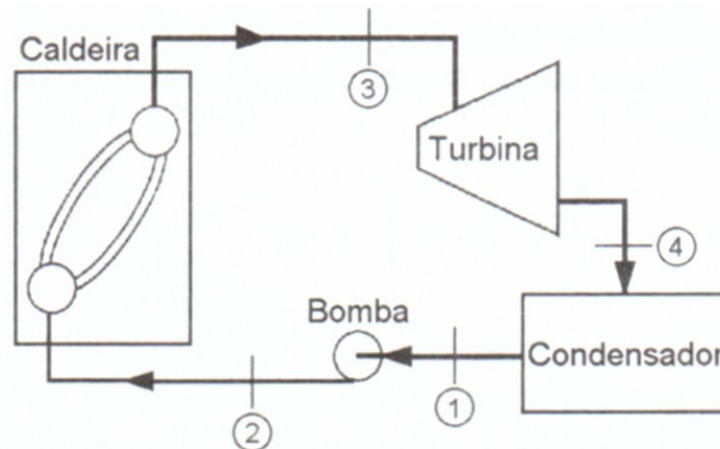
1-2: Processo de bombeamento adiabático reversível, na bomba.

2-3': Transferência de calor a pressão constante, na caldeira.

3'-4': Expansão adiabática reversível na turbina (ou noutra máquina motora tal como a máquina a vapor).

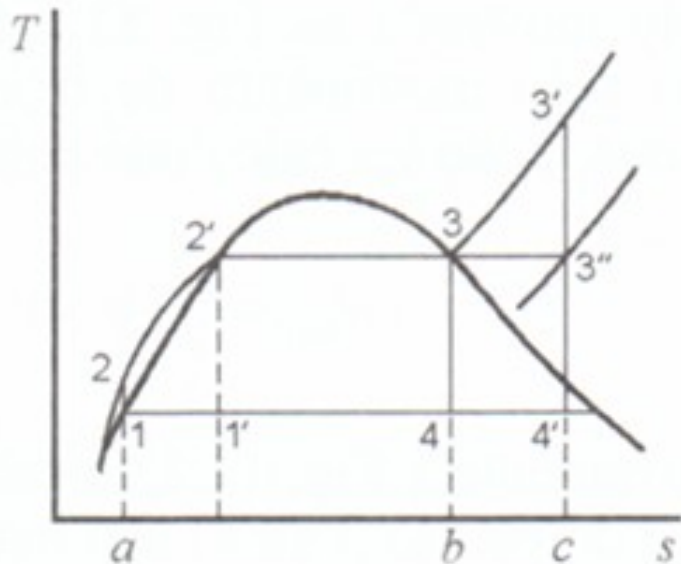
4'-1: Transferência de calor a pressão constante, no condensador.

O ciclo de Rankine usualmente apresenta superaquecimento do vapor.



MÁQUINAS TÉRMICAS

Se as variações de energia cinética e potencial forem desprezadas, as transferências de calor e o trabalho líquido podem ser representados pelas diversas áreas do diagrama T - s .



O calor transferido ao fluido de trabalho é representado pela área a - 2 - $2'$ - $3'$ - c - a e o calor transferido do fluido de trabalho pela área a - 1 - $4'$ - c - a .

Utilizando a primeira lei da termodinâmica, podemos concluir que a área que representa o trabalho é igual a diferença entre essas duas áreas, isto é, a área 1 - 2 - $2'$ - $3'$ - $4'$ - 1 .

O rendimento térmico é definido pela relação

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{liq}}}{q_H} = \frac{\text{área } 1 - 2 - 2' - 3' - 4' - 1}{\text{área } a - 2 - 2' - 3' - c - a}$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

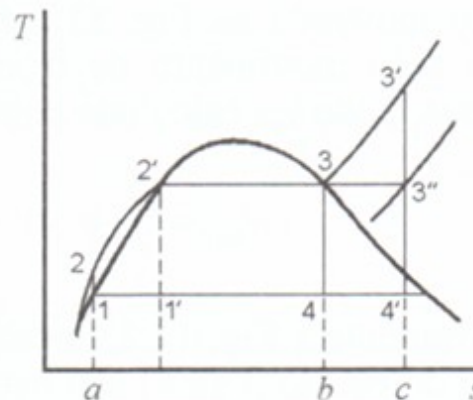
Na análise do ciclo de Rankine é útil considerar que o rendimento depende da temperatura média na qual o calor é fornecido e da temperatura média na qual o calor é rejeitado.

$$\eta = 1 - \frac{(T_L)_{\text{médio}}}{(T_H)_{\text{médio}}}$$

Qualquer variação que aumente a temperatura média na qual o calor é fornecido, ou que diminua a temperatura média na qual o calor é rejeitado, aumentará o rendimento do ciclo de Rankine.

Deve-se ressaltar que na análise dos ciclos ideais as variações de energias cinética e potencial, de um ponto do ciclo a outro, são desprezadas.

Em geral, isso é uma hipótese razoável para os ciclos reais.

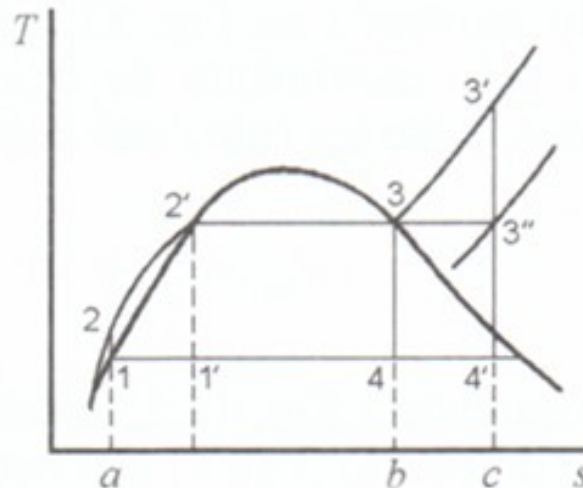


MÁQUINAS TÉRMICAS

O ciclo de Rankine (1-2-3-4-1) tem um rendimento menor que o ciclo de Carnot que apresenta as mesmas temperaturas máxima e mínima do ciclo de Rankine, porque a temperatura média entre 2 e 2' é menor do que a temperatura durante a vaporização.

Porque escolher o ciclo de Rankine como o ciclo ideal?

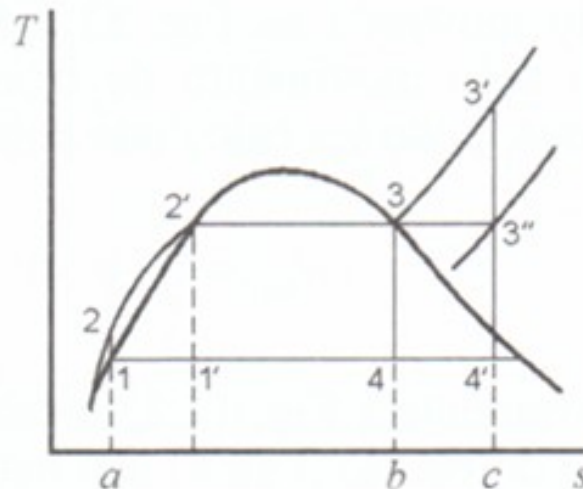
Porque não escolher o ciclo de Carnot 1'-2'-3-4-1' como o ciclo ideal?



MÁQUINAS TÉRMICAS

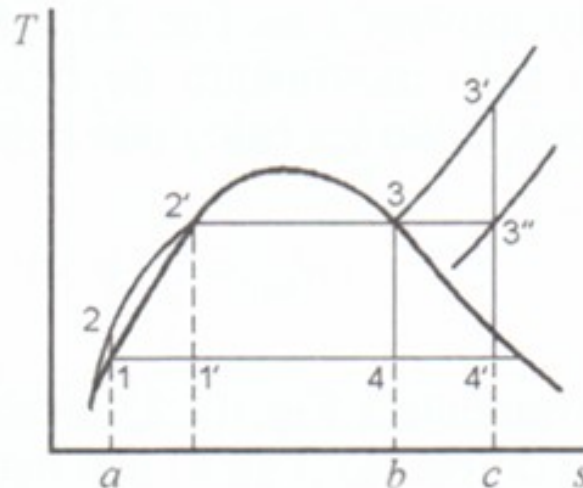
Por duas razões principais:

1.O processo de bombeamento – o estado 1' é uma mistura de líquido e vapor e é muito difícil construir uma bomba que opere convenientemente sendo alimentada com uma mistura de líquido e vapor (1') e que forneça líquido saturado na seção de descarga (2'). E muito mais fácil condensar completamente o vapor e trabalhar somente com líquido na bomba (o ciclo de Rankine é baseado neste fato).



MÁQUINAS TÉRMICAS

2. A segunda razão envolve o superaquecimento do vapor. No ciclo de Rankine o vapor é superaquecido a pressão constante, processo 3-3'. No ciclo de Carnot toda a transferência de calor ocorre a temperatura constante e portanto o vapor é superaquecido no processo 3-3''. Note que durante esse processo a pressão cai. Isto significa que calor deve ser transferido ao vapor enquanto ele sofre um processo de expansão (no qual é efetuado trabalho). Isso também é muito difícil de se conseguir na prática.



MÁQUINAS TÉRMICAS

O ciclo Rankine é o ciclo ideal que pode ser aproximado na prática.

Algumas variações do ciclo de Rankine provocam o aumento do rendimento térmico do ciclo e deste modo apresenta um rendimento mais próximo ao rendimento do ciclo de Carnot.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Exemplo

Determine o rendimento de um ciclo de Rankine que utiliza água como fluido de trabalho e no qual a pressão no condensador é igual a 10 kPa. A pressão na caldeira é de 2 MPa. O vapor deixa a caldeira como vapor saturado.

Simbologia:

w_b – trabalho da bomba por quilograma de fluido que escoar no equipamento;

q_L – calor rejeitado pelo fluido de trabalho por quilo de fluido que escoar no equipamento.

Na solução do problema será considerado, sucessivamente, uma superfície de controle que envolve a bomba, caldeira, turbina e condensador. Em cada caso é considerado que o processo ocorre regime permanente (com variações de energias cinética e potencial desprezíveis).

MÁQUINAS TÉRMICAS

Volume de controle na Bomba:

Estado de entrada: p_1 conhecida, líquido saturado: estado determinado.

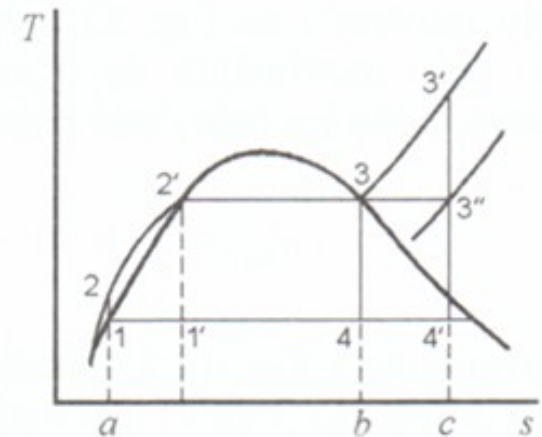
Estado de saída: p_2 conhecida.

Primeira lei da termodinâmica: $|W_b| = h_2 - h_1$

Segunda Lei da termodinâmica: $s_2=s_1$

Como $s_2 = s_1$

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 v dp$$



Admitindo que o líquido seja incompressível:

$$|w_b| = v(p_2 - p_1) = 0,00101(2000 - 10) = 2,0 \text{ kJ / kg}$$

$$h_2 = h_1 + |w_b| = 191,8 + 2,0 = 193,8$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

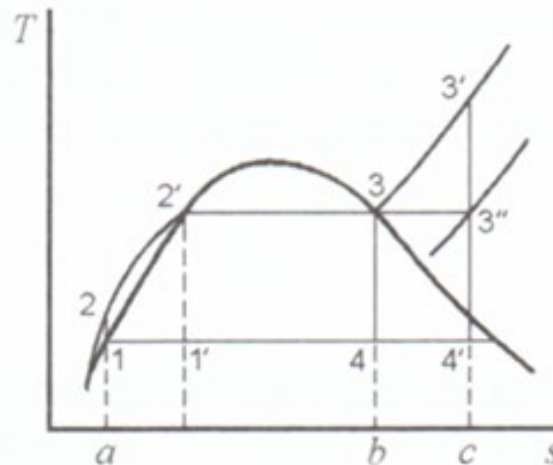
Volume de controle na Caldeira:

Estado de entrada: p_2 , h_2 conhecidas; estado determinado.

Estado de saída: p_3 conhecida, vapor saturado; estado determinado.

Primeira lei da termodinâmica: $q_H = h_3 - h_2$

$$q_H = h_3 - h_2 = 2799,5 - 193,8 = 2605,7 \text{ kJ/kg}$$



MÁQUINAS TÉRMICAS

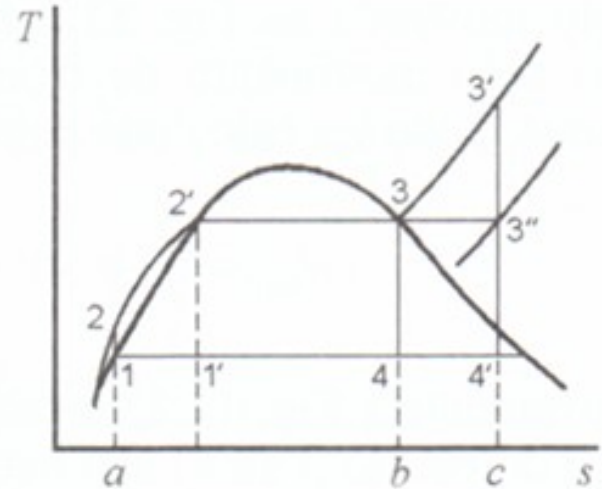
Volume de controle na Turbina:

Estado de entrada: estado 3 conhecido.

Estado de saída: p_4 conhecida.

Primeira lei da termodinâmica: $W_t = h_3 - h_4$

Segunda Lei da termodinâmica: $s_3 = s_4$



Da entropia no estado 4 pode-se determinar o título:

$$s_3 = s_4 = 6,3408 = 0,6493 + x_4 7,5009$$

→

$$x_4 = 0,7588$$

$$h_4 = 191,8 + 0,7588(2392,8) = 20007,5$$

$$w_t = 2799,5 - 2007,5 = 792,0 \text{ kJ/kg}$$

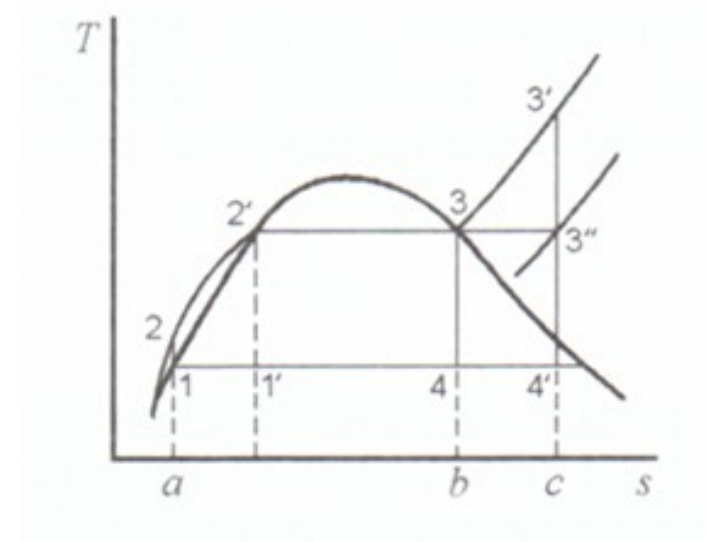
MÁQUINAS TÉRMICAS

Volume de controle no Condensador:

Estado de entrada: Estado 4 conhecido.

Estado de saída: Estado 1 conhecido.

Primeira lei da termodinâmica: $|q_L| = h_4 - h_1$



$$q_L = h_4 - h_1 = 2007,5 - 191,8 = 1815,7 \text{ kJ/kg}$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

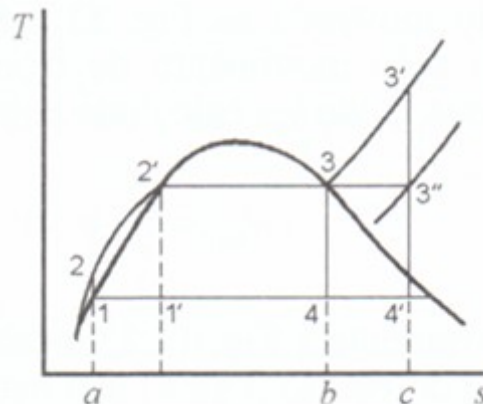
RENDIMENTO TÉRMICO DO CICLO

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{w_{\text{liq}}}{q_H} = \frac{q_H - |q_L|}{q_H} = \frac{w_t - |w_b|}{q_H} = \frac{792,0 - 2,0}{2605,7} = 30,3\%$$

Em termos de propriedades :

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{(h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{2605,7 - 1815,7}{2605,7} = \frac{792,0 - 2,0}{2605,7} = 30,3\%$$

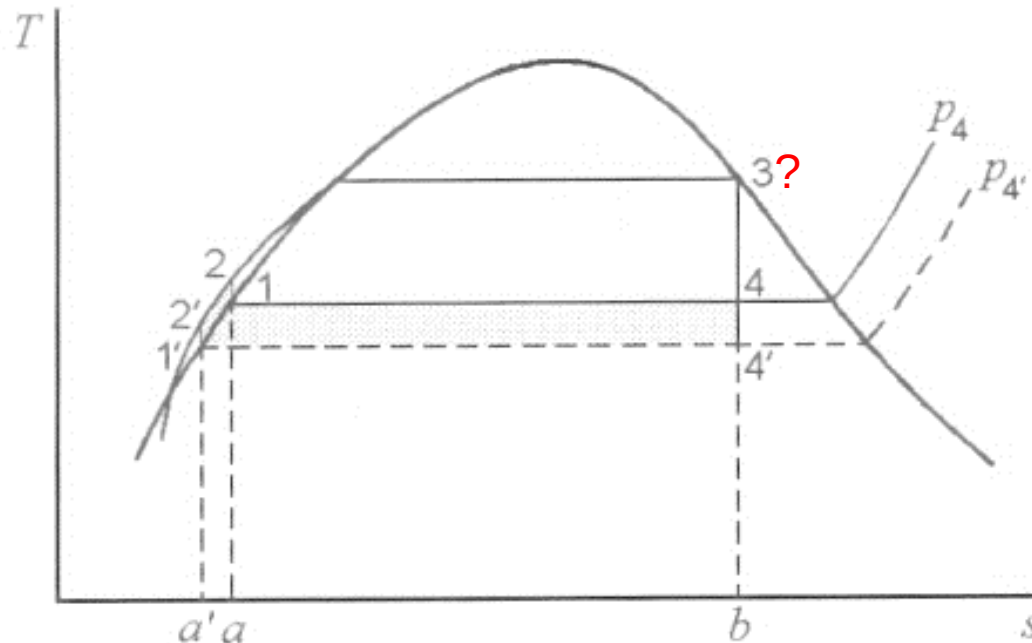


MÁQUINAS TÉRMICAS

EFEITOS DA VARIAÇÃO DE PRESSÃO E TEMPERATURA

Qual o efeito, no **rendimento** e no **trabalho específico**, da variação de pressão e temperatura na saída da turbina?

Esse efeito é mostrado no diagrama $T-s$ da figura.



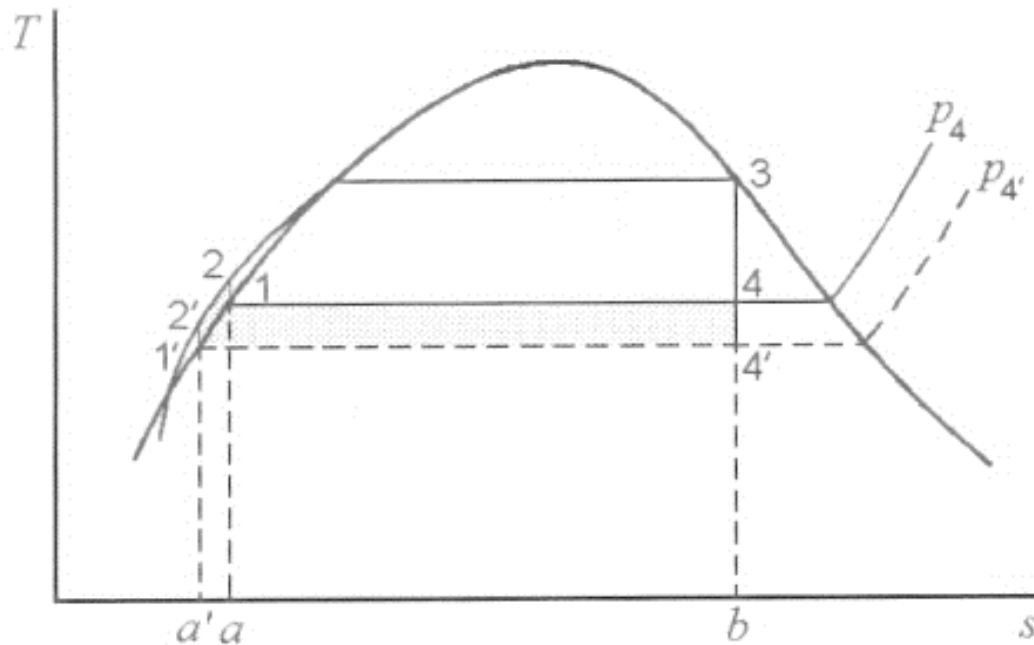
MÁQUINAS TÉRMICAS

A pressão de saída diminui de P_4 a $P_{4'}$, com a correspondente diminuição da temperatura na qual o calor é rejeitado.

O aumento do trabalho líquido está representado pela área 1-4-4'-1'-2'-2-1.

O aumento do calor transferido ao fluido é representado pela área a'-2'-2-a-a'.

Como essas duas áreas são aproximadamente iguais, o resultado líquido é um aumento no rendimento do ciclo.



$$\eta = \frac{x}{y} ; \eta' = \frac{x+kx}{y+kx}$$

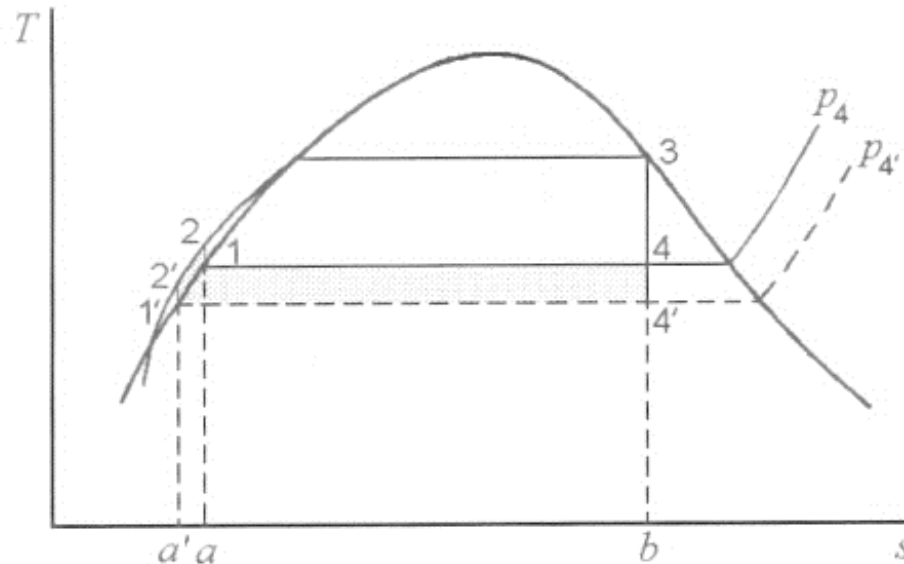
$$\eta' = \frac{x(1+k)}{y(1+k\frac{x}{y})} \therefore \eta' = \frac{1+k}{1+\eta k} \cdot \eta$$

$\frac{1+k}{1+\eta k}$ é maior que 1 pois $\eta < 1$

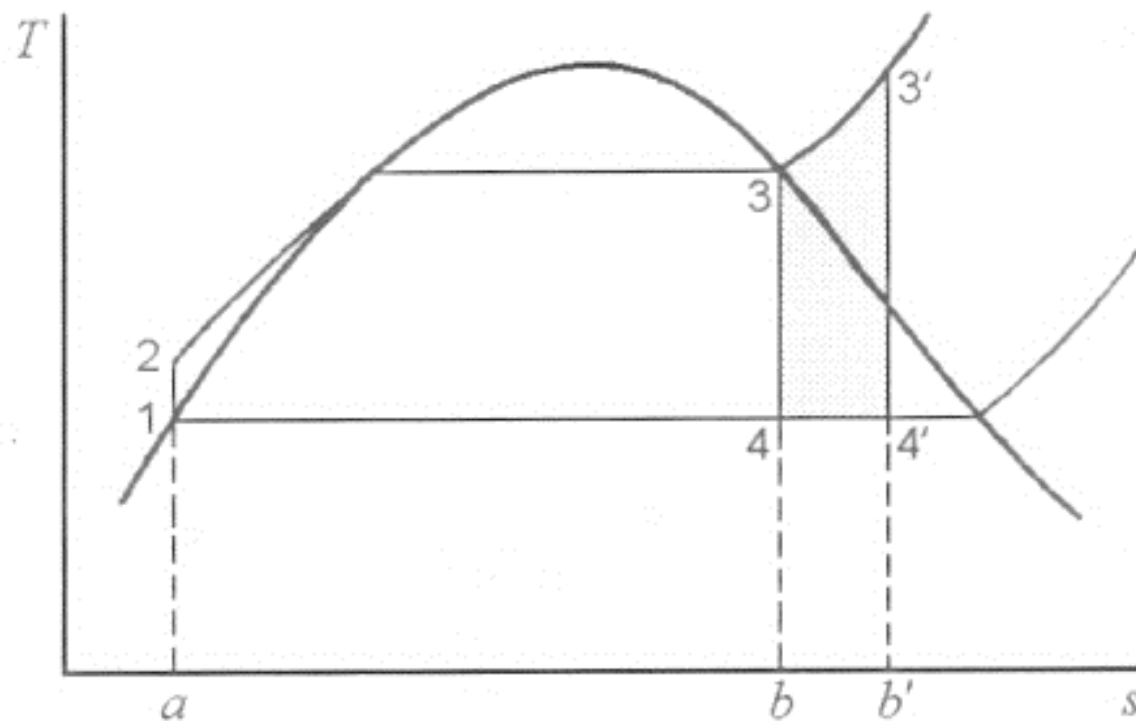
MÁQUINAS TÉRMICAS

O aumento do rendimento fica evidente pelo fato de que a temperatura média, na qual o calor é rejeitado, diminui.

Por outro lado a redução da pressão na seção de descarga da turbina provoca uma redução no título do fluido que deixa a turbina. Isso é um fator significativo, pois ocorrerá uma diminuição na eficiência da turbina e a erosão das palhetas da turbina tornar-se-á um problema muito sério quando a umidade do fluido, nos estágios de baixa pressão da turbina, excede cerca de 10 por cento.



Qual o efeito do superaquecimento do vapor na caldeira?



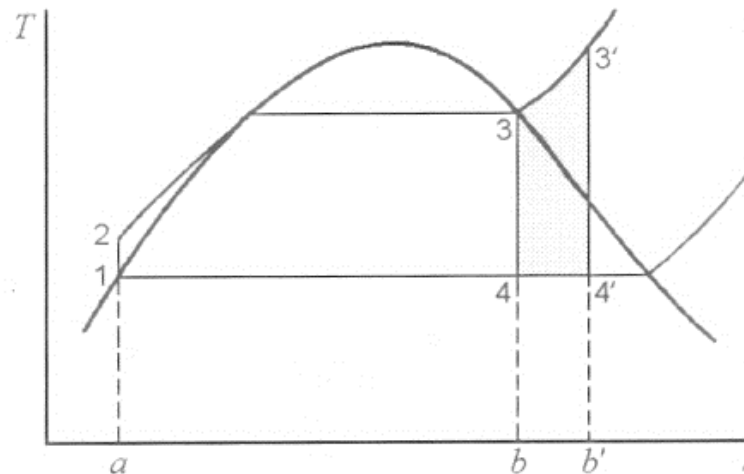
MÁQUINAS TÉRMICAS

O trabalho aumenta o correspondente a área $3-3'-4'-4-3$ e o calor transferido na caldeira aumenta o correspondente a área $3-3'-b'-b-3$.

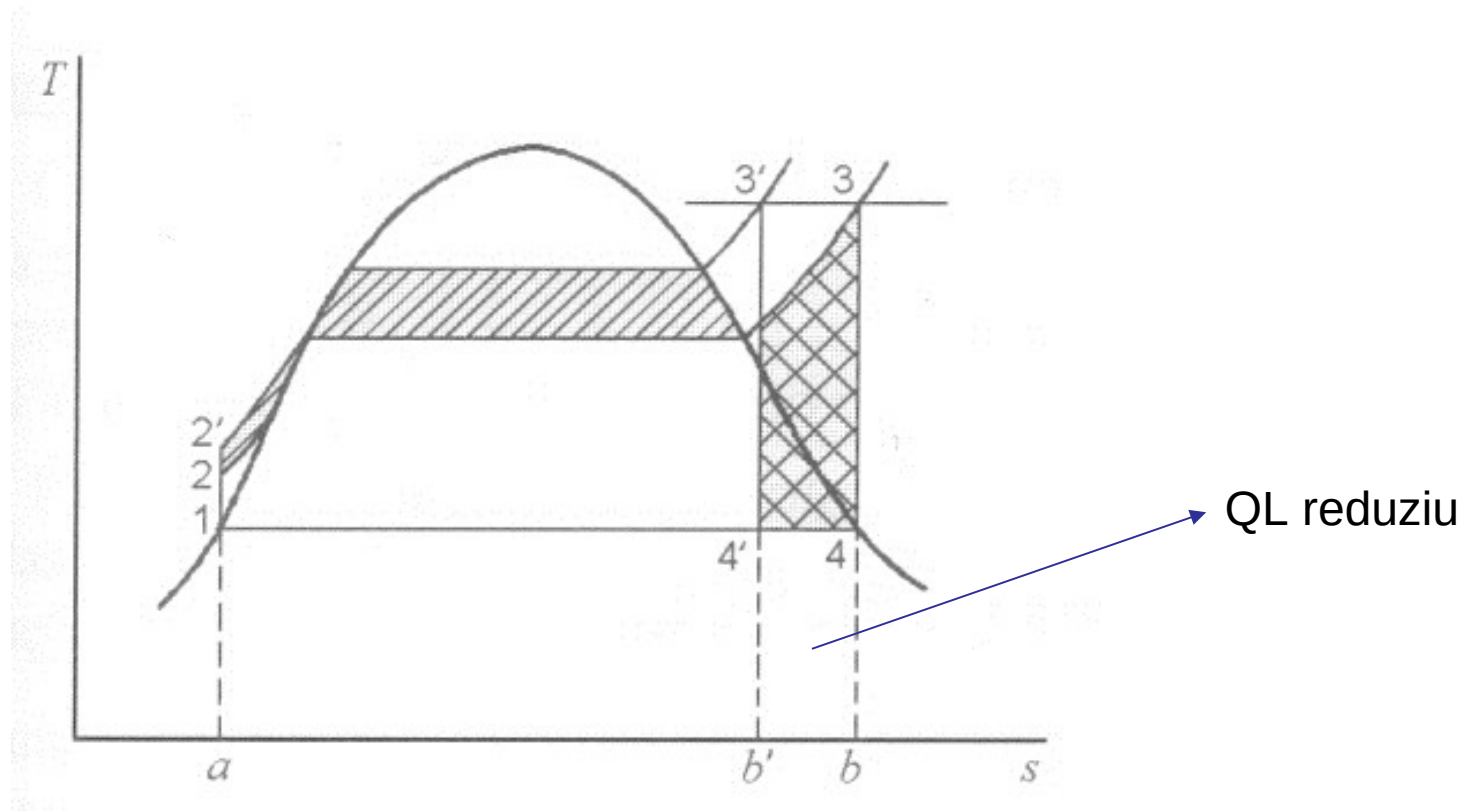
Como a relação entre estas duas áreas é maior do que a relação entre o trabalho líquido e o calor fornecido no restante do ciclo, para as pressões dadas, o superaquecimento do vapor aumenta o rendimento do ciclo de Rankine.

Isso pode ser explicado, também, pela ocorrência do aumento da temperatura média na qual o calor é transferido ao vapor.

Quando o vapor é superaquecido, aumenta o título do vapor na saída da turbina.



Qual o efeito da pressão máxima do vapor?

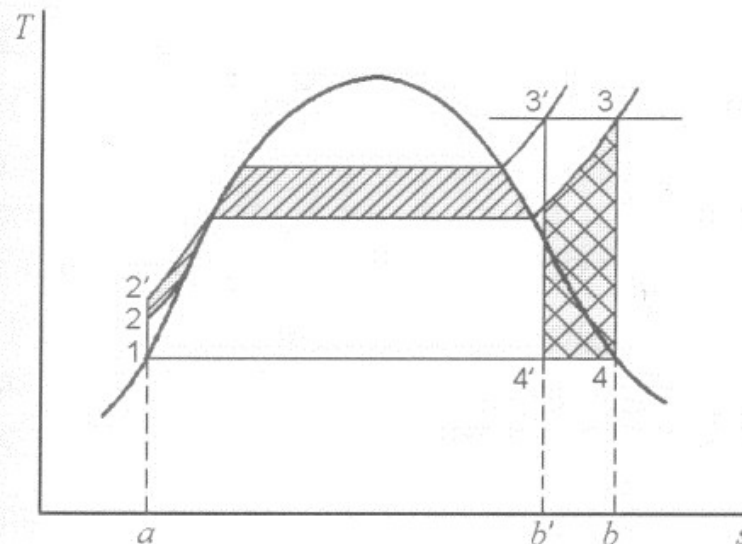


MÁQUINAS TÉRMICAS

Na análise, a temperatura máxima do vapor, bem como a pressão de saída, são mantidas constantes.

O calor rejeitado diminui o correspondente a área $b'-4'-4-b-b'$. O trabalho líquido aumenta o correspondente a área hachurada simples e diminui o correspondente a área duplo hachurada.

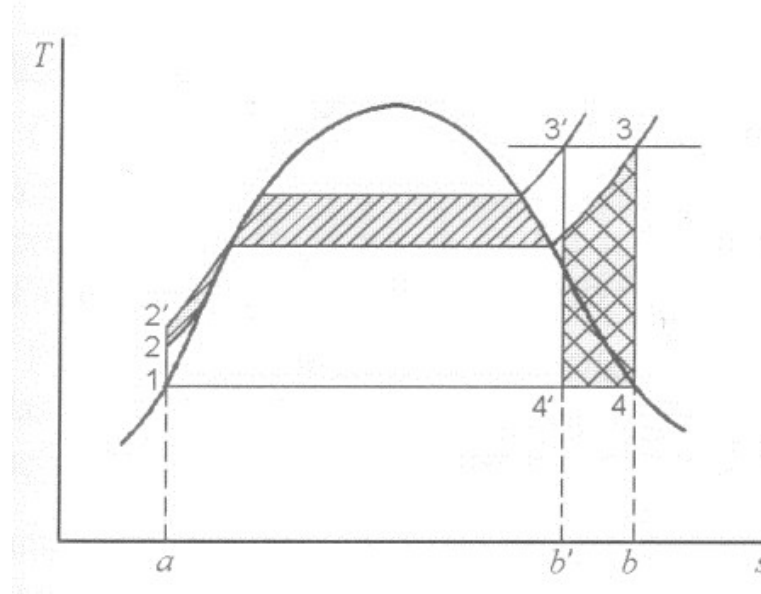
Portanto o trabalho líquido tende permanecer o mesmo, mas o calor rejeitado diminui e portanto, o rendimento do ciclo de Rankine aumenta com o aumento da pressão máxima.



MÁQUINAS TÉRMICAS

Neste caso, 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 do ciclo aumenta.



MÁQUINAS TÉRMICAS

RESUMO

O rendimento de um ciclo de Rankine pode ser aumentado pela redução da pressão na seção de descarga da turbina, pelo aumento da pressão no fornecimento de calor e pelo superaquecimento do vapor.

O título do vapor que deixa a turbina aumenta com o superaquecimento do vapor e diminui pelo abaixamento da pressão no condensador e pelo aumento da pressão no fornecimento de calor.

O que acontece, em cada caso, com o trabalho útil?

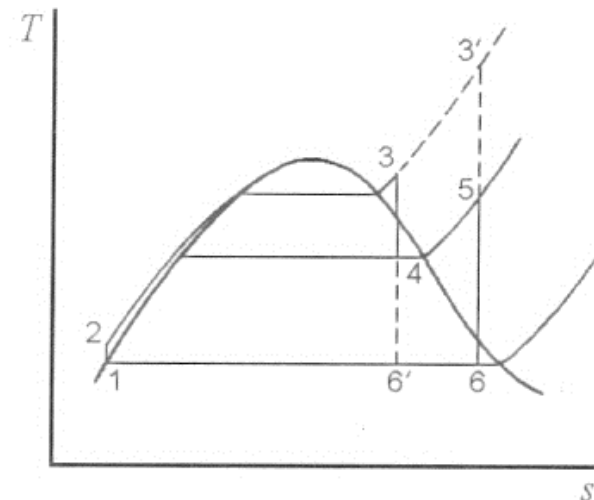
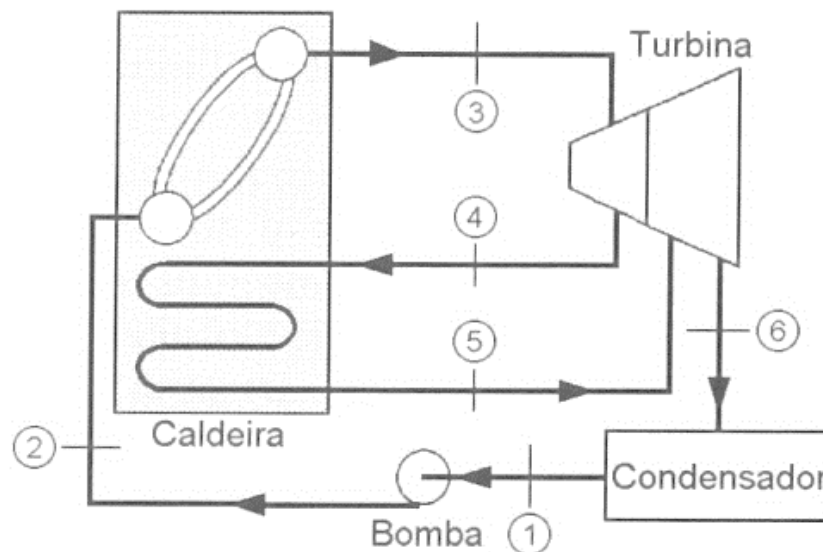
MÁQUINAS TÉRMICAS

CICLO RANKINE COM REAQUECIMENTO

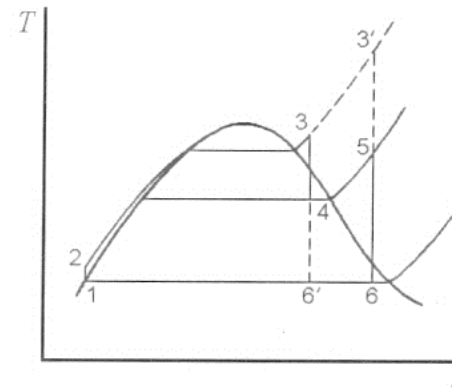
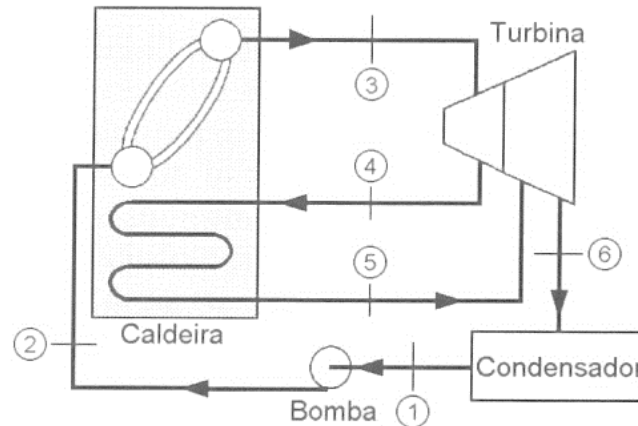
O rendimento do ciclo Rankine pode ser aumentado, pelo aumento da pressão no processo de fornecimento de calor.

O aumento da pressão aumenta o teor de umidade do vapor nos estágios de baixa pressão da turbina.

O ciclo com reaquecimento foi desenvolvido para tirar vantagem do aumento de rendimento provocado pela utilização de pressões mais altas e evitando que a umidade seja excessiva nos estágios de baixa pressão da turbina.



MÁQUINAS TÉRMICAS



O vapor expande até uma pressão intermediária na turbina e depois é reaquecido na caldeira e novamente expande na turbina até a pressão de saída.

Do diagrama $T-s$ vê-se que há um ganho muito pequeno de rendimento pelo reaquecimento do vapor, pois a temperatura média, na qual o calor é fornecido, não muda muito.

A principal vantagem deste reaquecimento está na diminuição do teor de umidade nos estágios de baixa pressão da turbina.

Se houver metais que possibilitem um superaquecimento do vapor até 3', o ciclo Rankine simples seria mais eficiente que o ciclo com reaquecimento e este ciclo modificado não seria necessário.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Exemplo

Considere um ciclo com reaquecimento que utiliza água como fluido de trabalho. O vapor deixa a caldeira e entra na turbina a 4 MPa e 400°C. O vapor expande até 400 kPa na turbina de alta pressão, é reaquecido até 400°C e então expande novamente na turbina de baixa pressão até 10 kPa. Determine o rendimento do ciclo.

O resultado mostra que o aumento do rendimento provocado pelo reaquecimento é relativamente pequeno. Porém, a fração de líquido do vapor na seção de saída da turbina (baixa pressão) diminui em consequência do reaquecimento (de 18,4 % para 3,4 %).

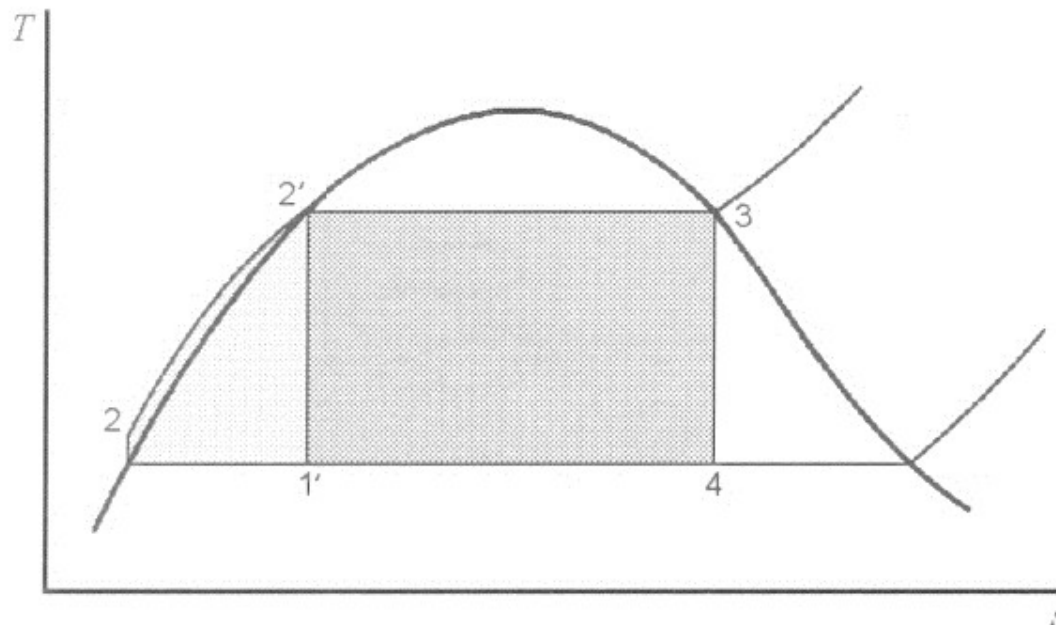
MÁQUINAS TÉRMICAS

CICLO RANKINE REGENERATIVO

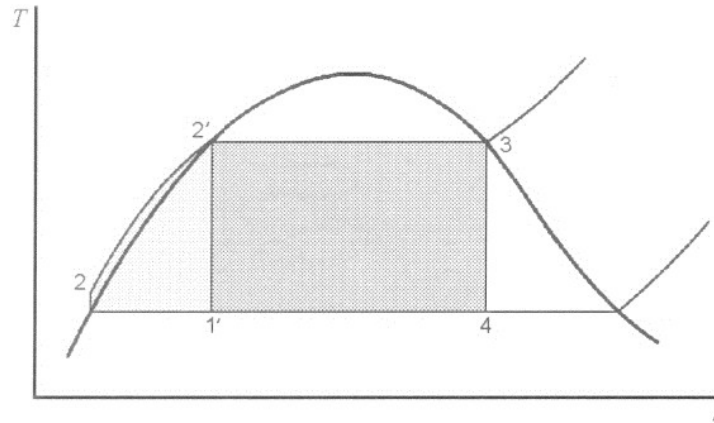
Outra variação importante do ciclo de Rankine é o ciclo regenerativo.

Esta variação envolve a utilização de aquecedores da água de alimentação.

As características básicas deste ciclo podem ser mostrados considerando-se o ciclo de Rankine sem superaquecimento mostrado na Figura.



MÁQUINAS TÉRMICAS



O fluido de trabalho é aquecido na fase líquida entre os estados 2 e 2'.

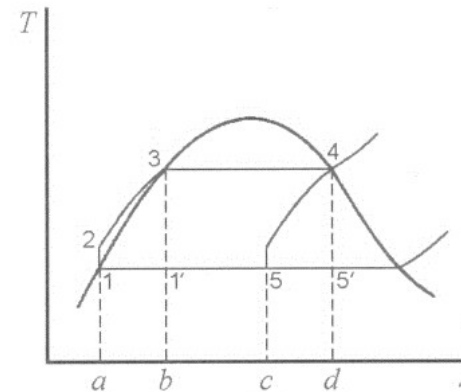
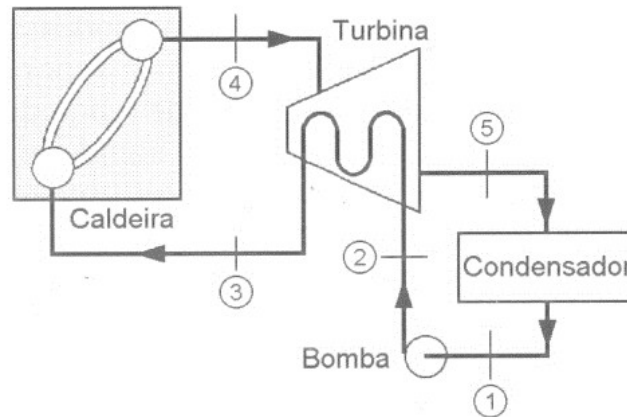
A temperatura média do fluido de trabalho, durante este processo, é muito inferior à do processo de vaporização 2'-3.

Isto faz com que a temperatura média, na qual o calor é transferido ao ciclo de Rankine, seja menor do que a do ciclo de Carnot 1'-2'-3-4-1'.

Assim o rendimento do ciclo Rankine é menor que o do ciclo de Carnot.

No ciclo regenerativo o fluido de trabalho entra na caldeira em algum estado entre 2 e 2', obtendo-se um aumento na temperatura média na qual o calor é fornecido ao fluido de trabalho.

MÁQUINAS TÉRMICAS



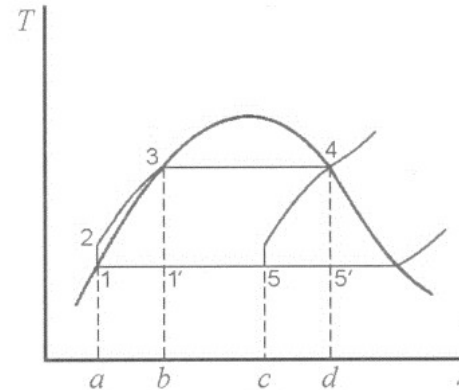
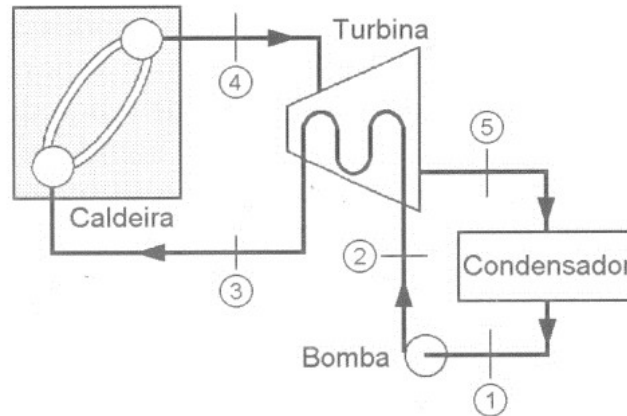
Um ciclo regenerativo ideal (Figura).

Característica: após deixar a bomba o líquido circula ao redor da carcaça da turbina, em sentido contrário ao do vapor. Calor é transferido do vapor ao líquido que escoar na periferia da turbina.

Admiti-se que seja uma transferência de calor reversível; isto é: em cada ponto da superfície da turbina, a temperatura do vapor é apenas infinitesimalmente superior a do líquido.

A linha 4-5, que representa os estados do vapor escoando através da turbina, é exatamente paralela à linha 1-2-3 que representa o processo de bombeamento (1-2) e os estados do líquido que escoar na periferia da turbina.

MÁQUINAS TÉRMICAS



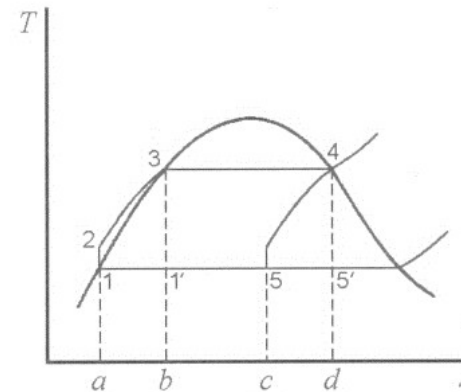
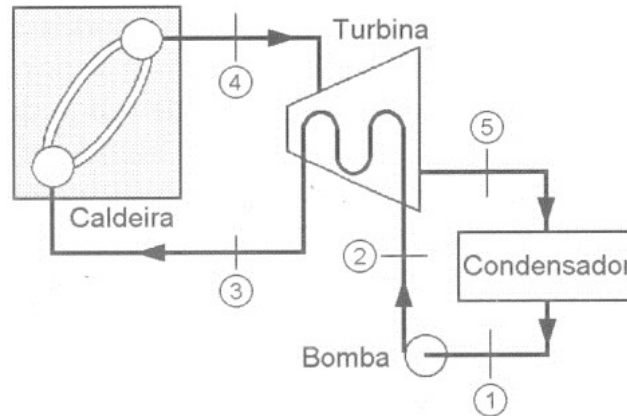
Portanto as áreas 2-3-b-a-2 e 5-4-d-c-5 são iguais e congruentes, e representam o calor transferido ao líquido e do vapor.

Calor é transferido **ao** fluido de trabalho a temperatura constante, no processo 3-4, e a área 3-4-d-b-3 representa esta transferência de calor.

Calor é transferido **do** fluido de trabalho no processo 5-1 e a área 1-5-c-a-1 representa esta transferência. Essa área é exatamente igual a área 1'-5'-d-b-1', que é o calor rejeitado no ciclo de Carnot relacionado, 1'-3-4-5'-1'.

O ciclo regenerativo ideal apresenta rendimento térmico exatamente igual ao rendimento do ciclo de Carnot que opera entre as mesmas temperaturas de fornecimento e rejeição de calor.

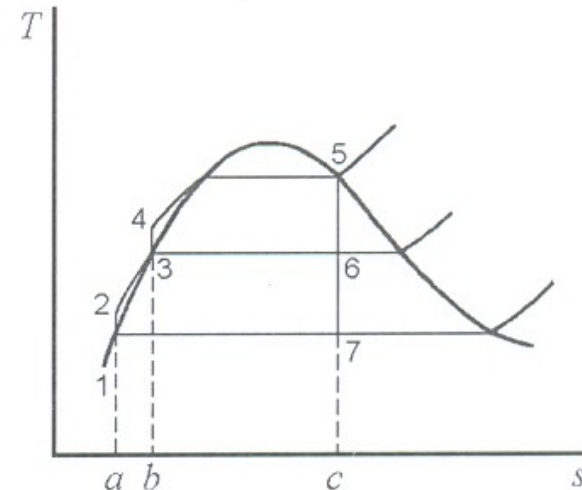
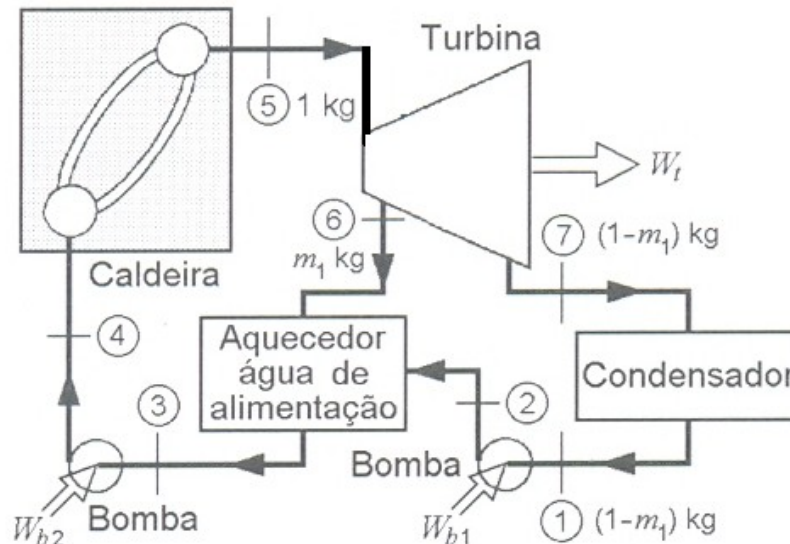
MÁQUINAS TÉRMICAS



Não é possível implantar este ciclo regenerativo ideal.

1. Não seria possível efetuar a transferência de calor necessária do vapor na turbina para a água líquida de alimentação.
2. O teor de umidade do vapor que deixa a turbina aumenta consideravelmente, em consequência da transferência de calor, e a desvantagem disto já foi anteriormente observada.

MÁQUINAS TÉRMICAS



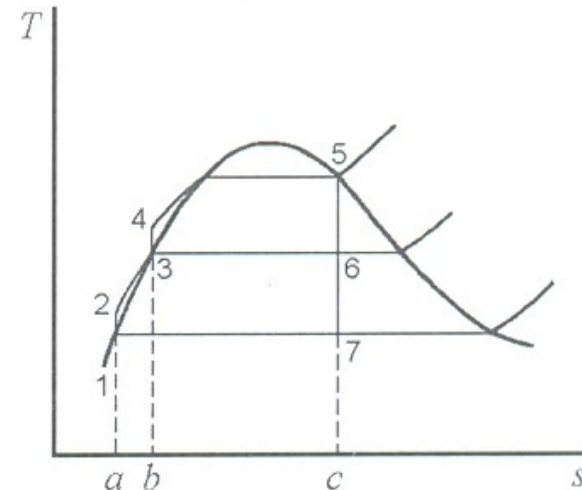
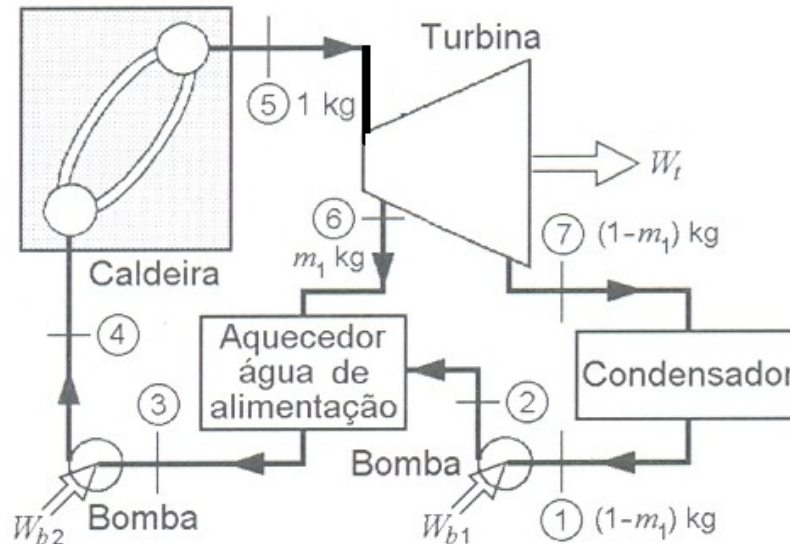
O ciclo regenerativo real está esquematizado na Figura.

Envolve a extração de uma parte do vapor que escoar na turbina, após ter sido parcialmente expandido, e a utilização de aquecedores da água de alimentação.

O vapor entra na turbina no estado 5. Após a expansão até o estado 6, parte do vapor é extraído e entra no aquecedor de água de alimentação.

O vapor não extraído expande na turbina até o estado 7 e é, então, levado ao condensador.

MÁQUINAS TÉRMICAS

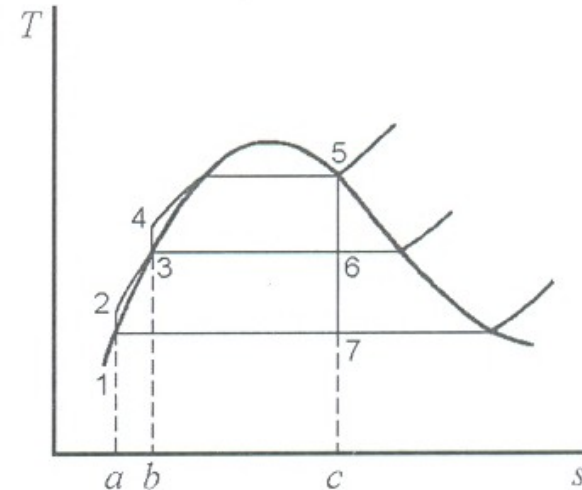
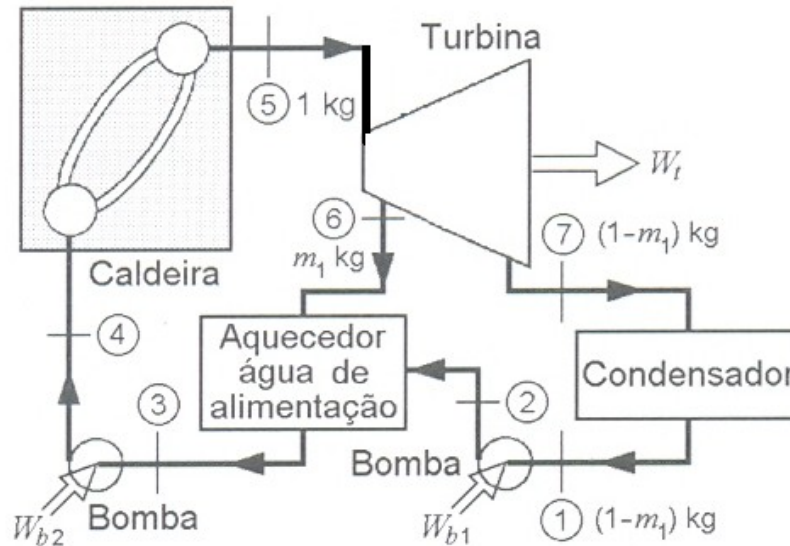


O líquido descarregado do condensador é bombeado para o aquecedor da água de alimentação onde ocorre a mistura com o vapor extraído da turbina.

A vazão de vapor extraído da turbina é a suficiente para fazer com que o líquido, que deixa o aquecedor de mistura, esteja no estado saturado (estado 3).

Como o líquido ainda não foi bombeado até a pressão da caldeira mas apenas até a pressão intermediária correspondente àquela no estado 6, torna-se necessária a instalação de uma outra bomba que transfere o líquido, que é descarregado do aquecedor da água de alimentação, para a caldeira.

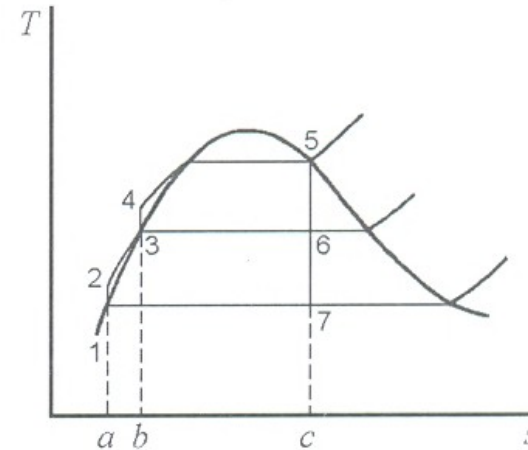
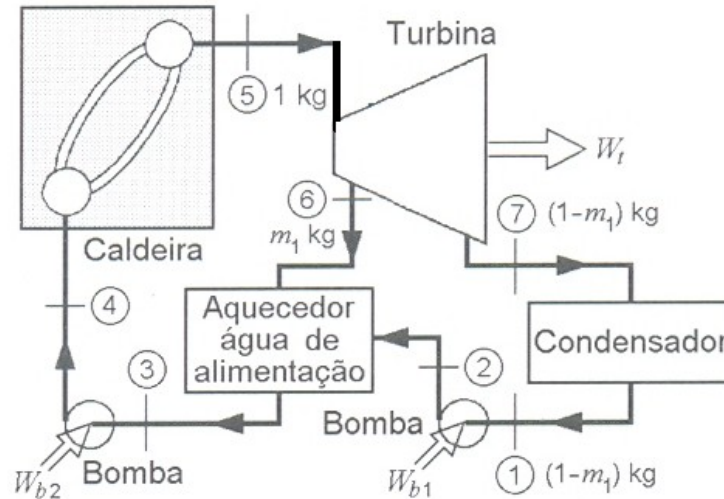
MÁQUINAS TÉRMICAS



O ponto significativo, deste ciclo, é o aumento da temperatura média na qual o calor é fornecido ao fluido de trabalho.

É difícil mostrar esse ciclo no diagrama $T-s$ porque a massa de vapor que escoia através dos vários componentes não é a mesma. O diagrama $T-s$ da Fig. mostra o estado do fluido nos vários pontos.

MÁQUINAS TÉRMICAS

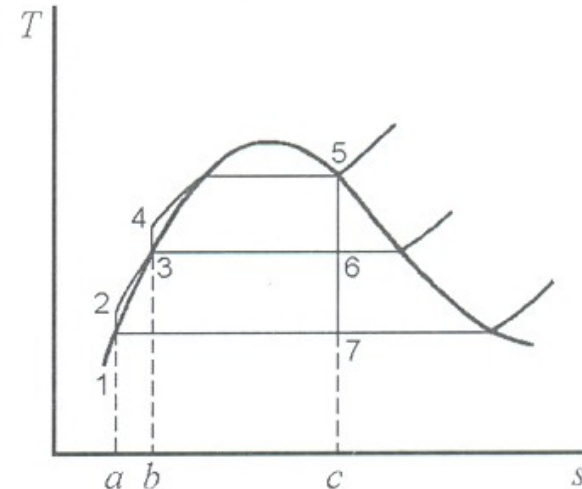
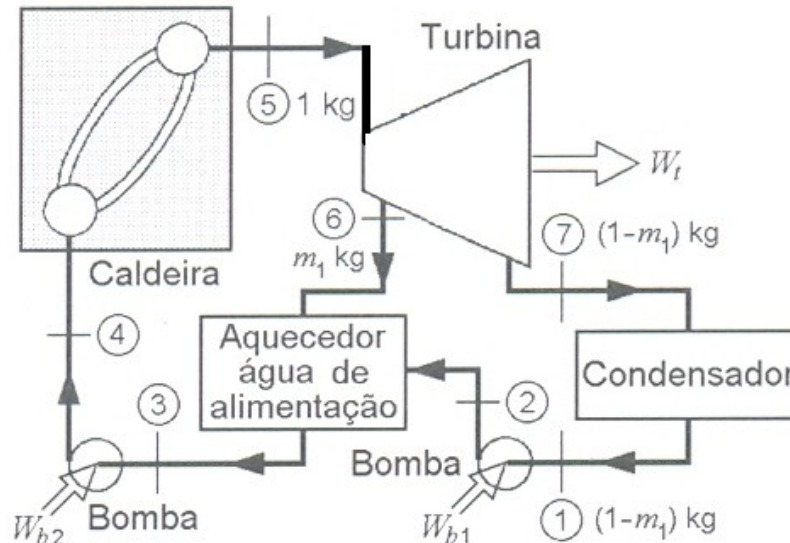


A área 4-5-c-b-4 representa o calor transferido por quilograma de fluido de trabalho.

O processo 7-1 é o processo de rejeição de calor, mas como todo o vapor gerado não passa através do condensador, a área 1-7-c-a-1 representa o calor transferido por quilograma de fluido que escoar no condensador. Esta área não representa o calor transferido por quilograma de fluido de trabalho que entra na turbina.

Entre os estados 6 e 7, somente uma parte do vapor gerado escoar através da turbina.

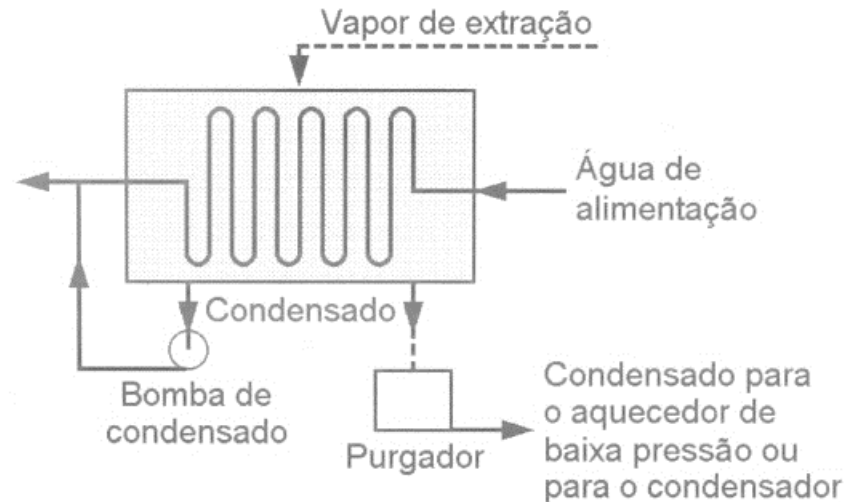
MÁQUINAS TÉRMICAS



Exemplo

Considere um ciclo regenerativo que utiliza água como fluido de trabalho. O vapor deixa a caldeira, e entra na turbina, a 4 MPa e 400°C. Após expansão até 400 kPa, parte do vapor é extraída da turbina com o propósito de aquecer a água de alimentação num aquecedor de mistura. A pressão no aquecedor da água de alimentação é igual a 400 kPa e a água na seção de saída deste equipamento está no estado líquido saturado a 400 kPa. O vapor não extraído é expandido, na turbina, até a pressão de 10 kPa. Determine o rendimento do ciclo.

MÁQUINAS TÉRMICAS

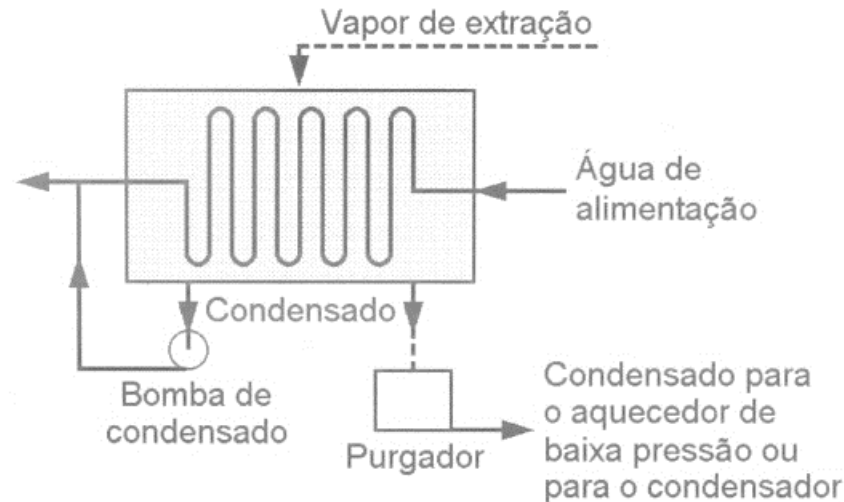


Anteriormente o vapor de extração e a água de alimentação eram misturados num aquecedor de água de alimentação.

Outro tipo de aquecedor de água de alimentação, conhecido como aquecedor de superfície, é aquele no qual o vapor e a água de alimentação não se misturam, porém o calor é transferido do vapor extraído, enquanto ele condensa na parte externa dos tubos, à água de alimentação (que escoar através dos tubos).

A Figura mostra o esboço de um aquecedor de superfície.

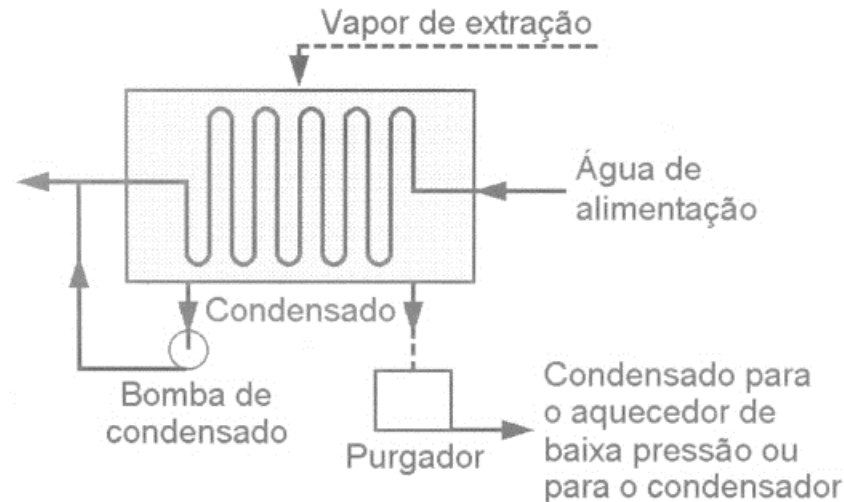
MÁQUINAS TÉRMICAS



Neste aquecedor a pressão do vapor pode ser diferente da pressão da água de alimentação.

O condensado pode ser bombeado para a tubulação de água de alimentação, ou pode ser removido através de um purgador (um aparelho que permite o líquido, e não o vapor, escoar para uma região de pressão inferior) para um aquecedor de baixa pressão ou para o condensador principal.

MÁQUINAS TÉRMICAS



Os aquecedores de mistura para a água de alimentação tem a vantagem, quando comparados com os aquecedores de superfície, de apresentar menor custo e melhores características na transferência de calor.

Porém, é necessário utilizar uma bomba para transportar o fluido de trabalho de um aquecedor de mistura para outro ou do aquecedor de mistura para a caldeira.

MÁQUINAS TÉRMICAS

É normal utilizar vários estágios de extração nas centrais térmicas, porém raramente são utilizados mais do que cinco estágios.

O número é determinado por considerações econômicas.

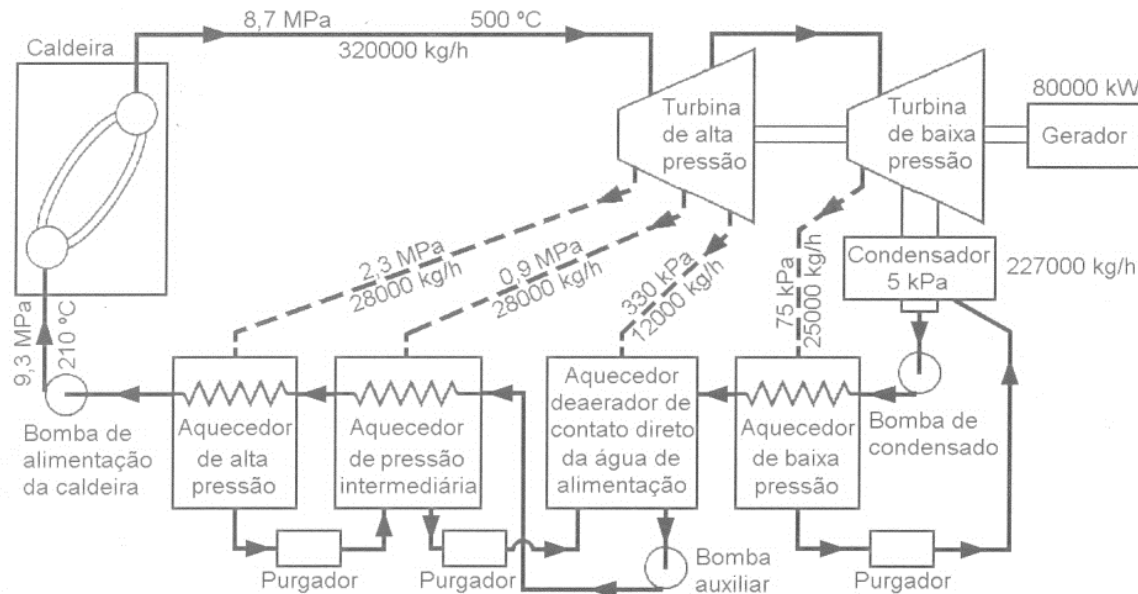
Utilizando um grande número de estágios de extração e aquecedores da água de alimentação, o rendimento do ciclo se aproxima daquele do ciclo regenerativo ideal, onde a água de alimentação entra na caldeira como líquido saturado a pressão máxima.

Na prática, isso não pode ser justificado economicamente, porque a economia alcançada com o aumento do rendimento não seria justificada pelo custo inicial do equipamentos adicionais (aquecedores da água de alimentação, tubulação etc.).

O que se observa é que se o número de aquecedores é dobrado, o ganho de rendimento não obedece a mesma proporção.

O ciclo Rankine usado nas térmicas de ciclo combinado (TG + TV) não usam aquecedores. Mais tarde veremos o motivo.

MÁQUINAS TÉRMICAS

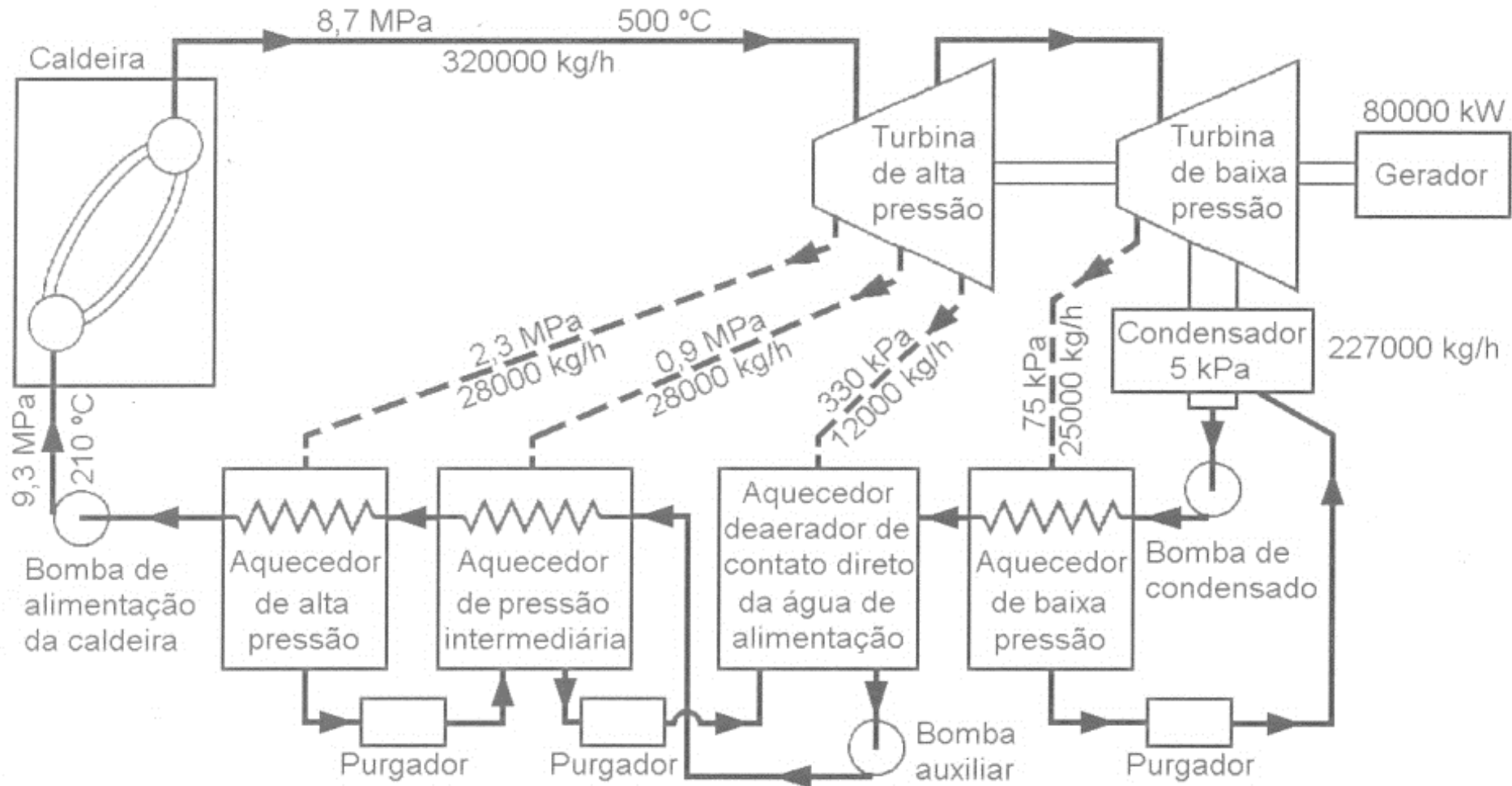


A Figura mostra um arranjo típico dos principais componentes de uma central real. Um dos aquecedores da água de alimentação de mistura é um aquecedor/desaerador da água de alimentação.

Este equipamento tem duplo objetivo: o aquecimento e a remoção de ar da água de alimentação. Sem a remoção do ar, pode ocorrer corrosão excessiva na caldeira.

O condensado do aquecedor a alta pressão escoar (através de um purgador) para um aquecedor intermediário; o condensado do aquecedor intermediário é drenado para o aquecedor desaerador e que o condensado do aquecedor a baixa pressão drena para o condensador.

MÁQUINAS TÉRMICAS



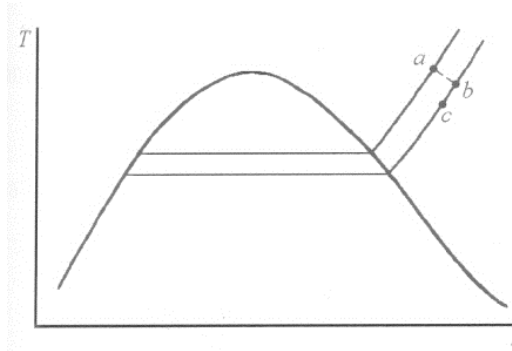
MÁQUINAS TÉRMICAS

AFASTAMENTO DOS CICLOS REAIS EM RELAÇÃO AOS CICLOS IDEAIS

Comentários relativos às formas pelas quais um ciclo real se afasta de um ciclo ideal (as perdas associadas com o processo de combustão são consideradas aparte).

As perdas mais importantes são vistas a seguir.

MÁQUINAS TÉRMICAS



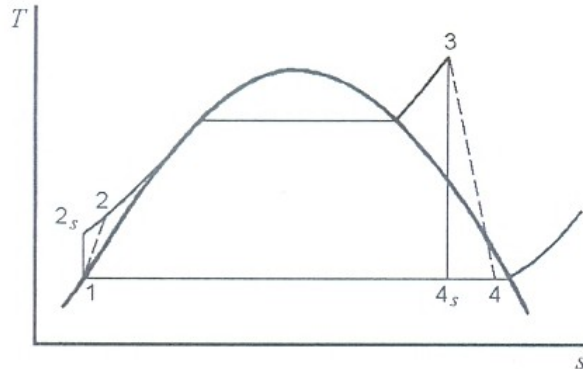
Perdas nas tubulações

A perda de carga, provocada pelo atrito, e a transferência de calor ao ambiente são as perdas mais importantes nas tubulações.

Na tubulação que liga a caldeira a turbina, se ocorrerem somente efeitos de atrito, os estados *a* e *b* representariam, respectivamente, os estados do vapor que deixa a caldeira e entra na turbina. O calor transferido ao ambiente, a pressão constante, pode ser representado pelo processo *bc*. Os dois fenômenos diminuem a capacidade da turbina produzir trabalho.

Uma perda análoga é a perda de carga na caldeira. Devido a esta perda, a água que entra na caldeira deve ser bombeada até uma pressão mais elevada do que a pressão desejada para o vapor que deixa a caldeira. Assim, será necessário um trabalho adicional no bombeamento do fluido de trabalho.

MÁQUINAS TÉRMICAS



Definição de eficiência isoentrópica da turbina

$$w_t = h_3 - h_4$$

$$\eta_{turbina} = \frac{w_t}{(h_3 - h_{4_s})}$$

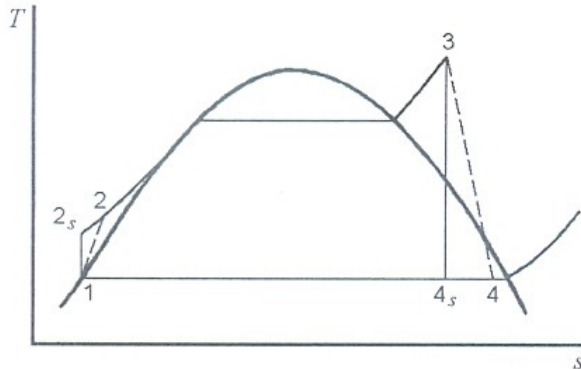
Perdas na turbina

As perdas principais na turbina são aquelas associadas ao escoamento do fluido de trabalho através da turbina. A transferência de calor para o meio também representa uma perda, mas apresenta importância secundária.

O ponto 4_s representa o estado após uma expansão isoentrópica e o ponto 4 representa o estado real do vapor na saída da turbina.

Os sistemas de controle também podem provocar uma perda na turbina, particularmente se for usado um processo de estrangulamento para controlar a turbina.

MÁQUINAS TÉRMICAS



Definição de eficiência isoentrópica da bomba

$$w_b = h_2 - h_1$$

$$\eta_{bomba} = \frac{(h_{2s} - h_1)}{w_b} = \frac{v(p_2 - p_1)}{w_b}$$

Perdas na bomba

As perdas na bomba são análogas àsquelas da turbina e decorrem principalmente das irreversibilidades associadas ao escoamento do fluido.

A transferência de calor é, usualmente, uma perda secundária.

Perdas no condensador

As perdas no condensador são relativamente pequenas.

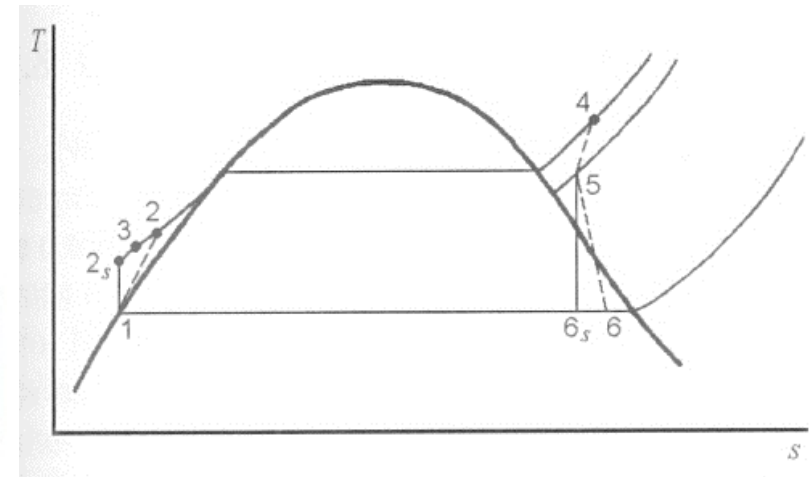
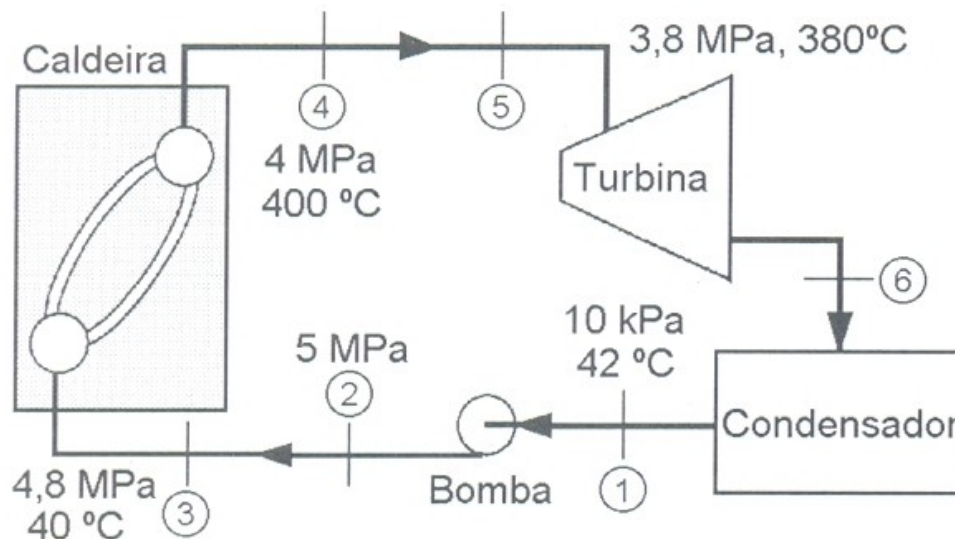
Uma dessas perdas é o resfriamento abaixo da temperatura de saturação do líquido que deixa o condensador, ou sub-resfriamento.

Isso representa uma perda, porque é necessário uma troca de calor adicional para trazer a água até a sua temperatura de saturação.

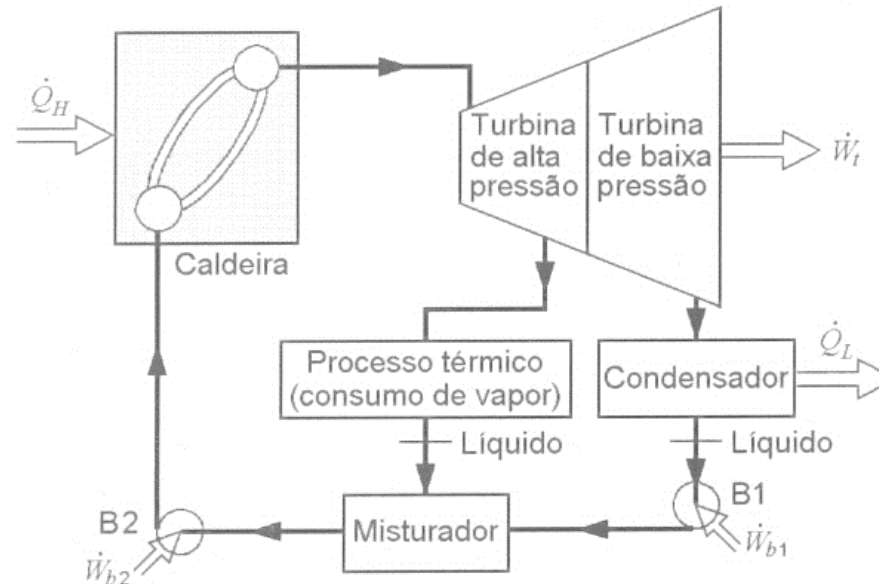
MÁQUINAS TÉRMICAS

Exemplo

Uma central térmica a vapor opera segundo o ciclo indicado na Figura. Sabendo que a eficiência da turbina é 86% e que a eficiência da bomba é 80%, determine o rendimento térmico deste ciclo.



MÁQUINAS TÉRMICAS



COGERAÇÃO

Existem indústrias que utilizam ciclo de potência a vapor para gerar eletricidade e o processo produtivo requer uma fonte de vapor ou de água quente.

Pode-se utilizar o vapor expandido até uma pressão intermediária, numa turbina de alta pressão do ciclo de potência, como fonte de energia do processo produtivo. Assim não será necessária a construção e utilização de uma segunda caldeira dedicada unicamente ao processo produtivo.

Este tipo de aplicação é denominada cogeração: geração concomitante de energia elétrica e vapor.

ASPECTOS GERAIS DO CICLO RANKINE

1. A água requer tratamento de desmineralização.
2. No passado usava-se carvão, mas está sendo abandonado (meio ambiente).
3. É usado em navios petroleiros e navios aeródromos.
4. Usado também em usinas nucleares.
5. Consegue-se potências superiores a 1 GW com uma única turbina.
6. Também chamados de combustão externa.
7. O fluido de trabalho pode ser um fluido orgânico.
8. Usado nas usinas de açúcar e álcool.
9. É o ciclo de potência mais antigo.
10. Responsável pela revolução industrial do século XVIII.