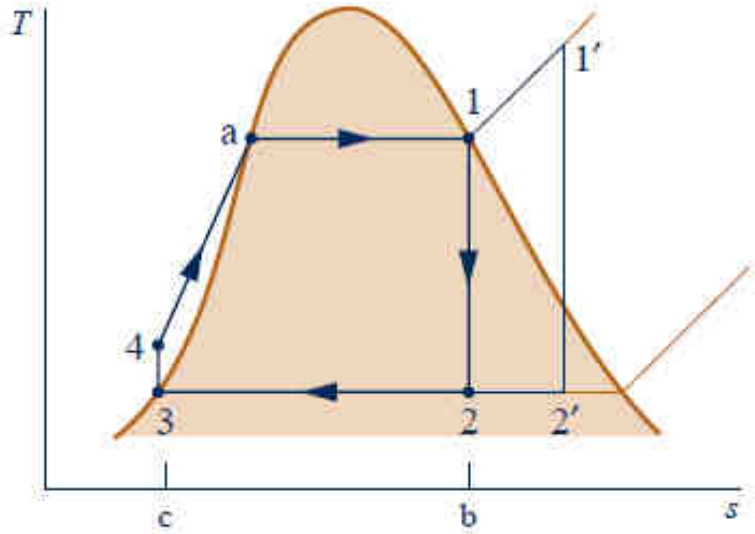
CAPÍTULO 8 – SISTEMAS DE POTÊNCIA A VAPOR

DISCIPLINA: TERMODINÂMICA II

PROF. DR. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA

8.3 – MELHORIA DO DESEMPENHO

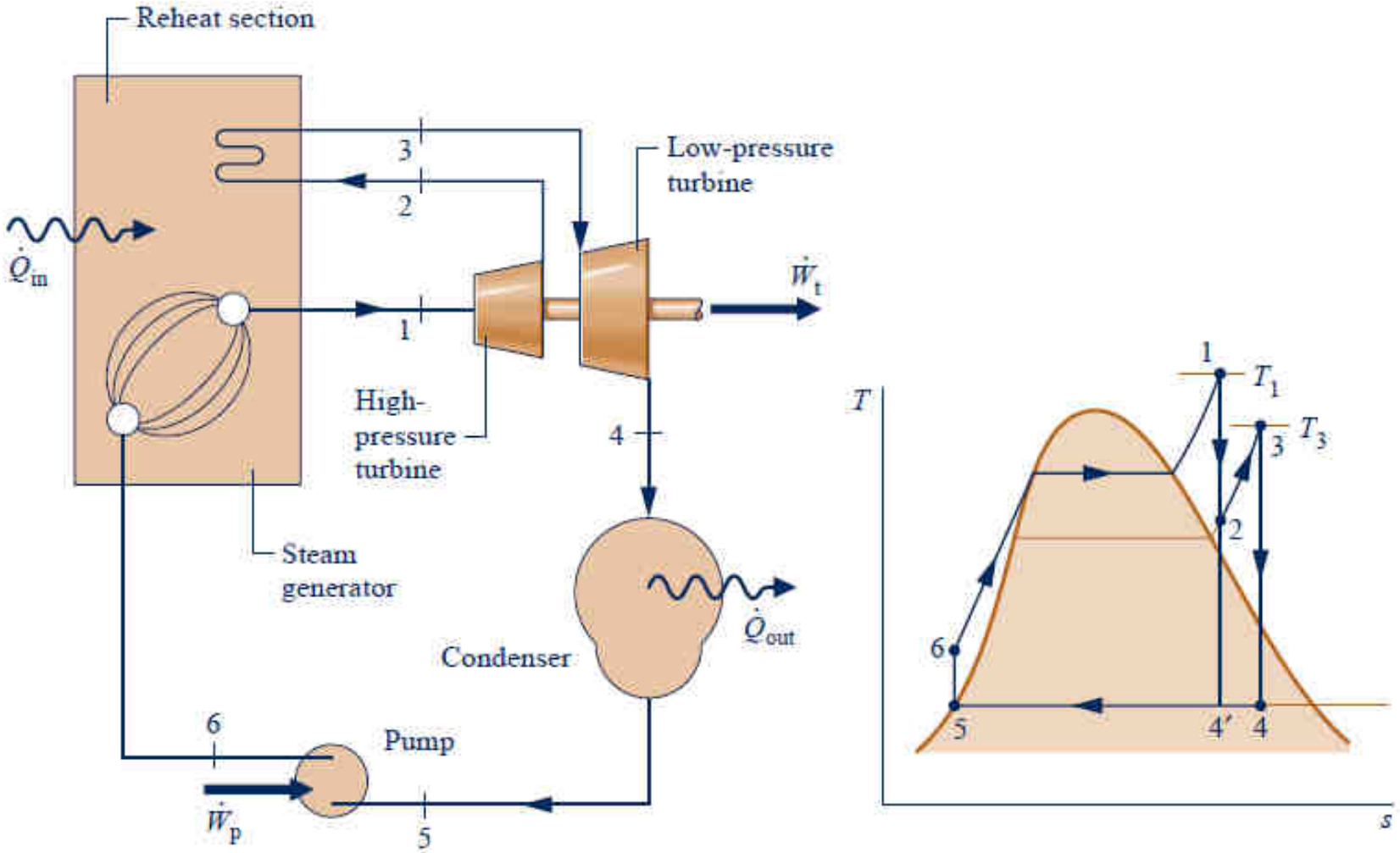


SUPERAQUECIMENTO

- Pode-se fornecer energia adicional para o vapor d'água na caldeira (superaquecedor) para que se tenha vapor superaquecido na entrada da turbina.

- A temperatura média de adição de calor aumenta (aumento de eficiência).

- O título na saída da turbina aumenta (pode ocorrer vapor superaquecido).



REAQUECIMENTO COM SUPERAQUECIMENTO

- Expansão no primeiro estágio da turbina (processo 1-2) até uma pressão intermediária entre a pressão da caldeira e do condensador.

- Reaquecimento do vapor a pressão constante no gerador de vapor (processo 2-3).

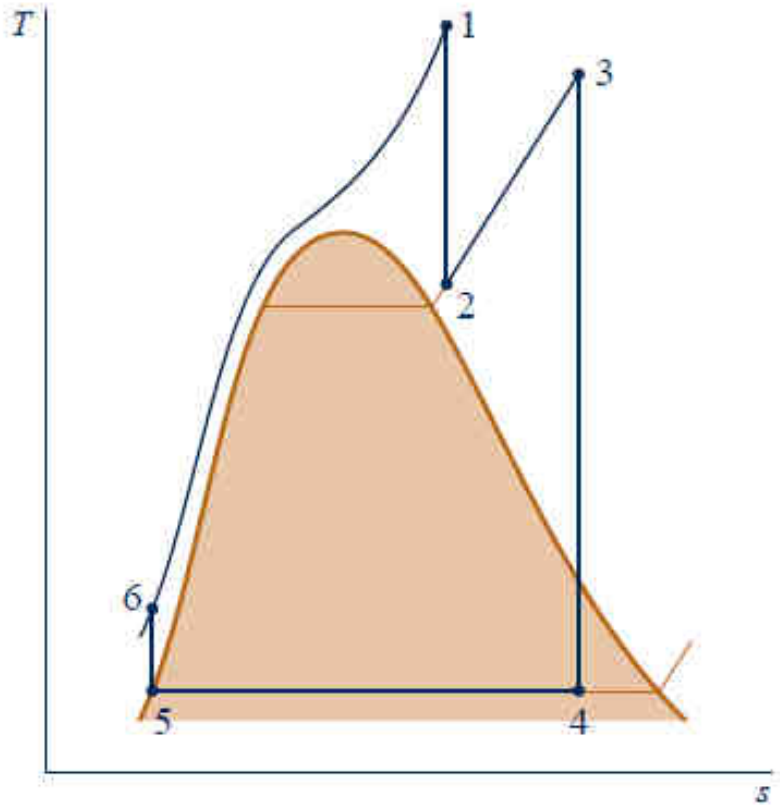
- Expansão no segundo estágio da turbina (processo 3-4) até a pressão do condensador.

- A vantagem do reaquecimento é aumentar o título na saída da turbina (compare 4 e 4'). $\dot{W}_{ciclo}$, $\dot{Q}_{ent}$ e η devem ser recalculados:

$$\frac{\dot{W}_{ciclo}}{\dot{m}} = \frac{\dot{W}_{t1}}{\dot{m}} + \frac{\dot{W}_{t2}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{b}}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)$$

$$\frac{\dot{Q}_{ent}}{\dot{m}} = (h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{ciclo}/\dot{m}}{\dot{Q}_{ent}/\dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)}$$

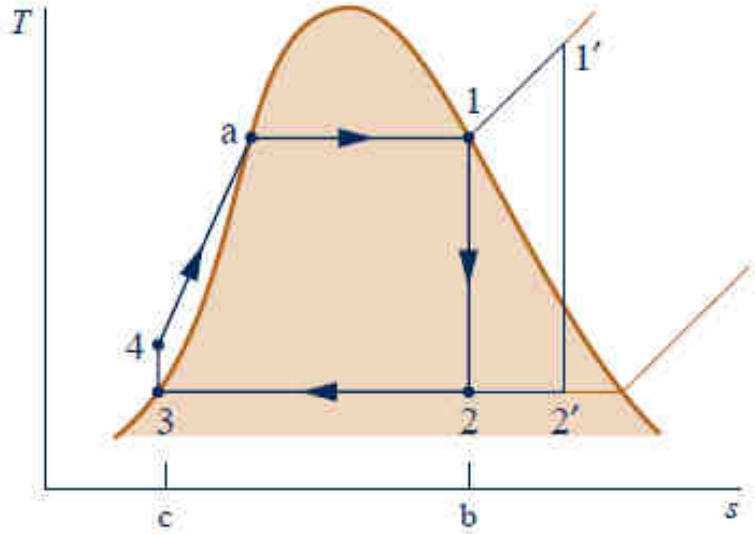


- Ponto crítico da água (22,1 MPa, 374 ^{o}C)
- A melhoria dos materiais e processos de fabricação tem permitido um aumento nas temperaturas no ciclo e na pressão do gerador de vapor, aumentando a eficiência térmica.
- Isso reduz o consumo de combustível e os impactos ambientais.
- Entretanto, o custo é mais elevado devido à utilização de equipamentos especiais que suportam grandes tensões.

CICLO SUPERCRÍTICO

- Plantas a vapor supercríticas: 30 MPa e 600 ^{o}C.
- Plantas a vapor ultra supercríticas: 35 MPa e 750 ^{o}C.

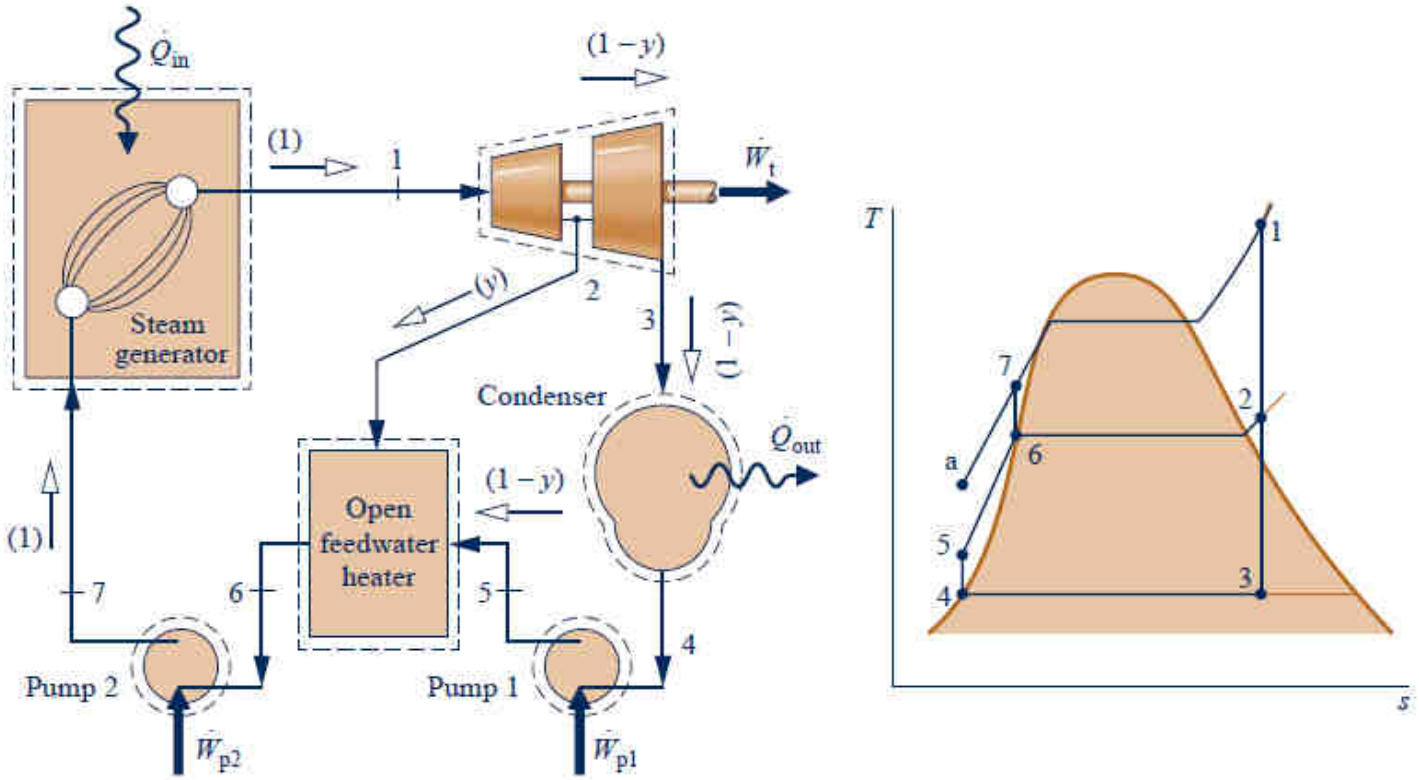
8.4 – MELHORIA NO DESEMPENHO - CICLO DE POTÊNCIA A VAPOR REGENERATIVO



- Sem regeneração, o líquido que entra na caldeira seria aquecido de 4 até a.
- Com regeneração, o líquido entraria na caldeira em algum estado entre 4 e a.
- A temperatura média de adição de calor aumenta e o consumo de combustível diminui.

AQUECEDORES DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO ABERTOS

- É um trocador de calor de contato direto onde correntes a diferentes temperaturas misturam-se para formar uma corrente a uma temperatura intermediária.



- Vapor d'água entra na turbina de primeiro estágio no estado 1 e se expande até o estado 2, quanto uma fração do escoamento total y é extraída (sangrada) para um aquecedor de água de alimentação aberto operando na pressão de extração p_2.

- Líquido saturado em 4 é bombeado até a pressão de extração p_5 e introduzido no aquecedor de alimentação. Uma única corrente misturada deixa o aquecedor de água de alimentação no estado 6 a p_6 como líquido saturado.

- O fluido de trabalho seria aquecido de 7 a 1 ao invés de a a 1 (economia de combustível e aumento da eficiência térmica)

- Deve ser notado que uma parte do escoamento total se expande através da turbina de segundo estágio de modo que menos trabalho seria desenvolvido.

- Na prática as condições de operação são escolhidas de tal maneira que o calor líquido adicionado supera o decréscimo do trabalho líquido desenvolvido.

- Para um volume de controle envolvendo os dois estágios da turbina, o balanço de massa em regime permanente se reduz a:

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_1$$

- Definindo a fração do escoamento total extraída no estado 2 de $y = \dot{m}_2 / \dot{m}_1$, a fração do escoamento total que passa através do segundo estágio da turbina é:

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1} \Rightarrow \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = 1 - y$$

- O valor da fração y pode ser determinado por um balanço de massa e energia em um volume de controle em torno do aquecedor de alimentação:

$$\dot{m}_2 h_2 + \underbrace{\dot{m}_5}_{=\dot{m}_3} h_5 = \underbrace{\dot{m}_6}_{=\dot{m}_1} h_6 \Rightarrow \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_5 = \dot{m}_1 h_6 \Rightarrow \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} h_2 + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} h_5 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1} h_6$$

$$yh_2 + (1-y)h_5 = h_6 \Rightarrow yh_2 + h_5 - yh_5 = h_6 \Rightarrow y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5}$$

- Trabalho total desenvolvido pela turbina por unidade de massa passando através da turbina de primeiro estágio:

$$\dot{W}_t = \dot{W}_{t1} + \dot{W}_{t2} = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + \dot{m}_3(h_2 - h_3) \Rightarrow \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1}(h_1 - h_2) + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}(h_2 - h_3)$$

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_1} = (h_1 - h_2) + (1-y)(h_2 - h_3)$$

- Trabalho total de bombeamento por unidade de massa passando através da turbina de primeiro estágio:

$$\dot{W}_b = \dot{W}_{b1} + \dot{W}_{b2} = \dot{m}_3(h_5 - h_4) + \dot{m}_1(h_7 - h_6) \Rightarrow \frac{\dot{W}_b}{\dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}(h_5 - h_4) + \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1}(h_7 - h_6)$$

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}_1} = (1 - y)(h_5 - h_4) + (h_7 - h_6)$$

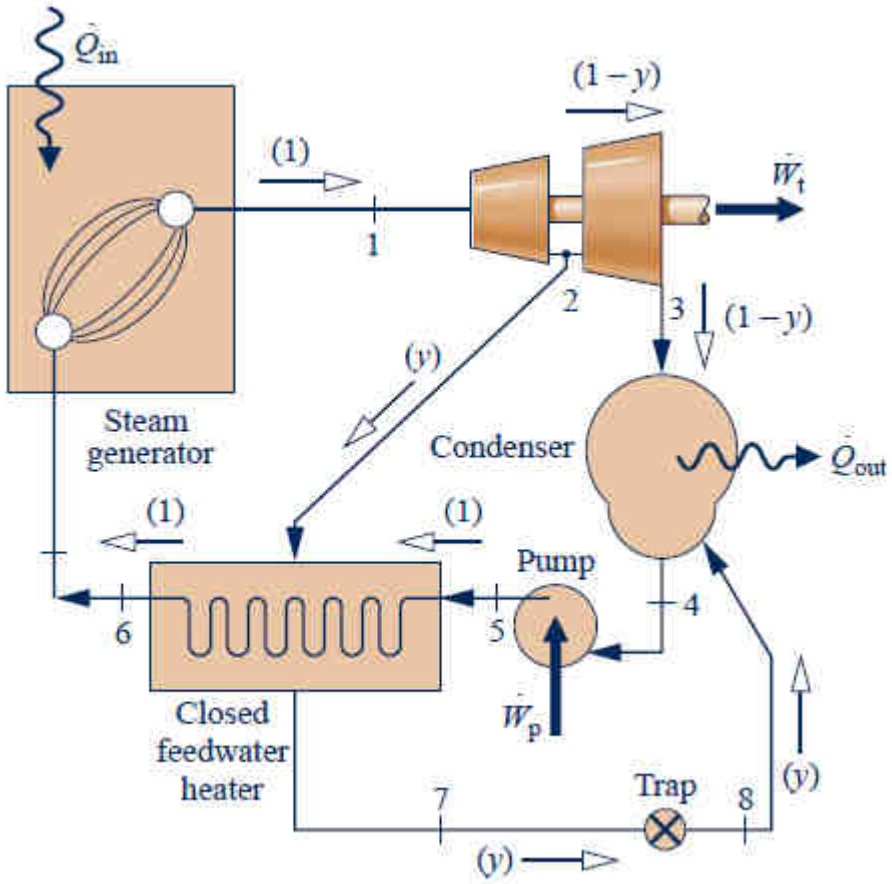
- Calor fornecido ao fluido de trabalho no gerador de vapor por unidade de massa passando através da turbina de primeiro estágio:

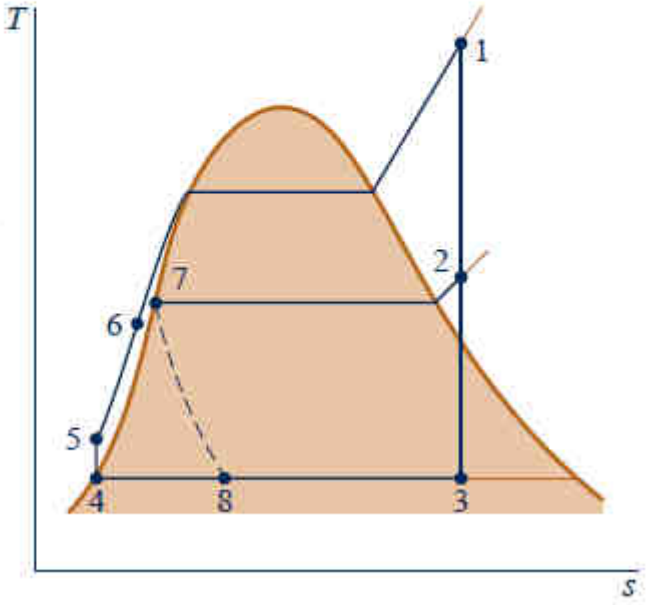
$$\dot{Q}_{ent} = \dot{m}_1(h_1 - h_7) \Rightarrow \frac{\dot{Q}_{ent}}{\dot{m}_1} = h_1 - h_7$$

- Calor rejeitado pelo fluido de trabalho para a água de arrefecimento por unidade de massa passando através da turbina de primeiro estágio:

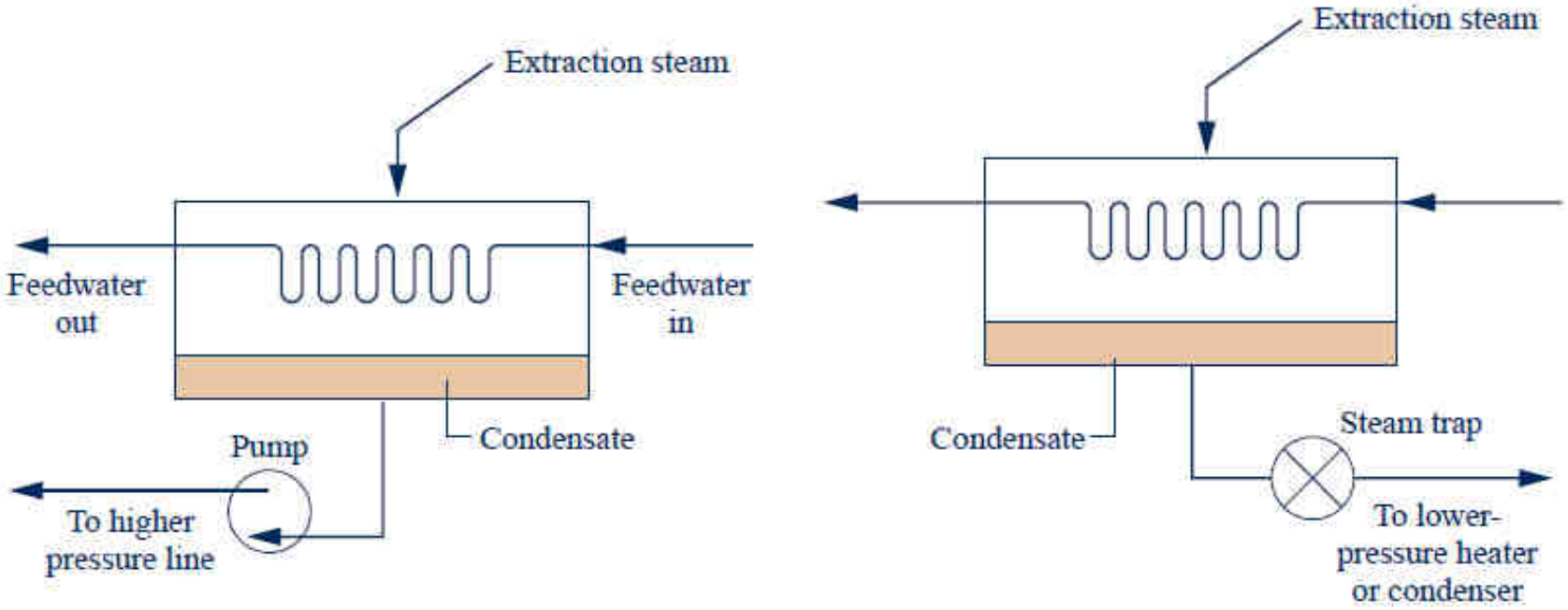
$$\dot{Q}_{sai} = \dot{m}_3(h_3 - h_4) \Rightarrow \frac{\dot{Q}_{sai}}{\dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}(h_3 - h_4) \Rightarrow \frac{\dot{Q}_{sai}}{\dot{m}_1} = (1 - y)(h_3 - h_4)$$

AQUECEDORES DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO FECHADOS





- Aquecedores fechados são recuperadores do tipo casca e tubo nos quais a temperatura da água de alimentação aumenta à medida que o vapor extraído condensa no exterior dos tubos que transportam a água de alimentação.



- Já que as duas correntes não se misturam, elas podem se encontrar a diferentes pressões.

- No primeiro diagrama o condensado é extraído por uma bomba cuja função é bombeá-lo para um ponto de pressão mais elevada no ciclo.

- No segundo diagrama o condensado passará através de um purgador para dentro de um aquecedor de água de alimentação, operando a uma pressão mais baixa ou para dentro do condensador.

- Um purgador é um tipo de válvula que permite a passagem apenas de líquido para uma região de pressão mais baixa (o processo é isoentálpico).

- A fração do escoamento total extraída, y, pode ser determinada através da aplicação dos princípios de conservação de massa e de energia em um volume de controle em torno do aquecedor de água de alimentação fechado:

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_7}$$

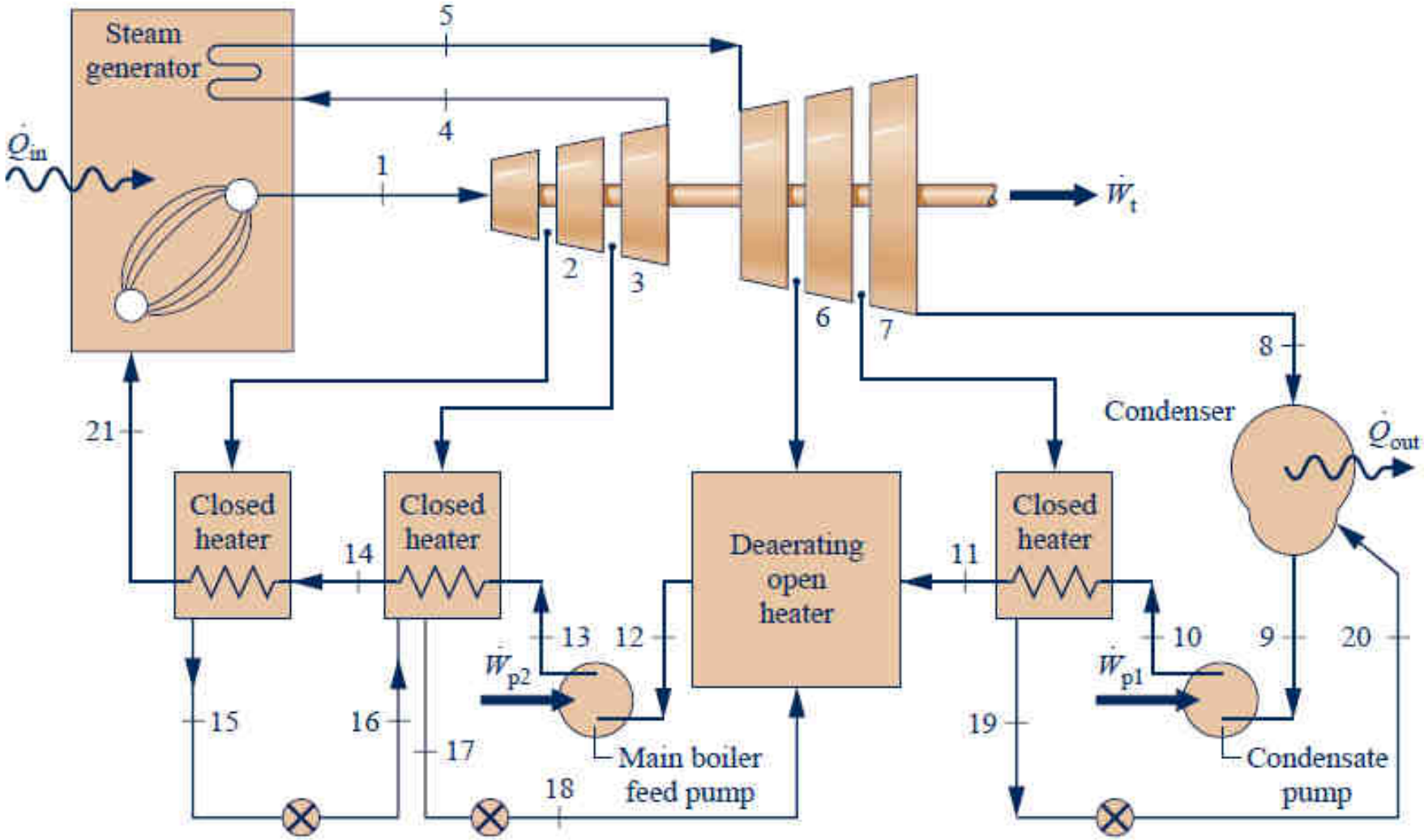
AQUECEDORES DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO MÚLTIPLOS

- A eficiência térmica do ciclo regenerativo pode ser aumentada pela incorporação de vários aquecedores de água de alimentação a pressões adequadamente escolhidas.

- O número de aquecedores de água de alimentação utilizados é baseado em considerações econômicas.

- Aumentos incrementais na eficiência térmica alcançada com cada aquecedor adicional devem justificar o aumento de custo (aquecedor, tubulações, bombas, etc.).

- Os projetistas de instalações de potência utilizam programas de computador para simular o desempenho termodinâmico e econômico de diferentes projetos, de forma a ajudá-los a decidir sobre o número de aquecedores a ser utilizado, os tipos de aquecedores e as pressões nas quais eles devem operar.


Steam generator
$\dot{Q}_{in}$
$\dot{W}_t$
$\dot{Q}_{out}$
Condenser
Closed heater
Closed heater
Deaerating open heater
Closed heater
$\dot{W}_{p2}$
$\dot{W}_{p1}$
Main boiler feed pump
Condensate pump
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21

- Comparando os aquecedores abertos e fechados:

1. Os aquecedores abertos são simples e baratos, além de apresentarem boas características de transferência de calor.

2. Eles trazem a água de alimentação até um estado de saturação, mas para cada aquecedor é necessária uma bomba para processar a água de alimentação.

3. Os aquecedores fechados são mais complexos por causa da tubulação interna e, portanto, são mais caros. A transferência de calor nesses aquecedores é menos efetiva, uma vez que as duas correntes não entram em contato direto.

4. Entretanto, os aquecedores fechados não exigem uma bomba separada para cada aquecedor, uma vez que o vapor extraído e a água de alimentação podem estar a pressões diferentes.

8.5 – OUTROS ASPECTOS DO CICLO DE POTÊNCIA A VAPOR

FLUIDO DE TRABALHO

- Água desmineralizada (pura e de maior qualidade) é utilizada na maioria dos sistemas de potência a vapor.

- Com a água a potência de bombeamento é tipicamente baixa e as técnicas de superaquecimento, reaquecimento e regeneração são efetivas para aumentar a eficiência da planta de potência.

- A água é satisfatória para ciclos com alta temperatura média de adição de calor.

- Os ciclos de Rankine orgânicos empregam substâncias orgânicas (pentano, misturas de hidrocarbonetos, refrigerantes, amônia) que possuem ponto de ebulição relativamente baixo.

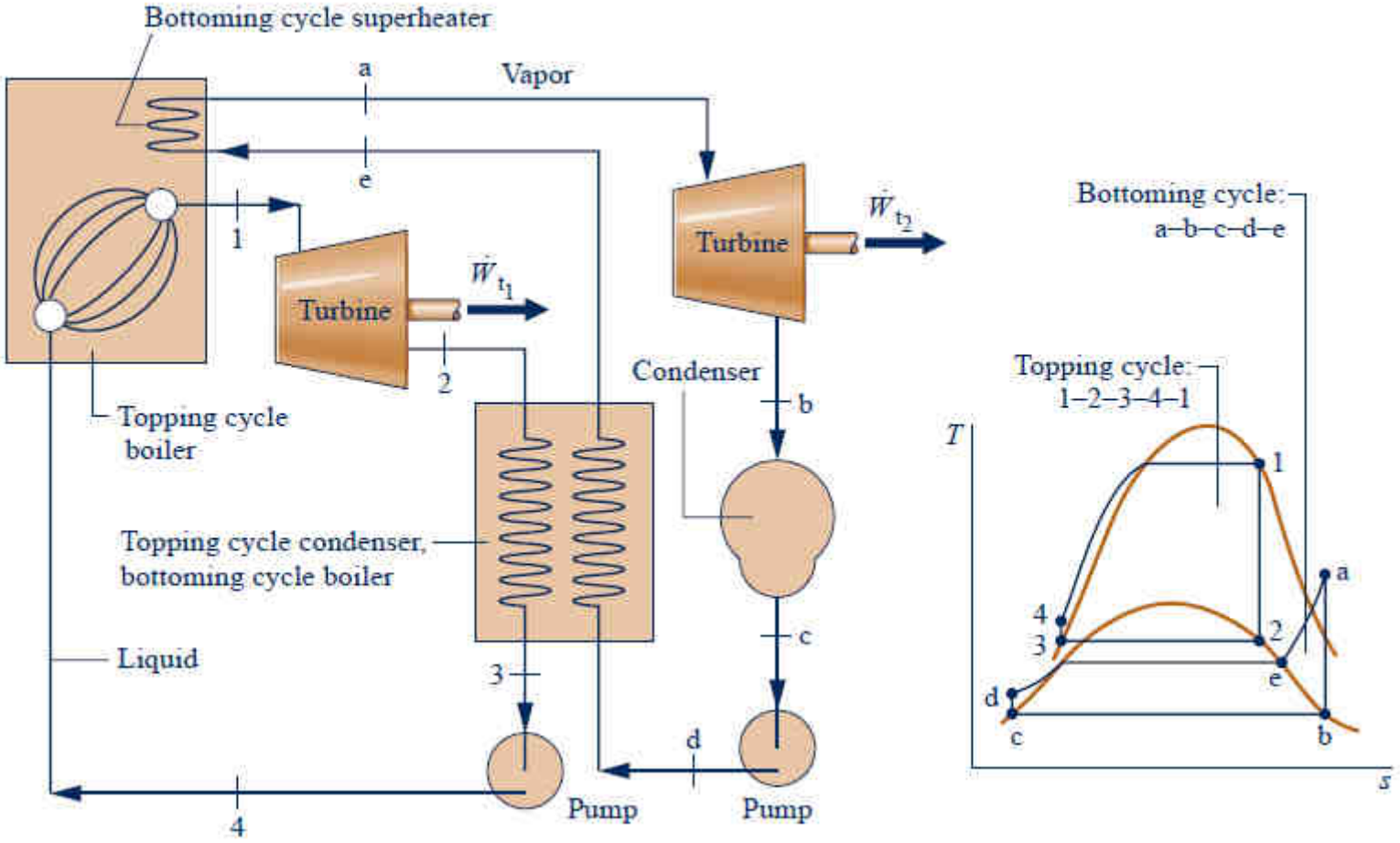
- Essas substâncias permitem ao ciclo de Rankine produzir potências a partir de fontes de baixa temperatura, como por exemplo, calor residual das indústrias, gases de escape de veículos, água quente geotérmica e energia solar.

- Um ciclo a vapor binário combina dois ciclos a vapor, de modo que a descarga de energia do ciclo de alta temperatura seja à entrada de energia do ciclo de baixa temperatura.

- Usualmente os fluidos são a água e uma substância orgânica.

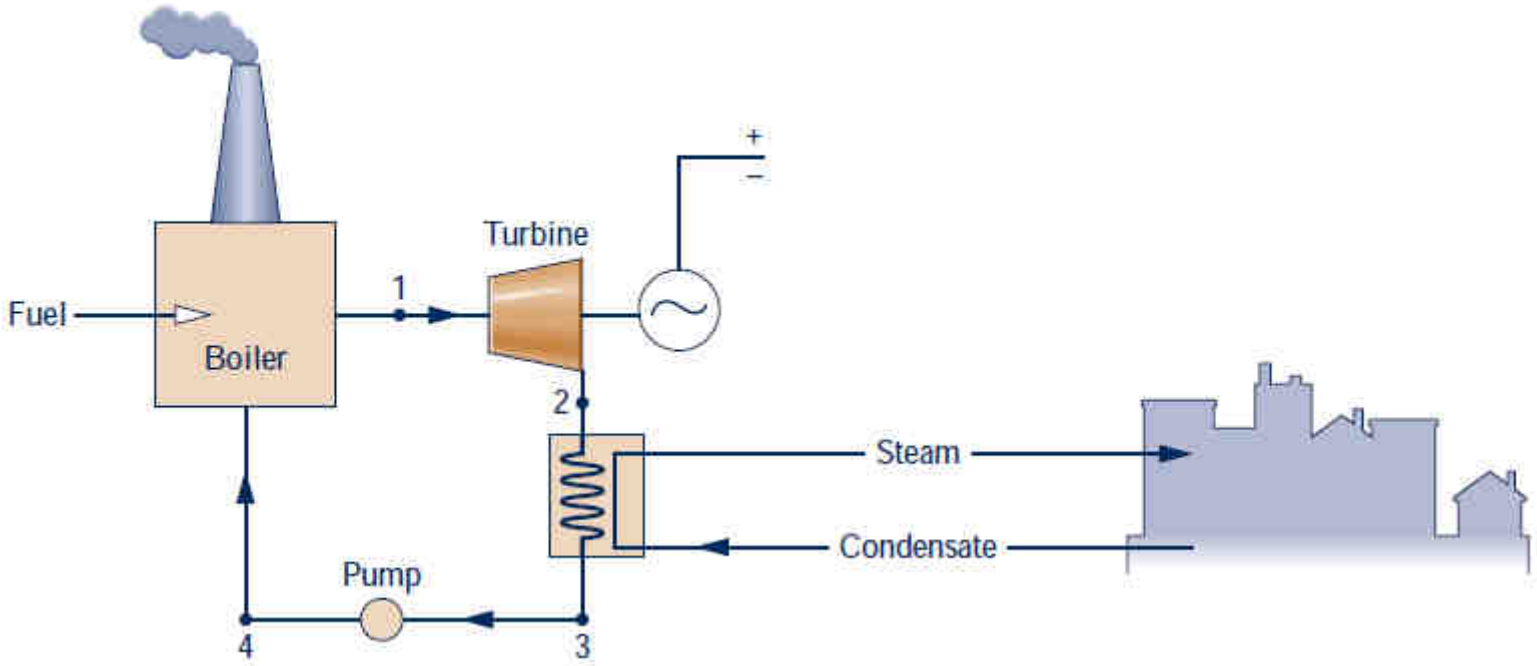
- Os dois ciclos são normalmente conectados através de um trocador de calor intermediário, que serve de condensador para o ciclo de temperatura mais alta e de caldeira para o ciclo de temperatura mais baixa.

- No ciclo combinado abaixo, o ciclo da esquerda é o ciclo de alta temperatura e o ciclo da direita o ciclo de baixa temperatura. No caso do ciclo a baixa temperatura, nota-se a inclusão do reaquecimento do fluido de trabalho.


Bottoming cycle superheater
a
Vapor
e
1
Turbine
$\dot{W}_{t_1}$
2
Topping cycle
boiler
Topping cycle condenser,
bottoming cycle boiler
Liquid
3
4
Pump
Turbine
$\dot{W}_{t_2}$
Condenser
b
c
d
Pump
Bottoming cycle:
a–b–c–d–e
Topping cycle:
1–2–3–4–1
T
s
1
2
3
4
a
b
c
d
e

COGERAÇÃO

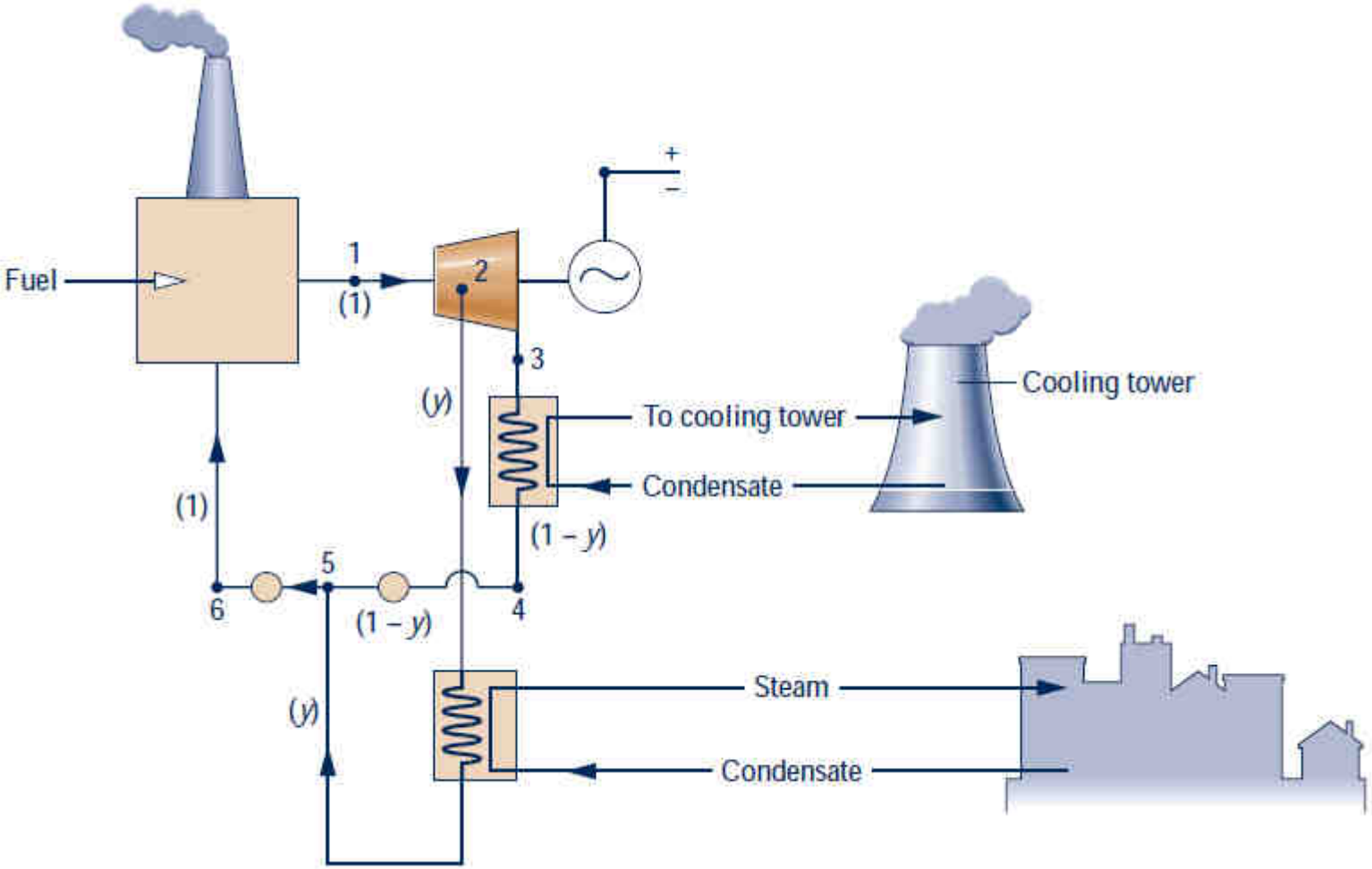
- É uma das maneiras de se utilizar combustíveis de maneira mais eficiente, sendo conhecidos como sistemas combinados de calor e energia.



- São sistemas integrados que fornecem simultaneamente dois produtos de valor, eletricidade e vapor (ou água quente) a partir de um único combustível de entrada, sendo uma alternativa mais econômica do que produzir eletricidade e vapor separadamente.

- São sistemas amplamente utilizados em indústrias, refinarias, fábricas de papel, indústrias de alimentos e outras que requerem vapor de processo, água quente e eletricidade para máquinas.

- O aquecimento urbano é uma importante aplicação da cogeração. Essas usinas fornecem vapor ou água quente para aquecimento de espaços e outras necessidades térmicas juntamente com eletricidade para uso doméstico, comercial e industrial.


Fuel
1
(1)
2
3
+
−
(y)
To cooling tower
Condensate
Cooling tower
(1)
(1 − y)
5
6
(1 − y)
4
(y)
Steam
Condensate

CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO

- A concentração de CO_2 na atmosfera é consequência da queima de combustíveis fósseis (plantas a vapor por queima de carvão).

- O excesso de CO_2 na atmosfera contribui para alterações climáticas.

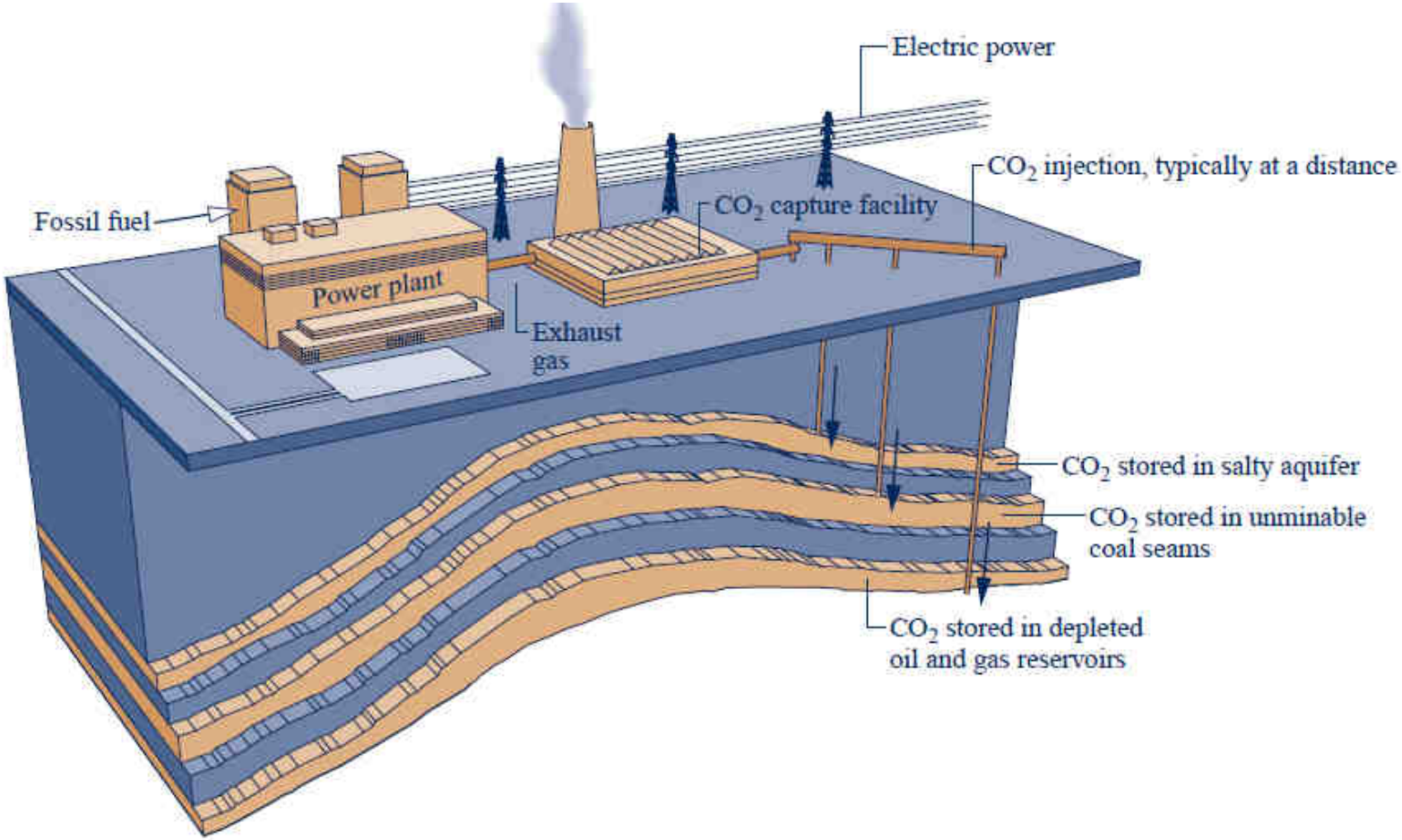
- Há um consenso de que medidas devem ser tomadas para reduzir as emissões.

- Dentre as medidas tem-se:

1. Utilização dos combustíveis fósseis de maneira mais eficiente (aumento da eficiência térmica).
2. Utilização de energia renováveis (plantas eólicas, hidrelétricas e solares).
3. Utilização de mais gás natural (baixa carbono) ao invés de carvão.

- Mas como as reservas de combustíveis fósseis ainda estarão disponíveis por muitos anos, é imperativo controlar a emissão de CO_2.

- Uma metodologia de interesse é a captura e armazenamento de CO_2.



- Tecnologia recente e que enfrenta grandes obstáculos:

1. Incertezas de quanto tempo o gás pode ficar armazenado.
2. Possível impacto ambiental na natureza.
3. Os custos para captura, transporta e armazenamento são elevados.
4. Entretanto, é a principal estratégias para reduzir as emissões de CO_2.
5. Área propícia a inovações.
6. Sugestão de leitura: O que fazer com o CO_2?