


---

# MOTORES TÉRMICOS

AULA 3-7 – SISTEMAS DE POTÊNCIA A VAPOR

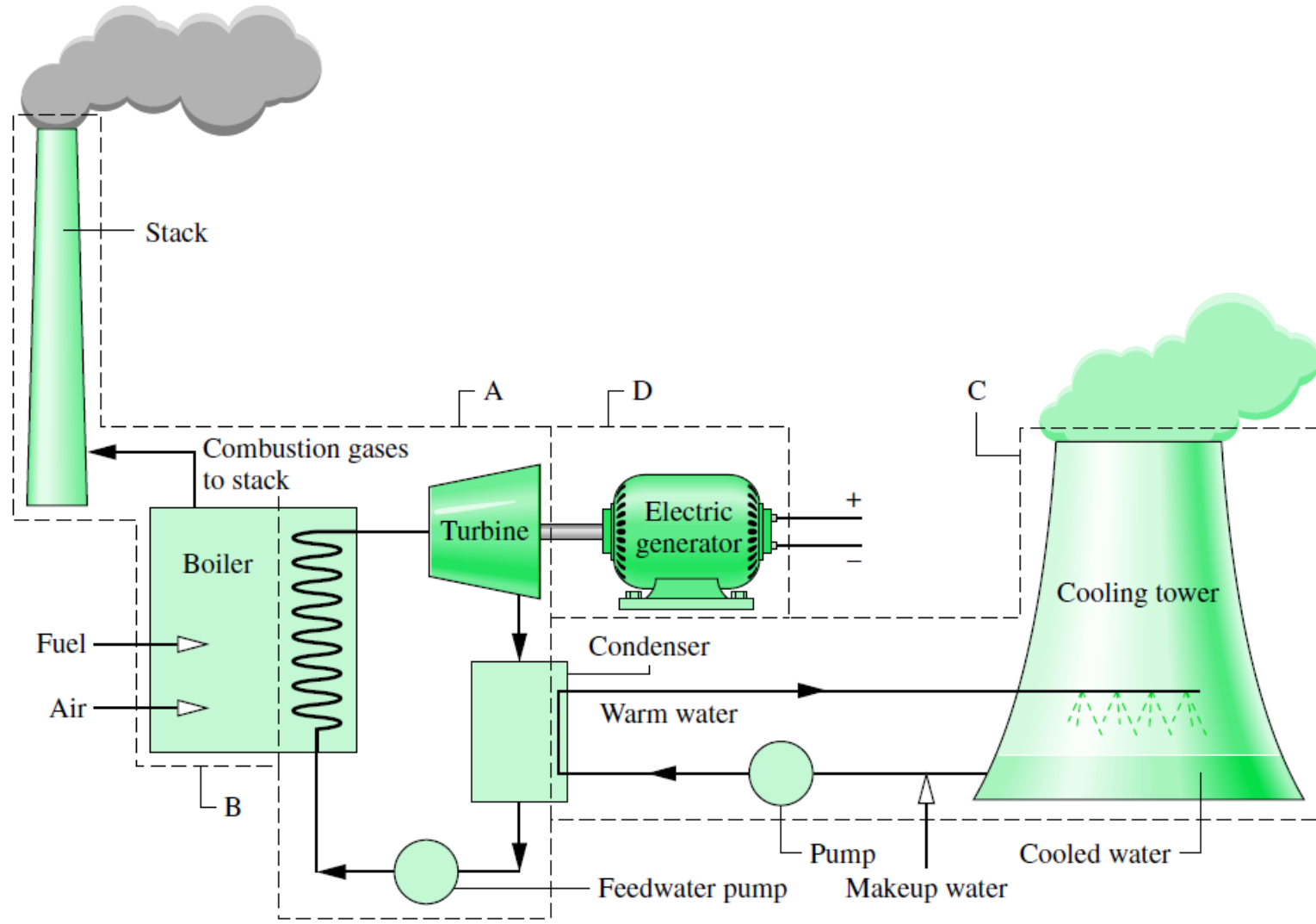
---

PROF.: KAIO DUTRA



# Modelando Sistemas de Potência a Vapor

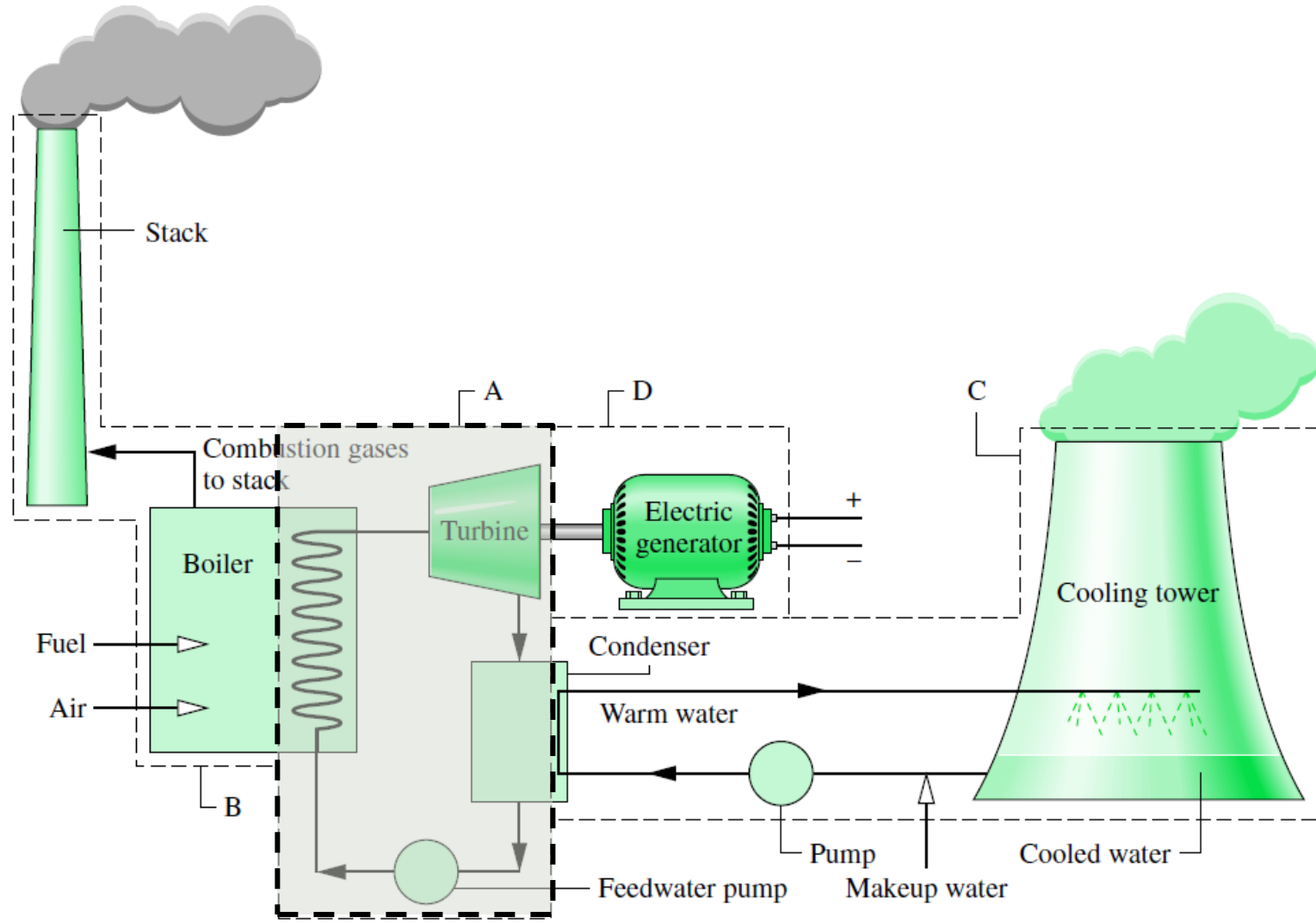
- A grande maioria das instalações elétricas de geração consiste em variações das instalações de potência a vapor nas quais a água é o fluido de trabalho.



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## O Ciclo Rankine

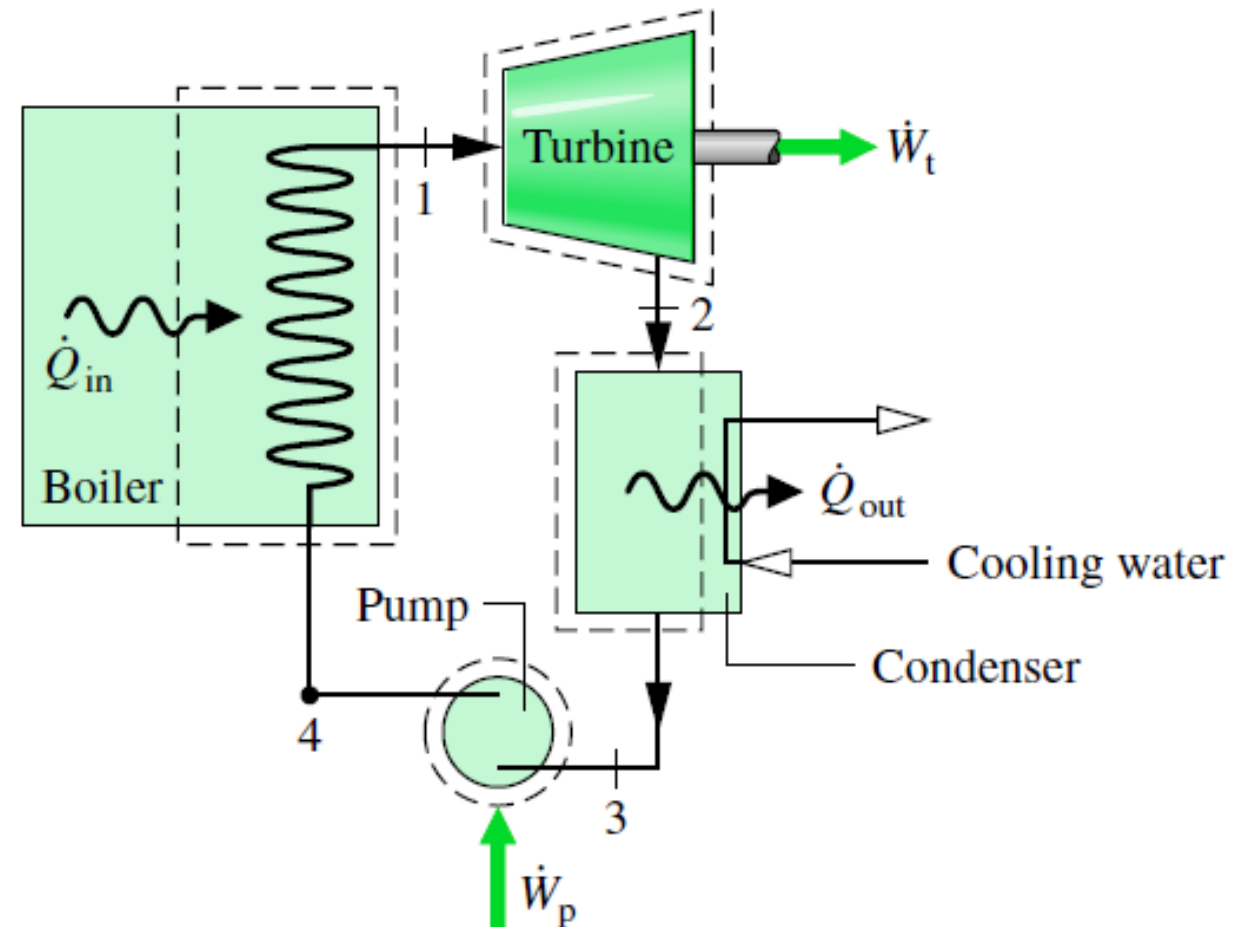
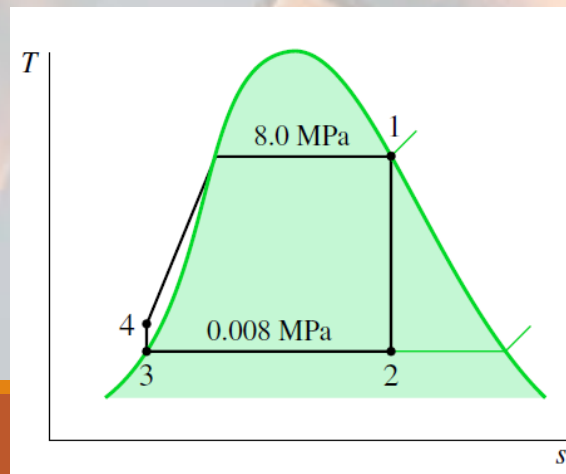
- O ciclo Rankine modela os ciclos de geração de potência a vapor, apresentado na figura como A.



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

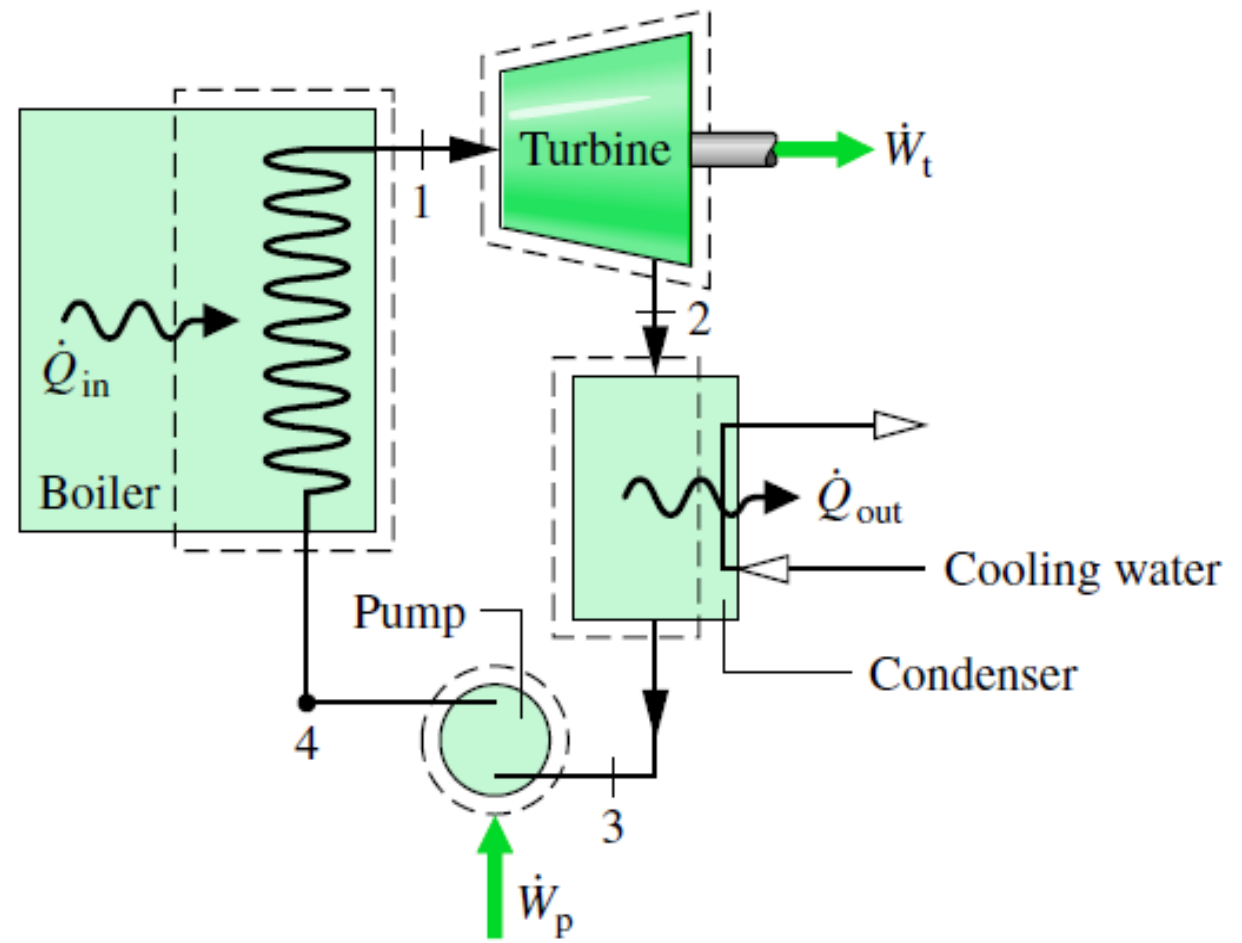
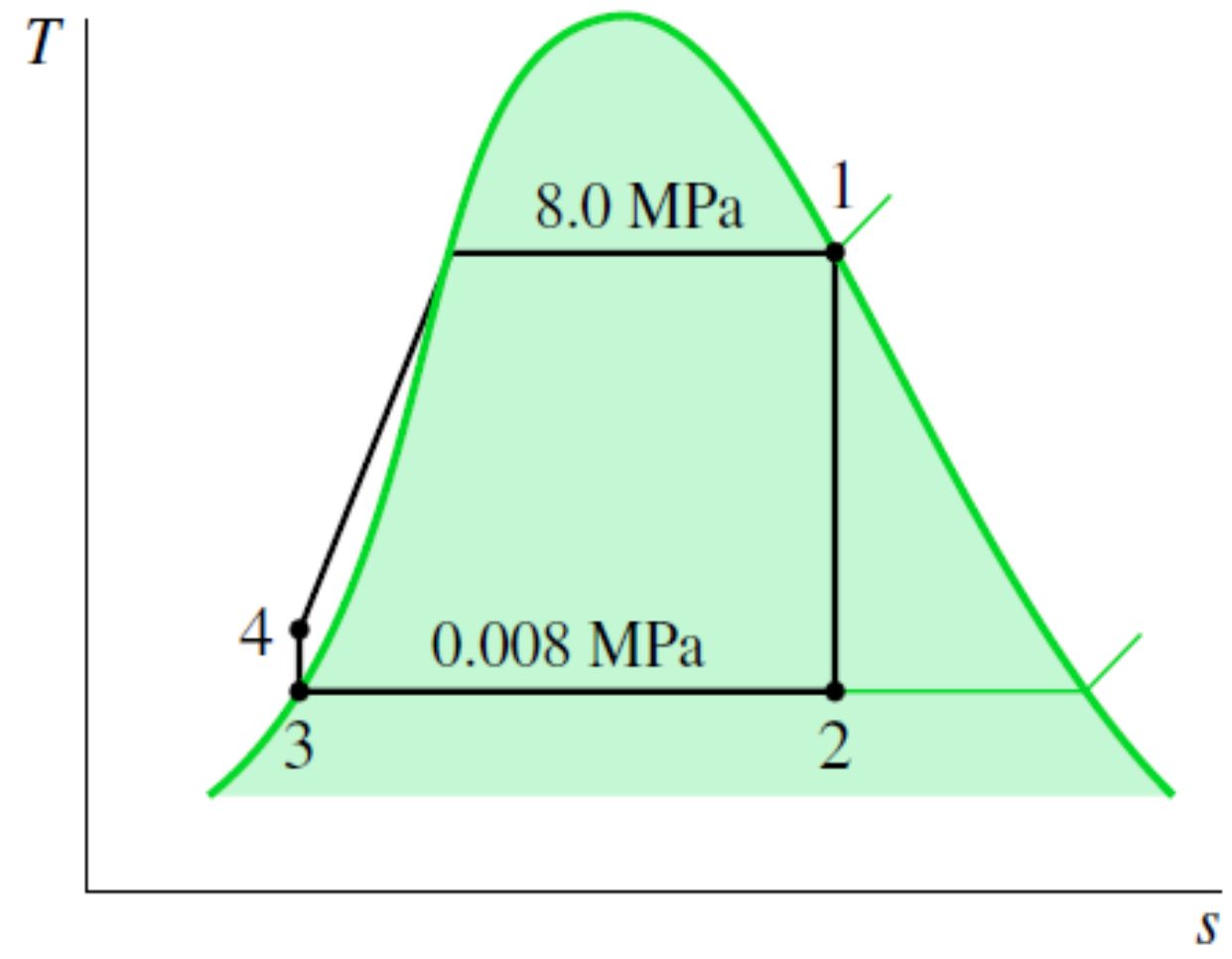
## O Ciclo Rankine

- O ciclo Rankine é composto fundamentalmente por quatro componentes:
- Caldeira (aquecedor);
- Turbina;
- Condensador;
- Bomba.



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

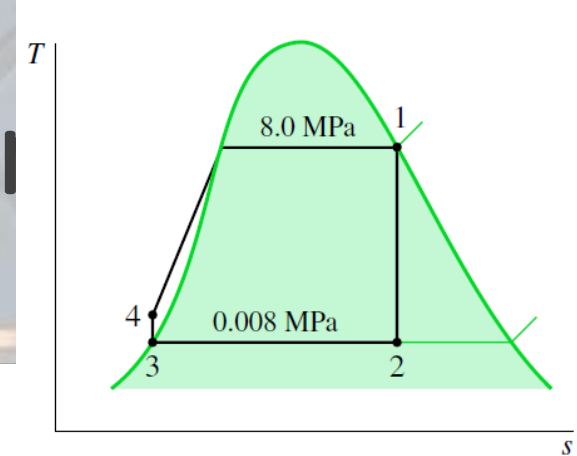
## O Ciclo Rankine



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

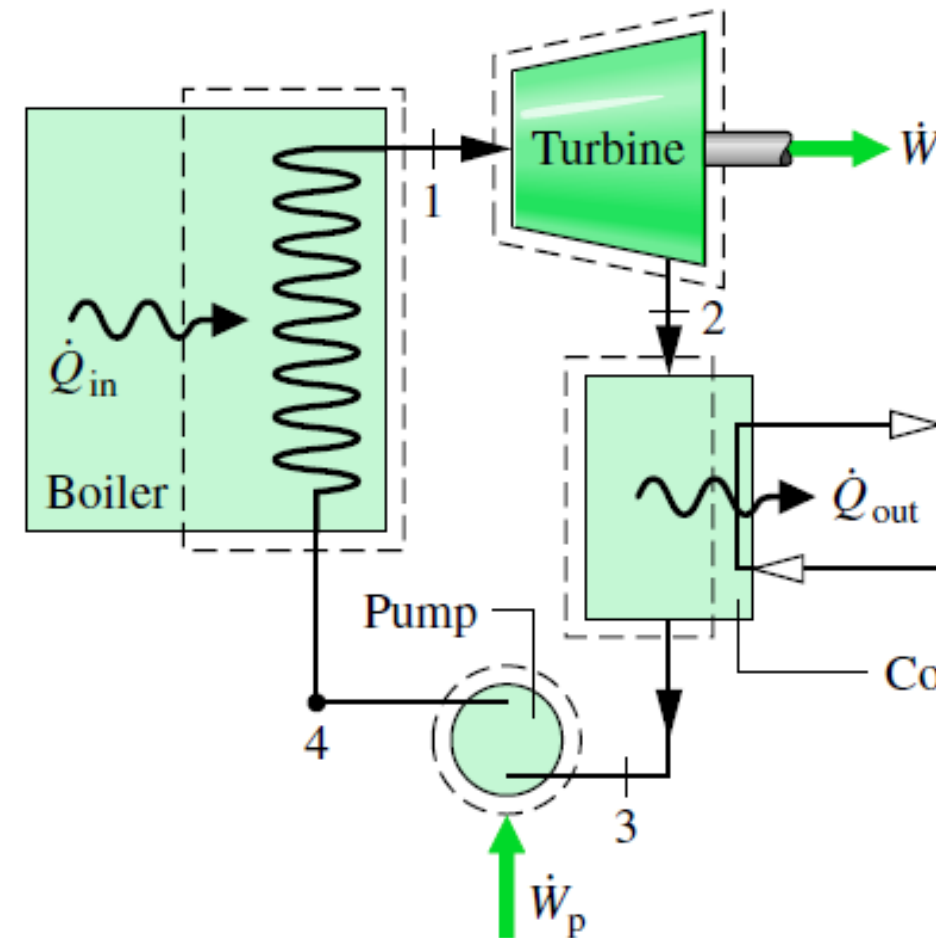
## O Ciclo Rankine – Turbina

- O vapor entra no estado 1, tendo uma pressão e temperatura elevadas, se expande através da turbina para produzir trabalho e então é descarregado no condensador no estado 2.



$$0 = \cancel{\dot{Q}_{cv}^0} - \dot{W}_t + \dot{m} \left[ h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$$

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

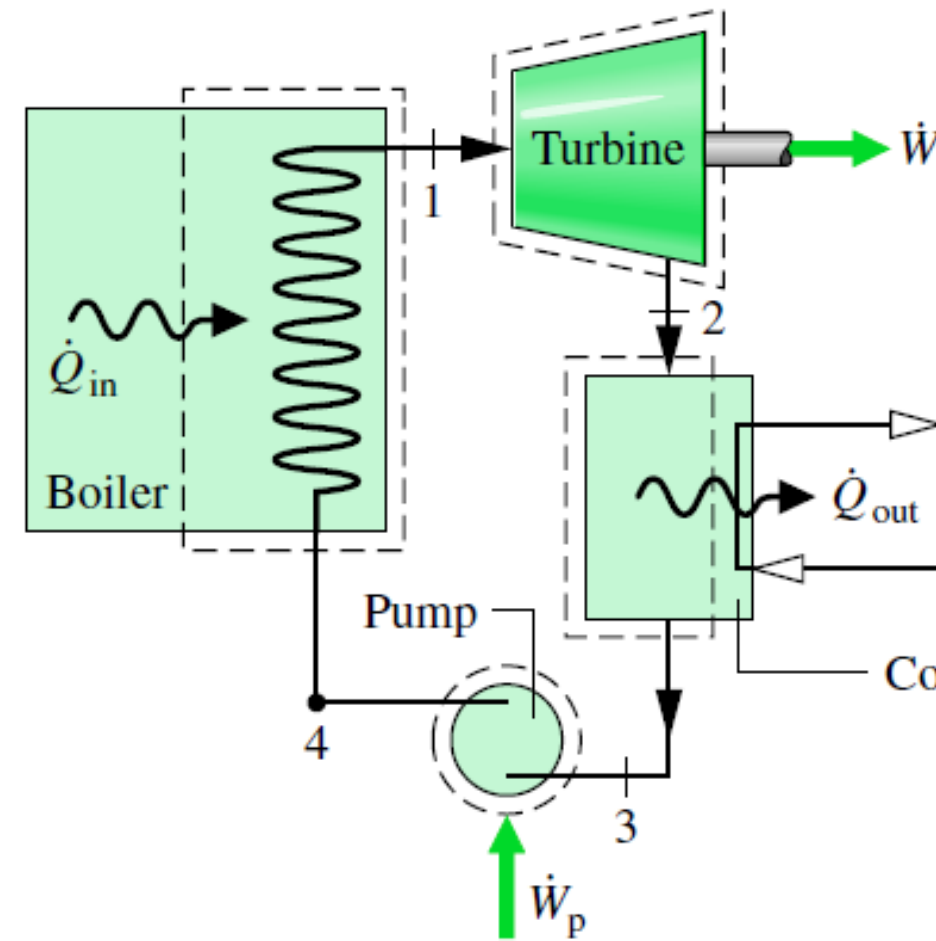
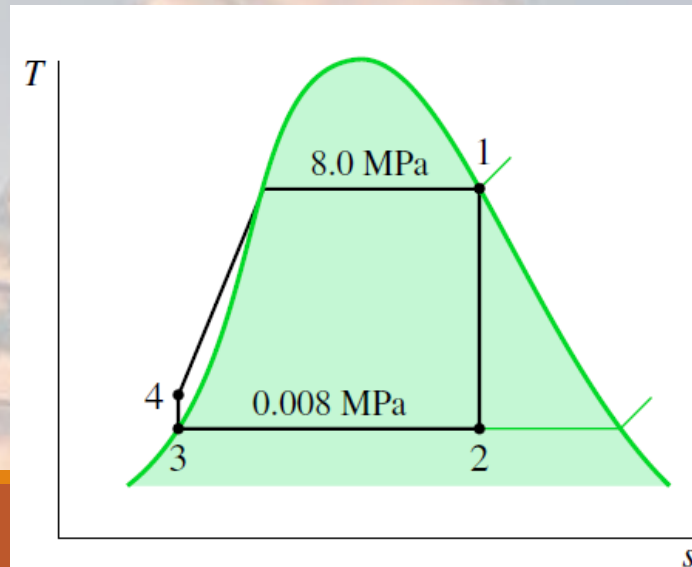


# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## O Ciclo Rankine – Condensador

- No condensador há transferência de calor do vapor para a água de arrefecimento escoando em uma corrente separada. O vapor é condensado e a temperatura da água de arrefecimento aumenta.

$$\frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{m}} = h_2 - h_3$$



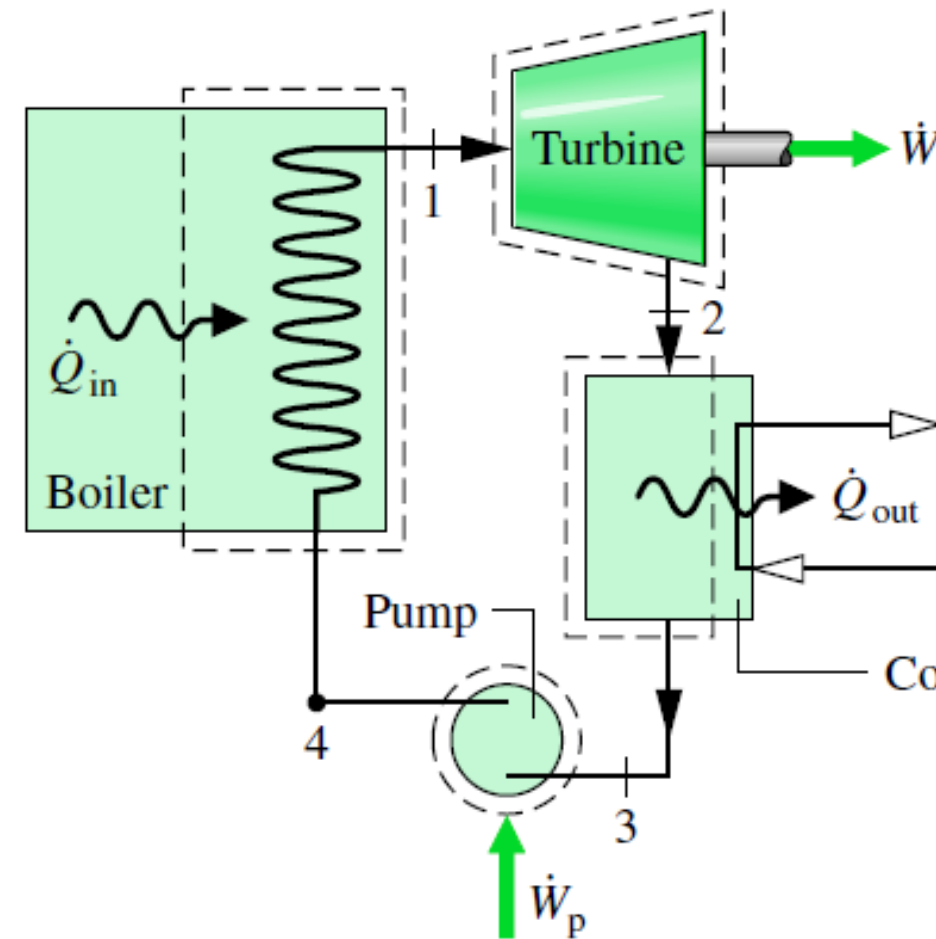
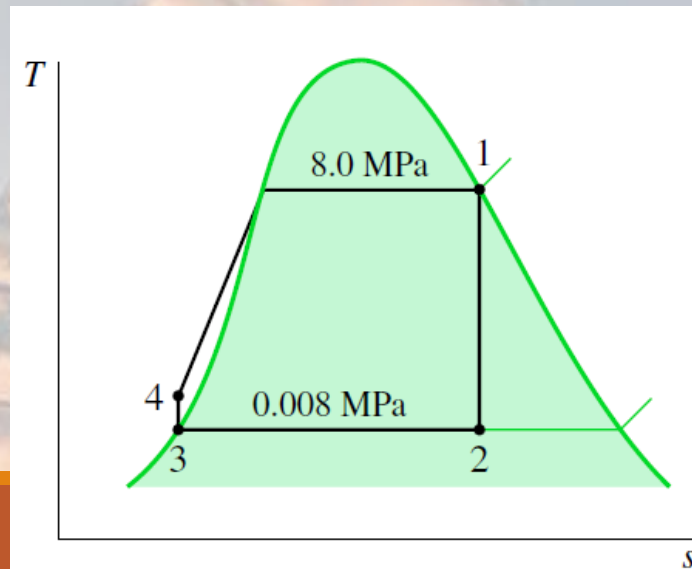
# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## O Ciclo Rankine – Bomba

- O líquido condensado que deixa o condensador em 3 é bombeado do condensador para a caldeira a uma pressão mais elevada.

$$\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} = h_4 - h_3$$

$$\left(\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}}\right)_{\text{int rev}} \approx v_3(p_4 - p_3)$$



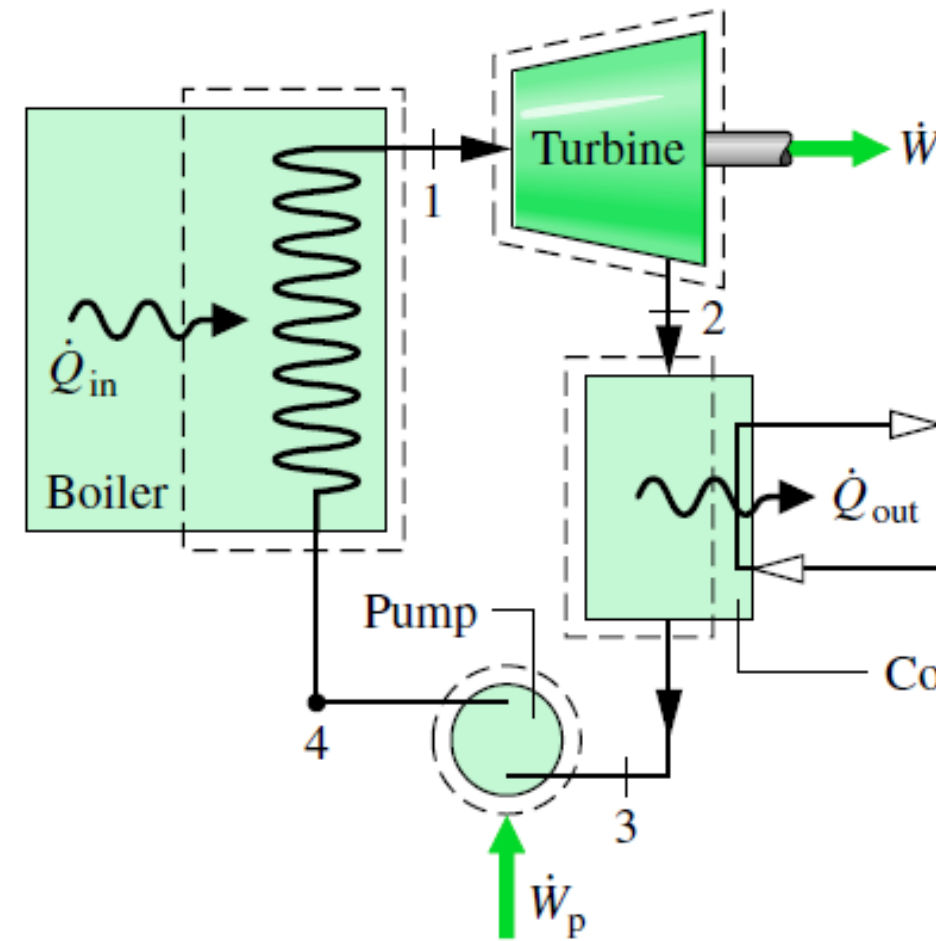
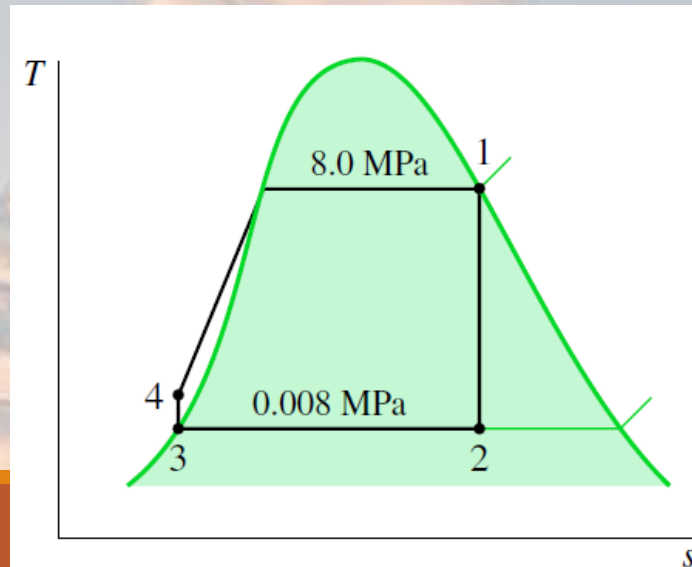


# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## O Ciclo Rankine – Caldeira

- O fluido de trabalho completa o ciclo quando o fluido de trabalho que deixa a bomba em 4 é aquecido até a saturação e evaporado na caldeira.

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$



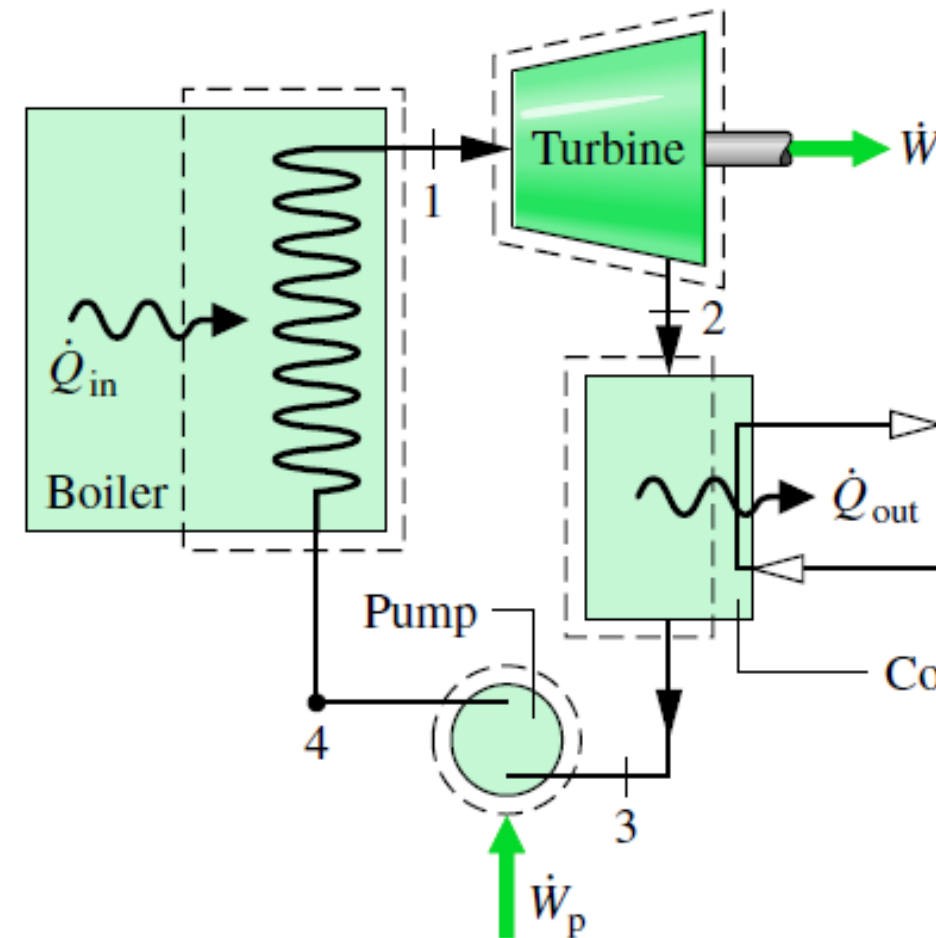
# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## O Ciclo Rankine – Parâmetros de Desempenho

- Eficiência Térmica:

- A eficiência térmica mede o percentual através do qual a energia fornecida ao fluido de trabalho é convertida em trabalho líquido disponível.

$$\eta = \frac{\dot{W}_t/\dot{m} - \dot{W}_p/\dot{m}}{\dot{Q}_{in}/\dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}$$



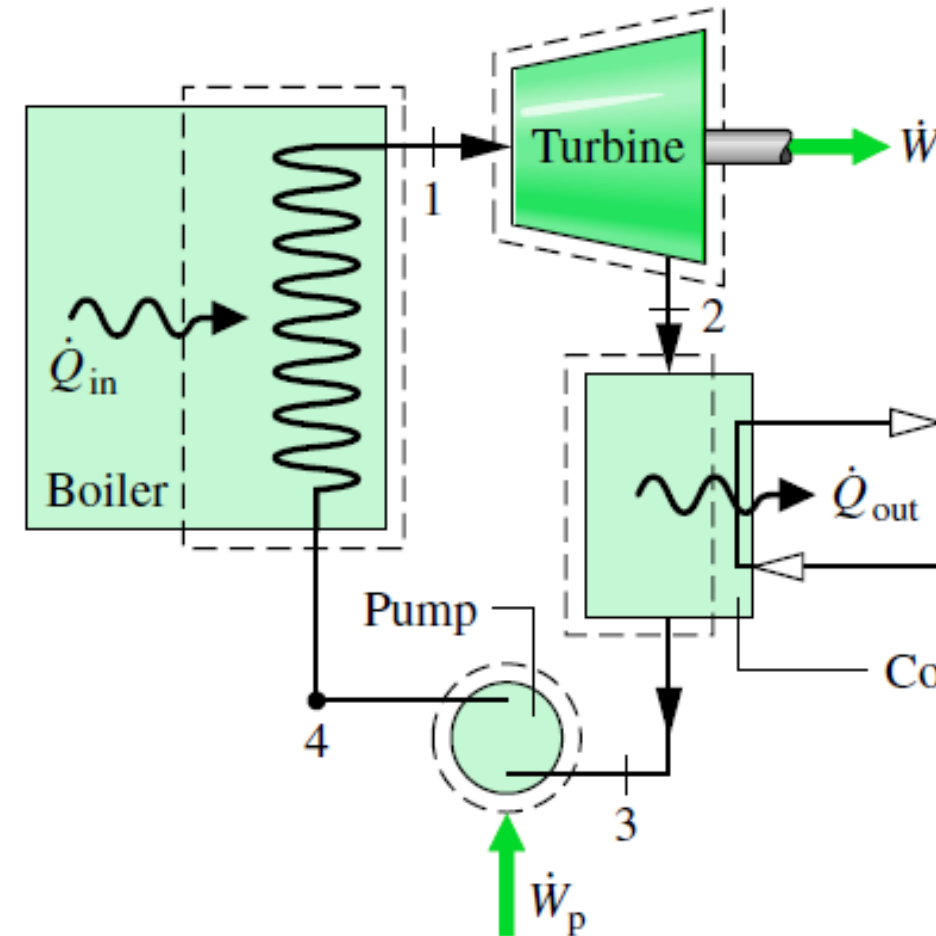
# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## O Ciclo Rankine – Parâmetros de Desempenho

- Eficiência Térmica:

- Em um ciclo fechado o trabalho líquido é igual ao calor líquido fornecido. Assim, a eficiência térmica pode ser expressa alternativamente como:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{in}/\dot{m} - \dot{Q}_{out}/\dot{m}}{\dot{Q}_{in}/\dot{m}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}/\dot{m}}{\dot{Q}_{in}/\dot{m}}$$
$$= 1 - \frac{(h_2 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

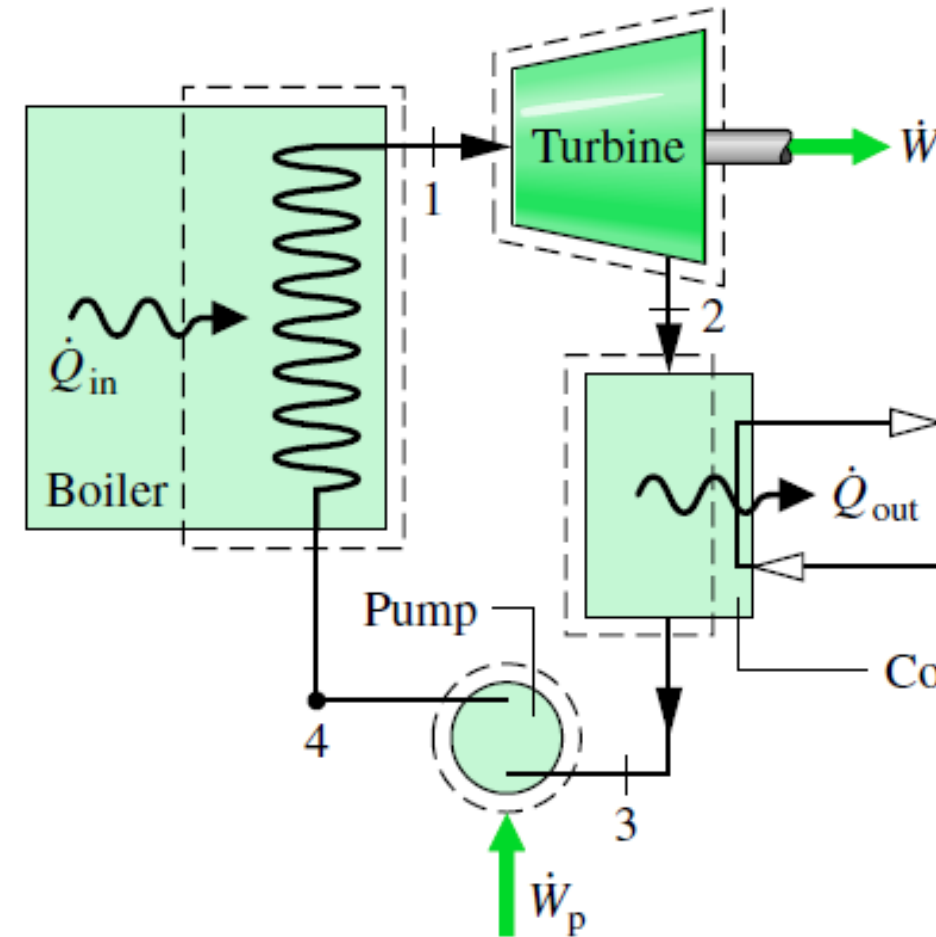


# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## O Ciclo Rankine – Parâmetros de Desempenho

- Taxa de Calor:

- É a quantidade de energia adicionada ao ciclo por transferência de calor para produzir uma unidade de trabalho disponível (Btu/KWh).

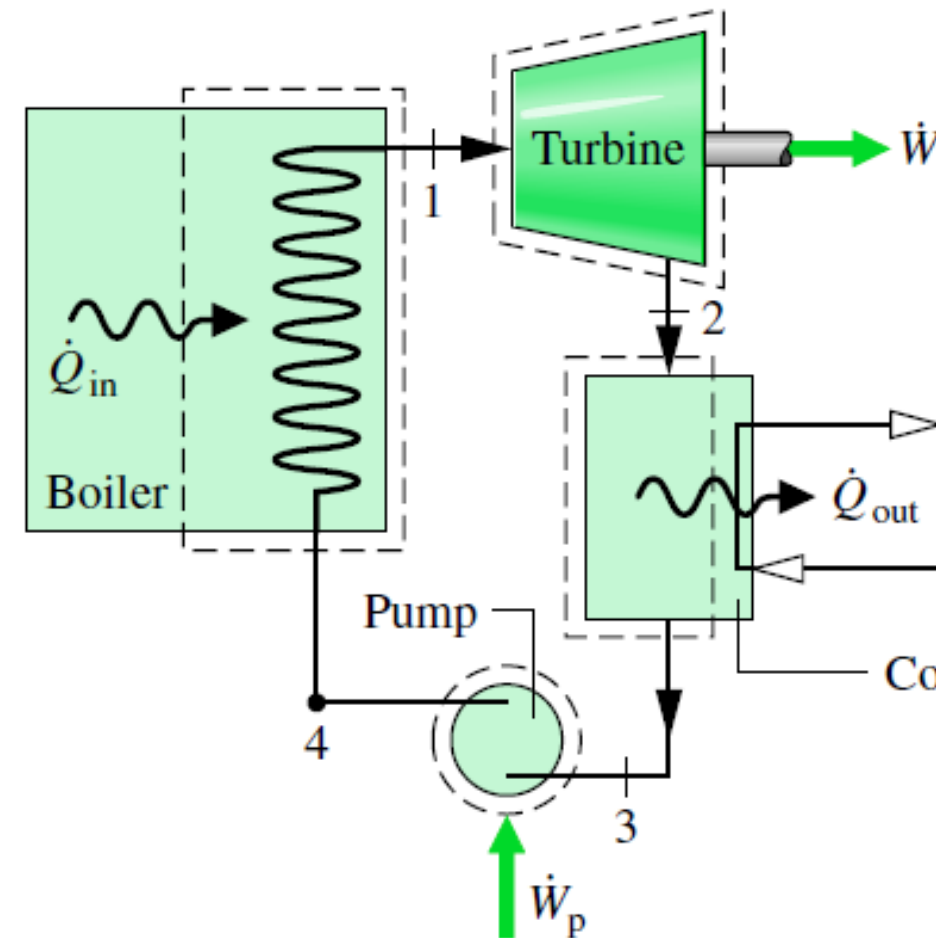


# Analisando Sistemas de Potência a Vapor

## O Ciclo Rankine – Parâmetros de Desempenho

- Razão de Trabalho Reverso (bwr):
  - É definido como a razão entre o trabalho entregue a bomba e o trabalho desenvolvido pela turbina.

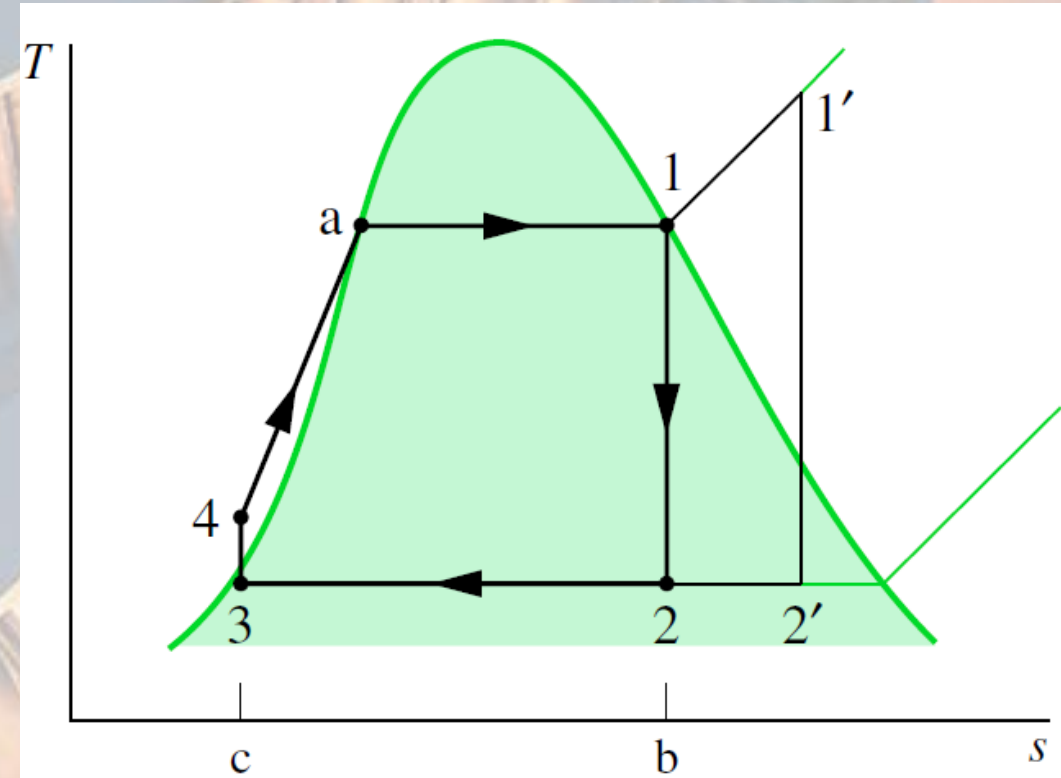
$$\text{bwr} = \frac{\dot{W}_p / \dot{m}}{\dot{W}_t / \dot{m}} = \frac{(h_4 - h_3)}{(h_1 - h_2)}$$



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## O Ciclo Rankine Ideal

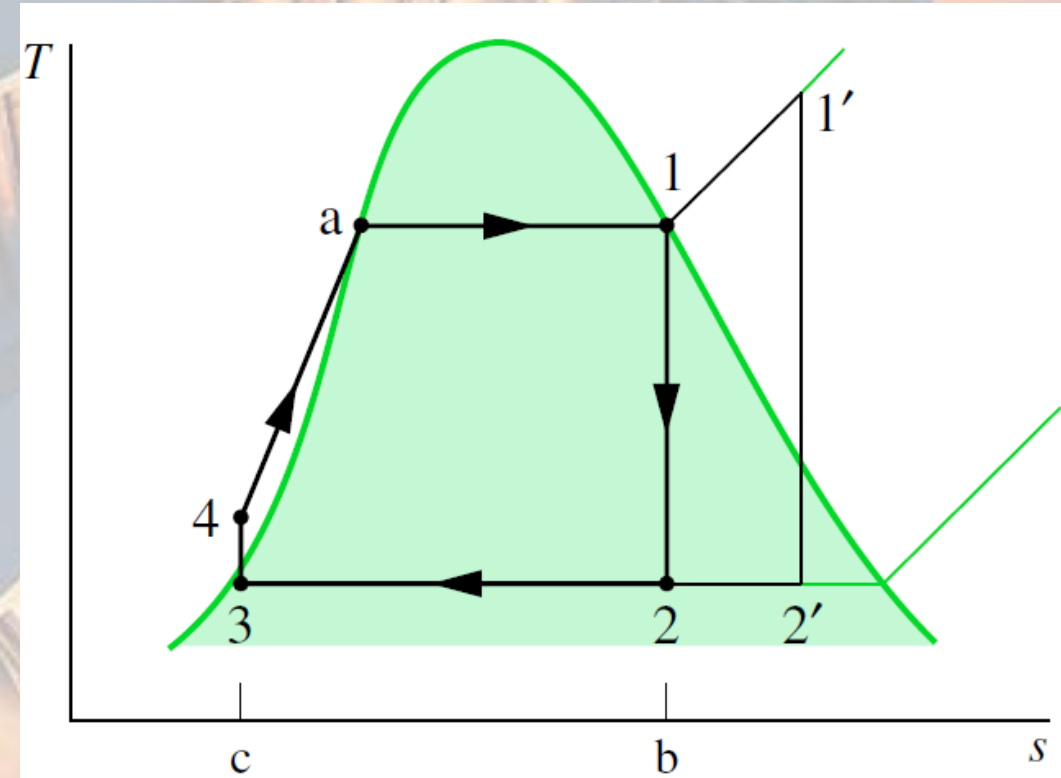
- Se o fluido de trabalho passa através de vários componentes do ciclo simples de potência a vapor sem irreversibilidades, as quedas de pressão devidas ao atrito estariam ausentes na caldeira e no condensador.
- Também na ausência de irreversibilidades e trocas de calor para a vizinhança, os processos através da turbina e bomba seriam isentrópicos.
- Um ciclo que segue estas idealizações é o ciclo de Rankine Ideal.



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## O Ciclo Rankine Ideal

- Processos do ciclo Rankine Ideal:
  - Processo 1-2: Expansão isentrópica;
  - Processo 2-3: Transferência de calor do fluido de trabalho à medida que ele escoava a pressão constante (isobárica);
  - Processo 3-4: Compressão isentrópica;
  - Processo 4-1: Transferência de calor para o fluido de trabalho à medida que ele escoava a pressão constante (isobárica).



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## Exemplo 8.1

---

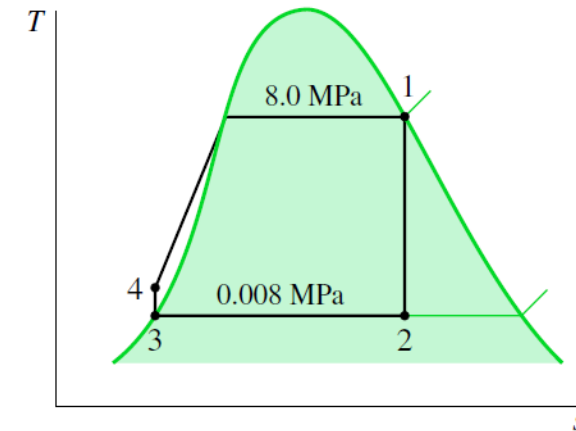
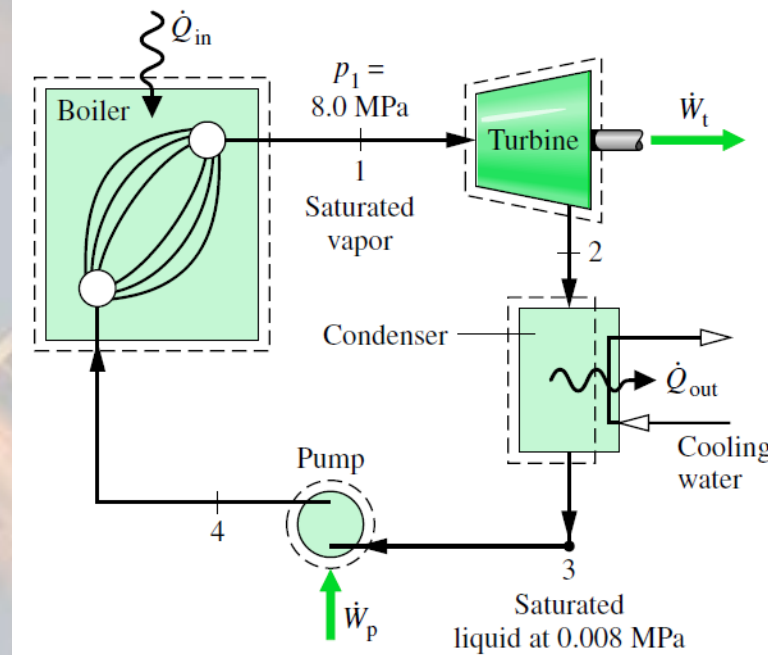
- Vapor d'água é o fluido de trabalho em um ciclo Rankine ideal. Vapor saturado entra na turbina a 8MPa, e líquido saturado deixa o condensador a uma pressão de 0,008MPa. A potência líquida desenvolvida pelo ciclo é 100MW. Determine, para o ciclo:
  - A) A eficiência térmica.
  - B) A razão de trabalho reversa.
  - C) A vazão em massa Kg/h.
  - D) O calor absorvido na caldeira.
  - E) O calor retirado no condensador.
  - F) A vazão mássica de água de arrefecimento do condensador, em Kg/h, se a água entra no condensador a 15°C e sai a 35°C.



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## Exemplo 8.1

- A) A eficiência térmica.
- B) A razão de trabalho reversa.
- C) A vazão em massa Kg/h.
- D) O calor absorvido na caldeira.
- E) O calor retirado no condensador.
- F) A vazão mássica de água de arrefecimento do condensador, em Kg/h, se a água entra no condensador a 15°C e sai a 35°C.



$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int rev}}$$

# Analisando Sistemas de Potência a Vapor

## Efeitos das Pressões da Caldeira e do Condensador

◦ Pode-se obter uma expressão para a eficiência térmica em termos de temperaturas médias durante os processos de interação térmica:

◦ Para o aquecimento (caldeira):

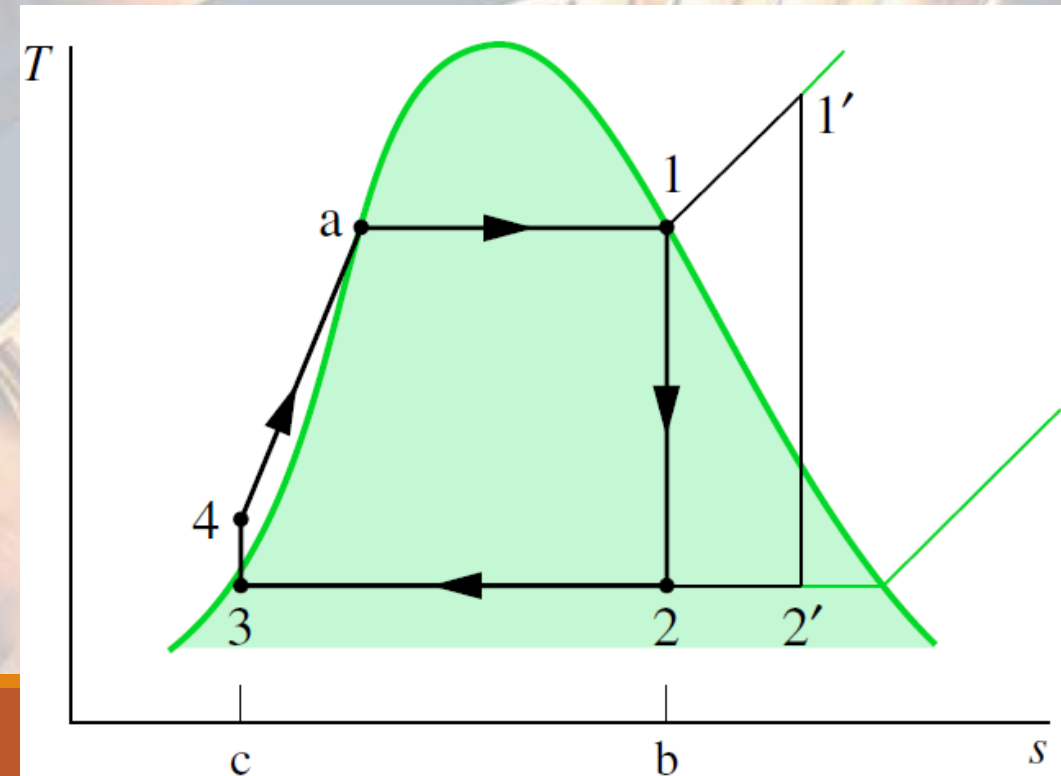
$$\left( \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{\dot{m}} \right)_{\text{int rev}} = \int_4^1 T ds$$

$$\left( \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{\dot{m}} \right)_{\text{int rev}} = \bar{T}_{\text{in}}(s_1 - s_4)$$

◦ Para o resfriamento (condensador):

$$\left( \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{m}} \right)_{\text{int rev}} = T_{\text{out}}(s_2 - s_3)$$

$$= T_{\text{out}}(s_1 - s_4)$$



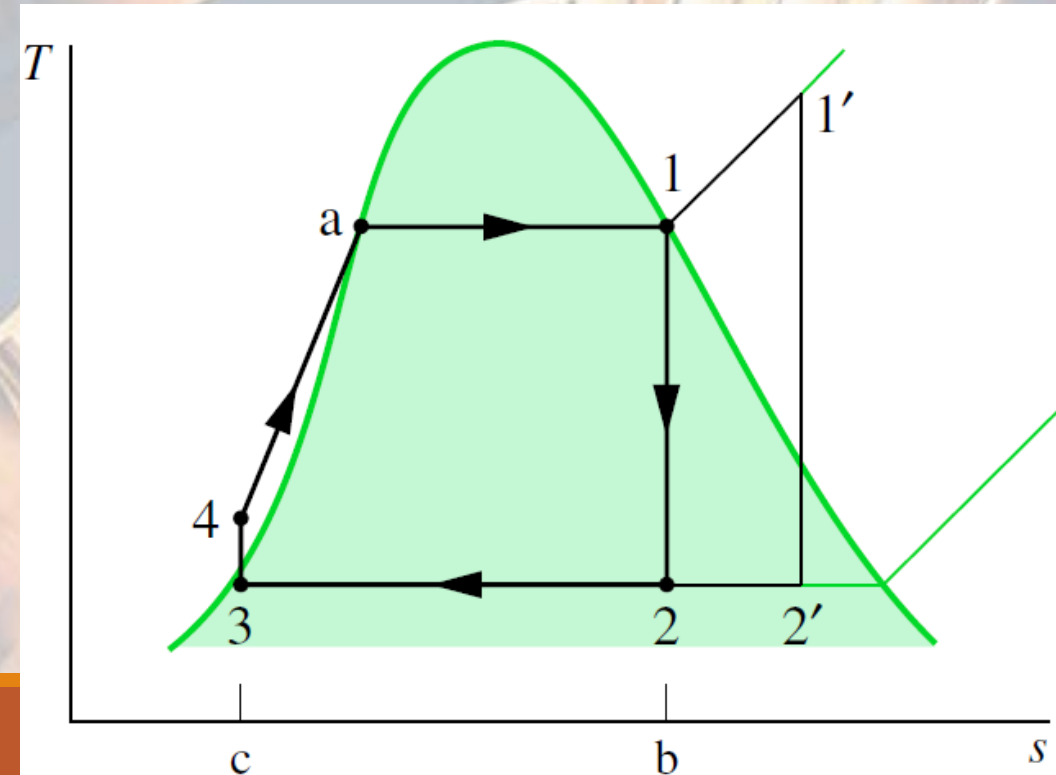
$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int rev}}$$

# Analisando Sistemas de Potência a Vapor

## Efeitos das Pressões da Caldeira e do Condensador

- A eficiência térmica do ciclo de Rankine ideal pode ser escrita em função das transferência de calor como:

$$\eta_{\text{ideal}} = 1 - \frac{(\dot{Q}_{\text{out}}/\dot{m})_{\text{int rev}}}{(\dot{Q}_{\text{in}}/\dot{m})_{\text{int rev}}} = 1 - \frac{T_{\text{out}}}{\bar{T}_{\text{in}}}$$

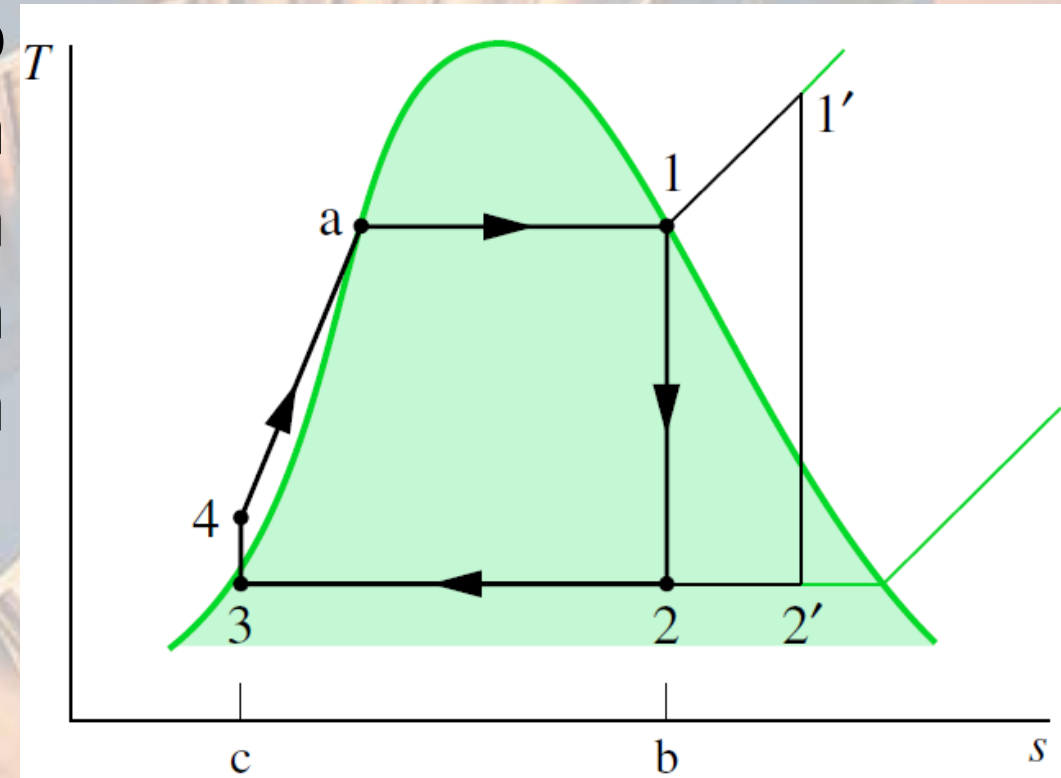


# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## Efeitos das Pressões da Caldeira e do Condensador

- Concluimos que a eficiência térmica do ciclo ideal tende a aumentar à medida que a temperatura média na qual a energia é adicionada por transferência de calor aumenta e/ou a temperatura na qual a energia é rejeitada diminui

$$\eta_{\text{ideal}} = 1 - \frac{(\dot{Q}_{\text{out}}/\dot{m})_{\text{int rev}}}{(\dot{Q}_{\text{in}}/\dot{m})_{\text{int rev}}} = 1 - \frac{T_{\text{out}}}{\bar{T}_{\text{in}}}$$

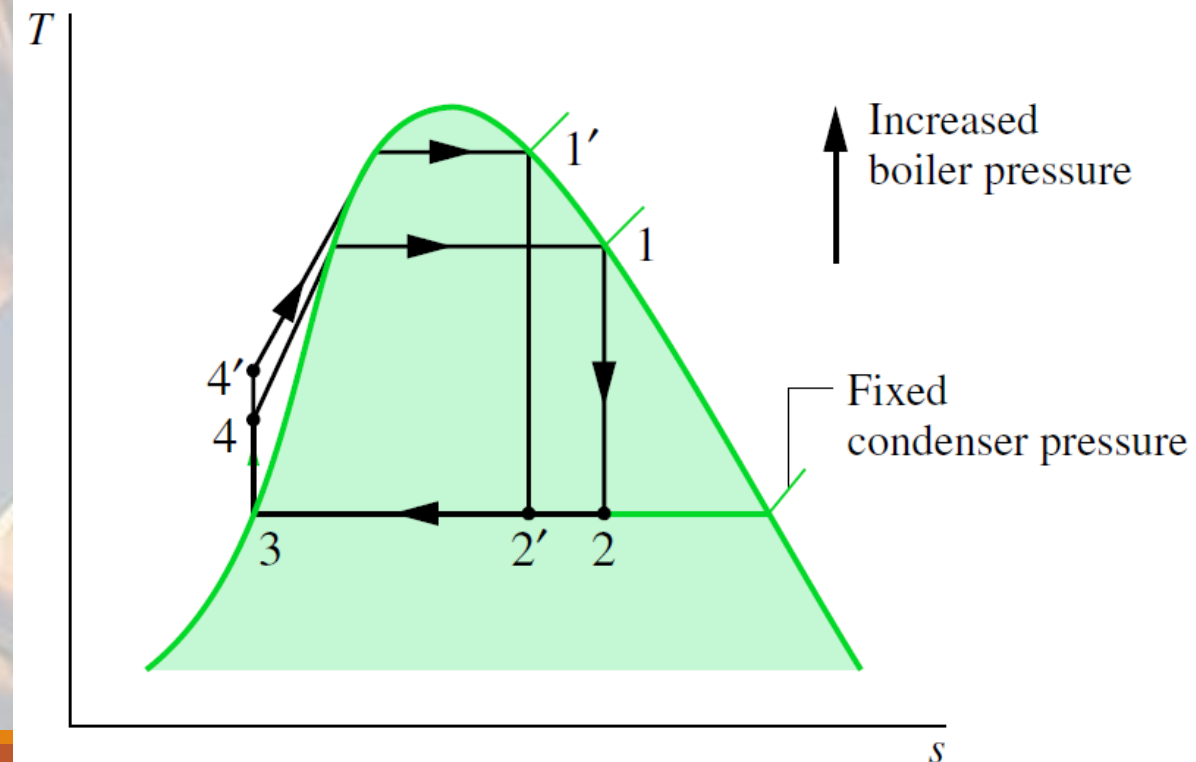


# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## Efeitos das Pressões da Caldeira e do Condensador

- A figura mostra dois ciclos com a mesma pressão no condensador, mas pressões diferentes na caldeira.

$$\eta_{\text{ideal}} = 1 - \frac{(\dot{Q}_{\text{out}}/\dot{m})_{\text{int rev}}}{(\dot{Q}_{\text{in}}/\dot{m})_{\text{int rev}}} = 1 - \frac{T_{\text{out}}}{\bar{T}_{\text{in}}}$$



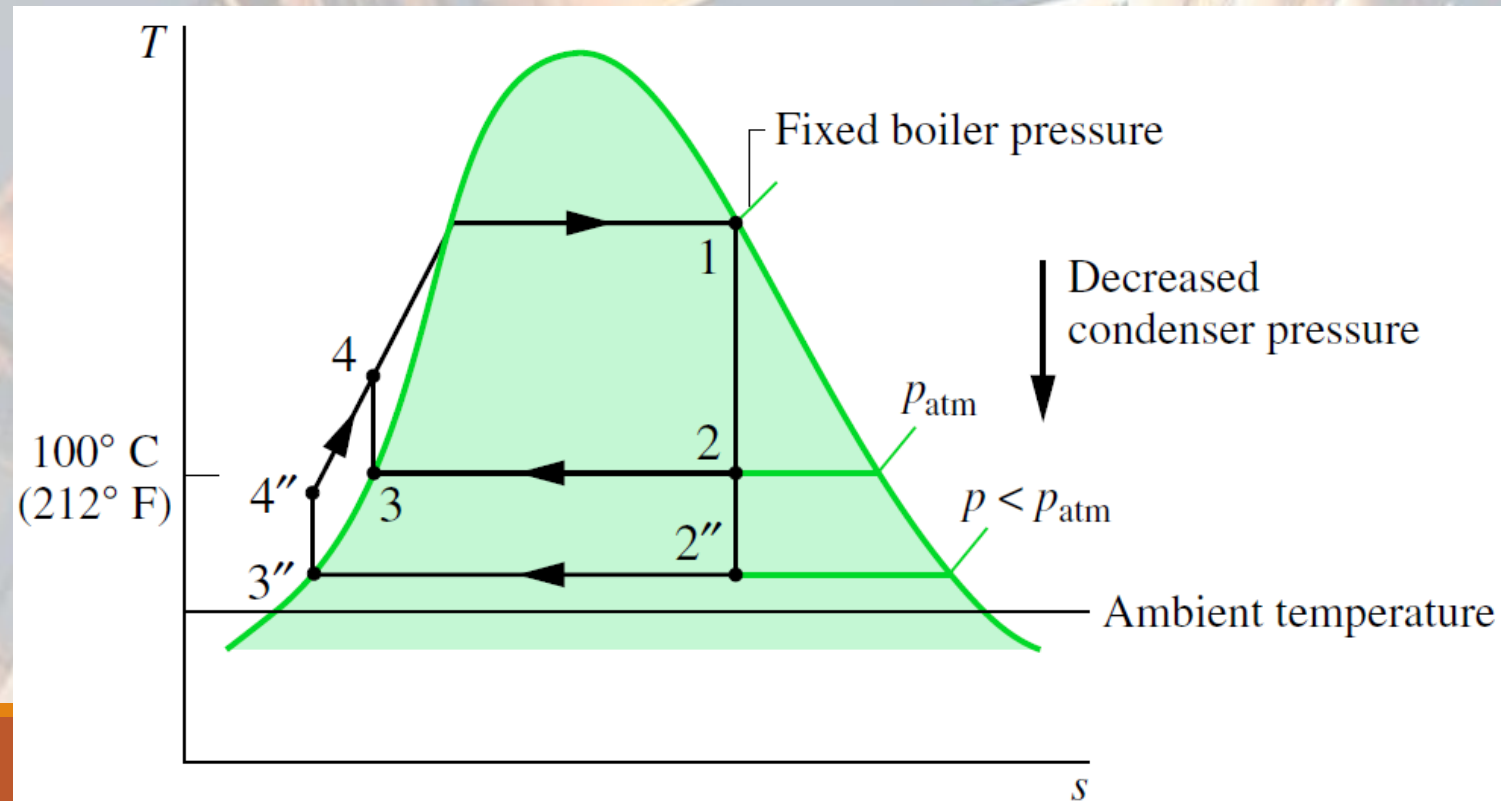
(a)

# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## Efeitos das Pressões da Caldeira e do Condensador

- A figura mostra dois ciclos com a mesma pressão na caldeira, mas pressões diferentes no condensador.

$$\eta_{\text{ideal}} = 1 - \frac{(\dot{Q}_{\text{out}}/\dot{m})_{\text{int rev}}}{(\dot{Q}_{\text{in}}/\dot{m})_{\text{int rev}}} = 1 - \frac{T_{\text{out}}}{\bar{T}_{\text{in}}}$$

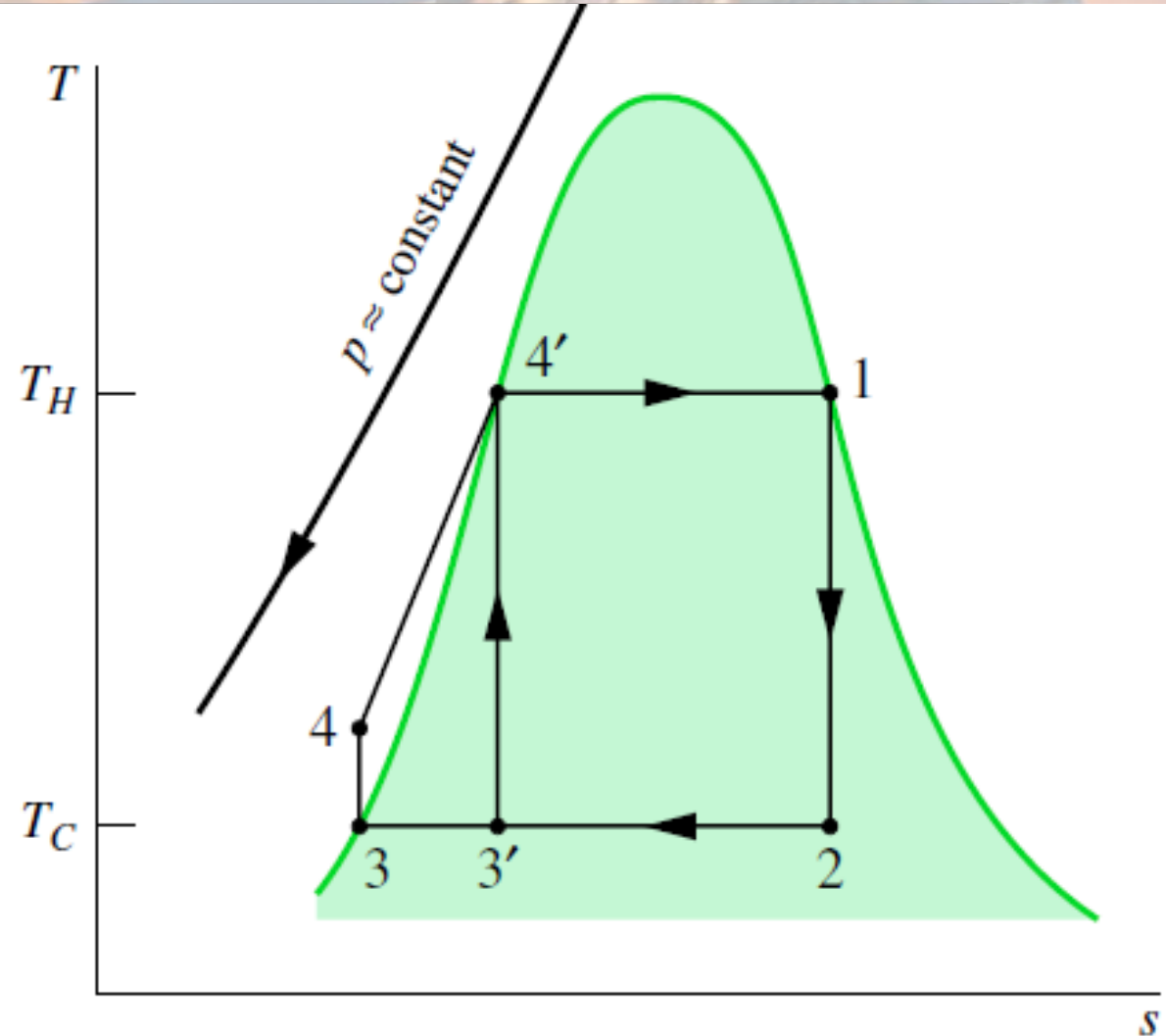


# Analisando Sistemas de Potência a Vapor Comparação com o Ciclo de Carnot

- As equações abaixo mostram o cálculo da eficiência térmica do ciclo de Carnot e do ciclo Rankine Ideal.

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

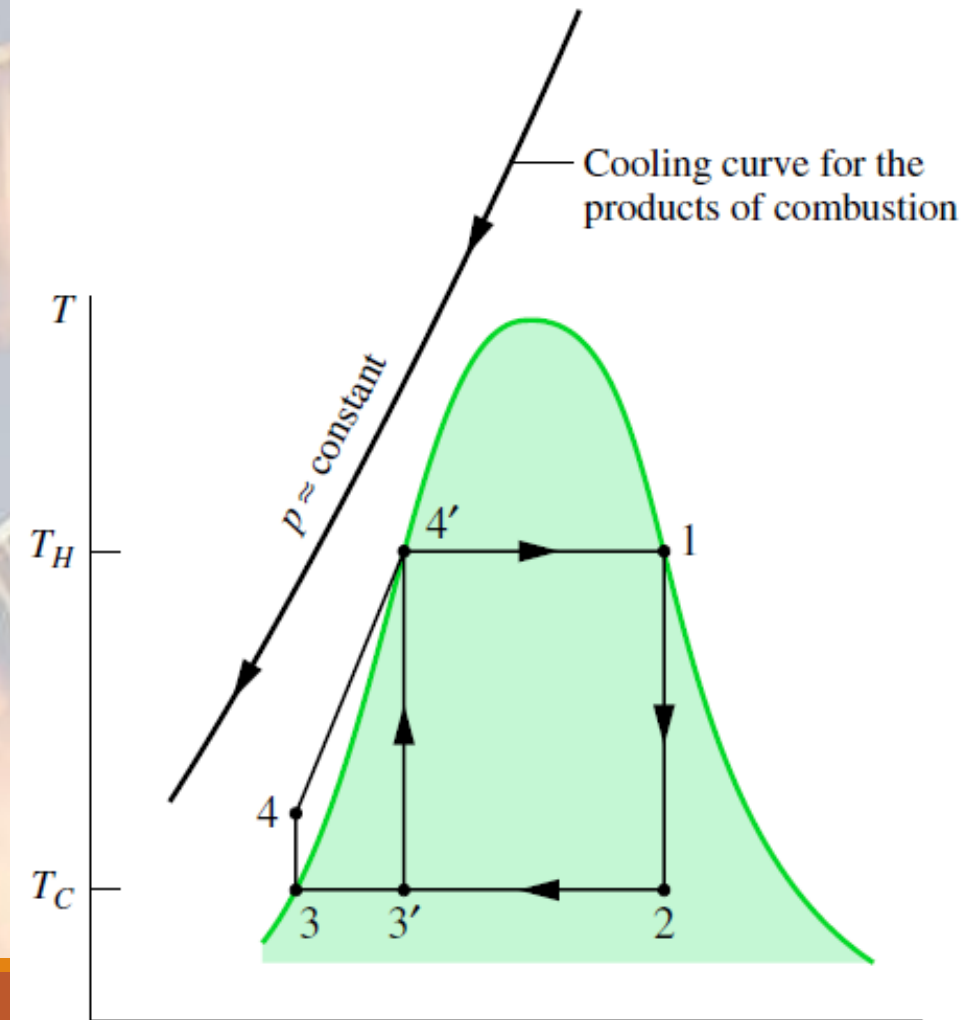
$$\eta_{\text{ideal}} = 1 - \frac{T_{\text{out}}}{\bar{T}_{\text{in}}}$$



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## Comparação com o Ciclo de Carnot

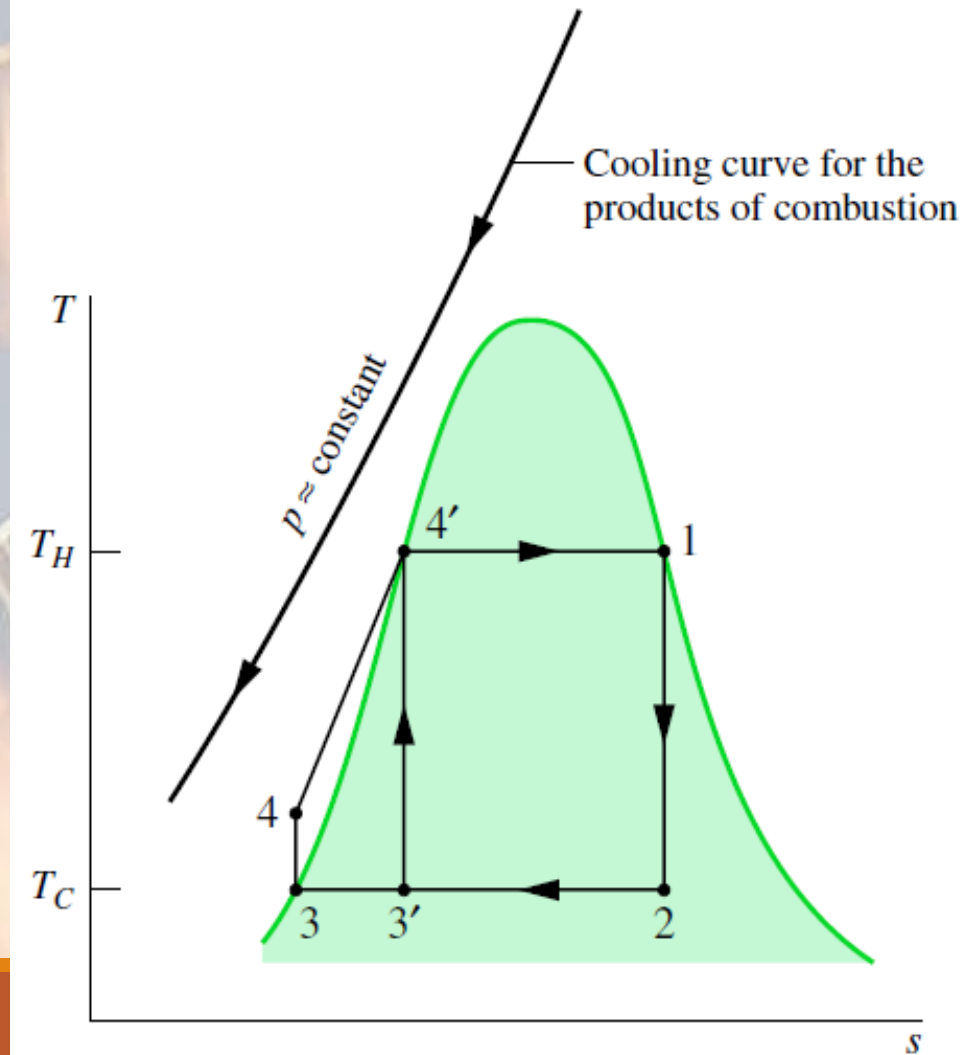
- O ciclo Rankine Ideal diverge do ciclo de Carnot em principalmente dois pontos:
- A primeira parte do processo de aquecimento do ciclo de Rankine mostrado (4-4') é obtido pelo resfriamento dos produtos de combustão abaixo da temperatura máxima  $T_H$ . Com o ciclo de Carnot, contudo, os produtos de combustão seriam resfriados até  $T_H$ .





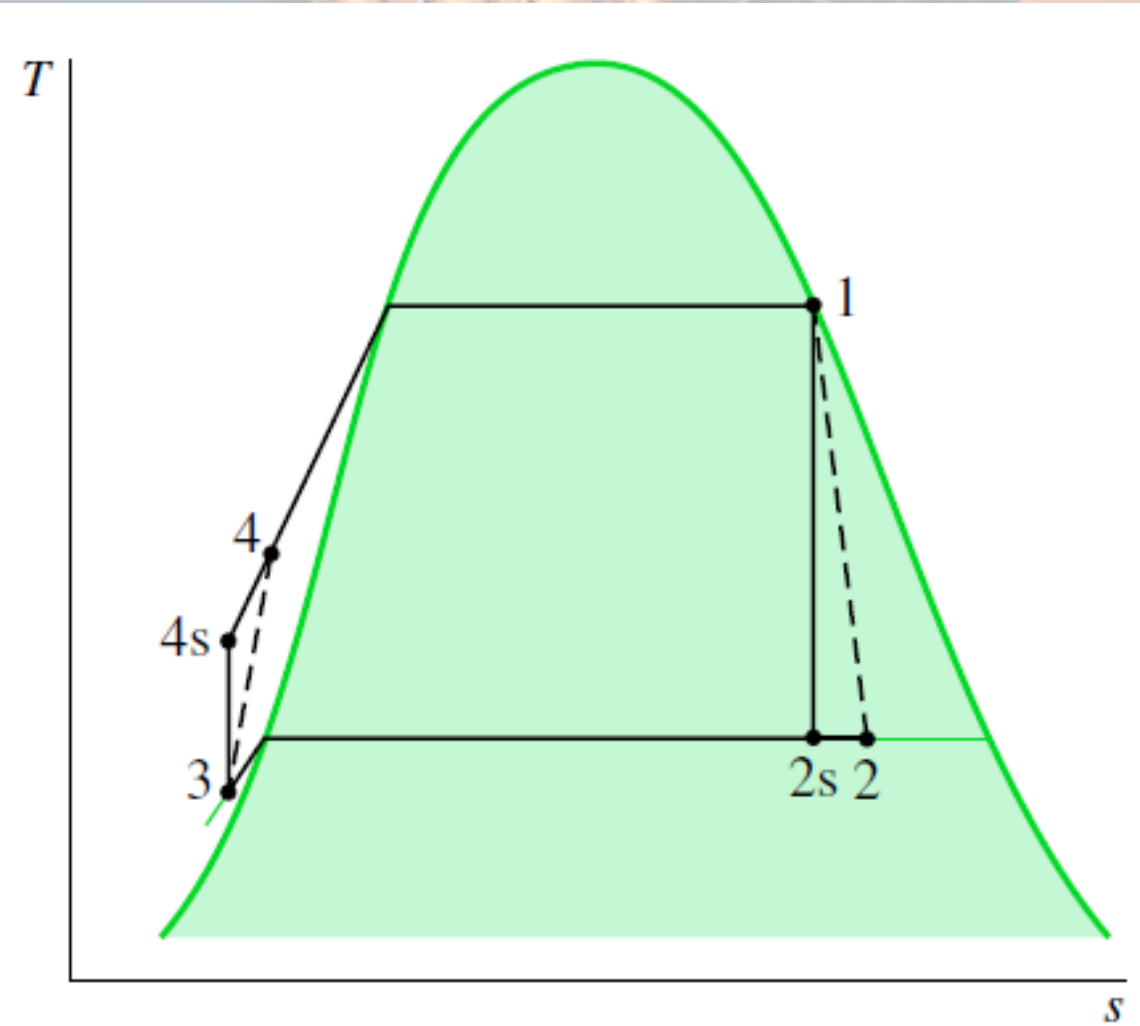
# Analizando Sistemas de Potência a Vapor Comparação com o Ciclo de Carnot

- O ciclo Rankine Ideal diverge do ciclo de Carnot em principalmente dois pontos:
- A segunda deficiência envolve o processo de bombeamento. Observe que no estado 3' existe uma mistura de líquido e vapor, o que gera uma complicação no bombeamento.



# Analisando Sistemas de Potência a Vapor Irreversibilidade e Perdas Principais

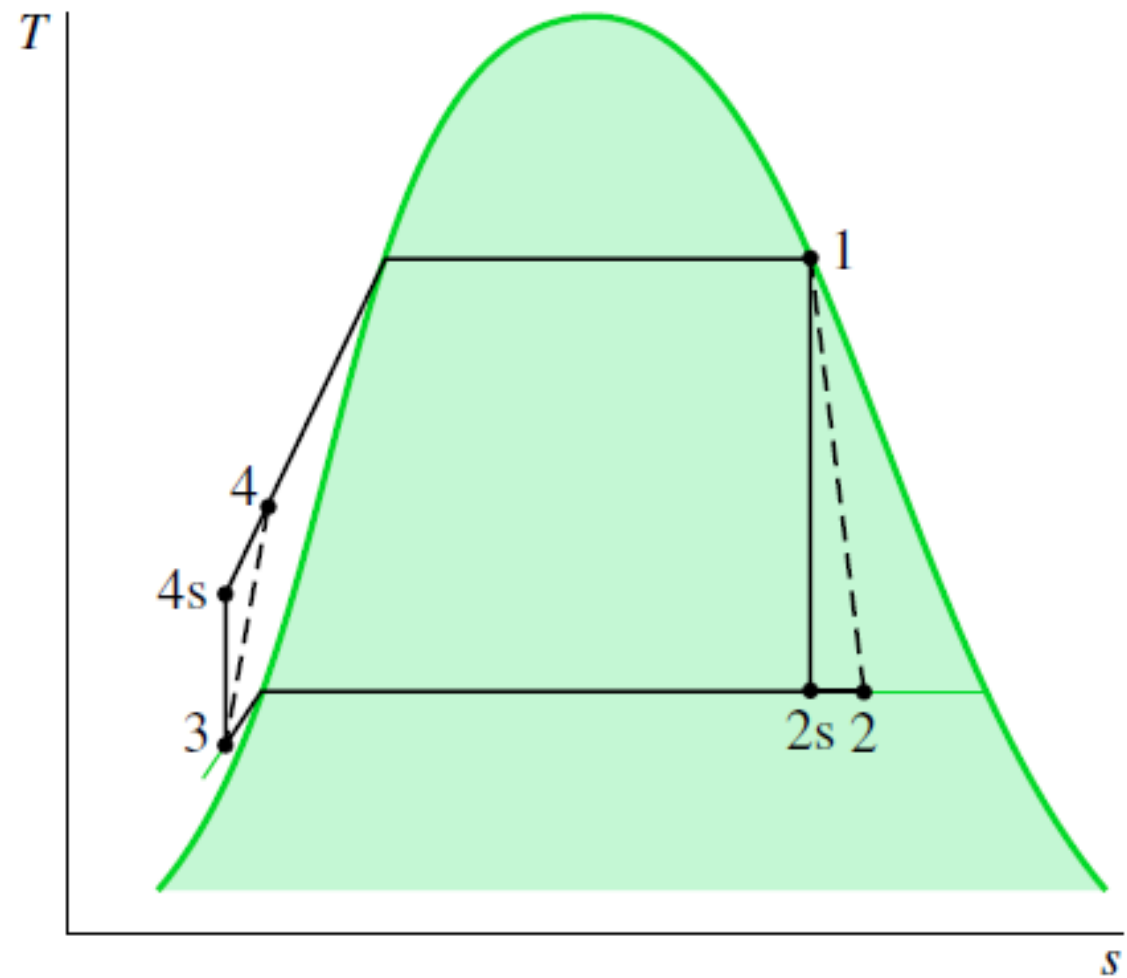
- As irreversibilidades estão presentes em cada um dos componentes que integram o ciclo, bem como nas tubulações que os interligam.



# Analisando Sistemas de Potência a Vapor Irreversibilidade e Perdas Principais

- Turbina: A principal irreversibilidade do fluido de trabalho está associada à expansão na turbina. Isto é devido, principalmente, aos processos internos de expansão nas pás. A eficiência isentrópica permite levar em conta o efeito das irreversibilidades na turbina:

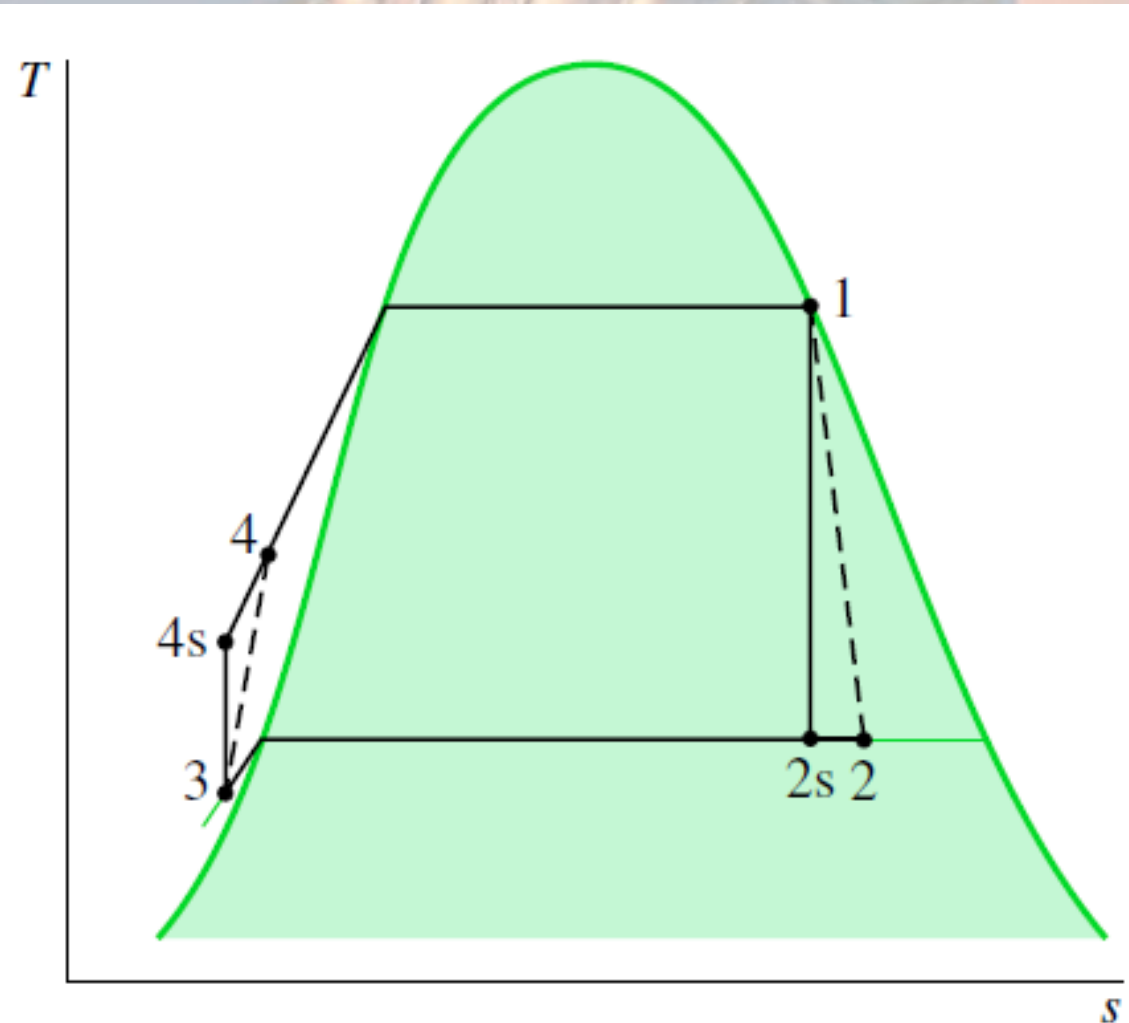
$$\eta_t = \frac{(\dot{W}_t/\dot{m})}{(\dot{W}_t/\dot{m})_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$



# Analisando Sistemas de Potência a Vapor Irreversibilidade e Perdas Principais

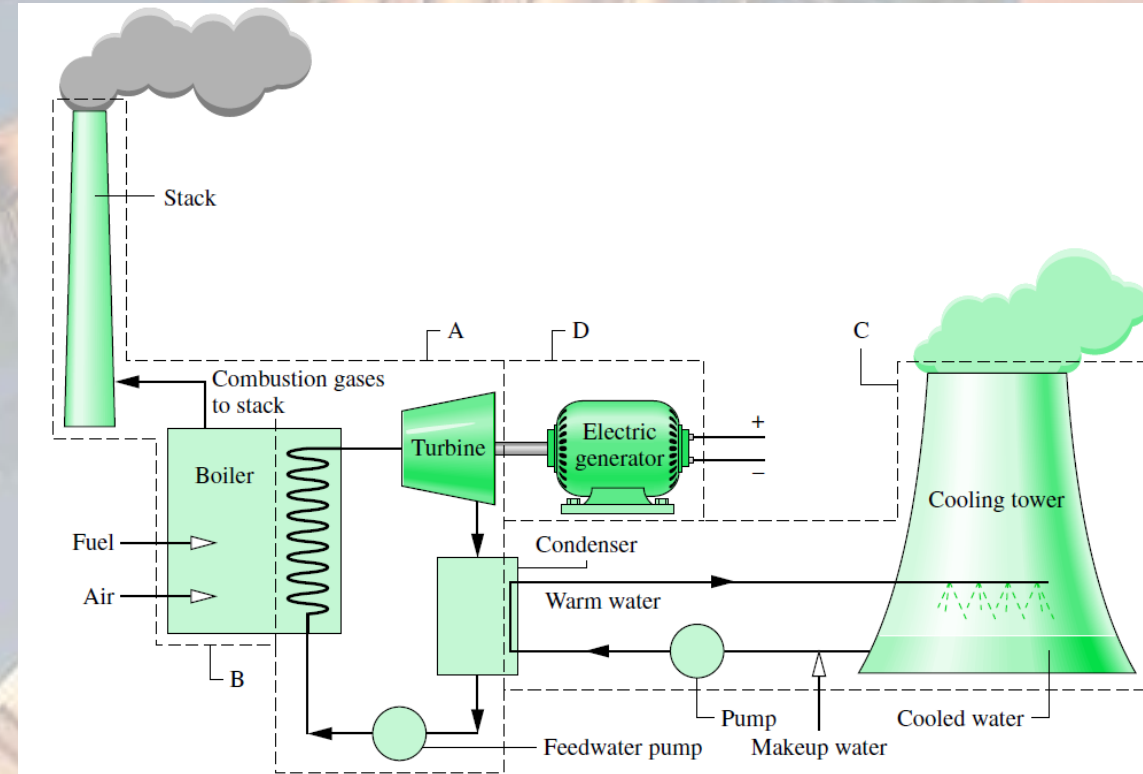
- Bomba: O trabalho necessário fornecido à bomba para vencer os efeitos de atrito interno também reduz a potência líquida disponível. Desta forma, o trabalho fornecido ao sistema é maior que o necessário, caso não houvesse irreversibilidades na bomba.

$$\eta_p = \frac{(\dot{W}_p/\dot{m})_s}{(\dot{W}_p/\dot{m})} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$$



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor Irreversibilidade e Perdas Principais

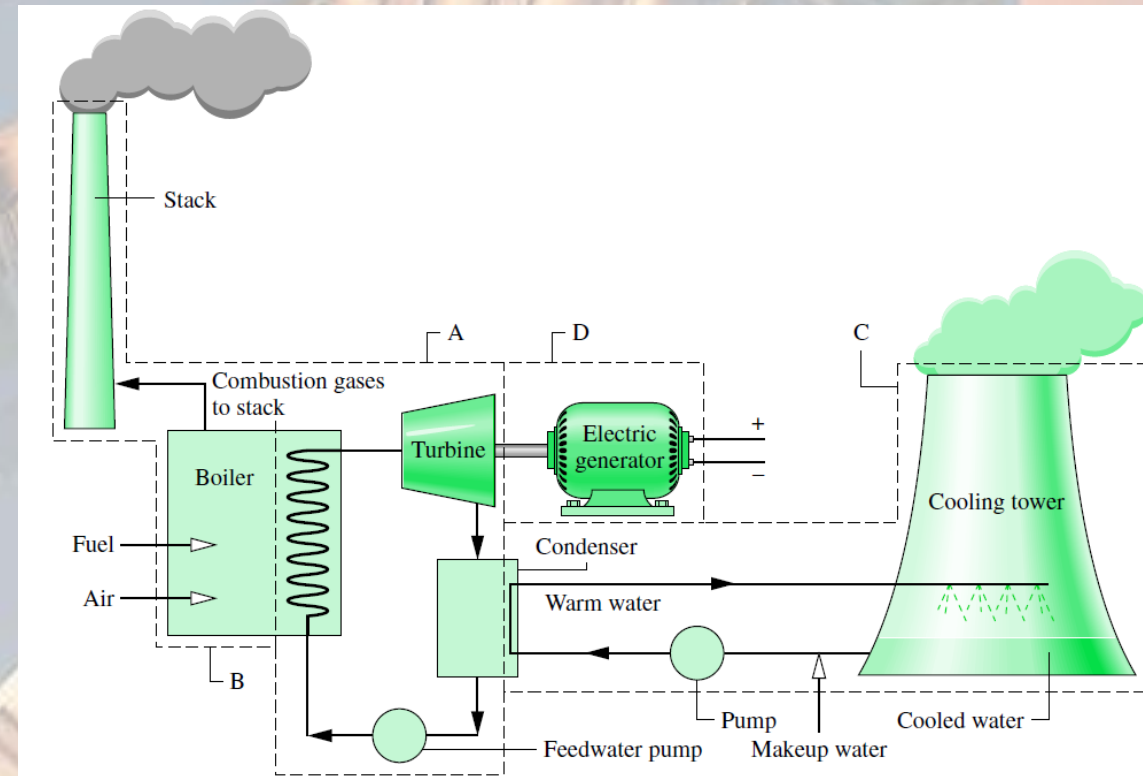
- Outros desvios das idealizações: As irreversibilidades da turbina e da bomba, são denominadas irreversibilidades internas. Porém, as fontes de irreversibilidades mais significativas para uma instalação de potência a vapor estão associadas aos sistemas externos.



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

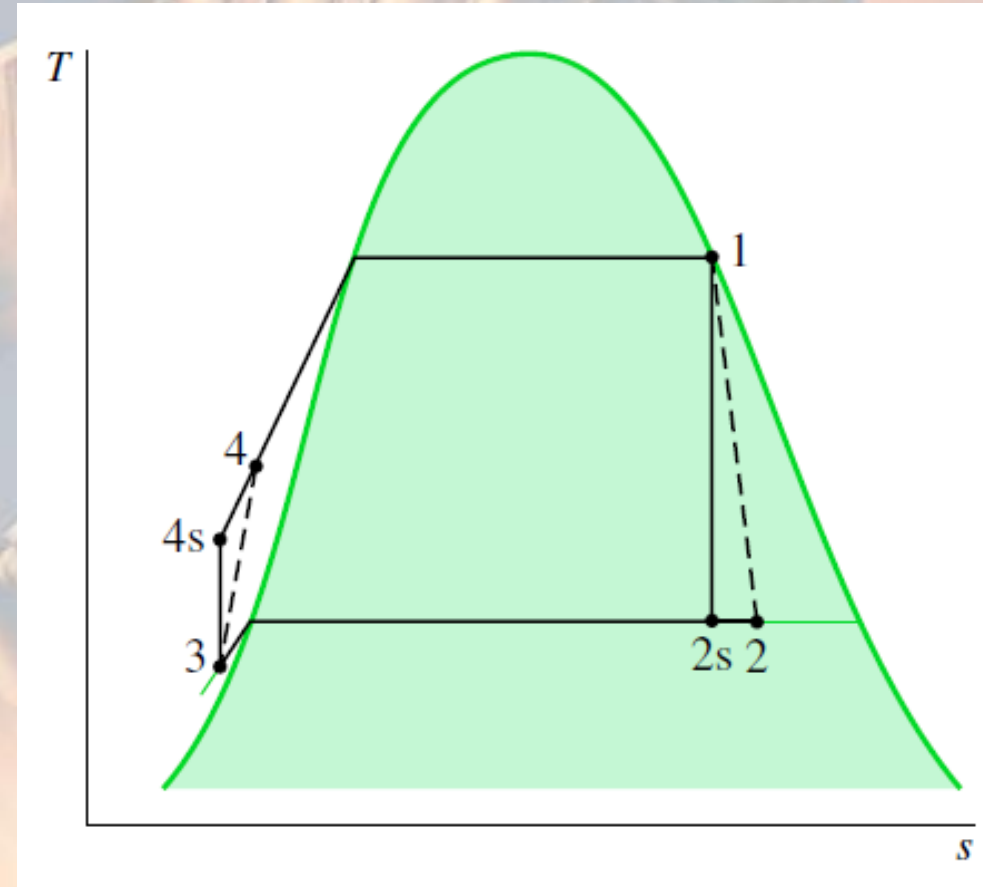
## Irreversibilidade e Perdas Principais

- Outros desvios das idealizações:
- A principal irreversibilidade está associada a combustão do combustível e a transferência de calor posterior dos produtos de combustão para o fluido de trabalho.
- Outras irreversibilidades estão associadas as perdas de calor pelas carcaças dos componentes quentes do sistema e as perdas de carga nas tubulações.



# Analisando Sistemas de Potência a Vapor Irreversibilidade e Perdas Principais

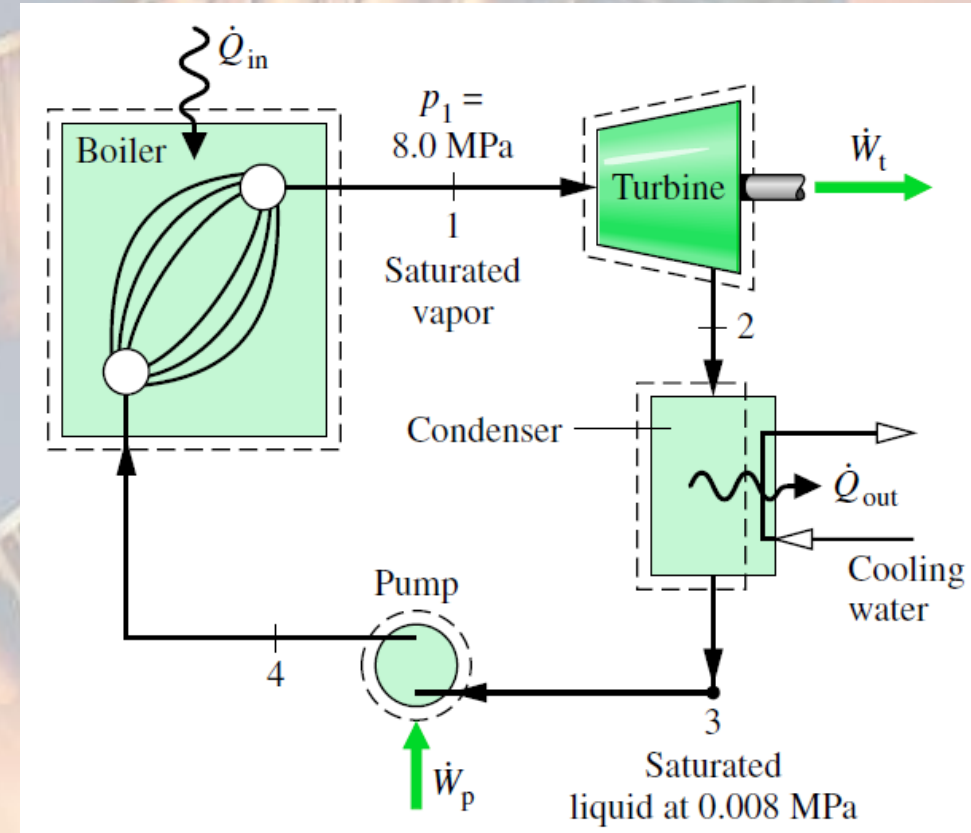
- Outros desvios das idealizações:
- Um outro efeito é verificado no estado 3. Neste caso, a temperatura do fluido de trabalho que sai do condensador seria menor que a temperatura de saturação, o que aumentaria a quantidade de calor necessário na caldeira.



# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

## Exemplo 8.2

- Reconsidere o ciclo de potência de vapor do Exemplo 8.1, mas inclua na análise que a turbina e a bomba possuem uma eficiência isentrópica de 85%, cada uma. Determinar para o ciclo modificado:
  - (a) o rendimento térmico.
  - (b) a vazão mássica de vapor, em kg/h para uma potência útil líquida de 100 MW.
  - (c) a taxa de transferência de calor para o fluido de trabalho à medida que passa através da caldeira, em MW
  - (d) a taxa de transferência de calor do vapor de condensação à medida que passa através do condensador, em MW
  - (e) o fluxo de massa da água de arrefecimento do condensador, em kg/h, se a água de arrefecimento entrar no condensador a 15 °C e sair a 35 °C.

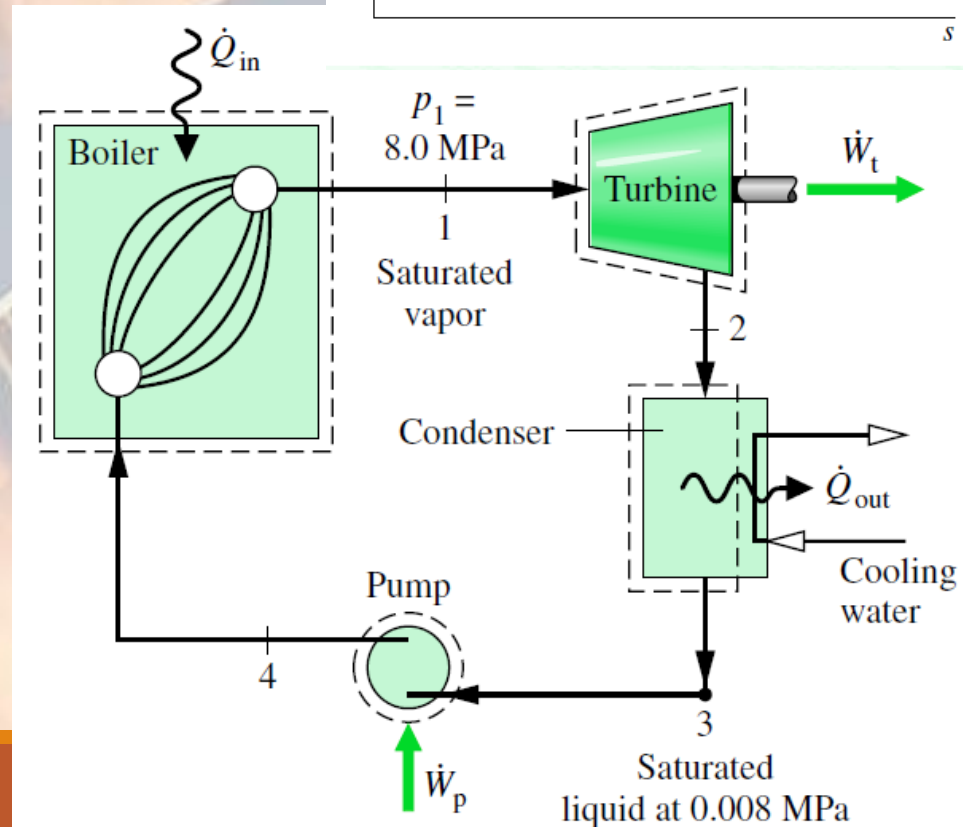
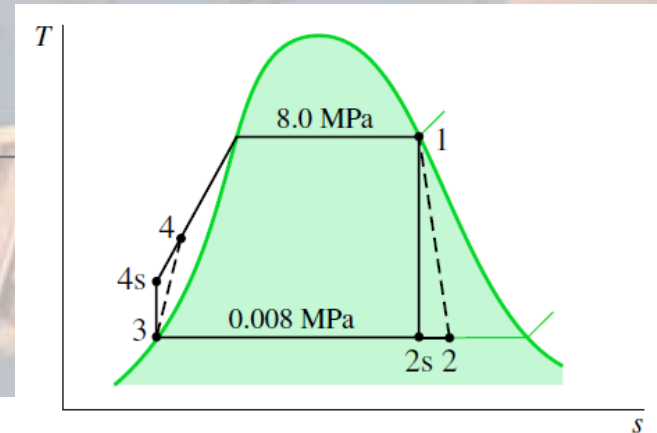




# Analizando Sistemas de Potência a Vapor

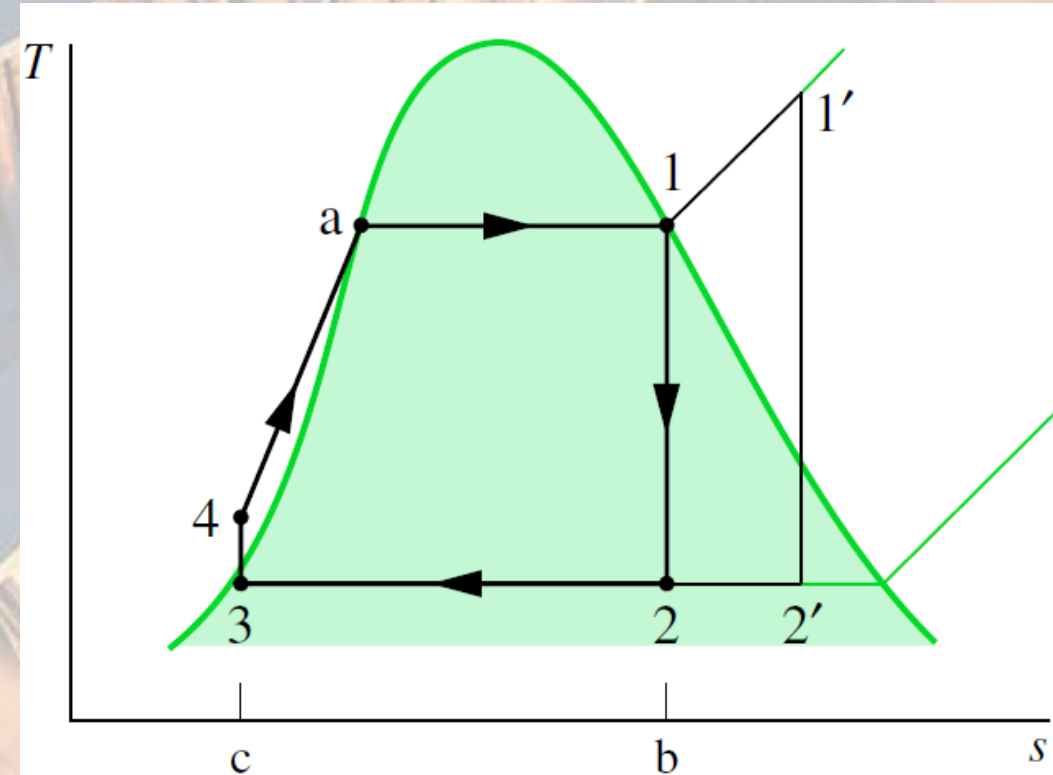
## Exemplo 8.2

- (a) o rendimento térmico.
- (b) a vazão mássica de vapor, em kg/h para uma potência útil líquida de 100 MW.
- (c) a taxa de transferência de calor para o fluido de trabalho à medida que passa através da caldeira, em MW
- (d) a taxa de transferência de calor do vapor de condensação à medida que passa através do condensador, em MW
- (e) o fluxo de massa da água de arrefecimento do condensador, em kg/h, se a água de arrefecimento entrar no condensador a 15 °C e sair a 35 °C.



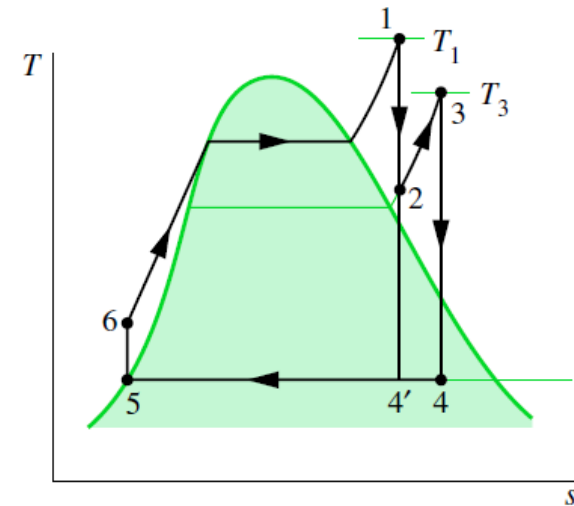
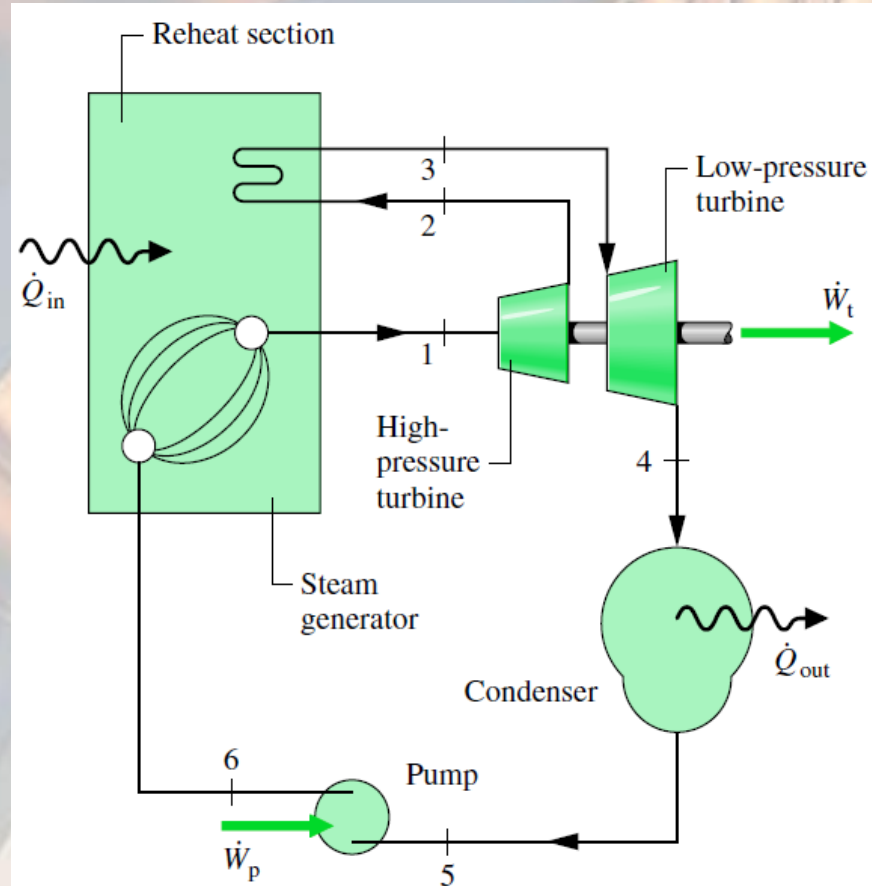
# Melhorando o Desempenho Superaquecimento

- Como não estamos restritos a ter vapor saturado na entrada da turbina, uma energia adicional pode ser somada elevando o vapor a níveis acima de sua saturação.
- Como pode ser verificado, na figura, o superaquecimento eleva a temperatura média de adição de calor, elevando sua eficiência térmica.
- Com superaquecimento, o estado na exaustão da turbina pode cair na região de vapor superaquecido.



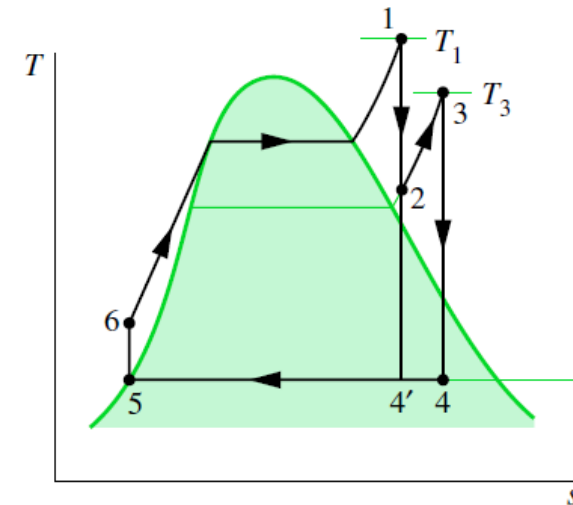
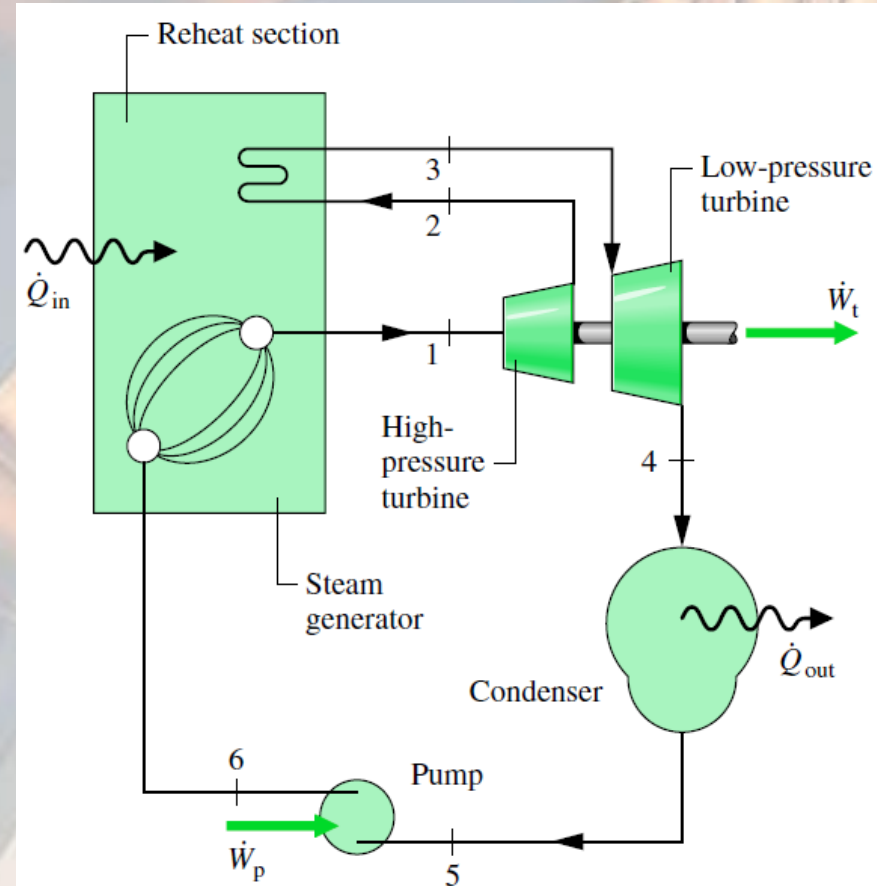
# Melhorando o Desempenho Reaquecimento

- Com o reaquecimento, uma instalação de potência pode tirar vantagem do aumento de eficiência que resulta de pressões maiores e ainda evita um título baixo de vapor na exaustão da turbina.



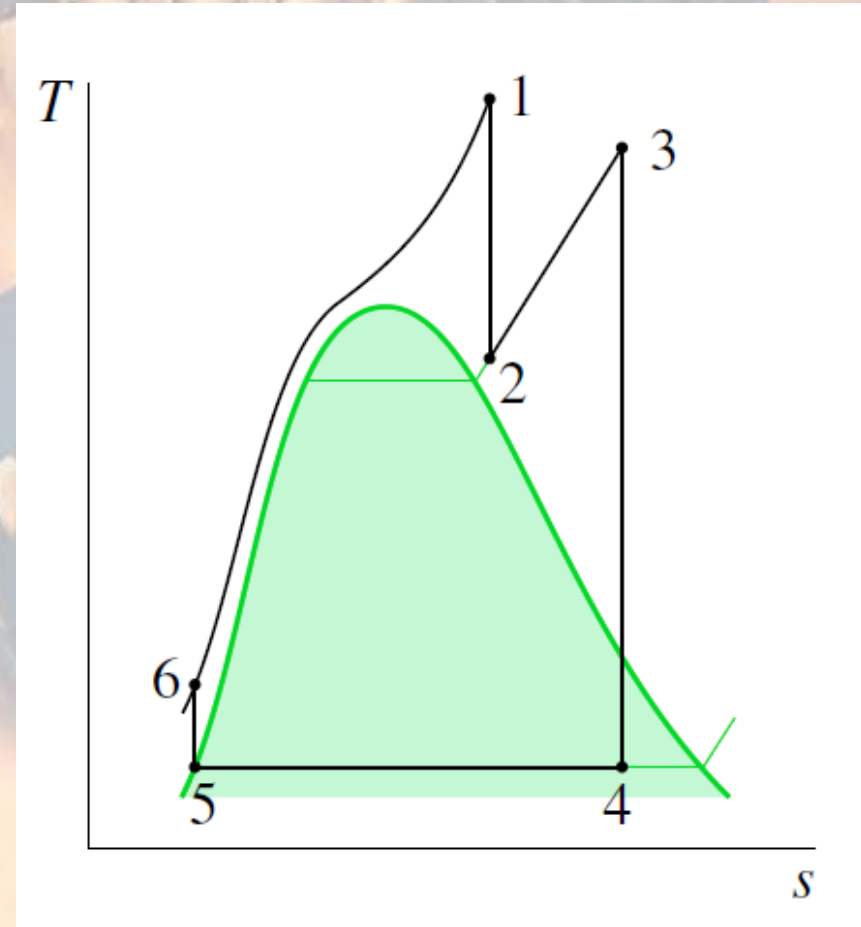
# Melhorando o Desempenho Reaquecimento

- Neste caso, não é evidente o aumento de eficiência do ciclo, pois, embora exista um aumento do trabalho gerado na turbina, existe também um aumento da energia adicionada ao ciclo para reaquecer o vapor.



# Melhorando o Desempenho Ciclo Supercrítico

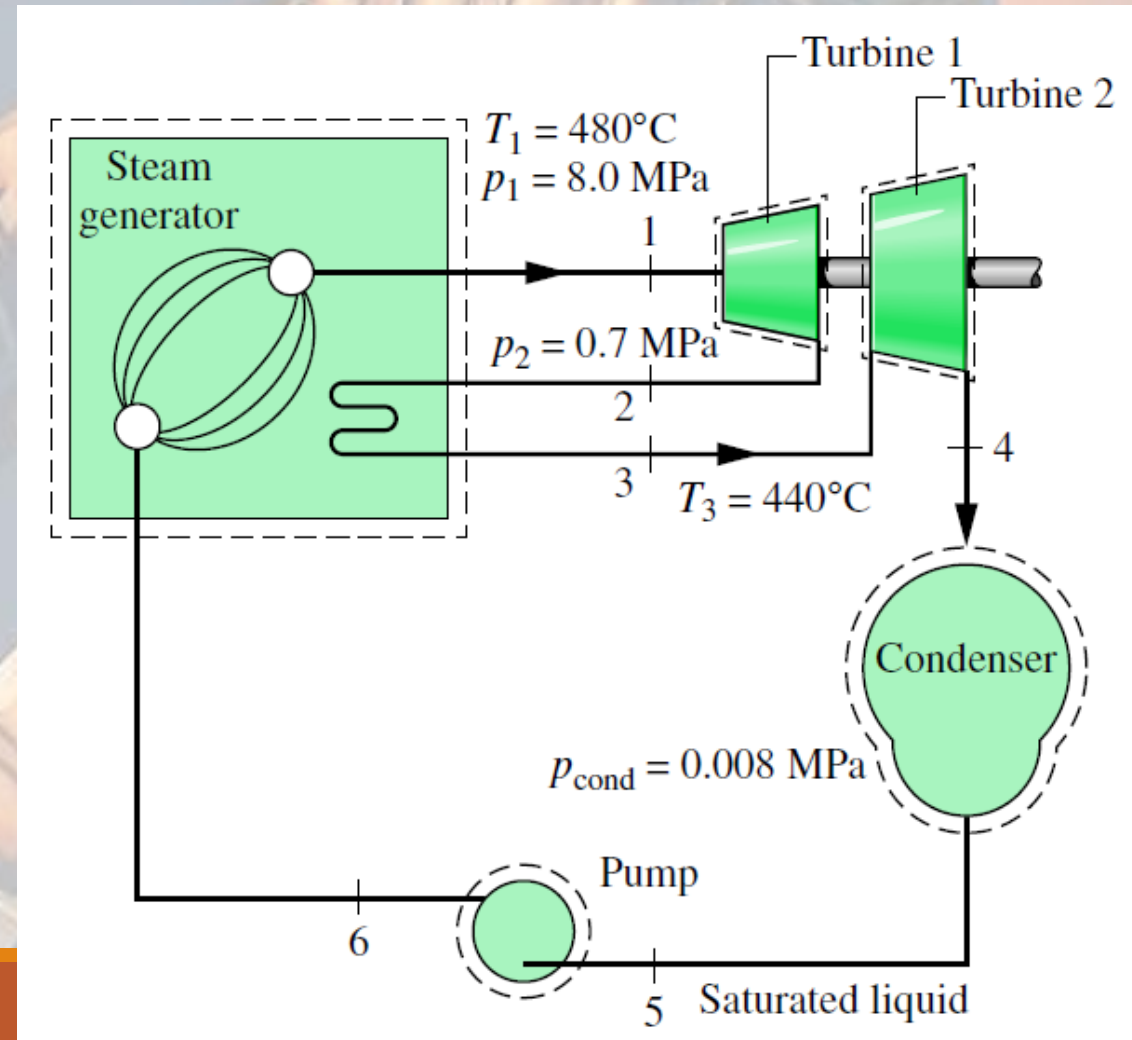
- Neste caso, o ciclo opera com pressões extremamente elevadas, necessitante também de um aporte maior de calor do gerador de vapor.
- Esta operação ainda possui várias limitações de engenharia, no que se refere as limitações metalúrgicas da turbina e na resistência das tubulações.



# Melhorando o Desempenho

## Exemplo 8.3

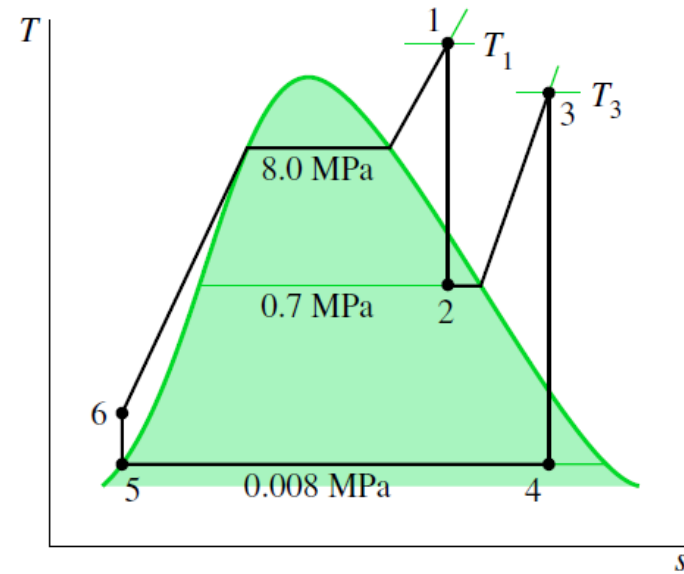
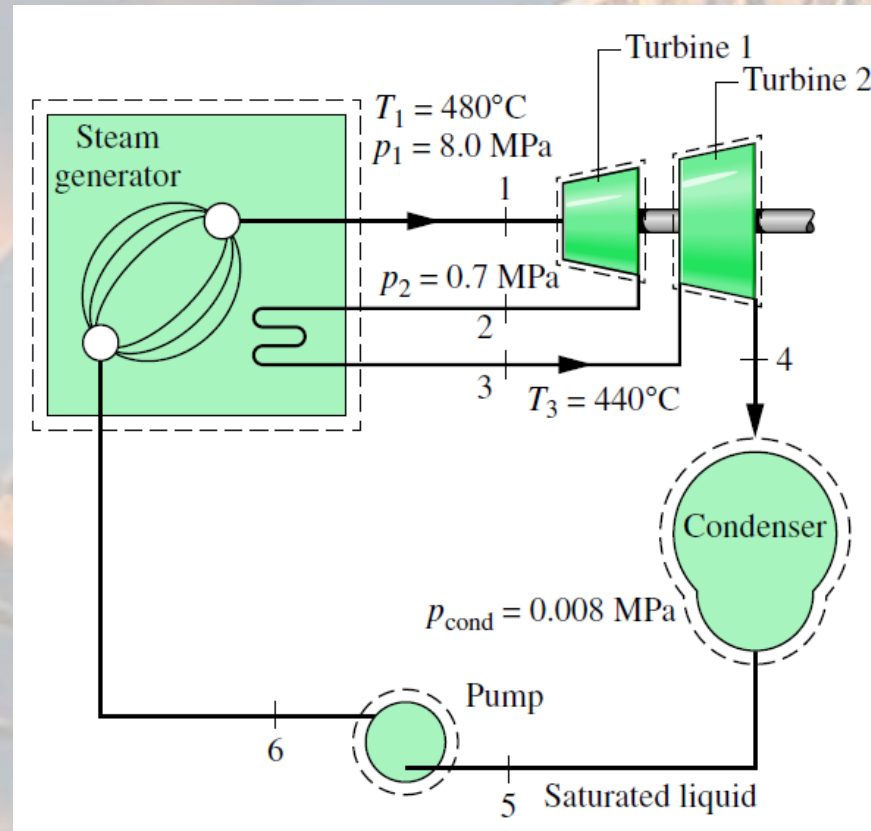
- Vapor de água é o fluido de trabalho em um ciclo Rankine ideal com superaquecimento e reaquecimento. Para os estados termodinâmicos apresentados na figura, determine:
  - A eficiência do ciclo;
  - A vazão mássica do vapor d'água, em kg/h;
  - A quantidade de calor removida no condensador.



# Melhorando o Desempenho

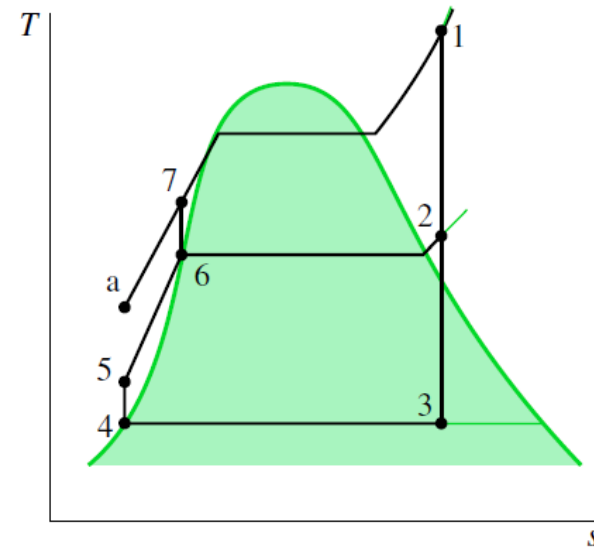
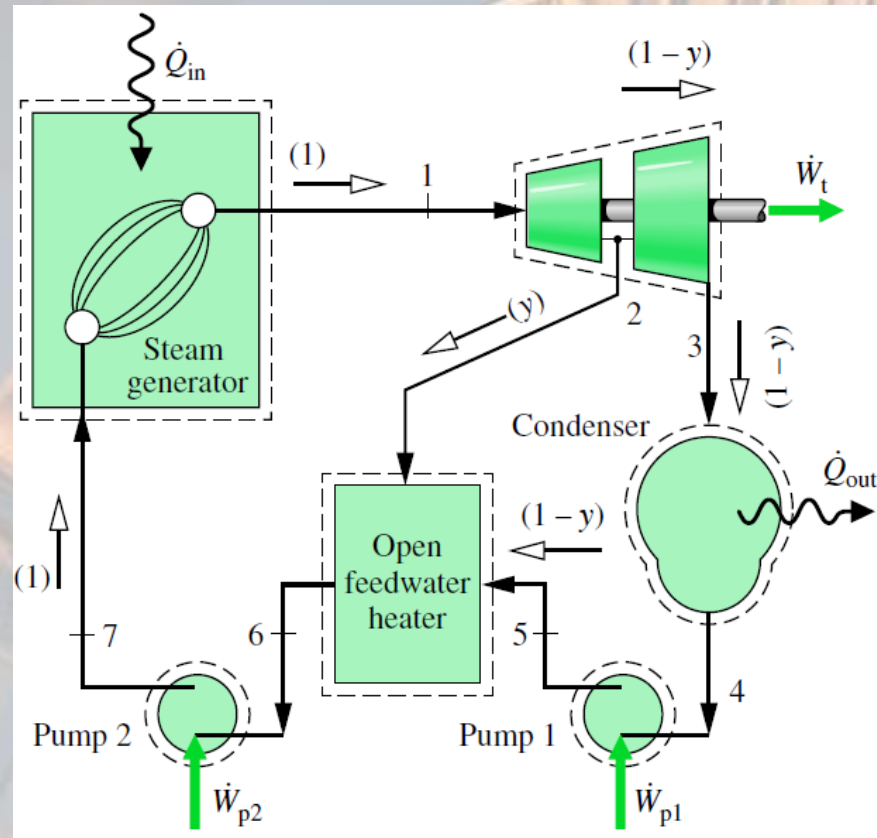
## Exemplo 8.3

- A eficiência do ciclo;
- A vazão mássica do vapor d'água, em kg/h;
- A quantidade de calor removida no condensador.



# Melhorando o Desempenho Regeneração

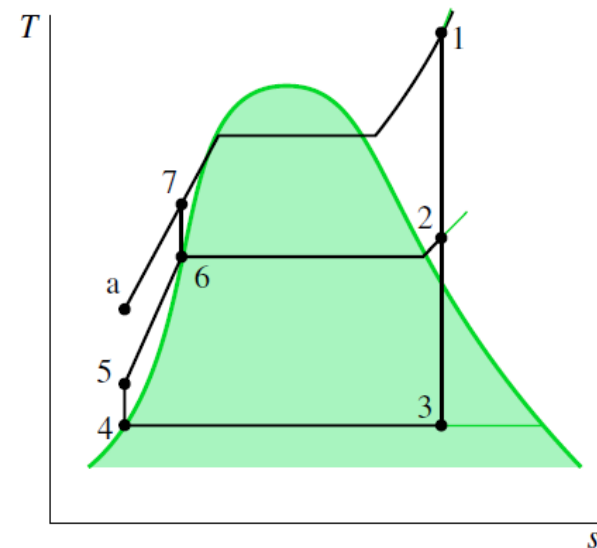
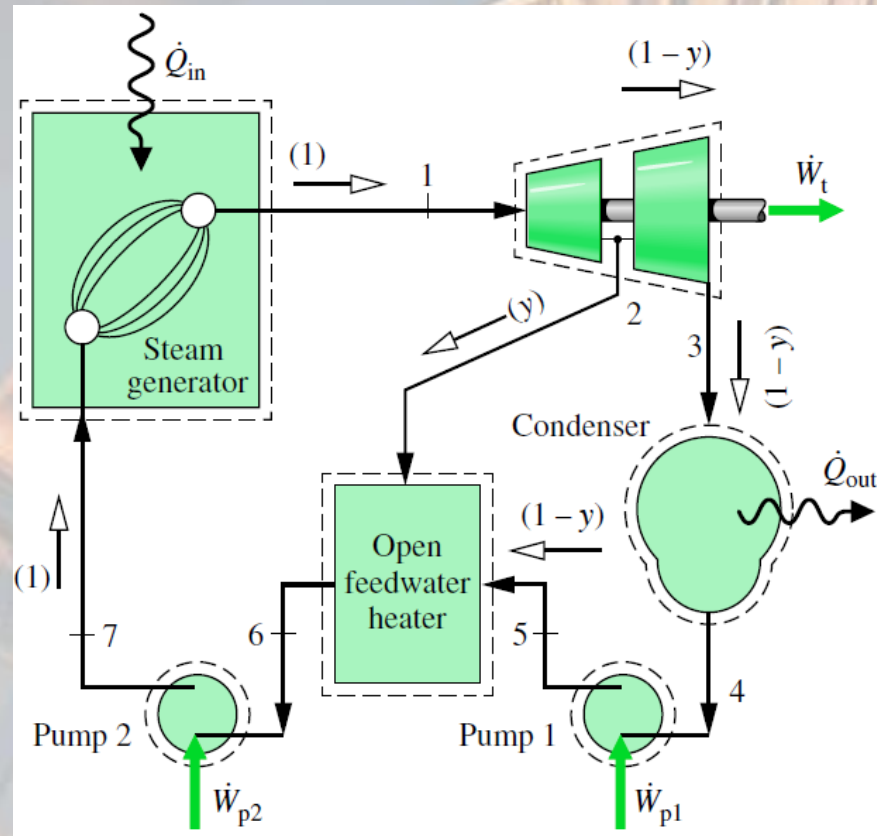
- A regeneração consiste no auxílio do aquecimento da água de alimentação da caldeira através da utilização de parte do vapor que passa pela turbina. Isto reduz a quantidade de calor necessário aquecimento do sistema.





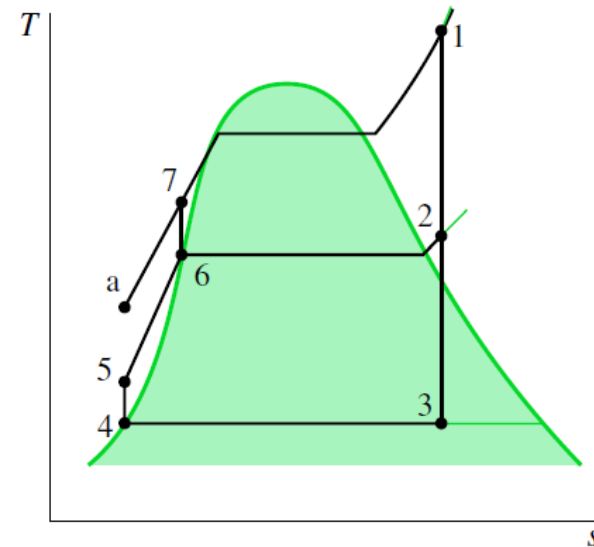
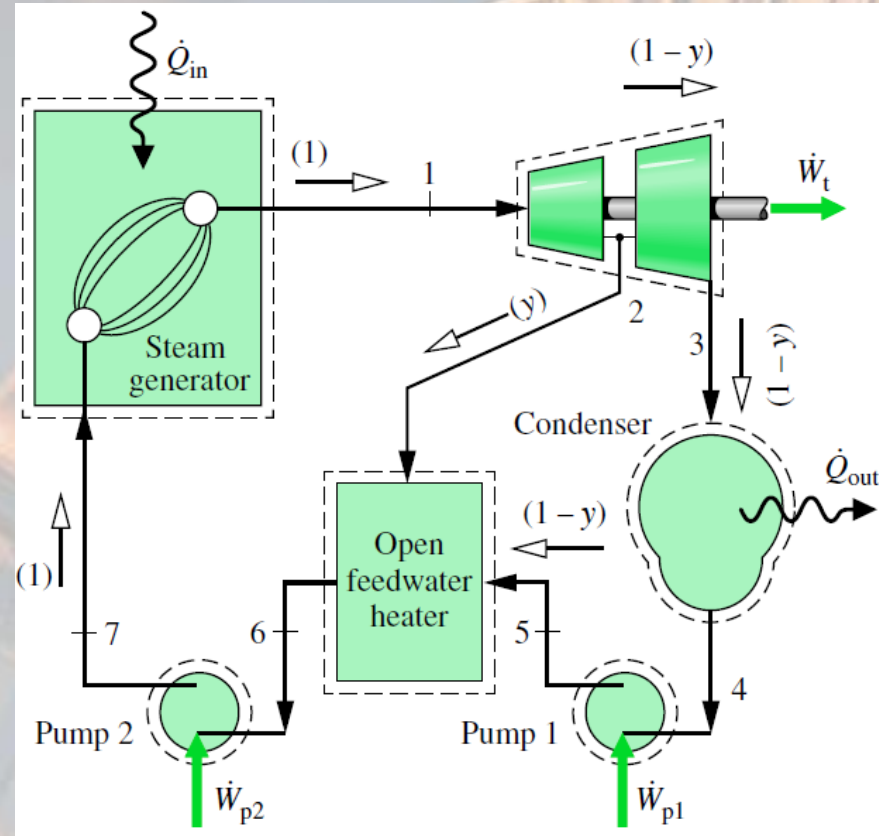
# Melhorando o Desempenho Regeneração

- No ciclo regenerativo não é evidente que a eficiência irá aumentar, embora exista uma redução da energia de entrada no sistema, também existe uma redução do trabalho gerado na turbina.
- Se a redução na turbina for menor que a redução de calor injetado no sistema, teremos um aumento da eficiência.



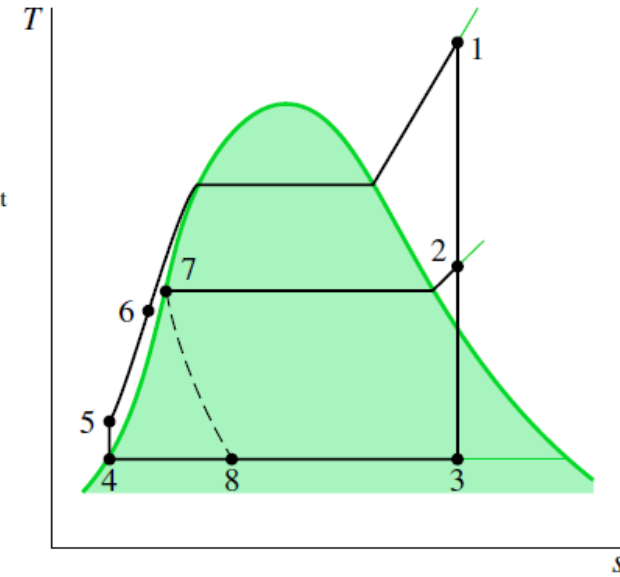
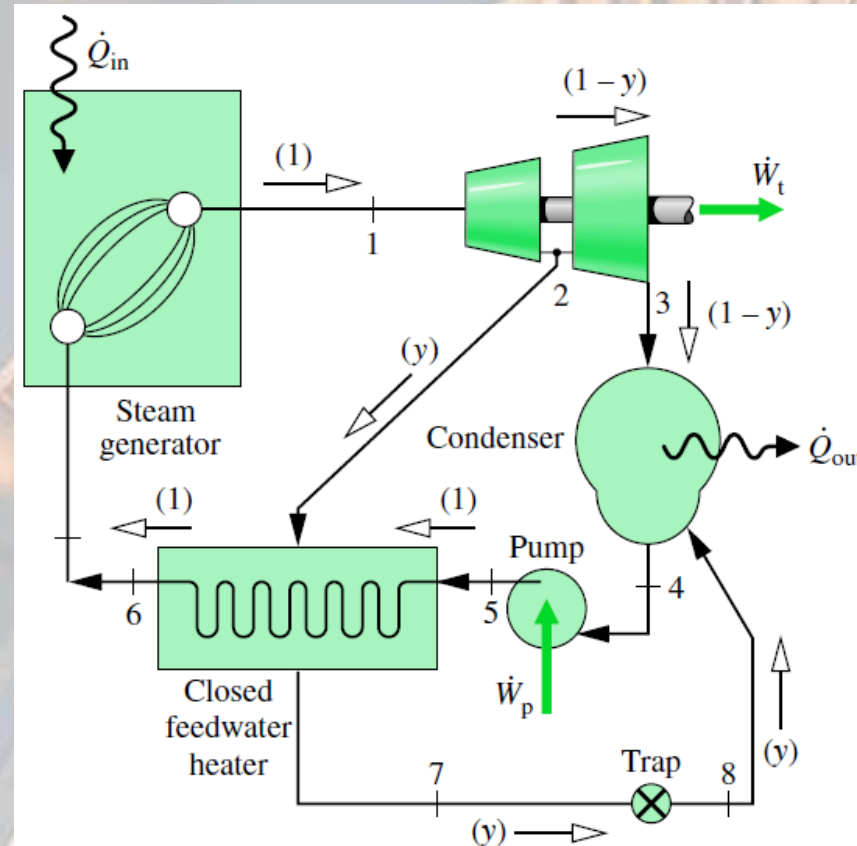
# Melhorando o Desempenho Regeneração – Alimentação Aberta

- Neste caso o vapor sangrado da turbina entra em contato direto com a água de alimentação que saí da primeira turbina.



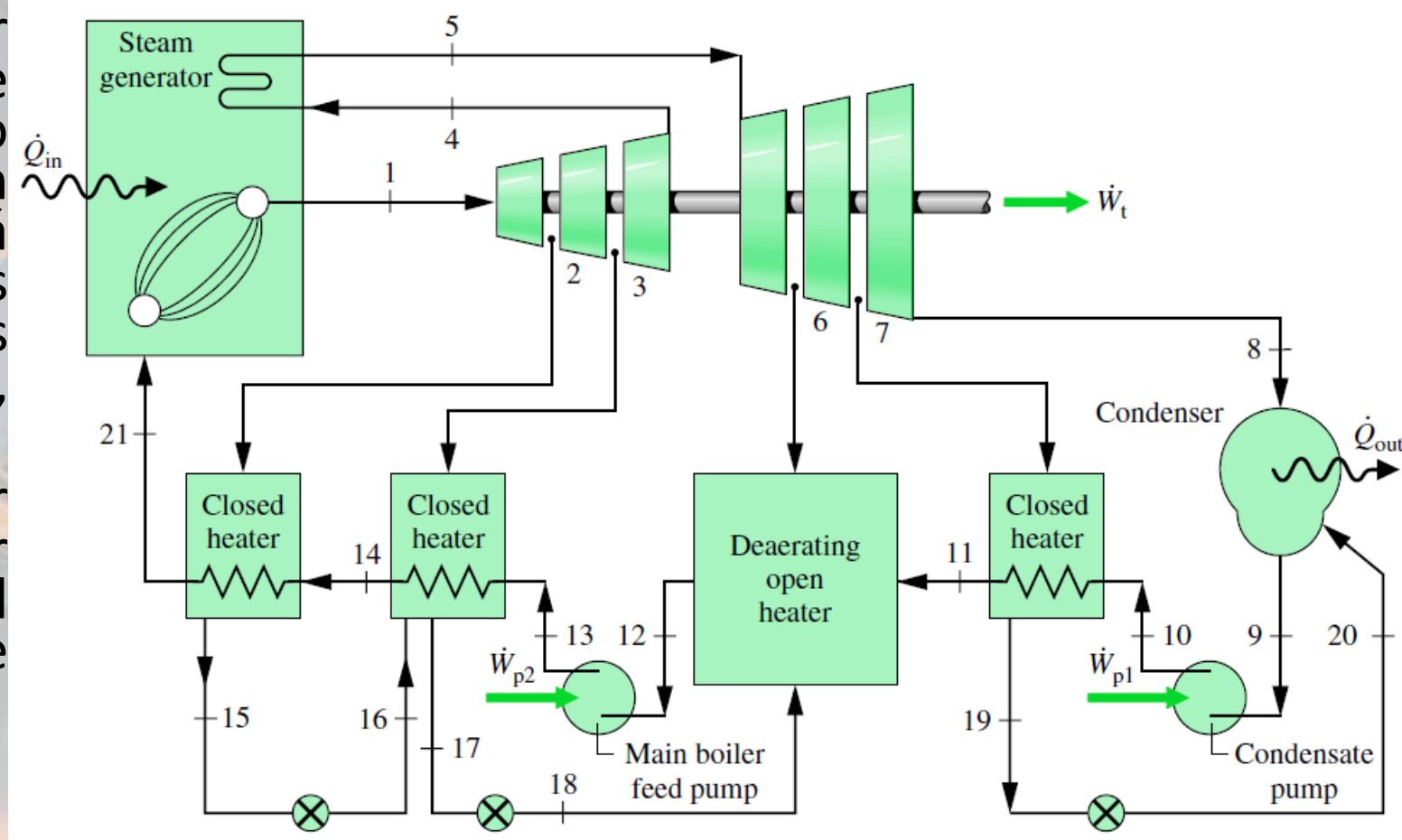
# Melhorando o Desempenho Regeneração – Alimentação Fechada

- Neste caso o vapor sangrado da turbina não entra em contato com a água que vem da bomba. Este cede calor, passa por uma válvula e é encaminhado para o condensador.



# Melhorando o Desempenho Regeneração – Múltiplos

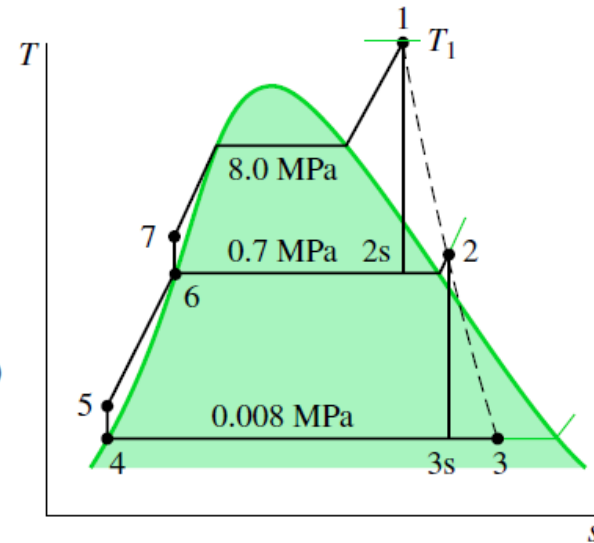
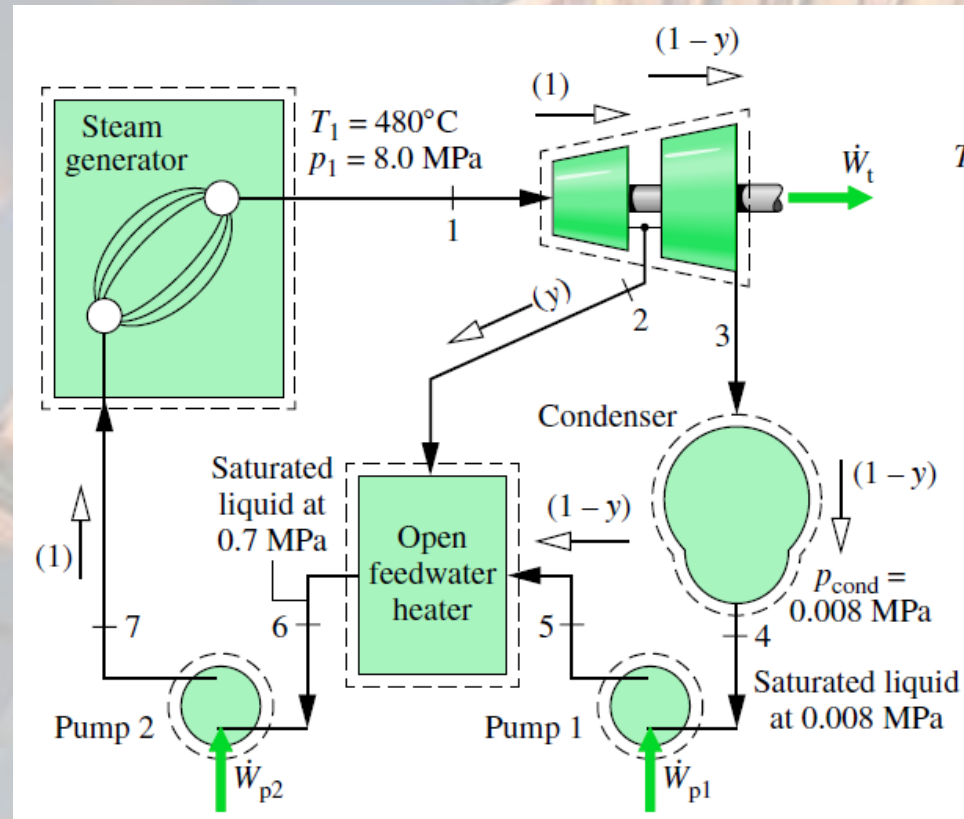
- A eficiência térmica pode ser aumentada pela incorporação de vários regeneradores. O número de regeneradores é baseado em considerações econômicas, já que o aumento está alinhado com o aumento de equipamentos como os trocadores de calor, bombas e tubulações.
- Nestes casos é muito comum ter pelo menos um regenerador aberto (desaerador) responsável pela remoção de oxigênio e outros gases dissolvidos.



# Melhorando o Desempenho

## Exemplo 8.5

- Considere um ciclo de potência a vapor regenerativo com um aquecedor de água de alimentação aberto. Para os parâmetros apresentados na figura, considere que a turbina possui uma eficiência isentrópica de 0,85 e um trabalho líquido de 100MW, determine:
  - A eficiência do ciclo;
  - A vazão de massa do vapor que entra no primeiro estágio da turbina.



# Outros Aspectos do Ciclo a Vapor

## Características do Fluido de Trabalho

---

- A água é usada como fluido de trabalho na grande maioria dos sistemas a vapor porque é abundante e de baixo custo, não tóxica, quimicamente estável e possui variação de entalpia relativamente grande quando se vaporiza.
- As propriedades da água são tais que as razões de trabalho reverso são pequenas e as técnicas de superaquecimento, reaquecimento e regeneração podem ser capazes de aumentar a eficiência do ciclo.

# Outros Aspectos do Ciclo a Vapor

## Características do Fluido de Trabalho

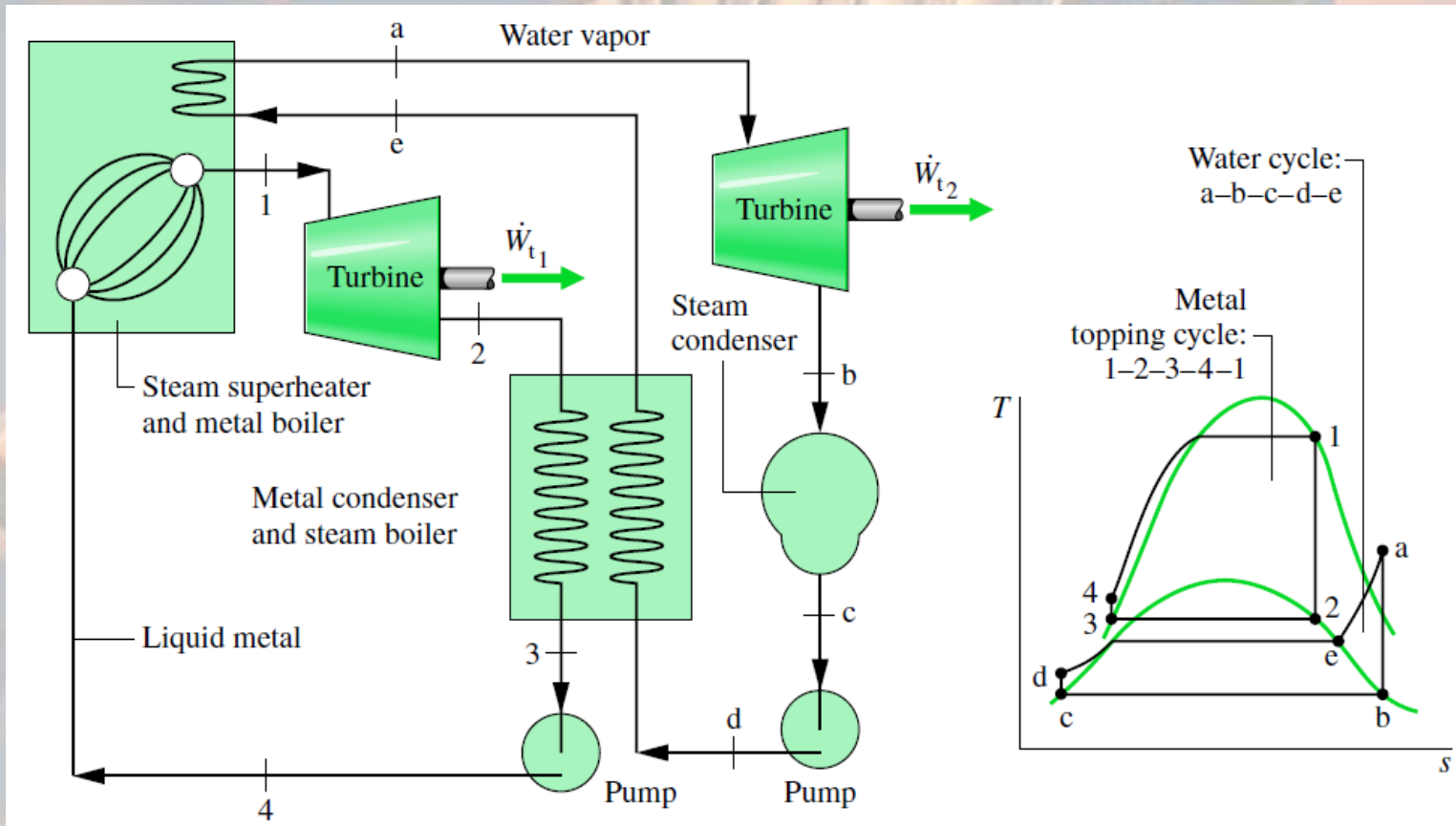
---

- A água é insatisfatória com relação a sua temperatura crítica ( $374,14^{\circ}\text{C}$ ) que cerca de  $225^{\circ}\text{C}$  abaixo das temperaturas máximas admissíveis na entrada de um turbina. Desta forma para atingir temperaturas médias elevadas é necessário a operação em níveis de pressão muito elevadas.
- Outra característica indesejável da água é a de que sua pressão de saturação a temperaturas comum do condensador é bem abaixo da pressão atmosférica. Como resultado, pode entrar ar no sistema.
- Ciclos que operam com temperaturas baixas podem ter um desempenho melhor com um refrigerante como amônia.

# Outros Aspectos do Ciclo a Vapor

## Ciclo de Vapor Binário

- Em um ciclo de vapor binário dois fluidos de trabalho são usados, um com boas características a altas temperaturas e outro com boas características a baixa temperatura.





# Outros Aspectos do Ciclo a Vapor

## Co-geração

---

- A co-geração consiste na estratégia de múltiplos usos do sistema, o que pode gerar aumento de sua eficiência.
- Produtos de combustão oriundos de processos industriais, que seriam descartados em um chaminé, podem ser utilizados para produção de vapor e geração de energia elétrica.
- Bem como o calor rejeitado em um condensador, pode ser utilizado para aquecimento de produtos químicos ou mesmo de água para outros processos.

# Outros Aspectos do Ciclo a Vapor

## Co-geração

- A figura mostra um exemplo simples de uma planta que utiliza parte de seu vapor gerado para um processos interno, que seria desde a sua utilização em máquinas como para processos.

