

# *Máquinas Térmicas I*

## *Ciclos térmicos a vapor*

*por*

*Christian Strobel*

"Existem três tipos de pessoas: as que sabem e as que não sabem contar..."

*- Homer J. Simpson*

## **INTRODUÇÃO**

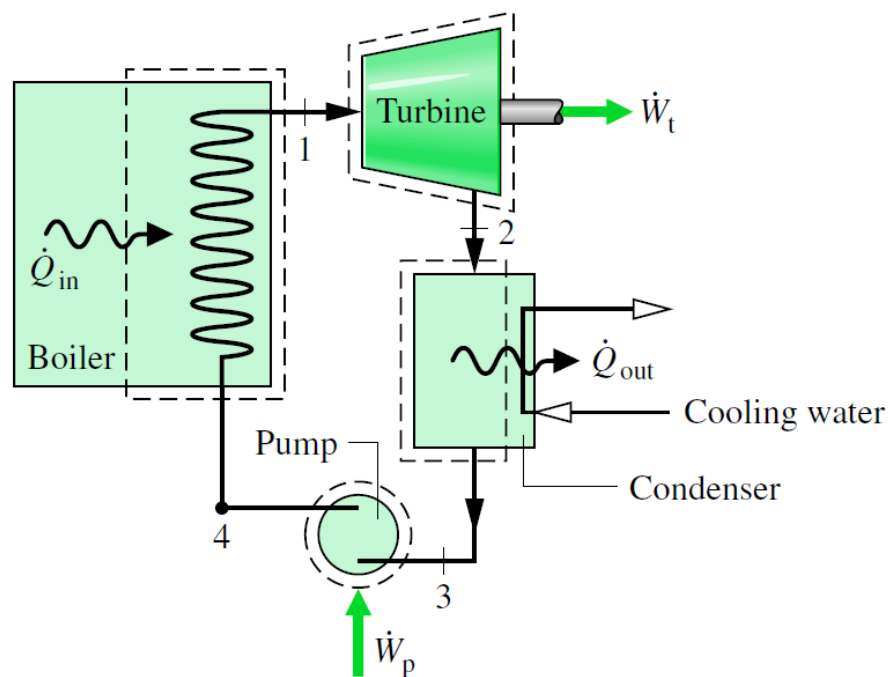
As máquinas térmicas a vapor utilizam a energia fornecida por um combustível pelo processo de combustão para um fluido de trabalho, como a água, para gerar vapor e converter a alta energia deste fluido em trabalho mecânico e/ou em calor para processos secundários de aquecimento.

Apesar do fluido de trabalho poder ser qualquer fluido que consiga alcançar uma situação de vapor superaquecido na saída da caldeira, a água é um fluido com grandes qualidades, visto possuir um alto calor específico, um alto calor latente de vaporização, ampla disponibilidade (baixo custo) e pouca quantidade de resíduos sólidos de evaporação, gerando baixo índice de incrustações na caldeira e nas tubulações.

O vapor de água é um dos meios mais importantes de transporte de energia e o mais utilizado em indústrias e unidades de geração de eletricidade. Máquinas térmicas a vapor constituem plantas de geração de potência em termelétricas, usinas nucleares e termossolares.

## ESQUEMA DE UMA UNIDADE DE POTÊNCIA A VAPOR

A Figura 01 mostra esquematicamente os equipamentos que compõem uma unidade de geração de potência que funciona conforme o Ciclo de Rankine. Esta unidade, em sua versão mais simples, é composta por quatro equipamentos básicos: A bomba hidráulica (*pump*) e a Turbina a vapor (*turbine*), que dividem o sistema em zonas de alta e baixa pressão, a caldeira (*boiler*) e o condensador de vapor (*condenser*), que são responsáveis por fornecer e retirar energia do sistema na forma de calor. Neste exemplo, a turbina aciona um gerador elétrico que converte energia mecânica ( $\dot{W}_t$ ) em eletricidade.

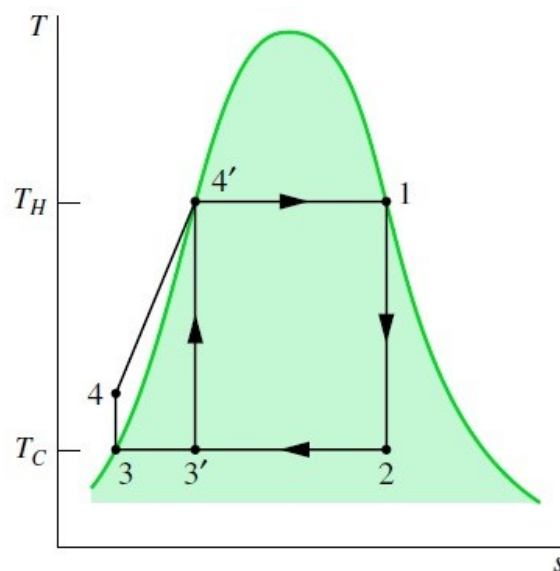


**Figura 1:** Esquema - Planta geradora de potência simples a vapor.  
**Fonte:** Moran e Shapiro (2006)

Melhores explicações sobre o funcionamento desta unidade encontram-se no capítulo 8: "**Sistemas de Potência a Vapor**" do livro "**Princípios de Termodinâmica para Engenharia**" (Moran e Shapiro, 2006).

## O CICLO RANKINE IDEAL

É o ciclo ideal para uma unidade motora simples a vapor. Embora o Ciclo de Carnot seja o que apresenta o melhor rendimento térmico, o mesmo é inviável na prática por: (a) requerer bombeamento de vapor mais líquido (processo 3'-4'); (b) requerer superaquecimento com temperatura constante, ou seja, com expansão (processo 1-1'); e (c) caso não utilize superaquecimento a turbina irá operar só com vapor úmido e com título baixo no final da expansão (processo 1-2).



**Figura 2:** Diagrama T-s - Ciclo Rankine ideal com superaquecimento

**Fonte:** Moran e Shapiro (2006)

De modo a tornar o ciclo viável, algumas modificações devem ser realizadas, de forma a tornar o ciclo compatível com os processos descritos abaixo:

- Processo 1-2: Expansão isentrópica do fluido de trabalho através da turbina, desde a condição de vapor saturado até a pressão do condensador;
- Processo 2-3: Rejeição de calor do fluido de trabalho pelo condensador até o estado de líquido saturado à pressão do

condensador. Um sub-resfriamento é indesejável, visto a energia excedente retirada ter de ser novamente fornecida na caldeira;

- Processo 3-4: Compressão isentrópica na bomba até o estado de líquido comprimido à pressão da caldeira;
- Processo 4-1: Transferência de calor para o fluido de trabalho na caldeira.

## ANÁLISE ENERGÉTICA PARA O CICLO RANKINE IDEAL

O estado 1 é um estado definido no projeto do ciclo. Para um ciclo ideal sem superaquecimento, é o ponto de vapor saturado para a pressão de alta, e para o caso de um ciclo com superaquecimento, deve ser conhecida a capacidade de temperatura máxima do sistema. Então as propriedades de entalpia e entropia devem ser obtidas.

O estado 2 é obtido com a propriedade de entropia do ponto 1, visto o processo de expansão ser isentrópico. Com base na pressão de baixa e na entropia do ponto 1, uma interpolação deve ser realizada para a obtenção da entalpia, ou então a regra da alavanca deve ser utilizada para se determinar o título de saída da turbina:

$$\phi = \phi_{ls} + x(\phi_{vs} - \phi_{ls})$$

O estado 3, via de regra, deve ser dimensionado para o estado de líquido saturado, de modo a evitar um sub-resfriamento desnecessário que ocasiona um maior consumo de combustível e uma menor temperatura na saída da caldeira.

Por fim, o estado 4 é obtido matematicamente através do conceito de uma bomba operando de maneira reversível. Desta forma, de acordo com a primeira lei da termodinâmica,

$$\dot{W}_b = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

E de acordo com a segunda lei da termodinâmica, considerando que o volume específico muda muito pouco no estado de líquido

comprimido,

$$\dot{W} = - \int_3^4 v \, dP = \dot{m} [v_3 (P_3 - P_4)]$$

Lembrando que, para as propriedades 2 e 4 obtidas através desta metodologia, deve ser levado o sub índice "s", que denota um processo isentrópico, ou seja, ideal.

Relembrando, a primeira lei da termodinâmica para um volume de controle é dada por:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \left( h_e + \frac{w_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{m}_s \left( h_s + \frac{w_s^2}{2} + gz_s \right)$$

Considerando que em um ciclo de potência a vapor o sistema opera em regime permanente, e que as variações de energia cinética e potência são desprezíveis em relação à variação de entalpia, tem-se:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}(h_e - h_s) = 0$$

A potência fornecida pela turbina é dada por:

$$\dot{W}_T = \dot{m} (h_1 - h_2)$$

A potência dada pela bomba:

$$\dot{W}_b = \dot{m} (h_3 - h_4)$$

E a potência líquida do sistema é dado pela soma das potências:

$$\dot{W}_{líq} = \dot{W}_T + \dot{W}_b = \dot{m} (h_1 - h_2 + h_3 - h_4)$$

A transferência de calor na caldeira é:

$$\dot{Q}_{cald} = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

E a taxa de transferência de calor rejeitada pelo condensador é dada pela expressão:

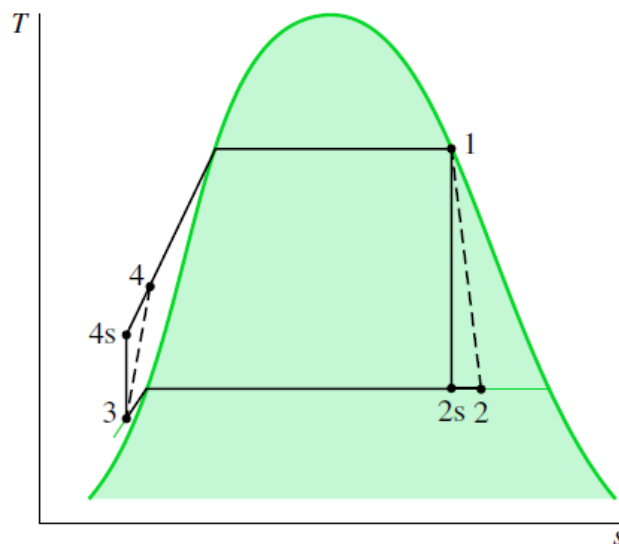
$$\dot{Q} = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

E por fim, a eficiência do ciclo é dada pela razão entre a potência líquida do sistema pela potência gasta para alimentar o sistema:

$$\eta_{ciclo} = \frac{\text{útil}}{\text{gasto}} = \frac{\dot{W}_{líq}}{\dot{Q}_{cald}} = \frac{h_1 - h_2 + h_3 - h_4}{h_3 - h_2}$$

## O CICLO RANKINE COM IRREVERSIBILIDADES

Para o ciclo real, considerando irreversibilidades, o conceito de eficiência isentrópica apresentada pela segunda lei da termodinâmica é necessário.



**Figura 3:** Diagrama T-s – Efeitos das irreversibilidades

**Fonte:** Moran e Shapiro (2006)

Para a turbina, a principal irreversibilidade é a expansão não resistida, o que eleva o valor de entropia. A eficiência isentrópica para a turbina é dada por:

$$\eta_T = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Para a bomba, o efeito de atrito do fluido com o rotor é o principal responsável pelo aumento de entropia. A eficiência isentrópica para processos de bombeamento é dada pela expressão:

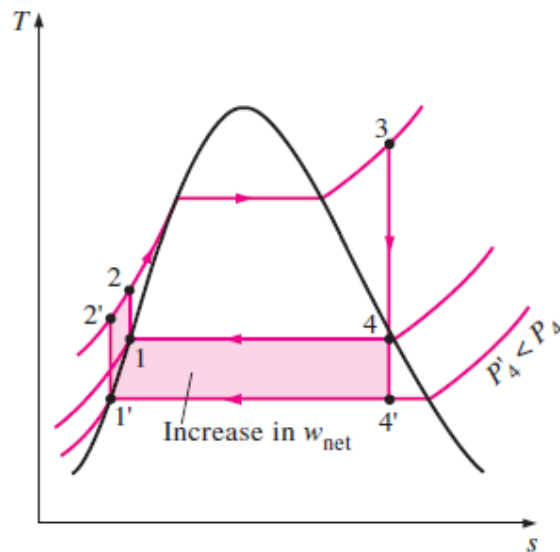
$$\eta_B = \frac{h_3 - h_{4s}}{h_3 - h_4}$$

Desta forma, a tratativa matemática é a mesma, mas considerando para os pontos 2 e 4 as entalpias corrigidas para o sistema.

## AUMENTO NA EFICIÊNCIA DO CICLO RANKINE

Existem algumas formas de elevar a eficiência de ciclos a vapor:

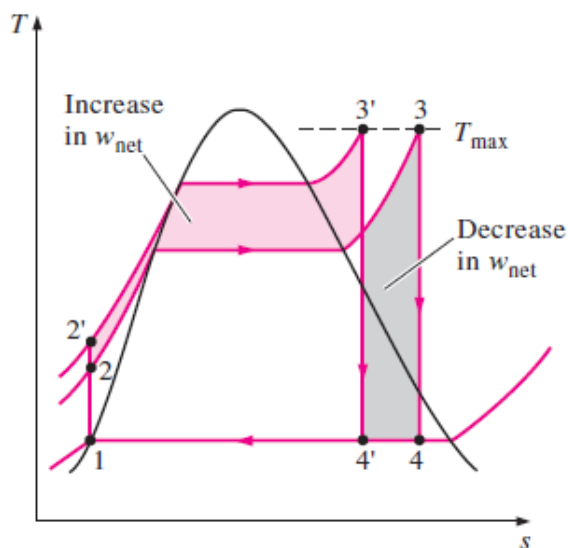
a) Reduzir a pressão no condensador;



**Figura 4:** Efeito da redução de pressão no condensador - potência

**Fonte:** Cengel e Boles (2005)

b) Elevar a pressão na caldeira;



**Figura 5:** Efeito do aumento da pressão na caldeira - potência

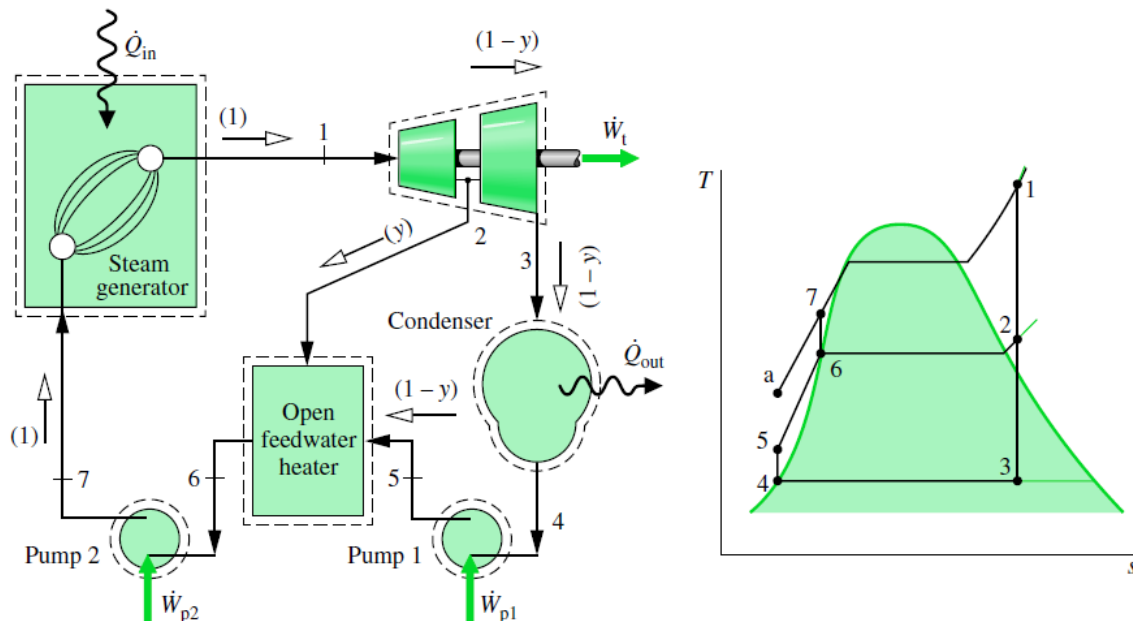
**Fonte:** Cengel e Boles (2005)





Na proposta (d), faz-se necessário conhecer a(s) pressão(ões) intermediária(s), e a temperatura de reaquecimento. Novos pontos surgem, mas a metodologia é a mesma.

e) Extração com regeneração.



**Figura 8:** Ciclo Rankine com Extração e Regeneração

**Fonte:** Moran e Shapiro (2006)

Nesta proposta, o fator mais importante é levantar as vazões que fluem em cada componente, visto haver uma extração no primeiro estágio da turbina.