

# Apêndices

## Apêndice 1- O Ciclo Rankine

O aproveitamento da energia de combustão gerando vapor que alimenta uma turbina onde o vapor é expandido gerando energia mecânica convertida em energia elétrica através de um gerador constitui o chamado ciclo Rankine. O ciclo é completado pela condensação do vapor exausto da turbina e posterior bombeamento e pré-aquecimento até a condição de entrada na caldeira novamente.

O ciclo Rankine é o ciclo da água/vapor que compreende idealmente os seguintes processos:

- 1-2 :Aumento de pressão (bombeamento) adiabático da água;
- 2-3: Fornecimento de calor a pressão constante levando à evaporação da água e subsequente superaquecimento do vapor;
- 3-4: Expansão adiabática do vapor na turbina;
- 4-1: Condensação do vapor à pressão constante.

Outros fluidos de trabalho foram propostos para o ciclo Rankine. A escolha do fluido depende da temperatura de trabalho. Para altas temperaturas (acima de 500 °C) são requeridos fluidos com altas temperaturas críticas (como o mercúrio ou o potássio) (Van Wylen e Sonntag, 1985). Para temperaturas menores o vapor continua sendo o fluido mais adequado, por ser barato, disponível, não ser tóxico e suas propriedades bem conhecidas. Quando o fluido de trabalho é orgânico, como refrigerantes ou iso-butano por exemplo, o ciclo é chamado Ciclo Rankine Orgânico (Anônimo, 2005).

Segue, na Figura 57, um esquema com os principais equipamentos e processos do ciclo Rankine convencional:

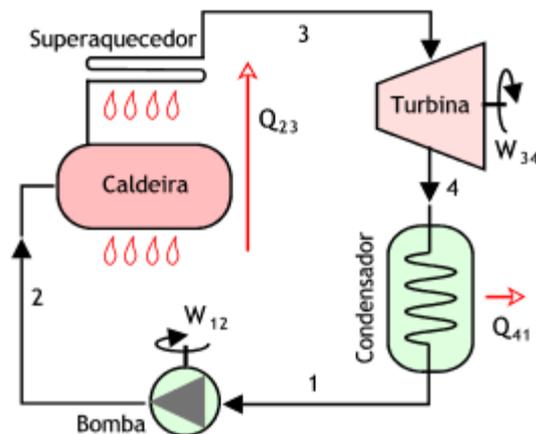


Figura 57- Esquema Simplificado do Ciclo Rankine

O diagrama T vs S apresentado na Figura 58 representa o ciclo Rankine ideal:

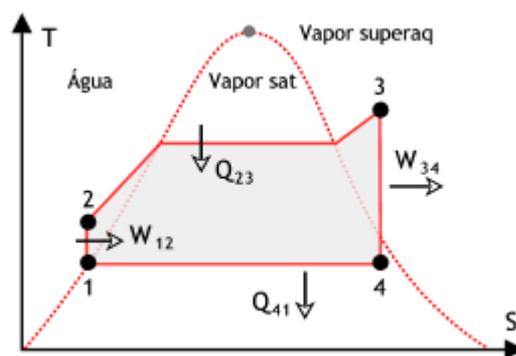


Figura 58- Diagrama T vs S do ciclo Rankine ideal com superaquecimento

No ciclo Rankine real existem perdas por atrito e por condução e radiação de calor reduzindo a eficiência do ciclo.

O ciclo Rankine pode ser otimizado, do ponto de vista de eficiência energética, com a utilização das seguintes alterações:

- Reaquecimento: o vapor é expandido em um primeiro conjunto de estágios de turbina (sessão de alta pressão) até uma pressão intermediária e passa por um reaquecedor na caldeira antes de ser admitido pelo segundo conjunto de estágios da turbina (sessão de baixa pressão). Esta alternativa tem a vantagem de aumentar a potência gerada aumentando a área que representa o trabalho realizado no diagrama T vs

S sem exceder as limitações metalúrgicas (El Wakil, 1984);

Seguem, nas Figuras 59 e 60, o esquema de uma planta operando com reaquecimento e o respectivo diagrama T vs S para o ciclo ideal.

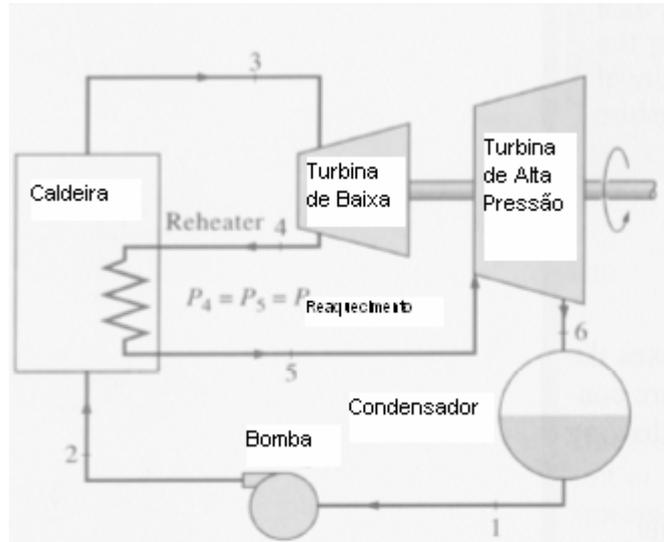


Figura 59- Esquema de um ciclo Rankine com reaquecimento

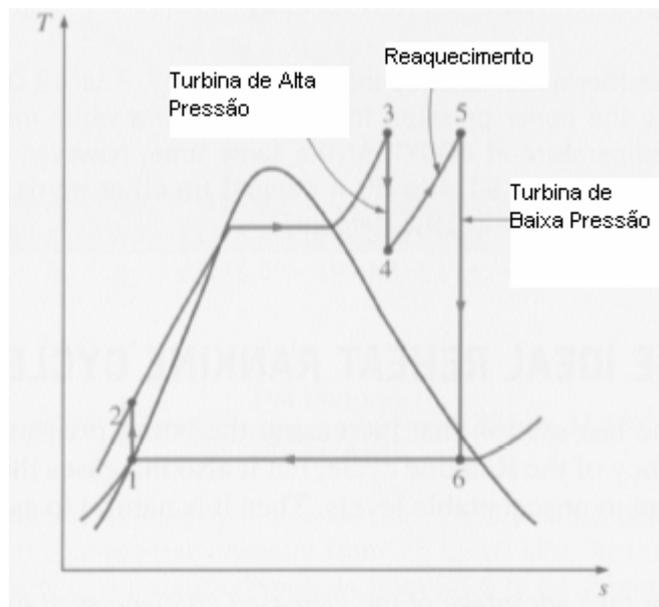


Figura 60- Diagrama T vs S do ciclo Rankine ideal com reaquecimento

- Regeneração: consiste na troca de calor entre extrações de vapor da turbina e a água de alimentação de caldeira. Esta alternativa permite um aumento na temperatura média do fluido de trabalho o que aumenta a eficiência termodinâmica do ciclo.

Seguem, nas Figuras 61 e 62, o esquema de uma planta operando com regeneração e o respectivo diagrama T vs S para o ciclo ideal.

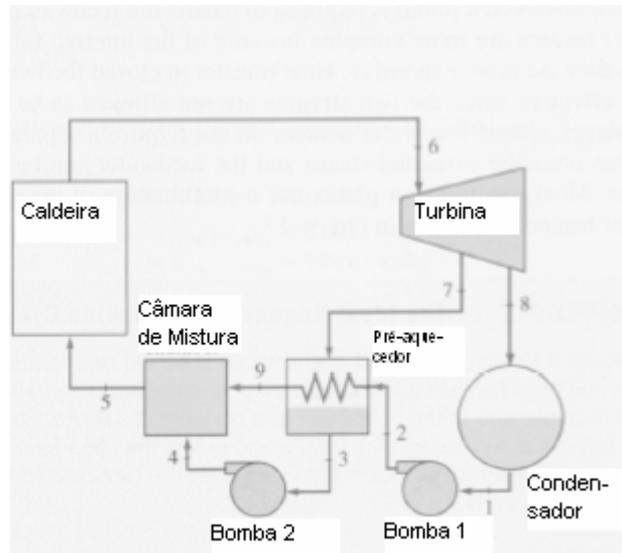


Figura 61- Esquema do ciclo Rankine com regeneração

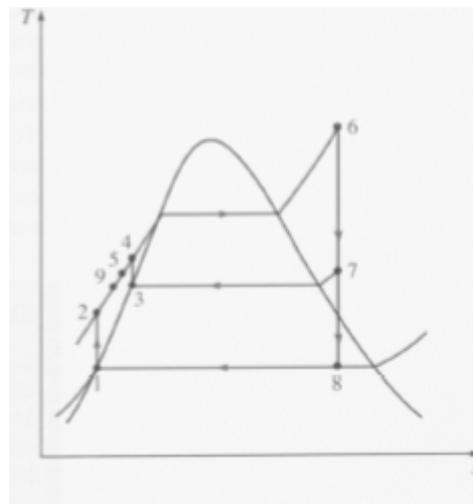


Figura 62- Diagrama T vs S do ciclo Rankine ideal com regeneração

## Apêndice 2- Análise de Primeira Lei

O balanço energético realizado com a aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica para cada um dos componentes do ciclo será utilizado no estudo comparativo como uma das etapas de avaliação.

Considerando um volume de controle passando por um processo em que calor é adicionado e trabalho é realizado (Figura 63), pode-se expressar definir a equação (8.1) de conservação de energia em sua forma simplificada (desprezando as variações de energia potencial e cinética), que será utilizada no presente estudo para avaliação do balanço energético dos componentes do ciclo e do ciclo como um todo:

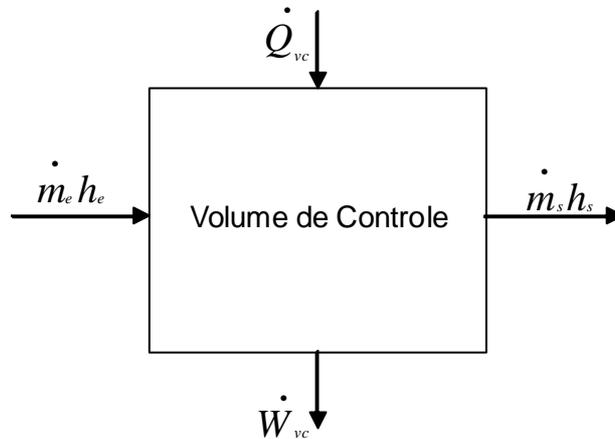


Figura 63- Esquema de um volume de controle- balanço energético

$$\dot{Q}_{vc} + \sum(\dot{m}_e h_e) = \sum(\dot{m}_s h_s) + \dot{W}_{vc} \quad (\text{A2.1})$$

A análise de Primeira Lei para o ciclo Rankine ideal (Figura 57), ou seja, considerando a que bomba é adiabática reversível assim como a turbina e sem perdas nas tubulações, fornece:

$$\text{Trabalho realizado pela turbina: } w_t = h_3 - h_4 \quad (\text{A2.2})$$

$$\text{Calor fornecido ao fluido de trabalho na caldeira: } q_f = h_3 - h_2 \quad (\text{A2.3})$$

$$\text{Calor rejeitado no condensador: } q_r = h_4 - h_1 \quad (\text{A2.4})$$

$$\text{Trabalho realizado sobre a bomba: } w_b = h_2 - h_1 \quad (\text{A2.5})$$

$$\text{Trabalho líquido realizado pela planta: } w_l = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \quad (\text{A2.6})$$

E a eficiência de Primeira Lei pode ser obtida por:

$$\eta = \frac{\text{Energia Produzida}}{\text{Energia Fornecida}} \quad (\text{A2.7})$$

Logo, a eficiência térmica de um ciclo Rankine ideal é dada por:

$$\eta_T = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (\text{A2.8})$$

### Apêndice 3- Análise de Segunda Lei

A 1ª Lei apresenta, entretanto, algumas limitações. Segundo Kotas (1985), a 1ª Lei trabalha com várias formas de energia transferidas entre o volume de controle e suas redondezas e com a variação de energia armazenada pelo sistema. Ela trata das interações de calor e trabalho como formas equivalentes de energia em trânsito e não oferece indicação sobre a possibilidade de processos espontâneos ocorrendo numa certa direção. A 2ª Lei da Termodinâmica é, então, requerida para estabelecer a diferença de qualidade entre as energias mecânica e térmica e a para indicar as direções de processos espontâneos.

A análise pela 2ª Lei da Termodinâmica, também conhecida como Análise Exergética ou Análise de Disponibilidade, fornece uma análise qualitativa das parcelas de energia envolvidas num determinado processo. Entenda-se por qualidade das parcelas de energia como a capacidade que estas têm de causar modificações no processo (Fontoura, 1990).

Um processo reversível é um processo ideal onde não há perdas. Um volume de controle passando por um processo reversível fornecerá o máximo trabalho possível de ser fornecido. Desta forma, o estabelecimento do processo reversível permite comparar a performance de ciclos reais. O processo ideal ou reversível é o parâmetro de referência a partir do qual os processos reais podem ser avaliados.

A máxima eficiência, ou eficiência adiabática, para uma máquina térmica operando entre um reservatório quente com temperatura  $T_Q$  e um reservatório frio com temperatura  $T_F$  é dada pela eficiência de Carnot:

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_Q - T_F}{T_Q} = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \quad (\text{A3.1})$$

Esta é a eficiência de uma máquina térmica operando em um processo cíclico reversível. Como os ciclos térmicos têm que rejeitar calor para uma fonte fria, a eficiência nunca é igual 100%.

Um processo real é inevitavelmente acompanhado de um aumento da entropia global. Segundo Kotas (1985), existem dois grupos de fenômenos dentre os processos irreversíveis. Um envolve a dissipação de trabalho em energia interna do sistema, causada por fricção do fluido, histerese mecânica, resistência elétrica, etc. O outro grupo de fenômenos está associado a processos espontâneos de não-equilíbrio, em que o sistema tende a se mover de maneira irrestrita de um estado de não-equilíbrio para um estado de equilíbrio. Fenômenos típicos deste grupo são as reações espontâneas de combustão, difusão, expansão irrestrita e processos tendendo ao equilíbrio térmico.

As irreversibilidades ainda podem ser classificadas como internas ou externas ao ciclo. As externas são decorrentes da diferença de temperatura entre a fonte de calor primário, no caso o gás combustível proveniente da mistura do gás de coqueria com o gás de alto forno com o fluido de trabalho, no caso água desmineralizada. As internas são resultado de atrito, estrangulamento ou mistura do fluido de trabalho. Destas, as mais importantes são as irreversibilidades nas turbinas e bombas e a perda de pressão nos trocadores de calor, válvulas, tubulações, curvas, etc (El Wakil, 1984).

Neste ponto, faz-se necessária a definição de irreversibilidade num processo termodinâmico. Considerando um volume de controle passando por um processo real em regime permanente, há irreversibilidades presentes enquanto o processo ocorre. A taxa de realização de trabalho pelo volume de controle durante o processo é  $\dot{W}_{vc}$  e a taxa de troca de calor,  $\dot{Q}_{vc}$ .

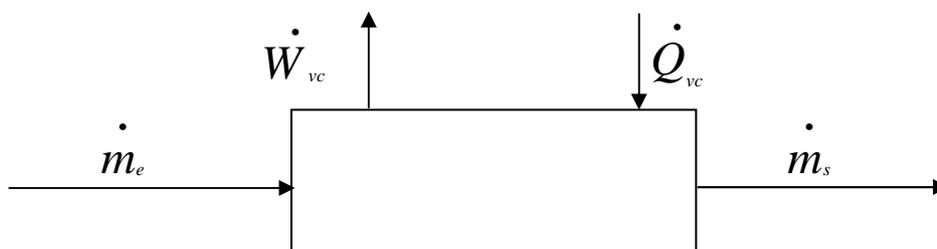


Figura 64- Esquema de um volume de controle sofrendo um processo real

A diferença entre o trabalho ideal (reversível, sem perdas) que poderia ser realizado e o trabalho realizado num processo real é a chamada irreversibilidade  $I$ .

$$I = W_{rev} - W_{vc} \quad (A3.2)$$

### A3.1- Exergia

A exergia de uma corrente pode ser entendida como o potencial de realização de trabalho pela mesma em relação às condições de referência, ou seja, o máximo trabalho (trabalho reversível) possível de ser realizado por esta corrente em condições ideais (Kotas, 1985).

A exergia física é igual à máxima quantidade de trabalho que pode ser obtida quando uma corrente de uma substância é trazida de seu estado inicial para o estado de referência (condições ambiente) por processos físicos envolvendo apenas interações térmicas com o ambiente (Kotas, 1985).

A expressão para exergia física pode ser obtida considerando-se uma máquina térmica reversível (Figura 65) trocando calor com o ambiente e produzindo trabalho a partir de uma corrente de entrada nas condições  $P_1$  e  $T_1$ . A corrente de saída corresponde às condições do ambiente  $P_0$  e  $T_0$ .

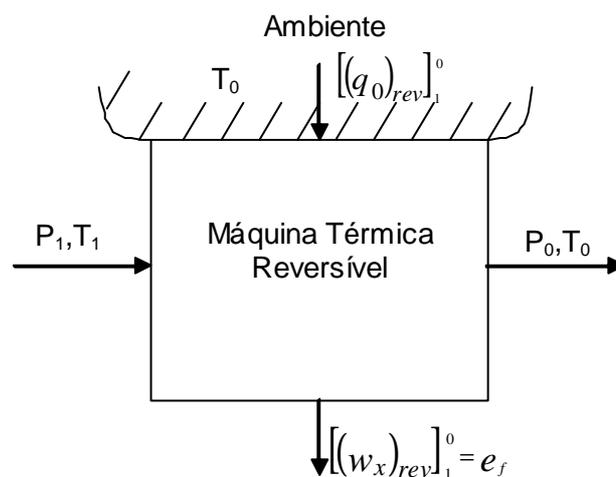


Figura 65- Esquema de uma máquina térmica reversível

A única interação com o ambiente é a troca de calor reversível, que por unidade de massa, é dada por:

$$\left[ (q_0)_{rev} \right]_1^0 = T_0 (s_0 - s_1) \quad (\text{A3.3})$$

A equação de energia para regime permanente (1ª Lei) por unidade de massa é:

$$\left[ (q_0)_{rev} \right]_1^0 - \left[ (w_x)_{rev} \right]_1^0 = (h_0 - h_1) \quad (\text{A3.4})$$

De acordo com a definição acima, o trabalho reversível produzido pela máquina é igual à exergia física específica da corrente:

$$e_f = (h_1 - T_0 s_1) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (\text{A3.5})$$

A exergia química é igual à máxima quantidade de trabalho que pode ser obtida quando uma substância é trazida da condição ambiente para o estado morto por processos envolvendo transferência de calor e troca de substâncias apenas com o ambiente.

Kotas (1985) apresenta uma tabela com razões típicas de exergia do combustível pelo respectivo poder calorífico superior. Nesta tabela, é definido que esta razão para o gás de alto forno é de 98% (com tolerância de  $\pm 1\%$ ). Como este gás é responsável por 97,5% do gás de mistura, a exergia do o gás combustível será calculada com esta razão indicada para o gás de alto forno multiplicada pelo poder calorífico do gás de mistura..

O fluxo de exergia total de uma corrente é dada por:

$$\dot{E} = \dot{m} (e_f + e_q + e_p + e_c) \quad (\text{A3.6})$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica,  $e_f$  é a exergia física específica,  $e_q$  é a exergia química específica,  $e_p$  é a exergia específica relativa à energia potencial e  $e_c$  é a exergia específica relativa à energia cinética, todas expressas em kJ/kg. O fluxo de exergia total  $\dot{E}$  é dado em kW. As parcelas de exergia devido às energias cinética e potencial podem ser desprezadas. Com isto, a equação (A3.1.4) reduz-se a:

$$\dot{E} = \dot{m}(e_f + e_q) \quad (\text{A3.7})$$

Considerando um volume de controle sofrendo um processo real (Figura 66), pode-se escrever a expressão genérica para o balanço exergético para um volume de controle como:

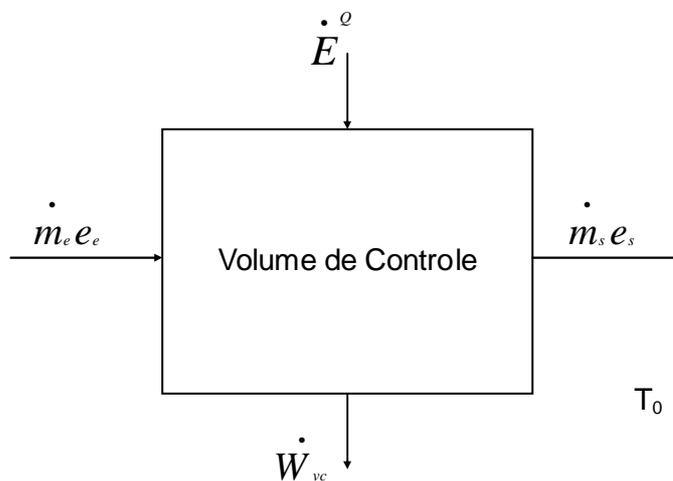


Figura 66- Esquema de um volume de controle sofrendo um processo real- balanço de exergia

$$\dot{E}_e + \dot{E}^Q = \dot{E}_s + \dot{W}_{vc} + \dot{I} \quad (\text{A3.8})$$

Onde:

$$\dot{E}_e = \sum_e \dot{m}e \quad (\text{A3.9})$$

$$\dot{E}_s = \sum_s \dot{m}e \quad (\text{A3.10})$$

$$\dot{E}^{\circ} = \sum_r \left[ \dot{Q}_r \frac{T_r - T_0}{T_r} \right] \quad (\text{A3.11})$$

Fisicamente,  $\dot{E}_e$  é a taxa de exergia associada ao influxo de massa,  $\dot{E}^{\circ}$  é a taxa de exergia devida à transferência de calor para o volume de controle,  $\dot{E}_s$  é a taxa de exergia devida ao efluxo de massa,  $\dot{W}_{vc}$ , a taxa de realização de trabalho pelo volume de controle e  $\dot{I}$  a taxa de irreversibilidade gerada no processo.

O balanço exergético, equação (A3.8), expressa a lei da degradação da energia que pode ser definida em palavras da seguinte forma:

“O fluxo de exergia para o volume de controle é sempre maior que o fluxo de exergia saindo do volume de controle. A diferença (taxa de perda de exergia) é chamada taxa de irreversibilidade. Esta afirmação é válida para todos os processos reais” (Kotas, 1985).

Diferentemente do balanço de energia, no balanço exergético a exergia não é conservativa, sendo que a parte não recuperável é a irreversibilidade do processo. A equação geral para o balanço de exergético pode ser obtida a partir das equações 8.16 a 8.19 e expressa da seguinte forma:

$$\sum (\dot{m}_e e_e) = \sum (\dot{m}_s e_s) + \sum_r \left( 1 - \frac{T_0}{T_r} \right) \dot{Q}_r + \dot{W}_{vc} + \dot{I} \quad (\text{A3.12})$$

Considerando, por hipótese, que o volume de controle é adiabático, a parcela  $\dot{E}^{\circ}$  se anula e o balanço exergético será:

$$\sum_e \dot{m}(e_f + e_q) = \sum_s \dot{m}(e_f + e_q) + \dot{W}_{vc} + \dot{I} \quad (\text{A3.13})$$

A eficiência exergética ( $\psi$ ) de um processo é expressa, segundo Kotas (1985), pela razão entre o efluxo e o influxo de exergia em um volume de controle:

$$\Psi = \frac{\sum_s \Delta E}{\sum_e \Delta E} \quad (\text{A3.14})$$

onde as diferenças  $\Delta E$  podem ter forma de potência, exergia associada a troca térmica ou a fluxo de massa. Utilizando o conceito de exergia e voltando à equação (A3.2), podemos reescrevê-la como:

$$I = \sum_e \Delta E - \sum_s \Delta E \quad (\text{A3.15})$$

O balanço exergético pode ser aplicado para cada componente do ciclo e para o ciclo como um todo. O balanço exergético é bastante útil na análise de ciclos térmicos pois permite a identificação dos pontos “fracos” do sistema, onde o grau de irreversibilidade é maior, os quais portanto, possuem maior potencial de otimização.