

Cogeração

Parte 1

Introdução

- Cogeração
 - Produção simultânea de potência mecânica ou elétrica e de calor útil a partir de uma única fonte de calor
 - OBS: alguns consideram também ciclo combinado como cogeração
 - Permite reduzir perdas: melhora o aproveitamento energético do combustível utilizado
- Não é uma “tecnologia” nova
 - No Séc. XVIII, James Watt já havia sugerido o uso de calor rejeitado por máquinas térmicas para fins de aquecimento
- No Brasil, tradicionalmente presente nas ind. de papel e celulose, sucroalcooleira, siderúrgicas, etc.

Introdução

- Nas últimas décadas ganhou destaque:
 - Busca por maior eficiência energética
 - Menor consumo de combustíveis
 - Diminuição da poluição
 - Menor rejeição de calor para a natureza

Energia e Exergia

- Qualidade da energia está diretamente relacionada ao conceito de Exergia
 - Máximo trabalho teórico produzido por um sistema ao interagir com dado ambiente
- Qualidade da energia => capacidade em convertê-la em outro tipo de energia
 - Por ex: energia elétrica pode ser facilmente convertida => alta qualidade (nobre)
 - Por ex: fonte de calor depende da temperatura
 - Temperaturas baixas dificilmente serão convertidas em outro tipo de energia
 - Por outro lado, se $T_{\text{fonte}} \gg T_{\text{dispositivo}} \Rightarrow$ perda de exergia

Energia e Exergia

- Por ex: combustíveis dependem de sua composição química
 - Cerca de 30% da exergia química é destruída na combustão com ar teórico
- Por ex: em grande parte dos processos ind., $T_{\text{utiliz.}} < 600^{\circ}\text{C}$.
 $1400^{\circ}\text{C} < T_{\text{chama}} < 1800^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ diminuição da qualidade a energia
 - Mesmo se $\eta_T = 90\%$ para caldeiras, grande parte da exergia é perdida
 - Maior parte da perda de exergia em centrais termelétricas se dá na caldeira! (e não em condensadores, que promovem rejeição de calor)

Energia e Exergia

- Cogeração:
 - Permite adequar a elevada disponibilidade de energia resultante da queima dos combustíveis com a extração de energia e transferências de calor.
 - $T_{elevada}$ é utilizada onde é necessário.

Análise Exergética (revisão)

- Análise exergética:
 - Faz uso da conservação da massa, da 1ª Lei e da 2ª Lei para o projeto e a análise de sistemas térmicos
- Exergia:
 - Máximo trabalho teórico que pode ser obtido quando um sistema interage até atingir o equilíbrio com dado ambiente
 - Ambiente: sistema idealizado suficientemente longe e grande, onde as propriedades intensivas não são afetadas por processos envolvendo o sistema e a vizinhança imediata.
 - Embora suas propriedades intensivas não mudem, as propriedades extensivas podem mudar

Análise Exergética (revisão)

- Vizinhança imediata: região próxima ao sistema, onde variações de propriedades intensivas podem ocorrer devido a interações com o sistema
- Estado morto: estado em que o sistema considerado encontra-se em equilíbrio com o ambiente
 - Não existe mais diferença de potencial para realização de trabalho
- OBS: no estado morto, tanto o sistema como o ambiente possuem energia, porém a exergia é nula
 - Não existe diferença de potencial para realizar trabalho

Análise Exergética (revisão)

- OBS:
 - Exergia é uma propriedade
 - Exergia é uma medida das diferenças entre o estado de um sistema e o ambiente
 - Exergia não pode ter valores negativos
 - Diferença de potencial \Rightarrow exergia > 0
 - Exergia não é conservada: ela é destruída por irreversibilidades

Balanço de exergia para um SF

$$\underbrace{E_2 - E_1}_{\substack{\text{exergy} \\ \text{change}}} = \underbrace{\int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q - [W - p_0(V_2 - V_1)]}_{\substack{\text{exergy} \\ \text{transfers}}} - \underbrace{T_0 \sigma}_{\substack{\text{exergy} \\ \text{destruction}}}$$

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt}\right) - \dot{E}_d$$

$$\Delta E]_{\text{isol}} = -E_d]_{\text{isol}}$$

Exemplo

- Um conjunto pistão-cilindro contém água inicialmente a 150°C no estado de líquido saturado. A água sofre um processo de aquecimento internamente reversível que a torna vapor saturado, no qual o pistão pode se mover livremente. Considere $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ e $P_0 = 1$ bar, determine: a variação de exergia, a transferência de exergia associada ao calor, a transferência de exergia associada ao trabalho e a destruição de exergia. Despreze as variações devido às energias cinética e potencial.

Balanço de exergia para um VC

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{cv} - p_0 \frac{dV_{cv}}{dt}\right) + \sum_i \dot{m}_i e_{fi} - \sum_e \dot{m}_e e_{fe} - \dot{E}_d$$

rate of exergy change

rate of exergy transfer

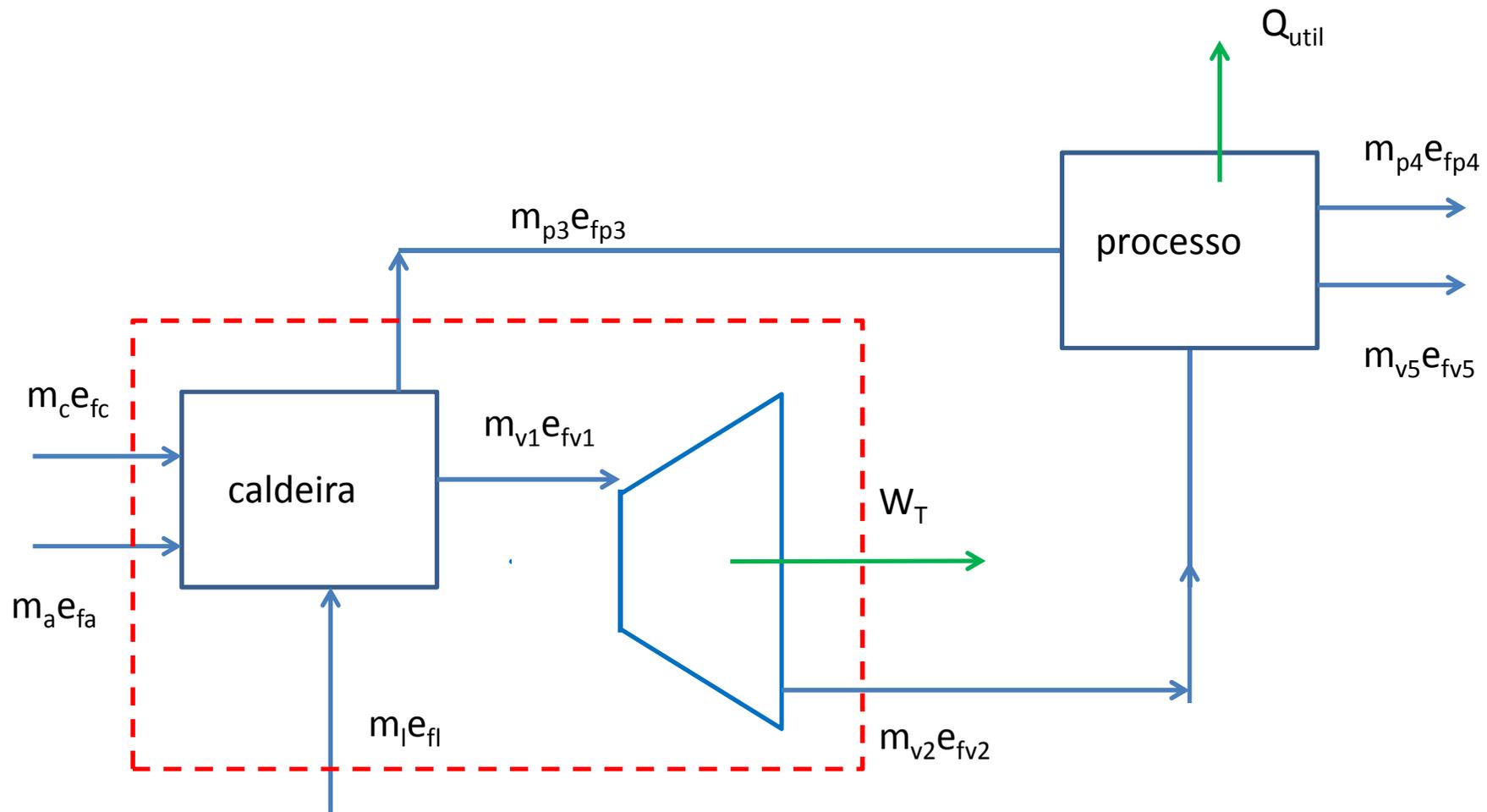
rate of exergy destruction

$$e_f = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

Exemplo

- Ar comprimido entra em um trocador de calor em contracorrente operando em R.P. a 610K e 10bar e sai a 860K 9,7bar. Gás de combustão quente entra como um fluxo separado a 1020K e 1,1bar. Cada fluxo tem uma vazão mássica de 90 kg/s. A transferência de calor entre a superfície exterior do trocador e a vizinhança pode ser ignorada. Os efeitos cinético e gravitacional podem ser desprezados. Admitindo que o gás de combustão possui as propriedades do ar, determine: (a) a variação líquida da taxa de fluxo de exergia entre a entrada e a saída de cada corrente; (b) a taxa de destruição de exergia.

Princípio da cogeração



Balanço de exergia

- RP, PUF, $\Delta KE = \Delta PE = 0$, $Q \approx 0$

$$0 = -\dot{W}_T - \dot{\epsilon}_d + \dot{m}_a e_{fa} + \dot{m}_c e_{fc} + \dot{m}_l e_{fl} - \dot{m}_{v2} e_{fv2} - \dot{m}_{p3} e_{fp3}$$

$$\dot{W}_T = (\dot{m}_a e_{fa} + \dot{m}_c e_{fc} + \dot{m}_l e_{fl} - \dot{\epsilon}_d) - (\dot{m}_{v2} e_{fv2} + \dot{m}_{p3} e_{fp3})$$

Balanço de exergia

$$\dot{W}_T = \left(\dot{m}_a e_{fa} + \dot{m}_c e_{fc} + \dot{m}_l e_{fl} - \dot{\epsilon}_d \right) - \left(\dot{m}_{v2} e_{fv2} + \dot{m}_{p3} e_{fp3} \right)$$

- 1° termo RHS
 - Exergias do combustível e do comburente ($\dot{m}_c PCS$) + exergia presente na água líquida (pode ser alta no caso do reaproveitamento de condensados) – irreversibilidades
 - Este termo é difícil de ser melhorado, embora as maiores perdas de exergia estejam aqui
- 2° termo RHS
 - Exergias que deixam o sistema na forma de produtos da combustão e de vapor
 - Este termo poderia ser reaproveitado: cogeração

Balanço de exergia

- A energia residual contida nestes gases não pode ser utilizada diretamente em uma TV
 - x_2 é baixo => erosão
 - Em 3 temos gases (não é vapor d'água)
- Entretanto, pode ser utilizada para outros fins
 - Trocadores de calor
 - Outra caldeira
 - Para envio a outra turbina
 - Refrigeração (ciclos por absorção)
 - Isto aumentaria os rendimentos térmico e exergético

Balanço de exergia

- Para o VC considerado:

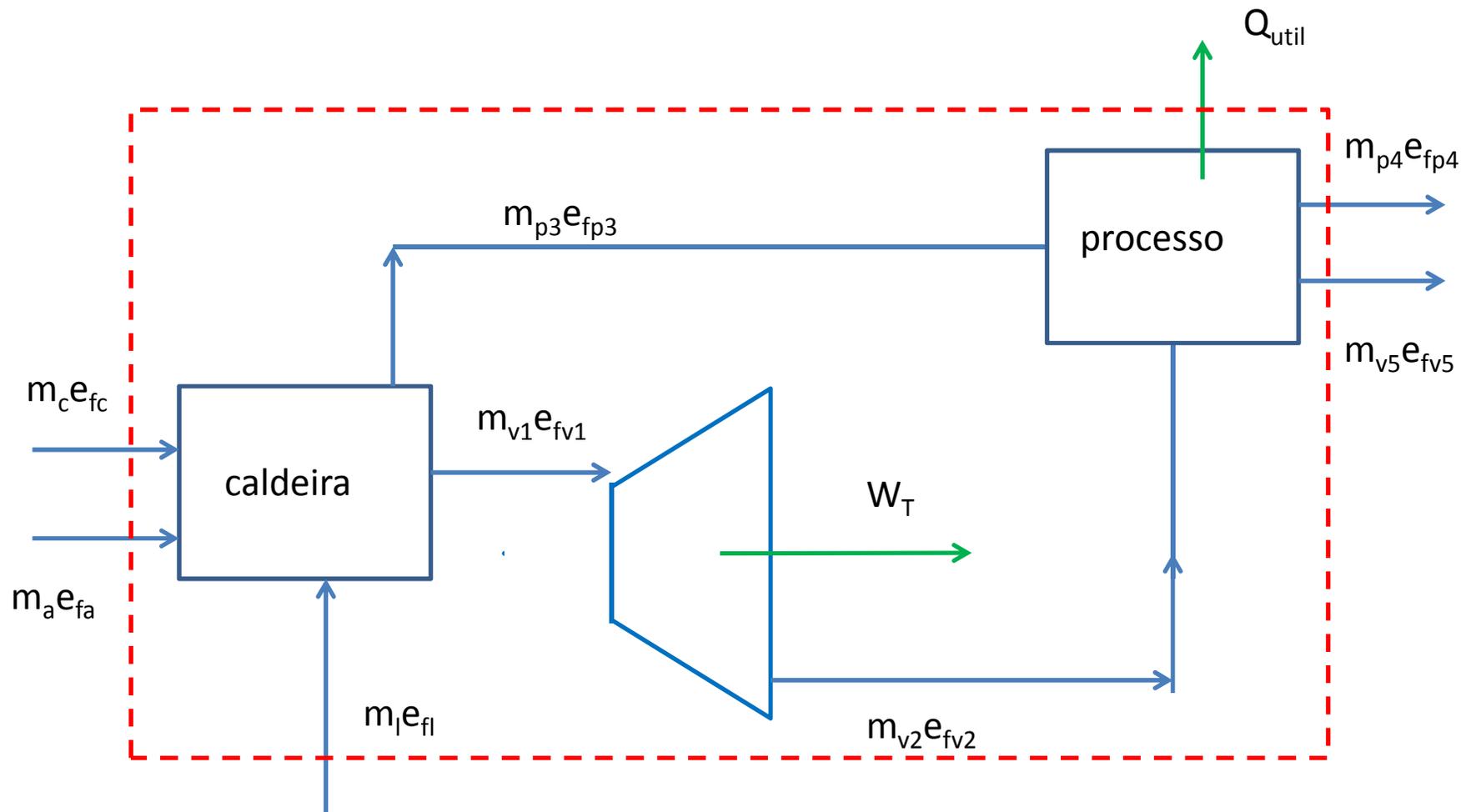
$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_a e_{fa} + \dot{m}_c e_{fc} + \dot{m}_l e_{fl}}$$

- E se considerarmos que:

$$\begin{aligned}\dot{m}_a e_{fa} + \dot{m}_c e_{fc} &= \dot{m}_c PCS \\ \dot{m}_l e_{fl} &\ll \dot{m}_c PCS\end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_c PCS}$$

Princípio da cogeração



Balanço de exergia

- RP, PUF, $\Delta KE = \Delta PE = 0$, $Q \approx 0$

$$\left(1 - \frac{T_0}{T_{pr}}\right) \dot{Q}_{util} + \dot{W}_T = -\dot{\epsilon}_d + \dot{m}_a e_{fa} + \dot{m}_c e_{fc} + \dot{m}_l e_{fl} - \dot{m}_{p4} e_{fp4} - \dot{m}_{v5} e_{fv5}$$

$$\begin{aligned} &\left(1 - \frac{T_0}{T_{pr}}\right) \dot{Q}_{util} + \dot{W}_T \\ &= (\dot{m}_a e_{fa} + \dot{m}_c e_{fc} + \dot{m}_l e_{fl} - \dot{\epsilon}_d) \\ &\quad - (\dot{m}_{p4} e_{fp4} + \dot{m}_{v5} e_{fv5}) \end{aligned}$$

Balanço de exergia

$$\left(1 - \frac{T_0}{T_{pr}}\right) \dot{Q}_{util} + \dot{W}_T \\ = (\dot{m}_a e_{fa} + \dot{m}_c e_{fc} + \dot{m}_l e_{fl} - \dot{\epsilon}_d) - (\dot{m}_{p4} e_{fp4} + \dot{m}_{v5} e_{fv5})$$

- LHS
 - Exergia útil (agora é maior)
- O aporte de exergia é o mesmo
- Fluxos de exergia para a vizinhança diminuiu
 - $(\dot{m}_{p4} e_{fp4} + \dot{m}_{v5} e_{fv5}) < (\dot{m}_{v2} e_{fv2} + \dot{m}_{p3} e_{fp3})$
- Aumento da energia disponível
 - Isto pode significar uma economia significativa no uso de recursos energéticos
 - Diminuição da emissão de poluentes

Balanço de exergia

- Para o VC considerado:

$$\varepsilon = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_{pr}}\right) \dot{Q}_{util} + \dot{W}_T}{\dot{m}_a e_{fa} + \dot{m}_c e_{fc} + \dot{m}_l e_{fl}}$$

- E se considerarmos que:

$$\begin{aligned}\dot{m}_a e_{fa} + \dot{m}_c e_{fc} &= \dot{m}_c PCS \\ \dot{m}_l e_{fl} &\ll \dot{m}_c PCS\end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_{pr}}\right) \dot{Q}_{util} + \dot{W}_T}{\dot{m}_c PCS}$$

Princípio da cogeração

- Percebe-se que a eficiência exergética aumentou
 - Este é o ganho que se tem com a cogeração
- OBS1: a utilização da cogeração requer um maior investimento financeiro na planta
 - O uso da cogeração deve considerar:
 - Ganho exergético (energético)
 - Custos financeiros suplementares
 - Critérios ambientais e legislação
- OBS2: esta análise poderia ter sido feita em termos de energia. Entretanto como a exergia é uma medida do valor da energia, ela foi utilizada aqui.

Classificação dos sistemas de cogeração

- Sequência na utilização da energia
 - Feita em função da sequência de utilização da energia no sistema de cogeração
 - 2 tipos básicos
 - A. Topping: geração elétrica (ou mecânica) à montante
 - Produção elétrica ou mecânica precede o fornecimento de calor útil
 - O VC apresentado anteriormente é um exemplo de sistema de cogeração do tipo Topping
 - Queima de comb -> pot. Eixo -> calor útil -> rejeiç prod e vap
 - B. Bottoming: geração elétrica (ou mecânica) à jusante
 - Produção elétrica ou mecânica está situada após a demanda térmica

Classificação dos sistemas de cogeração

- De emprego mais restrito
 - Calor rejeitado em processos possui T baixo para gerar potência de eixo
 - São utilizados quando há calor a T elevada
 - » Ex: fornos de cerâmica e indústria de cimento
- Reutilização da energia (gás e vapor de escape)
 - Em função de como são aplicados
 - 2 tipos
 - A. Indireto: gás de escape rejeita energia (transf. de calor) para produção de vapor
 - Ex: ocorre muitas vezes em turbinas a gás e motores alternativos
 - B. Direto: o vapor de escape é utilizado diretamente em outros processos
 - Quando se utiliza TV