

# Máquinas Térmicas I

## *Balanço energético em caldeiras*

por

*Christian Strobel*

*“Eu tenho três filhos e nenhum dinheiro...  
Porque eu não posso ter nenhum filho e três  
dinheiros?”  
- Homer J. Simpson*

### 1. Método Direto

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{Q}_{\text{disp}}} = \frac{\dot{m}_v \left[ (h_v - h_a) + \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_v} (h_p - h_a) \right]}{\dot{m}_c PCI}$$

### 2. Método Indireto

O cálculo pelo método indireto é mais preciso que pelo método direto, pois a medição do fluxo de massa de vapor não é algo preciso. Outra vantagem do método indireto é conhecer e quantificar as perdas que existem, podendo ser o foco de estudo para redução de perdas ou ainda para verificação do adequado funcionamento.

Do balanço de energia, o que entra de calor no volume de controle (caldeira), deve sair:

$$\dot{Q}_{\text{entra}} = \dot{Q}_{\text{sai}}$$

É conveniente, devido ao fato do combustível ser a fonte energética do sistema, escrever o balanço energético em termos do fluxo de massa de combustível. Desta forma, tem-se:

$$\dot{Q}_{\text{comb}} + \dot{Q}_c^* + \dot{Q}_{ar}^* = \dot{Q}_{\text{útil}} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5 + \dot{Q}_c^* + \dot{Q}_{ar}^*$$

Onde

$\dot{Q}_{\text{útil}}$  – Calor efetivo gasto para a geração de vapor (kW);

$\dot{Q}_1$  – Calor perdido nos gases de escape (kW);

$\dot{Q}_2$  – Calor perdido devido à combustão química incompleta (kW);

$\dot{Q}_3$  – Calor perdido devido à combustão mecânica incompleta (kW);

$\dot{Q}_4$  – Calor perdido devido ao arrefecimento externo da caldeira (kW);

$\dot{Q}_5$  – Calor perdido com a escória (kW);

$\dot{Q}_c^*$  - Calor do combustível previamente aquecido (entrada) ou p/ aquecer o combustível (kW);

$\dot{Q}_{ar}^*$  - Calor do ar previamente aquecido (entrada) ou para pré-aquecer o ar (kW);

\* Caso o combustível e/ou o ar sejam aquecidos pelo calor da caldeira, estes devem ser desconsiderados, pois o calor recebido é o mesmo gasto para aquecer o produto.

$$\eta = 100 - \frac{\sum \dot{Q}_{perdas}}{\dot{Q}_{disp}} \cdot 100$$

### 2.1. Calor do ar atmosférico

Como todo o ganho ou perda é referente às condições climáticas externas, o calor físico fornecido ao ar e ao combustível externamente e que adentra a caldeira é dado por, respectivamente:

$$Q_{AR} = \dot{m}_{ar} c_{p,ar} (T_{ar} - T_{\infty}) = \dot{m}_C \rho_{ar} V_{ar}^{Ef} c_{p,ar} (T_{ar} - T_{\infty}) [kW]$$

### 2.2. Calor do combustível

Assim como o ar, o calor do combustível aquecido é dado por:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_C \cdot c_p \cdot (T_c - T_{\infty})$$

### 2.3. Calor útil

O calor útil, por sua vez, é o responsável por vaporizar a água e superaquecê-la ao ponto desejado, com a vazão requerida. Este calor também deve aquecer água de alimentação para suprir as purgas do sistema, que pode ser expresso em fluxo de massa de purga ou por uma fração do fluxo de massa de vapor. Como o vapor é o objetivo, este é denominado o calor útil.

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{m}_v(h_{\text{vap}} - h_{\text{aa}}) + \dot{m}_p(h_p - h_{\text{aa}}) = \dot{m}_v \left[ (h_{\text{vap}} - h_{\text{aa}}) + \left( \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_v} \right) (h_p - h_{\text{aa}}) \right]$$

### 2.4. Calor perdido nos gases de escape ( $\dot{Q}_1$ )

A perda de calor com os gases de escape é maior e é esta perda que em geral diminui o rendimento da caldeira.

$$\dot{Q}_1 = [\sum(\dot{m}_i c_{p,i})](T_g - T_\infty)$$

Onde  $i$  representa cada sub-produto de combustão. Pela conservação da massa, o que entra de ar e combustível deve sair da caldeira, visto não se misturar com a água de alimentação. O calor específico dos gases de combustão não difere muito do calor específico do ar. Desta forma, a expressão anterior pode ser alterada para:

$$\dot{Q}_1 = (\dot{m}_{\text{ar}} + \dot{m}_c) \cdot C_{p,\text{ar}} \cdot (T_g - T_\infty) = \dot{m}_c \left( \frac{A}{C} + 1 \right) \cdot C_{p,\text{ar}} \cdot (T_g - T_\infty)$$

### 2.5. Calor perdido devido à combustão química incompleta ( $\dot{Q}_2$ )

Esta perda, teoricamente, não deve acontecer, pois ar em excesso deve ser fornecido para garantir a combustão completa. Para o cálculo desta perda, os teores de CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> nos gases de escape, que são gases ainda combustíveis, devem ser conhecidos. Como a combustão foi incompleta, parte do calor que seria liberado pelo PCI é perdido, e a combustão, mesmo fora da caldeira, não ocorre devido ao percentual destes gases difundidos na atmosfera. O mesmo é calculado pela expressão do PCI para combustíveis gasosos:

$$\dot{Q}_2 = \dot{V}_g(126CO + 108H_2 + 358CH_4) = \frac{(\dot{m}_{ar} + \dot{m}_c)}{\rho_g}(126CO + 108H_2 + 358CH_4)$$

$$\rho_g = \frac{PM}{\bar{R}T}$$

Onde CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> são expressos em percentuais volumétricos de gases secos nos gases de escape, em %.

Os principais fatores que provocam estas perdas são: (a) falta de ar para a combustão; (b) má mistura do ar com o combustível; (c) período insuficiente de permanência do combustível na câmara de combustão, fazendo com que partículas combustíveis saiam da câmara sem completar sua combustão.

### 2.6. Calor perdido devido à combustão mecânica incompleta ( $\dot{Q}_3$ )

Ocorre quando se queima combustível sólido. A escória envolve o restante do combustível em uma partícula, isolando o combustível do ar. Pode ocorrer ainda quando o combustível cai na grelha ou é arrastado para fora da caldeira pela chaminé.

Combustível	Perdas de calor % q <sub>3</sub>
Lenhite	0,5
Carvão betuminoso	0,5-1,0
Carvão pulverizado	0
Antracite	0
Turfa fresada	0
Mazute	0,5
Gás natural e gás de coque	0,5
Gás do alto forno	1,4

### 2.7. Calor perdido devido ao arrefecimento externo da caldeira ( $\dot{Q}_4$ )

Estas perdas ocorrem por que o corpo externo da caldeira possui uma temperatura acima da temperatura ambiente. Isto é amenizado, em parte, pela parede d'água. É calculada por:

$$\dot{Q}_4 = A_p(\bar{h}_{conv} + \bar{h}_{rad})(T_p - T_\infty)$$

Os coeficientes de convecção e radiação são calculados pelas correlações apropriadas da transferência de calor.

Caldeiras com paredes integralmente irradiadas (parede d'água e refratário) possuem perda na ordem de 1 a 2%. Caldeiras sem parede d'água, com tijolos refratários e alvenaria comum podem perder até 6%.

### 2.8. Calor perdido devido à escória ( $\dot{Q}_5$ )

A perda de calor com a escória existe só nas caldeiras com grelhas que queimam carvões. A escória é eliminada da grelha com altas temperaturas. Esta perda é calculada por:

$$\dot{Q}_5 = \dot{m}_c (1 - \alpha_{arr}) \frac{A^t}{100} c_{p,esc} [(T_{esc} - T_\infty) + Q_{fusão}]$$

Para os carvões queimados na grelha, a parte da cinza arrastada varia:

$$0,07 < \alpha_{arr} < 0,2$$

E o calor de fusão da escória em torno de 250 kJ/kg.

Exercícios:

**Exercício 1)** No pré-dimensionamento de um gerador de vapor do tipo aquatubular para a produção de vapor superaquecido seco, os seguintes requisitos de projeto são conhecidos:

- Produção de vapor necessária: 15 ton/h;
- Condições do vapor: 8 Mpa e 520°C;
- Combustível: C=50%;H=6%; O=8%; S=5%; A=22%; W=9% (Massa Trabalho);
- Coeficiente de excesso de ar: 1,4;
- Temperatura de alimentação da água: 50°C;
- Temperatura de alimentação do ar: 60°C;
- Temperatura do ar atmosférico: 20°C
- Calor específico da água de alimentação: 4,180 kJ/kgK;
- Calor específico da escória: 6,5 kJ/kgK;

- Temperatura de entrada dos gases no pré-aquecedor de ar: 400°C;
- Temperatura da escória: 400°C
- Calor específico do ar: 1,009 kJ/kgK;
- Calor específico dos gases de combustão: 1,600 kJ/kgK
- Constante termodinâmica dos gases: 0,287 kJ/kgK
- Perda de calor por combustão mecânica incompleta: 4%
- Percentual de CO nos gases secos de combustão: 0,3%
- Percentual de H<sub>2</sub> nos gases secos de combustão: 0,4 %;
- Perda de calor para o ambiente: 5%

Pede-se:

- a. O rendimento da caldeira
- b. O consumo horário de combustível
- c. O fluxo de massa de ar horário necessário para a combustão
- d. A emissão horária de CO<sub>2</sub> para a atmosfera
- e. Caso o rendimento da caldeira e o consumo horário de combustível se mantenham constante, qual a nova geração de vapor, emissão de CO<sub>2</sub> e fluxo mássico de ar para os seguintes combustíveis:
  1. C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH com 4% de umidade em volume;
  2. C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH com 7% de umidade em massa;
  3. C = 87,0 %; H = 12,6%; S = 0,4% (Diesel, percentuais em massa)
  4. Gás natural da Bolívia (CH<sub>4</sub> = 89,0203%; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 5,9353%; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> = 1,918%; C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 1,0563%; CO<sub>2</sub> = 1,0297%; N<sub>2</sub> = 1,0113%; O<sub>2</sub> = 0,0297% - Frações volumétricas),  $\rho = 0,74 \text{ kg/m}^3$ .

**Exercício 2)** Caldeira aquatubular tem os seguintes dados de operação:

- Vapor saturado a 25 bar;
- Consumo de combustível: 60 kg/h;
- Temperatura ambiente: 20°C;
- Água de alimentação: 50°C;
- Temperatura de saída dos gases: 350°C;
- Calor específico do ar: 1,009 kJ/kgK;

- Calor específico dos gases de combustão: 1,051 kJ/kgK ;
- Óleo combustível com C = 84,5% e H = 15,5%;
- Excesso de ar: 25%;
- Perdas estimadas (exceto gases da chaminé): 5%;

Pede-se:

- a. Calcular o rendimento térmico da caldeira;
- b. A adição de um recuperador de calor, baixando a temperatura dos gases da chaminé para 260°C, através do pré-aquecimento do ar de combustão deve proporcionar qual economia de combustível?
- c. Neste caso, qual a temperatura de entrada do ar na fornalha?

**Exercício 3)** Os seguintes dados foram obtidos durante a operação contínua de uma caldeira aquatubular de médio porte:

- Consumo de água de alimentação: 42 m<sup>3</sup>/h
- Temperatura ambiente: 20°C
- Temperatura de alimentação da água: 40°C
- Percentual de purgas: 4% a 60°C
- Temperatura de saída dos gases: 280°C
- Calor específico do ar: 1,009 kJ/kgK
- Calor específico dos gases de combustão: 1,310 kJ/kgK
- Excesso de ar: 27%
- Pressão na caldeira: 20 bar
- Temperatura do vapor: 600°C
- Combustível: Etanol puro (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O)
- Perdas de calor para o ambiente: 5%

Pede-se:

- a. Determine o rendimento térmico da caldeira com os dados disponíveis;
- b. Determine o consumo de combustível;
- c. Determine a geração de vapor atual;
- d. A nova geração de vapor se o consumo de combustível aumentar em 20%

**Exercício 4)** Caldeira a óleo combustível, com  $C=80\%$ ,  $H=10\%$ ,  $S=3\%$ ,  $O=5\%$ ,  $W=2\%$ , produzindo 100 ton/h de vapor a 40 bar,  $340^{\circ}\text{C}$ , apresenta temperatura de saída dos produtos de combustão de  $345^{\circ}\text{C}$ . Com a instalação de um pré-aquecedor de ar, esta temperatura baixou para  $240^{\circ}\text{C}$ . Devido ao ar aquecido na entrada do queimador, foi possível modificar o valor do excesso de ar de 15%, na situação anterior, para 8% com o pré-aquecedor. A temperatura da água de alimentação é  $65^{\circ}\text{C}$ . Qual a economia de combustível proporcionada? Considere a temperatura ambiente em  $20^{\circ}\text{C}$ .



---


$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{Q}_{\text{disp}}} = \frac{\dot{m}_v \left[ (h_v - h_a) + \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_v} (h_p - h_a) \right]}{\dot{m}_c PCI}$$

*Eficiência método direto*

---

$$\eta = 100 - \frac{\sum \dot{Q}_{\text{perdas}}}{\dot{Q}_{\text{disp}}} \cdot 100$$

*Eficiência método indireto*

---

$$\dot{Q}_{AR} = \dot{m}_{ar} c_{p,ar} (T_{ar} - T_{\infty}) [kW]$$

$$\dot{Q}_{AR} = \dot{m}_c \rho_{ar} V_{ar}^{Ef} c_{p,ar} (T_{ar} - T_{\infty}) [kW]$$

*Calor do ar atmosférico*

---

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot c_p \cdot (T_c - T_{\infty})$$

*Calor do combustível*

---

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{m}_v \left[ (h_{vap} - h_{aa}) + \left( \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_v} \right) (h_p - h_{aa}) \right]$$

*Calor útil*

---

$$\dot{Q}_1 = [\sum (\dot{m}_i c_{p,i})] (T_g - T_{\infty})$$

$$\dot{Q}_1 = (\dot{m}_{ar} + \dot{m}_c) \cdot c_{p,ar} \cdot (T_g - T_{\infty})$$

*Calor perdido nos gases de escape  
( $\dot{Q}_1$ )*

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_c \left( \frac{A}{C} + 1 \right) \cdot c_{p,ar} \cdot (T_g - T_{\infty})$$


---

$$\dot{Q}_2 = \dot{V}_g (126CO + 108H_2 + 358CH_4)$$

$$\dot{Q}_2 = \frac{(\dot{m}_{ar} + \dot{m}_c)}{\rho_g} (126CO + 108H_2 + 358CH_4)$$

*Calor perdido devido à combustão  
química incompleta ( $\dot{Q}_2$ )*

---

Combustível	Perdas de calor % $q_3$	
Lenhite	0,5	<i>Calor perdido devido à combustão mecânica incompleta (<math>Q_3</math>)</i>
Carvão betuminoso	0,5-1,0	
Carvão pulverizado	0	
Antracite	0	
Turfa fresada	0	
Mazute	0,5	
Gás natural e gás de coque	0,5	
Gás do alto forno	1,4	

$$\dot{Q}_4 = A_p(\bar{h}_{conv} + \bar{h}_{rad})(T_p - T_\infty)$$

0% ~ 2% paredes integralmente irradiadas (parede d'água e refratário)  
2% ~ 6% sem parede d'água, com tijolos refratários e alvenaria comum.

*Calor perdido devido ao arrefecimento externo da caldeira ( $Q_4$ )*

$$\dot{Q}_5 = \dot{m}_c(1 - \alpha_{arr}) \frac{A^t}{100} c_{p,esc} [(T_{esc} - T_\infty) + Q_{fusão}]$$

$$0,07 < \alpha_{arr} < 0,2$$

*Calor perdido devido à escória ( $\dot{Q}_5$ )*

$$Q_{fusão} = 250 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$\rho_g = \frac{PM}{RT}$$

*Massa específica*

$$\frac{A}{C} = 0,1149 \cdot C^t + 0,3448 \cdot H^t + 0,0431 \cdot (S^t - O^t) \left[ \frac{kg_{ar}}{kg_{comb}} \right]$$

*Relação ar/combustível p/ sólidos e líquidos (percentuais de 0 a 100 massa)*

$$V_{ar}^0 = \frac{4,76}{100} \cdot \left[ 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n - O_2 \right] \left[ \frac{Nm_{ar}^3}{Nm_{comb}^3} \right]$$

*Volume de ar teórico nas CNTP  
Percentuais de 0 a 100 volume*

$$PCI_{t,s}^t = 339,13 \cdot C^t + 1029,95 \cdot H^t + 108,85 \cdot (S^t - O^t) - 25,12 \cdot W^t \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

*PCI de combustíveis sólidos e líquidos  
Componentes na massa de trabalho  
Percentuais de 0 a 100 massa*

$$PCI_t = 108 \cdot H_{fr}^t + 126 \cdot CO_{fr}^t + 234 \cdot H_2 \cdot S_{fr}^t + 358 \cdot CH_{4fr}^t + 591 \cdot C_2H_{4fr}^t + 638 \cdot C_2H_{6fr}^t + 860 \cdot C_3H_{6fr}^t + 913 \cdot C_3H_{8fr}^t + 1135 \cdot C_4H_{8fr}^t + 1187 \cdot C_4H_{10fr}^t + 1461 \cdot C_5H_{12fr}^t + 1403 \cdot C_6H_{6fr}^t \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$$

*PCI de combustíveis gasosos  
Componentes na massa de trabalho  
Percentuais de 0 a 100 volume*

$$V = V_{ar}^0 \cdot \frac{101,325}{P} \cdot \frac{T}{273,15}$$

*Volume de ar efetivo a  $T \neq 0^\circ C$*

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot PCI$$

*Calor fornecido (sólidos e líquidos)*

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot PCI$$

*Calor fornecido (gasosos)*

---

$$\frac{E_{CO_2}}{C} = 3,66667 \cdot C \left[ \frac{kg_{CO_2}}{kg_C} \right]$$

*Relação Emissão CO<sub>2</sub> combustível  
para líquidos e sólidos  
Carbono em fração (0 a 1) em  
massa*

---

$$\frac{E_{CO_2-gas}}{C} = \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{comb}} \cdot (CO_2 + CO + \sum m \cdot (C_m H_n)) \left[ \frac{kg_{CO_2}}{kg_C} \right]$$

*Relação Emissão CO<sub>2</sub> combustível  
para fluidos gasosos  
Componentes em fração (0 a 1) em  
volume*

---