

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 11



Aula 11: Balanços Térmicos e Consumo de combustível

Tópicos

- *Características de Funcionamento do Forno*
- *Condições Térmicas*
- *Balanço de Calor*
- *Consumo de combustível*



11.1 - Características de Funcionamento do Forno

- O funcionamento de um forno pode ser dado por um grande numero de características. As mais importantes são:
 - A temperatura;
 - As condições térmicas;
 - O coeficiente de utilização;
 - A produtividade.



11.1 - Características de Funcionamento do Forno

A TEMPERATURA

A temperatura é a característica mais importante do desempenho de um forno. Por isso, o termo TEMPERATURA DO FORNO é uma condição vital. O ponto de análise é a chama, (gases incandescentes), o metal, a direcção da chama, e os elementos que estão em troca mútua de calor a temperaturas diferentes.

A temperatura do interior do forno não é determinada apenas por um destes elementos mas sim pelo valor médio denominado TEMPERATURA DO FORNO.



11.1 - Características de Funcionamento do Forno

A TEMPERATURA

A temperatura do forno depende de numerosos factores tais como: a temperatura de combustão do combustível usado no forno, a natureza de absorção e das perdas de calor que normalmente são dadas por:

$$t_r = \eta \cdot t_c \quad (11.1)$$

Onde:

t_r é a temperatura real do forno;

t_c é a temperatura de combustão do combustível e

η é o coeficiente do pirómetro que varia de 0,65 - 0,80 e que depende do tipo de projecto do forno.



11.2 – Condições Térmicas

As condições de operação de um forno dependem da quantidade de calor fornecido ao forno. A quantidade de calor fornecido num dado instante é chamada ***carga térmica***. A maior quantidade de calor que normalmente pode ser absorvida, pelo forno (sem chama do combustível), é chamada ***potência térmica***.

As condições térmicas de um forno consistem essencialmente na variação com o tempo da carga térmica e elas podem ser representadas graficamente.



11.2 – Condições Térmicas

As condições térmicas estão relacionadas com as condições da temperatura do forno. Os fornos periódicos operam com a variação de temperatura no tempo, isto é, a carga térmica varia com o tempo, enquanto que os fornos contínuos funcionam sem variação da carga térmica.

A qualidade de operação de um forno ou a perfeição deste como instalação térmica é representada pelo coeficiente de utilização térmica do combustível (η_u) e o coeficiente de utilização total de calor (η_{ut}).



11.2 – Condições Térmicas

De uma forma geral, (η_u) é determinado pela fórmula:

$$\eta_u = \frac{Q_m + Q_{sl} - Q_{end} + Q_{ex}}{Q_f + Q_{ph} B} \quad (11.2)$$

Onde:

B é o caudal do combustível em $m^3(kg)/h$;

Q_f é o calor químico do combustível em kJ/h , $Q_f = BQ_i^t$;

Q_m , Q_{sl} são o calor físico do metal e da escória em kJ/h ;

Q_{end} e Q_{ex} são o calor das reacções endotérmicas e exotérmicas (exceptuando da combustão do combustível), em kJ/h

Q_{ph} é o calor físico do combustível e ar por unidade de combustível em KJ/m^3 ou kJ/kg ; Q_{wg} é o calor dos gases de escapa por unidade de combustível em KJ/m^3 ou kJ/kg



11.2 – Condições Térmicas

É de notar que:

$$Q_f + \dot{B}Q_{ph} - \dot{B}Q_{wg} - Q_{los} = Q_m + Q_{sl} - Q_{end} + Q_{exec} \quad (11.3)$$

Onde Q_{los} é o calor perdido.

O coeficiente de utilização do combustível também pode ser escrito pela seguinte fórmula:

$$h_u = \frac{Q_f + \dot{B}Q_{ph} - \dot{B}Q_{wg} - Q_{los}}{Q_f + \dot{B}Q_{ph}} \quad (11.4)$$



11.2 – Condições Térmicas

Para os fornos eléctricos pode-se escrever:

$$Q_f + \dot{B}Q_{ph} = 860 \cdot P \quad (11.5)$$

Onde P é a potência do forno em kW

O coeficiente de utilização do combustível também pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\eta_u = \frac{Q_f + \dot{B}Q_{ph} - \dot{B}Q_{wg} - Q_{los}}{Q_f + \dot{B}Q_{ph}} / B \quad (11.6)$$

Se $Q_{ph}=0$, e apenas o calor do combustível é fornecido ao forno o coeficiente de utilização do calor do combustível altera-se.



11.2 – Condições Térmicas

A equação anterior revela que ao coeficiente de utilização do calor deve-se acrescentar ao acréscimo do calor do combustível e do ar baixando a temperatura dos gases de escape (desde que $Q_{wg} = V_{wg} C_{wg} t_{wg}$) e as perdas de calor do forno.

As perdas de calor no forno dependem do projecto do forno. Por esta razão o uso do forno depende do coeficiente de utilização do calor.

$$\eta_{ut} = \frac{Q_l + BQ_{ph} - BQ_{wg}}{Q_l + BQ_{ph}} \quad (11.7)$$



11.2 – Condições Térmicas

Comparando as Fórmulas 11.2 e 11.7 nota-se que η_u é mais baixo que η_{ut} esta é a razão pela qual os fornos devem ser desenhados e operados de modo a aproximar os dois coeficientes para minimizar as perdas de calor.

A **produtividade do forno** é essencialmente a característica da sua operação e esta reflecte todos os aspectos negativos e positivos do seu projecto e as suas condições térmicas. Nos fornos de fundição a produtividade depende substancialmente do tipo de carga a ser fundida



11.2 – Condições Térmicas

Nos fornos de aquecimento a produtividade é determinada pela temperatura inicial do metal a ser aquecido. A produtividade é largamente afectada pela temperatura do espaço interno do forno, pela temperatura dos gases do escape e também pela intensidade e natureza de transferência de calor do forno para o material a ser aquecido. Tudo isto mostra que a produtividade do forno depende de vários factores tecnológicos, térmicos e estruturais.



11.3 -Balanço de Calor e Consumo de Combustível

O consumo de combustível é uma característica importante do funcionamento de um forno. Nos fornos, o consumo de combustível é determinado por medição directa ou por cálculo, através do balanço de calor.

O balanço de calor de um forno é feito através de variáveis de entrada e variáveis de saída, e cada uma delas tem vários sub-itens.

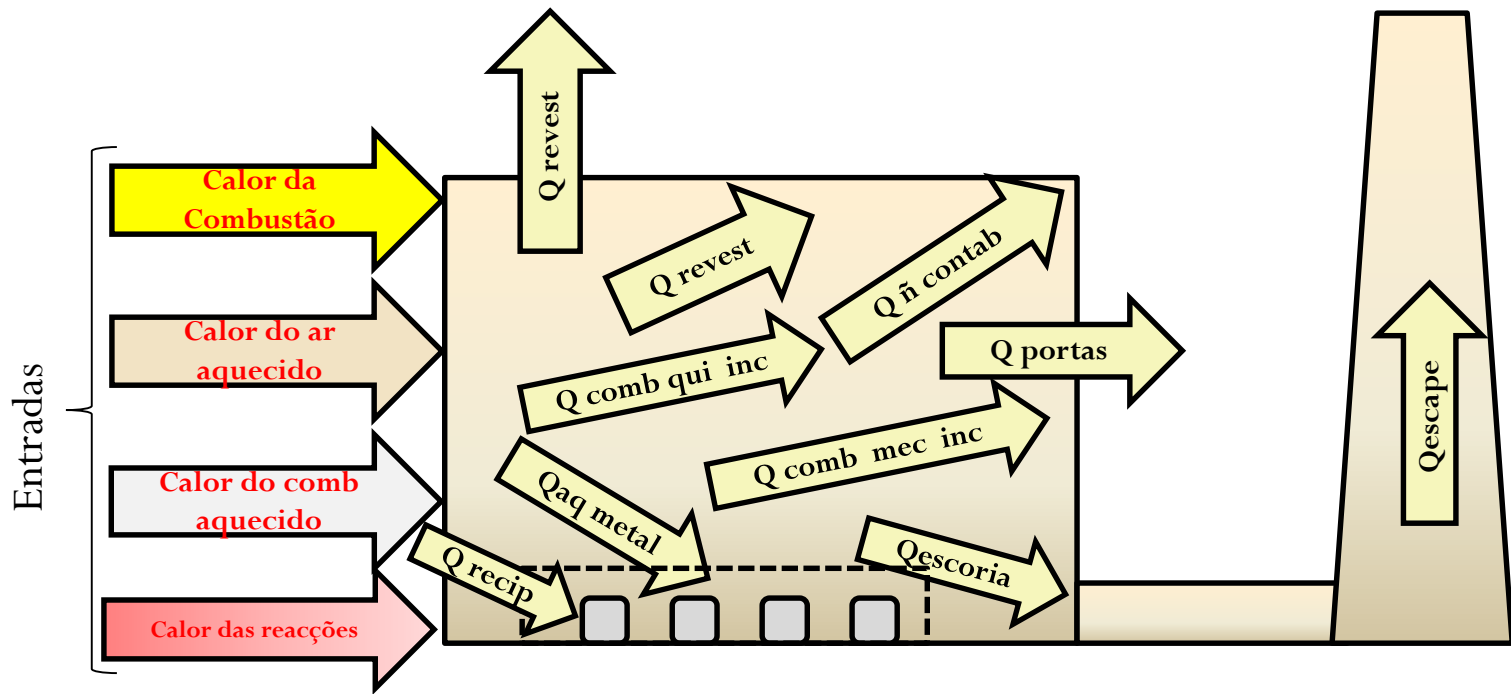
O balanço de calor é realizado para uma hora de funcionamento contínuo do forno ou para um ciclo de operações, no caso de um funcionamento periódico do forno.





11.3 - Balanço de Calor e Consumo de Combustível

Balanço de Calor



11.3.1 - Variáveis de Entrada

1 - Calor químico da combustão

$$Q_q = \dot{B}Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.8)$$

Onde

B é o caudal do combustível, em kg/h ou m³/h;

Q_i^t é o poder calorífico inferior do combustível em massa de trabalho dado em kJ/kg ou kJ/m³.



11.3.1 - Variáveis de Entrada

2 - Calor físico do ar pré - aquecido

$$Q_a = \dot{B} c_a t_a \alpha V_{ar}^o \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.9)$$

Onde

t_a é a temperatura do ar de pré-aquecimento em °C

C_a é o calor específico do ar dos 0°C ate t_a kJ/(m³°C)

α é o coeficiente de excesso de ar

V_{ar}^o é a quantidade teórica de ar requerida para queimar uma unidade de combustível em m³/kg ou m³/m³.



11.3.1 - Variáveis de Entrada

3 - Calor físico do combustível pré - aquecido

$$Q_a = \dot{B}c_f t_f \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.10)$$

Onde:

c_f é o calor específico do combustível em °C ate t_f em $\text{kJ}(\text{m}^3\text{°C})$

t_f é a temperatura de pré-aquecimento do combustível em °C.



11.3.1 - Variáveis de Entrada

4 - Calor das reacções exotérmicas

Este item do balanço de calor engloba todas as reacções químicas dando um efeito térmico positivo excepto para reacções de combustão do combustível. Nos fornos de aquecimento de metal o calor libertado pela sua oxidação é também tomado em conta. Um quilograma de metal liberta 5652 kJ de calor por causa do qual:



$$Q_{ex} = 5652 \cdot P \cdot a \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.11)$$

Onde:

P - é a produtividade do forno em kg/h

a - são perdas por oxidação do metal em kg/kg do metal.

11.3.1 - Variáveis de Saída

1 - Calor requerido para aquecimento e fusão do material

Com material frio a ser carregado no forno:

$$Q_{us} = Gc_m t_{m.f} \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.12)$$

Onde:

G é o fluxo mássico do material em kg/h

$t_{m.f}$ é a temperatura final do material a aquecer em °C

c_m é o calor específico médio do metal no intervalo de temperaturas de 0°C até $t_{m.in}$ em kJ/kg

nos fornos de fusão do metal o calor latente de fusão do material também deve ser considerado



11.3.1 - Variáveis de Saída

1 - Calor requerido para aquecimento e fusão do material

Com material pré-aquecido a ser carregado no forno

$$Q_{ust} = G(c_m t_{m.f} - c_m t_{m.in}) \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.13)$$

Onde:

G é o fluxo mássico do material em kg/h

$t_{m.f}$ é a temperatura final do material a aquecer em °C

$t_{m.in}$ é a temperatura inicial do material em °C

c_m é o calor específico médio do metal no intervalo de temperaturas de 0°C até $t_{m.in}$ em kJ/kg

nos fornos de fusão do metal o calor latente de fusão do material também deve ser considerado



11.3.1 - Variáveis de Saída

2 - Calor perdido com a escória

$$Q_{sl2} = G_{sl} c_{sl} t_{sl} \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.14)$$

Onde

G_{sl} é a massa da escória em kg

t_{sl} é a temperatura da escória em °C

c_{sl} é o calor específico da escoria em kJ/kg°C.

O calor Q_3 é típico dos fornos destinados à fusão do material, geralmente apenas inclui o calor perdido na decomposição de argilas.



11.3.1 - Variáveis de Saída

4 - Calor perdido com os gases de escape

$$Q_4 = \dot{B}v_{wg} c_{wg} t_{wg} \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.15)$$

Onde:

t_{wg} é a temperatura dos gases de escape à saída do forno em °C

c_{wg} é o calor específico dos gases em kJ/(m³°C).

Uma certa quantidade de gases sai do forno através da boca do forno, fendas etc. por esta razão v_{wg} deve ser usado somente condicionalmente como a quantidade total de gases produzidos na combustão de uma unidade massa ou volume de combustível.



11.3.1 - Variáveis de Saída

5 - Calor químico devido à combustão incompleta do combustível

Numa combustão com chama virtualmente não há perda de calor devido à combustão incompleta. Numa combustão com chama usualmente os gases da combustão têm 0,5 a 3 por cento de gases não queimados, (CO e H₂). Assume-se que 0,5% de H₂ diminuem em 1% CO.

O valor do calor de uma mistura dessas é de 12 142 kJ/m³.



11.3.1 - Variáveis de Saída

5 - Calor químico devido à combustão incompleta do combustível

Definindo por a a proporção de CO não queimado, o calor perdido fica:

$$Q_5 = \dot{B}v_{wg} a \cdot 12142 \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.16)$$

ou

$$Q_5 = \dot{B}v_{wg} a \cdot 2900 \quad [\text{kcal/h}] \quad (11.17)$$

Onde v_{wg} é a quantidade dos gases de escape a saída do forno em m^3/m^3 .



11.3.1 - Variáveis de Saída

6 - Calor da combustão mecânica incompleta

Este item engloba muitas perdas de combustível. Por exemplo as perdas mecânicas na combustão de combustível sólido normalmente variam de 3 a 5% logo:

$$Q_6 = (0,03 - 0,05) \cdot \dot{B}Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.18)$$

Com combustível gasoso devido ao escapamento do gás

$$Q_6 = (0,02 - 0,03) \cdot \dot{B}Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.19)$$

Com combustível líquido normalmente é perdido cerca de 1% do combustível

$$Q_6 = 0,01 \cdot \dot{B}Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.20)$$



11.3.1 - Variáveis de Saída

7 - Calor perdido por condução através do revestimento

O calor perdido através do tecto, paredes, e parte de baixo do forno é calculado pela equação

$$Q_{l7} = \frac{t_l - t_a}{l_1 / k_1 + l_2 / k_2 + 1/h} \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.21)$$

Onde:

t_l é a temperatura da superfície interna do forro em °C;

t_a é a temperatura ambiente em °C;

l_1 e l_2 são as espessuras do forro de material refractário e do isolamento em m;

k_1 e k_2 são as condutividades do forro de material refractário e do isolamento em $\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$;

h – é o coeficiente de transferência de calor por convecção $19,8 \text{ W}/(\text{m}^2^\circ\text{C})$.



11.3.1 - Variáveis de Saída

8 - Calor perdido por radiação através das portas abertas do forno

$$Q_8 = C_o (T/100)^4 F \Phi \varphi \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.22)$$

Onde:

C_o é a emissividade do corpo negro, $5,768 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ ou $4,96 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$

T é a temperatura média no forno em K

F é a área da porta aberta em m^2

Φ é o coeficiente de diafragma, (pode ser consultado na Tabela 11.1)

φ é o tempo, (fracção de uma hora) quando a porta é aberta





Tabela 11.1 Valores do coeficiente de diafragmação

Espessura da porta ⁽¹⁾ mm	Altura da porta em mm				Espessura da porta ⁽²⁾ mm	Altura da porta em mm			
	250	450	600	700		250	450	600	700
300	0,70	0,73	0,76	0,78	600	0,49	0,53	0,56	0,58
600	0,78	0,8	0,82	0,84	900	0,52	0,57	0,60	0,62
900	0,79	0,83	0,85	0,87	1200	0,55	0,69	0,63	0,65
1200	0,81	0,85	0,87	0,89	1500	0,56	0,61	0,64	0,67
1500	0,82	0,86	0,89	0,91					

1 Espessura da parede 230 mm
2 Espessura da parede 460 mm

11.3.1 - Variáveis de Saída

9 - Calor perdido durante o aquecimento do recipiente

Com recipientes frios a [273 K (0°C)] a quantidade de calor requerida para aquecer o recipiente é:

$$Q_9 = G_c c_c t_c \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.23)$$

Onde:

G_c é a massa do recipiente em kg/h

C_c calor específico médio do recipiente no intervalo de temperaturas de 0 a t_c em $\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$

Se o recipiente estiver quente deve-se apenas considerar o calor adicional gasto.



11.3.1 - Variáveis de Saída

10 - Calor perdido com a água de arrefecimento do forno

As perdas de calor devido ao arrefecimento do forno, são determinadas por meio de métodos experimentais. Essas perdas usualmente estão entre os 10 a 15% do calor total fornecido.

$$Q_{10} = (0,10 - 0,15) \cdot \dot{B}Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.24)$$



11.3.1 - Variáveis de Saída

11 - Perdas de calor acumulado no revestimento

$$Q_{ac11} = V_r \rho_r c_r t_r \quad [\text{kJ/período}] \quad (11.25)$$

Onde:

V_r é o volume do revestimento em m^3

ρ_r é a massa específica do revestimento em kg/m^3

c_r é o calor específico do revestimento em $\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$

t_r é a temperatura média de aquecimento do revestimento



11.3.1 - Variáveis de Saída

11 - Perdas de calor acumulado no revestimento

Nos fornos de carruagens o calor acumulado pelos forros inferiores de materiais refractários das carruagens deve também ser considerado. Nos fornos periódicos para além da parte de calor acumulada no revestimento uma parte é perdida por condução através das paredes. As perdas de calor por acumulação no revestimento são determinadas para uma operação periódica do forno na qual a temperatura varia com o tempo. O balanço de calor para estes fornos é calculado para todo o ciclo de operação em vez de para uma hora.



11.3.1 - Variáveis de Saída

12 - Perdas de calor não contabilizáveis

$$Q_{12} = \dot{B}(0,1 - 0,15) \cdot (Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}) \quad [\text{kJ/h}] \quad (11.26)$$

Somando separadamente os itens de entrada e de saída os dois somatórios devem ser $Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}}$. Isto dá uma equação com uma incógnita que é o consumo de combustível **B**. Conhecido **B** todos os itens do balanço de calor podem ser calculados.



Quando se analisa os balanços térmicos de um forno, a tabela de balanços térmicos pode ser útil para identificar qual das variáveis de saída é excessivamente alta e também para identificar o mau funcionamento do forno.

11.4 - Consumo de combustível

$$\dot{B} \cdot Q_i + B \cdot Q_a + B \cdot Q_c + Q_{ex} = Q_I + Q_{II} + Q_{III} + B \cdot Q_{IV} + B \cdot Q_V + B \cdot Q_{VI} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + B \cdot Q_X + Q_{XI} + B \cdot Q_{XII}$$

$$\dot{B} \cdot Q_i + B \cdot Q_a + B \cdot Q_c - B \cdot Q_{IV} - B \cdot Q_V - B \cdot Q_{VI} - B \cdot Q_X - B \cdot Q_{XII} = Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_{XI} - Q_{ex}$$

$$\dot{B} \cdot (Q_i + Q_a + Q_c - Q_{IV} - Q_V - Q_{VI} - Q_X - Q_{XII}) = Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_{XI} - Q_{ex}$$

$$\dot{B} = \frac{Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_{XI} - Q_{ex}}{(Q_i + Q_a + Q_c - Q_{IV} - Q_V - Q_{VI} - Q_X - Q_{XII})}$$



11.4.1- O consumo específico do combustível

A qualidade de operação de muitos fornos é comparada com recurso aos valores dos consumos e dos calores específicos.

O consumo específico do combustível revela a quantidade de calor consumido para aquecer 1 kg do metal ate a temperatura desejada.

O consumo específico de combustível é frequentemente calculado em referência a combustível standard. O combustível standard é um combustível hipotético cujo calor específico é de 29 330 kJ/kg. Dai o consumo específico de combustível é:



Para Q_i^t expresso em kJ/kg ou kcal/m³

$$BQ_i^t / 29330 \quad [\text{kg/kg}] \quad (11.28)$$

37

Para Q_i^t expresso em kcal/kg ou kcal/m³

$$BQ_i^t / 7000 \cdot G_m \quad [\text{kg/kg}] \quad (11.29)$$