

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 9

Aula 9: Balanços Térmicos e Consumo de combustível



Tópicos

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



9.1 - 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.



9.1 - 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.



9.1 - 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**.



PONTO DE ANÁLISE

- **Chama** (gases incandescentes)
- **Metal** (carga)
- **Direção** da chama
- **Elementos** em troca mútua de calor a temperaturas diferentes (paredes, soleira, ar, gases, etc.)

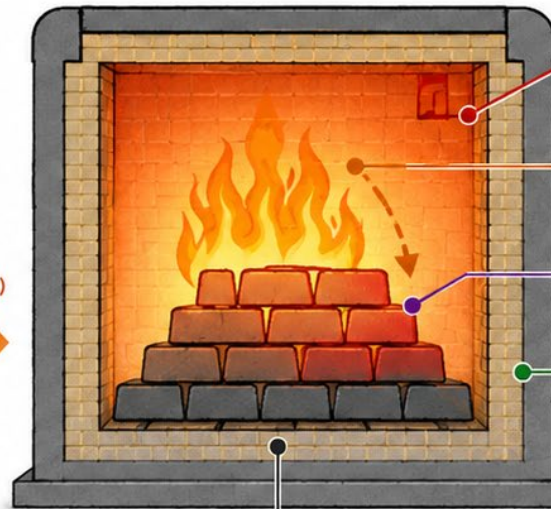


A temperatura do interior do forno não é determinada apenas por um destes elementos, mas sim pelo valor médio representativo denominado **TEMPERATURA DO FORNO (T_f)**.

ENTRADA
DE ENERGIA
(COMBUSTÍVEL)



ELEMENTOS DO FORNO E SUAS TEMPERATURAS TÍPICAS



GASES INCANDESCENTES (chama)

$T_{\text{gases}} \approx 1400 - 1800 \text{ } ^\circ\text{C}$

DIREÇÃO DA CHAMA

$T_{\text{dir}} \approx 1000 - 1600 \text{ } ^\circ\text{C}$

METAL (CARGA)

$T_{\text{metal}} \approx 900 - 1300 \text{ } ^\circ\text{C}$

PAREDES/REVESTIMENTO

$T_{\text{rev}} \approx 300 - 600 \text{ } ^\circ\text{C}$

SUPERFÍCIES EXTERNAS

$T_{\text{ext}} \approx 50 - 100 \text{ } ^\circ\text{C}$

SOLEIRA (fundo)

$T_{\text{sol}} \approx 400 - 700 \text{ } ^\circ\text{C}$



IDEIA-CHAVE

A **TEMPERATURA DO FORNO (T_f)** representa o estado térmico global do interior do forno, resultante da interação entre todos os elementos.

T_f não é a média aritmética simples das temperaturas, mas um **valor representativo para o balanço de calor**.

9.1 - 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:

$$t_r = \eta \cdot t_c \quad (9.1)$$

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.



9.2 – 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.



9.2 – 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}).



9.2 – Condições Térmicas

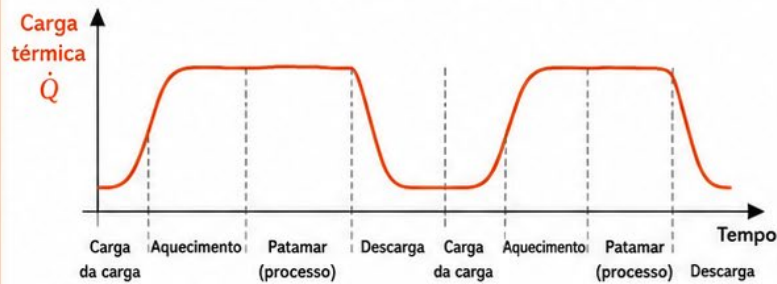


As condições térmicas estão relacionadas com as condições da **temperatura do forno**.

Nos fornos **periódicos**, a temperatura e a carga térmica variam com o tempo, enquanto que nos fornos **contínuos** a carga térmica permanece aproximadamente constante.

FORNOS PERIÓDICOS

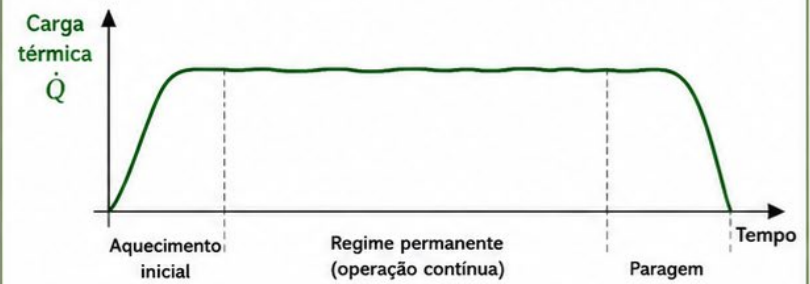
A carga térmica varia com o tempo (ciclo de operação)



► Temperatura e carga térmica não são constantes no tempo.

FORNOS CONTÍNUOS

A carga térmica permanece aproximadamente constante



► Após o aquecimento inicial, a carga térmica é praticamente constante.



A qualidade de operação de um forno, ou a perfeição deste como instalação térmica, é representada pelos seguintes coeficientes:

Coeficiente de utilização térmica do combustível (η_u)

Relação entre o **calor útil** aproveitado e o **calor químico do combustível** consumido.

Coeficiente de utilização total de calor (η_{ut})

Relação entre o calor útil e o **calor total fornecido** ao forno (considera outras fontes de calor além do combustível).



IDEIA-CHAVE

Os coeficientes η_u e η_{ut} permitem **avaliar o aproveitamento da energia** no forno e identificar as principais fontes de perdas, orientando melhorias na eficiência térmica.

9.2 – Condições Térmicas

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

$$\eta_u = \frac{Q_m + Q_{sl} - Q_{end} + Q_{ex}}{Q_f + Q_{ph} B} \quad (9.2)$$

É de notar que:

$$Q_f + \dot{B}Q_{ph} - \dot{B}Q_{wg} - Q_{los} = Q_m + Q_{sl} - Q_{end} + Q_{exec} \quad (9.3)$$

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

$$\eta_u = \frac{Q_f + \dot{B}Q_{ph} - \dot{B}Q_{wg} - Q_{los}}{Q_f + \dot{B}Q_{ph}} \quad (9.4)$$



9.2 – Condições Térmicas

Onde:

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

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 e

Q_{los} é o calor perdido.



9.2 – Condições Térmicas

Para os fornos eléctricos pode-se escrever:

$$Q_f + \dot{B}Q_{ph} = 860 \cdot P \quad (9.5)$$

Onde P é a potência do forno em kW

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

$$\eta_u = \frac{Q_f + \dot{B}Q_{ph} - \dot{B}Q_{wg} - Q_{los}}{Q_f + \dot{B}Q_{ph}} \quad (9.6)$$

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



9.2 – 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.



$$\eta_{ut} = \frac{Q_w^l + BQ_{ph} - BQ_{wg}}{Q_w^l + BQ_{ph}} \quad (9.7)$$

9.2 – Condições Térmicas

comparando as Formulas 1 e 2 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



9.2 – Condições Térmicas

Nos fornos de aquecimento a produtividade é determinada pela temperatura inicial do metal a ser aquecido. Nos dois casos a produtividade é largamente afectada pela temperatura do espaço interno do forno e a temperatura dos gases do escape e também da intensidade e da 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.





9.2 – Condições Térmicas

A produtividade do forno depende das condições térmicas e do processo.



Nos fornos de aquecimento, a **produtividade** é determinada pela **temperatura inicial do metal a ser aquecido**.



Nos dois casos, a produtividade é largamente afectada pela **temperatura do espaço interno do forno** e pela **temperatura dos gases de escape**.



Também influenciam a **intensidade e a natureza da 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**.

PRINCIPAIS FACTORES QUE AFECTAM A PRODUTIVIDADE



Temperatura do espaço interno do forno
Maior temperatura → maior força motriz de transferência de calor



Temperatura dos gases de escape
Temperaturas mais altas reduzem o aproveitamento do calor



Temperatura inicial do metal
Quanto mais baixa a temperatura inicial, mais energia é necessária



Transferência de calor
Intensidade e natureza da transferência determinam a taxa de aquecimento



Factores tecnológicos e estruturais do forno
Tipo de forno, isolamento, refractários, sistema de combustão, geometria, etc.



IDEIA-CHAVE

A produtividade resulta do equilíbrio entre o **calor fornecido**, a **transferência de calor eficaz** e as **características do forno e do material**.



9.3 -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.

9.3 -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**.

- ✓ Identifica todas as fontes de energia que entram no forno.
- ✓ Quantifica o **calor útil** e todas as **perdas**.
- ✓ Permite calcular o **consumo de combustível** e avaliar a **eficiência térmica**.

BALANÇO DE CALOR DO FORNO

ENTRADAS

- Combustível
- Ar aquecido
- Comb. aquecido
- Reacções
- ...

FORNO



SAÍDAS

- Calor útil (metal/escória)
- Gases de escape
- Paredes/tecto
- Portas/aberturas
- Outras perdas
- ...

$$\Sigma Q_{\text{entradas}} = \Sigma Q_{\text{saídas}}$$

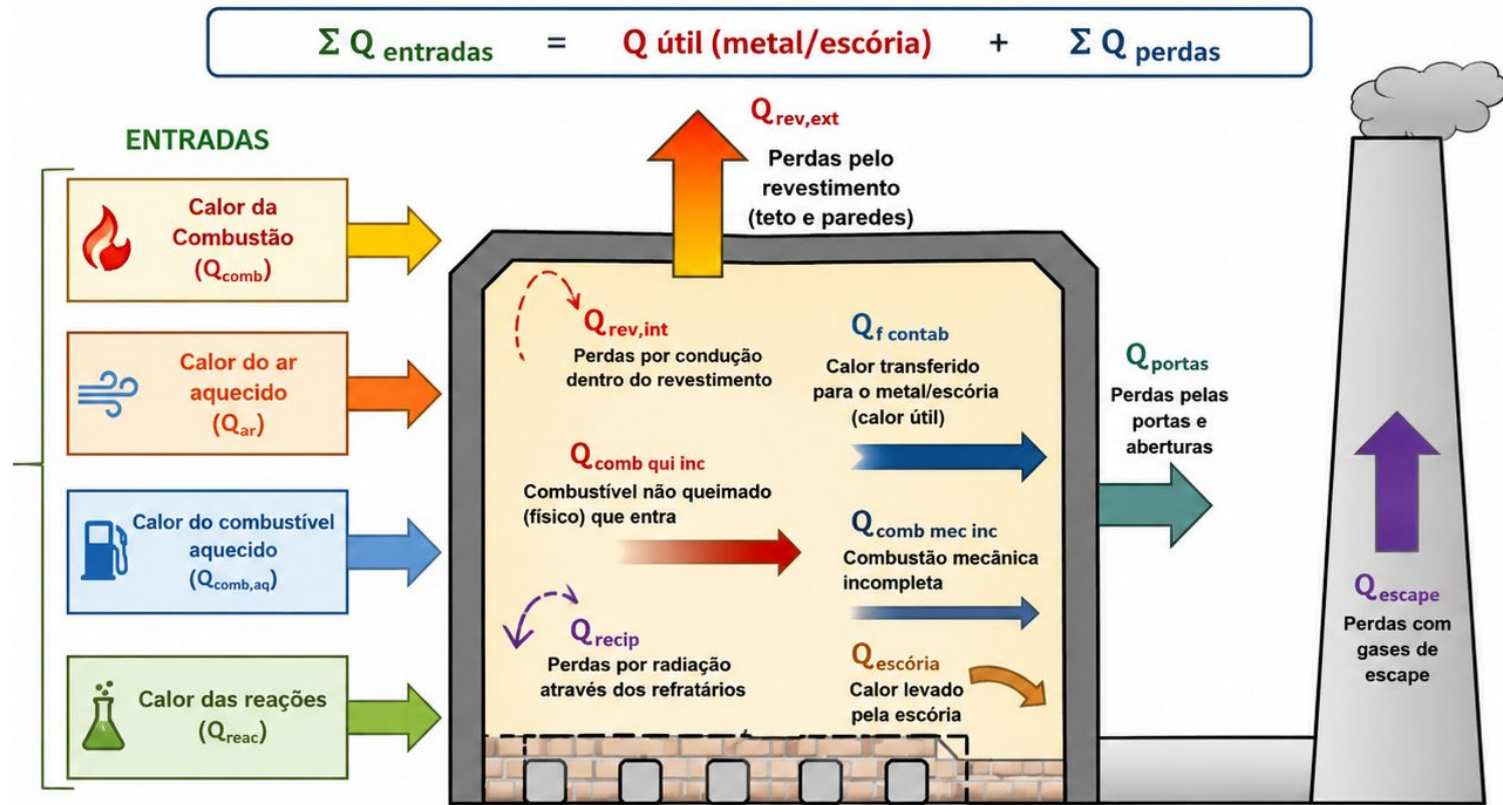


O balanço de calor é realizado:

- para uma **hora de funcionamento contínuo** do forno; ou
- para um **ciclo completo de operações**, no caso de um funcionamento periódico do forno.



9.3 - Balanço de Calor e Consumo de Combustível



$Q_{\text{rev,int}}$ – perdas de calor para o interior do revestimento

$Q_{\text{rev,ext}}$ – perdas de calor para o exterior do revestimento

BASE DE CÁLCULO:

- Fornos contínuos: 1 hora de funcionamento
- Fornos periódicos: 1 ciclo completo



O balanço de calor permite identificar como a energia entra no forno, onde é utilizada e para onde são conduzidas as perdas.

9.3.1 - Variáveis de Entrada

1 - Calor químico da combustão

$$Q_q = \dot{B} Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.8)$$

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.

9.3.1 - Variáveis de Entrada

2 - Calor físico do ar pré - aquecido

$$Q_a = \dot{B}c_a t_a \alpha V_{ar}^o \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.9)$$

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 ta kJ/(m³°C)

α é o coeficiente de excesso de ar

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



9.3.1 - Variáveis de Entrada

3 - Calor físico do combustível pré - aquecido

$$Q_a = \dot{B}c_f t_f \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.10)$$

Onde:

c_f é o calor específico do combustível em °C ate t_f em kJ(m³°C)

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



9.3.1 - 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:

$$Q_{ex} = 5652 \cdot P \cdot a \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.9)$$



Onde:

P - é a produtividade do forno em kg/h

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

9.3.1 - Variáveis de Saída

1 - Calor requerido para aquecimento e fusão do material

Com material frio a ser carregado no forno:

$$Q_{us} = G c_m t_{m.f} \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.12)$$

Com material pré-aquecido a ser carregado no forno

$$Q_{ust} = G (c_m t_{m.f} - c_m t_{m.in}) \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.13)$$



9.3.1 - Variáveis de Saída

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_{mf} é o calor específico médio do metal no intervalo de temperaturas de 0°C a $t_{m.f}$ em kJ/kg

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

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



9.3.1 - Variáveis de Saída

2 - Calor perdido com a escória

$$Q_{sl2} = G_{sl} c_{sl} t_{sl} \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.14)$$

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.

9.3.1 - Variáveis de Saída

4 - Calor perdido com os gases de escape

$$Q_4 = \dot{B}v_{wg} c_{wg} t_{wg} \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.15)$$

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.

9.3.1 - Variáveis de Saída

12 – Perdas de calor não contabilizáveis

$$Q_{12} = \dot{B} (0,1 - 0,15) \cdot (Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}) \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.26)$$

1) BALANÇO DE CALOR

Somando separadamente os itens de entrada e de saída, os dois somatórios devem ser $Q_{in} = Q_{out}$.

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.

ENTRADAS	=	SAÍDAS
Q_{in}		Q_{out}
(SOMATÓRIO DAS ENTRADAS)		(SOMATÓRIO DAS SAÍDAS)

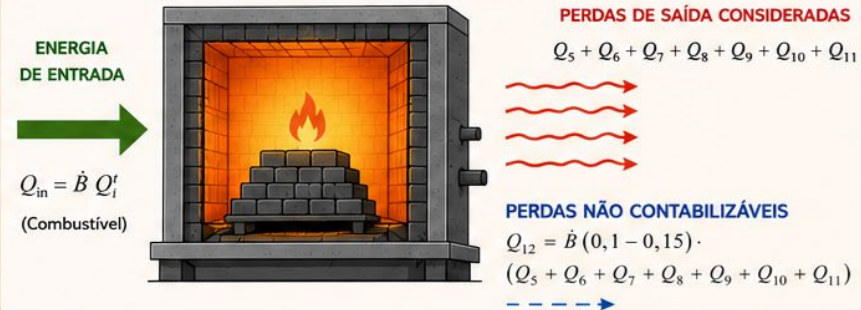
2) ITENS DE SAÍDA CONSIDERADOS

Os termos Q_5 a Q_{11} representam as principais perdas de calor identificadas no balanço térmico do forno.



3) PERDAS NÃO CONTABILIZÁVEIS

Mesmo depois de contabilizadas as principais perdas (Q_5 a Q_{11}), existe uma fração adicional que não pode ser medida ou identificada individualmente (fugas, infiltrações, radiação de pequenas aberturas, perdas locais, etc.).



4) UTILIDADE DA TABELA DE BALANÇOS TÉRMICOS



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;
- identificar o mau funcionamento do forno.



Com esta análise é possível tomar medidas corretivas que melhorem a eficiência e reduzam o consumo de combustível.

RESUMO



Q_{12} representa uma fração (10% a 15%) das perdas totais consideradas. Ela cobre perdas que não podem ser medidas diretamente, mas que devem ser incluídas no balanço para que $Q_{in} = Q_{out}$ seja satisfeito e o consumo de combustível **B** possa ser corretamente determinado.



9.3.1 - 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 tem 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 142kJ/m³.

9.3.1 - 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:

$$Q_5 = \dot{B}v_{wg} a \cdot 12142 \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.16)$$

ou

$$Q_5 = \dot{B}v_{wg} a \cdot 2900 \quad [\text{kcal/h}] \quad (9.17)$$

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



9.3.1 - 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:

$$Q_6 = (0,03 - 0,05) \cdot \dot{B}Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.18)$$

Com combustível gasoso devido ao escapamento do gás


$$Q_6 = (0,02 - 0,03) \cdot \dot{B}Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.19)$$

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

$$Q_6 = 0,01 \cdot \dot{B}Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.20)$$

9.3.1 - 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

$$Q_{l7} = \frac{t_l - t_a}{l_1 / k_1 + l_2 / k_2 + 1 / h} \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.21)$$

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 $19,8 \text{ W}/(\text{m}^2^\circ\text{C})$.



9.3.1 - Variáveis de Saída



Quando as portas do forno estão abertas, o calor do interior do forno é **perdido por radiação** através da abertura.

Esta perda aumenta com a temperatura interna e com o tamanho da abertura.



FACTORES QUE INFLUENCIAM A PERDA POR RADIAÇÃO



Temperatura interna do forno
Quanto maior a temperatura, maior a perda por radiação.



Tamanho da abertura (área)
A perda é proporcional à área das portas abertas.



Tempo de abertura
Quanto maior o tempo com as portas abertas, maior a perda total.



Estado das superfícies
Superfícies mais emissivas (escuras e rugosas) aumentam a radiação.

EXPRESSÃO APROXIMADA

A perda de calor por radiação através das portas abertas pode ser estimada por:

$$Q_{\text{rad, portas}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{\text{ab}} \cdot (T_{\text{forno}}^4 - T_{\text{ext}}^4) \quad [\text{kJ/h}]$$

- ε – emissividade efectiva da abertura (0,6 a 0,9)
- σ – constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ kW/m}^2\text{K}^4$
- A_{ab} – área total das portas abertas [m^2]
- T_{forno} – temperatura absoluta do ambiente do forno [K]
- T_{ext} – temperatura absoluta do exterior [K]



BOAS PRÁTICAS

- Minimizar o tempo com as portas abertas.
- Abrir apenas o necessário.
- Manter as portas e vedantes em bom estado.
- Utilizar cortinas térmicas quando possível.



As perdas por radiação pelas portas abertas podem representar uma parcela significativa das perdas totais do forno, afectando o consumo de combustível e a eficiência energética.

9.3.1 - Variáveis de Saída

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

$$Q_8 = C_o (T/100)^4 F \Phi \varphi \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.22)$$

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 9.1)

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

Tabela 9.1 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									



9.3.1 - 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:

$$Q_9 = G_c c_c t_c \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.23)$$

Onde:

G_c é a massa do recipiente em kg/h

C_c calor específico médio do do recipiente no intervalo de temperaturas de 0 a t_c em kJ/(kg°C)

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



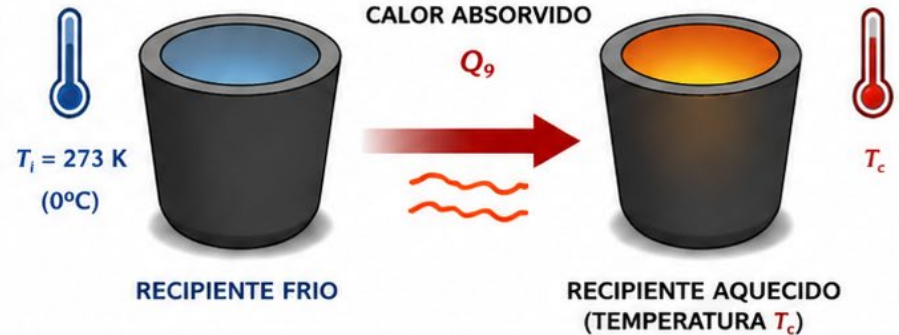
9.3.1 - Variáveis de Saída



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:

$$Q_9 = G_c c_c t_c \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.23)$$



Onde:

- G_c é a massa do recipiente em kg/h
- c_c é o calor específico médio do recipiente no intervalo de temperaturas de 0 a t_c em kJ/(kg°C)
- t_c é a temperatura final do recipiente (°C)



INTERPRETAÇÃO

O calor Q_9 corresponde à energia necessária para elevar a temperatura do recipiente desde 0°C até à temperatura de operação t_c .



Se o recipiente estiver quente deve-se apenas considerar o calor adicional gasto (diferença entre a sua temperatura inicial e a temperatura de operação).



9.3.1 - 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.



$$Q_{10} = (0,10 - 0,15) \cdot \dot{B}Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.24)$$



9.3.1 - 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.

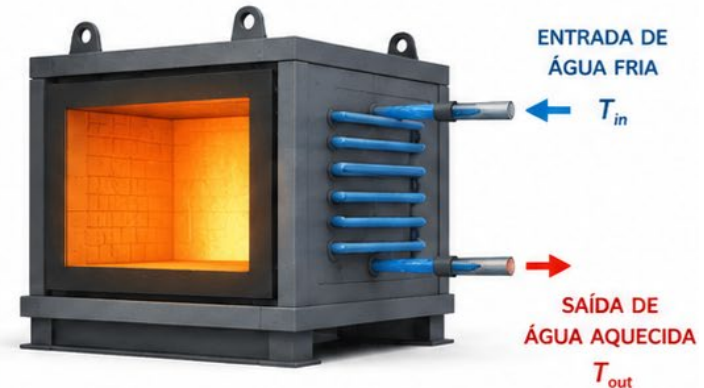
$$Q_{10} = (0,10 - 0,15) \cdot \dot{B} Q_i^t \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.24)$$

Onde:

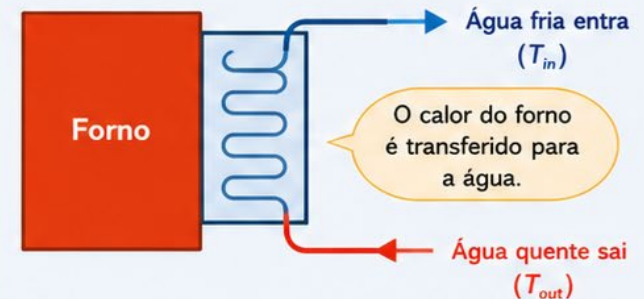
Q_{10} – calor perdido com a água de arrefecimento do forno [kJ/h]

$\dot{B}$ – consumo de combustível [kg/s] ou [m³/h]

Q_i^t – poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg] ou [kJ/m³]



Esquema de remoção de calor pela água de arrefecimento



IMPORTANTE

As perdas por arrefecimento representam entre 10% e 15% do calor total fornecido ao forno. Essas perdas reduzem a eficiência energética do sistema.



9.3.1 - Variáveis de Saída

11 - Perdas de calor acumulado no revestimento

$$Q_{ac11} = V_r \rho_r c_r t_r \quad \left[\text{kJ/período} \right] \quad (9.25)$$

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



9.3.1 - Variáveis de Saída

11 - Perdas de calor acumulado no revestimento



Nos fornos de carruagens o **calor acumulado** nos forros inferiores de materiais refractários das carruagens deve ser considerado.



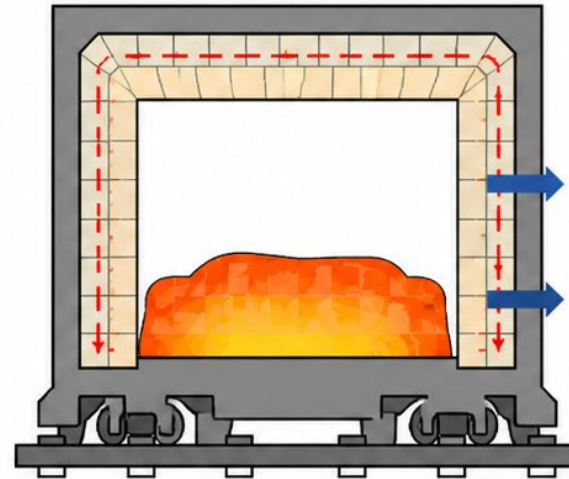
Nos **fornos periódicos**, além da parte de calor acumulada no revestimento, uma parte é **perdida por condução** através das paredes.



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** e não para uma hora.



$Q_{\text{acum (rev)}}$

Calor acumulado no revestimento (energia armazenada)

$Q_{\text{cond (paredes)}}$

Perdas por condução através das paredes

$Q_{\text{out outras}}$

Outras perdas (por convecção, radiação, portas, etc.)



IDEIA-CHAVE

Nos fornos periódicos, a **energia armazenada** no revestimento durante o aquecimento é, parcialmente, recuperada na fase de arrefecimento, mas uma parte é **perdida por condução** através das paredes.



Por isso, o balanço de calor deve ser feito para **TODO O CICLO DE OPERAÇÃO**. Essa abordagem permite avaliar correctamente as perdas e o desempenho do forno.

9.3.1 - 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.



9.3.1 - Variáveis de Saída

12 - Perdas de calor não contabilizáveis

$$Q_{12} = \dot{B}(0,1-0,15) \cdot (Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}) \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.26)$$

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.

9.3.1 - Variáveis de Saída

12 – Perdas de calor não contabilizáveis

$$Q_{12} = \dot{B} (0,1 - 0,15) \cdot (Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}) \quad [\text{kJ/h}] \quad (9.26)$$

1) BALANÇO DE CALOR

Somando separadamente os itens de entrada e de saída, os dois somatórios devem ser $Q_{in} = Q_{out}$.

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.

ENTRADAS	=	SAÍDAS
Q_{in}		Q_{out}
(SOMATÓRIO DAS ENTRADAS)		(SOMATÓRIO DAS SAÍDAS)

2) ITENS DE SAÍDA CONSIDERADOS

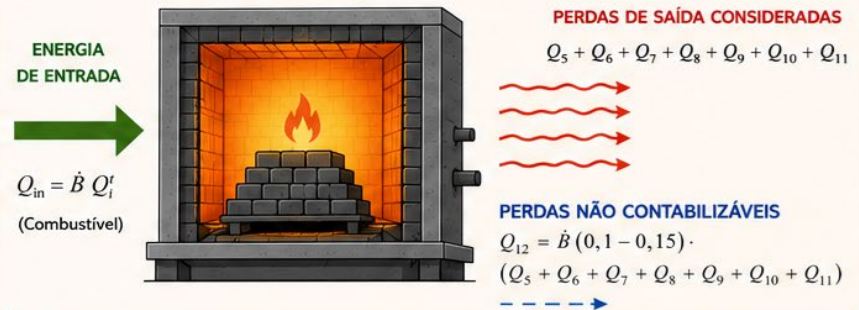
Os termos Q_5 a Q_{11} representam as principais perdas de calor identificadas no balanço térmico do forno.



Itens de saída considerados na equação de Q_{12}

3) PERDAS NÃO CONTABILIZÁVEIS

Mesmo depois de contabilizadas as principais perdas (Q_5 a Q_{11}), existe uma fração adicional que não pode ser medida ou identificada individualmente (fugas, infiltrações, radiação de pequenas aberturas, perdas locais, etc.).



4) UTILIDADE DA TABELA DE BALANÇOS TÉRMICOS



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;
- identificar do mau funcionamento do forno.



Com esta análise é possível tomar medidas corretivas que melhorem a eficiência e reduzam o consumo de combustível.

RESUMO

Q_{12} representa uma fração (10% a 15%) das perdas totais consideradas.

Ela cobre perdas que não podem ser medidas diretamente, mas que devem ser incluídas no balanço para que $Q_{in} = Q_{out}$ seja satisfeito e o consumo de combustível **B** possa ser corretamente determinado.





O consumo de combustível de um forno pode ser determinado pelo balanço de calor.

1 Balanço geral de energia (entradas = saídas)

$$\underbrace{\dot{B} \cdot Q_i + B \cdot Q_a + B \cdot Q_c + Q_{ex}}_{\text{Entradas}} = \underbrace{Q_I + Q_{II} + Q_{III} + B \cdot Q_{IV} + B \cdot Q_V + B \cdot Q_{VI} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + B \cdot Q_X + Q_{XI} + B \cdot Q_{XII}}_{\text{Saídas (calor útil + perdas)}}$$

2 Agrupando os termos com B à esquerda

$$\underbrace{\dot{B} \cdot Q_i + B \cdot Q_a + B \cdot Q_c - B \cdot Q_{IV} - B \cdot Q_V - B \cdot Q_{VI} - B \cdot Q_X - B \cdot Q_{XII}}_{\text{Termos com B}} = \underbrace{Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_{XI} - Q_{ex}}_{\text{Termos independentes de B}}$$

3 Factorizando B

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

4 Isolando o consumo de combustível ($\dot{B}$)



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

Onde:

$\dot{B}$: consumo de combustível [kg/h ou m³/h]

Q_i : poder calorífico (inferior) do combustível [kJ/kg ou kJ/m³]

Q_a : calor sensível do ar de combustão por unidade de combustível [kJ/kg ou kJ/m³]

Q_c : calor sensível do combustível por unidade de combustível [kJ/kg ou kJ/m³]

Q_{ex} : calor das reacções exotérmicas (não relacionadas com a combustão) [kJ/h]:

CALOR ÚTIL

Q_I	Calor sensível do metal	[kJ/h].
Q_{II}	Calor latente do metal (fusão)	[kJ/h].
Q_{III}	Calor sensível da escória!	[kJ/h].

PERDAS

Q_{IV}	Calor dos gases de escape por unidade de combustível	[kJ/kg ou kJ/m³]
Q_V	Calor perdido pelas paredes e teto (revestimento)	[kJ/kg ou kJ/m³]
Q_{VI}	Calor perdido pelas portas e aberturas (infiltrações)	[kJ/kg ou kJ/m³]
Q_{VII}	Calor por radiação através das aberturas	[kJ/h]
Q_{VIII}	Outras perdas (convecção, radiação, etc.)	[kJ/h]
Q_{IX}	Calor perdido na água de refrigeração	[kJ/h]
Q_X	Calor devido à combustão incompleta (perdas físicas)	[kJ/kg ou kJ/m³]
Q_{XI}	Calor levado pela escória (metal não recuperado)	[kJ/h]
Q_{XII}	Calor acumulado no revestimento (armazenado) ³	[kJ/kg ou kJ/m³]



A expressão permite calcular o consumo de combustível necessário para fornecer o calor útil ao processo, considerando todas as entradas adicionais e todas as perdas de calor do forno.



9.4.1- O consumo específico do combustível



- ▶ A qualidade de operação de muitos fornos é comparada com recurso aos **consumos e aos calores específicos**.
- ▶ O consumo específico do combustível revela a **quantidade de calor consumido** para aquecer 1 kg do metal até à temperatura desejada.
- ▶ O consumo específico de combustível é frequentemente calculado em referência a combustível padrão (standard).
- ▶ O combustível padrão (standard) é um combustível hipotético cujo **calor específico inferior é de 29 330 kJ/kg**. Dai o consumo específico de combustível é:



IDEIA-CHAVE

O consumo específico permite comparar fornos independentemente do tipo de combustível utilizado.

Quanto **menor** o consumo específico, melhor a eficiência energética do forno.



REFERÊNCIA
EM kJ/kg
OU kcal/m³

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

$$BQ_i^t / 29330 \quad [\text{kg/s}]$$

(9.28)

- B – consumo de combustível [kg/s]
- Q_i^t – poder calorífico inferior do combustível utilizado [kJ/kg ou kcal/m³]
- 29330 – poder calorífico inferior do combustível padrão [kJ/kg]



REFERÊNCIA
EM kcal/kg
OU kcal/m³

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

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

(9.29)

- B – consumo de combustível [kg/s]
- Q_i^t – poder calorífico inferior do combustível utilizado [kcal/kg ou kcal/m³]
- G_m – factor de conversão (1 kcal = G_m kJ)
 $G_m = 4,1868$ kJ/kcal
- 7000 = 29330/4,1868



Utiliza-se o combustível padrão para permitir **comparações entre fornos com combustíveis diferentes**.

Exemplo de unidades do consumo específico: kJ/kg, kcal/kg, kJ/m³ ou kcal/m³ do metal produzido.

