

eficiência energética na indústria

{3.ª PARTE – BALANÇOS DE MASSA E DE ENERGIA}



Para reduzir os consumos de energia numa instalação é necessário conhecer os equipamentos mais consumidores. Para tal é essencial determinar todas as entradas e saídas de massa e de energia destes equipamentos, de modo a determinar o seu consumo, assim como as suas perdas e consequentemente a sua eficiência energética.

De modo a percebermos como é que estamos a utilizar a energia, qual o rendimento dos diversos equipamentos e quais as perdas verificadas, é fundamental proceder a medições, que conduzirão ao conhecimento de determinadas grandezas que irão aferir a maior ou menor eficácia com que se utiliza energia numa instalação.

A forma mais completa de conhecer um equipamento é efectuar um balanço mássico e energético, sendo o modo de o efectuar o objecto de estudo neste artigo.

O balanço de energia tem o seu fundamento no princípio da conservação de energia, isto é: de toda a energia fornecida a um sistema, uma parte é acumulada no seu interior sob a forma de energia interna, e outra parte é dissipada para o exterior do sistema. Analiticamente, podemos representar este princípio pela seguinte expressão:

$$E_e = E_c + E_d$$

E_e energia fornecida ao sistema

E_c energia acumulada no sistema

E_d energia dissipada para o exterior do sistema

Em regime estacionário não há acumulação de energia no sistema, o que por outras palavras se pode dizer que toda a energia que entra é igual à energia que sai do sistema, para um determinado intervalo de tempo. Logo, na expressão anterior, $E_c=0$ e que se traduz em:

$$E_e = E_d$$

O que significa que em regime estacionário não há alteração dos parâmetros de funcionamento do sistema ao longo do tempo. Ou seja, todos os caudais e temperaturas do sistema se mantêm constantes.

Esta definição de sistema estacionário é válida, na prática, apenas em termos médios. As situações a que um equipamento térmico está sujeito variam no tempo, de tal forma que, ao longo de um período suficientemente longo, os parâmetros médios de funcionamento se mantêm constantes.

O regime estacionário assim definido é atingido ao fim de um determinado tempo mais ou menos longo, após o arranque do equipamento. Dependendo, também, da estabilidade da produção nesse mesmo período de tempo.

Balanço energético é então definido como o somatório da energia que entra no sistema e da energia que sai desse mesmo sistema, sendo o balanço térmico um caso particular do balanço de energia, onde apenas se contabiliza a energia térmica.

A primeira coisa que se deve fazer para elaborar um balanço de energia é definir a fronteira do sistema em relação ao qual se efectua a contabilização das entradas e saídas de energia. Conhecida a fronteira do sistema, tudo o que passa no seu interior não interessa à realização do balanço, interessarão apenas as quantidades de energia que atravessam essa fronteira num sentido ou no outro. É evidente que se modificarmos a localização da fronteira do sistema o balanço é alterado.

Toma-se o exemplo simplificado de um forno e os seus recuperadores de calor dos fumos, como esquematizado na Figura 1.

Se se fizer um balanço relativamente à fronteira I, ele refere-se apenas ao forno e é diferente do balanço relativamente à fronteira II, que inclui as trocas de energia no recuperador.

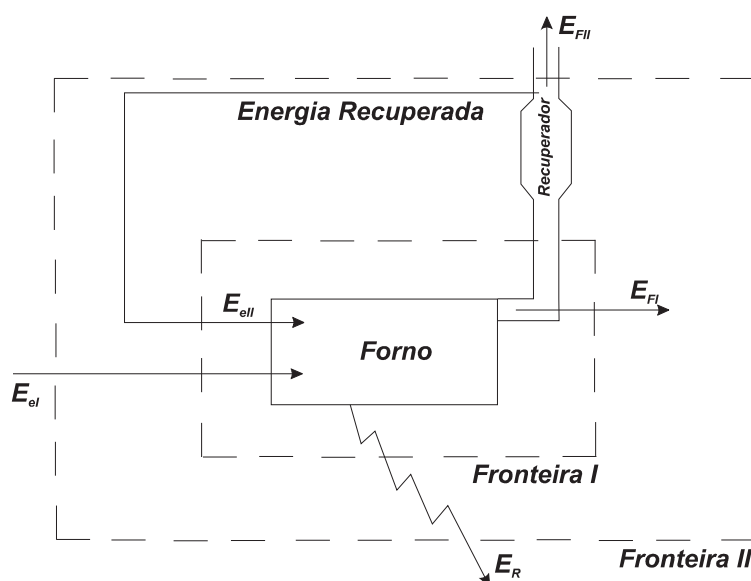


Figura 1

Analiticamente temos então:

$$\begin{array}{ll} \text{Fronteira I} & \text{Fronteira II} \\ E_{el} + E_{ell} = E_R + E_{Fl} & E_{el} = E_R + E_{Fl} \end{array}$$

Neste caso, $E_{FI} \neq E_{FII}$, que é a energia perdida através dos gases de combustão. Tornando-se assim, evidente a importância da definição da fronteira em relação à qual se faz o balanço de energia.

Em esquema (Figura 2), e a título de exemplo, pode definir-se um balanço de energia da seguinte forma:

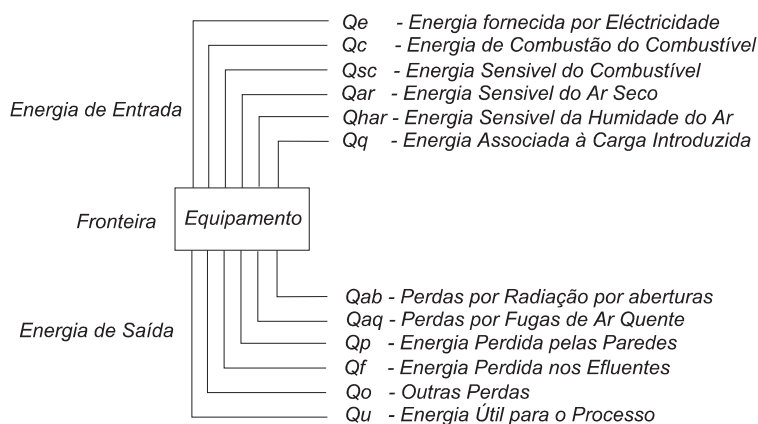


Figura 2

Assim, em regime estacionário temos a seguinte expressão:

$$(Q_e + Q_c + Q_{sc} + Q_{ar} + Q_{har} + Q_g) - (Q_u + Q_f + Q_p + Q_{ab} + Q_{ag} + Q_o) = 0 \quad (1)$$

A temperatura de referência é um parâmetro que tem de ser definido no cálculo de um balan-

ço de energia pois é em relação a ela, que serão calculadas todas as parcelas de energia. Toma-se normalmente para temperatura de referência 0°C .

Só pode haver trocas de energia se o fluido que transporta essa energia se encontrar a uma temperatura diferente da temperatura de referência. Assim, tendo em conta que na maior parte dos casos o ar de combustão entra à temperatura ambiente, para simplificar os cálculos, pode tomar-se a temperatura ambiente como de referência.

A realização de um balanço de energia implica a medição das diversas grandezas envolvidas, o que permite o cálculo das várias parcelas de energia. É evidente que estas parcelas serão calculadas com um determinado erro que, embora se tente minimizar através de medidas adequadas com bons equipamentos durante períodos suficientemente longos, para garantir tanto quanto possível a estabilidade do sistema, toma sempre um valor significativo.

Assim, o 2º membro da equação não será zero, como se referiu, mas na realidade terá um valor relativamente pequeno. Este é o denominado erro de fecho, e pode ser calculado se for possível calcular todas as trocas de energia independentemente umas das outras. Tal implica o próprio cálculo de energia útil de uma forma directa. É o chamado método directo.

Existe outra forma de proceder a um balanço de energia, em que a energia útil é calculada por diferença. É o denominado método das perdas. Neste caso a equação (1) vem para a equação (2). Neste caso não é possível conhecer o erro de fecho do balanço.

A partir do conhecimento das parcelas do balanço de energia é possível definir de uma forma genérica o rendimento energético, isto é, a razão entre a energia útil e a energia total entrada no sistema. Torna-se evidente que o rendimento assim definido depende da fronteira em relação à qual foi feito o balanço energético.

$$Q_u = (Q_e + Q_c + Q_{sc} + Q_{ar} + Q_{har} + Q_q) - (Q_f + Q_p + Q_{ab} + Q_{aq} + Q_o) \quad (2)$$

Assim, em relação à fronteira I da figura anteriormente apresentada, o rendimento é dado pela seguinte expressão:

$$\eta = 100 \times \frac{Q_u}{Q_e + Q_c + Q_{sc} + Q_{ar} + Q_{har} + Q_q}$$

em que: $Q_e + Q_c + Q_{sc} + Q_q = E_{el}$

$Q_{ar} + Q_{har} = E_{ell}$ (energia recuperada nos fumos)

Este será o rendimento do forno, não considerando o economizador. Se considerarmos a definição de rendimento relativamente à fronteira II, ou seja, da instalação constituída por forno e recuperador, temos:

$$\eta = 100 \times \frac{Q_u}{Q_e + Q_c + Q_{sc}}$$

Admitiu-se que o ar e a carga entram à temperatura de referência. Caso contrário seria também, necessário adicionar estas parcelas no denominador.

Existem, no entanto, outras definições possíveis de rendimento, como seja:

$$Q_u = (Q_e + Q_c + Q_{sc} + Q_{ar} + Q_{har} + Q_q) - (Q_f + Q_p + Q_{ab} + Q_{aq} + Q_o)$$

se se fizer: $Q_t = Q_e + Q_c + Q_{sc} + Q_{ar} + Q_{har} + Q_q$

e aplicando de novo a expressão (2), vem:

$$\eta = 100 - \left(\frac{Q_f}{Q_t} \times 100 + \frac{Q_p}{Q_t} \times 100 + \frac{Q_{ab}}{Q_t} \times 100 + \frac{Q_{aq}}{Q_t} \times 100 + \frac{Q_o}{Q_t} \times 100 \right)$$

isto é:

$$\eta = 100 - \sum \text{perdas}$$

Este é o rendimento calculado pelo método das perdas, que é idêntico ao anteriormente definido.

O rendimento de geradores de vapor calculado pelo método directo é correntemente definido pela seguinte expressão:

$$\eta = 100 \times \frac{Q_v - Q_{ag}}{Q_c + Q_{sc}}$$

Como observação final, é de salientar que, ao comparar rendimentos energéticos de equipamentos é necessário ter em atenção a que rendimentos se referem, sob a pena de se cometerem erros graves de apreciação.

Embora não possa ser considerado um rendimento, é correntemente utilizado um parâmetro, denominado taxa de evaporação, que permite avaliar o grau de eficiência energética da pro-

dução de vapor. Define-se como a relação entre a quantidade de vapor produzida num dado período de tempo e a quantidade de combustível consumido na produção desse vapor. Ou seja:

$$T_{ev} = \frac{M_v}{M_c}$$

em que: M_v – Caudal de vapor

M_c – Caudal de combustível

Na prática dado ser mais fácil medir o caudal de água do que o de vapor, utiliza-se a expressão:

$$T_{ev} = \frac{M_{ag}}{M_c}$$

em que:

M_{ag} – Caudal de água de alimentação

No entanto estamos a cometer um erro, já que existem purgas, o que reduz o caudal de vapor, mas como esta diferença é diminuta, o erro cometido é desprezável.

FÓRMULAS DE CÁLCULO

Grande parte das fórmulas apresentadas para o cálculo da quantidade de energia de um fluxo são baseadas na fórmula: $Q = m \times cp \times \Delta T$

› Energia da Combustão

$$Q_c = M_c \times (PCS + cp_c \times T_c)$$

onde:

$$Q_c = Q_c + Q_{sc} \quad [\text{kJ} / \text{h}]$$

$$Q_c = \text{Energia de combustão do combustível} \quad [\text{kJ} / \text{h}]$$

$$Q_{sc} = \text{Energia sensível do combustível} \quad [\text{kJ} / \text{h}]$$

$$M_c = \text{Caudal mássico do combustível} \quad [\text{kg} / \text{h}]$$

$$PCS = \text{Poder Calorífico Superior do combustível} \quad [\text{kJ} / \text{kg}]$$

$$cp_c = \text{Calor específico do combustível} \quad [\text{kJ} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}]$$

$$T_c = \text{Temperatura do combustível} \quad [^\circ\text{C}]$$

› Energia Eléctrica

$$Q_e = P \times 3600$$

onde:

Q_e = Energia eléctrica fornecida [kJ / h]

P = Potência dos equipamentos eléctricos [kW]

$$M_{ar\ seco} = (1 + e) \times m_{ar\ seco} \times M_{comb}$$

Normalmente, o caudal de ar que é possível obter directamente é o caudal volúmico e como tal, será necessário converter este valor para caudal mássico, utilizando a seguinte expressão:

$$Q_m = \frac{Q_v \times 28.97 \times P \times 10^5}{8314.3 \times (T + 273.15)}$$

› Energia Associada a gases húmidos (Ar, Gases de combustão)

$$Q_g = M_g \times [cp_g \times T_g + W(1.9 \times T_g + 2480)]$$

onde:

Q_g = Energia associada a gases húmidos [kJ / h]

M_g = Caudal mássico de gás seco [kg / h]

T_g = Temperatura do gás [°C]

cp_g = Calor específico do gás [kJ / kg °C]

W = Teor de humidade no gás [kg_{H2O} / kg_{gás seco}]

Normalmente, existem alguns parâmetros desta fórmula que são difíceis de obter directamente, como tal existem vários métodos de cálculo de alguns deles.

1.º Passo

Calcular o valor do excesso de ar (e)

No caso de se medir a concentração dos gases de combustão, o valor do excesso de ar pode ser calculado seguindo a fórmula:

$$e = \frac{\%O_2}{21 - \%O_2}$$

Se for possível medir a quantidade de ar de combustão, o valor do excesso de ar pode ser calculado pela fórmula seguinte:

$$e = \frac{M_{ar\ seco}}{m_{ar\ seco} \times M_{comb}} - 1$$

2.º Passo

Quando não é possível medir a quantidade de ar de combustão, este caudal pode ser calculado utilizando a seguinte fórmula:

3.º Passo

Calcular o caudal mássico dos gases secos de combustão

$$M_{gases\ secos} = [(1 + e) \times m_{ar\ seco} + 1 - m_{H2O}] \times M_{comb\ seco}$$

4.º Passo

Calcular a humidade dos gases de combustão

$$W_{gases} = \frac{(1 + e) \times m_{ar\ seco} \times W_{ar} + a + m_{H2O}}{(1 + e) \times m_{ar\ seco} + 1 - m_{H2O}}$$

onde:

e = Excesso de ar

$m_{ar\ seco}$ = Ar estequiométrico [kg / kg_{comb. seco}]

m_{H2O} = Água produzida na Combustão de H₂ [kg / kg_{comb. seco}]

a = Teor de água presente no combustível [kg_{H2O} / kg_{comb. seco}]

W_{ar} = Humidade no ar de combustão [kg_{H2O} / kg_{ar seco}]

No quadro seguinte apresentam-se alguns valores típicos de Ar Estequiométrico e de Água formada na combustão.

Combustível	'm _{ar seco} '	'm _{H2O} '
Gasóleo	14.4	1.2
'Burner' óleo	14.0	1.0
'Thin' fuelóleo	14.0	1.0
'Thick' fuelóleo	13.8	1.0
Propano	15.7	1.6

› Calor associado à água de alimentação

$$Q_{ag} = M_{ag} \times cp_{ag} \times T_{ag}$$

onde:

Q_{ag} = Energia associada à água [kJ / h]

M_{ag} = Caudal mássico da água [kg / h]

cp_{ag} = Calor específico da água [kJ / kg °C]

T_{ag} = Temperatura da água [°C]

› Calor associado à água de alimentação

$$Q_v = M_v \times (h_f + xh_{fg})$$

onde:

Q_v = Energia associada ao vapor de água [kJ / h]

M_v = Caudal mássico de vapor [kg / h]

h_f = Entalpia específica da água líquida [kJ / kg]

h_{fg} = Entalpia específica de evaporação [kJ / kg]

x = Fracção de vapor em relação à massa total

Se o vapor de água for vapor saturado seco no lugar de $(h_f + xh_{fg})$ utilizamos h_g .

M_m = Caudal mássico de material seco [kg / h]

c_r = Calor das reacções irreversíveis (780) [kJ / kg]

› Calor associado a perdas pelas paredes

$$Q_{pp} = U \times A \times (T_s - T_a)$$

onde:

Q_{pp} = energia associada a perdas pelas paredes [kJ / h]

A = área da superfície [m²]

$U = U_r + U_c$ = coeficiente global de transmissão de calor [kJ / h m² °C]

U_r = coeficiente de transmissão de calor por radiação [kJ / h m² °C]

U_c = coeficiente de transmissão de calor por convecção [kJ / h m² °C]

T_s = temperatura da superfície [°C]

T_a = temperatura ambiente [°C]

Coefficiente de transmissão de calor por radiação U_r

$$U_r = \frac{20.4 \times E}{T_s - T_a} \times \left[\left(\frac{T_s + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273.15}{100} \right)^4 \right]$$

onde:

Q_{cd} = Energia associada aos condensados [kJ / h]

M_{ag} = Caudal mássico dos condensados [kg / h]

Sendo E a emissividade da superfície.

Coefficiente de transmissão de calor por radiação U_c

$$U_c = B \times (T_s - T_a)^{0.25}$$

Sendo B o factor de geometria.

› Calor associado ao material

$$Q_m = M_m \times cp_m \times T_m$$

onde:

Q_m = Energia associada ao material [kJ / h]

M_m = Caudal mássico de material [kg / h]

cp_m = Calor específico do material [kJ / kg °C]

T_m = temperatura do material [°C]

› Calor associado a reacções endotérmicas irreversíveis

$$Q_r = M_m \times c_r$$

onde:

Q_r = Energia associada às reacções endotérmicas [kJ / h]

Valores Típicos de B	
Planos verticais e cilindros de grandes dimensões	5.22
Planos horizontais virados para cima	6.12
Cilindros horizontais	4.32

Valores Típicos de E		
Aço oxidado	0.4	0.7
Alumínio polido (comercial)	0.1	
Alumínio oxidado (comercial)	0.2	0.3
Refractários	0.4	0.8
Aço pintado	0.8	0.9

Poder Calorífico [kJ/kg]		
Combustível	PCS	PCI
Gasóleo	45 700	43 750
'Burner' óleo	44 100	42 160
'Thin' fuelóleo	43 300	41 200
'Thick' fuelóleo	42 600	40 570
GPL	50 015	46 046
Gás Natural	49 975	45 110

Calor Específico	cp [kJ / kg °C]
Combustíveis líquidos	2.1
Propano líquido	2.5
Butano líquido	2.4
Carvão	1.3
Ar	1
Gases de combustão	1.1
Água	4.186
Aço	0.5
Tijolo refractário	1.0
Betão	0.8
Amianto	0.9
Cortica	2.0
Termofluido	2.5
Argila	1.0
Vidro	1.2