



# Máquinas Térmicas Transferência de Calor na Caldeira

Jurandir Itizo Yanagihara



## Dimensionamento térmico

- Objetivo: minimizar investimentos em material e buscar o aproveitamento racional da energia.
- Abordagem: combinação de fundamentos científicos e informações empíricas.
- Variáveis importantes: energia introduzida na fornalha, calor transferido para as paredes d'água, temperatura no interior da fornalha calor transferido para os trocadores de calor, temperatura de saída dos gases).



## Dimensionamento: fatores importantes

- Envolvimento simultâneo de todos os mecanismos de transferência de calor, inclusive radiação de gases.
- Presença de partículas sólidas em suspensão e deposição contínua de cinzas junto às paredes da fornalha.
- Emissividades variáveis, que dependem das paredes, da deposição das cinzas, tipo de combustível queimado, pressão parcial e temperatura dos gases radiantes.
- Disposição complexa das superfícies de aquecimento, arranjo de tubos e contínua alteração de suas propriedades físicas.
- Queima de combustíveis de propriedades variáveis e combustão instável, com liberação irregular de calor.
- Posição dos queimadores e distribuição das isothermas no interior da caldeira.



## Temperatura adiabática dos gases

$$T_{ad} = T_o + \frac{q_d}{m_g c_{pg} + m_{cz} c_{pcz}}$$

T = Temperatura (ad= ad. gases, o= ambiente) (K)

$q_d$  = Energia disponível na fornalha (kJ/kg comb)

m = Massa (g= gases, cz= cinzas) (kg/kg comb)

$c_p$  = Calor específico (g, cz) (kJ/kg K)



## Energia disponível na fornalha

$$q_d = PCI + \Delta h_{cb} + m_{ar} (\Delta h_{ar} + w_{ar} \Delta h_{vp})$$

PCI = Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg comb)

$\Delta h_{cb}$  = Entalpia do combustível (kJ/kg comb)

$m_{ar}$  = massa real de ar de combustão (kg/kg comb)

$w_{ar}$  = Umidade do ar (kg/kg ar seco)

$\Delta h_{ar}$  = Entalpia do ar de combustão (kJ/kg)

$\Delta h_{vp}$  = Entalpia da umidade do ar (kJ/kg)



## PCS / PCI : Combustíveis Sólidos e Líquidos

$$PCS = 33900c + 141800 \left( h - \frac{o}{8} \right) + 9200s$$

$$PCI = PCS - 2440(9h + w)$$

PCS = Poder calorífico superior do combustível (kJ/kg)

PCI = Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

c = Teor de carbono (kg carbono / kg comb)

h = Teor de hidrogênio (kg hidrogênio / kg comb)

s = Teor de enxofre (kg enxofre / kg comb)

o = Teor de oxigênio (kg oxigênio / kg comb)

w = Teor de umidade (kg umidade / kg comb)



## Massa de Ar e Gases de Combustão Combustíveis Sólidos e Líquidos

$$m_{ar}^* = 138,2 \left( \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right)$$

$$m_g^* = 44 \left( \frac{c}{12} \right) + 9 \left( h + \frac{w}{9} \right) + 64 \left( \frac{s}{32} \right) + 0,7685 m_{ar}^*$$

$m_{ar}^*$  = massa estequiométrica de ar (kg/kg comb)

$m_g^*$  = massa estequiométrica de gases de combustão (kg/kg comb)

$m_{ar}$  = massa real de ar de combustão (kg/kg comb)

$e$  = coeficiente de excesso de ar ( $e = m_{ar} / m_{ar}^*$ )



## Valores Indicados para Excesso de Ar

Combustível	Tipo de queima	Excesso de ar (%)
Gás combustível	Suspensão	5 a 20
Carvão pulverizado	Suspensão	10 a 25
Óleo combustível	Suspensão	10 a 25
Carvão granulado	Grelha	30 a 60
Lenha	Grelha	30 a 60



## Temperatura real dos gases

$$T_r = T_o + \frac{q_d - (\dot{q}_r + \dot{q}_p)}{\dot{m}_{cb} m_g c_{pg}}$$

$T_r$  = Temperatura real de saída dos gases (K)

$q_r$  = Calor trocado por radiação com a água (W)

$q_p$  = Calor trocado com paredes, cinzas, etc (W)

$m_{cb}$  = Consumo de combustível (kg/s)



## Exercício - Calor Disp. e Temp. dos Gases

- Um gerador de vapor de uma usina termelétrica queima carvão pulverizado e produz vapor superaquecido a 10 MPa e 500 °C. A água de alimentação está a  $T_{\text{agua}} = 180$  °C e a temperatura de entrada do ar, após passar pelo pré-aquecedor, é  $T_1 = 250$  °C. O poder calorífico inferior (PCI) do combustível é de 17.500 kJ/kgcomb, sendo que a temperatura de entrada do combustível é  $T_{\text{amb}} = T_{\text{ref}} = 25$  °C e a massa de ar de combustão é de  $7,5 \text{ kg}_{\text{ar seco}} / \text{kg}_{\text{comb}}$ . Considere desprezível a umidade do ar de entrada. A massa dos gases de combustão é de  $8,2 \text{ kg}_{\text{gases}} / \text{kg}_{\text{comb}}$  e a massa de cinzas leves é de  $0,3 \text{ kg}_{\text{cinzas}} / \text{kg}_{\text{comb}}$ . Considerando-se que os gases de combustão deixam o superaquecedor à temperatura de  $T_3 = 900$  °C e que o consumo de combustível é de  $25 \text{ kg}_{\text{comb}} / \text{s}$ , calcule: a) a produção de vapor (kg/s); b) a temperatura ( $T_2$ ) dos gases de combustão antes de passar pelo superaquecedor (°C). Dados:  $C_{p_{\text{ar}}} = C_{p_{\text{gases}}} = 1,0 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ ;  $C_{p_{\text{cinzas}}} = 0,84 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ .



## Calor irradiado na fornalha

$$\dot{q}_r = \sigma \varepsilon S_i (T^4 - T_p^4)$$

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5,668 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

$\varepsilon$  = Emissividade combinada

$S_i$  = Superfície irradiada ( $\text{m}^2$ )

$T$  = Temperatura média dos gases (K)

$T_p$  = Temperatura da parede (K)



## Emissividade combinada

- Depende do tipo de combustível, do conteúdo de dióxido de carbono e vapor d'água nos gases de combustão, das temperaturas envolvidas e do material que compõe as superfícies.
- Faixa de variação da emissividade combinada:
  - combustíveis convencionais : 0,75 - 0,95
  - óleo combustível : maior que 0,95
  - carvão betuminoso e madeira: 0,55 – 0,80



## Temperatura da parede

$$T_p = T_v + \frac{\dot{q}_r}{2\pi L} \left[ \frac{1}{k_t} \ln \frac{d_e}{d_i} + \frac{2}{h_i d_i} \right]$$

$T_v$  = Temperatura do vapor (K)

$k_t$  = Condutividade térmica dos tubos (W/m K)

$d_e$  = Diâmetro externo dos tubos (m)

$d_i$  = Diâmetro interno dos tubos (m)

$L$  = Comprimento dos tubos (m)

$h_i$  = Coeficiente de transferência de calor (W/m<sup>2</sup>K)



## Superfície de irradiação

Superfície de irradiação => área projetada de feixes tubulares ou das paredes d'água visíveis às chamas.

$$S_i = f_p \cdot S_{ip}$$

$f_p$  = Fator de correção       $S_{ip}$  = Superfície projetada (m<sup>2</sup>)

Valores convencionais (depende do espaçamento entre tubos)

$f_p = 1,0$  ( $s = d_e$ )       $f_p = 0,9$  ( $s = 2 d_e$ )

$d_e$  = Diâmetro externo dos tubos (m)

$s$  = Espaçamento entre tubos (m)



## Convecção externa em feixes tubulares

$$Nu = 0,30 \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot Re^m \cdot Pr^{1/3}$$

$f_1$  = Fator corr. => número de fileiras de tubos (figura)

$f_2$  = Fator corr. => arranjo de fileiras de tubos (tabela)

$m$  = Expoente => arranjo e espaçamento dos tubos (tabela)

Válido para  $Pr > 0,7$  e  $2000 < Re < 40000$ .

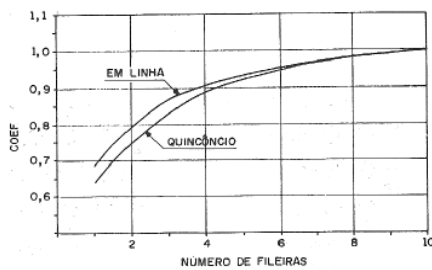
Propriedades tomadas à temperatura de filme, entre  $T_g$  (temperatura dos gases) e  $T_p$  (temperatura da parede).

Número de Reynolds ( $Re$ ) baseada na velocidade correspondente à área mínima de escoamento.



## Fatores de Correção $f_1$ e $f_2$

$f_1$



Fator de correção  $f_1$ , como função do número de fileiras de tubos

$f_2$

$\frac{s_p}{d_e}$	$st/d_e$					
	1,5		2,0		3,0	
	$f_2$	$m$	$f_2$	$m$	$f_2$	$m$
Em linha:						
1,5	0,94	0,62	0,30	0,70	0,26	0,74
2,0	1,13	0,60	0,86	0,63	0,75	0,65
3,0	1,34	0,58	1,41	0,58	1,08	0,61
Quincôncio:						
1,5	1,73	0,56	1,70	0,57	1,84	0,57
2,0	1,57	0,57	1,82	0,56	1,69	0,57
3,0	1,34	0,58	1,66	0,56	1,59	0,57

$s_p$  = Espaçamento paralelo ao fluxo  
 $st$  = Espaçamento transversal ao fluxo





## Radiação gasosa em feixes tubulares

- A radiação gasosa torna-se mais importante quanto maior a temperatura e a concentração de dióxido de carbono e vapor d'água nos gases de combustão.
- Dióxido de enxofre e demais gases, não tem participação significativa na troca térmica.
- Paredes d'água e feixes tubulares se apresentam sempre sujos e cobertos de fuligem, aproximando-se da condição de corpo negro.



## Radiação gasosa em feixes tubulares

$$\dot{q}_g = \sigma \cdot A \cdot f (\epsilon_g \cdot T^4 - \alpha_g \cdot T_p^4)$$

$q_g$  = Calor trocado por radiação gasosa (W)

$A$  = Área de troca de calor ( $m^2$ )

$f$  = Fator de correção para invólucros cinzas

$f = 1$  para corpo negro

$f = (\epsilon_p + 1)/2$  para invólucros cinzas com  $\epsilon > 0,8$

$\epsilon_p$  = Emissividade da parede

$\epsilon_g$  = Emissividade do gás (avaliado em  $T$ ).

$\alpha_g$  = Absortividade do gás para radiação proveniente do invólucro negro em  $T_p$ .



## Emissividade dos gases

- Os valores de emissividade dos gases dependem da pressão de mistura, pressão parcial do gás, temperaturas envolvidas e espessura efetiva da camada gasosa.
- As pressões parciais do dióxido de carbono ( $p_c$ ) e do vapor d'água ( $p_w$ ) são calculadas multiplicando-se o percentual em volume dos gases pela pressão total de mistura.
- A espessura efetiva da camada gasosa depende da geometria do invólucro (tabela).



## Espessura efetiva de camada gasosa

Para valores de  $L_e$  não indicados na tabela, sugere-se adotar a equação:

$$L_e = 0,85 \cdot \frac{4 \cdot V}{A}$$

$L_e$  = Espessura efetiva de camada gasosa (m)

$V$  = Volume total do gás ( $m^3$ )

$A$  = Área superficial em contato com o gás ( $m^2$ )



## Espessura efetiva de camada gasosa ( $L_e$ )

Geometria	$L_e$ (m)
Planos paralelos, infinitos, separados por uma camada de gases de espessura $L$	$1,80.L$
Cilindro infinito de diâmetro $d$	$0,95.d$
Cilindro de altura igual ao diâmetro $d$	$0,60.d$
Cubo de aresta $L$	$0,60.L$
Paralelepípedo de base quadrada $L$ e de altura igual a $4.L$	$0,81.L$
Paralelepípedo de base retangular $L \times 2L$ e altura igual a $6L$	$1,20.L$
Feixe tubular infinito em triângulo equilátero(*) de espaçamento $st = 2.d$	$3,0.(st-d)$
Feixe tubular infinito em triângulo equilátero(*) de espaçamento $st = 3.d$	$3,8.(st-d)$
Feixe tubular infinito em quadrado(*) de espaçamento $st = sp = 2.d$	$3,5.(st-d)$

(\*) Radiação correspondente um único tubo de diâmetro  $d$



## Emissividade do gás

$$\epsilon_g = f_c \epsilon_c + f_w \epsilon_w - \Delta \epsilon$$

$\epsilon_c$  = Emissividade do  $\text{CO}_2$  (função de  $T$  e  $p_c \cdot L_e$ )

$\epsilon_w$  = Emissividade do  $\text{H}_2\text{O}$  (função de  $T$  e  $p_w \cdot L_e$ )

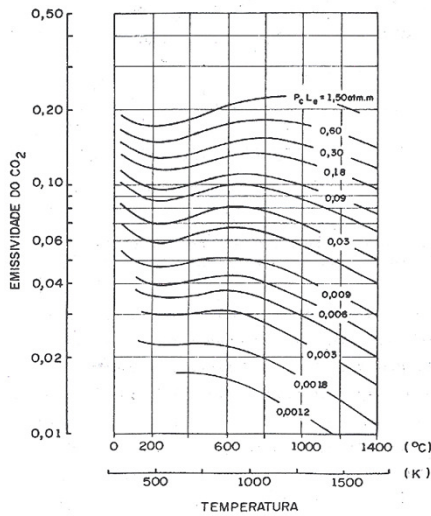
$f_c$  = Fator de correção de  $\epsilon_c$   $p$ / a pressão desejada

$f_w$  = Fator de correção de  $\epsilon_w$   $p$ / a pressão desejada

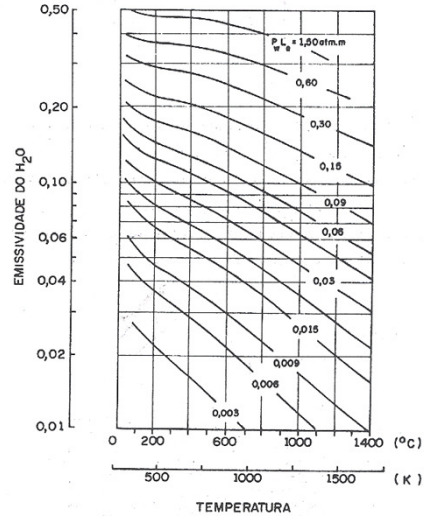
$\Delta \epsilon$  = Correção devido a presença simultânea de gases de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , na temperatura absoluta  $T$



## Emissividade – CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O



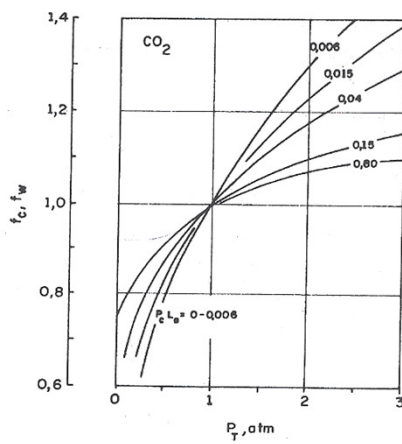
Transferência de Calor na Caldeira



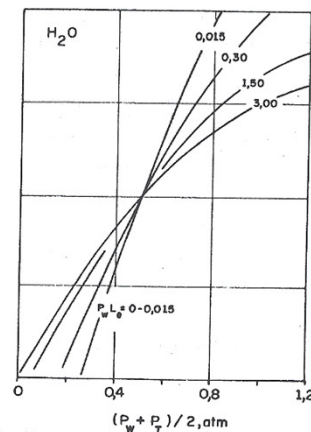
Jurandir Itizo Yanagihara



## Fator de correção para as emissividades



(a) CO<sub>2</sub>



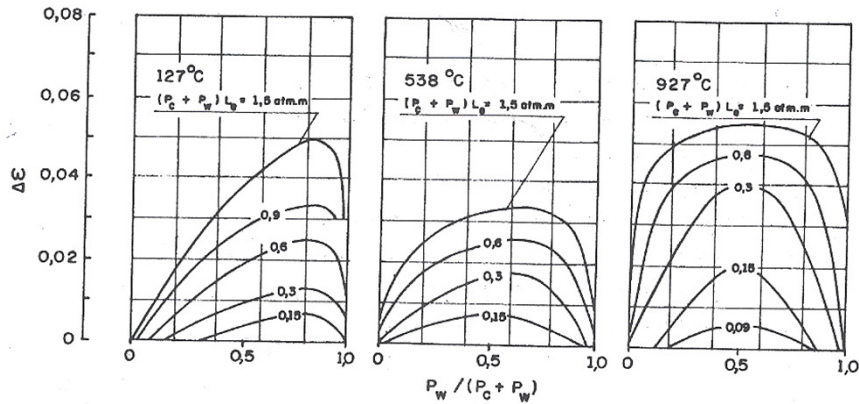
(b) H<sub>2</sub>O

Transferência de Calor na Caldeira

Jurandir Itizo Yanagihara



## Correção da emissividade $\Delta\epsilon$



Transferência de Calor na Caldeira

Jurandir Itizo Yanagihara



## Absortividade do gás

$$a_g = f_c \epsilon_c \left[ \frac{T}{T_p} \right]^{0,65} + f_w \epsilon_w \left[ \frac{T}{T_p} \right]^{0,45} - \Delta\epsilon$$

$\epsilon_c$  = Emissividade do  $\text{CO}_2$  (função de  $T_p$  e  $p_c \cdot L_e$ )

$\epsilon_w$  = Emissividade do  $\text{H}_2\text{O}$  (função de  $T_p$  e  $p_w \cdot L_e$ )

$\Delta\epsilon$  = Correção devido a presença simultânea de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , na temperatura absoluta  $T_p$

Transferência de Calor na Caldeira

Jurandir Itizo Yanagihara