

8,5
(oito, cinco)

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE UM PRÉ-AQUECEDOR COM FLUXO
EM CONTRA CORRENTE E OUTRO COM FLUXO EQUICORRENTE

Autor: Carlos Keiske Uemi

Orientador: Prof. Eng. Hildo Pera

1988

ÍNDICE

Conteúdo	Pág.
Introdução.....	2
Justificativa do Projeto.....	2
Dados de Projeto.....	3
Dimensionamento do Pré-aquecedor.....	5
Instalação Típica de um Pré-aquecedor.....	16
Exemplo de uma estrutura de um Pré-aquecedor.....	17
Exemplo de uma estação de controle.....	18
Bibliografia.....	19

INTRODUÇÃO

O pré-aquecedor de ar é um componente da caldeira que se localiza num estágio antes de os gases de combustão serem eliminados pela chaminé. Eventualmente pode existir um equipamento para limpeza dos gases após o pré-aquecedor, o que hoje em dia está se tornando necessário, pois a preocupação com a qualidade dos gases liberados para a atmosfera vem aumentando.

A função do pré-aquecedor é aquecer o ar de combustão para a seguir introduzi-lo na fornalha. Este aquecimento é feito através da troca de calor dos gases de combustão e o ar que é forçado a passar pelo pré-aquecedor através de um ventilador.

Neste trabalho faremos um estudo comparativo entre dois pré-aquecedores de concepções diferentes: um com fluxo em contra corrente e outro com fluxo equicorrente.

JUSTIFICATIVA DO PROJETO

O dimensionamento correto do pré-aquecedor de ar pode melhorar em até 9% o rendimento de uma caldeira, o que hoje em dia é bastante significativo em termos de economia de combustível.

Por esse motivo o pré-aquecedor de ar, apesar de não ser a parte mais importante da caldeira, deve ser estudado a parte, a fim de obtermos um projeto de caldeira que, quando executado, forneça um performance de alto grau de rendimento.

DADOS DE PROJETO

O pré-aquecedor de ar será projetado em função do seguinte cálculo térmico:

_Projeto de uma caldeira para queimar óleo BPFA(1A) para alcançar as seguintes performances:

- Vazão de vapor $D=4500 \text{ kg/h}$;
- Pressão de vapor na saída do superaquecedor... $P=42 \text{ kgf/cm}^2 \text{g}$;
- Temperatura de vapor superaquecido $T_{su}=420^\circ\text{C}$;
- Temperatura da água de alimentação $T_{ag}=130^\circ\text{C}$;
- Temperatura ambiente $T_{amb}=25^\circ\text{C}$;
- Temperatura do ar pré aquecido $T_{prq}=210^\circ\text{C}$;
- Rendimento $N=88\%$.

CONDIÇÕES DE ESTADO

$T(^{\circ}\text{C})$	$P(\text{ata})$	$V(\text{m}^3/\text{kg})$	$h_l(\text{kcal/kg})$	$h_{vs}(\text{kcal/kg})$	$h_{sup}(\text{kcal/kg})$
130.0	2,75	0.98730	130.4	-x-	-x-
256.2	45	0.04495	266.5	668.2	-x-
20.0	43	0.07192	-x-	-x-	777.8

CONDIÇÕES DE VAPOR

$$Q_{vt} = Q_s + Q_{su}$$

$$Q_{vt} = D(h_{vs} - h_l) + D(h_{sup} - h_{vs})$$

$$Q_{vt} = 45000(777.8 - 130.4)$$

$$Q_{vt} = 29133000 \text{ kcal/h.}$$

CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

$$PCI = 9698 \text{ kcal/kg}$$

$$B = \frac{Q_{vt}}{PCI \times N} = \frac{29133000}{9698 \times 0.88} = 3413.66 \text{ kg/h}$$

VOLUME DOS FLUIDOS GASOSOS

Para combustível líquido:

$$V_{art} = \frac{0.85 \times PCI}{1000} + 2 = 10.24 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{gt} = \frac{0.88 \times PCI}{1000} = 10.76 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{arR} = m \times V_{art} = 1.1 \times 10.24 = 11.26 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

$$V_{gR} = V_{gt} + (m-1) \times V_{art} = 11.78 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

VAZÃO DE AR

$$V_{ar} = B \times V_{arR} = 38437.8 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

VAZÃO DE GÁS

$$V_{gás} = B \times V_{gR} = 40212.9 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

DADOS DE PROJETO DO PRÉ-AQUECEDOR

Vazão de gás $V_g = 40212.9 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

Temperatura de entrada do gás $T = 310 \text{ }^\circ\text{C}$

Vazão de ar $V_a = 38437.8 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

Temperatura de entrada do ar $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura de saída do ar $T_s = 210 \text{ }^\circ\text{C}$

CÁLCULO DA TEMPERATURA DE SAÍDA DOS GASES

$$V_a \times C_{par} \times (T_s - T_a) = V_g \times C_{pgás} \times (T - T_g)$$

$$38437.8 \times 0.31 \times (210 - 25) = 40212.9 \times 0.33 \times (310 - T_g)$$

$$T_g = 143.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

DIMENSIONAMENTO DO PRÉ-AQUECEDOR

COMPOSIÇÃO DO COMBUSTÍVEL LÍQUIDO

-Carbono.....C = 87.27%

-Hidrogênio..... H_2 = 4.26%

-Oxigênio..... O_2 = 3.31%

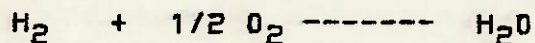
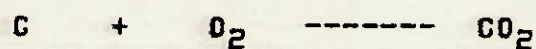
-Nitrogênio..... N_2 = 0.80%

-Enxofre.....S = 0.83%

-Umidade.....W = 2.50%

-Cinzas.....Z = 1.03%

REAÇÕES DE COMBUSTÃO



Cálculo estequiométrico

C	+	O ₂	-----	CO ₂
12,01		32		44,01
0		22,39		22,26

_ 2,664 kg de O₂/kg de C

_ 1,864 Nm³ de O₂/kg de C

_ 1,8535 Nm³ de CO₂/kg de C

H ₂	+	1/2 O ₂	-----	H ₂ O
2,016		16		18,016
22,43		11,195		22,4

_ 7,94 kg de O₂/kg de H₂

_ 5,56 Nm³ de O₂/kg de H₂

_ 11,11 Nm³ de H₂O/kg de H₂

S	+	O ₂	-----	SO ₂
32,06		32		64,06
0		22,39		21,89

_ 0,998 kg de O₂/kg de S

_ 0.697 Nm³ de O₂/kg de S

_ 0.683 Nm³ de SO₂/kg de S

QUANTIDADE GASTA DE OXIGÊNIO PARA A COMBUSTÃO COMPLETA DO
COMBUSTÍVEL

_ Quantidade de combustível --- 3413,66 kg/h

Portanto:

$$C \text{ ----- } 3413,66 \times 0,8727 \times 1,864 = 5553,04 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$H_2 \text{ ----- } 3413,66 \times 0,0426 \times 5,560 = 808,55 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$S \text{ ----- } 3413,66 \times 0,0083 \times 0,697 = 19,75 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

OXIGÊNIO CONTIDO NO COMBUSTÍVEL

$$O_2 \text{ ----- } 3413,66 \times 0,0331 = 112,99 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\text{Logo a quantidade de oxigênio} = 6494,33 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

CÁLCULO DA QUANTIDADE DE OXIGÊNIO INTRODUZIDO NA CALDEIRA

$$\text{Volume de ar} = 38437,8 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\text{Porcentagem de } O_2 = 21\%$$

$$\text{Portanto a quantidade de } O_2 = 0,21 \times 38437,8 = 8071,94 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\text{Excesso de ar} = 8071,94 - 6494,33 = 1577,6 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

CÁLCULO DO VOLUME DE CO_2

$$V_{CO_2} = B \times 1,8535 \times 0,8727 = 5521,7 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

CÁLCULO DO VOLUME DE H_2O

$$V_{H_2O} = B \times W + B \times 11,11 \times 0,0426 = 1700,98 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

CÁLCULO DO VOLUME DE N_2

$$V_{N_2} = 0,79 \times V_{ar} + 8 \times 0,008 = 30365,86 + 27,31 = 30393,2 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

CÁLCULO DO VOLUME DE SO_2

$$V_{SO_2} = 8 \times 0,0083 \times 0,683 = 19,35 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Destas informações podemos calcular a composição dos gases:

CO_2	-----	13,73 %
N_2	-----	75,58 %
O_2	-----	3,92 %
H_2O	-----	4,23 %
SO_2	-----	0,05 %
OUTROS	-----	2,49 %

DIMENSIONAMENTO

Propriedades do ar a 25°C

$$\rho = 1,1774 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,983 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$$

$$u = 1,684 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 0,02624 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 0,2216 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,708$$

$$d = 0,0508 \text{ m}$$

$$v = 10 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} = \frac{1,1774 \times 10 \times 0,0508}{1,983 \times 10^{-5}} = 30162$$

Reg. turb.

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} \quad h = \frac{Nu \cdot k}{d}$$

$$Nu = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,4}$$

$$Nu = 76,79$$

$$\text{Portanto } h = \frac{87,52 \times 0,02624}{0,0508} = 39,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Dimensões do tubo

$$\text{— Diâmetro interno do tubo ————— } D_{int} = 50,8 \text{ mm}$$

$$\text{— Diâmetro externo do tubo ————— } D_{ext} = 54,6 \text{ mm}$$

Como queremos uma velocidade de 10 m/s temos:

$$S = \frac{\text{Vazão}}{\text{Velocidade}} = \frac{38437,8 \text{ m}^3/\text{h}}{10 \text{ m/s} \times 3600}$$

$$S = 1,068 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{cada tubo}} = \frac{\pi \times 0,0508^2}{4} = 0,00203 \text{ m}^2$$

Portanto o número total de tubos :

$$N_{\text{total tubos}} = \frac{1,068}{0,00203} = 527 \text{ tubos} \quad \begin{array}{l} \text{Alterado para} \\ 532 \text{ tubos} \end{array}$$

PROPRIDADES DO GÁS A TEMPERATURA DE PELÍCULA

Temperatura de película

$$T_p = \frac{310 + 143,9}{2} = 226.95 = 500 \text{ K}$$

$$\rho = 0,1373 \times 1,0732 + 0,7558 \times 0,6824 + 0,0392 \times 0,7801 + 0,0423 \times 0,4405 = 0,71 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 0,1373 \times 0,03352 + 0,7558 \times 0,03984 + 0,0392 \times 38,34 \times 10^{-6} + 0,0423 \times 0,0339 = 0,0378 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\nu = 0,1373 \times 21,67 \times 10^{-6} + 0,7558 \times 37,66 \times 10^{-6} + 0,0392 \times 38,34 \times 10^{-6} + 0,0423 \times 1,152 \times 10^{-6} = 32,95 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,1373 \times 0,702 + 0,7558 \times 0,684 + 0,0392 \times 0,697 + 0,0423 \times 0,996 = 0,683$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{10 \times 0,0546}{32,95 \times 10^{-6}} = 16570$$

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} \quad h = \frac{Nu \cdot k}{d}$$

$$S_p = \text{Espaçamento transversal} = 68.25 \text{ mm}$$

$$S_n = \text{Espaçamento longitudinal} = 75 \text{ mm}$$

$$\frac{S_p}{d} = \frac{68,25}{54,6} = 1,25 \quad ; \quad \frac{S_n}{d} = \frac{75}{54,6} = 1,37$$

Destes dados obtemos os seguintes parâmetros:

$$C = 0,345 \quad ; \quad n = 0,6$$

$$Nu = C \times Re^n \times Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0,345 \times 16570^{0,6} \times 0,683^{1/3} = 103,47$$

$$h = \frac{103,47 \times 0,0378}{0,0546} = 71,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Coefficiente global de transferência de calor

U = Coeficiente global de transferência de calor

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \times \ln(r_e/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{A_i}{A_e \times h_e}}$$

$$- h_i = 39,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$- h_e = 71,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$- d = 0,0508 \text{ m}$$

$$U = 16,76 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

CÁLCULO DA ÁREA DE TROCA DE CALOR

Fluxo em contra-corrente

Temos que:

$$q = U \times A \times \text{LMTD}$$

$$\text{LMTD} = \frac{(T_{ge} - T_{as}) - (T_{gs} - T_{ae})}{\ln[(T_{ge} - T_{as}) / (T_{gs} - T_{ae})]}$$

$$T_{ge} = 310^{\circ}\text{C} \quad ; \quad T_{as} = 210^{\circ}\text{C}$$

$$T_{gs} = 143,9^{\circ}\text{C} \quad ; \quad T_{ae} = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\text{LMTD} = \frac{100 - 118,9}{\ln(100/118,9)} = 109,18^{\circ}\text{C}$$

$$q = 38437,8 \times 0,31 \times (210 - 25) = 2204407 \text{ kcal/h} =$$

$$q = 2564461 \text{ W}$$

$$A = \frac{q}{U \times \text{LMTD}} = \frac{2564461}{16,76 \times 109,18} = 1401,45 \text{ m}^2$$

NOTA: Como a temperatura de saída dos gases é menor que a temperatura de saída dos gases, a construção do pré-aquecedor em paralelo não apresentará as condições especificadas no projeto. Para que possamos efetivamente comparar os dois pré-aquecedores, mudaremos as condições de projeto.

Para a nova condição de projeto adotaremos uma modificação nas condições de entrada do ar na fornalha, ou seja, na temperatura do ar pré-aquecido.

Nova condição de projeto:

Temperatura de entrada dos gases $T_{ge} = 310^{\circ}\text{C}$

Temperatura de saída do ar $T_{as} = 150^{\circ}\text{C}$

Temperatura de entrada do ar $T_{ae} = 25^{\circ}\text{C}$

Cálculo da temperatura de saída dos gases.

$$m_{ar} \times C_{p_{ar}} \times (T_{as} - T_{ae}) = m_{gás} \times C_{p_{gás}} \times (T_{ge} - T_{gs})$$

$$38437,8 \times 0,31 \times (150 - 25) = 40212,9 \times 0,33 \times (310 - T_{gs})$$

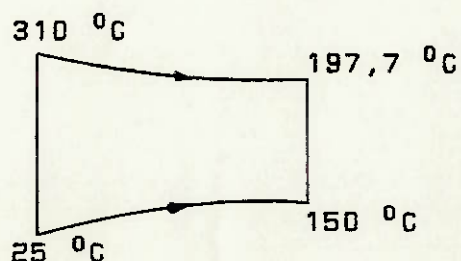
$$T_{gs} = 197,7^{\circ}\text{C}$$

Temperatura de película do gás

$$T_p = \frac{310 + 197,7}{2} = 253,8^{\circ}\text{C}$$

A temperatura de película não variou muito em relação aos cálculo anterior. Essa variação de temperatura não altera significamente as propriedades dos gases. Por isso utilizaremos as mesmas propriedades utilizadas anteriormente.

Fluxo em paralelo



$$LMTD = \frac{(310 - 25) - (197,7 - 150)}{\ln[(310 - 25)/(197,7 - 150)]} = 132,75 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

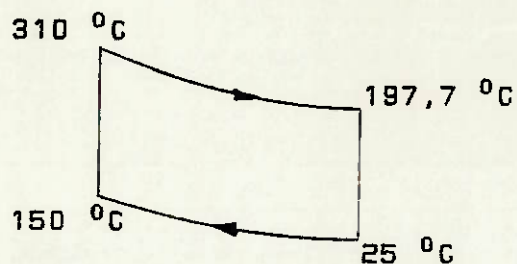
$$q = 38437,8 \times 0,31 \times (150 - 25) = 1489465 \text{ kcal/h}$$

$$q = 1732745 \text{ W}$$

Cálculo da área de troca de calor

$$A = \frac{q}{U \times LMTD} = \frac{1732745}{16,76 \times 132,75} = 778,8 \text{ m}^2$$

Fluxo em contra-corrente



$$LMTD = \frac{(310 - 150) - (197,7 - 25)}{\ln[(310 - 150)/(197,7 - 25)]} = 166,27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$A = \frac{1732745}{16,76 \times 166,27} = 621,79 \text{ m}^2$$

A partir dos cálculos podemos concluir que os pré-aquecedores de concepção em contra corrente apresentam melhor performance que os de concepção em paralelo.

Para concluir o trabalho mostraremos uma instalação típica de um pré-aquecedor, uma estação de controle e uma estrutura de um pré-aquecedor.

INSTALAÇÃO TÍPICA DE UM PRÉ-AQUECEDOR

