

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

P M C 5 8 1

PROJETO MECÂNICO II

Ano : 1991

" PROJETO DE COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO "
(Parte 2)

Orientador :
Prof. dr. Hildo Pera

Aluno :
Humberto Mauro dos Santos Marchi

USP :
6278156

Aos meus pais ,
que me possibilitaram
concluir este curso.

'A minha avó' Antonieta,
(in memoriam), por tudo que
fez por mim , ao longo de minha vida.

ÍNDICE

- Apresentação.....	i
- Introdução.....	ii
- Parâmetros do combustor.....	1
- 1) Determinação do Poder Calorífico do Carvão Mineral.....	2
- 2) Determinação dos Volumes dos Fluidos.....	3
- 3) Velocidade Mínima de Fluidização.....	8
- 4) Perda de Carga no Leito Fluidizado.....	13
- 5) Transferência de Calor.....	14
- 6) Dimensionamento do Ciclone.....	24
- 7) Determinação da Quantidade de Areia para Partir o Leito.....	28
- 8) Perda de Carga Total.....	29
- 9) Controle das Cinzas.....	32
- 10) Emissão de Poluentes.....	33
- 11) Alimentação e Partida.....	34
- 12) Instrumentação e Partida.....	35
- 13) Considerações Finais.....	36
- 14) Referências Bibliográficas.....	37

Apresentação

O presente trabalho de graduação compõe-se de duas partes, tendo sido a primeira delas atribuída ao colega engenheiro Sidney Fujita Ido e consistindo do tratamento teórico do leito fluidizado. A segunda parte, que aqui apresentamos, se constitui no dimensionamento e projeto de uma fornalha operando com leito fluidizado.

A orientação deste trabalho esteve a cargo do professor dr. Hildo Pera, do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP.

No primeiro semestre de 1991 o prof. Pera, que nos ministrava na época a disciplina PMC 550 (Instalações Motoras a Vapor e Geradores de Vapor), propôs-nos o supra citado tema para ser desenvolvido ao longo de dois semestres como trabalho de graduação para as disciplinas PMC 580 e PMC 581 (Projeto Mecânico I e II). Valendo-nos dos conhecimentos adquiridos em PMC 550, das referências bibliográficas indicadas por nosso orientador, bem como de sua vasta experiência no assunto, como subsídios, nos foi possível levar adiante a elaboração deste projeto.

Introdução:

Há um consenso geral de que antes do final deste século a demanda mundial de óleo e gás deverá superar os suprimentos. Com a produção desses combustíveis atingindo o máximo a medida em que se esgotam as reservas e devido ao aumento de preços, o carvão tende a voltar a ocupar sua antiga posição dominante.

Em caldeiras alimentadas por combustíveis pulverizados, há a queima de carvão moído em finas partículas numa corrente de ar numa câmara de combustão. A temperatura de combustão é elevada e é necessária uma grande câmara de combustão para permitir que o calor seja transferido aos tubos geradores de vapor.

A combustão de carvão em leito fluidizado oferece as seguintes vantagens:

a) Uma vasta gama de tipos de carvão podem ser queimados de forma eficiente e com alto grau de brandura na queima;

b) Sistemas automáticos de manuseio do carvão e de cinzas podem ser incorporados, tornando a instalação fácil de se operar (quando comparadas com instalações alimentadas por gás e por óleo;

c) Sistemas de controle empregando microprocessadores e equipamento de ignição automática fornecem um excelente controle com um mínimo de supervisão manual;

d) A ausência de partes móveis na zona de combustão resulta num alto grau de confiabilidade e baixos custos de manutenção;

e) Inspeções de rotina são pouco freqüentes e é mantida uma alta eficiência por longos períodos;

f) Emissões de enxofre para a atmosfera podem ser reduzidas, com um mínimo custo e com pouca perda de eficiência, pela adição de pedra calcária ou dolomita ao leito fluidizado;

g) Uma vasta gama de rejeitos industriais podem ser queimados numa instalação de leito fluidizado alimentada a carvão, poupando o custo de dispositivos de separação e contribuindo para eficiência energética;

h) Um combustor de leito fluidizado pode atender a demandas variáveis de calor mais facilmente que sistemas alimentados por grelhas. Isso o torna mais adequado para aplicações como aquecedores de fluido térmico, exigindo rápidas taxas de resposta;

i) Operando o leito fluidizado a altas pressões, ele pode ser usado para gerar gases pressurizados quentes para acionar uma turbina. Isso pode ser combinado com uma turbina a vapor convencional para aumentar a eficiência da geração de eletricidade, obtendo-se uma economia potencial de combustível de pelo menos 4 %.

A fornalha a ser projetada deverá queimar, pelo processo de combustão em leito fluidizado, um consumo de combustível de 240 kg / h de carvão mineral nacional de procedência da Mina do Leão, em Butiá, no Rio Grande do Sul.

O combustor deverá ser construído na forma de um prisma reto de seção quadrada de aproximadamente $0,05 \text{ m}^2$, com estrutura de perfilado e chapa de revestimento. Adotaremos, como revestimento interno da fornalha, uma camada de tijolo refratário, uma camada de tijolo comum e uma camada de lã de rocha. Trabalharemos com uma altura de cerca de 1,80 m para o combustor, enquanto que o leito fluidizado deve chegar a uma altura em torno de 0,80 m.

Usaremos um exaustor para realizar a saída dos gases gerados a partir da combustão e um ciclone, antes dele, onde serão recolhidas as partículas sólidas provenientes do combustor para posterior análise.

1-3) Determinação do Poder Calorífico (inferior e superior) do Carvão Mineral.

Determinaremos o poder calorífico do carvão mineral, analiticamente, a partir da composição elementar do mesmo e do calor de combustão dos elementos ou compostos gasosos.

O cálculo do poder calorífico inferior será feito utilizando a fórmula de Dulong :

$$PCI = 8100 * c + 29000 * (h - o / 8) + 2500 * s - 800 * w$$

Utilizando os dados fornecidos pela referência [14] para a análise imediata da composição química do carvão da Mina do Leão :

c = 30,50 % : teor de carbono fixo b.s.

h = 4,96 % : teor de hidrogênio

o = 15,06 % : teor de oxigênio

s = 1,70 % : teor de enxofre

w = 10,90 % : teor de umidade

Efetuando o cálculo, encontraremos:

$$PCI = 8100 * 0,305 + 29000 * (0,0496 - 0,1506 / 8) + 2500 * 0,017 - 800 * 0,109$$

$$PCI \cong 3340,075 \text{ Kcal / Kg}$$

O poder calorífico superior é definido como :

$$PCS = PCI + (9 \times h + w) \times 800$$

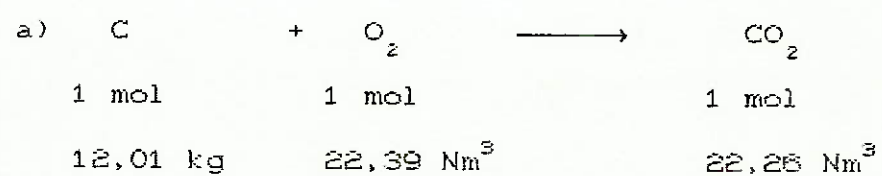
$$PCS = 3340,075 + (9 \times 0,0496 + 0,109) \times 800$$

$$PCS \cong 3673,315 \text{ kcal/Kg}$$

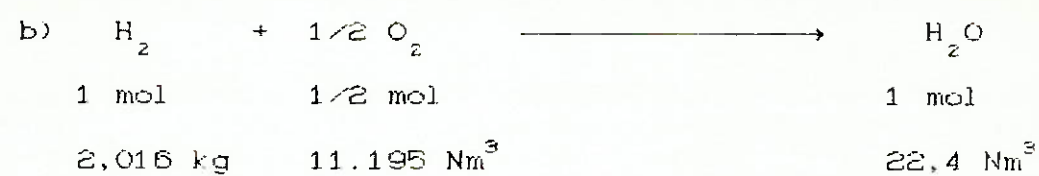
2-) Determinação dos volumes dos fluidos

Reações de Combustão

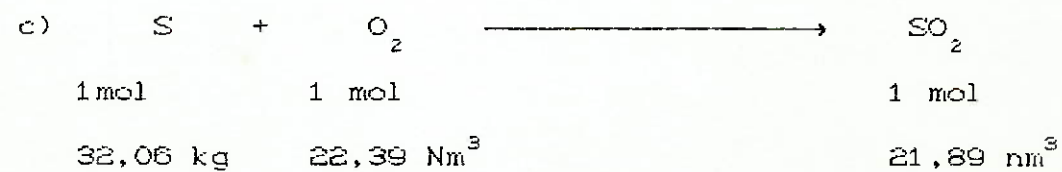
Na combustão de combustíveis sólidos, como é o caso do carvão mineral, ocorrem basicamente as reações de oxidação do enxofre, hidrogênio e de carbono, que pode ser completa ou parcial. Na queima do carvão em leito fluidizado, podemos admitir que ocorra combustão completa do carbono. Assim, temos as seguintes equações:



então 1 kg de carbono exige ($22,39 / 12,01$) = 1,864 Nm³ de oxigénio e produz ($22,26 / 12,01$) = 1,856 Nm³ de dióxido de carbono.



então 1 kg de hidrogénio requer ($11,195 / 2,016$) = 5,56 Nm³ de oxigénio e produz ($22,4 / 2,016$) = 11,11 Nm³ de vapor d'água



então 1 kg de enxofre requer ($22,39 / 32,06$) = 0,697 Nm³ de oxigénio e produz ($21,89 / 32,06$) = 0,683 Nm³ de dióxido de enxofre.

Utilizaremos a seguinte expressão para o cálculo do volume de oxigênio teórico (estequiométrico) necessário na combustão :

$$V_{O_2}^t = 1,864 * c + 5,56 * (h - o / 8) + 0,697 * s$$

onde c, h, o e s são as porcentagens de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre no combustível. Para o carvão da Mina do Leão essa composição pode ser adotada como:

$$c = 30,5 \%$$

$$h = 4,96 \%$$

$$o = 15,06 \%$$

$$s = 1,70 \%$$

Considerando como 21 % o teor de oxigênio no ar teórico, podemos calcular o volume de ar teórico para a combustão da seguinte forma:

$$V_{ar}^t = V_{O_2}^t / 0,21 = 8,876 * c + 26,443 * (h - o / 8) + 3,322 * s$$

$$V_{ar}^t = 8,876 * 0,305 + 26,443 * (0,0496 - 0,1506 / 8) + 3,322 * 0,017$$

$$V_{ar}^t = 3,577 \text{ Nm}^3 / \text{kg de combustível}$$

Tendo em vista o fato de que não se consegue assegurar uma combustão completa apenas com suprimento de ar teoricamente necessário, já que fatores como a granulometria do combustível, seu estado de divisão, o aparelho de combustão, intervêm no processo de queima, devemos abastecer o combustor com um excesso de ar (m) correspondente à relação :

$$m = V_{ar}^r / V_{ar}^t$$

Esse excesso de ar gera um aumento considerável das perdas de calor sensível dos gases de combustão lançados na atmosfera, razão pela qual devemos reduzir o máximo possível o valor de m .

A influência desse excesso de ar (m) na temperatura adiabática de combustão se dá de forma que quanto maior for o excesso m , menor a temperatura adiabática.

Adotaremos para o excesso de ar o valor $m = 1,15$, adequado para carvão moído utilizado em fornalha ciclônica, segundo referência [1].

Obtemos assim o volume de ar real necessário:

$$V_{ar}^r = m * V_{ar}^t = 1,15 * 3,577$$

$$V_{ar}^r = 4,114 \text{ Nm}^3 / \text{kg de combustível}$$

A fim de determinarmos o valor do volume teórico dos gases por quilograma de combustível, faremos uso da seguinte fórmula :

$$V_g^t = 1,8535 * c + 0,683 * s + 0,8 * n + (9 * h + w) * 1,24 + 0,79 * V_{ar}^t$$

onde n é a percentagem de nitrogénio no combustível que, no caso, vale 1,44 %.

Efetuando os cálculos, temos:

$$V_g^t = 1,8535 * 0,305 + 0,683 * 0,017 + 0,8 * 0,0144 + (9 * 0,0496 + 0,109) * 1,24 + 3,577$$

$$V_g^t = 4,854 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$$

Com o excesso de ar m, o volume real dos gases se obtém por :

$$V_g^r = V_g^t + (m - 1) * V_{ar}^t$$

$$V_g^r = 4,854 + (1,15 - 1) * 3,577$$

$$V_g^r = 5,391 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$$

3-3) Velocidade Mínima de Fluidização

Conceituamos a velocidade mínima de fluidização como sendo aquela para a qual a perda de carga do fluido através do leito se iguala ao peso do sólido por unidade de área da secção transversal do leito.

De acordo com a referência [8], a velocidade mínima de fluidização pode ser calculada pela seguinte expressão :

$$v_f = 1,58 \cdot 10^{-4} \times \frac{\phi_e^{1,82}}{\nu^{0,81}} \times \frac{(\gamma_M - \gamma_m^{0,94})}{\gamma_m} \quad (m / s)$$

onde :

ϕ_e = diâmetro médio equivalente das partículas do leito

ν = viscosidade cinemática do ar (m^2 / s)

γ_m = peso específico do meio (kgf / m^3)

γ_M = peso específico das partículas (kgf / m^3)

Temos que :

$$\nu = \mu / \rho$$

μ = viscosidade dinâmica do ar ($1,97 \cdot 10^{-5} kg / s . m$)

ρ = massa específica do ar ($1,12 kg / m^3$) $\cong \gamma_m$

Assim, obtemos $\nu = 1,76 \cdot 10^{-5} m^2 / s$ para o ar em condições aproximadamente iguais às do leito.

Sabemos que quanto maior o tamanho das partículas do combustível, menor será a elutriação, ressaltando, porém, que partículas muito grandes exigiriam uma velocidade de fluidização muito alta, o que tornaria a fluidização impraticável. É aconselhável o uso de partículas de 6 a 25 mm.

Utilizaremos então carvão britado com tamanho máximo de $1/4"$ ($\phi_c = 6,4 \text{ mm}$).

Vamos admitir, sem entrar em detalhes quanto às proporções dos silicatos e outros minerais, que o peso específico da areia e o diâmetro médio de seus grãos serão, respectivamente :

$$\gamma_a = 2200 \text{ kgf} / \text{m}^3$$

$$\phi_a = 1,5 \text{ mm}$$

Adotando para o material do leito uma mistura de 25 % de carvão e 75 % de areia, podemos calcular o peso específico médio e o diâmetro médio das partículas do leito :

$$\gamma_M = 0,25 * \gamma_c + 0,75 * \gamma_a$$

onde:

γ_c = peso específico do carvão da Mina do Leão.

De acordo com a referência [13], temos que o teor de cinzas do carvão da mina supra referida é de cerca de 47 %. De posse de tal valor, podemos calcular o peso específico desse combustível por meio da expressão abaixo, extraída de um diagrama que relaciona o teor de cinzas com o peso específico (referência [12]) :

$$\frac{0,01235}{1 \%} * \% \text{ de cinzas} + 1,192 \text{ tf} / \text{m}^3 = \gamma$$

$$\gamma = 1,77245 \text{ tf} / \text{m}^3 = \gamma_c$$

$$\gamma_c = 1772,45 \text{ kgf} / \text{m}^3$$

$$\rho_M = 0,25 \times 1772,45 + 0,75 \times 2200$$

$$\rho_M = 2093,11 \text{ kgf} / \text{m}^3$$

$$\phi_e = 0,25 \times \phi_c + 0,75 \times \phi_a$$

$$\phi_e = 0,25 \times 6,4 + 0,75 \times 1,5$$

$$\phi_e = 2,7 \text{ mm} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Ao substituírmos os valores acima obtidos na expressão da velocidade mínima de fluidização obtemos:

$$v_f = \frac{1,58 \cdot 10^{-4} \times 0,0064^{1,82}}{1,76 \cdot 10^{-5 \times 0,88}} \times \frac{(2093,11 - 1,12^{0,94})}{1,12}$$

$$v_f = 0,458 \text{ m/s}$$

Esse é um valor muito baixo para a velocidade de fluidização, o que nos leva à necessidade de recalcularmos tal grandeza, utilizando, desta vez, a seguinte expressão fornecida pela referência [6]:

$$v_f = \frac{9 \times (\rho_M - \rho_m)^{0,9} \times \phi_e^2 \times \rho_m^{0,1}}{800 \times \mu}$$

Substituindo os valores anteriormente obtidos na fórmula, temos:

$$v_f = \frac{9 * (2093,11 / 9,81 - 1,12)^{0,9} * 0,0064^2 * 1,12^{0,1}}{800 * 1,97.10^{-5}}$$

$$v_f = 2,94 \text{ m / s}$$

Vamos, a seguir, corrigir esse valor de velocidade por um fator de forma ϕ , que leva em conta uma provável não esfericidade das partículas do combustível. A expressão desse fator de forma é dada por :

$$\phi = 0,205 * s / v^{2/3}$$

onde :

s = área externa da partícula

v = volume externo da partícula

Adotaremos, em primeira aproximação, partículas de formato cúbico, visto que o cubo é a figura geométrica regular que melhor modela a forma do carvão britado. Adotaremos $D = \phi_e = 2,7$ mm , como sendo o valor da aresta desse cubo. Temos, então :

$$s = 6 * D^2 = 6 * 2,7^2 = 43,74 \text{ mm}^2$$

$$v = D^3 = 2,7^3 = 19,68 \text{ mm}^3$$

Que resulta:

$$\varphi = 0,205 * \frac{43,74}{19,68^{2/3}} = 1,23$$

Obtemos, para a velocidade corrigida de fluidização, o valor :

$$\gamma_f = v_f * \varphi = 2,94 * 1,23$$

$$\gamma_f = 3,62 \text{ m / s}$$

4-3) Perda de Carga no Leito Fluidizado

A perda de carga no início da fluidização é suficiente para equilibrar os sólidos do leito. À medida em que o leito expande, sua altura aumenta, mas é de se esperar que a perda de carga continue sendo praticamente igual ao peso aparente do sólido por unidade de área de seção transversal. A explicação disso reside no fato de que o atrito entre as partículas e o fluido deverá superar os demais efeitos, como o atrito nas paredes e o aumento da altura do leito. Então, sendo M a massa total do sólido, S a seção transversal total do leito e ΔP a perda de carga quando a altura é H e a porosidade é m devemos ter :

$$M = H * S * (1 - m) (\rho_M - \rho_m)$$

$$\Delta P * S = M * g / g_c$$

portanto :

$$\Delta P * S = g / g_c * H * S * (1 - m) (\rho_M - \rho_m)$$

A expressão acima pode ser aplicada para leitos com relação altura / diâmetro (H / Φ) < 2,6, que é o caso do nosso leito.

Lembrando $\rho_M \cong \gamma_M$ e com os demais parâmetros conhecidos podemos calcular ΔP :

$$\Delta P = g / g_c * H * (1 - m) (\rho_M - \rho_m)$$

$$\Delta P = 9,8 / 9,8 * 0,8 * (1 - 0,45) (2093,11 - 1,12)$$

$$\Delta P = 920,5 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 920,5 \text{ mmCA}$$

5-) Transferência de Calor

O calor total gerado pela queima do carvão no combustor será dissipado através da superfície lateral da câmara e pela troca de calor entre os gases da combustão e o ar atmosférico na saída do combustor.

Sendo:

C_t = consumo específico de combustível = 240 kg / h (dado de projeto)

PCI = poder calorífico inferior = 3340,075 kcal / kg (calculado anteriormente)

O calor total gerado é dado por :

$$Q_t = C_t * PCI$$

$$Q_t = 240 * 3340,075$$

$$Q_t = 801618 \text{ kcal / h}$$

Vamos calcular a dissipação deste calor.

1. Troca de Calor na Região do Leito

$$Q_1 = \alpha_T * A_1 * (\theta - t_{par})$$

onde :

$A_1 = 4 * 0,8 * 0,23 = 0,74 \text{ m}^2$ = área das paredes circunvizinhas ao leito

θ = temperatura do leito = 850°C (adotada)

t_{par} = temperatura das paredes = 800°C (adotada)

Temos que α_T é o coeficiente global de troca de calor entre o leito e as paredes circunvizinhas, que pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\alpha_T = (\alpha_{cond} + \alpha_{conv}) + \alpha_{rad}$$

com :

$$(\alpha_{cond} + \alpha_{conv}) = C_M * \gamma_M * \gamma_n * (1-m) * \left[1 - \exp \left(- \frac{1,2 * \lambda_m}{\delta_{par} * C_M * \gamma_M * \gamma_n * (1-m)^{1/3}} \right) \right]$$

onde:

$C_M \cong 0,3 \text{ kcal} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ = calor específico do combustível

$\gamma_M = 2093,11 \text{ kgf} / \text{m}^3$

$m = 0,45$

$\lambda_m = 0,275 \text{ kcal} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ = calor específico do ar

$\delta_{par} = \phi_e / 3 = 2,7 \cdot 10^{-3} / 3 = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ = espaçamento

entre cada partícula e as paredes vizinhas

γ_n = velocidade de fluidização normal às paredes do leito, cujo cálculo é dado pela expressão (referência [8]) :

$$\left[\frac{1}{t_{par} * 10^{-3}} \right]^3 * \left[\frac{1}{2} * \ln \frac{(t_{par} + \theta)(\theta_{lf} - t_{par})}{(\theta + t_{par})(\theta_{lf} - t_{par})} \right] +$$

$$+ \arctan \frac{\theta}{t_{par}} - \arctan \frac{\theta_{lf}}{t_{par}} = \frac{118,5 * E_1}{C_M * \gamma_M * \gamma_n * (1-m)^{1/3}}$$

Onde temos:

$E_1 = 0,75$ = emissividade do refratário

θ_{lf} = máxima temperatura do leito = 1000°C (adotada)

Calculando o valor de γ_n encontramos :

$$\gamma_n \cong 0,2 \text{ m / s}$$

Com todos os parâmetros determinados temos :

$$(\alpha_{\text{cond}} + \alpha_{\text{conv}}) = 0,3 * 2093,11 * 0,2 * (1 - 0,45) * \left[1 - \exp \left(- \frac{1,2 * 0,275}{0,9 \cdot 10^{-3} * 0,3 * 2093,11 * 0,2 * (1 - 0,45)^{1/3}} \right) \right]$$

$$(\alpha_{\text{cond}} + \alpha_{\text{conv}}) = 67,12 \text{ kcal / h . m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

O coeficiente de radiação é dado por :

$$\alpha_{\text{rad}} = 4,9 * E_1 * \left[\frac{\left(\frac{\theta_{\text{lf}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{par}}}{100} \right)^4}{\theta_{\text{lf}} - t_{\text{par}}} \right]$$

$$\alpha_{\text{rad}} = 4,9 * 0,75 * \left[\frac{(12,73)^4 - (10,73)^4}{1273 - 1073} \right]$$

$$\alpha_{\text{rad}} = 238,9 \text{ kcal / h . m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

O coeficiente global de troca de calor no leito é então dado por :

$$\alpha_T = (\alpha_{\text{cond}} + \alpha_{\text{conv}}) + \alpha_{\text{rad}} = 306,02 \text{ kcal} / \text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

O calor trocado no leito pode agora ser calculado :

$$Q_1 = \alpha_T * A_1 * (\theta - t_{\text{par}})$$

$$Q_1 = 306,02 * 0,74 * (850 - 800)$$

$$Q_1 = 11322,74 \text{ kcal} / \text{h}$$

2- Troca de Calor Entre os Gases e a Superfície

Lateral Acima do Leito

A troca de calor entre os gases da combustão e as paredes é feita por convecção e por radiação.

São relativamente recentes os estudos que permitem a determinação da radiação gasosa . Dados contraditórios, obtidos pela observação prática e pelos cálculos de calor adsorvido nas trocas dos geradores de vapor, levantaram tal problema.

Dos constituintes encontrados nos gases da combustão, apenas o CO_2 e o vapor d'água se apresentam como bons receptores e emissores de calor. Sob o ponto de vista prático, H_2 , N_2 , O_2 e SO_2 são considerados não irradiantes.

Conforme já foi determinado anteriormente :

1 kg de H_2 produz 11,11 Nm^3 de H_2O

1 kg de C produz 1,8535 Nm^3 de CO_2

Então a produção horária será:

$$V_{H_2O} = C_t * h * 11,11 = 240 * 0,0496 * 11,11 = 132,25 \text{ } Nm^3 \text{ } H_2 / h$$

$$V_{CO_2} = C_t * c * 1,8535 = 240 * 0,305 * 1,8535 = 135,68 \text{ } Nm^3 \text{ } CO_2 / h$$

$$\text{Sendo conhecido } V_g^r = 5,391 * 240 = 1293,84 \text{ } Nm^3 / h :$$

$$P_{(H_2O)} = V_{H_2O} / V_g^r = 132,25 / 1293,84 = 0,102$$

$$P_{(CO_2)} = V_{CO_2} / V_g^r = 135,68 / 1293,84 = 0,104$$

Obtemos, através de diagramas (referência [1]), os valores para os coeficientes de troca de calor do CO_2 e H_2O , em função das pressões parciais de CO_2 e H_2O e das temperaturas dos gases e das paredes, assumidas, respectivamente, como sendo 800 °C e 750 °C :

$$\alpha_{H_2O} = 5,5 \text{ kcal } / m^2 \text{ } . h \text{ } . ^\circ C$$

$$\alpha_{CO_2} = 4,3 \text{ kcal } / m^2 \text{ } . h \text{ } . ^\circ C$$

$$\alpha_R = 9,8 \text{ kcal } / m^2 \text{ } . h \text{ } . ^\circ C$$

A expressão abaixo (referência [11]), válida para fluxo interno, forçado e turbulento, permite-nos calcular o coeficiente de troca de calor por convecção :

$$N_{n_m} = \frac{h * D}{K} = 5 + 0,016 * P_e^a * P_r^b$$

onde :

$$P_r = 0,688 \text{ (adotamos o valor para o ar)}$$

$$a = 0,88 - \frac{0,24}{4 + P_r} = 0,83$$

$$b = 0,33 + 0,5 * e^{-0,6 * P_r} = 0,66$$

$$P_e = \frac{D * v}{\nu} = \frac{0,25 * 3,62}{1,76 * 10^{-5}} = 5,142 * 10^4$$

$$K = 0,04 \text{ W / m . } ^\circ\text{C}$$

Podemos, então, calcular:

$$N_{n_m} = 5 + 0,016 * (5,14 * 10^4)^{0,83} * 0,688^{0,66} = 106,63$$

$$N_{n_m} = 106,63 = \frac{h * D}{K}$$

$$N_{n_m} = \frac{h * 0,25}{0,04} = 106,63 \Rightarrow$$

$$h = \frac{106,63 * 0,04}{0,25}$$

$$h = \alpha_c = 17,06 \text{ W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C} = 19,8 \text{ Kcal / h . m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Podemos agora calcular os calores específicos trocados por radiação e convecção Q_R e Q_C . Considerando uma altura de 1 m acima da superfície do leito, teremos uma área lateral:

$$A = 4 \times 0,23 \times 1 = 0,92 \text{ m}^2$$

$$Q_R = \sigma \times A \times (T_g^4 - T_p^4)$$

onde :

$$\sigma = 4,88 \cdot 10^{-8} \text{ kcal} / \text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$T_g = 1123 \text{ K (temperatura dos gases)}$$

$$T_p = 1073 \text{ K (temperatura das paredes)}$$

$$Q_R = 4,88 \cdot 10^{-8} \times 0,92 \times (1123^4 - 1073^4)$$

$$Q_R = 11892,4 \text{ kcal} / \text{h}$$

$$Q_C = (\alpha_R + \alpha_C) \times A \times (t_g - t_p)$$

$$Q_C = (9,8 + 19,8) \times 0,92 \times (850 - 800)$$

$$Q_C = 1359,14 \text{ kcal} / \text{h}$$

Portanto o calor total trocado pelos gases dentro do combustor é :

$$Q_2 = 11892,4 + 1359,1 = 13251,5 \text{ kcal / h}$$

3 - Troca de Calor Entre os Gases e o Ar na Saída do Combustor

Subtraindo Q_1 e Q_2 de Q_t obtemos :

$$Q_3 = Q_t - Q_1 - Q_2$$

$$Q_t = 801618 - 11322,74 - 13251,5$$

$$Q_t = 777043,76 \text{ kcal / h}$$

Deveremos ter a troca desse calor restante com o ar atmosférico que vai se misturar com os gases antes do ciclone, de modo que a temperatura fique por volta de 350 °C no máximo.

Desse modo devemos ter :

$$Q_3 = \dot{m} * C_{p_{ar}} * (t_f - t_i)$$

onde :

$\dot{m}$ = vazão mássica

$C_{p_{ar}} = 0,243 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C}$ (calor específico do ar)

$t_f = 350 \text{ } ^\circ\text{C}$ (temperatura final do ar)

$t_i = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$ (temperatura inicial do ar)

$Q_3 = 777043,76 \text{ kcal / h}$

$$\dot{m} = \frac{777043,76}{0,243 * (350 - 21)}$$

$$\dot{m} = 9719,5 \text{ kg} / \text{h}$$

Transformando essa vazão para m^3 / h , sendo $\rho_{\text{ar}} = 1,12 \text{ kg} / \text{m}^3$, ficamos com :

$$\dot{m} = 9719,5 / 1,12 = 8678,11 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Somando-se essa vazão de ar com a vazão de saída dos gases encontraremos a vazão total que deverá entrar no ciclone :

$$\dot{m}_T = V_g^r + \dot{m}$$

$$\dot{m}_T = 1293,84 + 8678,11$$

$$\dot{m}_T = 9971,95 \text{ m}^3 / \text{h}$$

6-3 Dimensionamento do Ciclone

O ciclone é um dispositivo de construção simples, compacta, operação fácil e de grau de purificação elevado para partículas maiores que $90\ \mu\text{m}$, utilizado na separação de partículas de gases. O tipo mais comum é o ciclone cilíndrico com a parte inferior cônica, que será utilizado por nós.

A entrada dos gases com partículas se dá tangencialmente, realizando várias voltas no corpo e no cone, depositando as partículas e saindo, ainda girando, através do tubo cilíndrico axial.

Sob a ação da força centrífuga, as partículas em suspensão tendem a se concentrar na fina camada de gases junto à parede externa.

O movimento helicoidal descendente dos gases e a descarga de pequena quantidade de gases através da saída de pó tendem a projetar as partículas separadas no depósito.

Faremos, agora, um breve comentário sobre o arrastamento de partículas no leito fluidizado.

O mecanismo de arrastamento pode ser descrito como a soma de dois processos, o primeiro relativo à elutriação de partículas finas e o segundo como resultado do *splashing*, que se caracteriza quando se tem o arraste de partículas muito grandes para serem elutriadas. (maiores que $0,6\ \text{mm}$).

No processo de combustão em leito fluidizado, o material inerte do leito é reduzido em tamanho por atrito, enquanto que o combustível que entra pela alimentação, é continuamente reduzido em tamanho pela ação combinada da combustão e do atrito.

Após essa breve descrição dos princípios básicos de um ciclone, passaremos ao seu dimensionamento, propriamente dito.

Neste trabalho, utilizaremos a tabela de Silverman para obtermos diretamente as medidas de um ciclone do tipo apresentado no desenho anexado a seguir. Os dados da tabela conduzem a seguinte expressão:

$$D_c = 70,9 * V^{0,477}$$

onde :

D_c = diâmetro do ciclone em cm

V = vazão em m^3 / s

As demais dimensões do ciclone são tiradas em função de D_c . A expressão acima foi obtida com uma velocidade de entrada de $15,2 m / s$.

A vazão volumétrica de entrada no ciclone, determinada anteriormente, é :

$$\dot{m}_T = 9971,95 m^3 / h$$

que, em m/s , fica :

$$V = \frac{9971,95 m^3 / h}{3600 s / h} = 2,77 m^3 / s$$

Portanto teremos :

$$D_c = 70,9 * 2,77^{0,477}$$

$$D_c \cong 115,27 \text{ cm}$$

As demais dimensões ficam assim determinadas :

$$H = D_c / 2 = 57,63 \text{ cm}$$

$$B = D_c / 4 = 28,82 \text{ cm}$$

$$L = 2 * D_c = 230,54 \text{ cm}$$

$$Z = 2 * D_c = 230,54 \text{ cm}$$

$$D_s = D_c / 2 = 57,63 \text{ cm}$$

$$I = D_c / 1,6 = 72,04 \text{ cm}$$

$$J = D_c / 4 = 28,82 \text{ cm}$$

A perda de carga, em alturas de velocidade na entrada, pode ser calculada pela expressão :

$$F_c = \frac{12 * \frac{B * H}{K * D_s^2}}{3 * \frac{L * Z}{D_c^2}}$$

onde K é um fator relacionado com o defletor de entrada. Utilizando um ciclone com defletor até a parede temos que K vale 2.

Calculando F_c obtemos :

$$F_c = \frac{12 \times \frac{28,82 \times 57,63}{2 \times 57,63^2}}{3 \times \frac{230,54 \times 230,54}{115,27^2}}$$

$$F_c = 0,25 \text{ altura de velocidade } h_v$$

onde :

$$h_v = 51,18 \times \rho' \times v^2$$

sendo :

$$\rho' \cong 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ g / cm}^3 \text{ (densidade do gás)}$$

$$v = 15,2 \text{ m / s (velocidade na entrada)}$$

Podemos assim calcular a perda de carga :

$$F_c = 0,25 \times 51,18 \times 1,12 \cdot 10^{-3} \times 15,2^2$$

$$F_c = 3,31 \text{ mm CA} = 3,31 \text{ kgf / m}^2$$

7-) Determinação da Quantidade de Areia para Partir o Leito

Temos, da definição de porosidade :

$$m = \frac{\rho_M - \rho_{\text{máx}}}{\rho_M - \rho_m}$$

onde :

$\rho_{\text{máx}}$ = densidade do leito após a fluidização

$$m = 0,45$$

$$\rho_M = 2093,11 / 9,81 = 213,36 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\rho_m = 1,12 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$0,45 = \frac{213,36 - \rho_{\text{máx}}}{213,36 - 1,12}$$

$$\rho_{\text{máx}} = 117,85 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Como o leito fluidizado ocupa um volume de $0,042 \text{ m}^3$,
teremos a seguinte massa de material:

$$M = \rho_{\text{máx}} * V = 117,85 * 0,042$$

$$M = 4,95 \text{ kg}$$

A altura do leito antes da fluidização será :

$$V_o = M / \rho_M = 4,95 / 213,36 = 4 * 0,23 * H_o$$

$$H_o = 0,025 \text{ m de altura de areia no leito}$$

8-) Perda de Carga Total

A perda de carga dos ventiladores até a pré-câmara (perda de carga distribuída) é calculada por :

$$\Delta P_1 = 0,4 * f * (L / D^{1,22}) * v^{1,82}$$

onde :

$L \cong 2 \text{ m}$ (admitido, pois vai depender das condições de instalação do equipamento no laboratório)

$$D = 0,2 \text{ m}$$

$$v = Q / S$$

$$v = \frac{V_{\text{ar}}^r * C_t}{\pi * D^2 * 1/4}$$

$$v = \frac{4,114 * 240}{\pi * (0,2)^2 * 1/4 * 3600}$$

$$v = 8,73 \text{ m/s}$$

$f = 0,9$ para fluxo de ar no interior de tubos lisos

$$\Delta P_1 = 0,4 * 0,9 * (2 / 0,2^{1,22}) * 2,86^{1,82}$$

$$\Delta P_1 = 34,73 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 34,73 \text{ mm CA}$$

A grelha distribuidora será separada do leito por uma camada de aproximadamente 90 mm de altura constituída de pedras refratárias com granulação de 8 a 9 mm, baseado em experiências relatadas na referência [10].

Será utilizada como grelha uma placa perfurada, com orifícios circulares de 2,5 mm de diâmetro. A área efetiva para o escoamento do ar foi tomada como 50 % da área transversal do leito, resultando em 5092 orifícios.

A perda de carga na grelha será :

$$\Delta P_2 = \frac{K \times v^2}{2 \times g}$$

onde K = 0,15 considerando tanto a entrada como a saída da grelha.

$$v = \frac{V_{ar}^r \times C_t}{3600 \times A_L \times 0,5}$$

$$v = \frac{4,114 \times 240}{3600 \times 0,05 \times 0,5}$$

$$v = 10,97 \text{ m / s}$$

$$\Delta P_2 = \frac{0,15 \times 10,97^2}{2 \times 9,81}$$

$$\Delta P_2 = 0,92 \text{ m CA} = 920 \text{ mm CA}$$

A perda de carga no leito já foi calculada e é igual a :

$$\Delta P = 920,5 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 920,5 \text{ mmCA}$$

A perda total será, então :

$$\Delta P_t = \Delta P + \Delta P_1 + \Delta P_2$$

$$\Delta P_t = 920,5 + 920 + 34,73$$

$$\Delta P_t = 1875,28 \text{ mm CA}$$

9-3) Controle das Cinzas

A composição química das cinzas do carvão mineral da Mina do Leão-Butiá tem a seguinte variação :

SiO_2	52,4 - 56,4 %
Al_2O_3	23,7 - 29,7 %
CaO	1,9 - 2,4 %
MgO	0,8 - 0,9 %
TiO_2	1,2 %
K_2O	0,7 - 1,0 %
Fe_2O_3	6,7 - 14,1 %
P_2O_5	0,2 - 0,4 %

O dióxido de silício e óxido de alumínio afetam o ponto de fusão das cinzas, aumentando-o, enquanto que o óxido de cálcio e o óxido férrico o diminuem.

As cinzas serão retiradas pela parte superior do leito, de modo intermitente, uma vez que este alcance o nível de 0,82 m, sendo reduzido para 0,78 m. Esse procedimento é mais aconselhável porque uma retirada contínua aumentaria os efeitos de entrada de ar falso ou mesmo saída de gases quentes.

10-) Emissão de Poluentes

Basicamente a composição dos gases queimados é a seguinte : CO_2 , N_2 , NO_x , H_2O (vapor d'água), CO e SO_2 .

Quanto ao H_2O (vapor), N_2 e CO_2 , não há problema, visto que não são substâncias nocivas à saúde ou à Ecologia.

O CO nas cinzas ocorre em quantidade extremamente reduzida, posto que a combustão em leito fluidizado é praticamente completa.

Estudos revelam que a contribuição de N_2 da atmosfera para a concentração de NO_x não é significativo para temperaturas de reação inferiores a 982°C . Uma vez que o carvão da Mina do Leão apresenta baixa porcentagem de nitrogênio (1,44 %) e que se pretende trabalhar com temperaturas próximas de 900°C no combustor aqui dimensionado, cremos que a emissão de óxidos de nitrogênio não se constituirá num fator limitante para o nosso trabalho.

11-0 Alimentação e Partida

Utilizaremos, na alimentação do combustível no gerador de calor, um transportador helicoidal com eixo giratório (parafuso - sem fim). Como o dimensionamento em detalhes de tal parafuso não se mostra dentro do escopo deste trabalho, apresentaremos, a seguir, apenas alguns resultados, recomendados pela norma DIN 15261 :

diâmetro de rosca = 160 mm

passo de rosca = 160 mm

O dispositivo deverá se deslocar no sentido vertical de 20 em 20 cm, para atingir as 3 bocas de alimentação de 50 mm de diâmetro .

Usaremos gás propano para dar a partida no gerador de calor, uma vez que a combustão não ocorre nas condições de início de operação. O suprimento desse gás se dará através de dois torpedos de 45,4 kg, após passar por regulador, rotâmetro e válvula. A injeção do carvão se dará junto à grelha e só ocorrerá após o leito alcançar a temperatura de 250 °C. Ao atingirmos temperaturas da ordem de 500 °C no leito, poderemos interromper a alimentação do gás propano.

12-) Instrumentação e Controle

As principais variáveis de interesse a serem por nós monitoradas no processo de queima do carvão são : temperatura, pressão e vazão de vapor.

a) Medidores de Temperatura dos Gases e do Vapor :

O equipamento a ser utilizado na medição das temperaturas no sistema será do tipo termopar, indicado para altas temperaturas (200 a 1000 °C) e capaz de fornecer uma resposta rápida. A sua distribuição será feita da seguinte forma :

- no meio do leito;
- na região ligeiramente superior ao leito;
- na entrada do feixe de convecção;
- na saída da caldeira;
- na câmara de gases (3 termopares);
- no duto de saída dos gases da combustão.

b) Tomadas de Pressão :

Faremos cinco tomadas de pressão, a fim de monitorarmos as perdas de carga até a saída dos gases :

- na caixa distribuidora de ar, logo abaixo da grelha;
- logo acima do leito de pedras;
- logo acima do leito;
- na entrada do feixe de convecção ;
- na saída do feixe de convecção.

c) Registradores Gráficos :

Para termos um melhor monitoramento do comportamento do carvão durante sua queima, utilizaremos registradores do tipo *multi-point* que nos fornecerão os gráficos de temperatura durante todo o tempo de funcionamento da caldeira.

13-) Considerações Finais

Durante a realização deste trabalho encontramos dificuldade , basicamente, na localização de bibliografia adequada no tratamento de dois tópicos : o carvão mineral de procedência da Mina do Leão e suas propriedades ; e o projeto de combustores de leito fluidizado, propriamente dito.

Os dados sobre o supra referido combustível foram localizados em algumas publicações recentes (periódicos e anais de congressos de geologia e mineralogia), sendo muito reduzido o acervo de informações sobre essa mina em relação a outras da região, como Candiota e Charqueadas.

Quanto à bibliografia sobre o processo de combustão em leito fluidizado, além de ser excessivamente teórica, leva em consideração, essencialmente, os aspectos relativos aos fenômenos físicos presentes, sem fornecer elementos necessários ao dimensionamento do equipamento e seus detalhes construtivos.

Essa escassez de material sobre leito fluidizado se deve ao fato de sua utilização no Brasil ser recente, embora em expansão.

14-) Referências Bibliográficas

- 1 - PERA, H. - Geradores de Vapor d'Água (Caldeiras). São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Mecânica, 1966.
- 2 - VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. - Fundamentos da Termodinâmica Clássica (trad. 2ª. ed. americana) . São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1977.
- 3 - KREITH, FRANK . - Princípios da Transmissão de Calor (3ª edição) São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1977.
- 4 - SILVA, R. B. - Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Mecânica, 1972.
- 5 - LEVA, M. - Fluidisation. New York, 1959.
- 6 - MILLER, C. O. ; LOGWINNK, A. K. - Ind. Eng. Chem., s.e., 43:1220-6, 1951.
- 7 - ZABRODSKY, S. S. - Analysis of Experimental Data in Heat Transfer in Fluidised Beds. Inzh. Fiz. Zhurn., Moscow (4):22-30, 1958.

8 - ZABRODSKY, S. S. - Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidised Beds. Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1966.

9 - DAVIDSON, J. F. ; HARRISON, V. et alii. Fluidisation. New York, Academic Press, 1971.

10 - DAVIDSON, J. F. ; KEAIRNS, D. L. et alii - Fluidisation proceedings of the second engineering foundation conference. Cambridge, Great Britain, Trinity College, April, 1978.

11 - NECATI OZISKIK, M. - Basic Heat Transfer. Tokyo, McGraw-Hill, Kogakusha, 1977.

12 - MACHADO, J. L. F. - Estudo comparativo da qualidade do carvão mineral do Rio Grande do Sul . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32. Salvador, 1982. Anais. Salvador, SBG, 1982. v.3, p. 1159-68.

13 - SCHNEIDER, A. W. ; BRINCKMANN, F. A. ; CASTANHO, O. S. - Carvão mineral no Rio Grande do Sul. Geologia e Metalurgia , n.41, p.93-112, 1978.

14 - Conselho de Implantação do Complexo Carboquímico do Estado do Rio Grande do Sul. Subsídios a uma política carboquímica estadual . Porto Alegre, 1980. 233 p.