



MODELO MATEMÁTICO PARA TROCADOR DE CALOR COM LEITO FLUIDIZADO RASO

Oscar M. Hernandez Rodriguez

Araí A. B. Pécora

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Cx.P. 6122 - 13083-970 – Campinas, SP, Brasil.

email: oscarmh@fem.unicamp.br

Resumo. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um modelo matemático simplificado para a previsão do comportamento térmico de um trocador de calor com leito fluidizado raso. O trocador contém tubos imersos através dos quais escoava água em contra corrente em relação ao escoamento da suspensão gás-sólido constituída de ar e areia. O modelo está baseado na hipótese de um leito dividido em estágios ao longo do comprimento do trocador de calor e considera a transferência de calor entre as três correntes atuantes no sistema: partículas sólidas, ar e água. São apresentados também resultados numéricos fornecidos pelo modelo e sua comparação com resultados experimentais onde se verifica boa concordância, com desvios máximos da ordem de 25 %.

Palavras Chave: Trocador de calor, Recuperação de energia, Leito fluidizado raso, Modelo matemático

1. INTRODUÇÃO

A recuperação de energia vem ganhando destaque no cenário industrial, por representar, além de uma economia energética significativa, um avanço na qualidade do processo produtivo e uma maior preocupação quanto ao meio ambiente, o que está de acordo com uma política ecológica cada vez mais atuante.

O uso da energia contida em partículas sólidas aquecidas representa um importante estágio em muitos processos industriais, onde deseja-se obter uma eficiência máxima com um consumo de energia mínimo. Entre os processos industriais que disponibilizam material sólido quente, podem-se destacar: secagem; produção de fertilizantes compostos; calcinação de minérios e combustão de carvão em leitos fluidizados. Fan (1996) fez uma revisão das aplicações mais comuns de sistemas fluidizados na indústria e mostrou que a tecnologia de fluidização está significativamente presente nas indústrias química, petroquímica, metalúrgica, bioquímica e de mineração, onde operações envolvendo partículas sólidas quentes são comuns. Na produção de fertilizantes compostos os sólidos deixam o processo com temperaturas da ordem de 130 °C; na calcinação de minérios as partículas deixam o forno a 530 °C; enquanto que na combustão de carvão em leitos fluidizados as cinzas deixam o

combustor a 850 °C. A indústria de processos no Brasil envolve, em geral, partículas sólidas, em uma ampla e diversificada faixa de produtos, indo desde combustíveis e materiais de construção até a agricultura, produtos químicos, papel e fibras sintéticas.

Nos dias de hoje, observa-se um aumento na produção de energia através da gaseificação de combustíveis sólidos e da combustão de materiais de baixo poder calorífico em sistemas fluidizados. A combustão de sólidos como bagaço de cana, casca de arroz, carvão e outros combustíveis com alto conteúdo de cinzas, resulta em uma quantidade considerável de partículas sólidas descartadas do reator com temperaturas da ordem de 800 a 1000 °C. Existe um significativo potencial de recuperação de energia neste material sólido e pesquisas buscando a otimização de tais processos de recuperação energética são ainda necessárias.

Brookes e Reay (1982) detalharam vários tipos de equipamentos de recuperação de calor disponíveis e mencionaram as vantagens do trocador de calor com leito fluidizado, como: geometria compacta, boas taxas de transferência de calor, atuação em ambiente severo e fácil manutenção.

Observações experimentais mostram que, para sólidos pertencentes aos grupos A, B e D da classificação Geldart, o maior coeficiente de transferência de calor mistura-parede é obtido em leitos fluidizados densos operando com velocidades do ar por volta do dobro da velocidade de mínima fluidização. O leito fluidizado raso possui um lugar de destaque devido à grande vantagem da não presença de bolhas, acarretando em altos valores do coeficiente de transferência de calor mistura-parede, além de fornecer pequena queda de pressão em função da pequena altura da suspensão gás-sólido. Estes equipamentos são recomendados por Elliot e Holme (1976), Aihara et al. (1993) e Virr e Willians (1985).

Suo (1976) apresentou modelos para a previsão do comportamento térmico de leitos fluidizados rasos e profundos. Foram desenvolvidos procedimentos analíticos para dois tipos de aproximações diferentes: a primeira consiste num leito suficientemente profundo para que possa ser assumido como completamente isotérmico; na segunda tem-se um leito fluidizado suficientemente raso para que possa ser assumido como isotérmico na direção vertical e adiabático na direção horizontal. Os resultados de desempenho demonstraram que o trocador de calor com leito fluidizado raso apresenta potencial de alta efetividade para uma área superficial mínima.

Tardin et al (1997) estudaram um trocador de calor com leito fluidizado em escala piloto testado pela Petrobrás. Os resultados foram utilizados para verificar as correlações disponíveis para o coeficiente de transferência de calor leito-tubos. O trocador de calor, com um tubo horizontal imerso, foi projetado para recuperar o calor de cinzas produzidas por uma planta piloto de uma caldeira com leito fluidizado circulante de 1 MW. De acordo com os autores, as correlações de Molerus et al. (1995) e Andeen e Glickisman (1976), a última reafirmada também por Aihara et al. (1993), apresentaram as melhores aproximações, com menos de 20% de desvio.

Pécora e Goldstein (1987) apresentaram uma metodologia de projeto termo-hidráulico para trocadores de calor com leito fluidizado raso e superfícies imersas. A metodologia apresentada foi baseada na hipótese de um equilíbrio térmico praticamente instantâneo entre as partículas sólidas e o gás fluidizante, o que pode ser considerado razoável em se tratando de partículas de pequeno diâmetro ($d_p < 1$ mm). Os autores analisaram a transferência de calor, entre as três correntes (sólidos particulados, gás fluidizante e água no interior de superfícies imersas no leito), por câmaras separadas por chicanas.

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um modelo matemático para a previsão do comportamento térmico de um trocador de calor com leito fluidizado raso com tubos imersos. O modelo apresentado leva em conta a transferência de calor entre as três correntes atuantes no sistema: sólidos, ar e água; e considera-se a presença de uma grande quantidade de câmaras, cujo número é limitado apenas pela granulometria do material

particulado, tratamento ainda não verificado na literatura. São apresentados também os resultados numéricos fornecidos pelo modelo, que em comparação com resultados experimentais mostraram boa concordância.

2. MODELO MATEMÁTICO

Através da análise das informações existentes na literatura verifica-se a necessidade de um tratamento mais aprofundado dos fenômenos que ocorrem em sistemas de recuperação de calor com leito fluidizado, visando a proposição de modelos que permitam a otimização do projeto do trocador de calor. Essa análise é importante principalmente em leitos fluidizados rasos, que são os equipamentos que se mostram mais vantajosos por apresentarem menor perda de carga e altas taxas de transferência de calor entre o leito e as superfícies imersas.

Foi desenvolvido um modelo para a previsão do comportamento térmico de um leito fluidizado raso com tubos imersos, baseado no trabalho de Pécora e Goldstein (1987) para trocadores de calor com leitos fluidizados convencionais divididos em câmaras através de comportas. O modelo apresentado no presente trabalho leva em conta a transferência de calor entre as três correntes atuantes no sistema: sólidos, ar e água; e o arranjo de escoamento entre leito e água, no interior dos tubos, é em contra corrente, devido a já conhecida melhor efetividade.

O modelo desenvolvido está baseado na hipótese de um leito dividido em estágios ao longo do comprimento do trocador. Essa simplificação é razoável em se tratando de um leito fluidizado raso com uma relação relativamente grande entre comprimento e largura na área de plataforma, o que sugere um escoamento pistonado do leito, ou seja, o leito teria uma componente horizontal de velocidade e os sólidos se deslocariam preferencialmente apenas na direção do comprimento.

Devido à relação relativamente grande entre comprimento e largura, aliada à pequena profundidade do leito, é razoável esperar que o leito fluidizado raso seja isotérmico apenas na direção vertical, (Suo, 1976). A força motriz para a transferência de calor é a diferença entre a temperatura do leito e a temperatura da superfície imersa, no caso a parede dos tubos onde ocorre o escoamento de água fria. Também é razoável admitir que o leito está dividido em pequenas células verticais ou estágios imaginários, onde no regime estacionário a temperatura do leito e a temperatura da parede permanecem constantes.

A cinética da transferência de calor entre gás e sólido particulado mostra que o equilíbrio térmico ocorre rapidamente, sendo necessários apenas alguns milímetros de altura do leito para que gás e sólido atinjam a mesma temperatura. Portanto, tratando-se de leitos fluidizados rasos constituídos de partículas menores que 1mm, é bastante razoável a adoção da hipótese de equilíbrio térmico gás-sólido na suspensão fluidizada, (Molerus, 1997).

Consolidação das hipóteses:

1. regime permanente;
2. leito verticalmente isotérmico e horizontalmente adiabático;
3. mistura perfeita do sólido no plano vertical;
4. inexistência de gradiente de temperatura no interior das partículas e
5. a transferência de calor ocorre primeiramente entre sólido e gás, e, posteriormente, entre a mistura gás-sólido (leito) e os tubos imersos.

A partir da quinta hipótese, é possível obter, para cada estágio, a temperatura, T'_L , atingida pela mistura bifásica após o equilíbrio térmico gás-partícula, conhecendo-se a temperatura do gás e do sólido na entrada do estágio considerado. A mistura bifásica à temperatura T'_L aquece então o fluido escoando no interior dos tubos naquele estágio,

resfriando-se até uma temperatura T_L . O procedimento de cálculo inicia-se a partir dos dados de descargas e temperaturas de entrada de cada corrente e da geometria do trocador de calor. Admite-se o número de estágios N , com comprimento l , como mostrado na Fig. 1.

O procedimento de cálculo inicia-se admitindo o perfil de temperaturas do leito, T_s , o que permite a obtenção, para cada estágio, dos seguintes parâmetros:

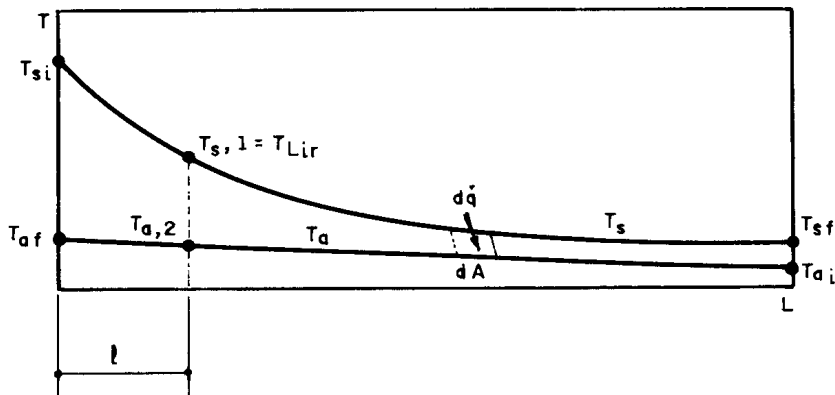
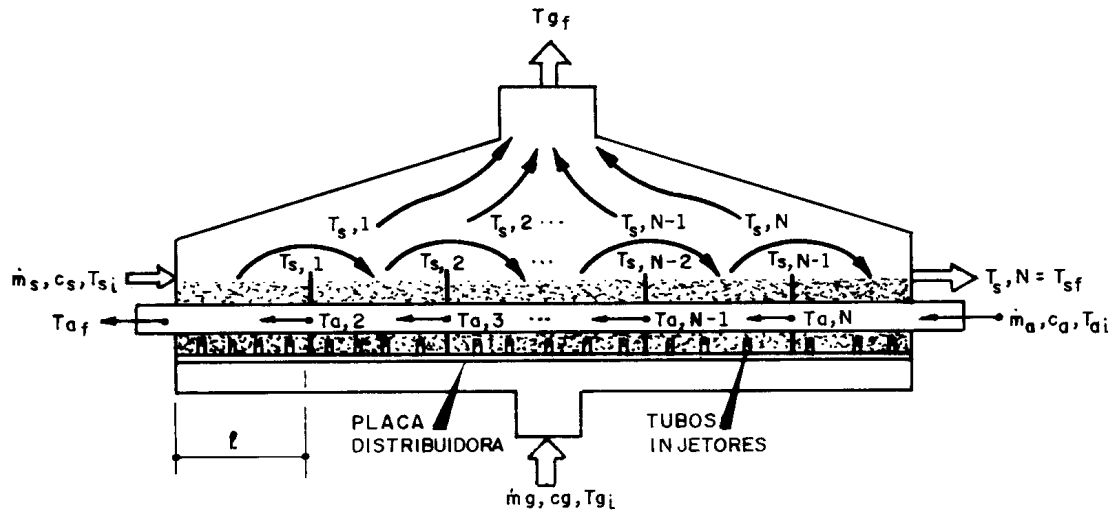


Figura 1 – Leito fluidizado multiestágios horizontal contendo tubos imersos e perfis de temperatura do leito e da água ao longo do comprimento do trocador.

- Taxa de transferência de calor cedida pelo sólido no estágio n :

$$\dot{q}_{s,n} = \dot{m}_s c_s (T_{s,n-1} - T_{s,n}) \quad (1)$$

- Taxa de transferência de calor ganho pelo gás no estágio n :

$$\dot{q}_{g,n} = \frac{\dot{m}_g}{N} c_g (T_{s,n} - T_{g_i}) \quad (2)$$

- Taxa de transferência de calor ganha pela água, no estágio n : obtida através do balanço de energia entre as três correntes:

$$\dot{q}_{a,n} = \dot{q}_{s,n} - \dot{q}_{g,n} \quad (3)$$

A temperatura da água na saída do estágio n é fornecida por:

$$T_{a,n} = \frac{\dot{q}_{a,n}}{m_a c_a} + T_{a,n+1} \quad (4)$$

Esses cálculos são realizados a partir da extremidade do trocador onde ocorre a entrada da água, pois $T_{a,N+1} = T_{a_i}$ é conhecida

Tendo calculado as temperaturas das três correntes em cada estágio, pode-se obter a diferença média logarítmica de temperaturas:

$$DMLT_n = \frac{(T'_{s,n} - T_{a,n}) - (T_{s,n} - T_{a,n+1})}{\ln \frac{(T'_{s,n} - T_{a,n})}{(T_{s,n} - T_{a,n+1})}}, \quad (5)$$

onde $T'_{s,n}$ corresponde à temperatura de equilíbrio entre gás e partículas, ($= T'_{L,n}$), no estágio n , antes de ocorrer troca de calor com o fluido escoando nos tubos imersos, como pode ser visualizado no perfil de temperatura esquematizado na Fig. 2.

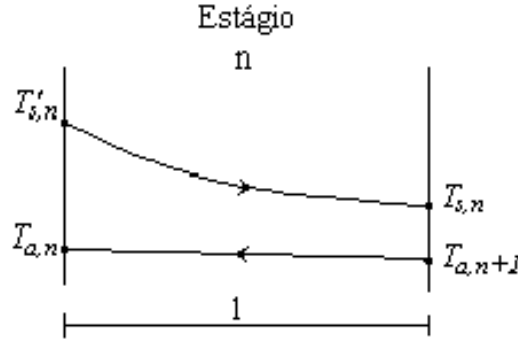


Figura 2 - Perfis de temperatura de sólidos e água no estágio n .

Para o cálculo de $T'_{s,n}$, supõe-se apenas a transferência de calor entre sólidos e gás, antes de ocorrer a troca com a água. Analisando um elemento de estágio de número n , tem-se que a temperatura do leito no estágio imediatamente anterior, $T_{s,n-1}$, é a temperatura dos sólidos antes de ocorrer a transferência de calor com o gás do estágio n . Imediatamente após a entrada dos sólidos no estágio n , estes adquirem a temperatura, $T'_{s,n}$ ou $T'_{L,n}$. O leito então, com temperatura $T'_{s,n}$ troca calor com a água no interior dos tubos imersos até que sua temperatura, ao deixar o estágio n , corresponde a $T_{s,n}$. Portanto o calor retirado do sólido apenas pelo gás em cada elemento de estágio é:

$$\dot{q}_{gp,n} = \dot{m}_s c_s (T_{s,n-1} - T'_{s,n}) \quad (6)$$

ou, em uma análise diferencial para cada elemento do estágio:

$$d\dot{q}_{gp,n} = -\dot{m}_s c_s dT'_{s,n} \quad (7)$$

Para um elemento do estágio:

$$d\dot{q}_{gp,n} = \frac{\dot{m}_g c_g}{N} (T'_{s,n} - T_{g_i}) \frac{dl}{l} = \frac{\rho_g S u_o}{N} c_g (T'_{s,n} - T_{g_i}) \frac{dl}{l}, \quad (8)$$

onde ρ_g e u_o são a densidade e a velocidade superficial do gás, respectivamente, e S é a área de plataforma do leito raso.

Igualando as Eqs. (7) e (8) e integrando ao longo do comprimento l de cada estágio do trocador, obtém-se o valor de $T'_{s,n}$:

$$T_{s,n} = T_{gi} + (T_{s,n-1} - T_{gi}) \exp\left(\frac{-\dot{m}_g \cdot c_g}{\dot{m}_s \cdot c_s \cdot N}\right) \quad (9)$$

Obtida a $DMLT_n$, através da Eq. (5), o calor ganho pela água pode ser recalculado utilizando-se a equação:

$$\dot{q}_{a,n} = U A_n DMLT_n, \quad (10)$$

onde a área de troca de calor, A_n , e o coeficiente global de transferência de calor, U , são obtidos por:

$$A_n = n_t \pi d_t l, \quad (11)$$

onde n_t e d_t são o número e o diâmetro externo dos tubos, respectivamente, e

$$\frac{1}{U} = \frac{d_t}{h_a d_{in}} + \frac{d_t}{2k_t} \ln \frac{d_t}{d_{in}} + \frac{1}{h_{mp}}, \quad (12)$$

onde h_a e h_{mp} são os coeficientes de transferência de calor do lado dos tubos e mistura-parede, respectivamente, k_t é condutividade térmica dos tubos e d_{in} é o diâmetro interno dos tubos.

Recalcula-se, então a temperatura de saída do sólido e do gás em cada estágio ($T_{s,n}$) através das Eqs. (1) a (3) e compara-se com os valores arbitrados no início dos cálculos. Caso exista uma diferença significativa entre eles deve-se realizar os cálculos novamente utilizando um novo perfil de T_s , até que se consiga obter valores, no final da tentativa, próximos aos utilizados no seu início, ou seja, o cálculo iterativo prossegue até que o perfil de temperaturas arbitrado esteja próximo ao perfil de temperaturas obtido após o balanço de energia. Após o fechamento do balanço de energia, tem-se a distribuição de temperaturas do leito e da água no interior dos tubos.

O coeficiente de transferência de calor mistura-parede, h_{mp} , pode ser estimado a partir das correlações existentes na literatura. Foram utilizadas as seguintes correlações:

- Molerus et al. (1995), para leito fluidizado:

$$\frac{h_{mp} l_l}{k_g} = \frac{0,125(1 - \varepsilon_{mf}) \left\{ 1 + 33,3 \left[\frac{(u_o - u_{mf})/u_{mf}}{\sqrt{(\rho_s c_s / k_g g)(u_o - u_{mf})}} \right]^3 \right\}^{-1}}{1 + (k_g / 2c_s \mu) \left\{ 1 + 0,28(1 - \varepsilon_{mf})^2 \left[\frac{\rho_g}{\rho_s - \rho_g} \right]^{0,5} \left[\frac{\sqrt{\rho_s c_s / k_g g} (u_o - u_{mf})}{u_{mf}} \right]^2 \right\}} + 0,165 \text{Pr}^{1/3} \left(\frac{\rho_g}{\rho_s - \rho_g} \right)^{1/3} \left[1 + 0,05 \left(\frac{u_o - u_{mf}}{u_{mf}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (13)$$

onde a escala de comprimento de fluxo laminar, l_l , é definida como:

$$l_l \equiv \left[\frac{\mu}{\sqrt{g}(\rho_s - \rho_g)} \right]^{2/3} \quad (14)$$

- Andeen e Glickisman (1976), para leito fluidizado raso:

$$\frac{h_{mp} d_t}{k_g} = 450(1 - \varepsilon) \text{Pr}_g^{0,3} \left(\frac{\text{Re}}{\text{Ar}} \right)^{0,326} \quad (15)$$

É importante salientar que o coeficiente h_{mp} deve ser recalculado para cada elemento de estágio, visto que as propriedades termofísicas do leito variam com a temperatura e esta, por sua vez, está variando ao longo do comprimento do trocador com leito fluidizado raso.

Foi implementado um programa computacional em FORTRAN para a aplicação do modelo proposto e o leito fluidizado raso foi dividido em até 1000 câmaras.

3. SISTEMA EXPERIMENTAL

Foi construída, para este trabalho, uma bancada experimental, onde foram coletados dados para comparação com os resultados numéricos gerados pelo modelo. O sistema experimental é composto basicamente pelos equipamentos mostrados na Fig. 3.

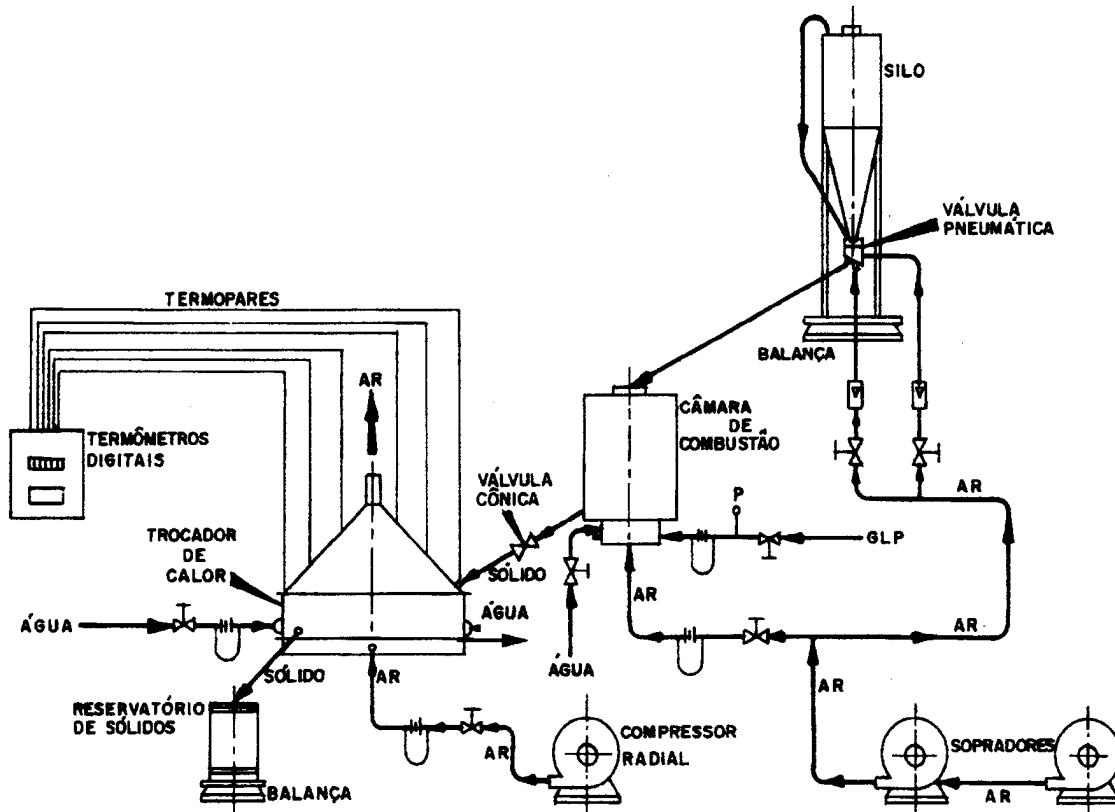


Figura 3 – Sistema experimental.

No início do processo existe um silo com um volume de $0,16 \text{ m}^3$, contendo 250 kg de areia. O silo está conectado a uma válvula pneumática para sólidos particulados, que é utilizada para alimentar a câmara de combustão com leito fluidizado borbulhante, responsável pelo aquecimento dos sólidos. A descarga de material particulado aquecido, que deixa o combustor, é controlada por uma válvula cônica de alimentação. Os sólidos quentes provenientes da câmara de combustão alimentam o trocador de calor com leito fluidizado raso. Depois do processo de recuperação de calor, o material sólido resfriado deixa o trocador de calor em direção a um reservatório de material sólido.

As temperaturas no trocador de calor e no combustor foram medidas através de termopares e a aquisição foi feita através de sistema de aquisição de dados. As medidas de pressão, incluindo as medidas do fluxo mássico de gás e perda de carga dos leitos fluidizados, foram obtidas através de bancadas de tubos em U. A Fig. 3 mostra um esquema geral das instalações experimentais.

O trocador de calor com leito fluidizado raso, que é o objeto de estudo deste trabalho, foi construído em aço carbono e tubos de aço inoxidável, onde flui a água, e é composto de plenum, placa distribuidora, casco e coifa, como mostrado na Fig. 4.

Em cada experimento os fluxos mássicos do gás, sólidos e água foram medidos, além dos perfis de temperatura ao longo do comprimento do trocador de calor

Os experimentos foram realizados para uma série de combinações de parâmetros diferentes, onde variaram o diâmetro da partícula (d_p), a descarga de gás (\dot{m}_g), a descarga de

sólidos (\dot{m}_s). Além disso os experimentos foram feitos em dois tipos de trocadores de calor diferentes: um sem chicanas e o outro com a presença de cinco chicanas dispostas de forma equidistante ao longo do comprimento do trocador de calor. A Tabela 1 apresenta os valores dessas variáveis em cada teste. Para todos os testes, a vazão mássica de água no interior dos tubos foi mantida constante (220 kg/h).

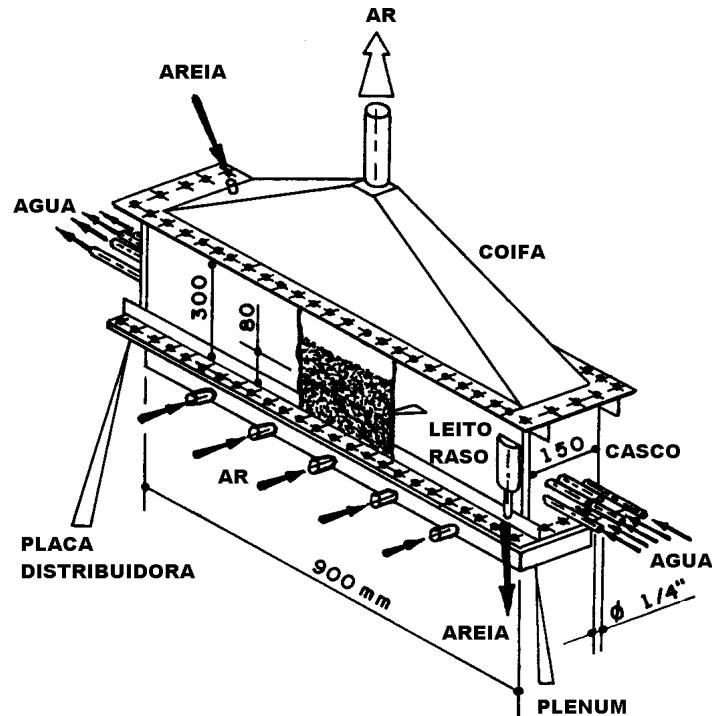


Figura 4 – Esquema do trocador de calor.

Os dados experimentais foram obtidos quando o sistema atingia o regime permanente, identificado através dos fluxos mássicos de sólidos, ar e água constantes e através da verificação do equilíbrio térmico entre o trocador de calor e o ambiente.

A simulação numérica e os testes experimentais foram realizados para um caso típico e as grandezas utilizadas estão mostradas na Tabela 2.

4. RESULTADOS

Na Fig. 5 são apresentados, para algumas das condições experimentais testadas, os perfis de temperatura do leito e da água obtidos experimentalmente em comparação com os perfis fornecidos pelo modelo matemático desenvolvido. O comportamento observado nos demais testes foram semelhantes aos apresentados na Fig. 5. A variável x representa a coordenada na direção do comprimento do trocador de calor.

Comparando de uma forma geral os perfis de temperatura do leito, percebe-se que o modelo segue a tendência dos pontos experimentais. Porém o modelo prevê uma queda maior da temperatura do leito, assim como uma maior temperatura de saída da água. Tal comportamento pode ser explicado pela existência de um coeficiente de transferência de calor mistura-parede real menor do que o esperado. Isso explica a melhor aproximação verificada para o trocador de calor com chicanas, Fig. 5 (c) e (d), já que neste caso obteve-se coeficientes de transferência de calor mistura-parede mais elevados.

Foram observados desvios máximos, entre os resultados experimentais e os previstos pelo modelo numérico, da ordem de 25 %, o que pode ser considerado razoável levando-se em conta a simplicidade do modelo e sua característica mecanicista.

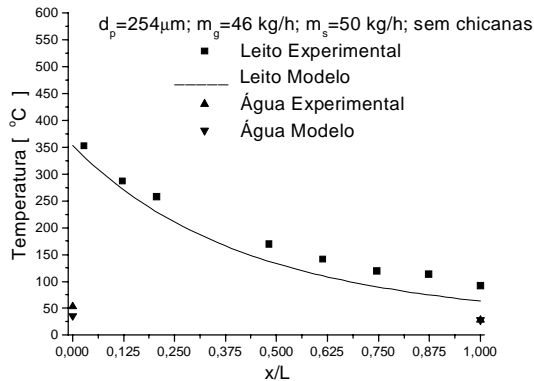
Tabela 1 – Organização dos resultados experimentais.

		d_p [μm]	\dot{m}_g [kg/h]	\dot{m}_s [kg/h]
Sem chicanas	1	254	46	80
	2	254	50	80
	3	254	46	50
	4	254	50	50
	5	385	46	80
	6	385	50	80
	7	385	46	50
	8	385	50	50
Com chicanas	9	254	46	80
	10	254	50	80
	11	254	46	50
	12	254	50	50
	13	385	46	80
	14	385	50	80
	15	385	46	50
	16	385	50	50

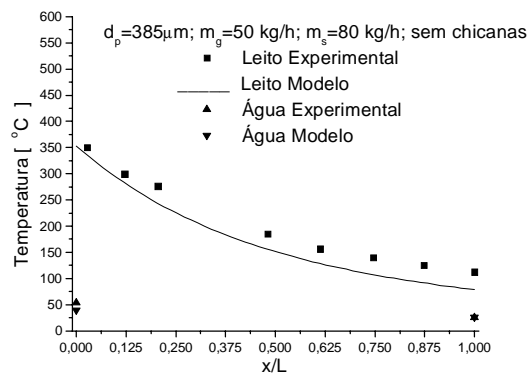
Tabela 2 – Grandezas utilizadas na simulação e no experimento

Fluido	\dot{m} [kg/s]	ρ [kg/m ³]	c [kJ/kg K]	k [W/m K]	μ [kg/m s]
areia ¹	0.28	2600	0.800	0.35	-
ar	-	0.485 ² e 1.049 ³	1.005	0.051	3.43·10 ⁻⁵
água	-	1000	4.187	0.65	5.60·10 ⁻⁴

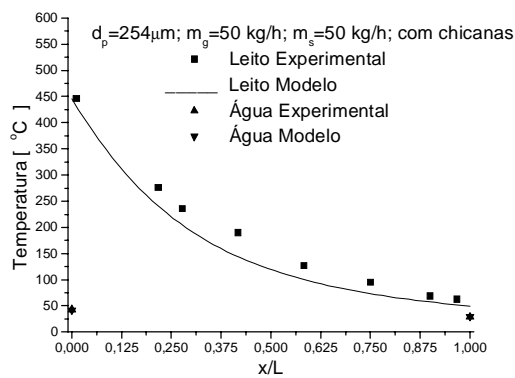
¹ $d_p = 200 \mu\text{m}$, $\phi = 0.80$, ² 455°C, ³ 60°C



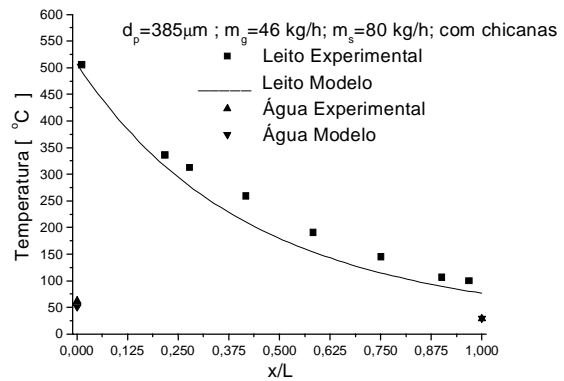
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5 – Perfis de temperatura no trocador de calor.

5. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um modelo matemático simplificado para a previsão do comportamento térmico de um trocador de calor com leito fluidizado raso. Os resultados do modelo foram comparados com resultados obtidos em uma bancada experimental. O modelo seguiu a tendência dos pontos experimentais, apresentando um desvio máximo da ordem de 25 %. Levando em conta a simplicidade do modelo matemático, considera-se que o modelo prevê razoavelmente bem o comportamento térmico do sistema, sendo considerado de grande valia para engenheiros de projeto, além de representar uma contribuição para uma melhor compreensão dos sistemas de transferência de calor com leito fluidizado raso.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo), processo 97/12684-7, pelo suporte financeiro para este trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Aihara, T., Maruyama, S., Tanaka, K. e Yamaguchi, J. , 1993, Heat Transfer and Fluidization Characteristics of a High-Temperature Shallow Fluidized Bed, *Experimental Thermal and Fluid Science* , vol. 6, pp. 282-291.
- Andeen, B.R., Glicksman, L.R., 1976, Heat Transfer to Horizontal Tubes in Shallow Fluidized Beds, *Asme-Aiche Heat Transfer Conference, Missouri, ASME paper 76-HT-67.*
- Brookes, G. & Reay, D. A. , 1982, Comparative Merits of Heat Recovery Equipment , *Heat Recovery Systems*, vol. 2, n. 1, pp. 31-36.
- Elliot, D.E. & Holme, B.G. , 1976, Fluidized Bed Heat Exchangers, *Institute of Chemical Engineers* , U.K.
- Fan, L. S. , 1996, Sumary Paper on Fluidization and Transport Phenomena , *Powder Technology*, vol. 88, pp. 245-253.
- Molerus, O. , 1997, “Particle-to-Gas Heat Transfer in Particle Beds at Peclet Number $Pe \leq 10$ ”, *Powder Technology*, vol. 90, pp. 47-51.
- Molerus, O., Burschka, A., Dietz, S., 1995, Particle Migration at Solid Surfaces and Heat Transfer in Bubbling Fluidized Beds - II. Prediction of Heat Transfer in Bubbling Fluidized Beds, *Chemical Engineering Science*, vol. 50, n. 5, pp. 879-885.
- Pécora, A .A.B. & Goldshtein, L. , 1987, Recuperação De Calor De Sólidos Particulados. I Simpósio Brasileiro De Transferência De Calor E Massa , Unicamp.
- Suo, M. , 1976, Calculational Methods for Performance of Heat Exchangers Enhanced with Fluidized Beds, *Letters in Heat and Mass Transfer*, vol. 3, pp. 555-561.
- Tardin Jr, P. R., Goldstein Jr, L., Casavechia, L. C., 1997, An Investigation on Heat Transfer in an Industrial Fluidized Bed Heat Exchanger, *Proceedings, XIV Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, dez 8-12, Bauru.
- Virr, M.J. & Willians, H.W. , 1985, Heat Recovery By Shallow Fluidized Beds, *Cep* , pp. 50-56.

Mathematical Model of a Shallow Fluidized Bed Heat Exchanger

Abstract. This work presents a simplified mathematical model of a shallow fluidized bed heat exchanger with immersed tubes. The thermal performance of the equipment is obtained for a counter flow heat exchanger with water flowing inside the tubes and the solid-gas suspension outside them. The fluidized bed is divided in stages along the longitudinal direction where the heat and mass balances among the three currents involved (sand particles, air and water) are considered. The predicted model temperature profile along the length of the equipment present good agreement with experimental data with a maximum deviation of 25%.

Keywords: *Heat exchanger, Energy Recovery, Shallow fluidized bed, Mathematical Model*