

**PROJETO DE RECUPERADOR DE CALOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE
PARA AQUECIMENTO DE AR**

Denis Max de Lima Bezerra ⁽¹⁾ (dbezerra@alunos.utfpr.edu.br), Divaldo Bezerra Filho ⁽²⁾ (divaldofilho04@gmail.com), Jhon Jairo Ramírez Behainne ⁽¹⁾ (jhon@utfpr.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Departamento Acadêmico de Mecânica

⁽²⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); Departamento de Engenharia Química

RESUMO: *Trocadores de calor de leito fluidizado têm sido considerados equipamentos auxiliares eficientes no aproveitamento de energia térmica em geradores de vapor de alta capacidade. No entanto, em relação ao seu uso e desempenho como dispositivos de aquecimento de ar, a partir de correntes gasosas aquecidas residuais comuns em processos industriais, ainda falta informação na literatura. Em razão disso, esse trabalho propõe o procedimento para o projeto de um recuperador de calor de leito fluidizado borbulhante usado no aquecimento de ar ambiente utilizando partículas do Grupo B de Geldart, neste caso, areia quartzosa de 200 µm de diâmetro médio de Sauter fluidizada com corrente de ar a alta temperatura. Aplicando-se modelos de cálculo da literatura foi possível dimensionar um recuperador de calor para a realização de ensaios experimentais futuros em escala de laboratório. O trocador de calor ar-ar resultante tem dimensões de 300x150x200 mm (CxLxA), contendo internamente 36 tubos horizontais de 13,7 mm de diâmetro externo para possibilitar a troca de calor em uma única passagem. Adicionalmente, detalhes construtivos sobre o distribuidor de ar e a caixa plenum do sistema projetado são apresentados.*

PALAVRAS-CHAVE: *Trocador de calor, Leito fluidizado Borbulhante, Transferência de calor, Projeto mecânico.*

DESIGN OF A BUBBLING FLUIDIZED BED HEAT EXCHANGER FOR AIR HEATING

ABSTRACT: Fluidized bed heat exchangers have been considered efficient auxiliary devices for seizing thermal energy in high-capacity steam generators. However, regarding their use and performance as air heating devices, specifically from residual heated gas streams common in industrial processes, there is still a lack of information in the literature. Due to this gap, this work proposes the procedure for the design of a bubbling fluidized bed heat recovery device that allows to heat environmental air by using a bed of quartz sand of 200 µm in Sauter mean diameter, which is fluidized from an air stream fed at high temperature. By applying calculation models from the literature, it was possible to design a heat recovery system to carry out future experimental tests on a laboratory scale. The resulting air-air heat exchanger has dimensions of 300x150x200 mm, internally containing 36 horizontal tubes of 13.7 external diameter, which are set in single pass. Additionally, construction details about the air distributor and the plenum box of the designed system are presented.

KEYWORDS: *Heat exchanger, Bubbling fluidized bed, Heat transfer, Mechanical design.*

1. INTRODUÇÃO

Em virtude das suas diversas vantagens operacionais, trocadores de calor gás-sólido, também conhecidos como trocadores de calor de leito fluidizado (TCLF), têm sido objeto de estudos experimentais e numéricos há anos (HATTORI; HOWARD, 1985; CÓRCOLES, et al., 2021). A recuperação de energia térmica nesses dispositivos é realizada aproveitando diferenças de temperaturas entre correntes de fluidos, inicialmente descartadas de alguns processos, em benefício de outros que precisam de aquecimento ou resfriamento (TURINI, 2017).

Rodriguez *et al.* (2002) estudaram experimentalmente um trocador de calor de leito fluidizado tipo gás-sólido raso e analisaram a recuperação de energia de partículas sólidas que saem de um processo de combustão. Os experimentos foram realizados com e sem defletores verticais no leito fluidizado, com tubos horizontais submersos preenchidos com água em arranjo de contracorrente. Foram testados dois diâmetros de partículas (254 e 385 μm), duas vazões mássicas de sólidos (50 e 80 kg/h) e duas vazões mássicas de gás (46 e 50 kg/h). A variação da temperatura do leito ao longo do comprimento do equipamento, a vazão mássica e as temperaturas de entrada e de saída de partículas sólidas, ar e água foram observadas e medidas para determinar o coeficiente de transferência de calor leito-tubo e a eficiência do trocador de calor. Os resultados mostraram um incremento de aproximadamente 55% no coeficiente de transferência de calor e valores de efetividade do trocador de calor mais expressivos em experimentos com a presença de defletores. Blaszcuk *et al.* (2018) estudaram as características de transferência de calor em um leito fluidizado borbulhante com feixes de tubos horizontais de uma caldeira comercial de leito circulante. Os efeitos dos parâmetros operacionais sobre o rendimento do sistema foram mensurados, sendo obtidos valores do coeficiente de transferência de calor na faixa de 250 a 400 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, valores estes que superam em muitas vezes o valor do coeficiente obtido em trocadores de calor do tipo gas-gás (JIA, 2020). Um trabalho similar a esse foi apresentado por Armatsombat e Chinsuwan (2020), onde as temperaturas de operação do leito também giraram em torno de 800°C.

MaiOs recentemente, Wu *et al.* (2022), realizaram uma revisão da literatura sobre o princípio e as aplicações práticas da troca de calor em leito fluidizado, visando atualizar o progresso da investigação e fornecer referência para a sua aplicabilidade em escala. Zheng *et al.* (2024), investigou os mecanismos pelos quais partículas quimicamente reativas liberam energia em um trocador de calor de leito fluidizado, a fim de avaliar o desempenho de sistemas de conversão termoquímica.

A revisão da literatura indica que, até o início dos anos 2020, os estudos sobre as possibilidades tecnológicas de recuperação de calor residual em leito fluidizado são, em sua grande maioria, focados em sistemas que aproveitam calor de correntes com temperaturas acima de 500°C. Embora recuperadores de calor utilizando correntes com temperaturas intermediárias (100 a 400°C), tenham também sido estudados em diversos trabalhos da literatura, estes não envolvem sistemas

com leito fluidizado, como mostra o artigo elaborado em formato review apresentado por Men, *et al.* (2021).

Dessa forma, essa breve revisão da literatura sugere que recuperadores de calor de leito fluidizado borbulhante, para fins de recuperação de calor residual utilizando partículas do Grupo B de Geldart (1973) e troca térmica ar-ar a temperaturas intermediárias, não tem recebido a atenção que deveria como equipamentos que possuem um enorme potencial para o aumento da eficiência energética em processos industriais. O presente trabalho contribui ao diminuir a lacuna neste aspecto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O recuperador de calor de leito fluidizado projetado nesse trabalho é formado por cinco componentes principais: uma estrutura de suporte ou chassi, uma câmara *plenum*, um distribuidor de gás de fluidização ou placa distribuidora, uma seção vertical (ou seção do TCLF) que comporta um leito de partículas em regime de fluidização borbulhante em contato com tubos submersos, e uma seção de *freeboard* com saída para exaustão ou chaminé. Como material do leito fluidizado, escolheu-se areia quartzosa de 200 μm de diâmetro médio de Sauter e 2650 kg/m^3 de densidade.

As superfícies externas do TCLF, *plenum* e *freeboard* foram confeccionadas em chapa n. 11 de 3 mm de espessura, dobradas e soldadas. Estes três itens são fixados ao sistema mediante parafusos. A seguir, apresenta-se os detalhes de projeto dos principais componentes do recuperador de calor.

2.1. Componente trocador de calor de leito fluidizado (TCLF)

A seção do trocador de calor do dispositivo é composta por uma região de leito fluidizado em regime borbulhante, por tubos horizontais que atravessam o leito numa única passagem para possibilitar a troca de energia térmica, e por peças com geometria específica para a entrada e a saída do ar. No TCLF, o leito de partículas de areia é colocado em regime de fluidização borbulhante mediante a injeção de ar previamente aquecido (ou de gás efluente procedente de um processo industrial), entregando calor aos tubos que transportam ar alimentado na temperatura ambiente.

Para o dimensionamento do TCLF, inicialmente foi necessário definir o tamanho da sua seção transversal. Tendo em vista o propósito de avaliação futura do dispositivo em ambiente de laboratório e a redução dos custos de construção e montagem, escolheu-se uma seção transversal com 150 mm de largura por 300 mm de comprimento. Adicionalmente, com base em recomendação da literatura, a altura da seção vertical do TCLF foi fixada no mesmo valor do diâmetro hidráulico da seção transversal do leito (200 mm), a fim de manter condições de leito raso que beneficia a transferência de calor entre a suspensão gás-sólido e os tubos horizontais, diminuindo também as chances do surgimento do fenômeno indesejado de *slugging* durante a operação (BASU, 2006).

Dessa maneira, com a altura do leito de partículas em regime de fluidização borbulhante (H) sendo igual à altura da seção vertical do TCLF, a massa de sólidos a fluidizar (m_b) pode ser determinada com aproximação a partir da densidade das partículas (ρ_p), da porosidade do leito fluidizado em regime borbulhante (ε) e da área da seção transversal do leito (A_b). Pela sua vez, a massa de sólidos dividida pela área da seção transversal do leito (A_b) fornece o valor aproximado da queda de pressão no leito fluidizado (ΔP_b). Segundo Whitehead (1985, *apud* BASU, 2006) e Yang (2003), ΔP_b e H estão relacionados pela Equação 1:

$$\Delta P_b = \frac{m_b g}{A_b} = \rho_p (1 - \varepsilon_{mf}) H_{mf} g = \rho_p (1 - \varepsilon) H g \quad (1)$$

onde g é a constante gravitacional ($9,81 \text{ m/s}^2$), com ε_{mf} e H_{mf} sendo, respectivamente, a porosidade e a altura do leito na condição de mínima fluidização, cujos valores são assumidos iguais à porosidade e altura do leito fixo (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Ao rearranjar a Equação 1, obtém-se a relação:

$$\frac{H}{H_{mf}} = \left(\frac{1 - \varepsilon_{mf}}{1 - \varepsilon} \right) \quad (2)$$

Neste trabalho, foi estabelecido que o valor médio de ε pode variar na faixa de 0,50 a 0,60, a fim de manter valores de porosidade compatíveis com a condição de regime borbulhante (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). De acordo com Wen e Yu (1985, *apud* GRACE *et al.*, 2020), o valor de ε_{mf} para areia quartzosa com fator de esfericidade próximo de 0,67, similar à utilizada nesta pesquisa, tem valor de 0,47. Dessa maneira, conforme as Equações 1 e 2, a altura e a massa de leito fixo de partículas a ser carregada no TCLF estão na faixa de 151 a 181 mm, e de 9,54 a 11,93 kg, respectivamente.

A velocidade de fluidização (U_f) para a operação do TCLF é definida considerando valores apropriados para a relação U_f / U_{mf} , onde U_{mf} é a velocidade de mínima fluidização das partículas do leito. Essa relação de velocidades é normalmente conhecida como número de fluidização (F_n). Baseado em medições experimentais, Turini (2017) encontrou que, para transferência de calor em regime de leito fluidizado borbulhante com areia quartzosa, o número de fluidização ótimo é próximo de 3, sendo este o valor adotado para o projeto do recuperador de calor. Já, a velocidade de mínima de fluidização foi determinada a partir do número de Reynolds, conforme a Equação 3 (YANG, 2003):

$$Re_{mf} = \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \left(\sqrt{C_1^2 C_2 Ar} \right) - C_1 \quad (3)$$

Na Equação 3, d_p é o diâmetro médio de Sauter da partícula, ρ_g e μ são a densidade e a viscosidade dinâmica do agente fluidizante, C_1 e C_2 são constantes empíricas, sendo estas com valores de 27,2 e 0,0408, respectivamente, conforme Grace ((1982, *apud* YANG, 2003). A variável Ar corresponde ao número de Arquimedes, obtido a partir da Equação 4 (GOOSSEN, 1998):

$$Ar = \frac{\rho_g(\rho_p - \rho_g)gd_p^3}{\mu^2} \quad (4)$$

No interior do TCLF foi incluído um feixe de tubos horizontais de uma única passagem, cuja área total de troca térmica com a suspensão gás-sólido (A_t) foi calculada a partir da Equação 5:

$$A_t = \frac{q}{U(\Delta T_{ml})} \quad (5)$$

onde q é a carga térmica do recuperador de calor, em W; U é o coeficiente global de transferência de calor, em W/m²°C, e ΔT_{ml} , é a média logarítmica das diferenças de temperatura para um trocador de calor com fluxo cruzado, em °C (INCROPERA *et al.*, 2006).

Nesse trabalho, o valor de A_t foi determinado considerando uma carga térmica de 1000 W, um coeficiente de troca térmica suspensão gás-sólido/tubo de 300 W/m²°C (BASU, 2006), um feixe composto por tubos horizontais de aço inoxidável AISI 304 com diâmetro nominal de ¼ de polegada SCH-40, escoamento laminar para o ar frio que ingressa nos tubos e as seguintes temperaturas médias esperadas para as correntes: ar frio na entrada (25°C), ar frio na saída (200°C), ar de fluidização na entrada (400°C) e ar de fluidização na saída (250°C), esta última tendo o mesmo valor da temperatura do leito fluidizado.

Adicionalmente, foi assumido que o TCLF é isolado termicamente da vizinhança e que as correntes de ar se comportam como gás ideal. Dessa forma, a carga térmica presente em regime permanente é também relacionada pela Equação 6 (INCROPERA *et al.*, 2006):

$$q = \dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,e} - T_{q,s}) = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,s} - T_{f,e}) \quad (6)$$

onde $\dot{m}_q$, $c_{p,q}$, T_q e $\dot{m}_f$, $c_{p,f}$, T_f representam, na sua ordem, as vazões mássicas, os calores específicos e as temperaturas do ar de fluidização quente e do ar frio que ingressam no TCLF. Os subscritos “e” e “s” indicados junto às temperaturas das correntes correspondem ao valor da variável no local de entrada e de saída do TCLF, respectivamente.

2.2. Componente distribuidor de ar

O distribuidor de ar escolhido correspondeu ao do tipo placa plana perfurada, por oferecer boa operação e maior simplicidade na fabricação. Segundo Whitehead (1985, *apud* Basu, 2006), para lograr uma distribuição uniforme de gás fluidizante em um leito onde são utilizadas partículas do Grupo B de Geldart (1973) e U se aproxima de U_{mf} , a razão entre as variações de pressão através do distribuidor (ΔP_d) e do leito (ΔP_b) deve cumprir com a exigência apresentada na Equação 5:

$$0,15 \leq \frac{\Delta P_d}{\Delta P_b} \leq 0,30 \quad (5)$$

Quanto maior for o valor dessa razão, mais uniforme será a distribuição do ar alimentado no leito fluidizado. Assim, tendo em vista essa característica, nesse trabalho foi considerado o valor de 0,3 para a razão das quedas de pressão da Equação 5.

A velocidade do gás através de um orifício do distribuidor (U_0), está relacionada com a queda de pressão (ΔP_d) na forma da Equação 8 (BASU, 2006):

$$U_0 = C_d \left(\frac{2\Delta P_d}{\rho_{g,o}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

onde $\rho_{g,o}$ é a densidade do gás no local do orifício e C_d é o coeficiente de orifício. Segundo Zenz (1981), o valor de C_d pode ser obtido por meio das Equações 7 e 10, sendo:

Para placas finas:

$$\text{Se } \frac{t}{d_o} \leq 0,09 \quad \rightarrow \quad C_d = 0,8 \quad (7)$$

Para placas grossas:

$$\text{Se } \frac{t}{d_o} > 0,09 \quad \rightarrow \quad C_d = 0,82 \left(\frac{t}{d_o} \right)^{0,13} \quad (8)$$

Nesse trabalho, foram escolhidos uma espessura da placa distribuidora (t) de 3 mm, e um diâmetro de orifício (d_o) de 1,5 mm, a fim de facilitar a construção. Com isso, a Equação 10 foi aplicada.

N_0 é o número de orifícios de diâmetro d_0 do distribuidor. Essa quantidade pode ser correlacionada com a velocidade superficial de fluidização (U_f) e a velocidade do gás nos orifícios (U_0) mediante a aplicação do balanço de massa indicado da Equação 11 (BASU, 2006):

$$\left(N_0 \frac{\pi}{4} d_0^2\right) U_0 \rho_{g,o} = U_f A_b \rho_g \quad (9)$$

Nesse trabalho, o passo entre orifícios foi determinado para uma distribuição de furos quadrada. De acordo com Basu (2006), o número de orifícios por unidade de área de distribuidor ($N = N_0/A_b$) está relacionado com o passo entre orifícios (P_{ss}) pela Equação 12:

$$N = \frac{1}{P_{ss}^2} \quad (10)$$

2.3. Componente *Plenum*

Segundo Basu (2006), a entrada do ar de fluidização na caixa *plenum* deve estar localizada a uma distância vertical específica abaixo do distribuidor (H_b). Essa altura pode ser encontrada a partir das exigências estabelecidas pelas Equações 13 e 14:

$$\text{Se } D_e > \frac{D_b}{100} \rightarrow H_b = 0,2D_b + 0,5D_e \quad (11)$$

$$\text{Se } D_e < \frac{D_b}{100} \rightarrow H_b = 18D_e \quad (12)$$

onde D_b é o diâmetro hidráulico do leito fluidizado, em metros.

2.4. Componentes *freeboard* e *chassi*

O *freeboard* representa a seção vertical compreendida entre a superfície do leito fluidizado e a saída do gás de fluidização do recuperador de calor. Nesse trabalho, esse elemento é composto por duas porções verticais: uma com área de seção transversal constante e outra com área de seção transversal variável.

A porção vertical de seção transversal constante serve como espaço para possibilitar a recuperação ou retorno das partículas que são expelidas na superfície do leito com a quebra das bolhas de gás. A sua menor altura deverá corresponder à altura crítica de transporte (TDH), com a qual se obtém o arraste mínimo de sólidos para fora do sistema (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). De acordo com Hamdullahpur and MacKay (1986, *apud* Cahyadi *et al.*, 2015), o valor da TDH para um

sistema com geometria, propriedades das partículas e condições de fluidização similares às aqui estudadas, pode ser calculado pela relação da Equação 15:

$$TDH = \frac{11,7d_{b,i}}{g} \quad (15)$$

onde $d_{b,i}$ é o diâmetro da bolha de gás calculado na altura do leito fluidizado (H). A partir do conhecimento do diâmetro dos orifícios da placa distribuidora de ar, que define o diâmetro inicial da bolha de gás, e assumindo uso de velocidade de fluidização máxima de 0,4 m/s (F_n próximo de 15), o valor mais alto de $d_{b,i}$ encontrado foi de 0,073 m, fornecendo assim um valor da TDH de 0,088 m.

Já, a porção vertical com seção transversal variável, consistiu de uma peça em forma de difusor, a fim de dar margem de segurança à porção TDH anteriormente definida ao promover uma diminuição na velocidade do gás e as chances de arraste por elutriação (desgaste por atrito de partículas), que pode gerar partículas mais finas.

Finalmente, o chassi tem a função de suportar o conjunto do recuperador de calor. Esse componente consiste de uma mesa de 462 mm de comprimento, 216 mm de largura e 3770 mm de altura, confeccionada em dois tipos de perfis, 30x30 mm e 30x20 mm, ambos em espessura 2 mm. Essas dimensões foram selecionadas devido a uma questão ergonômica de trabalho e a facilidade em seu manuseio, no caso particular das espessuras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

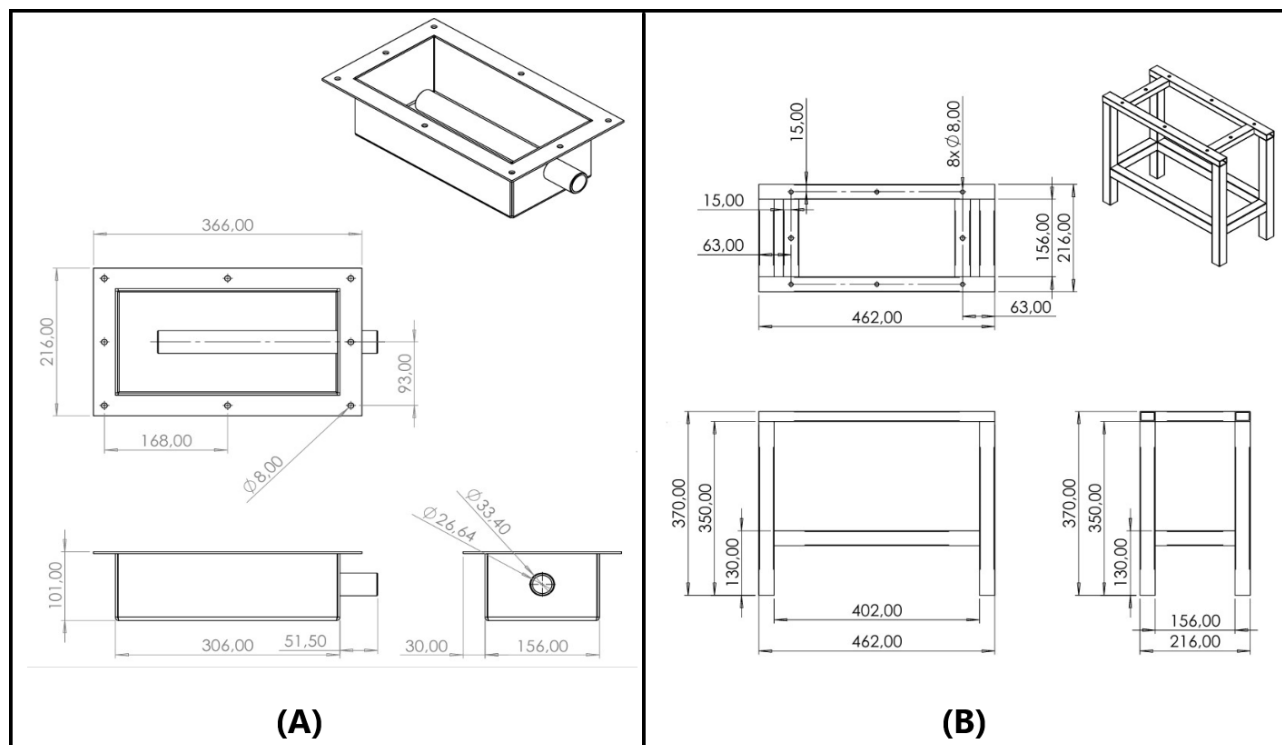
Os desenhos técnicos resultantes do projeto do sistema recuperador de calor, apresentados e discutidos nesta seção do trabalho, foram elaborados utilizando o software *Solidworks*, versão acadêmica 2023.

As **FIGURA 1 (A)** e **FIGURA 1 (B)**, mostram os detalhes dimensionais relacionados à construção dos componentes *plenum* e chassi, respectivamente. Nesses desenhos, percebe-se que ambos os componentes apresentam flange com oito furos de 8 mm de diâmetro, que servem para a conexão das peças ao TCFL.

Além disso, nota-se que o *Plenum* tem uma tubulação de entrada de ar quente com 301 mm de comprimento, 33,40 mm de diâmetro externo e 26,64 mm de diâmetro interno, dimensões estas que correspondem a uma tubulação de 1 polegada nominal do padrão SCH40. O extremo da tubulação que se encontra dentro do *Plenum* é tampado por uma luva e vedado com solda tipo *Metal Inert Gas* (MIG). Pelo lado da entrada, o tubo tem prolongação de 51,50 mm, a fim de facilitar a conexão da tubulação de alimentação do ar quente. Para melhorar a uniformidade do ar que será

entregue ao distribuidor de placa perfurada, foram incluídos quatro furos de 0,012 m de diâmetro na tubulação de entrada, todos eles direcionados para o fundo do *plenum*.

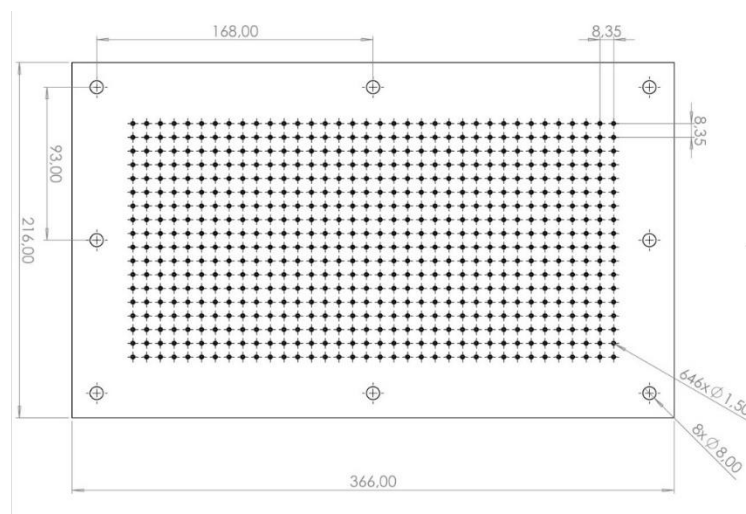
FIGURA 1. (A) *Plenum* com sua tubulação de entrada de ar; (B) chassi do equipamento.



Fonte: Autoria própria (2024).

A FIGURA 1 mostra a configuração do distribuidor de ar obtido a partir dos cálculos realizados.

FIGURA 2. Distribuidor de ar do sistema de recuperação de calor em leito fluidizado.



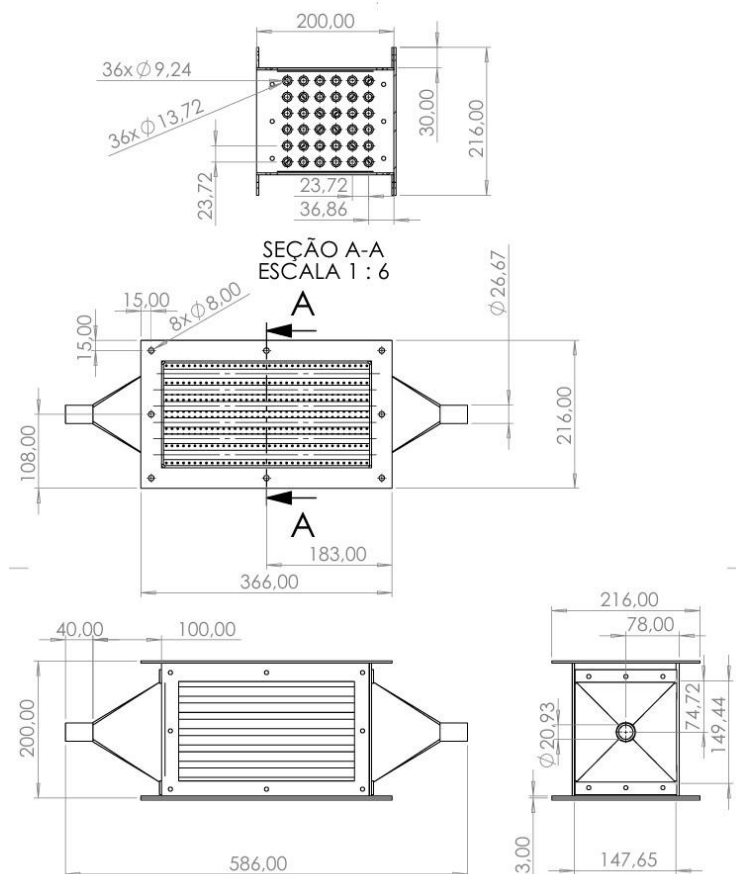
Fonte: Autoria própria (2024).

Como mencionado anteriormente, este distribuidor de ar é do tipo placa plana perfurada, construído com chapa de aço inoxidável AISI 304 de 3 mm de espessura. Ele contém 646 furos de 1,5 mm de diâmetro, sendo estes distribuídos em arranjo quadrado com passo de 8,35 mm.

Para evitar o retorno de sólidos ao *plenum*, uma malha metálica com abertura de 100 µm será instalada na parte inferior do distribuidor. A malha será fixada no local mediante o uso de uma peça adicional de reforço.

A **FIGURA 3** apresenta o desenho técnico do componente trocador de calor de leito fluidizado (TCLF).

FIGURA 3. Trocador de calor de leito fluidizado (TCFL).



Fonte: Autoria própria (2024).

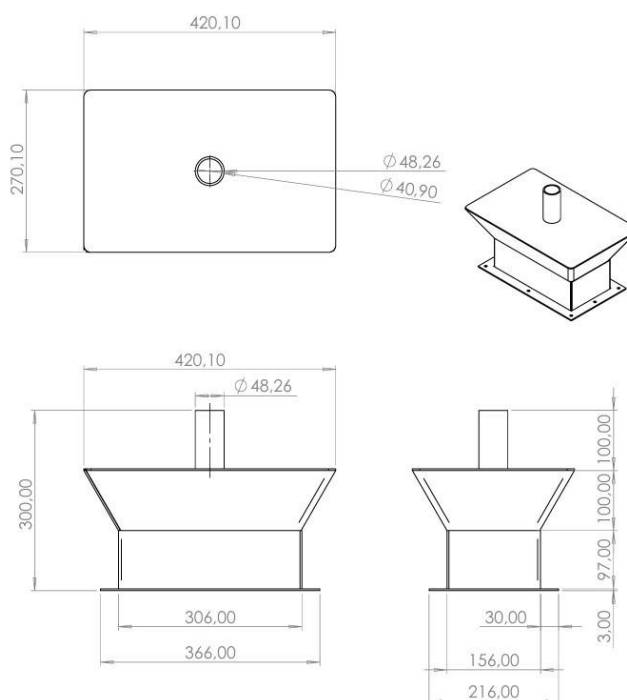
O TCLF será construído em chapa de 3 mm de espessura, a fim de proporcionar resistência mecânica aos esforços originados por dilatação térmica. Ele tem 586 mm de comprimento, 216 mm de largura e 200 mm de altura. O dispositivo é composto por quatro partes: zona de leito, tubos trocadores de calor (ou feixe tubular), bocal de entrada e difusor de saída de iguais dimensões. A zona de leito tem 306 mm de comprimento, 156 mm de largura e 200 mm de altura.

Os tubos horizontais inseridos na zona do leito para possibilitar a troca térmica entre as correntes de ar quente e frio têm 306 mm de comprimento, 13,72 mm de diâmetro externo e 9,24 mm de diâmetro interno, que configuram tubos de ¼ de polegada de diâmetro nominal do padrão SCH40. Os cálculos fluidotérmicos realizados resultaram na indicação de um feixe tubular que proporcionará uma área total de troca de calor de aproximadamente 0,46 m², representada na instalação de 36 tubos de uma única passagem, distanciados entre si em configuração alinhada e distribuição quadrada. A primeira fileira de tubos está localizada a 37 mm de distância do distribuidor de ar para minimizar o efeito dos jatos de ar na saída dos orifícios, enquanto as fileiras superiores estão separadas entre si a uma distância vertical de 23,7 mm.

O bocal e o difusor do TCLF são usados para permitir a entrada e a saída do ar a ser aquecido, respectivamente. Estas peças estão fixadas nas laterais do corpo do TCLF por meio de 6 parafusos instalados na base de cada um. Elas possuem uma seção transversal retangular de 145,61 mm x 147,97 mm, com redução para seção circular de 26,6 mm de diâmetro interno e comprimento de 100 mm. Além disso, foram projetados dois tipos de tampas para a região frontal do trocador de calor: uma de acrílico, para visualização da qualidade da fluidização em testes realizados a frio (condição ambiente), e outra metálica para suportar altas temperaturas durante testes de transferência de calor.

A **FIGURA 4** ilustra a geometria e os detalhes dimensionais do componente *freeboard*.

FIGURA 4. *Freeboard* do recuperador de calor de leito fluidizado.

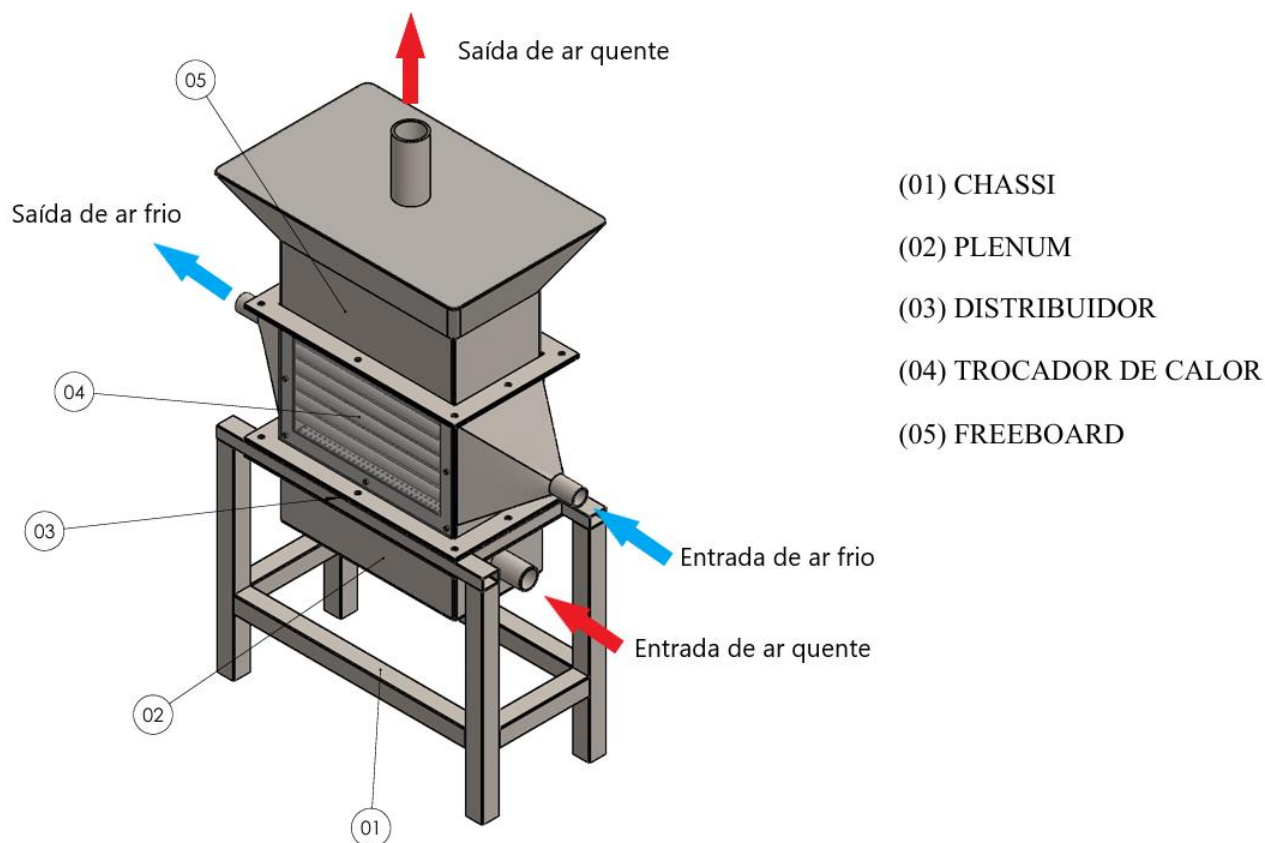


Fonte: Autoria própria (2024).

A região inferior do *freeboard*, que possui seção transversal constante, é aberta nos seus extremos inferior e superior para permitir a passagem do gás quente que deixa a superfície do leito fluidizado, sendo delimitada lateralmente por chapa de aço inoxidável AISI 304 de 3 mm de espessura. Essa seção transversal tem 306 mm de comprimento, 156 mm de largura e se estende em 100 mm de altura para satisfazer o valor da *TDH* calculada. Já, a região superior do *freeboard*, também de 100 mm de altura, tem seção transversal variável, aumentando de 306 mm x 156 mm para 420 mm x 270 mm. Essa parte do componente com forma de difusor será utilizado para reduzir a velocidade do ar e minimizar as perdas por partículas finas resultantes da elutriação originada na zona do leito, servindo como margem de segurança. Na tampa do difusor conecta um tubo de 1,5 polegada de diâmetro nominal SCH40 para a exaustão dos gases quentes através de chaminé.

Por fim, a **FIGURA 5** apresenta uma vista 3D do recuperador de calor montado a partir dos componentes projetados. As setas azuis indicam entrada e saída de ar frio a ser aquecido, enquanto as setas vermelhas indicam a entrada e a saída de ar quente, responsável pela fluidização e aquecimento das partículas sólidas do leito para posterior transporte de calor ao ar frio.

FIGURA 6. Vista 3D do recuperador de calor projetado.



Fonte: Autoria própria (2024).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que, a partir de diferentes considerações e abordagens disponíveis na literatura especializada para o projeto mecânico e fluidotérmico de sistemas gás-sólido, foi possível definir as características geométricas e as principais dimensões de um protótipo de recuperador de calor em leito fluidizado do tipo gás-gás em escala de laboratório.

Com a realização dessa pesquisa, espera-se que o aparelho projetado se torne uma ferramenta de utilidade para a avaliação experimental do rendimento térmico de recuperadores de calor em leito fluidizado que são alimentados com correntes residuais aquecidas de ar ou de outros gases, especialmente daquelas com temperaturas intermediárias pouco exploradas em trabalhos prévios, na faixa de 100 a 400°C.

Finalmente, cabe destacar a contribuição deste estudo na apresentação de uma metodologia enxuta relacionada ao desenvolvimento de um equipamento que tem potencial para ajudar no aumento da eficiência energética no setor industrial, auxiliando, portanto, na redução no consumo de combustíveis e nos possíveis impactos ambientais decorrentes do seu uso.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ARMATSOMBAT, A.; CHINSUWAN, A. Heat Transfer Behavior of the Immersed Tubes and Solid Circulation Rate of a Conventional U Type Loop-Seal with an In-line Tube Bundle in the Recycle Chamber with and without Side Aeration at the Walls. *Powder Technology*, vol. 369, pp. 114-126, 2020.

BASU, P. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. 1st Ed., CRC Press: Boca Raton, 2006.

BLASZCZUK, A.; POGORZELEC, M.; SHIMIZU, T. Heat Transfer Characteristics in a Large-Scale Bubbling Fluidized Bed with Immersed Horizontal Tube Bundles. *Energy*, vol. 162, pp. 10-19, 2018.

CAHYADI, A., NEUMAYER, A., HRENYA, C., COCCO, R., CHEW, J. Comparative study of transport disengaging height (TDH) correlations in gas–solid fluidization. *Powder Technology*, vol. 275, pp.220-238, 2015.

GELDART, D., Types of Gas Fluidization. *Powder Technology*. Lausanne, pp. 285-292. maio 1973.

GRACE, J. R. Fluidized-bed hydrodynamics, Handbook of Multiphase Systems. Washington: Hemisphere, p. 5-64, 1982.

GRACE, J., BI, X., ELLIS, N. Essentials of Fluidization Technology. 1st Ed., Wiley-VCH: Weinheim, 2020.

GOOSSEN, W. R. A. Classification of fluidized particles by Archimedes number. *Powder Technology*, Vol. 98, p. 48-53, 1998.

HATTORI, H.; HOWARD, R. Gas-to-Gas Heat Recovery using Fluidized Bed Technology. *Heat Recovery Systems*, vol. 5, n. 6, p. 535-544, 1985.

INCROPERA, FRANK, P.; BERGMAN, THEODORE, L. LAVINE, ADRIENNE, S. DEWITT, DAVID, P. Fundamentos da transferência de calor e massa. 7. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2014.

JIA, D. Heat and Mass Transfer. In: GRACE, J., BI, X., ELLIS, N. Essentials of Fluidization Technology. 1 st Ed., WileyVCH, Weinheim, 2020.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O., Fluidization Engineering. 2. ed. Boston, London, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington: Butterworth-Heinemann, 1991.

RODRIGUEZ, O., M., H.; PECORA, A., A., B.; BIZZO, W., A. Heat recovery from hot solid particles in a shallow fluidized bed. *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, 145-160, 2002.

MEN, Y.; LIU, X.; ZHANG, T. A Review of Boiler Waste Heat Recovery Technologies in the Medium Low Temperature Range. *Energy*, vol. 237, 121560, 2021.

TURINI, B. Avaliação Experimental do Coeficiente de Transferência de Calor Suspensão-Parede em Regime de Leito Fluidizado Borbulhante Monitorado pelo Método da Frequência Central Gaussiana. 131 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

WEN, C. Y.; YU Y. H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity, *AIChE J*, vol. 12, p. 610–612, 1966.

WHITEHEAD, A. B.; DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. Chapter 5 in Fluidization, *Academic Press*, 2nd ed., New York, pp. 173–198, 1985.

YANG, W. Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems. Marcel Dekker: Basel, 2003.

ZENZ, F. A. Elements of Grid Design. *Gas Particle Industrial Symposium, Engineering Society*, Western, Pittsburgh, 1981.

ZHENG, H.; LIU, X.; FLAMANT, G. Design of reactive particle fluidized bed heat exchangers for gas–solid thermochemical energy storage. *Chemical Engineering Journal*, v. 489, 2024.