

BANCADA DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE PARA COMBUSTÃO COMBINADA DE CARVÃO MINERAL BRASILEIRO E BIOMASSAS: PROJETO E EXECUÇÃO.

Flavio MICHELS BIANCHI¹; Maria Luiza SPERB INDRUSIAK²; Paulo Roberto WANDER³.

¹Universidade do Vale do Rio dos Sinos, flaviombianchi@hotmail.com; ²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, msperbindrusiak@gmail.com; ³Universidade do Vale do Rio dos Sinos, prwander@unisinos.br

RESUMO

Baseado na tecnologia de leito fluidizado borbulhante, um combustor em escala de bancada foi projetado e construído para operar a coqueima de misturas de carvão mineral e biomassas. O carvão mineral disponível no sul do Brasil é tipicamente sub-betuminoso e normalmente é beneficiado para atingir requisitos necessários à geração termoelétrica. Mesmo após beneficiamento contém aproximadamente 40% de cinzas e uma substancial quantidade de enxofre na sua composição (aproximadamente 2%). Considerando a necessidade de processos que incluam um conceito de combustão ambientalmente mais amigável, porém não abrindo mão da confiabilidade oferecida pelo carvão mineral em termos de suprimento e armazenamento, a queima combinada de carvão mineral com combustíveis renováveis converge para esta finalidade. Biomassas como lenha e resíduos de seu processamento, dentre outros resíduos agroindustriais, são combustíveis energéticos renováveis, facilmente encontrados no sul do Brasil e normalmente de baixo valor de mercado. Estes renováveis, no entanto, têm umidade relativamente alta. Esta umidade, sendo um componente usual das biomassas, dificulta a combustão singular destes combustíveis, portanto, a queima combinada destes combustíveis com carvão mineral tende a ser mais eficiente e estável. A proposta deste trabalho é apresentar as metodologias utilizadas para o projeto e execução de um combustor de leito fluidizado borbulhante em escala de bancada, dando ênfase ao projeto do reator e equipamentos acessórios à câmara de combustão (ciclone, alimentadores, pré-aquecimento de ar, materiais, instrumentação e controle etc.). Testes experimentais indicam boa operacionalidade do combustor, partida e desligamento relativamente rápidos, robustez, estabilidade da operação do leito fluidizado e homogeneidade das temperaturas ao longo da câmara de combustão.

Palavras-chave: Combustão. Leito fluidizado. Coqueima. Carvão mineral. Biomassa.

ABSTRACT

Based on bubbling fluidized bed technology, a bench scale combustor has been designed and built to operate in cofiring with coal and biomass blends. Coal available in southern of Brazil is typically sub-bituminous and is usually beneficiated to meet the requirements for thermoelectric generation. Even after processing, it contains approximately 40% of ash and a substantial amount of sulfur in its composition (about 2%). Considering the needs for processes that include an environmentally friendly combustion concept, but not giving up the reliability offered by coal in terms of supply and storage, the cofiring of coal with renewable fuels converges for this purpose. Biomass as wood and their processing residues, among other agroindustry wastes, are renewable energy fuels, easily found in southern of Brazil and usually have low market value. These renewables, however, have relatively high moisture. This moisture, being a usual component of biomasses, make the combustion of these fuels difficult, therefore, the combined burning of these fuels with coal tends to be more efficient and stable. This work aims to show the methodologies used to design and build a bench scale bubbling fluidized bed combustor, emphasizing the reactor and accessories (cyclone, feeders, air preheating, materials, instrumentation and control, etc.). Experimental tests indicate good operability of the combustor, relatively fast start and stop, robustness, stability of fluidized bed and homogeneity of temperatures throughout the combustion chamber.

Key-Words: Combustion. Fluidized bed. Cofiring. Coal. Biomass.

1 INTRODUÇÃO

Sendo a disponibilidade de energia um fator diretamente ligado à qualidade de vida em nível

global, buscar meios de geração barata e de fácil acesso são um desafio contínuo dos setores envolvidos nestas atividades. Neste cenário, a

combustão se enquadra como uma alternativa viável para a geração energética. A Rede Nacional de Combustão (RNC), afirma que aproximadamente 80% da energia atualmente utilizada no Brasil é proveniente da queima de derivados de petróleo, gás natural, carvão mineral, lenha, carvão vegetal e resíduos agroindustriais (RNC, 2017). Verificando esta expressiva contribuição da combustão no cenário nacional, um contínuo desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias de combustão se faz necessário para o melhor aproveitamento dos combustíveis e da melhor forma mitigar os impactos ambientais, tornando os processos mais sustentáveis e ambientalmente harmoniosos.

Dentre as principais tecnologias de combustão aplicadas a combustíveis sólidos podemos evidenciar as tecnologias de conversão energética utilizando leito fluidizado como mais modernas e ambientalmente mais amigáveis quando comparadas com os processos de conversão como combustores de leito fixo e pulverizado.

Leitos fluidizados permitem a combustão de combustíveis sólidos de baixa qualidade, como carvões com alto teor de cinza (disponíveis no sul do Brasil) e biomassas com altos teores de umidade, a partir da regularidade das temperaturas de operação do leito. Dentre as características dos leitos fluidizados que proporcionam esta vantagem, é possível apontar as altas taxas de transferência de calor e de massa como uma das mais importantes (COLLOT, 2006).

Metodologias para o desenvolvimento de um projeto de construção destes equipamentos em escala industrial estão dispersas na bibliografia especializada. Entretanto, o dimensionamento de pequenas unidades de teste não é amplamente disponível e por muitas vezes as considerações utilizadas em escalas industriais não podem ser aplicadas às menores escalas. Desta forma este trabalho tem por objetivo apresentar os principais pontos levantados no dimensionamento e construção de um combustor de leito fluidizado borbulhante em escala de bancada para a aplicação de queima combinada de carvão mineral de alta cinza e biomassas.

2 MATERIAIS

Kunii e Levenspiel (1991), descrevem o fenômeno de fluidização como uma operação pela

qual partículas sólidas são levadas a um estado de fluidez através da suspensão em um gás ou líquido. Partindo deste conceito é possível admitir que os sólidos particulados são parte essencial no estudo de fluidização em geral, sendo responsáveis por grande influência do comportamento do fenômeno a partir de suas características.

Nos leitos fluidizados, os sólidos particulados são os inertes que formam o leito, os combustíveis e em alguns casos há a utilização de aditivos, como o calcário para o controle da emissão de compostos de enxofre na combustão de carvão mineral.

2.1 PARTÍCULAS DO LEITO

Combustores de leito fluidizado borbulhante contém uma massa de sólidos granulares que geralmente tem tamanhos variando entre 0,1 mm e 1,0 mm, dependendo do tipo de aplicação. Estes sólidos são chamados de material do leito e, caracteristicamente, são areias, calcário (quando se queimam carvões com alto teor de enxofre) e cinzas provenientes da queima de carvão quando este é utilizado. Os sólidos inertes do leito representam de 97 a 99% de todo o material particulado presente nestes equipamentos (BASU, 2006).

Para o dimensionamento deste combustor foram selecionados dois tipos de partículas como base para o leito, uma areia amplamente utilizada na confecção de moldes de fundição e uma areia utilizada em filtros de água de piscina. Para a caracterização das partículas, ensaios foram realizados com intuito de determinar as massas específicas de carga e massa específica real. A esfericidade das partículas foi estimada a partir de uma correlação indicada por Foust et al. (1982) a partir da medição da porosidade dos leitos fixos.

As velocidades de mínima fluidização das partículas selecionadas foram realizadas através da metodologia sugerida por Kunii e Levenspiel (1991), com base na análise da perda de carga do leito sujeito a variação de velocidades.

A areia nominada areia de fundição é amplamente utilizada na confecção de moldes de fundição. É um material particulado inerte e foi selecionado devido à boa regularidade granulométrica e a estar colocada no grupo B da classificação de Geldart. A faixa selecionada por peneiramento tem partículas entre 250 μm e 350 μm e teve seu diâmetro médio estimado em 290 μm , a

partir da análise de imagem feita através de microscopia eletrônica de varredura, utilizando um microscópio eletrônico modelo MEV ZEISS EVO MA10 com EDS Bruker QUANTAX.

A areia de filtro foi selecionada por ser um material inerte com granulometria ligeiramente maior que a areia de fundição e estar posicionada no grupo D da classificação de Geldart. Uma vantagem na

utilização destas partículas é que o fornecedor normalmente informa a faixa granulométrica para a utilização em filtragem de água (separação de suspensão de sólidos no tratamento de água de piscinas).

A Tabela 1 apresenta as principais características das partículas pré-selecionadas como material do leito.

Tabela 1 - Propriedades das partículas do leito

Tipo	Areia de fundição	Areia de filtro
Granulometria [µm]	250-350	590-1000
Massa específica real [kg/m³]	2263	2450
Massa específica de carga [kg/m³]	1514	1450
Diâmetro médio de Sauter [µm]	290	728
Velocidade de mínima fluidização [m/s]	0,063	0,512
Classificação de Geldart *	B	D

2.2 COMBUSTÍVEIS DE REFERÊNCIA

Conforme aplicação típica em leitos fluidizados borbulhantes, os combustíveis sólidos utilizados são predominantemente granulados e, conforme Basu

(2006), leitos fluidizados podem operar com grande flexibilidade de combustíveis. No atual estudo os combustíveis utilizados serão carvão mineral energético CE 4500 e serragem de madeira, sendo os dois provenientes do estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 2 - Características dos combustíveis em base úmida

Característica/ Carvão Tipo	CE 4500	Serragem de pinus
Poder Calorífico Inferior kJ/kg (kcal/kg)	18828 (4500)	17782 (4250)
Umidade Total de Entrega %	16,5	55,56
Carbono %	39,6	48,99
Hidrogênio %	2,5	6,36
Nitrogênio, %	0,7	0,03
[Oxigênio + Halogênios] %	7,6	42,71
Cinzas %	31,8	1,91
Enxofre Total %	1,3	-

3 EQUIPAMENTO

O equipamento é composto basicamente por uma câmara de reação cilíndrica, vertical, com isolamento externo e material indicado para suportar a atmosfera oxidante. Também contém um distribuidor de ar (placa perfurada), uma câmara plena, um ciclone de separação de sólidos, sistema de armazenagem e alimentação de combustíveis e estrutura de suporte.

3.1 VAZÕES DE AR

Para o cálculo das vazões de ar necessárias para combustão dos combustíveis foi realizado o balanço estequiométrico tendo o carvão CE-4500 como referência e estimada a relação ar/combustível estequiométrica como sendo:

$$A/C = 5,108\alpha \frac{g_{ar}}{g_{comb}} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Fazendo uso de $\alpha = 1$ para relação estequiométrica.

Considerando a ineficiência do contato do oxigênio com os componentes orgânicos a serem oxidados nas reações de combustão, fenômeno que ocorre na prática, é necessário a utilização de um

excesso de ar para prevenir que o oxigênio esteja suficientemente disponível e uma combustão mais completa ocorra. Singer (1991), estabelece uma faixa de utilização de excesso de ar dependendo do combustível a ser utilizado conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Excessos de ar típicos para combustão de combustíveis sólidos

Combustível	% de excesso de ar
Carvão	15-30
Coque	20-40
Madeira	25-50
Bagaço	25-45

Fonte: Singer (1991)

Apesar do combustor estar sendo projetado com base no combustível de referência, carvão mineral CE4500, o equipamento tem o objetivo de operar em queima combinada de carvão e biomassas e, portanto, utilizamos um excesso de ar de projeto de 30%, faixa que enquadra a queima dos dois tipos de combustíveis simultaneamente, e, portanto a relação ar/combustível real fica:

$$A/C = 6,64\alpha \frac{g_{ar}}{g_{comb}} \quad [\text{Eq. 02}]$$

A partir da relação ar/combustível real, foi possível estimar a faixa de vazões de ar em função das taxas de alimentação de combustível determinadas previamente como sendo entre 2 e 4 quilogramas por hora e, corrigindo a vazão volumétrica pela variação da massa específica do ar em função da temperatura de pré-aquecimento.

$$\dot{Q}_{ar} = \frac{A/C \times \dot{m}_{comb}}{\rho_f} \quad [\text{Eq. 03}]$$

Assim, considerando a temperatura de pré-aquecimento do ar de projeto de 300 °C encontramos para a faixa sugerida de 2 a 4 quilogramas por hora e excesso de ar de 30% vazões volumétricas variando de 359,6 a 719,2 L/min.

3.2 CÂMARA DE COMBUSTÃO

O dimensionamento de uma câmara de combustão operando em regime de leito fluidizado borbulhante se constitui da operação do leito quando

temos valores acima da velocidade de mínima fluidização e abaixo da velocidade terminal das partículas do leito.

3.2.1 Velocidades de mínima fluidização

Segundo Kunni e Levenspiel (1991), nos casos onde a velocidade de mínima fluidização não pode ser definida experimentalmente, ela pode ser encontrada a partir da expressão:

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_f) g \epsilon^3 \theta^2}{150\mu (1 - \epsilon)} \quad [\text{Eq. 04}]$$

Assim, para partículas onde dados experimentais de mínima fluidização não estão disponíveis, é possível estimar a velocidade teoricamente.

3.2.2 Velocidade terminal

Para velocidades terminais, com número de Reynolds entre 0,4 e 50, Ramirez *et al.* (2007), sugere:

$$U_t = d_p \left[\frac{4(\rho_p - \rho_f)^2 g^2}{225\rho_f \mu} \right]^{1/3} \quad [\text{Eq. 05}]$$

3.2.3 Velocidade de operação

De posse dos valores de velocidade de mínima fluidização e da velocidade terminal das partículas de interesse, Chatterjee *et al.* (1995) sugere a relação:

$$\frac{H}{H_{mf}} = 1 + \frac{10978 U_{mf}^{0,738} \rho_p^{0,376} d_p^{1,006}}{U_{mf}^{0,973} \rho_f^{0,126}} \quad [\text{Eq. 06}]$$

Para leitos fluidizados borbulhantes aconselha-se a relação:

$$1,2 < \frac{H}{H_{mf}} < 1,4 \quad [\text{Eq. 07}]$$

Tabela 4 - Velocidades características das partículas do leito

Material	U_{mf} Experimental (m/s)	U_t Teórico (m/s)	U_f Teórica (m/s)	U_f Indicada (m/s)
Areia de fundição	0,063	2,27	0,06302	0,126
Areia de filtro	0,512	5,99	0,5121	1,024

Portanto para o dimensionamento do diâmetro da seção circular do reator optamos pela velocidade de operação de 1,024 m/s, uma vez que é adequada à fluidização dos dois materiais pré-selecionados durante o dimensionamento, sem ultrapassar a velocidade de transporte da areia de fundição:

$$D = \sqrt{\frac{4 \dot{Q}_{ar}}{\pi U_f}} \quad [\text{Eq. 08}]$$

Utilizando a vazão volumétrica de ar como 719,2 L/min e velocidade de fluidização de 1,024 encontramos a partir da Equação 08 o diâmetro do reator de 0,122 m e, portanto, admitimos como diâmetro para o equipamento 0,120 m por aproximação do padrão industrial de tubos.

A câmara de combustão foi confeccionada em chapa de 4 mm de aço inox AISI 310, que pertence à família dos aços inoxidáveis austeníticos. Segundo Chiaverini (2005), o aço inox AISI 310 tem boa estabilidade às temperaturas de soldagem, podendo suportar temperaturas de até 1100 °C em atmosfera oxidante, perfil que se adequa aos parâmetros de operação do equipamento em questão.

3.3 ALTURA DA CÂMARA DE COMBUSTÃO

Para a determinação da altura total da câmara de combustão é necessário definir a altura máxima tomada pelo leito fluidizado e a altura limite de

Utilizando para este dimensionamento $H/H_{mf} = 1,3$ podemos encontrar a velocidade de operação teórica.

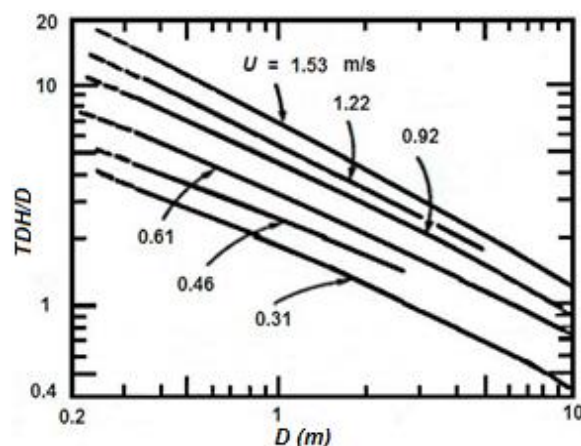
Pinho *et al.* (2015), sugere como consideração prática a velocidade para operação de leitos fluidizados em escalas de bancada na ordem de 2 vezes a velocidade de mínima fluidização. Desta forma, foi definido que a maior velocidade entre as duas bibliografias seria a utilizada para o projeto deste equipamento.

projeção das partículas (TDH) do equipamento em operação:

$$H_{cr} = TDH + H \quad [\text{Eq. 09}]$$

Por conveniência e buscando evitar o fenômeno de *slugging*, definiu-se que a altura máxima do leito não deve ultrapassar duas vezes o diâmetro do reator e neste caso o leito deve ter no máximo 0,240 m.

Figura 1 - Correlação TDH/D pelo diâmetro do reator em função da velocidade de fluidização



Fonte: Adaptado de Kunni e Levenspiel (1991).

O cálculo do TDH é realizado de acordo com correlações gráficas apresentadas por Kunii e Levenspiel (1991), Figura 1, baseado no diâmetro

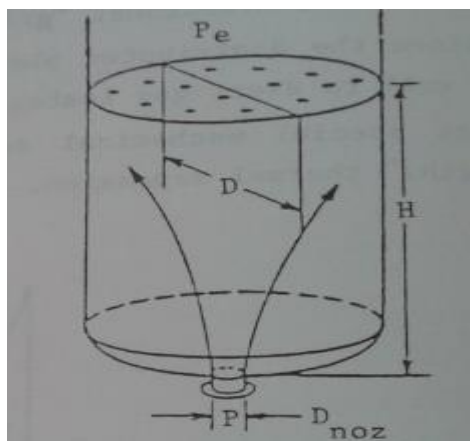
interno (0,120 m) e na velocidade de fluidização de projeto (1,024 m/s).

Como a Figura 1 não apresenta valores para diâmetros menores que 0,2 m, utilizamos este valor como referência no eixo horizontal e estabelecemos TDH/D como aproximadamente 11,5 o que representa um valor final de TDH de 1,38 m. Assim a altura total da câmara de reação projetada a partir da Equação 09 é de 1,62 m.

3.4 CÂMARA PLENA

Para o dimensionamento da câmara plena utilizamos a metodologia proposta por Tung e Williams (1987) com molde proposto de câmara plena de entrada de ar pela base.

Figura 2 - Câmara plena com entrada de ar pela base.



Fonte: Tung e Williams (1987).

Considerando o bocal de entrada D_{noz} como 0,025 m e a vazão máxima de entrada do ar pré-aquecido a 300 °C ($\dot{Q}_{ar} = 719,2$ L/min) podemos

estimar a velocidade máxima no bocal em 24,41 m/s conforme Equação 10:

$$U_{noz} = \frac{\dot{Q}_{ar}}{A_{noz}} \quad [\text{Eq. 10}]$$

A altura da câmara plena é função do diâmetro do reator e do bocal de entrada, como mostra a Equação 11:

$$H_{cp} = 3(D - D_{noz}) \quad [\text{Eq. 11}]$$

Deste modo encontramos a altura da câmara plena como 0,28 m e a altura total do reator de 1,90 segundo a Equação 12:

$$H_t = H_{cr} + H_{cp} \quad [\text{Eq. 12}]$$

3.5 CICLONE DE SEPARAÇÃO

O ciclone de separação é responsável por separar os gases de exaustão de partículas que são arrastadas pelo fluxo ascendente dos gases vindos da câmara de combustão. Na base inferior do ciclone, um silo de armazenamento acumula o material particulado capturado, enquanto pela saída superior o gás purificado é expelido para a atmosfera. O dimensionamento do ciclone de separação sólido-gás foi baseado na metodologia apresentada por Hoffmann e Stein (2008), onde o método de Muschelknautz foi utilizado. Adotamos a geometria Stairmand pois é uma geometria para ciclones de alta eficiência, que respeita as relações conforme Tabela 6, onde foi definido o diâmetro base da seção cilíndrica (D_c) com 0,08 m.

Tabela 5 - Características do ciclone de separação

Termo	Descrição	Coef. adimensionais Stairmand	Valores adotados
D_c	Diâmetro da seção cilíndrica (corpo) do ciclone	1,0	0,08
a	Altura da seção de entrada	0,5	0,04
b	Largura da seção de entrada	0,2	0,016
S	Comprimento do tubo de saída de gás	0,5	0,04
D_x	Diâmetro do tubo de saída de gás	0,5	0,04
H_{tc}	Altura total	4,0	0,32
H_c	Altura da seção cilíndrica	1,5	0,12
D_s	Diâmetro da seção de saída de pó	0,375	0,03

Fonte: Adaptado de Hoffmann e Stein (2008).

A geometria respeitou o limite de velocidade de entrada do ciclone abaixo de 25 m/s, prevenindo erosões severas ao equipamento e perdas de carga acima de 1500 Pa.

3.6 PLACA DISTRIBUIDORA DE AR

O distribuidor de ar é responsável por dar homogeneidade na dispersão do ar que entra na câmara de reação em contato com o leito. Basu (2006), propõe uma ordenação para o desenvolvimento de distribuidores que leva em conta a perda de carga do leito de partículas e admite que as perdas de carga para distribuidores tipo prato perfurado variam entre 15 e 30% da perda de carga imposta pelo leito. Para este dimensionamento convencionou-se a perda de carga na placa de 22% da perda de carga no leito.

A fração de vazios pode ser estimada em leitos fixos ($U = 0$) a partir da Equação 13 com valor de 0,5:

$$\varepsilon = \frac{U+1}{U+2} \quad [\text{Eq. 13}]$$

Assim, foi possível calcular a perda de carga do leito fixo com altura de 0,240 m e massa específica de 2450 kg/m³ a partir da Equação 14, resultando em aproximadamente 2884 Pa:

$$\Delta P_b = \rho_p (1 - \varepsilon) H_g \quad [\text{Eq. 14}]$$

A partir da convenção de perda de carga do distribuidor de 22% da perda de carga do leito encontramos 634 Pa para a perda de carga no distribuidor. Basu (2006) recomenda que a velocidade do gás atravessando os orifícios da placa perfurada esteja abaixo de 30 m/s, porém caso este valor não possa ser respeitado, a velocidade nunca pode ultrapassar 90 m/s. A velocidade nos orifícios é encontrada a partir da Equação 15:

$$U_o = C_D \left[\frac{2\Delta P_d}{\rho_f} \right]^{0,5} \quad [\text{Eq. 15}]$$

Considerando a indicação de Zenz (1981), para o coeficiente de arrasto de 0,8 e temperatura de operação de 300 °C a velocidade no orifício foi determinada como 36,3 m/s. O valor supera levemente a indicação de velocidade ótima, entretanto se apresenta distante do limite de operação de 90 m/s e é considerado seguro.

Os furos do distribuidor são distribuídos na área útil da placa. A placa contém um dreno central com 34 mm de diâmetro externo disponibilizado para o esvaziamento do leito e retirada de cinzas durante e ao fim das operações. Deste modo, a área do dreno central teve sua área descontada da área total da placa distribuidora. Assim a área útil para projeção dos orifícios foi de 0,0104 m². Foi convencionado que os orifícios teriam diâmetros de 1 mm, motivado pelos diâmetros dos particulados selecionados para o leito e facilidade na construção mecânica. Assim, o número total de furos na placa foi estimado em 373 a partir da Equação 16:

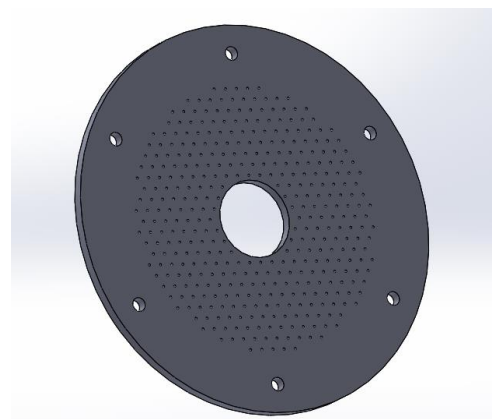
$$N = \frac{4U_f A_u}{\pi d_o^2 U_o} \quad [\text{Eq. 16}]$$

Considerou-se para este distribuidor o arranjo triangular e a distância entre furos foi de 5,67 mm e arredondada para 5,5 mm a partir da Equação 17:

$$P = \sqrt{\frac{2A_u}{N\sqrt{3}}} \quad [\text{Eq. 17}]$$

A partir do arredondamento do espaçamento a placa foi construída contendo 401 orifícios de 1 mm. A Figura 3 apresenta o desenho da placa com flange 6 furos para fixação no reator.

Figura 3 - Placa perfurada projetada



Devido às dificuldades impostas pela manufatura dos furos da placa e a possibilidade de aço sofrerem o fenômeno de flambagem devido à variação de temperatura, optou-se pelo emprego da fibra cerâmica de sílica e alumina de nome comercial Silplate 1108 da fabricante Unifrax (Unifrax I LLC, 2015).

3.7 FORNO ELÉTRICO E ISOLAMENTO

Para evitar a formação de um gradiente de temperatura significativo na parede do combustor e garantir a estabilização da temperatura do sistema, um forno elétrico dividido em 3 zonas de aquecimento, com 3800 W cada, foi construído de forma a circundar o corpo cilíndrico do equipamento. A potência de projeto permite o aquecimento do forno a temperaturas próximas de 1000 °C, possibilitando também auxiliar no aquecimento inicial do sistema, no processo de partida.

3.8 PRÉ-AQUECEDOR DE AR

O ar injetado na base do combustor de leito fluidizado é medido por um dispositivo de medição de vazão tipo rotâmetro com escala de 0-400 L/min a temperatura e pressão ambiente (21 °C e 101,3 kPa) onde é controlado por uma válvula de agulha. Após medição e controle de vazão, o ar pode ser aquecido por um pré-aquecedor de ar elétrico de troca direta com potência de projeto de 3000 W antes de ser inserido na câmara plena. O pré-aquecedor permite o aquecimento do ar propiciando temperatura ajustável a partir da condição ambiente até temperaturas próximas de 500 °C com vazões nominais, a montante do pré-aquecedor, de 180 até 370 L/min.

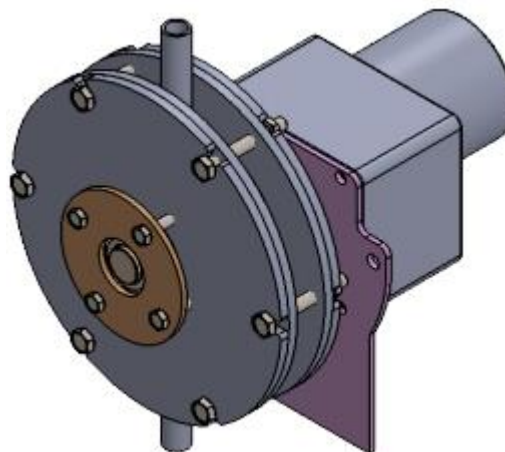
3.9 ALIMENTADORES

O sistema de alimentação de combustíveis é composto por dois silos de carga, 2 válvulas rotativas e um duto de entrada no reator. As 2 válvulas do tipo rotativa contém 9 aletas e comportas volumétricas adaptadas para baixas vazões e com razoável precisão de ajuste e controle de acordo com a massa específica de carga de cada combustível. Cada válvula é responsável por dosar e inserir no sistema um dos combustíveis utilizados na queima combinada sendo que os alimentadores são conectados em um tubo inclinado em 45° em formato de ípsilon por onde os combustíveis são levados até a câmara de combustão, misturando-se no trajeto

A alimentação no leito se dá a uma altura de 0,4 m a partir da placa distribuidora. As válvulas rotativas são acionadas por motoredutores de dupla redução acionados por corrente contínua com ajuste de velocidade controlado por voltímetro e torque de 7,65 Nm, necessário principalmente para as

biomassas, evitando trancamento da válvula durante a operação.

Figura 4 - Alimentador de combustível e acionamento por motoredutor



Para evitar o aquecimento precoce e a possível volatilização, este tubo inclinado é provido de camisa d'água, mantendo assim a temperatura adequada para evitar o aquecimento do combustível no equipamento.

3.10 INSTRUMENTAÇÃO

O equipamento conta ainda com 11 termopares tipo K, sendo 1 na câmara plena, onde é responsável pelo monitoramento da temperatura de aquecimento do ar primário, 6 termopares distribuídos na câmara de combustão, para aquisição de dados da temperatura em locais distintos do combustor, 1 termopar na saída superior do ciclone, para medição da temperatura da saída dos gases e 3 termopares para medição e posterior controle da temperatura das zonas de aquecimento do forno.

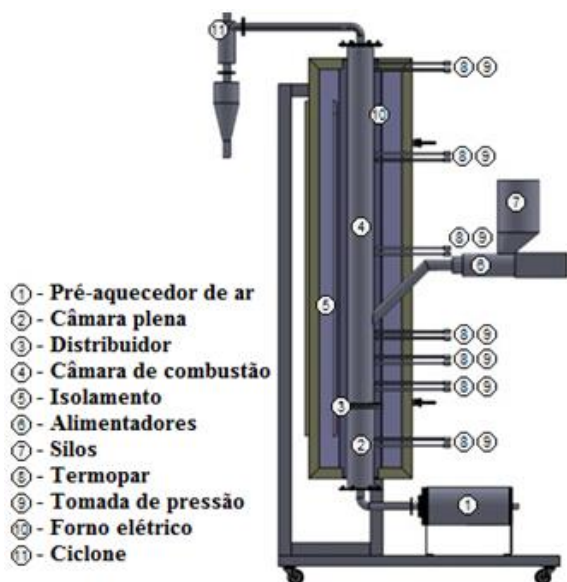
Ao todo, 7 pontos de tomada de pressão também estão distribuídos pela estrutura do equipamento de modo a monitorar as perdas de carga, bem como controlar a altura do leito. Os transdutores de pressão são do tipo diferencial com escala de 0-10 kPa de leitura, baseado em testes preliminares durante a montagem. A Figura 5 apresenta o esquemático geral do combustor de leito fluidizado borbulhante.

É prevista a coleta dos gases de exaustão na saída superior do ciclone. Este ponto de coleta de gás foi selecionado pois apresenta uma zona de menor

temperatura quando comparada com a câmara de combustão e tem o gás purificado de material particulado devido à ação do ciclone. Prevê-se a utilização de analisadores de gás portáteis para a execução da coleta e análise dos gases nesta posição do equipamento. No caso da utilização de outras técnicas de análise, o equipamento necessitará ser adaptado para a operação conforme indicação do equipamento.

Amostras de cinzas coletadas pelo ciclone também poderão ser recolhidas e posteriormente avaliadas para verificação da eficiência da combustão.

Figura 5 – Esquemático do combustor



4 RESULTADOS ESPERADOS

Com a realização da queima de um combustível de base (carvão mineral) e um combustível adjunto (biomassa) simultaneamente na mesma câmara de combustão, alguns parâmetros podem ser observados quando comparados com a queima simples de carvão mineral. Dentre eles está a avaliação da eficiência de combustão.

Devido ao alto teor de voláteis normalmente presente em biomassas, é esperada uma combustão mais veloz e consequentemente com maior eficiência, para um mesmo tempo de residência.

Também é esperada uma diminuição nas emissões de compostos de enxofre devido à menor disponibilidade deste elemento químico na mistura de carvões brasileiros, que contém percentuais

significativos de enxofre, com biomassa, que normalmente não apresenta quantidades significativas deste elemento.

Com acessórios projetados de forma a atender os combustíveis de referência, é previsto que o equipamento possa ter certa flexibilidade e operar com outros carvões e biomassas, além de outros combustíveis, desde que com granulometria e umidade controladas.

5 CONCLUSÕES

Após a execução de testes experimentais preliminares foi constatado boa operacionalidade do combustor, incluindo rápido aquecimento do sistema com auxílio do pré-aquecedor de ar e forno elétrico antes da partida com combustível. Regime estacionário pode ser observado com boa estabilidade das temperaturas ao longo do reator. O desligamento do equipamento acontece de maneira gradual e relativamente rápido.

A placa distribuidora de ar cumpriu o papel de homogeneizar a distribuição de ar na base do leito assegurando boa fluidização do leito de partículas.

Os alimentadores foram calibrados e operaram dentro das faixas estipuladas em projeto. Para o alimentador de biomassa foi necessário incluir um agitador mecânico atuando na saída inferior do silo para prevenir o sistema de entupimentos.

O ciclone de separação não apresentou material particulado na saída de gás de maneira demasiada a partir de inspeção visual e grande parte dos finos foram acondicionados no compartimento de acumulação de pó.

A robustez da estrutura permitiu segurança na operação, o isolamento do sistema mostrou-se eficiente e não expõe partes quentes garantindo maior segurança na operação.

É possível que os excessos de ar estipulados durante projeto do equipamento necessitem ser reavaliados e extrapolados para valores em torno de 40 a 70% de maneira a atender mais eficientemente as condições para oxidação completa do combustível a partir de observações práticas relacionadas a altos teores de CO nos gases de exaustão.

6 NOMENCLATURA

A_{noz} – Área da seção do bocal de entrada da câmara plena [m²]

A_u – Área útil do distribuidor [m²]

A/C – Relação ar/combustível []

a – Altura da seção de entrada do ciclone [m]

b – Largura da seção de entrada do ciclone [m]

C_D – Coeficiente de arrasto []

D – Diâmetro do reator [m]

D_C – Diâmetro da seção cilíndrica do ciclone [m]

D_{noz} – Diâmetro do bocal de entrada da câmara plena [m]

D_s – Diâmetro da seção de saída de pó do ciclone [m]

D_x – Diâmetro do tubo de saída de gás do ciclone [m]

d_p – Diâmetro médio das partículas [m]

d_o – Diâmetro dos orifícios do distribuidor [m]

g – Aceleração da gravidade [m/s²]

H – Altura do leito fixo [m]

H_c – Altura da seção cilíndrica do ciclone [m]

H_{cp} – Altura da câmara plena [m]

H_{cr} – Altura da câmara de reação [m]

H_{mf} – Altura do leito na mínima fluidização [m]

H_t – Altura total do reator [m]

H_{tc} – Altura total do ciclone [m]

$\dot{m}_{comb}$ – Vazão mássica de combustível [kg/s]

N – Número total de furos no distribuidor []

P – Distância entre furos em arranjo triangular no distribuidor [m]

$\dot{Q}_{ar}$ – Vazão volumétrica de ar [m³/s]

S – Comprimento do tubo de saída de gás do ciclone [m]

TDH – Altura limite de projeção das partículas [m]

U – Velocidade das partículas [m/s]

U_f – Velocidade de operação da fluidização em regime borbulhante [m/s]

U_{mf} – Velocidade de mínima fluidização [m/s]

U_{noz} – Velocidade no bocal de entrada da câmara plena [m/s]

U_o – Velocidade nos orifícios do distribuidor [m/s]

U_t – Velocidade terminal [m/s]

Letras gregas

α – Coeficiente estequiométrico []

ΔP_b – Perda de carga do leito [Pa]

ΔP_d – Perda de carga do distribuidor [Pa]

ε – fração de vazios do leito []

μ – Viscosidade dinâmica do fluido [Pa s]

ρ_f – Massa específica do fluido [kg/m³]

ρ_p – Massa específica dos sólidos [kg/m³]

θ – Esfericidade das partículas []

7 REFERÊNCIAS

BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 460 p.

CHATTERJEE, P.K.; DATTA, A.B.; KUNDU, K.M. Fluidized bed gasification of coal, **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, n.73, p. 204–210, 1995.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Metais, 2005. 599 p.

COLLOT, A. G., 2006. Matching gasification technologies to coal properties. **International Journal of Coal Geology**, n.65, p. 191-212, 2006.

FOUST, A. S. et al. **Princípio das operações unitárias**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 670 p.

HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. **Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation**. 2 ed. New York: Springer, 2008. 422 p.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2 ed. Newton (MA): Butterworth-Heinemann, 1991. 491 p.

PINHO, C.; FERREIRA, T.; PEREIRA, C.; PAIVA, J. M. Combustion of invasive acacia dealbata char pellets – Determination of diffusive and kinetic data. In: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Rio de Janeiro, 2015.

RAMIREZ, J.J.; MARTINEZ, J. D.; PETRO, S. L. Basic design of a fluidized bed gasifier for rice husk on a pilot scale. **Latin America Applied Research**, n.37, p. 299-306, 2007.

RNC. **Site da Rede Nacional de Combustão**. Criada Rede Nacional de Combustão. Disponível

em:<<http://redenacionaldecombustao.org/content/criada-rede-nacional-de-combust%C3%A3o>>. Acesso em 8 de fevereiro de 2017.

TUNG, S.; WILLIAMS, G. C. **Atmospheric Fluidized Bed Combustion: a technical source book**. United States: Department of Energy, 1987. 1392 p.

UNIFRAX I LLC. **Silplate Structural Insulating Board Catalogue**. United States: Niagara Falls, 2015.

ZENZ, F. A., **Fluidization and Fluid Particle Systems**. 2 ed. Nelsonville: Pemm-Corp. Publication, 1989. 665 p.