

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

AMAURI PINHEIRO GARCIA JUNIOR

VINICIUS VENSKE HORST

**ESTUDO EXPERIMENTAL A FRIO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE
AERAÇÃO DE UMA VÁLVULA LOOP-SEAL NA FLUIDODINÂMICA DE UMA
FORNALHA PILOTO DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE**

PONTA GROSSA

2025

**AMAURI PINHEIRO GARCIA JUNIOR
VINICIUS VENSKE HORST**

**ESTUDO EXPERIMENTAL A FRIO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE
AERAÇÃO DE UMA VÁLVULA LOOP-SEAL NA FLUIDODINÂMICA DE UMA
FORNALHA PILOTO DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE**

**Experimental study at room conditions of different aeration configurations of a
loop-seal valve on the fluid dynamics of a lab-scale circulating fluidized bed
furnace**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Jhon Jairo Ramírez Behainne.

PONTA GROSSA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**AMAURI PINHEIRO GARCIA JUNIOR
VINICIUS VENSKE HORST**

**ESTUDO EXPERIMENTAL A FRIO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE
AERAÇÃO DE UMA VÁLVULA LOOP-SEAL NA FLUIDODINÂMICA DE UMA
FORNALHA PILOTO DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/02/2025

Jhon Jairo Ramirez Behainne
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Maria Regina Parise
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Peixoto de Araújo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA
2025**

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão a todos que contribuíram para esta jornada acadêmica. Aos nossos pais, cujo esforço incansável nos bastidores proporcionou as condições para nosso crescimento e desenvolvimento, nossos sinceros agradecimentos. Vocês foram a luz que iluminou nossos caminhos, mesmo nos momentos mais desafiadores.

Agradecemos também aos amigos e familiares que estiveram ao nosso lado, oferecendo apoio moral e incentivo. Suas palavras de encorajamento foram essenciais para superar desafios e celebrar conquistas. Além disso, somos imensamente gratos às pessoas especiais que cruzaram nosso caminho, compartilhando conhecimento, experiências e amizade, enriquecendo nosso aprendizado e ampliando nossa visão de mundo.

Estendemos nossos agradecimentos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por proporcionar o ambiente e os recursos necessários para a realização deste trabalho. Nosso profundo reconhecimento ao professor orientador Jhon Jairo Ramírez Behainne, cuja orientação e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto. Este trabalho é dedicado a todos vocês, cujo apoio e presença tornaram possível alcançar este marco em nossas vidas acadêmicas.

RESUMO

As válvulas de recirculação de sólidos, conhecidas como loop-seals, são componentes cruciais em sistemas de leito fluidizado circulante (LFC). Sua função principal é repor a quantidade de sólidos arrastada na coluna principal ou riser, assegurando a circulação contínua e adequada das partículas para o bom funcionamento do sistema. Neste estudo, conduzido no Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa, uma caldeira piloto de leito fluidizado circulante foi testada a frio para avaliar experimentalmente duas configurações de aeração da válvula loop-seal. Os resultados esperados incluem a identificação das condições de funcionamento eficiente do LFC, a análise da recuperação de sólidos e a comparação dos perfis de pressão estática com as respectivas quedas de pressão nos componentes riser e downcomer. Um total de 32 testes experimentais, programados sob planejamento fatorial 2^4 com repetição para verificação da reprodutibilidade dos experimentos, foram conduzidos para avaliar a influência das configurações de aeração aplicadas na válvula loop-seal sob dois níveis de velocidade de fluidização no riser, inventário total de sólidos e vazão volumétrica de aeração. Foram obtidas excelentes respostas do sistema dos testes, com os perfis de pressão axial correspondendo conforme a literatura, assim demonstrando a funcionalidade do sistema. Os resultados indicaram que a configuração A-C apresentou melhor desempenho em termos de estabilidade e menor variação de pressão em comparação com a configuração A-B. Além disso, verificou-se que a configuração de aeração influencia diretamente o comportamento do sistema, sendo um fator determinante para seu funcionamento eficiente em condições de maior velocidade de fluidização. Em testes com velocidades mais baixas, essa influência foi reduzida, sugerindo que a taxa de aeração aplicada deve estar alinhada às condições operacionais específicas do LFC.

Palavras-chave: LFC; Fluidização Gás-Sólido; *Loop Seal*; Aeração.

ABSTRACT

Solid recirculation valves, known as loop-seals, are crucial components in circulating fluidized bed (CFB) systems. Their main function is to replenish the amount of solids entrained in the main column or riser, ensuring the continuous and proper circulation of particles for the system's optimal operation. In this study, conducted at the Thermochemical Processes Laboratory of UTFPR/Campus Ponta Grossa, a pilot-scale circulating fluidized bed boiler was tested under cold conditions to experimentally evaluate two aeration configurations of the loop-seal valve. The expected results include identifying efficient operating conditions for the CFB, analyzing solid recovery, and comparing static pressure profiles with the corresponding pressure drops in the riser and downcomer components. A total of 32 experimental tests, designed under a 2^4 factorial plan with repetition to verify the reproducibility of the experiments, were conducted to assess the influence of the applied aeration configurations in the loop-seal valve under two levels of riser fluidization velocity, total solid inventory, and aeration volumetric flow rate. Excellent system responses were obtained from the tests, with axial pressure profiles corresponding to those reported in the literature, thereby demonstrating the system's functionality. The results indicated that the A-C configuration performed better in terms of stability and exhibited lower pressure variation compared to the A-B configuration. Furthermore, it was observed that the aeration configuration directly influences the system's behavior, being a determining factor for its efficient operation under higher fluidization velocity conditions. In tests with lower velocities, this influence was reduced, suggesting that the applied aeration rate should be aligned with the specific operational conditions of the CFB.

Keywords: CFB; Gas-Solid Fluidization; Loop Seal; Aeration.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema de caldeira flamotubular | 18 |
| Figura 2 – Esquema de caldeira aquatubular. | 18 |
| Figura 3 - Caldeira de leito fluidizado circulante. | 19 |
| Figura 4 - Componentes de uma caldeira de leito fluidizado circulante. | 22 |
| Figura 5 - Válvula <i>loop-seal</i> | 28 |
| Figura 6 - Configuração do sistema. | 31 |
| Figura 7 – Estrutura da Válvula <i>Loop-Seal</i> | 33 |
| Figura 8 - Fluxograma do Experimento. | 41 |
| Figura 9 – Perfis de pressão axial. | 43 |

LISTA DE FOTOGRAFIAS

| | |
|--|-----------|
| Fotografia 1 – Coluna de Sólidos no <i>Standpipe</i> | 32 |
| Fotografia 2 - Configuração A-B de Aeração | 33 |
| Fotografia 3 - Configuração A-C de Aeração | 34 |
| Fotografia 4 - Sistema de Aeração Auxiliar..... | 35 |
| Fotografia 5 - Sistema de Aeração Auxiliar..... | 36 |
| Fotografia 6 – Conjunto de peneiras utilizadas na determinação do tamanho médio de <i>Sauter</i>. | 37 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 – Média das pressões distribuídas no sistema..... | 45 |
| Gráfico 2 – Queda de pressão <i>Downcomer</i> | 46 |
| Gráfico 3 – Queda de pressão no <i>Riser</i> | 47 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----------|
| Tabela 1 - Procedimento Operacional. | 40 |
| Tabela 2 – Divisão de dados para análise ANOVA. | 48 |
| Tabela 3 – Hipóteses obtidas ANOVA. | 50 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | Objetivo Geral | 14 |
| 1.2 | Objetivos Específicos | 14 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 16 |
| 2.1 | Tipos de Caldeiras | 17 |
| 2.2 | Caldeiras de Leito Fluidizado Circulante (LFC) | 19 |
| 2.3 | Contexto Nacional | 21 |
| 2.4 | Componentes das Caldeiras de Leito Fluidizado Circulante | 22 |
| 2.4.1 | Escolha da partícula fluidizada | 22 |
| 2.4.2 | Riser | 23 |
| 2.4.3 | Ciclone | 24 |
| 2.4.4 | Standpipe | 25 |
| 2.4.5 | Válvulas de Recirculação dos Sólidos | 25 |
| 2.4.6 | Perfil da Pressão Estática | 25 |
| 2.5 | Válvulas <i>Loop-Seal</i> | 27 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| 3.1 | Descrição do Sistema | 30 |
| 3.2 | Escolha da Partícula | 37 |
| 3.3 | Propriedades Fluidodinâmicas | 38 |
| 3.4 | Configurações dos Testes | 39 |
| 3.5 | Fluxograma dos Testes | 40 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 42 |
| 4.1 | Resultados dos Testes Operacionais | 42 |
| 4.2 | Diferenças de Pressão | 44 |
| 4.2.1 | Pressão Média Total | 44 |
| 4.2.2 | Diferença de Pressão no Downcomer | 45 |
| 4.2.3 | Diferença de Pressão no Riser | 46 |
| 4.3 | Análise ANOVA | 47 |
| 5 | CONCLUSÃO | 51 |
| | REFERÊNCIAS | 53 |
| | APÊNDICES | 56 |
| | APÊNDICE A – Valores de pressão obtidos nos manômetros | 56 |
| | APÊNDICE B – Alturas de leito fixo e fluidizado obtidos | 57 |

1 INTRODUÇÃO

As caldeiras de leito fluidizado circulante (LFC) representam um avanço significativo na tecnologia de geração de vapor. Elas começaram a ser amplamente adotadas na indústria nas décadas de 1970 e 1980, especialmente com o aumento do interesse na busca por fontes de energia mais eficientes e ambientalmente sustentáveis. Desde então, as caldeiras de LFC se tornaram uma parte essencial da infraestrutura de geração de energia em muitas instalações industriais, principalmente na Europa, desempenhando um papel crucial na produção de calor e eletricidade de forma eficiente e ecologicamente correta (BASU; BUTLER, 2009).

Para assegurar a integridade de operação das caldeiras de leito fluidizado circulante, é imprescindível efetuar um controle eficaz do fluxo de recirculação de sólidos no interior da sua fornalha, o qual desempenha um papel fundamental na maximização das taxas de transferência de calor e massa dentro do sistema. Para alcançar essa gestão precisa, são utilizadas válvulas de acionamento pneumático, comumente denominadas *loop seal* (BASU; CHENG, 2000). Essas válvulas são essenciais na regulação do fluxo de sólidos no interior do leito fluidizado circulante, permitindo a manutenção das condições operacionais ideais e garantindo um desempenho eficiente do processo de combustão (OLIVEIRA, 2019; CHINSUWAN; SOMJUN, 2020).

De acordo com a pesquisa realizada por Oliveira (2019), é possível observar que a estratégia de aeração adotada na câmara *plenum* do *loop-seal* tem um impacto significativo no comportamento do perfil axial de pressão estática em sistemas de LFC. Além disso, a configuração operacional do sistema de LFC pode se beneficiar da utilização de múltiplos pontos de aeração (CHINSUWAN; SOMJUN, 2020). Essa abordagem permite um controle mais efetivo da distribuição de partículas no sistema, contribuindo diretamente para a estabilidade e uniformidade do processo de fluidização, resultando na prevenção de fenômenos indesejados, como por exemplo, o *slugging*.

Em estudo mais recente, Artmatsombat *et al.* (2023) concluíram que o uso de aeração lateral em conjunto com aeração na parte inferior da válvula *loop-seal* leva a um fluxo de circulação de sólidos maior em comparação com a aeração convencional realizada apenas da base da válvula. Dados apresentados por Chinswan e Somjun, (2020), apontam que é possível obter um fluxo de circulação de sólidos até cinco

vezes maior quando utilizadas aerações auxiliares laterais, além de que, a taxa de aeração necessária para iniciar a fluidização quando utilizado o modelo convencional é maior quando comparado aos testes com aeração auxiliar lateral na válvula *loop-seal*.

Dada a importância das caldeiras de leito fluidizado circulante como uma alternativa promissora para impulsionar o desenvolvimento sustentável através do aproveitamento energético de resíduos industriais e domésticos, minimizando as emissões de gases poluentes na geração de energia, é crucial compreender e otimizar suas condições operacionais. O perfil de pressão estática é um fator crítico nessa otimização, pois está diretamente ligado à distribuição de sólidos em todo o sistema, permitindo a identificação de potenciais problemas, como acúmulo de sólidos em áreas específicas e ocorrência de *slugging*.

Tendo em vista que a melhor escolha de configuração na aeração de uma válvula *loop seal* pode mudar de acordo com a geometria e a escala do sistema experimental, este estudo avalia duas configurações distintas de aeração da válvula *loop-seal* responsável pela recirculação dos sólidos de um protótipo de caldeira de leito fluidizado circulante localizado no Laboratório de Processos Termoquímicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa. O estudo pretende encontrar os efeitos produzidos na fluidodinâmica do sistema de LFC ao implementar as configurações escolhidas de aeração na válvula *loop seal* sob diferentes velocidades de fluidização, taxa de aeração e inventário de sólidos. Dessa forma, procura-se identificar as melhores condições de aeração do sistema para, futuramente, nortear a definição dos parâmetros para a operação da fornalha.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar experimentalmente o efeito da aplicação de duas configurações de aeração em uma válvula *loop-seal* na fluidodinâmica de um protótipo de caldeira de leito fluidizado circulante (LFC), operada em condições ambientais.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar as adequações necessárias no protótipo de caldeira LFC estudado.

- Identificar a reprodutibilidade dos dezesseis tratamentos experimentais definidos mediante testes realizados em duplicata, quando alterados a velocidade de fluidização, o inventário de sólidos e a taxa de aeração.
- Comparar os perfis axiais de pressão estática e as quedas de pressão nos principais componentes do sistema.
- Analisar a recuperação dos sólidos após cada teste realizado no sistema, a fim de verificar a situação da perda de inventário de partículas.
- Classificar as melhores condições de configuração da aeração da válvula *loop seal* do sistema, de acordo com as respostas obtidas a partir dos testes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Caldeiras são equipamentos industriais projetados para gerar vapor de água pressurizada através de aquecimento. O calor necessário para essa transformação é proveniente da queima de combustíveis como carvão, gás natural, óleo ou biomassa, ou de fontes alternativas como a eletricidade ou energia solar. Em ambientes industriais, as caldeiras são fundamentais devido à sua capacidade de gerar vapor, que é uma forma eficiente de transferir calor e desempenham um papel central na produção de energia, sendo componentes essenciais em usinas termoelétricas onde o vapor gerado é utilizado para mover turbinas que produzem eletricidade. Além disso, muitas indústrias utilizam vapor para aquecer fluidos, materiais e espaços, como na indústria química, onde o vapor é usado para aquecer reatores e colunas de destilação (SMITH; JONES, 2020).

A geração de vapor também é crucial em processos industriais específicos, como nas indústrias de papel e celulose, têxtil, alimentícia e farmacêutica, onde o vapor é empregado em etapas como secagem, esterilização e cozimento. Em sistemas de aquecimento de grandes edifícios e instalações industriais, as caldeiras são usadas para fornecer aquecimento central e água quente (KAKAC; LIU, 2002). Ademais, em ambientes que requerem alta limpeza e esterilização, como hospitais e fábricas de produtos farmacêuticos, o vapor gerado por caldeiras é utilizado para esterilizar equipamentos e materiais.

Por conseguinte, a realização de testes em laboratório para replicar a realidade operacional das caldeiras é imprescindível, tendo em vista que realizar testes cegos com esse tipo de equipamento é extremamente perigoso, dadas suas condições de operação. Caldeiras operam sob alta pressão e temperatura e podem explodir se houver falhas, colocando em risco vidas humanas e causando danos significativos às instalações, como descrito na NR-13 de 1978, responsável por regulamentar a operação de Caldeiras e Vasos de Pressão no Brasil. Sendo assim, estes testes são cruciais para garantir que as caldeiras operem de forma segura e eficiente em ambientes industriais. Eles simulam as condições reais de operação e permitem a avaliação de diferentes aspectos do desempenho da caldeira, tais como eficiência térmica, emissões de poluentes e integridade estrutural dos materiais (CHAWNER *et al.*, 2017).

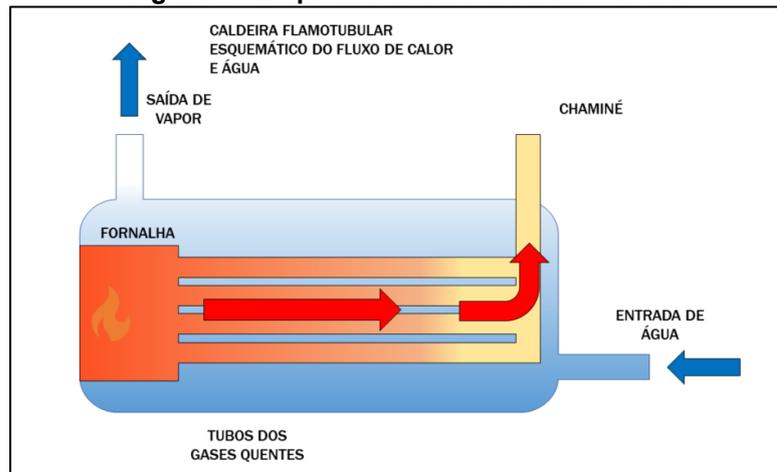
Portanto, testes laboratoriais auxiliam, também, na identificação de potenciais falhas e na implementação de medidas de segurança adequadas para prevenir acidentes (ASME, 2018). Além disso, os testes de desempenho não só possibilitam a otimização da operação da caldeira, garantindo que opere com máxima eficiência energética, mas também abrem portas para o desenvolvimento técnico-científico no caso de caldeiras de leito fluidizado, menos conhecidas ou aplicadas no Brasil. Através de novos estudos, tem-se a oportunidade de explorar tecnologias, materiais e métodos de operação que contribuem para a inovação e sustentabilidade no setor de geração de vapor.

2.1 Tipos de Caldeiras

Atualmente, existem diversos tipos de caldeiras utilizadas em aplicações industriais e comerciais, cada uma projetada para atender a requisitos específicos de operação e eficiência. Entre os tipos mais comuns estão as caldeiras flamotubulares e aquatubulares, que diferem significativamente em seu projeto e princípios de funcionamento.

As caldeiras flamotubulares, também conhecidas como caldeiras de tubos de fogo, são caracterizadas pela passagem dos gases quentes da combustão através de tubos cilíndricos que são circundados pela água a ser aquecida. Este tipo de caldeira é amplamente utilizado em aplicações de menor capacidade e pressão, onde a simplicidade construtiva e a facilidade de manutenção são vantagens desejáveis. A eficiência térmica dessas caldeiras pode variar dependendo do arranjo dos tubos e da taxa de transferência de calor (BAGGIO, 2008).

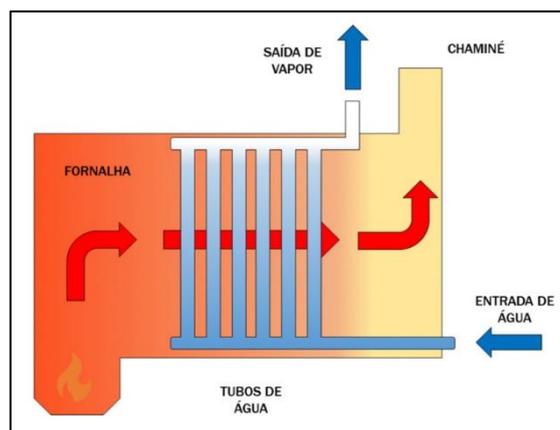
Figura 1 - Esquema de caldeira flamotubular



Fonte: Togawa Engenharia (2020).

Por outro lado, as caldeiras aquatubulares têm um projeto onde a água circula dentro dos tubos e os gases quentes da combustão passam ao redor desses tubos. Esta configuração permite uma transferência de calor mais eficiente devido à maior superfície de troca térmica e à capacidade de operar sob pressões mais altas (BAGGIO, 2018). Caldeiras aquatubulares são frequentemente utilizadas em aplicações industriais de médio a grande porte, como em usinas de energia elétrica, onde a geração de vapor em grande escala é necessária.

Figura 2 – Esquema de caldeira aquatubular.

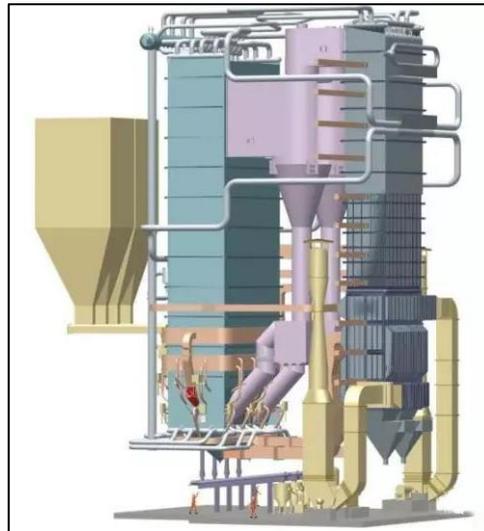


Fonte: BurnTech (2024).

Um tipo especializado de caldeira é a caldeira de leito fluidizado circulante (CFB – *Circulating Fluidized Bed* ou LFC – Leito Fluidizado Circulante). Esta caldeira (Figura 3) utiliza um leito de material sólido (normalmente areia) que é mantido em suspensão por meio da introdução de ar sob pressão. Os sólidos são misturados com o combustível na parte inferior do leito, onde a combustão ocorre a temperaturas

controladas. Este projeto permite uma eficiente transferência de calor e uma baixa emissão de poluentes, especialmente óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre com ajuda de aditivos. A capacidade de operar com uma variedade de combustíveis, incluindo resíduos de biomassa e carvão de baixa qualidade, faz delas uma escolha atrativa para aplicações industriais que exigem flexibilidade e sustentabilidade ambiental (BASU, 2018).

Figura 3 - Caldeira de leito fluidizado circulante.



Fonte: Xinli Boiler (2020).

Segundo Kakac e Liu (2002), caldeiras de leito fluidizado circulante são especialmente adequadas para processos que exigem controle rigoroso de emissões e eficiência energética, tornando-se uma tecnologia promissora em várias indústrias, representando uma evolução significativa no campo das tecnologias de geração de vapor, combinando eficiência energética com sustentabilidade ambiental.

2.2 Caldeiras de Leito Fluidizado Circulante (LFC)

As caldeiras de leito fluidizado circulante (LFC) são amplamente reconhecidas por sua eficiência e versatilidade em diversas aplicações industriais ao redor do mundo. Este tipo de caldeira utiliza um leito de material sólido, como areia, calcário ou carvão, mantido em suspensão por meio da introdução de ar sob pressão, criando um ambiente ideal para a queima eficiente de combustíveis sólidos. A tecnologia de leito fluidizado circulante permite uma transferência de calor eficaz e uma combustão

controlada, resultando em baixas emissões de poluentes, como óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre.

As caldeiras de LFC são utilizadas frequentemente em indústrias que requerem flexibilidade operacional e controle minucioso das emissões de gases poluentes, como na geração de energia elétrica, produção de biomassa, co-combustão de resíduos industriais e até mesmo na indústria química para processos de produção de calor e vapor. A capacidade de operar com uma ampla variedade de combustíveis, incluindo biomassa e carvão de baixa qualidade, torna-as uma escolha atrativa para empresas que buscam otimizar a eficiência energética e reduzir custos operacionais enquanto minimizam o impacto ambiental (BASU, 2018).

Em termos de adoção global, países como China se destacam como líderes na implementação de caldeiras de leito fluidizado circulante devido à sua alta demanda por energia e a políticas ambientais cada vez mais rigorosas. Atualmente, a China se destaca como uma potência industrial global, consumindo cerca de 25% da energia mundial em 2020 e mantendo uma produção industrial robusta que impulsiona sua economia (IEA, 2021). Diante dos desafios ambientais associados ao exuberante uso de energia, o país tem adotado tecnologias avançadas como as caldeiras de leito fluidizado circulante (LFC) para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de poluentes atmosféricos. Estas caldeiras são essenciais para atender à demanda crescente por energia de maneira mais sustentável, alinhando-se com as estritas normas ambientais chinesas que regulam gases como óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre (ZHANG *et al.*, 2020).

Além da China, regiões na Europa também têm visto um aumento significativo no uso de caldeiras de leito fluidizado circulante. Países como Alemanha e Dinamarca têm implementado essa tecnologia como parte de suas estratégias para transição energética, aproveitando os benefícios de eficiência e baixas emissões que as caldeiras de LFC oferecem (IEA, 2021). Na América do Norte, especialmente nos Estados Unidos e Canadá, a adoção de caldeiras de leito fluidizado circulante também está em ascensão, movida principalmente pela necessidade de diversificação das fontes de energia.

Sendo assim, o uso crescente de caldeiras de LFC reflete não apenas uma resposta às exigências ambientais e de eficiência energética como citado anteriormente, mas também ao compromisso com a inovação tecnológica e o desenvolvimento sustentável. A contínua pesquisa e desenvolvimento neste campo

visam melhorar ainda mais o rendimento das caldeiras de leito fluidizado circulante, expandindo suas aplicações e refinando suas capacidades de adaptação a diferentes tipos de combustíveis e condições operacionais.

2.3 Contexto Nacional

No contexto brasileiro, as caldeiras de leito fluidizado circulante oferecem uma solução eficaz para as demandas energéticas do país enquanto mitigam os impactos ambientais. Apesar de ainda não serem amplamente adotadas no Brasil, algumas grandes indústrias já utilizam essa tecnologia avançada. O Brasil, como um dos maiores consumidores de energia do mundo, enfrenta o desafio de equilibrar o crescimento econômico com a necessidade de reduzir as emissões de poluentes. As LFCs são especialmente vantajosas devido à sua capacidade de operar com uma variedade de combustíveis, incluindo biomassa abundante no país, como resíduos agrícolas e florestais, essenciais para promover a sustentabilidade energética e ambiental (IEA, 2020; ABESCO, 2023).

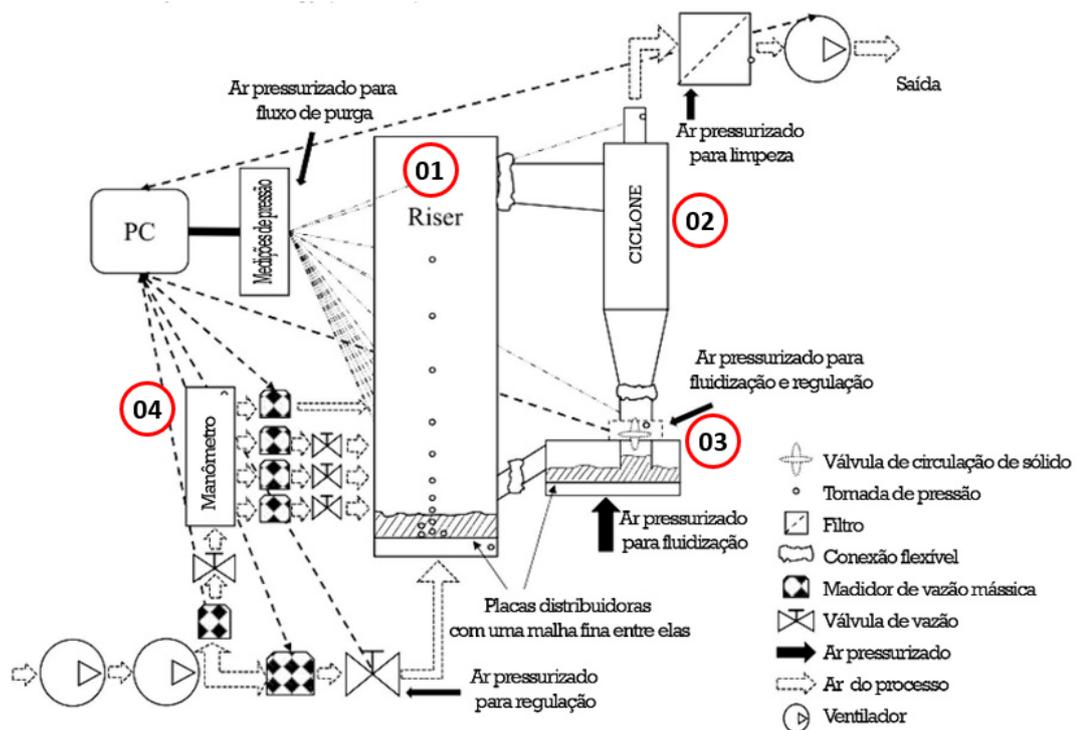
Além disso, essas tecnologias avançadas são fundamentais para atender aos padrões ambientais brasileiros, que regulam gases como óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre, reforçando o compromisso do país com práticas industriais mais limpas e eficientes (PEREIRA; FREIRE, 2021; MULLER; ORTEGA, 2019). No entanto, a implementação e expansão das caldeiras de LFC no Brasil requer investimentos significativos em infraestrutura e capacitação técnica, destacando a necessidade de políticas públicas que incentivem a adoção de tecnologias sustentáveis e o desenvolvimento de habilidades locais para operação e manutenção desses equipamentos.

Um exemplo concreto do potencial das caldeiras de LFC no Brasil pode ser visto em investimentos realizados em usinas de energia no Rio Grande do Sul, conforme destacado em um leilão que viabilizou aproximadamente R\$ 5 bilhões em investimentos para a construção de novas unidades geradoras no estado (G1, 2014). Este tipo de iniciativa não só impulsiona a economia local e regional, criando empregos e oportunidades de desenvolvimento, mas também promove a modernização da infraestrutura energética brasileira, alinhando-a com padrões globais de sustentabilidade e eficiência.

2.4 Componentes das Caldeiras de Leito Fluidizado Circulante

Para concernir efetivamente a aplicabilidade de uma caldeira de LFC, a compreensão de seus componentes é imprescindível, tendo em vista a possibilidade de explorar cada um desses elementos dentro do contexto operacional e funcional da tecnologia. As caldeiras com fornalhas de LFC são reconhecidas por sua capacidade de queimar eficientemente uma ampla variedade de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, proporcionando flexibilidade significativa nas aplicações industriais. Cada componente desempenha um papel específico e interligado no processo de geração de vapor e controle de emissões, fundamentais para o desempenho otimizado e sustentável conforme descrito a seguir.

Figura 4 - Componentes de uma caldeira de leito fluidizado circulante.



Fonte: Adaptado de WU, Wanqiang *et al.* (2024).

2.4.1 Escolha da partícula fluidizada

As caldeiras de leito fluidizado circulante oferecem uma flexibilidade notável na escolha das partículas a serem fluidizadas, o que constitui uma de suas principais vantagens operacionais. A seleção adequada dos materiais de leito é importante para otimizar a eficiência da combustão, a transferência de calor e a minimização de

emissões de poluentes. Entre os materiais mais comumente utilizados está a areia de quartzo, devido às suas propriedades físicas e químicas favoráveis.

A areia de quartzo é frequentemente escolhida como material de leito devido à sua alta resistência ao calor e estabilidade química, o que a torna ideal para suportar as altas temperaturas e reações químicas intensas presentes nas caldeiras de LFC. Sua granulometria uniforme e densidade adequada permitem uma fluidização eficiente, garantindo uma boa mistura dos combustíveis com o agente oxidante, o que é essencial para uma combustão completa e eficiente. Além disso, a dureza da areia de quartzo reduz o desgaste dos componentes internos da caldeira, prolongando a vida útil do equipamento (WANG *et al.*, 2015).

Além da areia de quartzo, outras partículas como cinzas volantes, calcário e diversos tipos de biomassa podem ser utilizados, dependendo das necessidades específicas da operação e das características do combustível primário. Por exemplo, o calcário é frequentemente utilizado em conjunto com combustíveis que possuem enxofre para capturar dióxido de enxofre (SO₂), contribuindo para a redução das emissões de gases ácidos (ARENA, 2013). As cinzas volantes, um subproduto de combustão, também podem ser recicladas como material de leito, promovendo a sustentabilidade ao reduzir os resíduos sólidos.

Dado o contexto socioeconômico brasileiro, a flexibilidade na escolha das partículas a serem fluidizadas é particularmente vantajosa. A utilização de resíduos agrícolas e industriais como biomassa, por exemplo, pode ser integrada como parte do material de leito, promovendo a economia circular e agregando valor a resíduos que, de outra forma, seriam descartados. Esta abordagem não só melhora a eficiência energética e a sustentabilidade das caldeiras de LFC, mas também oferece uma solução economicamente viável para o aproveitamento de resíduos locais.

2.4.2 Riser

Identificado como 01 na Figura 4, o *riser* representa o componente da fornalha onde se desenvolve a combustão e oferece espaço para as operações de transferência de calor dentro do sistema. Localizado verticalmente, permite a ascensão dos gases de combustão e das partículas sólidas sob a influência de um fluxo de ar ou gás oxidante, facilitando uma mistura intensa entre o combustível sólido e o agente oxidante (OLIVEIRA, 2019). Essa configuração cria condições ideais para uma queima completa, promovendo a geração de calor necessário para a produção

de vapor e favorecendo a transferência de calor para o fluido de trabalho transportado pelos tubos da caldeira.

Além de sua função central na combustão, o *riser* é determinante na eficiência térmica global da caldeira. Ao otimizar a interação entre os gases quentes e as partículas sólidas, maximiza a eficiência energética do sistema como um todo, reduzindo perdas térmicas indesejadas e aumentando a capacidade de geração de vapor.

2.4.3 Ciclone

O ciclone realiza um dos papéis mais críticos na operação de uma caldeira de LFC, sendo responsável direto pela separação de partículas sólidas dos gases de combustão. Posicionado estrategicamente, indicado como 02 na Figura 4, o ciclone utiliza a força centrífuga para separar as partículas sólidas dos gases, retendo-as dentro do sistema. Este processo de separação é essencial para minimizar as emissões de material particulado e manter a eficiência da combustão, garantindo que os gases liberados na atmosfera sejam significativamente mais limpos (CREMASCO, 2002).

Ao remover eficazmente as partículas sólidas dos gases de combustão, ele permite que estas partículas sejam recirculadas e queimadas novamente, maximizando a utilização do combustível. Esta recirculação contínua não só melhora a eficiência térmica da caldeira, mas também reduz a necessidade de reposição de material inerte (areia) e de combustível, resultando em economia de custos operacionais (BASU, 2009; ARENA, 2013).

Em sistemas de LFC de pequena escala, como o estudado neste TCC, falhas no desempenho do ciclone podem ser facilmente provocadas por sobrecarregamento, levando à perda súbita de inventário de sólidos durante a operação. Esse sobrecarregamento pode ser evitado com ajustes ou melhorias no projeto do conjunto ciclone-*standpipe* ou, alternativamente, por adequação na operação do sistema, onde parâmetros como a velocidade de fluidização, a configuração e a taxa de aeração da válvula *loop seal*, e o inventário de sólidos são determinantes (FILHO *et al.*, 2023).

2.4.4 *Standpipe*

O *standpipe* tem a função de transportar, usando a ação da gravidade, os sólidos capturados pelo ciclone para serem entregues à válvula recirculação ou *loop seal*. O seu dimensionamento determina o potencial de acúmulo de sólidos e, portanto, da regulagem do fluxo de sólidos dentro do sistema, podendo afetar também a eficiência de separação do ciclone e as características do escoamento das partículas (GRACE *et al.*, 1997).

2.4.5 *Válvulas de Recirculação dos Sólidos*

As válvulas de recirculação dos sólidos ou *loop-seals* representam o componente crítico das fornalhas de leito fluidizado circulante. Identificada como 03 na Figura 4, essas válvulas são responsáveis por manter a pressão diferencial e a circulação contínua de sólidos entre diferentes partes do sistema, como o *riser* e o *standpipe*. Estas válvulas funcionam criando um selo hidráulico que impede o retorno indesejado de gases e materiais sólidos, assegurando que o fluxo de sólidos permaneça unidirecional e estável. Elas têm a função principal de controlar o fluxo da recirculação dos sólidos mediante acionamento pneumático, conhecida como aeração. Essa função é vital para evitar interrupções no processo de combustão e para garantir que os sólidos sejam recirculados de forma eficiente, contribuindo para uma queima mais completa e eficaz do combustível (BASU, 2006).

A configuração de aeração das válvulas *loop-seal* é um aspecto extremamente importante na otimização da operação de uma fornalha de LFC. A aeração adequada garante uma distribuição uniforme do fluxo de ar, o que é crucial para manter a fluidização correta dos sólidos e prevenir a formação de aglomerações ou canais preferenciais que poderiam comprometer a eficiência do sistema (PECETE, 2023). Uma aeração bem configurada melhora a combustão e a transferência de calor na região do *riser*, aumenta a eficiência térmica da caldeira, reduz o desgaste dos componentes internos e minimiza as emissões de poluentes (GRACE *et al.*, 1997; LI *et al.*, 2016).

2.4.6 *Perfil da Pressão Estática*

O perfil da pressão estática em um sistema de LFC está estreitamente relacionado à distribuição da massa dos sólidos (ou inventário) ao longo do

equipamento. A forma desse perfil de pressão reflete as características da fluidização dos sólidos, afetando a eficiência da combustão e a transferência de calor. Existem vários instrumentos para medir a pressão estática em uma caldeira LFC, dentre eles, manômetros de coluna em U e transdutores de pressão.

Manômetros de coluna em U, indicado como ponto 04 na Figura 4, são dispositivos clássicos de medição de pressão que utilizam uma coluna de líquido, como mercúrio ou água, para medir a pressão relativa ou absoluta (ÇENGEL; CIMBALA, 2013). No contexto de uma caldeira de LFC, manômetros de coluna em U são frequentemente utilizados em escala laboratorial devido à sua simplicidade e confiabilidade. Eles são instalados em pontos estratégicos ao longo do sistema de caldeira para monitorar a pressão em diferentes componentes, como no *riser*, no *standpipe*, nas extremidades do ciclone e na válvula de recirculação de sólidos.

O uso de manômetros em um sistema de fluidização rápida é extremamente importante, tendo em vista a necessidade de monitorar e controlar a distribuição da pressão ao longo do sistema. A manutenção de um perfil de pressão adequado é imprescindível para garantir que os parâmetros de fluidização estejam corretos e que, conseqüentemente, os sólidos permaneçam em movimento. Por exemplo, a pressão diferencial entre o *riser* e o ciclone deve ser cuidadosamente controlada para assegurar a recirculação eficaz das partículas sólidas. Desvio nos perfis de pressão característicos são fortes indicadores de problemas no sistema, que podem comprometer tanto a sua operação, quanto a segurança, dentre eles: bloqueios no transporte ou acúmulo de sólidos em componentes, que geram focos de superaquecimento; quedas excessivas de pressão em zonas do equipamento, que elevam o custo operacional; esvaziamento ou perda acelerada do inventário de sólidos, que origina resfriamento rápido da fornalha; e falhas no fornecimento da aeração, que limita o fluxo de recirculação das partículas para atender a demanda da transferência de calor.

A análise de perfis de pressão em condições ambiente (ou a frio) é importante para estabelecer a regulação requerida na distribuição do inventário de sólidos durante a fase inicial de partida de uma fornalha de LFC, onde a temperatura não é ainda um fator relevante. Essa análise é facilmente realizável em equipamentos em escala laboratorial que, ao manter perfis de pressão consistentes nas condições de partida, facilitam o ajuste posterior dos parâmetros operacionais do sistema durante a etapa do aquecimento gradativo da fornalha, até ela alcançar o início e a manutenção

da combustão do combustível perto de 850°C. Os benefícios desse procedimento ficam evidentes nos registros experimentais da queima de carvão mineral brasileiro em LFC apresentados por Ramirez Behainne (2007).

2.5 Válvulas *Loop-Seal*

A eficiência operacional de uma caldeira de leito fluidizado circulante depende de uma série de fatores que influenciam diretamente seu rendimento, como o consumo de combustível e, conseqüentemente, a emissões de gases poluentes durante o processo.

Atualmente, a busca por maior eficiência energética e sustentabilidade ambiental impulsiona inovações e aprimoramentos nas operações industriais, sendo assim, entre os métodos mais eficazes para otimizar a operação de caldeiras LFC, destacam-se as melhorias voltadas ao controle do fluxo de ar e temperatura do leito, bem como aos ajustes dos fluxos de recirculação dos sólidos.

Uma das etapas imprescindíveis para aprimorar a operação de uma caldeira LFC é garantir a correta distribuição das linhas de alimentação de ar no sistema. O ar de fluidização é introduzido na base do leito, desempenhando um papel crucial na manutenção da dispersão das partículas sólidas, sua correta operação promove uma distribuição uniforme, favorecendo uma combustão mais completa, dada a uniformidade da temperatura no decorrer do sistema, evitando a formação de pontos quentes e frios no leito, que podem prejudicar a eficiência da queima (KUNNI; LEVENSPIEL, 1991).

A recirculação de sólidos também é um ponto crítico na operação de caldeiras de leito fluidizado circulante, principalmente no controle da densidade no decorrer do leito (BASU, 2009). Recircular os sólidos, que incluem partículas inertes e fragmentos de combustível não queimado, como a areia quartzosa, permite uma melhor utilização do combustível, favorecendo a eficiência da combustão e a distribuição uniforme do calor transferido. O alto fluxo de recirculação dos sólidos melhora a eficiência térmica e também reduz a formação de pontos quentes, assim como a presença de canais preferenciais decorrentes da aeração do sistema.

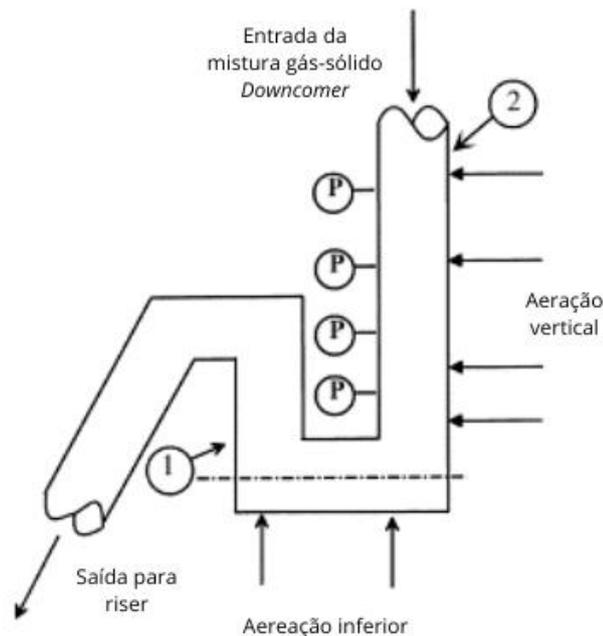
Um dos principais componentes utilizados na operação de caldeiras de LFC são as válvulas *loop-seal*. Como anteriormente descrito, essas válvulas desempenham função essencial no controle do fluxo de sólidos reciclados. As válvulas *loop-seal* permitem a passagem dos sólidos reciclados enquanto evitam o escape de

gases, contribuindo para a manutenção da pressão e da temperatura do sistema, assim como também são projetadas para suportar altas temperaturas, o que garante não só a sua durabilidade, mas também a confiabilidade do equipamento (LEE *et. al.*, 2023).

A estrutura principal da válvula *loop-seal* é o canal de recirculação em forma de U, que atua como um selo hidráulico para sólidos. Este canal contém um leito de material granular inerte, geralmente areia, que flui continuamente entre a saída do ciclone e a entrada do reator (*riser*). A altura do material no canal cria uma coluna de pressão que impede a passagem de gases, permitindo apenas a movimentação dos sólidos. A configuração da válvula inclui sistemas de fluidização com injeção de ar em pontos diferentes, que ajudam a manter o movimento das partículas sólidas.

Usualmente, a configuração de aeração das válvulas *loop-seal* envolve apenas a injeção de ar na sua base. Normalmente, este método de aeração torna-se suficiente para fluidizar os sólidos e garantir seu fluxo contínuo de volta ao *riser* (WANG, 2022). A injeção de ar na base ajuda a prevenir a formação de aglomerados e entupimentos, mantendo a integridade do equipamento e garantindo a eficiência do sistema de recirculação de sólidos na caldeira.

Figura 5 - Válvula *loop-seal*.



Fonte: Adaptado de KIM, Sung Won; KIM, Sang Done (2002).

No entanto, as válvulas *loop-seal* podem adotar diferentes configurações, com múltiplas zonas de aeração ao longo da válvula. Ao injetar ar em diferentes pontos do sistema, é possível controlar com mais precisão a fluidização dos sólidos em cada seção do componente, resultando numa melhor adaptabilidade às variações nas condições operacionais e na carga de sólidos.

Ademais, em grandes sistemas industriais, a aeração auxiliar pode ser equipada com controles automáticos que ajustam dinamicamente a quantidade e a pressão do ar de acordo com os dados fornecidos por sensores de pressão e temperatura. Esses sistemas permitem uma operação mais responsiva, adaptando-se rapidamente às mudanças nas condições do processo e melhorando a eficiência geral da caldeira (HAN, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo pode ser caracterizado como uma pesquisa experimental. A escolha da metodologia de análise fatorial para o desenvolvimento deste trabalho se deve à sua capacidade de lidar com a multidimensionalidade dos dados experimentais. A análise fatorial permite identificar e isolar os fatores que influenciam diretamente na fluidodinâmica do protótipo de caldeira de leito fluidizado circulante estudado, facilitando a compreensão das relações entre variáveis independentes e dependentes.

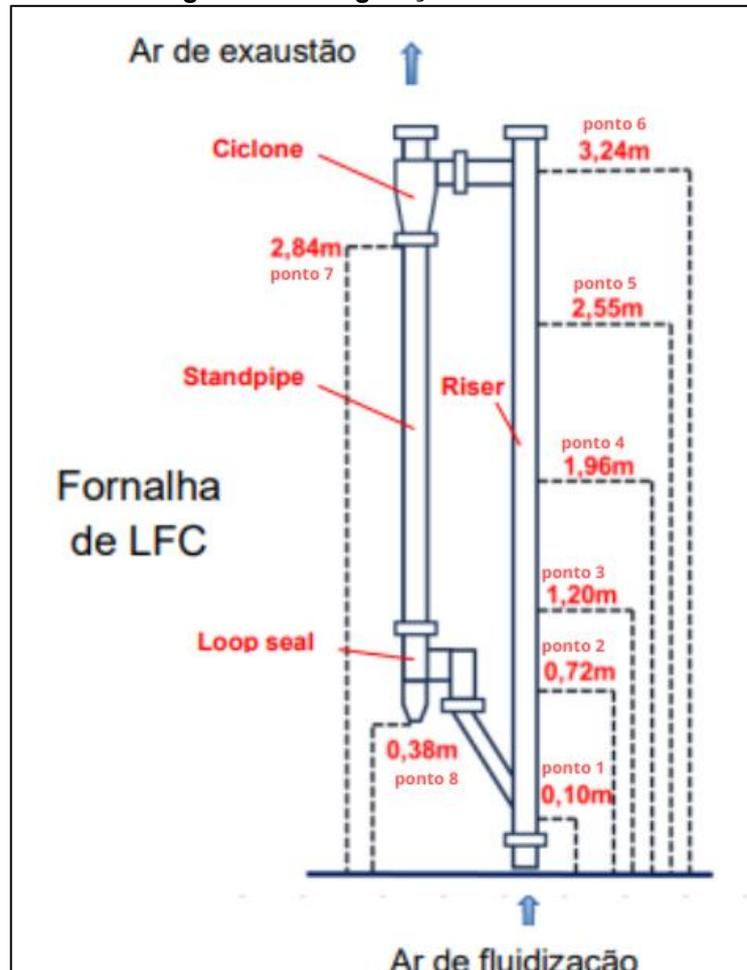
Esta abordagem é particularmente útil para fixar e controlar variáveis específicas enquanto se avaliam os efeitos de diferentes configurações de aeração na válvula *loop-seal*. A análise fatorial também fornece uma estrutura eficaz na identificação de padrões e relações entre os dados, permitindo uma comparação precisa entre as diferentes condições experimentais e a classificação das melhores condições de aeração. Conforme Hair et al. (2019), a análise fatorial é uma técnica poderosa para simplificar a complexidade dos dados e proporcionar melhorias claras e objetivas em estudos de engenharia e ciências aplicadas.

3.1 Descrição do Sistema

O sistema analisado possui a configuração apresentada na Figura 6, que mostra os componentes *riser*, ciclone, *standpipe* e válvula *loop-seal* da fornalha de LFC. A fornalha é construída em aço inoxidável refratário AISI 310, material escolhido pela sua capacidade de suportar altas temperaturas. Ao longo do circuito de fluidização, há oito tomadas de pressão estática estrategicamente posicionadas, para permitir a determinação experimental das quedas de pressão nos diversos componentes do equipamento.

O *riser* tem diâmetro interno de 0,041 m e uma altura de 3,24 m, conectando ao ciclone por uma tubulação de aproximadamente 0,2 m. Já o ciclone, responsável pela separação de sólidos do sistema, possui um corpo principal com diâmetro interno de 0,078 m e segue as relações geométricas de um ciclone do tipo Swift, conhecido por sua alta eficiência de captura de sólidos. O design geométrico específico do ciclone Swift permite uma separação eficaz, mesmo em condições de alta carga de sólidos, minimizando a perda de pressão e garantindo um desempenho estável (CREMASCO, 2002).

Figura 6 - Configuração do sistema.



Fonte: Adaptado de Junior et al., 2023.

A entrada tangencial do gás cria um movimento espiral, que empurra as partículas para as paredes do ciclone, onde elas perdem energia cinética e caem na seção de coleta na base do ciclone.

Para este estudo realizado em condições ambiente, o *standpipe* originalmente confeccionado em aço inoxidável AISI 310 foi trocado por outro da mesma dimensão, porém construído em acrílico, tendo diâmetro interno de 0,025m e altura de 2,21m, permitindo a visualização direta da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido neste componente do sistema, conforme apresentado pela Fotografia 1. Essa adaptação do equipamento foi necessária para identificar alguns problemas operacionais relatados em trabalhos anteriores (JUNIOR et al., 2023). A transparência do *standpipe* permitiu verificar situações com potenciais gargalos operacionais, como acúmulos de partículas por dificuldades no transporte e a ocorrência de fenômenos indesejados,

como *slugging*. O *slugging* é caracterizado pela formação de bolhas grandes e instáveis de gás que podem perturbar o fluxo de partículas e comprometer a eficiência do sistema. A capacidade de observar diretamente o comportamento das partículas no *standpipe* possibilita intervenções rápidas e precisas sobre esses problemas. Além disso, a transparência do *standpipe* permite a medição da altura do leito fixo antes e durante o processo de fluidização, quando aplicável, fornecendo dados essenciais para a análise do rendimento do sistema.

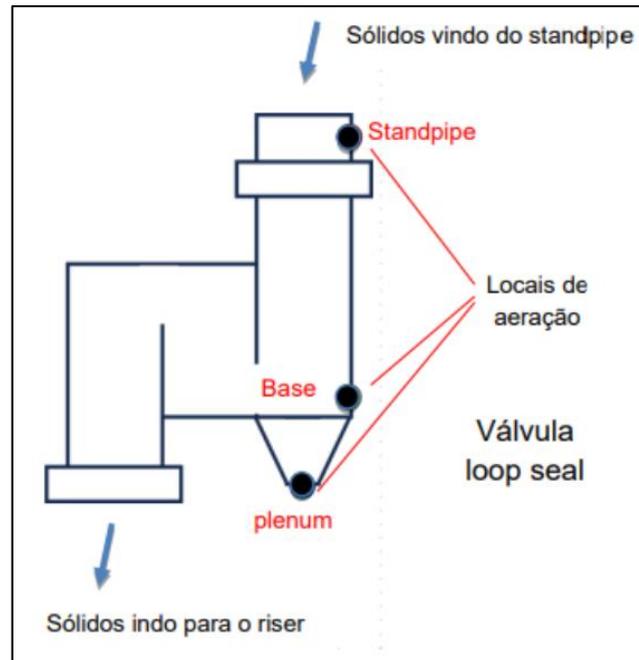
Fotografia 1 – Coluna de Sólidos no *Standpipe*



Fonte: Os autores, 2024.

A válvula *loop-seal*, localizada na base do *standpipe*, tem a função de garantir que os sólidos sejam continuamente recirculados dentro do sistema, mantendo a fluidização eficiente e estável. Além disso, a válvula é projetada para distribuir o ar de fluidização de maneira uniforme, evitando a formação de canais preferenciais e garantindo uma mistura homogênea de partículas.

Figura 7 – Estrutura da Válvula *Loop-Seal*.



Fonte: Adaptado de Junior et al., 2023.

A Figura 7 mostra a estrutura da válvula *loop-seal*, o fluxo das partículas em seu interior bem como os pontos de aeração que foram utilizados.

Fotografia 2 - Configuração A-B de Aeração



Fonte: Os autores, 2024.

Para a realização dos testes experimentais foram propostas duas configurações distintas de aeração para a válvula *loop-seal*. A primeira configuração, chamada de A-B, conta com aeração através da base da válvula *loop-seal* (ponto A) em conjunto com aeração no *plenum* (ponto B), conforme indicado na Fotografia 2.

Fotografia 3 - Configuração A-C de Aeração



Fonte: Os autores, 2024.

Já, a segunda configuração escolhida, identificada como A-C, tem sua aeração através da base da válvula *loop-seal* (ponto A), juntamente com aeração no *standpipe* (ponto C). Conforme indicado na Fotografia 3.

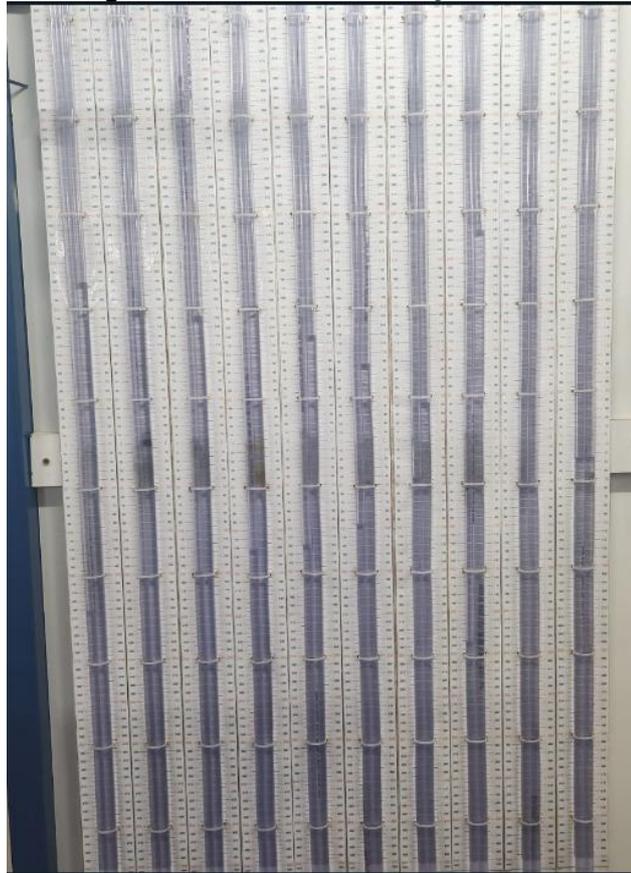
Fotografia 4 - Sistema de Aeração Auxiliar.



Fonte: Os autores, 2024.

Todo o ar é fornecido por um compressor do tipo parafuso marca FIAC com potência de 25 hp, sendo este distribuído por mangueiras de poliuretano entre as entradas do sistema e a distribuição auxiliar, conforme apresentado na Fotografia 4.

Fotografia 5 - Sistema de Aeração Auxiliar.



Fonte: Os autores, 2024.

O sistema de aeração auxiliar é responsável por manter a assiduidade dos dados de pressão axial lidos, evitando com que as conexões de ar entupam e interfiram nas medições realizadas pelos manômetros de tubo em U, representado na Fotografia 5.

O sistema de medição de pressão axial é composto por oito tomadas de pressão, posicionadas ao longo do sistema, que são conectadas a manômetros de tubo em U, com capacidade de medição máxima de 1.000 mmH₂O. Essas tomadas permitem a leitura das quedas de pressão em diferentes alturas do *riser*, proporcionando dados essenciais para a análise do perfil de pressão estática do sistema. Os manômetros de tubo em U foram escolhidos por sua simplicidade e precisão, permitindo a visualização direta das variações de pressão e facilitando a identificação de quaisquer anomalias ou desvios no comportamento esperado do escoamento gás-sólido.

3.2 Escolha da Partícula

No contexto da classificação aerodinâmica de partículas propostas por Geldart (1973), as válvulas de aeração não mecânica demonstram eficácia notável quando utilizadas com partículas do Grupo B (BASU, 2006). A areia escolhida para este estudo pertence a esse grupo de partículas.

O valor do diâmetro de Sauter foi obtido a partir da análise granulométrica com peneiramento feito em duplicata, sendo uma técnica utilizada para determinar o diâmetro médio das partículas do material sólido não homogêneo por meio de barreiras físicas. Estas barreiras são as peneiras sobrepostas em ordem decrescente em relação ao tamanho de suas aberturas nas malhas em um sistema de agitação. O valor da aberturada malha é descrito a partir do número Mesh com seu equivalente em micrômetros (CREMASCO, 2002).

Fotografia 6 – Conjunto de peneiras utilizadas na determinação do tamanho médio de Sauter.



Fonte: Os autores, 2024.

Para a realização dos experimentos de fluidização, foi utilizado um lote de aproximadamente 20 kg de areia quartzosa comercial, com tamanho de partícula previamente selecionado na faixa de 150 a 300 μm , utilizando peneiras de alta capacidade. Posteriormente, amostras aleatórias da areia preparada foram submetidas a análise granulométrica utilizando malhas da série Tyler, montadas sobre agitador eletromagnético, conforme ilustrado na Fotografia 6.

A análise granulométrica determinou um diâmetro médio de *Sauter* de 200 μm . A densidade da partícula, adotada de estudos anteriores realizados por Pecete, (2023), foi de 2652 kg/m^3 .

Os valores de densidade e diâmetro das partículas confirmaram que estas pertencem ao Grupo B de Geldart, sendo adequadas para utilização em fornalhas de leito fluidizado circulante.

3.3 Propriedades Fluidodinâmicas

Para determinar os valores operacionais referentes à vazão de ar necessária no sistema experimental, foi calculada a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) essencial para iniciar a fluidização do leito com inventário compactado na válvula de recirculação de sólidos, a partir da Equação (1). Todas as equações utilizadas para realizar os cálculo foram retiradas de Basu (2006):

$$Re_{mf} = \frac{Re_{mf} \mu}{d_p \rho_g} \quad (1)$$

Nesta equação, d_p representa o diâmetro médio de *Sauter* definido no item 3.2 como $200\mu\text{m}$, μ é a viscosidade do gás e, por fim, Re_{mf} é o número de Reynolds na condição de mínima fluidização.

O número de Reynolds na condição de mínima fluidização é um parâmetro adimensional que caracteriza o regime de escoamento do fluido através do leito de partículas no ponto em que as partículas começam a se mover e a fluidizar. Para o estudo em questão, o mesmo foi definido a partir da equação que o relaciona ao número de Arquimedes, conforme a Equação (2).

$$Re_{mf} = [27,2^2 + 0,0408Ar]^{0,5} - 27,2 \quad (2)$$

O número de Arquimedes (Ar) é um parâmetro adimensional que descreve a relação entre as forças de empuxo e de viscosidade que atuam sobre uma partícula em um fluido. É calculado utilizando o diâmetro das partículas, a densidade das partículas e do fluido, a aceleração da gravidade e a viscosidade do fluido (BASU, 2006). Este número é essencial para determinar a condição de mínima fluidização e para prever o comportamento de partículas em diferentes regimes de escoamento,

sendo fundamental na análise de sistemas de leito fluidizado, podendo ser encontrado de acordo com a Equação (3).

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

Por fim, para definir a velocidade de transporte das partículas (U_{tr}), foi utilizada a Equação (4), que tem por parâmetro o número de Arquimedes pertencente ao intervalo de 20 à 50000, que corresponde ao apresentado pelos cálculos anteriores.

$$U_{tr} = 1,45 \frac{\mu}{\rho_g d_p} Ar^{0,484} \quad (4)$$

O valor de U_{tr} de 2,71m/s foi aqui obtido, sendo este o valor mínimo da velocidade de fluidização no riser que deve ser utilizado para garantir o regime de fluidização rápida no sistema de LFC.

3.4 Configurações dos Testes

Para o desenvolvimento da análise fatorial, foram analisadas três variáveis diferentes sob duas condições distintas de aeração da válvula *loop-seal* (A-B e A-C). As variáveis analisadas foram a velocidade de fluidização, a taxa de aeração e o inventário de partículas.

A velocidade de fluidização (U_f) foi avaliada nos valores de 3,5 e 4,5 m/s, uma variável crucial para determinar o comportamento do leito fluidizado e a eficiência da recirculação de partículas dentro do sistema. Diferentes velocidades de fluidização podem influenciar significativamente a estabilidade e o desempenho do leito fluidizado.

A taxa de aeração (Q) foi testada em 15 e 20 L/min, sendo um fator determinante na manutenção da fluidização e na prevenção de fenômenos como *slugging* e canalização. A aeração adequada garante uma distribuição uniforme do ar através do leito, melhorando a eficiência de operação.

O inventário de partículas (I_s), variando entre 1,4 e 1,7 kg, refere-se à quantidade de material presente no leito fluidizado. A quantidade de partículas influencia diretamente a dinâmica do leito, a transferência de calor e massa, e a eficácia da recirculação dos sólidos.

As condições de aeração da válvula *loop-seal*, identificadas como A-B e A-C, foram aplicadas para verificar o impacto das diferentes configurações de aeração sobre o perfil de pressão estática e a queda de pressão nos componentes *riser* e *standpipe*. A combinação dessas variáveis e condições de aeração foi utilizada para identificar a influência que diferentes configurações de aeração da válvula *loop-seal* causam no sistema, otimizando a retenção dos sólidos, distribuindo a pressão de maneira mais uniforme, ou prevenindo a ocorrência de fenômenos indesejados no leito fluidizado, identificando, assim, as melhores condições de operação do protótipo.

Sendo assim, foram definidos, feito a mão, os dezesseis testes necessários para realizar a análise fatorial 2^4 do sistema, conforme a tabela a seguir.

Tabela 1 - Procedimento Operacional.

| TESTE | U_f (m/s) | I_s (kg) | Q (sL/min) | Config. de Aeração |
|-------|-------------|------------|--------------|--------------------|
| 1 | 3,5 | 1,4 | 15 | A-B |
| 2 | 3,5 | 1,4 | 15 | A-C |
| 3 | 3,5 | 1,4 | 20 | A-B |
| 4 | 3,5 | 1,4 | 20 | A-C |
| 5 | 3,5 | 1,7 | 15 | A-B |
| 6 | 3,5 | 1,7 | 15 | A-C |
| 7 | 3,5 | 1,7 | 20 | A-B |
| 8 | 3,5 | 1,7 | 20 | A-C |
| 9 | 4,5 | 1,4 | 15 | A-B |
| 10 | 4,5 | 1,4 | 15 | A-C |
| 11 | 4,5 | 1,4 | 20 | A-B |
| 12 | 4,5 | 1,4 | 20 | A-C |
| 13 | 4,5 | 1,7 | 15 | A-B |
| 14 | 4,5 | 1,7 | 15 | A-C |
| 15 | 4,5 | 1,7 | 20 | A-B |
| 16 | 4,5 | 1,7 | 20 | A-C |

Fonte: Os autores, 2024.

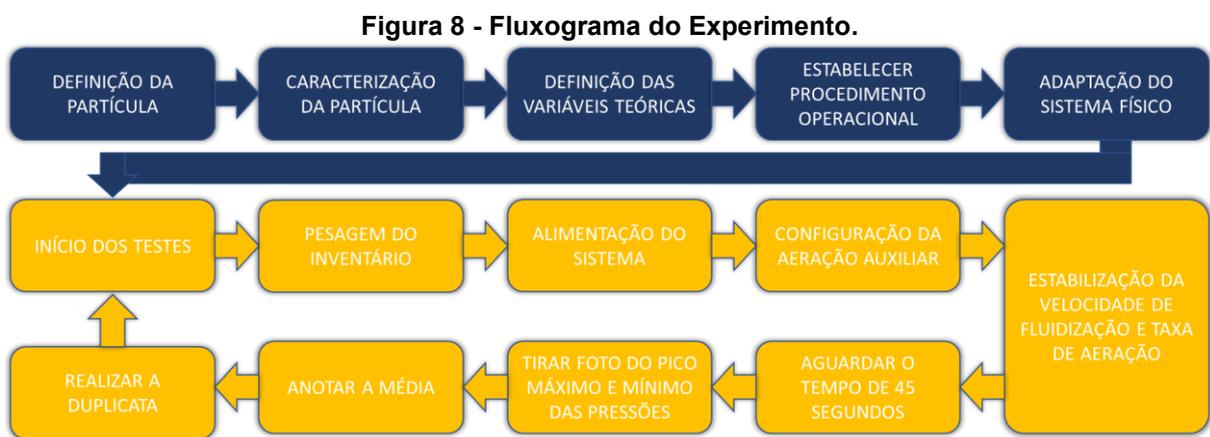
Para todos os valores de vazão de ar usados no ajuste da velocidade de fluidização, bem como da aeração, foram necessárias correções nas leituras obtidas dos rotômetros, a fim de poder expressar tais leituras em condições padrão de temperatura e pressão, e dessa forma, poder reproduzir os experimentos em qualquer outro local de testes.

3.5 Fluxograma dos Testes

Para o desenvolvimento deste estudo, foram implementadas várias etapas para assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos. Todos os dezesseis testes

foram conduzidos em duplicata, com o objetivo de avaliar a reprodutibilidade dos mesmos. O fluxograma da Figura 8 descreve as fases do procedimento realizado pela equipe no laboratório, abrangendo desde a seleção das partículas até a execução dos testes propriamente ditos.

Cada teste realizado gerou quatro conjuntos de dados de distribuição de pressão axial no sistema, tendo em vista que para cada repetição, eram tiradas duas fotos (em seu máximo e mínimo) sendo o valor final a média entre os resultados das duas.



Fonte: Os autores, 2024.

Tendo em vista a presença de importantes variações nos valores de pressão indicados pelos manômetros de coluna em U, optou-se pela padronização das leituras de pressão usando apenas os valores mínimos e máximos das flutuações, as quais foram registradas em fotografias.

Após a finalização de cada teste eram elaborados os perfis axiais de pressão, os quais devem apresentar uma forma característica de “peixe” para um leito fluidizado circulante. Este perfil é resultado da dinâmica de fluidização e da recirculação de sólidos no LFC. No *riser*, a pressão diminui gradualmente à medida que a suspensão gás-sólido sobe, transportando as partículas. No ciclone, a pressão continua a diminuir, mas de forma menos acentuada, devido à separação gás-sólido. No *standpipe*, a pressão é mais alta à medida que as partículas descem devido à carga hidrostática da coluna fluidizada. A válvula *loop-seal*, fundamental para a recirculação de sólidos, mantém a maior pressão do sistema na sua base para assegurar o fluxo contínuo de partículas em direção à parte baixa do *riser*. Este gráfico

na forma de "peixe" indica um funcionamento correto do sistema, evidenciando a recirculação eficiente de sólidos e a manutenção da fluidização adequada (BASU, 2006).

Por fim, a partir dessas análises gráficas detalhadas, foi possível obter resultados da queda de pressão axial em diferentes alturas do equipamento e a eficiência da configuração de aeração utilizada na *loop-seal*. Além disso, conseguiu-se avaliar a retenção do inventário de partículas e medir a altura do leito fixo de sólidos no *standpipe* durante cada teste, para a identificação das melhores condições operacionais do sistema.

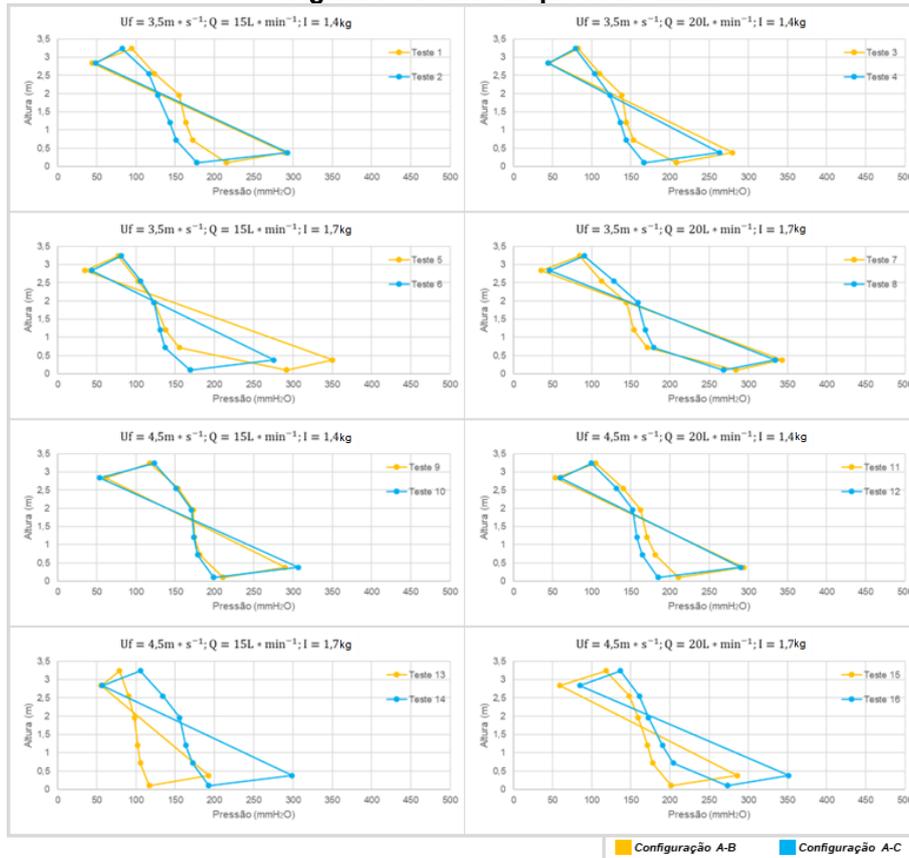
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados dos Testes Operacionais

De acordo com a teoria da fluidização rápida, perfis de pressão axiais adequados em sistemas de leito fluidizado circulante devem apresentar características específicas para garantir a operação contínua do sistema. Segundo Kim *et al.* (2002) e Basu (2006), a linha de pressão que conecta a região do *riser* deve normalmente cruzar a linha que liga a base do ciclone à base da *loop-seal*. Esse comportamento é crucial para a recirculação dos sólidos no sistema. Em particular, é na base da *loop-seal* que se espera que o valor máximo de pressão ocorra, permitindo uma adequada circulação dos sólidos no processo.

Sendo assim, a Figura 9 exibe os perfis axiais de pressão estática obtidos para os 16 testes realizados, considerando as duas configurações distintas de aeração, A-B e A-C.

Figura 9 – Perfis de pressão axial.



Fonte: Os autores, 2024.

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 9 é possível observar que todas as configurações de aeração avaliadas forneceram perfis axiais de pressão consistentes e coerentes com as expectativas para manter o sistema em operação contínua. Além disso, observa-se que, em cada configuração de aeração, os perfis de pressão seguem a forma desejada, com a linha de pressão conectando a região do *riser* (Ponto 1 e 6, Figura 6) cruzando a linha que liga a base do ciclone (Ponto 7, Figura 6) à base da *loop-seal* (Ponto 8, Figura 6), conforme indicado na literatura.

Além disso, em todas as condições testadas, o valor máximo de pressão foi registrado na base da *loop-seal* (Ponto 8, Figura 6), confirmando a ocorrência de uma recirculação eficiente dos sólidos, como esperado. Esses resultados sugerem que as configurações de aeração testadas estão adequadas para o funcionamento contínuo do sistema de leito fluidizado circulante, promovendo uma operação eficiente e estável.

4.2 Diferenças de Pressão

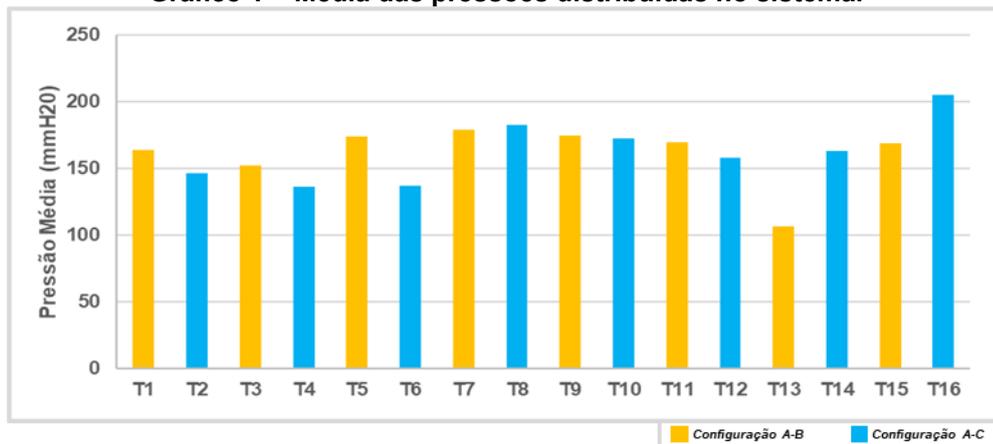
Um dos parâmetros comumente utilizados para avaliar o desempenho fluidodinâmico de caldeiras de leito fluidizado circulante são as pressões médias do sistema. No entanto, ao considerar a pressão média total de todo o sistema, alguns comportamentos específicos de determinados componentes podem ficar mascarados, já que essa média engloba todos os elementos do sistema. Assim, caso uma repetição do teste mostre pressões significativamente distintas em diferentes pontos do sistema, mas com a média total permanecendo constante, ocorre uma distorção que pode ocultar variações importantes. Nesse contexto, uma abordagem mais robusta para a análise é a separação das medições de pressão por componentes.

Neste estudo, foram realizadas análises de pressão média total, bem como pressões específicas no *downcomer* e no *riser*, com o intuito de avaliar não apenas a pressão total do sistema, mas também as variações nos componentes individuais, minimizando o risco de erros que poderiam comprometer a interpretação do rendimento operacional do sistema.

4.2.1 Pressão Média Total

O Gráfico 1 representa os resultados obtidos para pressão média total, ao considerarmos a pressão média total como um parâmetro para análise do desempenho do sistema, é fundamental destacar que esse dado pode mascarar divergências significativas entre os pontos de medição. Isso ocorre porque, ao calcular a média, possíveis discrepâncias entre as pressões locais em diferentes pontos podem ser suavizadas, ou seja, pressões mais altas em determinados pontos podem ser equilibradas por pressões mais baixas em outros. Esse comportamento pode resultar em uma representação inadequada do sistema, já que grandes variações entre os pontos podem não ser refletidas na média, levando à falsa impressão de que o sistema está operando de maneira estável em toda a sua extensão.

Gráfico 1 – Média das pressões distribuídas no sistema.



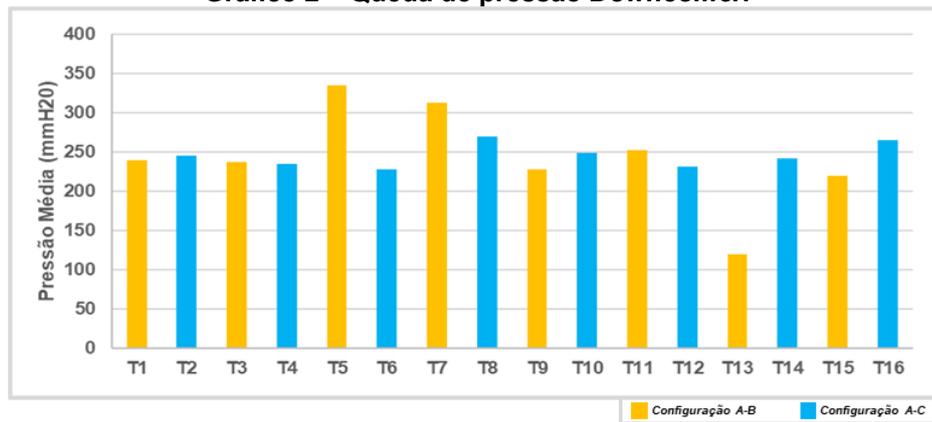
Fonte: Os autores, 2024.

Os resultados do Gráfico 1 indicam que a pressão média oscilou em torno do valor de 150 mmH₂O, o que não é considerado alto para a operação de um sistema piloto como o estudado neste TCC. Percebeu-se também um desvio máximo de 100% entre os testes 13 e 16, sugerindo que mudanças na configuração da aeração e na vazão dessa tendem a ser mais importantes quando se utiliza simultaneamente alta velocidade de fluidização e inventário de sólidos.

Por outro lado, os resultados gráficos mostram que para os pontos de pressão com maiores divergências entre os pontos de pressão do sistema, conforme apresentado na Figura 10, teve-se também uma maior variação da pressão total, como visto nos Testes 5 e 6, 13 e 14, e 15 e 16.

4.2.2 Diferença de Pressão no Downcomer

No Gráfico 2 é apresentada a variação de pressão no *downcomer*, identificado pelos pontos 7 (*standpipe*) e ponto 8 (*loop-seal*) descrito na Figura 6. O *downcomer* é uma região crítica do sistema, localizada entre a base do ciclone e a base da válvula *loop-seal*. Essa área é responsável por permitir o fluxo de sólidos recirculantes de volta para o *riser*, desempenhando um papel fundamental no equilíbrio do sistema de leito fluidizado circulante. A queda de pressão observada no *downcomer* reflete a resistência encontrada pela coluna de sólidos ao passar por essa região, sendo um indicativo importante da recirculação e conseqüentemente, da eficiência da configuração de aeração adotada.

Gráfico 2 – Queda de pressão *Downcomer*.

Fonte: Os autores, 2024.

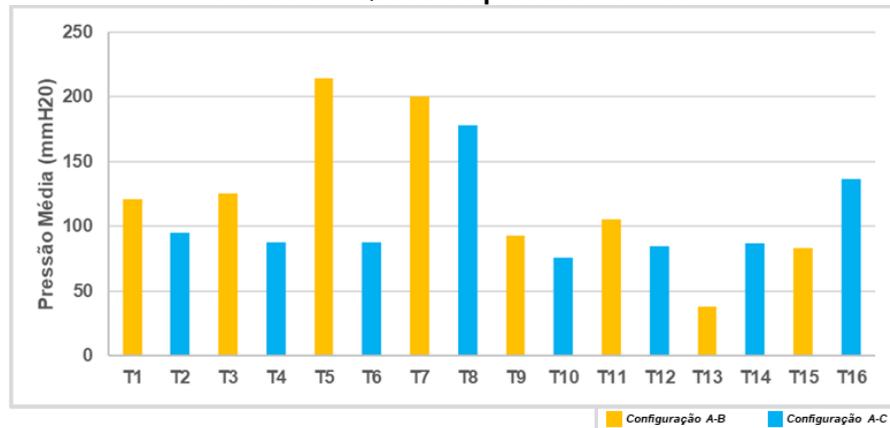
Avaliando os resultados, pode-se observar que os perfis de pressão que demonstraram graficamente maior instabilidade na Figura 10, ou seja, tiveram resultados com maiores diferenças entre o conjunto de pontos formados pelos dois testes, principalmente o caso dos Testes 5 e 6 e Testes 13 e 14, que também apresentaram uma maior diferença de pressão na coluna de sólidos. É possível perceber que os testes com maior queda de pressão no *downcomer* (T5 e T7) foram realizados com mesmo inventário (1,7 kg), mesma configuração de aeração (A-B) e mesma velocidade de fluidização (3,5 m/s). Este comportamento pode ser resultado da presença de *slugging* severo no componente, devido ao maior acúmulo de sólidos atribuído à baixa eficiência da aeração na configuração A-B no Teste 5. Ao se promover altas velocidades relativas gás-sólido através de uma alta coluna de inventário com pequeno diâmetro, originam-se fortes flutuações de pressão e impede-se o escoamento suave das partículas. Percebe-se também que o problema parece ter sido aliviado ao aumentar a taxa da aeração (Teste 7), provavelmente por causa de uma melhora na fluidização na base da *loop-seal*. Com uma fluidização mais eficiente na região da *loop-seal* diminui-se a altura dos sólidos no *standpipe*, conseguindo-se assim a redução da velocidade relativa gás-sólido por causa do maior arrasto de gás de aeração no mesmo sentido do transporte das partículas.

4.2.3 Diferença de Pressão no Riser

O *riser* é a região onde o fluido (ar) sobe e carrega partículas através do leito. A diferença de pressão neste componente é influenciada pela interação entre o fluxo de ar e as partículas no leito, sendo um indicador importante da eficiência da fluidização. Em muitos casos, pressões mais altas podem sugerir que o leito está

"mais denso" ou que há obstruções. O Gráfico 3 mostra a queda de pressão no componente *riser* identificado dos pontos 1 ao 6 de acordo com a Figura 6.

Gráfico 3 – Queda de pressão no Riser.



Fonte: Os autores, 2024.

Foi possível observar que, para a maioria das configurações testadas, a configuração A-C apresentou uma diferença de pressão menor em comparação à configuração A-B, o que pode ser interpretado como um possível indicativo de superioridade da configuração A-C. No entanto, esse comportamento não se verificou nos casos dos Testes 13 e 14 e Testes 15 e 16, sugerindo que sob uma combinação de inventário e velocidade de fluidização mais altas, a configuração A-C pode prejudicar a operação do sistema.

Além disso, vale destacar o comportamento observado no Teste 5, que apresentou uma diferença de pressão consideravelmente maior quando comparado ao Teste 6. Durante a execução desse experimento, foi identificada uma operação não uniforme, caracterizada pela formação significativa de *slugging*. Esse fenômeno comprometeu a estabilidade da fluidização, influenciando na grande variação de pressão, o que impactou negativamente o desempenho do sistema.

Finalmente, como era esperado para o cumprimento do balanço de pressão, o aumento na queda de pressão no *downcomer* se reflete também no aumento da queda de pressão no *riser*. Isto fica evidente ao observar o comportamento da queda de pressão em ambos os componentes nos Testes 5 e 7.

4.3 Análise ANOVA

A Análise de Variância (ANOVA) é uma técnica estatística amplamente utilizada para comparar as médias de diferentes grupos e determinar se há diferenças estatisticamente significativas entre elas (MONTGOMERY, 2017). Esta análise

permite avaliar o impacto de uma ou mais variáveis independentes sobre uma variável dependente, levando em conta a variação tanto do sistema como um todo quanto de seus componentes específicos. No contexto desta pesquisa, foi realizada uma análise ANOVA de fator duplo com repetição para examinar a influência da configuração de aeração de uma válvula *loop-seal*, responsável pela recirculação dos sólidos em uma caldeira de leito fluidizado circulante operando a frio.

Para isso, os testes foram organizados em quatro grupos (Tabela 2), comparando os resultados com o mesmo inventário e velocidade de fluidização, enquanto as variáveis analisadas foram a taxa de aeração e a configuração desta. Três parâmetros foram considerados nas análises: a pressão média do sistema, a queda de pressão no *downcomer* e a queda de pressão no *riser*. O nível de significância adotado foi de 5%, o que é padrão em muitas áreas da pesquisa (KUEHL, 2000).

Tabela 2 – Divisão de dados para análise ANOVA.

(continua)

| Grupo | uf (m/s) | Inv. (kg) | Q (sL/min) | Config. de Aeração | TESTES | MÉDIA DAS PRESSÕES (mmH ₂ O) | DOWNCOMER (mmH ₂ O) | RISER (mmH ₂ O) |
|-------|-------------|--------------|---------------|--------------------------|-------------|--|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 3,5 | 1,4 | 15 | A-B | TESTE 1 | 152,03 | 238,75 | 126,00 |
| | | | | | DUPLICATA 1 | 162,53 | 252,50 | 115,50 |
| | | | | A-C | TESTE 2 | 144,28 | 245,00 | 99,25 |
| | | | | | DUPLICATA 2 | 140,66 | 243,75 | 91,00 |
| | 3,5 | 1,4 | 20 | A-B | TESTE 3 | 144,31 | 237,00 | 131,25 |
| | | | | | DUPLICATA 3 | 146,44 | 232,50 | 119,75 |
| | | | | A-C | TESTE 4 | 129,63 | 234,25 | 78,50 |
| | | | | | DUPLICATA 4 | 135,72 | 203,50 | 97,00 |
| 2 | 3,5 | 1,7 | 15 | A-B | TESTE 5 | 160,19 | 334,25 | 249,25 |
| | | | | | DUPLICATA 5 | 158,16 | 296,25 | 180,00 |
| | | | | A-C | TESTE 6 | 133,31 | 227,75 | 85,50 |
| | | | | | DUPLICATA 6 | 133,00 | 236,75 | 90,25 |
| | 3,5 | 1,7 | 20 | A-B | TESTE 7 | 172,63 | 312,25 | 206,75 |
| | | | | | DUPLICATA 7 | 159,59 | 302,75 | 193,25 |
| | | | | A-C | TESTE 8 | 173,03 | 270,00 | 172,50 |
| | | | | | DUPLICATA 8 | 170,53 | 306,25 | 183,50 |

Tabela 2 – Divisão de dados para análise ANOVA.

| GRUPO | uf (m/s) | Inv. (kg) | Q (sL/min) | Config. de Aeração | TESTES | (conclusão) | | |
|-------|-------------|--------------|---------------|--------------------------|--------------|--|-----------------------------------|-------------------------------|
| | | | | | | MÉDIA DAS PRESSÕES (mmH ₂ O) | DOWNCOMER (mmH ₂ O) | RISER (mmH ₂ O) |
| 3 | 4,5 | 1,4 | 15 | A-B | TESTE 9 | 167,00 | 228,25 | 88,25 |
| | | | | | DUPLICATA 9 | 173,41 | 228,50 | 97,75 |
| | | | | A-C | TESTE 10 | 165,53 | 248,25 | 80,75 |
| | | | DUPLICATA 10 | 173,25 | 257,50 | 68,75 | | |
| | | | A-B | TESTE 11 | 165,38 | 252,00 | 120,50 | |
| | | | | DUPLICATA 11 | 164,25 | 228,75 | 91,00 | |
| 4 | 4,5 | 1,7 | 15 | A-B | TESTE 12 | 154,59 | 231,25 | 87,75 |
| | | | | | DUPLICATA 12 | 155,75 | 228,50 | 82,25 |
| | | | | A-C | TESTE 13 | 94,03 | 119,75 | 27,75 |
| | | | DUPLICATA 13 | 116,06 | 154,25 | 48,00 | | |
| | | | A-C | TESTE 14 | 161,84 | 241,50 | 84,00 | |
| | | | | DUPLICATA 14 | 157,91 | 242,00 | 90,00 | |
| | 4,5 | 1,7 | 20 | A-B | TESTE 15 | 163,00 | 219,25 | 74,25 |
| | | | | | DUPLICATA 15 | 167,38 | 234,00 | 92,00 |
| | | | A-C | TESTE 16 | 195,63 | 264,75 | 136,75 | |
| | | | | DUPLICATA 16 | 197,97 | 268,50 | 136,75 | |

Fonte: Os autores, 2024.

A análise ANOVA ajuda a determinar se há uma diferença estatisticamente significativa entre as médias dos grupos comparados. Para isso, são utilizados os resultados de valor p obtidos; assim, quando o valor p é maior que o nível de significância, a hipótese é nula (h_0) e considera-se que a variável não teve influência significativa nos testes; mas, quando o contrário acontece, é adotado a hipótese alternativa (h_1) e considera-se que a variável teve influência nos resultados. Também podem ser observados os valores de F e F crítico, quando $F > F$ crítico, h_1 enquanto que se $F < F$ crítico, h_0 .

Tabela 3 – Hipóteses obtidas ANOVA.

| Grupo | Inv.(kg) | uf (m/s) | Q(L/min) | Médias das pressões (mmH ₂ O) | Queda de pressão <i>downcomer</i> (mmH ₂ O) | Queda de pressão <i>riser</i> (mmH ₂ O) |
|-------|----------|----------|----------|--|--|--|
| 1 | 1,4 | 3,5 | 15 20 | h1 | h0 | h1 |
| 2 | 1,7 | 3,5 | 15 20 | h0 | h0 | h0 |
| 3 | 1,4 | 4,5 | 15 20 | h1 | h1 | h1 |
| 4 | 1,7 | 4,5 | 15 20 | h1 | h1 | h1 |

Fonte: Os autores, 2024.

Conforme a Tabela 3, percebe-se a influência da configuração de aeração nos grupos 3 e 4, onde a velocidade de fluidização utilizada foi a maior (4,5 m/s), demonstrando que a velocidade de fluidização é capaz de evidenciar a importância da configuração.

Enquanto, com as condições do grupo 2, com velocidade de fluidização (3,5 m/s) menor e inventário maior (1,7 kg), obteve-se a hipótese alternativa, indicando que a mudança na configuração de aeração não teve impacto significativo no sistema. Este resultado pode ter sido obtido devido a velocidade de fluidização não ser suficientemente alta para a quantidade de inventário, assim não conseguindo evidenciar a influência da configuração.

Em contraponto, quando se observa o grupo 1, onde os testes foram realizados com inventário menor (1,4 kg) e velocidade de fluidização menor (3,5 m/s), a resposta não foi a mesma para todas as variáveis. Pode-se ver que o impacto da configuração de aeração foi percebido na média das pressões distribuídas no sistema e na queda de pressão do *riser*. No entanto, na análise da queda de pressão no *downcomer* este impacto não foi significativo.

5 CONCLUSÃO

Ao final, pôde-se observar que todas as configurações de aeração propostas resultaram em perfis axiais de pressão dentro dos parâmetros esperados, garantindo o funcionamento contínuo do sistema. Esses resultados confirmam a teoria de que os perfis de pressão adequados para o sistema devem apresentar uma linha de pressão que conecta a região do *riser*, cruzando a linha que liga a base do ciclone à base do loop seal, formando o denominado gráfico do "peixe".

Em termos gerais, os dados experimentais indicam que a configuração de aeração tem uma influência significativa no comportamento do sistema, especialmente em condições de maior velocidade de fluidização. Em contrapartida, em experimentos com menores velocidades de fluidização e maior inventário, como os apresentados nos Testes 5 e 6 e Testes 7 e 8, não houve influência da configuração de aeração, provavelmente devido ao uso de uma velocidade de fluidização insuficiente para criar condições de balanço de pressão sensível às mudanças, independentemente da taxa de aeração aplicada.

Além disso, avaliando as alturas de leito fluidizado fixo e durante a fluidização, todos os testes apresentaram uma distribuição de altura de leito fixo sem variações significativas, sendo as pequenas diferenças influenciadas diretamente pelo grau de empacotamento do sistema. Contudo, o Teste 13 apresentou os menores valores de pressão nas três situações analisadas. Esse resultado pode ser explicado pela altura da coluna de sólidos formada durante a fluidização, que foi a maior entre os dezesseis testes realizados. Uma maior coluna de sólidos durante o processo de fluidização pode justificar a menor pressão observada nos oito pontos distribuídos ao longo do sistema e a superioridade da configuração A-C, tendo em vista que a situação não se replica para o Teste 14, realizado sob mesmas condições, mas com configuração de aeração diferente.

De maneira geral, ambas as configurações demonstraram bons resultados. No entanto, a configuração A-C apresentou menores variações de pressão em comparação à configuração A-B na maioria dos testes realizados. Além disso, a partir das análises gráficas, foi possível concluir que a configuração A-C demonstrou maior uniformidade nos resultados, apresentando menores flutuações em comparação à A-

B. Dessa forma, a configuração A-C mostra-se mais apropriada para as condições de operação avaliadas e descritas neste estudo.

Por fim, conclui-se que a configuração de aeração é uma variável crítica para a operação do protótipo analisado quando associada a velocidades de fluidização mais altas, evidenciando a importância do modelo de equilíbrio de pressão proposto por Kim *et al.* (2002).

REFERÊNCIAS

- American Society of Mechanical Engineers (ASME). Boiler and Pressure Vessel Code, 2018.
- ARENA, U. **Fluidized Bed Gasification of Biomass and Waste**. Cambridge: Elsevier, 2013.
- BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- BASU, P.; CHENG, L. apud BASU, 2006. **An Analysis Of Loop Seal Operations In a Circulating Fluidized Bed**. Institut Of Chemical Engineers, China, v. 78, p.991-999, out. 2000.
- BASU, P.; BUTLER, J. **Studies on the operation of loop seal in circulating fluidized bed boilers**. Applied energy, v. 86, n. 9, p. 1723-1731, 2009
- BASU, P.; CHENG, L. **An analysis of loop seal operations in a circulating fluidized bed**. Chemical Engineering Research and Design, v. 78, n. 7, p. 991-998, 2000.
- BURNTECH. **Caldeira aquatubular na geração energética: entenda a importância**. 18 abr. 2024. Disponível em: <https://blog.burntech.ind.br/caldeira-aquatubular-na-geracao-energetica/>. Acesso em: 10 de jun de 2024. (Figura - Material disponível na Internet).
- CHAWNER, J. R.; GUPTA, R. P.; WALL, T. F. **Fluidized Bed Combustion: Principles and Applications**. 2nd ed. New York: Routledge, 2017.
- CHINSUWAN, A.; SOMGUN, J. An investigation of performance of a conventional U type loop-seal for CFB reactors with side and bottom aerations, Chemical Engineering Research and Design. v. 163, p. 58–66, 2020.
- CREMASCO, H. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidos**. 2ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2002.
- ÇENGEL, Y. A., & CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. McGraw-Hill, 2013.
- FILHO, P., JUNIOR, A., HILGEMBERG, F., BEHAINNE, J. **Verificação experimental de um modelo fluidodinâmico para fornalha piloto de leito fluidizado circulante**. 2023. Anais do SICITE, 2023.
- GRACE, J. R.; BI, H. T.; KATO, K. **Circulating Fluidized Beds**. Springer Science & Business Media, 1997.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Multivariate Data Analysis**. Cengage Learning, 2019.
- JUNIOR, A., FILHO, P., HILGEMBERG, F., BEHAINNE, J. **Efeito da configuração da aeração de uma válvula loop seal no perfil de pressão axial a frio de uma fornalha piloto de leito fluidizado circulante**. 2023. Anais do SICITE, 2023.

KAKAC, S.; LIU, H. **Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design**. CRC Press, 2002.

KIM, S. et al. **Pressure balance model for circulating fluidized beds with a loop-seal**. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 41, p. 4949-4956, 2002.

KIM, Sung Won; KIM, Sang Done. **Effects of particle properties on solids recycle in loop-seal of a circulating fluidized bed**. *Powder Technology*, v. 124, n. 1-2, p. 76-84, 2002.

KUEHL, Robert O. **Design of experiments: statistical principles of research design and analysis**. 2000.

KUNNI, Daizo; LEVENSPIEL, Octave. **Fluidization Engineering**. USA: Butterworth-Heinemann, 1991.

LI, Z.; ZHANG, H.; XU, Y. **Advanced Fluidized Bed Technologies for Biomass Combustion and Gasification**. Elsevier, 2016.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. John Wiley & Sons, 2017.

OLIVEIRA, F. **Estudo da influência do modo de aeração de uma válvula loop-seal na operação de um leito fluidizado circulante**. 2019. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

PECETE, A. **Influência das características da aeração de uma válvula loop seal no rendimento operacional do ciclone de um leito fluidizado circulante**. 2023. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2023.

SMITH, J. R., JONES, P. A. **Industrial Boiler Systems: Theory and Applications**. Engineering Press, 2020.

STENGEL, F. H. **Fluidized Bed Technology**. 2. ed. New York: Springer, 2013.

TOGAWA ENGENHARIA. **Os Principais Tipos de Caldeiras**. 30 set. 2020. Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>. Acesso em: 10 de jun de 2024.

WANG, S.; YAN, J.; AN, H. **Progress in Energy and Combustion Science**. Elsevier, 2015.

WU, Wanqiang et al. **Radar-based measurement of solids back-mixing in the freeboard of a circulating fluidized bed**. *Chemical Engineering Journal*, v. 488, p. 151150, 2024.

Xinli Boiler. **What is a circulating fluidized bed boiler?**. 21 jul. 2020. Disponível em: <https://www.xinliboiler.com/solution/faq/28.html>. Acesso em: 16 de jun de 2024.

ZHANG, L., ZHANG, S., WANG, S., ZHU, X. **Application of circulating fluidized bed combustion technology in China: Progress and challenges**. *Journal of Energy Chemistry*, 46, 141-151, 2020. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS. **ABNT NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Valores de pressão obtidos nos manômetros.

| TESTES | MANÔMETROS | | | | | | STAND PIPE | LOOP SEAL |
|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| TESTE 1 | 214,25 | 166,75 | 157,25 | 146,25 | 117,25 | 88,25 | 43,75 | 282,50 |
| DUPLICATA 1 | 216,25 | 177,50 | 169,75 | 163,75 | 129,75 | 100,75 | 45,00 | 297,50 |
| TESTE 2 | 179,25 | 152,00 | 145,00 | 131,25 | 119,25 | 80,00 | 51,25 | 296,25 |
| DUPLICATA 2 | 175,75 | 150,00 | 141,25 | 123,75 | 113,50 | 84,75 | 46,25 | 290,00 |
| TESTE 3 | 213,50 | 147,50 | 140,00 | 135,00 | 108,25 | 82,25 | 45,50 | 282,50 |
| DUPLICATA 3 | 203,00 | 160,00 | 148,50 | 142,00 | 112,25 | 83,25 | 45,00 | 277,50 |
| TESTE 4 | 152,50 | 139,25 | 132,25 | 120,25 | 95,00 | 74,00 | 44,75 | 279,00 |
| DUPLICATA 4 | 181,25 | 148,75 | 141,25 | 126,25 | 112,50 | 84,25 | 44,00 | 247,50 |
| TESTE 5 | 318,75 | 152,50 | 130,00 | 115,00 | 95,00 | 69,50 | 33,25 | 367,50 |
| DUPLICATA 5 | 265,00 | 158,00 | 145,00 | 132,50 | 110,00 | 85,00 | 36,75 | 333,00 |
| TESTE 6 | 165,00 | 140,00 | 133,25 | 124,50 | 107,00 | 79,50 | 44,75 | 272,50 |
| DUPLICATA 6 | 172,75 | 133,75 | 128,25 | 121,50 | 105,00 | 82,50 | 41,75 | 278,50 |
| TESTE 7 | 292,50 | 181,50 | 162,75 | 153,75 | 119,50 | 85,75 | 36,50 | 348,75 |
| DUPLICATA 7 | 276,25 | 160,00 | 145,00 | 134,50 | 105,75 | 83,00 | 34,75 | 337,50 |
| TESTE 8 | 268,75 | 186,25 | 174,25 | 163,25 | 133,00 | 96,25 | 46,25 | 316,25 |
| DUPLICATA 8 | 268,00 | 172,00 | 162,50 | 155,00 | 123,50 | 84,50 | 46,25 | 352,50 |
| TESTE 9 | 202,50 | 177,50 | 170,00 | 170,00 | 151,00 | 114,25 | 61,25 | 289,50 |
| DUPLICATA 9 | 219,00 | 184,75 | 178,75 | 175,50 | 156,00 | 121,25 | 61,75 | 290,25 |
| TESTE 10 | 195,75 | 175,75 | 168,75 | 165,00 | 148,25 | 115,00 | 53,75 | 302,00 |
| DUPLICATA 10 | 200,00 | 181,25 | 178,50 | 176,25 | 153,75 | 131,25 | 53,75 | 311,25 |
| TESTE 11 | 218,25 | 183,00 | 173,75 | 160,00 | 138,25 | 97,75 | 50,00 | 302,00 |
| DUPLICATA 11 | 203,50 | 179,50 | 167,50 | 165,00 | 142,25 | 112,50 | 57,50 | 286,25 |
| TESTE 12 | 186,00 | 163,25 | 157,50 | 154,50 | 131,00 | 98,25 | 57,50 | 288,75 |
| DUPLICATA 12 | 183,50 | 165,75 | 157,75 | 150,00 | 132,25 | 101,25 | 63,50 | 292,00 |
| TESTE 13 | 100,00 | 91,25 | 88,75 | 86,25 | 81,50 | 72,25 | 56,25 | 176,00 |
| DUPLICATA 13 | 133,75 | 120,00 | 115,75 | 109,50 | 99,50 | 85,75 | 55,00 | 209,25 |
| TESTE 14 | 196,00 | 172,50 | 166,25 | 155,75 | 135,75 | 112,00 | 57,50 | 299,00 |
| DUPLICATA 14 | 189,25 | 171,75 | 160,75 | 155,00 | 132,75 | 99,25 | 56,25 | 298,25 |
| TESTE 15 | 195,00 | 175,50 | 168,75 | 158,00 | 146,25 | 120,75 | 60,25 | 279,50 |
| DUPLICATA 15 | 207,75 | 180,25 | 174,00 | 160,50 | 149,75 | 115,75 | 58,50 | 292,50 |
| TESTE 16 | 272,50 | 203,25 | 188,25 | 171,25 | 158,75 | 135,75 | 85,25 | 350,00 |
| DUPLICATA 16 | 274,25 | 205,25 | 192,50 | 173,75 | 163,00 | 137,50 | 84,50 | 353,00 |

APÊNDICE B – Alturas de leito fixo e fluidizado obtidos.

| Teste | Duplicata 1 | | Duplicata 2 | |
|-------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | Altura leito fixo (m) | Altura leito fluidizado (m) | Altura leito fixo (m) | Altura leito fluidizado (m) |
| 1 | 1,2 | 0,85 | 1,15 | 0,7 |
| 2 | 1,1 | 0,96 | 1,05 | 0,6 |
| 3 | 1,2 | 0,9 | 1,15 | 0,65 |
| 4 | 1,1 | - | 1,12 | - |
| 5 | 1,4 | 0,64 | 1,4 | 0,6 |
| 6 | 1,45 | 0,7 | 1,4 | 0,65 |
| 7 | 1,4 | 0,65 | 1,45 | 0,7 |
| 8 | 1,5 | - | 1,35 | - |
| 9 | 1,15 | 0,9 | 1,2 | 0,92 |
| 10 | 1,2 | 0,85 | 1,15 | 0,87 |
| 11 | 1,1 | - | 1,2 | - |
| 12 | 1,15 | 0,8 | 1,1 | 0,85 |
| 13 | 1,38 | 1,15 | 1,42 | 1,09 |
| 14 | 1,4 | 0,97 | 1,43 | 1 |
| 15 | 1,41 | 0,93 | 1,37 | 0,88 |
| 16 | 1,45 | 0,9 | 1,4 | 0,95 |