

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDREL DE SOUZA PECETE

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA AERAÇÃO DE UMA VÁLVULA
LOOP SEAL NO RENDIMENTO OPERACIONAL DO CICLONE DE UM
LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE**

PONTA GROSSA

2023

ANDREL DE SOUZA PECETE

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA AERAÇÃO DE UMA VÁLVULA
LOOP SEAL NO RENDIMENTO OPERACIONAL DO CICLONE DE UM
LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE**

**Influence of the aeration features of a loop seal valve on the cyclone's
performance of a circulating fluidized bed**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de Concentração: Térmica e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramírez Behainne.

PONTA GROSSA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/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). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ANDREL DE SOUZA PECETE

INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA AERAÇÃO DE UMA VÁLVULA LOOP SEAL NO RENDIMENTO OPERACIONAL DO CICLONE DE UM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Térmica E Fluidos.

Data de aprovação: 26 de Maio de 2023

Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Guilherme Jose De Castilho, Doutorado - Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Dr. Luiz Eduardo Melo Lima, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 26/05/2023.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pela saúde mental e física, pela família maravilhosa que Ele tem me dado e por tudo que Ele tem feito na minha vida. Agradeço a minha esposa Elza, minha filha Antonela, minha mãe Maria de Lourdes, meu pai José Pecete, irmãos, irmã e todos os outros da família, que de alguma maneira me apoiaram durante o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço também aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica que me auxiliaram neste caminho, em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Jhon Jairo Ramírez Behainne, o qual foi muito dedicado em me orientar em todos os momentos que precisei, com muita paciência, responsabilidade e pontualidade. Sem medir esforços, ele me ajudou em todos os aspectos do desenvolvimento deste trabalho, desde o pré-projeto, a qualificação, os experimentos e a escrita final da dissertação.

Não posso deixar de agradecer também o bacharel em Engenharia Mecânica, pela UTFPR, Guilherme Henrique Santos Furquim, por me ajudar durante vários dias na realização dos experimentos no Laboratório de Processos Termoquímicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Ponta Grossa.

Finalmente, deixo os meus agradecimentos aos meus colegas do Instituto Federal do Paraná (IFPR), os professores Daniel dos Santos Matos e Jair Damato, por dividirem comigo as despesas das viagens de Telêmaco Borba para Ponta Grossa durante o período das aulas presenciais.

RESUMO

Ciclones são dispositivos amplamente utilizados em processos industriais para separar partículas sólidas de um fluido. Em aplicações que envolvem fornalhas de leito fluidizado circulante (LFC), o ciclone garante a operação estável da fornalha ao evitar que o material inerte e as partículas de combustível escapem do circuito de fluidização antes do tempo necessário. A avaliação experimental do desempenho do ciclone acoplado a unidades piloto de LFC tem sido pouco explorada, e a relação entre a eficiência de separação do ciclone e a vazão de aeração é ainda desconhecida. A literatura sugere que, em certas condições operacionais, uma parcela da vazão de aeração aplicada na válvula de recirculação de sólidos (*loop seal*) poderia tomar o sentido inverso, em direção ao ciclone, prejudicando a eficiência de coleta do mesmo. Todavia, os estudos não apresentam dados da influência desse fenômeno sobre o rendimento do separador. Tendo em vista essa lacuna, este trabalho se propôs a determinar, experimentalmente, a influência da vazão e da posição da aeração na eficiência de coleta e na queda de pressão de um ciclone acoplado a um LFC operado em condições ambiente e sob dois níveis de inventário de sólidos. Os experimentos foram realizados numa unidade de fluidização rápida a frio, mantendo a velocidade de fluidização constante e o tamanho médio das partículas fixo. A análise incluiu a determinação da significância estatística dos efeitos produzidos pelas condições experimentais sobre a operação do ciclone, realizada a partir de um planejamento fatorial 2^3 em duplicata, contendo apenas os valores máximos e mínimos de cada variável estudada. Os resultados mostraram que a vazão de aeração possui relação inversamente proporcional com a eficiência de coleta do ciclone. Esse efeito foi ainda mais significativo ao utilizar um inventário de sólidos menor. Já, a variação da posição da aeração, enquanto localizada sempre abaixo do nível de sólidos na coluna *standpipe*, não provocou uma variação significativa na eficiência de coleta do ciclone. Por outro lado, o perfil de pressão estática, as quedas de pressão nos componentes do sistema e o fluxo de recirculação de sólidos não sofreram variação significativa com a mudança na vazão de aeração, indicando uma interação nula entre essas variáveis durante os testes realizados. Diferentemente da eficiência de coleta do ciclone, a queda de pressão no mesmo sofreu alteração apenas com o nível de inventário de sólidos utilizado. Os resultados alcançados neste estudo sugerem que, sob condições operacionais semelhantes às analisadas, em que a variação da vazão de aeração não provoca alteração no fluxo de recirculação de sólidos e o inventário dos sólidos se mantém relativamente baixo, o desempenho do ciclone pode ser significativamente influenciado, afetando a eficiência de uma fornalha de LFC.

Palavras-chave: escoamento gás-sólido; leito fluidizado circulante; aeração; ciclone; eficiência de coleta;

ABSTRACT

Cyclones are devices widely used in industrial processes to separate solid particles from streams of fluids. In applications involving Circulating Fluidized Bed (CFB) furnaces, cyclones ensure a stable furnace operation by preventing inert particles and material from leaving the system early. The experimental assessment of cyclone performance coupled to CFB pilot units has been scarcely explored, and the relationship between cyclone separation efficiency and aeration flow rate is still unknown. Furthermore, the literature shows that, under some operating conditions, a fraction of the aeration flow rate applied to the solids recirculation valve (loop seal) could take the opposite direction to that expected, affecting the cyclone operation. However, these studies do not feature any data regarding the influence of this phenomenon on the separator's performance. Given this gap, this work proposed to experimentally determine the influence of both the flow rate and the aeration position on the collection efficiency and pressure drop of a cyclone coupled to a CFB system operated under room conditions with different levels of solids inventory. The experiments were carried out in a cold flow fast fluidization unit, keeping the fluidizing gas velocity constant and the mean particle size fixed. The analysis included determining the statistical significance of the effects produced by the experimental conditions on the cyclone operation, based on a 2^3 factorial design run in duplicates, in which only were considered the maximum and minimum values of each controlled variable. The results showed that the aeration flow rate is inversely proportional to the cyclone's collection efficiency. This effect is even more significant when using a lower solids inventory. On the other hand, changing the aeration position did not cause a significant variation in the cyclone's collection efficiency. In addition, the static pressure profile, the pressure drops in the CFB system and the solids circulation flow did not undergo significant variation with the change in the aeration flow rate, suggesting no interaction among these variables during the tests. Unlike the cyclone collection efficiency, the pressure drop in the cyclone changed only with the level of solids inventory used. The results of this study suggest that, under operational conditions similar to those analyzed here, in which the variation in the aeration flow rate does not cause alteration in the solids recirculation flow and the solids inventory remains relatively low, the performance of the cyclone can be significantly influenced, affecting the efficiency of a CFB furnace.

Keywords: gas-solid flow; circulating fluidized bed; aeration; cyclone; collection efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho esquemático de um sistema de leito fluidizado circulante (LFC).....	20
Figura 2- Esquema do padrão de fluidização rápida no <i>riser</i> de um LFC	21
Figura 3 - Efeito da velocidade superficial do gás e do fluxo de recirculação dos sólidos sobre a fração gasosa do leito ao longo do <i>riser</i>	22
Figura 4 - Perfil de pressão em função da altura em um LFC típico com válvula <i>loop seal</i>	23
Figura 5– Esquema de funcionamento de um ciclone de escoamento reverso com entrada tangencial	24
Figura 6 – Parâmetros geométricos de um ciclone de escoamento reverso com entrada tangencial.....	25
Figura 7 – Movimentação de partículas sólidas em uma válvula <i>loop seal</i>	27
Figura 8 – Eficiência de separação em função da concentração de sólidos na entrada do ciclone.....	30
Figura 9–Relação entre eficiência total de separação e razão de diâmetros para diferentes relações de concentração de sólidos.....	31
Figura 10 - UFRAF instalada no Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa	41
Figura 11 – Desenho esquemático da UFRAF	42
Figura 12 - Ciclone da UFRAF com suas tomadas de pressão na entrada (CI-E) e saída (CI-S).....	44
Figura 13– Válvula <i>loop seal</i> da UFRAF com suas tomadas de pressão e locais de aeração.....	44
Figura 14 – Soprador SO-1 e Sensor PT-100	45
Figura 15 – Medidor de vazão do ar de fluidização da UFRAF, do tipo placa de orifício	46
Figura 16–Placa distribuidora de ar do tipo <i>tuyere</i> instalada na UFRAF	47
Figura 17– Instrumentos utilizados para o fornecimento da aeração na UFRAF	48
Figura 18 – Sequência das etapas para a realização dos experimentos na UFRAF	52
Figura 19– Fluxo de recirculação dos sólidos em função da vazão volumétrica de aeração.....	57
Figura 20 – Efeitos principais e de interação padronizados das variáveis controláveis sobre o fluxo de recirculação dos sólidos.....	59
Figura 21 - Perfis axiais de pressão estática média em função da vazão e posição da aeração, para inventário de sólidos de 3 kg.	61
Figura 22 – Perfis axiais de pressão estática média em função da vazão e posição da aeração, para inventário de sólidos de 5 kg.	62
Figura 23 - Queda de pressão no <i>riser</i> em função das variáveis controláveis..	65
Figura 24 - Queda de pressão no <i>standpipe</i> e na câmara de alimentação da <i>loopseal</i> em função das variáveis controláveis.	65
Figura 25 - Queda de pressão na câmara de reciclagem da <i>loopseal</i> em função das variáveis controláveis.....	66
Figura 26 - Queda de pressão na porção do ciclone conectada ao circuito de fluidização em função das variáveis controláveis.	67

Figura 27– Eficiência de coleta do ciclone em função das variáveis controláveis.	69
Figura 28 - Efeitos principais e de interação padronizados das variáveis controláveis sobre a eficiência de coleta do ciclone.	72
Figura 29 - Variação da eficiência de coleta do ciclone na faixa da vazão de aeração com o inventário de sólidos mantido constante.....	72
Figura 30 - Variação da eficiência de coleta do ciclone na faixa de inventário dos sólidos com a vazão de aeração mantida constante.....	73
Figura 31 - Queda de pressão no ciclone em função das variáveis controláveis.	74
Figura 32 - Efeitos principais e de interação das variáveis de entrada sobre a queda de pressão no ciclone.	75

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Proporções recomendadas para ciclones de escoamento reverso de acordo com a sua aplicação.....	26
Tabela 2 - Principais modelos matemáticos para o cálculo da eficiência total de separação.....	29
Tabela 3 - Modelos matemáticos para cálculo da queda de pressão no ciclone	32
Tabela 4 - Matriz de planejamento contendo as variáveis e seus respectivos valores de entrada.....	51
Tabela 5 - Matriz de planejamento contendo as variáveis e seus respectivos níveis, sem considerar os experimentos com níveis intermediários relativos à vazão de aeração.....	54
Tabela 6 – Coeficientes de contraste dos experimentos	54
Tabela 7 – Dados utilizados para analisar, estatisticamente, os efeitos dos parâmetros de entrada sobre o fluxo de recirculação dos sólidos.	59
Tabela 8 – Resultados da ANOVA para o valor médio da pressão estática em função da posição.....	63
Tabela 9 - Dados utilizados para analisar, estatisticamente, os efeitos das variáveis controláveis sobre a eficiência de coleta do ciclone.....	71
Tabela 10 - Dados utilizados para analisar, estatisticamente, os efeitos dos parâmetros de entrada sobre a queda de pressão no ciclone.	76

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Documentos mais citados nas bases <i>Scopus</i> e <i>Science Direct</i> relacionados com o comportamento de ciclones em leito fluidizado circulante	34
--	-----------

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CFB	<i>Circulating Fluidized Bed</i>
ECD	Entrada circular dupla
ECU	Entrada circular única
LFB	Leito Fluidizado Borbulhante
LFC	Leito Fluidizado Circulante
NBR	Norma Brasileira
UFRAF	Unidade de Fluidização Rápida a Frio
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VF	<i>Vortex Finder</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

B	Comprimento da região cônica do ciclone	[m]
d_{50}	Diâmetro de corte ou crítico	[μm]
d_p	Diâmetro da partícula	[μm]
D_c	Diâmetro do ciclone	[m]
E	Diâmetro do duto de saída dos sólidos	[m]
F	Comprimento do <i>vortex finder</i>	[m]
H	Comprimento total do ciclone	[m]
I_s	Inventário de sólidos	[kg]
K	Altura do duto de entrada do ciclone	[m]
L	Largura do duto de entrada do ciclone	[m]
m	Diâmetro do duto de saída do gás	[m]
\dot{m}_c	Vazão mássica de sólidos coletados pelo ciclone	[kg/s]
\dot{m}_s	Vazão mássica de sólidos que escapa do ciclone	[kg/s]
\dot{m}_t	Vazão mássica total de sólidos que entra no ciclone	[kg/s]
m_c	Massa de sólidos coletada pelo ciclone	[kg]
m_s	Massa de sólidos que escapa do ciclone	[kg]
m_t	Massa total de sólidos que entra no ciclone	[kg]
P_a	Posição da aeração	[-]
Q_a	Vazão da aeração	[m ³ /h]
S	Altura da região cilíndrica do ciclone	[m]
t_e	Tempo de experimento	[min]
u_{fl}	Velocidade de fluidização	[m/s]
u_t	Velocidade terminal da partícula	[m/s]
u_{tr}	Velocidade de transporte dos sólidos	[m/s]
v_i	Velocidade de entrada do gás no ciclone	[m/s]
z	Número de aeração	[-]

Letras Gregas

ΔP_{1-2}	Queda de pressão no <i>riser</i>	[Pa]
ΔP_{2-3}	Queda de pressão no ciclone, medida entre entrada e a saída pela base ciclone	[Pa]
$\Delta P_{3-4,5}$	Queda de pressão conjunta no <i>standpipe</i> e na câmara de alimentação da <i>loop seal</i> .	[Pa]
$\Delta P_{4,5-6}$	Queda de pressão na câmara de reciclagem da <i>loop seal</i>	[Pa]
ΔP_{6-1}	Queda de pressão no tubo de reciclagem	[Pa]
ΔP_c	Queda de pressão no ciclone, medida entre entrada e a saída pelo topo do ciclone	[Pa]
η	Eficiência global de separação do ciclone	[-]
$\eta(i)$	Eficiência de separação para um tamanho de partícula i	[-]
η_i	Eficiência de separação devido ao <i>vortex</i> interno	[-]

η_{lim}	Eficiência de separação atribuída ao atrito do escoamento gás-sólido com a parede do ciclone	[-]
μ_e	Concentração de sólidos na entrada do ciclone	[kg/kg]
μ_{lim}	Concentração limite de sólidos na corrente gasosa	[kg/kg]
ρ_g	Massa específica do gás	[kg/m ³]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1	Leito fluidizado circulante	19
2.1.1	Características do ciclone	23
2.1.2	Características da válvula <i>loop seal</i>	26
2.2	Rendimento operacional dos ciclones	28
2.2.1	Eficiência de coleta.....	28
2.2.2	Queda de pressão em ciclones	31
2.3	Revisão da literatura	33
2.3.1	Eficiência de Ciclones em LFC.....	33
2.3.2	Vazão de aeração na válvula <i>loop seal</i>	38
3	METODOLOGIA	41
3.1	Descrição do sistema experimental.....	41
3.1.1	Subsistema do circuito de fluidização.....	43
<u>3.1.1.1</u>	<u>Ciclone</u>	<u>43</u>
<u>3.1.1.2</u>	<u>Válvula <i>loop seal</i></u>	<u>44</u>
3.1.2	Subsistema do fornecimento do ar de fluidização no <i>riser</i>	45
3.1.3	Subsistema de fornecimento da aeração	47
3.2	Propriedades do material do leito	48
3.3	Procedimentos dos testes experimentais	49
3.4	Tratamento dos dados experimentais	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	Análise operacional do sistema de leito fluidizado circulante	56
4.1.1	Comportamento do fluxo de recirculação dos sólidos em função da vazão de aeração, posição da aeração e inventário de sólidos	56
4.1.2	Comportamento dos perfis de pressão estática do escamento gás-sólido em função da vazão volumétrica e posição da aeração.....	60
4.1.3	Queda de pressão nos componentes do sistema de LFC	64
4.2	Desempenho do ciclone	68

4.2.1	Eficiência de coleta do ciclone em função das variáveis controláveis	68
4.2.2	Queda de pressão no ciclone em função das variáveis controláveis	74
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Motivação

Nas últimas décadas, a tecnologia de fluidização tem apresentado um sustentado crescimento de uso em fornalhas de geradores de vapor ou caldeiras. De acordo com Global Market Insights (2019), o mercado mundial das fornalhas de leito fluidizado foi avaliado em mais de US\$ 38 bilhões em 2018, com previsão de ultrapassar US\$ 50 bilhões em 2025.

A fluidização é uma operação em que um aglomerado de partículas (leito) é colocado em suspensão pela passagem ascendente de um gás ou de um líquido, passando a comportar-se como um fluido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991; GRACE; KNOWLTON; AVIDAN, 1997). Quando aplicada ao processo de combustão em fornalhas de fornalhas, o material combustível adicionado ao leito é queimado em um ambiente que permite o intenso contato dele com um inventário de partículas inertes e gás oxidante, gerando calor útil. Aproximadamente 95% do inventário ou leito de sólidos é constituído por partículas inertes que geralmente variam de tamanho na faixa de 100 μm a 1000 μm (BASU, 2006).

As fornalhas fluidizadas são de dois tipos: borbulhantes e circulantes. Nas fornalhas de leito fluidizado circulante (LFC), que utilizam o mesmo princípio operacional do equipamento estudado na presente dissertação, a velocidade do gás oxidante alimentado é alta o suficiente para produzir o arraste líquido de apenas uma parcela do inventário dos sólidos. Segundo Basu (2006), essa velocidade do gás é normalmente superior à velocidade de transporte do tamanho médio das partículas do leito, com a qual consegue-se o regime de fluidização rápida no interior da fornalha. A maioria das partículas que saem da fornalha é capturada por um separador gás-sólido, normalmente do tipo ciclone, sendo enviada de volta à base da câmara de combustão a um fluxo de sólidos apropriado (MUSCHELKNAUTZ; GREIF, 1997).

Os ciclones instalados em sistemas particulados são dispositivos que separam partículas sólidas de uma corrente gasosa pela ação da força centrífuga. Essa força induz os sólidos em direção à parede do ciclone, onde deslizam por gravidade para a saída inferior do dispositivo e são coletados. Os separadores ciclônicos não possuem partes móveis e são robustos, requerendo baixo capital de investimento e de manutenção na maioria das aplicações. Adicionalmente, podem ser

utilizados em ambientes com condições extremas de temperatura e pressão, assim como quimicamente agressivos (MUSCHELKNAUTZ; GREIF, 1997; HOFFMANN; STEIN; BRADSHAW, 2002).

Em fornalhas de LFC, o ciclone separa a corrente gasosa das partículas arrastadas que ainda precisam manter-se no circuito de fluidização por mais tempo. Quando esse papel não é bem executado, seja pelo dimensionamento inadequado do ciclone ou pela imposição de condições operacionais adversas, afeta-se o rendimento do processo de queima, devido à perda excessiva de partículas combustíveis que não conseguem liberar todo o calor que poderiam por causa da combustão parcial (BASU, 2006). Dessa forma, por estarem sujeitos a receber correntes gás-sólido com concentrações de partículas superiores às de outros tipos de fornalhas, como as de Leito Fluidizado Borbulhante (LFB) e convencionais (leito móvel em grelha e suspensão), exige-se um maior cuidado no projeto do dispositivo separador e nas condições que devem ser impostas ao sistema de combustão operado sob fluidização rápida.

Dentre os parâmetros operacionais do LFC que afetam a eficiência de separação do ciclone, destacam-se o tamanho e a concentração das partículas sólidas na corrente gasosa, a velocidade de entrada e a temperatura do gás (HUGI; REH, 1995; DE; NAG, 1999; MUSCHELKNAUTZ; MUSCHELKNAUTZ, 1999; SHUKLA; SHUKLA; GHOSH, 2013; YANG; SUN; ZHAN, 2015; KNOWLTON, 2017; HUANG *et al.*, 2018; WEI; SUN; YANG, 2019; PAULA; HENRIQUEZ; FIGUEIREDO, 2020). Além dos parâmetros acima mencionados, outros autores da literatura relatam que as características da aplicação da aeração na válvula de recirculação dos sólidos podem causar efeitos adversos no rendimento de captura do ciclone (BASU; CHENG, 2000; DIETER *et al.*, 2011; YAO *et al.*, 2011; YUKSELENTURK; YILMAZ, 2019; SUÁREZ; GÓMEZ, 2022). Todavia, as análises apresentadas nesses trabalhos são apenas qualitativas e, até onde foi possível pesquisar, ainda não foram apresentadas avaliações com resultados quantitativos obtidos de testes experimentais ou de estimativas realizadas a partir de simulações computacionais.

O presente trabalho contribui no preenchimento desta lacuna, avaliando a influência das características da aplicação da aeração numa válvula *loop seal* sobre o rendimento operacional (eficiência de coleta e queda de pressão) do ciclone acoplado a uma Unidade de Fluidização Rápida a Frio (UFRAF) construída em escala piloto. Esse estudo, de natureza experimental, analisa o comportamento do dispositivo de

separação gás-sólido em função de três parâmetros de entrada, são eles: vazão volumétrica da aeração injetada na base da válvula *loop seal*, posição dessa aeração (uso ou não de uma parcela dessa aeração na coluna vertical de retorno dos sólidos) e inventário de sólidos carregado no sistema. O trabalho estuda também outros parâmetros fluidodinâmicos como o perfil de pressão estática e o fluxo de recirculação de sólidos em função das variáveis de entrada. Adicionalmente, mediante a inclusão de uma análise estatística baseada na técnica do planejamento fatorial de experimentos, é estabelecida a hierarquia dos efeitos produzidos pelos parâmetros analisados sobre o rendimento do ciclone.

1.2 Objetivos

Os objetivos geral e específicos deste trabalho são descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar, mediante a realização de experimentos, a influência das características da aeração de uma válvula *loop seal* sobre o rendimento do ciclone de um leito fluidizado circulante operado em condição ambiente com dois níveis de inventário de sólidos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Implementar adequações ao sistema experimental de LFC existente, a fim de permitir a avaliação de seus parâmetros fluidodinâmicos sobre as duas variáveis de saída principais (respostas): eficiência de coleta e a queda de pressão do ciclone.
- Realizar experimentos para a avaliação da eficiência de coleta no ciclone e da queda de pressão no mesmo, em função de três variáveis controláveis principais ou parâmetros de entrada: vazão volumétrica da aeração injetada na base da válvula *loop seal*, posição da aeração (distribuída ou não entre válvula *loop seal* e *standpipe*), e diferentes inventários de sólidos carregados no sistema.
- Analisar o comportamento operacional do sistema de LFC com base no perfil axial de pressão estática e do fluxo de recirculação dos sólidos, com o intuito de

explicar melhor, por meio de gráficos, a relação entre os três parâmetros principais e as duas respostas de interesse.

- Determinar a significância estatística dos efeitos principais e de interação das três variáveis controláveis sobre as duas variáveis principais de saída, observando também as consequências sobre os perfis de pressão estática e do fluxo de recirculação dos sólidos no LFC.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados, inicialmente, os principais aspectos teóricos e tecnológicos relevantes ao assunto tratado nesta dissertação. Nesse sentido, abordam-se as características referentes à operação do sistema de leito fluidizado circulante (LFC) e seus componentes, dando maior ênfase ao ciclone e à válvula *loop seal*. Posteriormente, apresenta-se uma revisão da literatura com a descrição de alguns trabalhos que relacionam a eficiência de separação e a queda de pressão do ciclone com parâmetros operacionais de um LFC, tais como velocidade de fluidização, inventário de sólidos, diâmetro da partícula e características da aplicação da aeração na válvula *loop seal*.

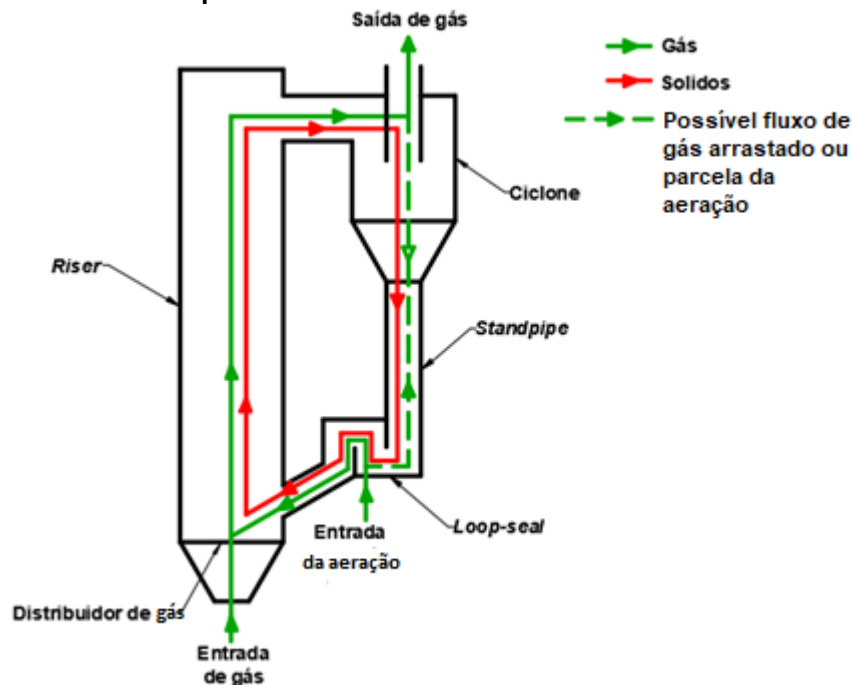
2.1 Leito fluidizado circulante

O sistema de LFC gás-sólido utiliza o regime de fluidização rápida como princípio básico de funcionamento. Nesse regime fluidodinâmico, o escoamento multifásico é caracterizado por uma mistura estratificada de partículas e gás que se movimenta no sentido axial e radial no interior de uma coluna, envolvendo alta velocidade de deslizamento entre as fases. Na prática, para que o regime de fluidização rápida ocorra, é necessário que o gás atinja a velocidade de transporte (u_{tr}), a qual possui valor superior à velocidade terminal da partícula (u_t). A velocidade terminal é definida como a velocidade atingida pela partícula em condição de equilíbrio das forças de arrasto e gravitacional, quando essa está na iminência de ser arrastada para cima ((KUNII; LEVENSPIEL, 1991; GRACE; KNOWLTON; AVIDAN, 1997). O equipamento de fluidização é chamado de “circulante”, porque uma quantidade líquida da fase sólida é arrastada para fora da coluna sob o regime de fluidização rápida e restituída continuamente em ciclos, utilizando componentes pertencentes a um circuito de transporte (Figura 1).

Conforme ilustrado na Figura 1, o sistema de LFC utiliza um distribuidor de ar para manter o inventário de sólidos na coluna principal (*riser*) e possibilitar a distribuição homogênea do gás de fluidização. No *riser* ocorrem as principais operações do equipamento sob o regime de fluidização rápida. As partículas que deixam o topo do *riser* são separadas da corrente gasosa pela ação de um ciclone, normalmente sendo de escoamento reverso. Nesse tipo de separador, os gases

limpos saem pela parte superior do ciclone, enquanto que as partículas são direcionadas para a sua base e liberadas para uma coluna de retorno (*standpipe*) que opera sob ação da gravidade. As partículas armazenadas na base do *standpipe* ingressam a um dispositivo de reciclagem de sólidos, que as leva novamente para o fundo do *riser* ao vencer uma queda de pressão adversa com o auxílio de aeração localizada. Em sistemas de LFC, usam-se frequentemente válvulas *loop seal* ou válvulas L e V como dispositivos de reciclagem de partículas (BASU; CHENG, 2000; YANG, 2003).

Figura 1 - Desenho esquemático de um sistema de leito fluidizado circulante (LFC)

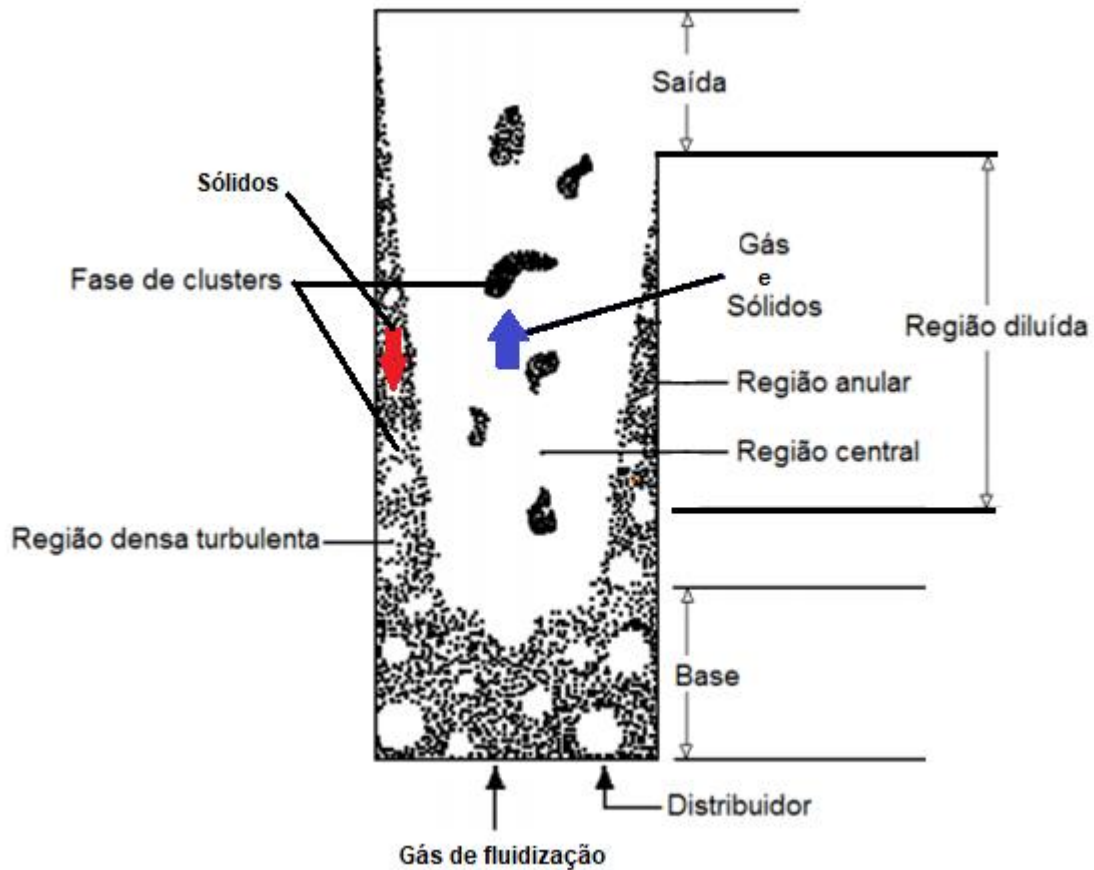


Fonte: adaptada de Yang (2003) e de Machado, Behainne e Parise (2019)

No regime de fluidização rápida desenvolvido na coluna *riser* (Figura 2), o perfil axial de concentração de partículas possui uma região densa na base, que mantém porosidade axial e radial aproximadamente constante, e outra diluída, que se caracteriza por uma diminuição exponencial da porosidade em direção ao topo. A região diluída apresenta um padrão de escoamento conhecido como núcleo-anular, onde uma mistura gás-sólido com baixa concentração de partículas sobe pelo centro do *riser*, e aglomerados de sólidos (*clusters*) descem nas proximidades das paredes até atingir a região densa perto da base do *riser*. Esta característica confere uma distribuição heterogênea dos sólidos no sentido radial, onde um anel denso de partículas perto das paredes do *riser* é formado, aumentando gradualmente a sua

espessura à medida que se movimenta em direção à base da coluna (BASU, 2006; RAMÍREZ-BEHAINNE, 2007).

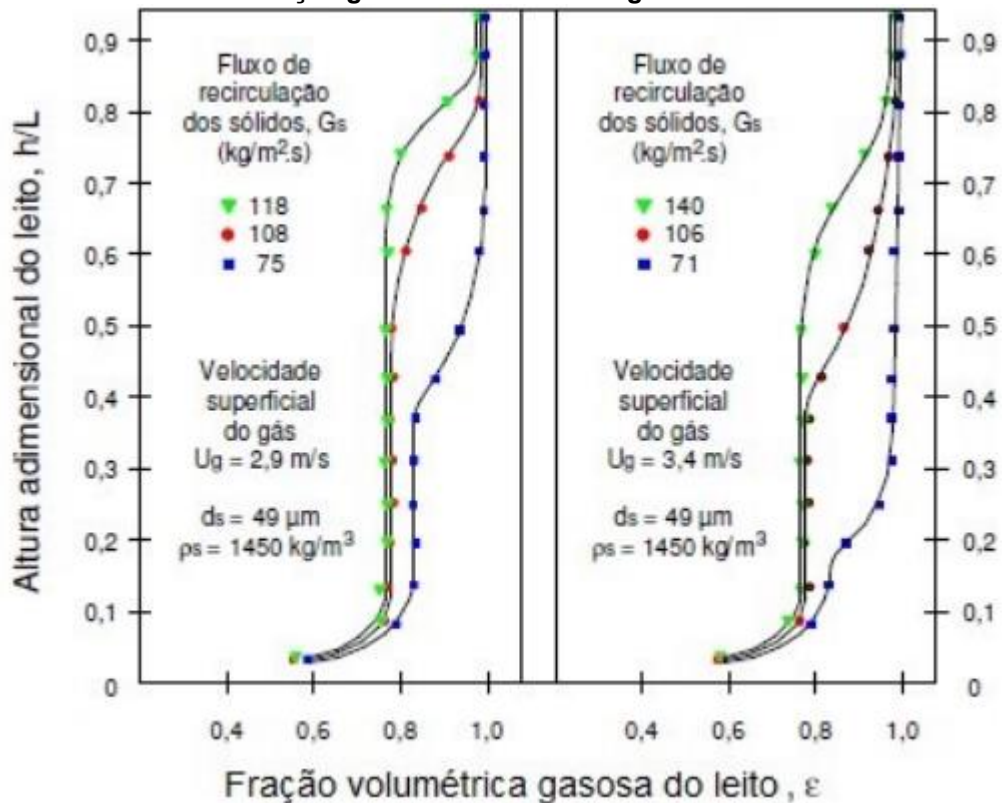
Figura 2- Esquema do padrão de fluidização rápida no *riser* de um LFC



Fonte: adaptada de Basu (2006)

Weinstein, Shao e Schnitzlein (1983) mostraram que os valores da queda de pressão, da velocidade superficial do gás e do fluxo de recirculação das partículas ao longo do *riser* estão relacionados com a altura do inventário de sólidos acumulado no *standpipe*. Os autores perceberam que a mudança axial da região densa para a região diluída em um LFC é caracterizada pelo aparecimento de um ponto de inflexão, identificado nas curvas da Figura 3. Nos experimentos realizados, foi constatado que, mantendo a quantidade de sólidos (inventário) em valor constante, o acréscimo do fluxo de recirculação desloca o ponto de inflexão para cima, aumentando assim a região densa e reduzindo a região diluída. Já, com o aumento da velocidade, consegue-se o efeito inverso, devido ao maior arraste das partículas para o topo do *riser*. Dessa maneira, o ponto de inflexão desloca-se para baixo, com a consequente redução da região densa e aumento da região diluída.

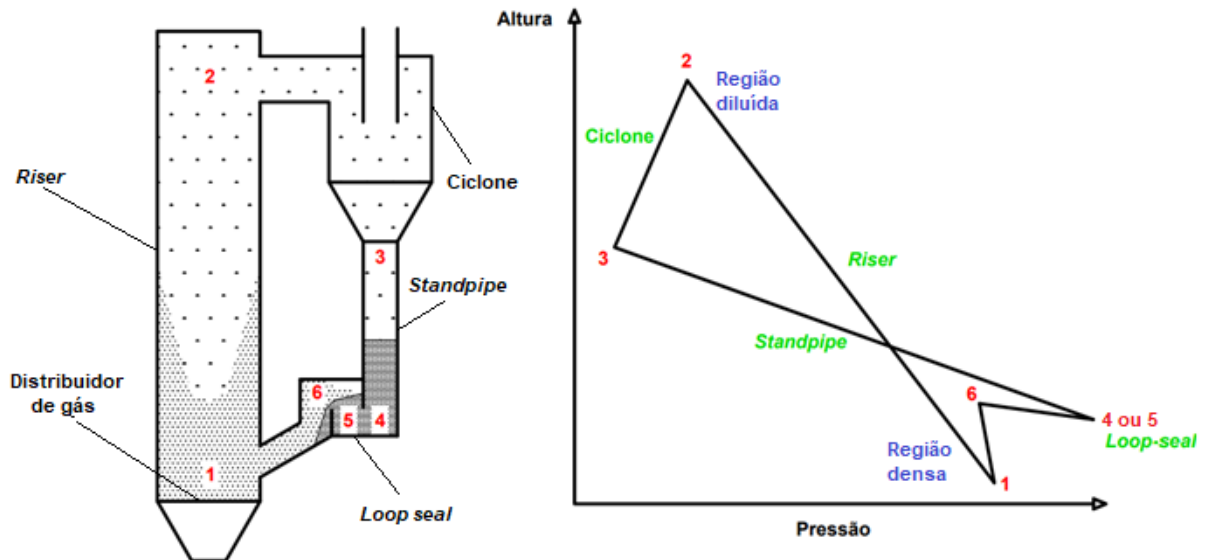
Figura 3 - Efeito da velocidade superficial do gás e do fluxo de recirculação dos sólidos sobre a fração gasosa do leito ao longo do riser



Fonte: adaptada de Weinstein, Shao e Schnitzlein (1983) apud RAMÍREZ-BEHAINNE (2007)

A Figura 4 mostra o comportamento da pressão estática do escoamento gás-sólido em função da altura medida a partir da base do riser de um LFC operado com válvula de recirculação do tipo *loop seal*. A base do riser (ponto 1) possui uma alta concentração de partículas, formando uma região densa, diferentemente do topo (ponto 2), onde a concentração é baixa, caracterizando uma região diluída. Conseqüentemente, a diferença de pressão entre os pontos 1 e 2 é relativamente elevada. Todavia, o maior diferencial de pressão localiza-se no *standpipe*, entre a saída do ciclone (ponto 3) e a base da válvula *loop seal* (pontos 4 e 5), em virtude da maior concentração e acúmulo de sólidos na região do dispositivo de recirculação das partículas (KIM *et al.*, 2002).

Figura 4 - Perfil de pressão em função da altura em um LFC típico com válvula *loop seal*



Fonte: adaptada de Basu (2006) e Ramírez-Behainne (2007)

Para alcançar a operação estável, o LFC precisa cumprir o balanço de pressão descrito pela Equação (1) (KIM *et al.*, 2002):

$$\Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3} + \Delta P_{3-4,5} + \Delta P_{4,5-6} + \Delta P_{6-1} = 0 \quad (1)$$

onde, os termos ΔP representam as respectivas quedas de pressão entre os locais destacados pelos números da cor vermelha na Figura 4.

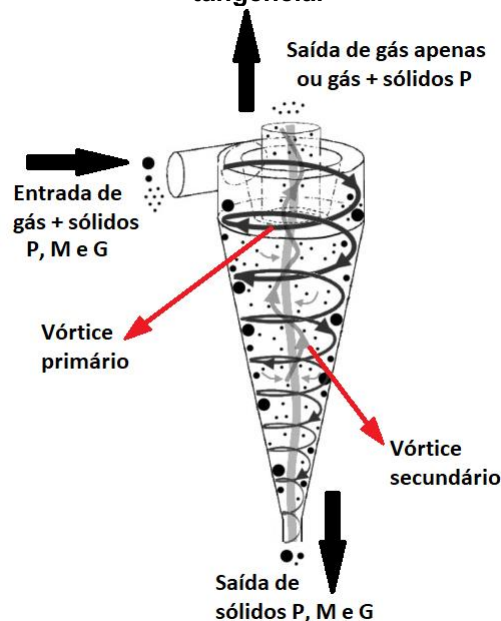
O valor da pressão estática obtida em cada ponto, bem como o diferencial de pressão entre eles, depende da velocidade de fluidização, do inventário de sólidos, do fluxo de circulação dos sólidos, do diâmetro médio das partículas sólidas, da geometria dos componentes, e das características da aeração (vazão e modo) aplicada na válvula *loop seal* (RAMÍREZ-BEHAINNE, 2007; PECETE, 2014; OLIVEIRA, 2019).

2.1.1 Características do ciclone

Os ciclones são conhecidos como coletores centrífugos de poeira, utilizados para separar partículas sólidas de gases na indústria desde o final do século XIX. Representam um dos mais difundidos aparelhos que utilizam o efeito inercial para remover sólidos particulados de correntes gasosas. Estes separadores também podem ser empregados na determinação da distribuição de tamanhos de partículas

suscetíveis ao transporte por uma corrente de gás (SOUZA, 1994). Embora existam outros separadores que realizam a mesma função do ciclone, este último tem-se mostrado mais vantajoso por possuir baixo custo, facilidade de fabricação, robustez e capacidade de ser utilizado em ambientes com condições físico-químicas extremas (MUSCHELKNAUTZ; GREIF, 1997; HOFFMANN; STEIN; BRADSHAW, 2002; RAOUFI; SHAMS; KANANI, 2009).

Figura 5– Esquema de funcionamento de um ciclone de escoamento reverso com entrada tangencial



Fonte: adaptada de Davailles, Climent e Borgeois (2012)

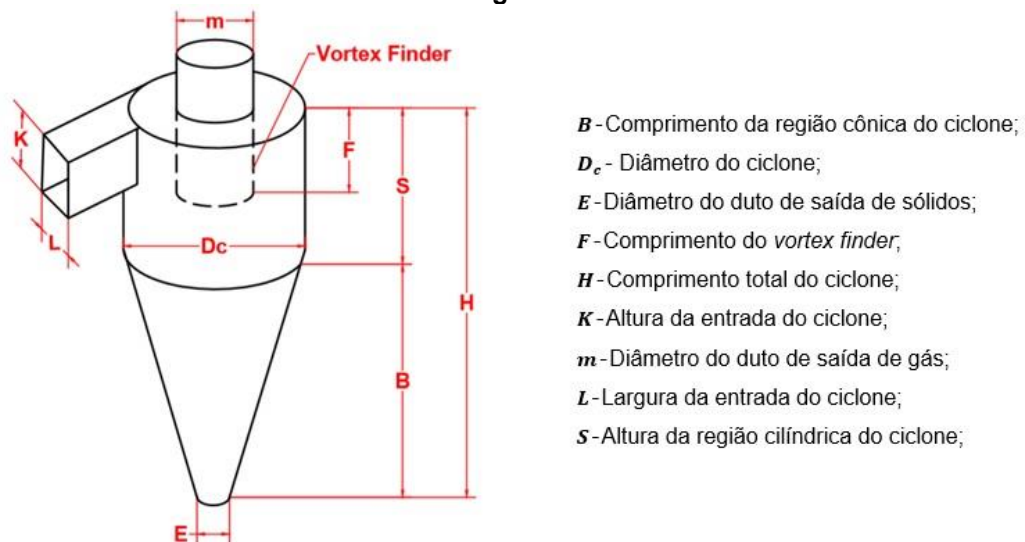
De acordo com Grace, Knowlton e Avidan (1997), os ciclones mais utilizados são os de escoamento reverso e com entrada tangencial, caracterizados por separar partículas sólidas de um escoamento de gás pela ação de uma força centrífuga exercida sobre essas. Nesse tipo de ciclone, a corrente de gás, acompanhada de partículas de diferentes tamanhos (pequenas, médias e grandes, representadas pelas letras P, M e G, respectivamente na Figura 5), entra ao ciclone por um duto posicionado tangencialmente ao corpo principal do separador (Figura 5).

Após o seu ingresso, a corrente gás-sólido adquire um movimento helicoidal (vórtice primário), que impulsiona as partículas maiores em direção às paredes do dispositivo devido à força centrífuga. Assim, ao ficarem em contato com as paredes do corpo principal do ciclone, essas partículas desaceleram pelo atrito com a superfície e acabam descendo por gravidade para, posteriormente, serem coletadas na base do dispositivo. Em contrapartida, o gás, agora com partículas menores em

baixa concentração, continua seu movimento por um caminho de menor restrição à passagem, formando um vórtice secundário ascendente em direção ao topo do ciclone, por onde é finalmente liberado.

No ciclone de uma fornalha de LFC, as partículas maiores separadas da corrente gasosa são direcionadas à coluna de retorno dos sólidos ou *standpipe*. Isso permite que material combustível, ainda aproveitável energeticamente, circule entre 15 a 50 vezes pelo sistema de LFC, favorecendo a eficiência de combustão (MUSCHELKNAUTZ; GREIF, 1997; RAMÍREZ-BEHAINNE, 2007). Os resultados obtidos por Morita (2009), sugerem que o ciclone também poderia reduzir a emissão dos óxidos de nitrogênio (NO_x), ao otimizar o consumo do calcário que precisaria ser alimentado na fornalha junto com combustíveis fósseis para remover dióxido de enxofre (SO_2). Os parâmetros dimensionais de um ciclone de escoamento reverso são ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Parâmetros geométricos de um ciclone de escoamento reverso com entrada tangencial



Fonte: adaptada de Basu (2006)

Dependendo da aplicação, os ciclones de escoamento reverso e com entrada tangencial são classificados em três tipos: alta vazão, alta eficiência e propósito geral. Lapple (1951), Stairmand (1951), Peterson e Whitby (1965) e Swift (1969), definiram proporções geométricas padrões para esses ciclones, relacionando os parâmetros dimensionais da Figura 6. A Tabela 1 mostra tais proporções geométricas, compiladas por Basu (2006).

Tabela 1 - Proporções recomendadas para ciclones de escoamento reverso de acordo com a sua aplicação

Tipo de ciclone:	$\frac{K}{D_c}$	$\frac{L}{D_c}$	$\frac{m}{D_c}$	$\frac{F}{D_c}$	$\frac{S}{D_c}$	$\frac{H}{D_c}$	$\frac{E}{D_c}$	Autoria:
Alta vazão	0,75	0,375	0,75	0,875	1,5	4,0	0,375	Stairmand (1951)
	0,8	0,35	0,75	0,85	1,7	3,7	0,4	Swift (1969)
Alta eficiência	0,44	0,21	0,4	0,5	1,4	3,9	0,4	Swift (1969)
	0,5	0,22	0,5	0,5	1,5	4,0	0,375	Stairmand (1951)
Propósito geral	0,5	0,25	0,5	0,6	1,75	3,75	0,4	Swift (1969)
	0,5	0,25	0,5	0,625	2,0	4,0	0,25	Lapple (1951)
	0,584	0,208	0,5	0,584	1,333	3,167	0,5	Peterson e Whitby (1965)

Fonte: Basu (2006)

2.1.2 Características da válvula *loop seal*

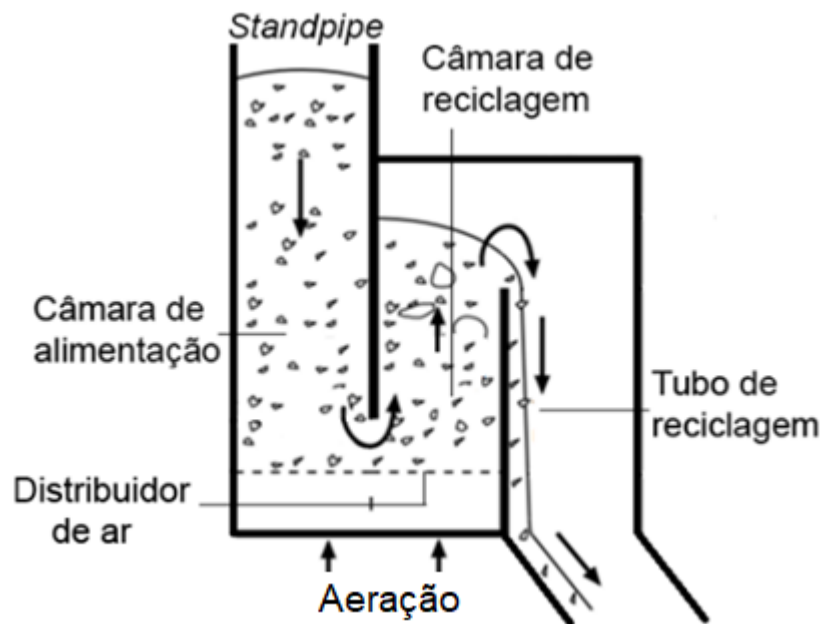
Uma das dificuldades que precisa ser superada para conseguir o funcionamento estável de um sistema de LFC refere-se à realocação dos sólidos capturados pelo ciclone na base do *riser*. Pelas suas características, esse retorno de partículas precisa de intervenção externa, uma vez que a região superior do *standpipe*, que recebe os sólidos do ciclone, possui pressão inferior à da base do *riser*.

Para contornar o problema, é preciso utilizar um dispositivo de recirculação de sólidos, que além de manter a estabilidade operacional do sistema, consiga controlar o tempo de residência das partículas mediante a regulagem da vazão mássica recirculada (KUNNI; LEVENSPIEL, 1991; MORITA, 2009). Essa recirculação pode ser feita utilizando dispositivos mecânicos que possuem partes móveis, porém, que são pouco utilizados em fornalhas de LFC por apresentar problemas em ambientes de elevada temperatura. Como alternativa, costuma-se utilizar dispositivos sem elementos mecânicos com baixo consumo de energia, normalmente de tipo pneumático, em que uma baixa injeção de ar (aeração) é suficiente para promover o retorno de sólidos ao *riser* (BASU, 2006).

As válvulas do tipo L, V e *loop seal* são os dispositivos de recirculação de sólidos de acionamento pneumático mais aplicados em sistemas de LFC, com as válvulas *loop seal* ganhando destaque em processos de combustão. Conforme

mostrado na Figura 7, a válvula *loop seal* possui duas câmaras: a de alimentação e a de reciclagem. Os sólidos que saem pela parte inferior do ciclone, atingem primeiramente à câmara de alimentação após serem transportados por gravidade através do *standpipe*. Na sequência, ar injetado na base da *loop seal* com vazão mássica apropriada, que atravessa um distribuidor de gás, faz com que o atrito entre as partículas acumuladas na câmara de alimentação diminua, facilitando o deslocamento delas para a câmara de reciclagem com ajuda da pressão hidrostática atribuída à coluna de sólidos acumulada no *standpipe*. A magnitude da vazão de ar, bem como o local específico da injeção (normalmente posicionado na câmara de alimentação e/ou na câmara de reciclagem), permite que o leito de sólidos se expanda na câmara de reciclagem e transborde a barragem da *loop seal*, conseguindo-se assim o retorno das partículas ao *riser* através do tubo de reciclagem (BASU, 2006).

Figura 7 – Movimentação de partículas sólidas em uma válvula *loop seal*



Fonte: Machado (2019, adaptada de BASU, 2006)

Além de possibilitar a recirculação dos sólidos, a operação da válvula *loop seal* também tem influência sobre parâmetros operacionais do leito, tais como no fluxo de recirculação das partículas, na porosidade do leito no *riser* e nas quedas de pressão experimentadas pelos componentes do LFC. A vazão de ar injetado (aeração) na *loop seal* deve ser aplicada dentro de uma faixa de valores apropriados, a fim de evitar o fenômeno conhecido como “curto circuito” do LFC, em que o fluxo de sólidos de recirculação é interrompido. Quando usados valores de aeração abaixo de um

mínimo requerido, a interrupção da circulação dos sólidos é causada pelo atrito excessivo que prevalece entre as partículas ao fornecer aeração insuficiente. Já, quando usados valores de aeração muito altos, a interrupção da circulação dos sólidos também pode acontecer se o inventário de sólidos acumulado na coluna *standpipe* for muito baixo, com o qual não se consegue vencer o gradiente de pressão adverso na válvula *loop seal* (BASU; CHENG, 2000).

Suspeita-se que a aplicação de altas vazões de aeração prejudica a eficiência do ciclone. Estudos sem comprovação de dados experimentais ou resultados de simulações numéricas relatam que, sob condições operacionais específicas, o excesso de aeração pode criar caminhos preferenciais do gás na região do *standpipe*, principalmente em direção à base do ciclone, afetando o rendimento do separador gás-sólido (BASU; CHENG, 2000; YAO, *et al.* 2011; YUKSELENTURK; YILMAZ, 2019).

2.2 Rendimento operacional dos ciclones

O desempenho operacional de um ciclone pode ser avaliado em termos da sua eficiência de coleta das partículas e da queda de pressão entre o local de entrada e de saída da corrente gasosa que atravessa o dispositivo (SOUZA, 1994).

2.2.1 Eficiência de coleta

Dentre os modelos semi-empíricos utilizados para o cálculo da eficiência de separação, os mais antigos baseiam-se no cálculo prévio do diâmetro de corte ou diâmetro crítico da partícula, d_{50} , que é definido como o diâmetro da partícula cuja eficiência individual de coleta corresponde a 50%. Os valores de eficiência para todos os outros tamanhos de partículas são determinados utilizando o valor de d_{50} como referência (SOUZA, 1994).

Hoffmann, Stein e Bradshaw (2002), apresentam duas eficiências de separação para ciclones: a eficiência individual de separação e a eficiência total de separação. A eficiência individual, $\eta(i)$, representa a fração de separação para partículas com tamanho i . Por outro lado, a eficiência total de separação (η) envolve toda a distribuição de tamanho das partículas, sendo expressa pela Equação (2):

$$\eta = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_t} = 1 - \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_t} = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_c + \dot{m}_s} \quad (2)$$

onde, \dot{m}_c é a vazão mássica de sólidos coletada pelo ciclone; \dot{m}_s , a vazão mássica de sólidos que deixa o ciclone com o gás; e \dot{m}_t , a vazão mássica total de sólidos que entra no ciclone.

A Equação (2), apresentada por Hoffmann, Stein e Bradshaw (2002), é normalmente utilizada para se obter a eficiência total η de um ciclone já projetado e construído. Todavia, para o dimensionamento do dispositivo, torna-se necessário utilizar modelos matemáticos disponíveis na literatura, tais como o de Lapple (1950), Zenz (1975), Li e Wang (1989) e Muschelknautz e Greif (1997), listados resumidamente na Tabela 2.

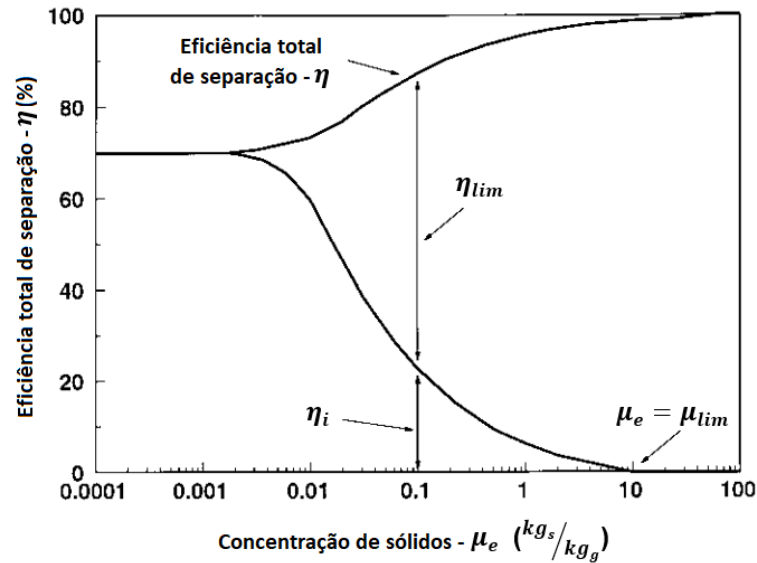
Tabela 2 - Principais modelos matemáticos para o cálculo da eficiência total de separação		
Equação da eficiência total de separação (η)	Autoria	Observações
$\frac{1}{[1 + (\frac{d_p}{d_{50}})^{-2}]}$	Lapple (1950)	$\frac{d_p}{d_{50}}$ Relação entre diâmetro da partícula e diâmetro crítico, disponível em Lapple (1950).
$\frac{1}{[1 + (\frac{d_p}{d_{50}})^{-2}]}$	Zenz (1975)	$\frac{d_p}{d_{50}}$ Relação entre diâmetro da partícula e diâmetro crítico, disponível em Zenz (1975).
$1 - \exp[-\lambda\theta_1]$	Li e Wang (1989)	λ, θ_1 – Funções matemáticas, disponíveis em Li e Wang (1989).
$\eta_{lim} + \eta_i$ onde: $\eta_{lim} = 1 - \frac{\mu_{lim}}{\mu_e}$ $\eta_i = \frac{\mu_{lim}}{\mu_e} \exp[-(\frac{d_i^*}{d_e^*/0.7^{1/n_{Ai}}})^{n_{Ai}}]$	Muschelknautz e Greif (1997)	Este modelo é especialmente recomendado para LFC. $\mu_{lim}, \mu_e, d_i^*, d_e^*$ e n_{Ai} – Funções matemáticas disponíveis em Muschelknautz e Greif (1997).

Fonte: autoria própria (2021)

Segundo o modelo de Muschelknautz e Greif (1997), a eficiência total de separação (η) de um ciclone acoplado a sistema de LFC é calculada pela soma da eficiência de separação devido ao vórtice interno (η_i), e da eficiência de separação atribuída ao atrito com a parede do ciclone (η_{lim}).

A Figura 8 mostra que, para concentrações de sólidos muito baixas ($\mu_e < 0,01$), η_i contribui consideravelmente sobre η . Já, η_{lim} é praticamente irrelevante, conseguindo-se assim valores de η relativamente baixos ($\eta \leq 70\%$).

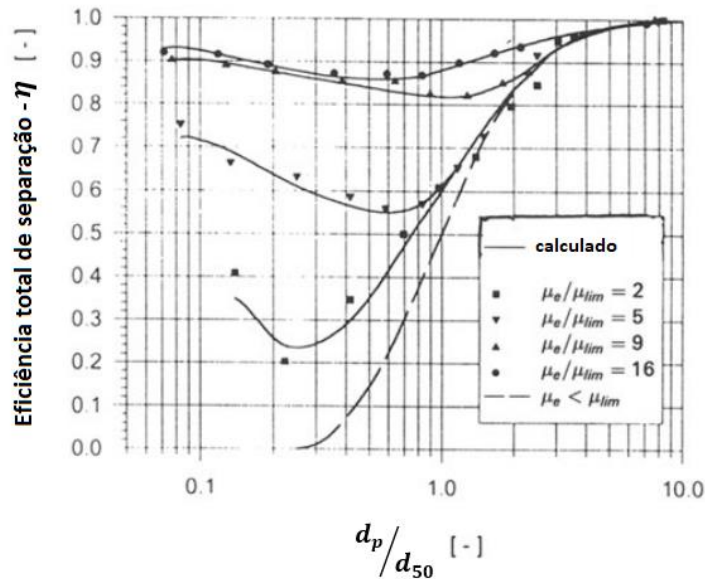
Figura 8 – Eficiência de separação em função da concentração de sólidos na entrada do ciclone



Em contrapartida, quando a concentração de sólidos na entrada do ciclone se aproxima do valor limite (concentração crítica: $\mu_e = \mu_{lim}$), a maior parte dos sólidos são separados pelo efeito do atrito envolvendo a parede do ciclone (η_{lim}), restando uma pequena parcela, praticamente desprezível, de partículas que são separadas no vórtice interno (η_i). Dessa maneira, a eficiência total de separação em tal condição pode ser próxima de 100% (MUSCHELKNAUTZ; GREIF, 1997).

A Figura 9 coloca em evidência que o efeito do diâmetro da partícula (d_p/d_{50}) sobre a eficiência total de separação (η) depende da concentração de sólidos na entrada do ciclone (μ_e/μ_{lim}). Observa-se que o aumento do d_p é diretamente proporcional à η somente quando a concentração de sólidos é baixa ($\mu_e < \mu_{lim}$). Todavia, para $\mu_e/\mu_{lim} > 9$ e d_p/d_{50} variando de 0,1 a 3, a η muda na faixa de 0,85 a 0,95, aproximadamente. Já, para d_p relativamente grande ($5 < d_p/d_{50} < 10$), a η se aproxima de 100%, independentemente do valor de μ_e/μ_{lim} (MUSCHELKNAUTZ; GREIF, 1997).

Figura 9—Relação entre eficiência total de separação e razão de diâmetros para diferentes relações de concentração de sólidos



Fonte: adaptada de Muschelknautz e Greif (1997)

2.2.2 Queda de pressão em ciclones

De acordo com Souza (1994), a queda de pressão em um ciclone é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de entrada do gás (v_i^2) e à sua massa específica (ρ_g). Além disso, inclui-se o termo adimensional ΔH , representando uma constante de perda de carga para cada geometria de ciclone. Assim, a queda de pressão pode ser expressa pela Equação(3):

$$\Delta P_c = \frac{\rho_g v_i^2}{2} \Delta H \quad (3)$$

Considerações operacionais específicas, tais como compressão do gás na entrada e/ou na saída do ciclone, atrito na parede, entre outras, têm impossibilitado a adoção de uma única equação para o cálculo da queda de pressão (SOUZA, 1994; PELL; DUNSON; KNOWLTON, 2008).

A Tabela 3 mostra alguns dos principais modelos matemáticos usados para calcular a queda de pressão em um ciclone, sendo eles, os apresentados por Shepherd e Lapple (1939), First (1949), Casal e Benet (1983) e Muschelknautz e Greif (1997). Os três primeiros modelos são aplicados para ciclones de uso

convencional, já o último modelo, de Muschelknautz e Greif (1997) é aplicado a ciclones utilizados em sistemas de LFC.

Tabela 3 - Modelos matemáticos para cálculo da queda de pressão no ciclone

Equação da queda de pressão no ciclone (ΔP_c)	Autoria	Observações
$\frac{\rho_g v_i^2}{2} C \left[\frac{KL}{m} \right]$	Shepherd e Lapple (1939)	$C = 16$ - Para ciclones com entrada tangencial
$\frac{\rho_g v_i^2}{2} \frac{24KL}{m^2} \left[\frac{D_c}{S(H-S)} \right]^{1/3}$	First (1949)	-
$\frac{\rho_g v_i^2}{2} \left[11,3 \left(\frac{KL}{m^2} \right) + 3,33 \right]$	Casal e Benet (1983)	-
$\Delta P_e + \Delta P_i$		
$\Delta P_e = \lambda_s \frac{A_R}{0,9Q_g} \frac{\rho_g}{2} (u_a u_i)^{(3/2)}$	Muschelknautz e Greif (1997)	-
$\Delta P_i = \frac{\rho_g v_i^2}{2} \left[2 + 3 \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^{(4/3)} + \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^2 \right]$		

Fonte: autoria própria (2021)

Muschelknautz e Greif (1997) mostram que, diferente dos outros modelos, a queda de pressão em um ciclone de um LFC possui duas parcelas: uma atribuída ao atrito gás-parede e gás-partícula (ΔP_e) e outra devida ao vórtice central que se forma no interior do ciclone até a saída do gás pelo topo (ΔP_i).

Além dos modelos descritos na Tabela 3, outros autores (SHEPHERD; LAPPLE, 1939; BRIGGS, 1946; STAIRMAND; 1949; CASAL; BENET, 1983; CASAL; KAGAROS; AVCI, 2005; CHEN; SHI, 2007; CORTES; GIL, 2007) apresentam alternativas que incluem dois métodos diferentes para o cálculo do termo adimensional ΔH .

O primeiro método calcula ΔH mediante o produto de dois termos (ξg e ξs) que consideram, respectivamente, o efeito da geometria e da carga sólida do gás na queda de pressão do ciclone. Shepherd e Lapple (1939), bem como Casal e Benet (1983), analisaram um ciclone de fluxo diluído e usaram modelos empíricos para estimar ξg , considerando apenas o efeito da geometria através da relação entre as

áreas de entrada e saída do ciclone. Já, ξ_s pode ser determinado usando a correlação de Briggs (1946) para ciclones com baixa carga de sólidos.

O outro método consiste em determinar ΔH adicionando parcelas de contribuição na queda de pressão, na qual somam-se os efeitos da aceleração de entrada (ξ_{in}), do atrito com as paredes (ξ_{corpo}) e das perdas de carga dentro do núcleo do vórtice do ciclone (ξ_{out}) (STAIRMAND; 1949; CASAL; BENET, 1983; MUSCHELKNAUTZ; GREIF, 1997; CHEN; SHI, 2007; CORTES; GIL, 2007). Nesse caso, os modelos levam em consideração o efeito da carga de sólidos e do comprimento da região cilíndrica do ciclone (S) na queda de pressão total do ciclone por meio de efeitos de atrito. É importante destacar que para ciclones com alta carga de sólidos, como os acoplados em sistemas de LFC), a queda de pressão aumenta com o incremento da carga sólida, sendo esse efeito atribuído às perdas por aceleração das partículas sólidas (KNOWLTON; KARRI, 2008).

2.3 Revisão da literatura

A revisão da literatura aqui apresentada é dividida em duas seções: a primeira, mostra uma discussão de alguns trabalhos que estudam a eficiência de ciclones usados em sistemas de LFC; já, a segunda, mostra uma análise de várias pesquisas que envolvem o estudo dos efeitos da vazão de aeração aplicada na válvula *loop seal* sobre a operação do sistema em diferentes situações.

2.3.1 Eficiência de Ciclones em LFC

Em relação a este assunto, foram exploradas as seguintes bases de dados: *Scopus* e *Science Direct*. As buscas foram finalizadas em março de 2023 utilizando as *strings*: *Cyclone*; *Cyclone efficiency*; *Circulating fluidized bed*; *Circulating fluidised bed*; *CFB*.

O Quadro 1 mostra os dois trabalhos mais citados de cada base de dados, além do trabalho mais recente, o único publicado em 2022. O mais citado da base *Science Direct*, com 29 citações, foi publicado por Shin, Jang e Hwang (2005), realiza experimentos em uma fornalha de Leito Fluidizado Circulante (LFC) em escala de laboratório, porém não comenta sobre a eficiência do ciclone. Os autores destacam apenas que foram obtidas melhores eficiências de combustão e menores emissões

de poluentes ao utilizar uma composição de material sólido específico formado por 35% de água e, o restante, de um lodo proveniente do subproduto da fabricação de papel. Este material é diferente ao que geralmente se utiliza em um combustor de LFC piloto, envolvendo material combustível sólido com umidades abaixo de 20%.

Quadro 1 - Documentos mais citados nas bases *Scopus* e *Science Direct* relacionados com o comportamento de ciclones em leito fluidizado circulante

Título do documento	Autores	Ano de publicação	Nº de citações
Base de dados: <i>Science Direct</i>			
<i>Combustion characteristics of paper mill sludge in a lab-scale combustor with internally cycloned circulating fluidized bed</i>	Shin, D., Jang, S., Hwang, J.	2005	29
<i>Cyclone separation in a supercritical water circulating fluidized bed reactor for coal/biomass gasification: Structural design and numerical analysis</i>	Li, G., Lu, Y.	2018	6
Base de dados: <i>Scopus</i>			
<i>Focus on solids strand formation improves separation performance of highly loaded circulating fluidized bed recycle cyclones</i>	Hugi, E., Reh, L.	2000	22
<i>CFB cyclones at high temperature: Operational results and design assessment</i>	Dewil, R., Baeyens, J., Caerts, B.	2008	16
Trabalho mais recente encontrado. Base de dados: <i>Scopus</i>			
<i>Prediction and minimization of NOx emission in a circulating fluidized bed combustor: Improvement of bed quality by optimizing cyclone performance and coal particle size</i>	Ke, X., Yao, Y., Huang, Z., Zhang, M., Lyu, J., Yang, H., Zhou, T.	2022	2

Fonte: autoria própria

O trabalho mais citado da base *Scopus*, com 22 citações, é o escrito por Hugi e Reh (2000). Por meio de experimentos realizados em um sistema de LFC piloto, os autores indicam que ao alimentar uma corrente de gás carregada com material particulado de vidro a altas velocidades na entrada do ciclone, é possível obter

elevadas eficiências de separação ainda para partículas com diâmetro médio relativamente pequeno, entre $1\mu\text{m}$ e $40\mu\text{m}$. De acordo com eles, isso ocorre devido à formação de aglomerados de sólidos relativamente compactos durante a passagem da corrente pelo ciclone. Essa descoberta sugere que uma fornalha de LFC poderia trabalhar com partículas relativamente pequenas sob altas taxas de recirculação de sólidos, aumentando assim, a eficiência de troca de calor sem experimentar perda de eficiência na separação das partículas. É importante destacar também que os experimentos foram realizados em três ciclones com entradas únicas retangulares e com dimensões diferentes, sendo que dois deles não possuíam *vórtex finder*. Os resultados obtidos foram semelhantes para os três dispositivos de separação gás-sólido.

Li e Lu (2018) projetaram ciclones com uma entrada circular única (ECU) ou uma entrada circular dupla (ECD) para se adaptar às condições supercríticas de operação, sendo que, no ECD, uma das entradas recebeu apenas gases e a outra gases com partículas sólidas. Os autores avaliaram o desempenho de separação dos dois ciclones acoplados a um LFC em escala de laboratório, usando simulações numéricas com 6 tamanhos médios de partículas que variaram entre $5\mu\text{m}$ e $60\mu\text{m}$. Um modelo de tensões de Reynolds tridimensional foi usado para simular o escoamento turbulento do fluido, e um modelo Lagrangiano estocástico foi usado para simular o movimento das partículas. A análise da distribuição da turbulência revelou que essa era mais intensa na zona perto do *vórtex finder*, enquanto o escoamento na parte central era relativamente estável. Além disso, foi encontrado que a distribuição da concentração de partículas não era uniforme por causa da força centrífuga. Os resultados obtidos indicaram que a eficiência de separação de ambos os ciclones aumentou com o incremento da velocidade da corrente gasosa na entrada do separador, tendo maior influência sobre o ECD, concordando com o comportamento observado no estudo de Hugi e Reh (2000). Por possuir uma das entradas com escoamento exclusivo para gás sem partículas, o separador ECU teve maior eficiência de separação do que o separador ECD em simulações comparáveis.

No segundo artigo mais citado, encontrado na base de dados *Scopus*, Dewil, Baeyens e Caerts (2008) relatam que nenhum dos modelos da literatura prevê a queda de pressão no ciclone com uma precisão razoável dentro da faixa de condições operacionais experimentais. A partir disso, eles propõem um método alternativo para determinar o fator adimensional, ΔH , da equação da queda de pressão no ciclone.

O trabalho mais recente encontrado na revisão da literatura foi publicado por Ke *et al.* (2022), que apresenta um estudo que investiga o efeito da otimização do desempenho do ciclone e do tamanho das partículas de carvão na emissão de NOx em fornalhas LFC. Os resultados da simulação indicam que o aumento da eficiência do ciclone e a redução do tamanho das partículas de carvão pode melhorar a qualidade do leito, o que leva à formação de uma atmosfera redutora em áreas locais e à inibição efetiva da formação de NOx. Além disso, os autores sugerem que a redução do tamanho das partículas de carvão pode contribuir para o aumento da eficiência de combustão do combustível. O estudo também analisa a influência das características do fluxo gás-sólido no processo de reação química e fornece uma nova solução para o controle de emissões de poluentes de baixo custo para fornalhas de LFC.

Vale também destacar as publicações do ano de 2020, que não possuem citações, mas que indicam a evolução do assunto estudado. Durante as buscas, apenas um trabalho com autores brasileiros foi encontrado. É a pesquisa apresentada por Paula, Henríquez e Figueiredo (2020), os quais destacam que alguns modelos de eficiência de ciclone fazem simplificações, eliminando termos importantes do cálculo. Nesse contexto, eles validam e analisam, analiticamente, uma metodologia de dimensionamento de um ciclone aplicado à um LFC piloto com material particulado de diâmetro médio igual a 30 μm . Três geometrias de ciclone foram consideradas (*Stairmand*, *Swift* e *Lapple*), todas contendo *vórtex finder* e com entrada única retangular. Verificou-se que o aumento da velocidade de entrada no ciclone provocou a elevação da eficiência de separação e a queda de pressão, conforme observado também por Hugi e Reh (2000), bem como por Li e Lu (2018). Das geometrias testadas, a da configuração *Swift* apresentou a maior eficiência de coleta e maior queda de pressão.

Por outro lado, Hwang, Jeong e Hwang (2020) realizaram um estudo numérico com o propósito de analisar o efeito do comprimento do *vórtex finder* (VF) no desempenho do ciclone de uma fornalha de LFC. Os autores concluíram que não vale a pena aumentar o comprimento do VF além de um certo valor, e que existe um comprimento de VF ideal para maximizar a eficiência de coleta do ciclone.

Wang (2020) fez um estudo numérico da eficiência do ciclone em um LFC comercial. O autor analisa a influência do rastreamento da trajetória das partículas, bem como o tamanho médio da partícula sobre a eficiência de separação. Os

resultados mostram que a eficiência da separação é melhorada quando o tamanho da partícula torna-se maior que 30 μm , mostrando um resultado diferente do encontrado por Hugi e Reh (2000), no qual a eficiência de separação já é alta mesmo para partículas pequenas com diâmetro de 1 μm a 40 μm . Adicionalmente, foi encontrado que a eficiência de separação atinge valores suficientemente altos depois que o tamanho da partícula ultrapassa 80 μm e que, a partir desse tamanho, o aumento do diâmetro da partícula não produz mais um efeito significativo.

É importante destacar também que outra palavra-chave pesquisada, em todas as bases de dados foi *Aeration*. Porém, quando a mesma foi colocada junto com as *strings* anteriormente citadas, as bases não encontraram nenhum trabalho, mesmo selecionando-a para ser encontrada em qualquer parte do documento. Todavia, como a *string Aeration* tem uma importância relevante para esta pesquisa, optou-se por fazer uma busca mais abrangente, a fim de encontrar uma relação entre *Aeration* e *Cyclone efficiency* nos trabalhos da literatura. Dessa maneira, uma busca foi realizada nas bases *Scopus* e *Science Direct* do seguinte modo: *Cyclone* (no título, *abstract* ou *keywords*) AND *Aeration* (no título, *abstract* ou *keywords*) AND *Circulating fluidized bed* (no título do documento) OR *Circulating fluidised bed* (no título do documento) OR *CFB* (no título do documento). Desta busca, foram obtidos 11 resultados na base de dados *Scopus*. Dos 6 resultados encontrados na base de dados *Science Direct*, 4 se repetiam na *Scopus* e 2 eram novos. Portanto, um total de 13 documentos diferentes foram encontrados nas buscas.

Os documentos obtidos foram analisados, a fim de encontrar, ao longo dos seus conteúdos, alguma relação entre a eficiência do ciclone e a aeração. Nesse contexto, tal relação foi encontrada em apenas 1 dos 13 trabalhos, correspondendo ao artigo publicado por Yao *et al.* (2011). Neste trabalho, comenta-se que altas vazões de aeração podem causar uma redução na eficiência do ciclone e, conseqüentemente, levar ao aumento no tamanho médio das partículas que permanecem circulando no sistema, reduzindo assim, a eficiência de troca de calor entre as partículas e as paredes de uma fornalha de LFC. Todavia, nenhum detalhe a mais a respeito desse assunto é comentado.

Diante dos outros trabalhos apresentados, pode-se concluir que o aumento da velocidade de entrada no ciclone melhora a eficiência de separação (PAULA; HENRÍQUEZ; FIGUEIREDO, 2020; HUGI; REH, 2000; LI; LU, 2018). O estudo numérico feito por Wang (2020) não conseguiu identificar a formação de aglomerados

de sólidos relativamente compactos para partículas com diâmetro médio relativamente pequeno (de 1 μm a 40 μm), contrastando com o sugerido a partir dos experimentos realizados por Hugi e Reh (2000), em que um aumento na eficiência de separação foi observada com o uso de tais partículas.

2.3.2 Vazão de aeração na válvula *loop seal*

A fim de realizar uma revisão a respeito da válvula *loop seal* e a sua relação com a vazão de aeração, foram feitas novas buscas nas bases de dados *Scopus* e *Science Direct* com as seguintes palavras-chave: *loop seal* (no título) AND *aeration* (no título, *abstract* ou *keywords*). Foram encontrados 23 documentos na *Scopus* e 13 documentos na *Science Direct* com apenas 2 referências diferentes, totalizando assim 25 documentos.

A partir da análise dos documentos encontrados, confirma-se que a vazão da aeração aplicada na válvula *loop seal* modifica o fluxo de recirculação dos sólidos, apresentando uma relação diretamente proporcional ao manter constante o diâmetro da partícula (BASU; BUTLER, 2009; BASU; CHENG, 2000; LI; LI; ZHU, 2014; YUKSELENTURK; YILMAZ, 2019; CHINSUWAN; SOMJUN, 2020). Por outro lado, de acordo com Kim e Kim (2002), quando o diâmetro da partícula é aumentado, torna-se necessário elevar a vazão da aeração para que a taxa de recirculação de sólidos seja mantida. No entanto, como também observado por outros autores, a partir de um determinado valor da vazão da aeração, o fluxo de recirculação dos sólidos não se altera mais, como consequência das limitações impostas ao balanço de pressão com a quantidade do inventário de sólidos carregado no LFC (BASU; BUTLER, 2009; OLIVEIRA, 2019; YUKSELENTURK; YILMAZ, 2019)

Basu e Cheng (2000) destacam que, sob condições em que a vazão de aeração na *loop seal* é alta e a velocidade do gás no *riser* é baixa, a eficiência do ciclone pode ser afetada pela presença de uma corrente de gás ascendente no *standpipe*, proveniente da vazão de aeração. Isso ocorre em virtude do aumento do fluxo de recirculação dos sólidos causado pela elevada vazão de aeração aplicada, que combinado com a baixa velocidade do gás, faz com que as partículas se concentrem no *riser* e diminuam a altura de sólidos acumulados no *standpipe*, facilitando a passagem de uma parcela da aeração em direção ao ciclone. Yukselenturk e Yilmaz (2019) observaram também que, quando a taxa total da aeração aplicada é alta, e

maior na câmara de alimentação do que na câmara de reciclagem, a porção da aeração direcionada para a base do ciclone pode ser considerável.

Dieter *et al.* (2011) identificaram a presença do regime *slugging* no *standpipe* de um sistema de LFC de pequeno porte. Esse regime surge pela formação de grandes bolsões de ar que crescem até ocupar o diâmetro da coluna de sólidos, gerando um movimento pistonado com oscilações de pressão de baixa frequência e alta amplitude. A formação desse regime torna-se altamente provável quando se utiliza alta aeração na câmara de alimentação da válvula *loop seal*, na presença de um leito profundo em tubulação de pequeno diâmetro. Nessas condições, os bolsões de ar tendem a subir pelo *standpipe* em direção ao ciclone, carregando junto partículas sólidas que alteram a eficiência de coleta do ciclone e comprometem o funcionamento do sistema de LFC. Todavia, os autores não apresentaram dados que quantificam as perdas na eficiência de coleta do separador ciclônico.

Li *et al.* (2017) realizaram estudos alterando a vazão de aeração na câmara de reciclagem, mantendo-a constante na câmara de alimentação, conforme também praticado por Li *et al.* (2014). Os autores verificaram que, ao manter constante a velocidade do gás no *riser*, um aumento na vazão de aeração inserida na câmara de reciclagem gerou pouca influência sobre o fluxo de recirculação dos sólidos. Todavia, quando a velocidade do gás na entrada do *riser* foi aumentada, a taxa de recirculação de sólidos passou a ter um aumento significativo.

Mais recentemente, Oliveira (2019) realizou testes experimentais em uma unidade de LFC em escala de laboratório para analisar o efeito do modo de aeração de uma válvula *loop-seal* do tipo U sobre o comportamento de variáveis operacionais, incluindo o perfil de pressão estática, a distribuição do inventário de leito e o fluxo de recirculação dos sólidos transportados pelo circuito de fluidização. Os resultados indicaram valores crescentes de G_s na faixa de 15 kg/m² s a 46 kg/m² s, mas o modo de aeração não afetou, de maneira significativa, o valor médio do G_s no nível de confiança de 95%. Foi observado que a queda de pressão nos componentes *riser*, *standpipe*/câmara de alimentação e câmara de reciclagem foi significativamente afetada pelo modo de aeração utilizado. Nesse sentido, o aumento da taxa de aeração provocou, nos dois primeiros componentes acima descritos, um acréscimo na queda de pressão. Por outro lado, no terceiro, houve uma redução por conta do aumento da porosidade local. Já, o ciclone não sofreu variação significativa na queda de pressão em qualquer modo e vazão de aeração. Vale a pena ressaltar que nesse trabalho, a

queda de pressão no ciclone foi medida entre a entrada da corrente gás-sólido e a saída dos sólidos despejados para o *standpipe*. Esta maneira de aferir a queda de pressão não corresponde à forma universalmente aceita, na qual a pressão estática à jusante é lida na saída do gás depurado que sai pelo topo do ciclone.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a descrição do sistema experimental, as propriedades do material utilizado no leito, o procedimento adotado para a realização dos experimentos e a forma como as informações coletadas foram tratadas para posterior análise.

3.1 Descrição do sistema experimental

O equipamento experimental utilizado neste trabalho é composto pela Unidade de Fluidização Rápida a Frio (UFRAF) ilustrada na Figura 10. Essa unidade encontra-se instalada no Laboratório de Processos Termoquímicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)/Campus Ponta Grossa, sendo dividida em 3 subsistemas: subsistema do circuito de fluidização; subsistema do fornecimento de ar de fluidização no *riser*; subsistema do fornecimento do gás de aeração na válvula *loop seal*.

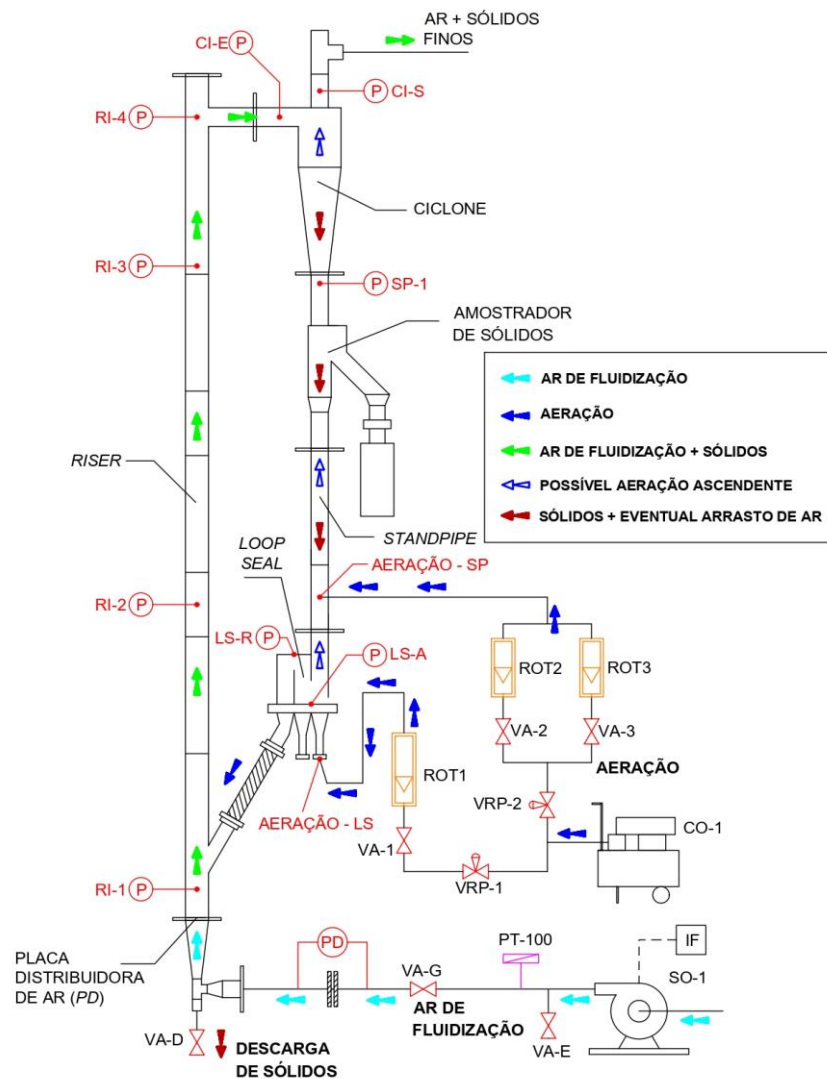
Figura 10 - UFRAF instalada no Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa



Fonte: autoria própria (2021)

A Figura 11 apresenta um desenho esquemático da UFRAF, detalhando os seus subsistemas e componentes. O ar de fluidização é proveniente do soprador SO-1, sendo esse o responsável por manter o regime de fluidização rápida no interior da coluna *riser* e por transportar uma parcela dos sólidos até a entrada do ciclone. Já, o gás de aeração, fornecido pelo compressor CO-1, tem a função de ativar a recirculação das partículas na válvula *loop seal* (LS). Como relatado por Dieter *et al.* (2011), dependendo das condições operacionais, uma parcela da vazão da aeração pode subir pelo *standpipe* (SP) e atingir a base do ciclone. Essa possível corrente de gás é indicada na Figura 11 pelas setas brancas contornadas na cor azul.

Figura 11 – Desenho esquemático da UFRAF



Fonte: autoria própria (2021)

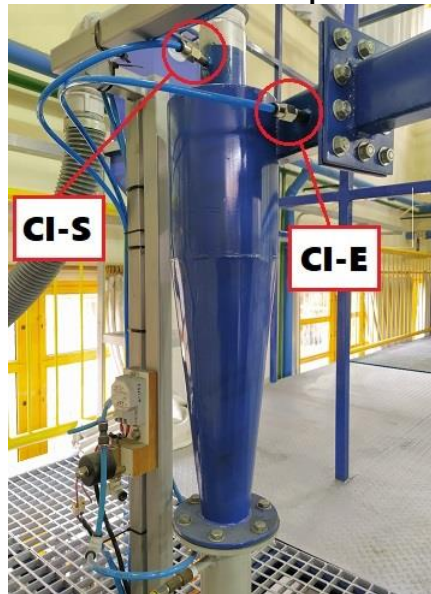
3.1.1 Subsistema do circuito de fluidização

O circuito de fluidização da UFRAF é dividido em seções de tubulação construídas em aço carbono e acrílico, compondo as seguintes partes: uma coluna de fluidização ou *riser*, de 0,078 m de diâmetro interno; um ciclone de entrada tangencial com fluxo reverso; uma coluna de escoamento descendente ou *standpipe*, de 0,052 m de diâmetro interno; um amostrador de sólidos do tipo divergente; uma válvula de recirculação de sólidos do tipo *loop seal*; um tubo flexível para retorno dos sólidos, que interliga a *loop seal* à base do *riser*; tomadas de pressão em vários locais, identificadas como *RI-1*, *RI-2*, *RI-3*, *RI-4*, *CI-1*, *CI-S*, *SP-1*, *LS-A* e *LS-R*; dois locais para injeção da aeração, na *loop seal* (Aeração – *LS*) e na base do *standpipe* (Aeração – *SP*); uma placa distribuidora de ar do tipo *tuyere* – *PD*; um dispositivo cônico tipo *plenum*, conectado à base do *riser* junto à placa distribuidora de ar; uma válvula diafragma, para descarga de sólidos (*VA-D*); uma conexão T, para alimentação dos sólidos pelo topo; e uma mangueira flexível, para exaustão dos gases e das partículas mais finas não capturadas pelo ciclone.

3.1.1.1 Ciclone

A Figura 12 mostra o ciclone instalado na UFRAF e analisado neste estudo. O separador possui 0,145 m de diâmetro de corpo principal, sendo projetado com base nas relações geométricas propostas por Swift (1969) para alta eficiência. Esse ciclone recebe as partículas arrastadas pelo ar de fluidização alimentado no *riser*, separando quase todas as partículas contidas na corrente. O gás depurado é direcionado para o topo do ciclone junto com partículas finas, enquanto que, as partículas retidas pelo dispositivo, descem por gravidade em direção ao *standpipe*. Para medir a queda de pressão do ciclone entre a entrada do escoamento gás-sólido e a saída da corrente de gás com partículas finas não coletadas, foram instaladas as tomadas de pressão identificadas como *CI-E* e *CI-S*, respectivamente.

Figura 12 - Ciclone da UFRAF com suas tomadas de pressão na entrada (CI-E) e saída (CI-S)

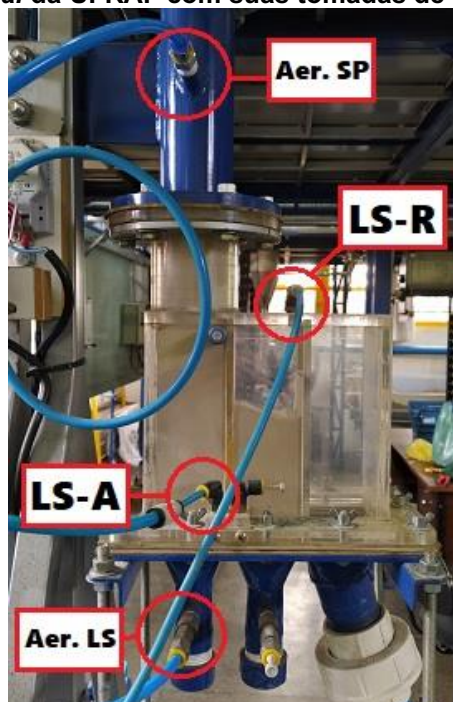


Fonte: autoria própria (2021)

3.1.1.2 Válvula loop seal

A válvula *loop seal* da UFRAF, mostrada na Figura 13, é fabricada em acrílico, possuindo seção transversal quadrada de 0,052 m nas suas duas câmaras de alojamento de sólidos (câmara de alimentação e câmara de reciclagem).

Figura 13– Válvula *loop seal* da UFRAF com suas tomadas de pressão e locais de aeração



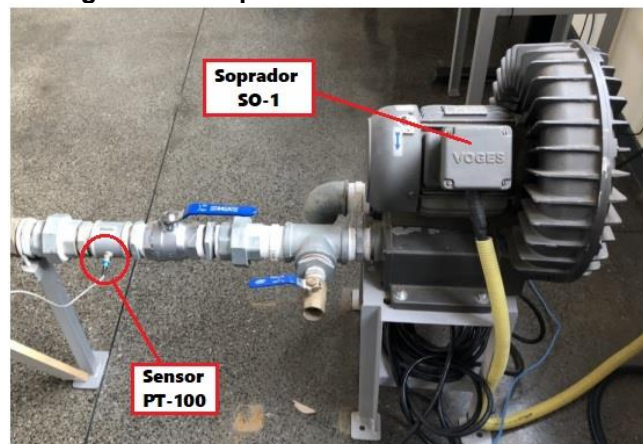
Fonte: autoria própria (2021)

Na base da válvula *loop seal*, há dois bicos que permitem a aeração independente nas câmaras de alimentação e de reciclagem. Todavia, nesse trabalho, a aeração na seção da válvula *loop seal* foi aplicada apenas na câmara de alimentação, identificada como “Aer. LS” na Figura 13. Outro local utilizado para aplicar a aeração em alguns dos experimentos foi a base do *standpipe*, onde também há um bico identificado como “Aer- SP”. Adicionalmente, existem duas tomadas de pressão, identificadas como “LS-A” e “LS-R”, utilizadas para medir as pressões na câmara de alimentação e de reciclagem, respectivamente.

3.1.2 Subsistema do fornecimento do ar de fluidização no *riser*

As partículas sólidas contidas na coluna principal são fluidizadas por meio da injeção de ar que ocorre na base do *riser*. Para tanto, utilizou-se um soprador de ar, tipo radial, marca AEROMACK, modelo CRE-04, alimentado por um motor elétrico de 4 cv de potência, identificado como “SO-1” na Figura 14. A vazão do ar de fluidização, e, conseqüentemente, a velocidade de fluidização, foram reguladas por meio de um inversor de frequência identificado como “IF” na Figura 11, da marca WEG, modelo CFW300B15P2T2DB20. Na tubulação de descarga do soprador há um termoresistor PT-100, acoplado a um indicador digital de temperatura da marca NOVUS. Esse instrumento foi utilizado para medir a temperatura do ar de fluidização liberado pelo soprador SO-1, possibilitando correções no cálculo da vazão volumétrica de ar alimentada no *riser*.

Figura 14 – Soprador SO-1 e Sensor PT-100



Fonte: adaptada de Oliveira (2019)

Para medir a vazão do ar de fluidização e, conseqüentemente, a velocidade de fluidização, utilizou-se um medidor do tipo placa de orifício (Figura 15). A vazão do ar de fluidização foi determinada por meio do conhecimento do diâmetro do orifício da placa, do diâmetro interno da tubulação, do valor da pressão absoluta medido à montante, da diferença de pressão (ΔP_{OJ-M}) medida entre pontos à montante e à jusante da placa de orifício, bem como da temperatura do fluido. Para o cálculo dos valores de vazão e da velocidade de fluidização no *riser* foi utilizado o modelo matemático apresentado na norma NBR-ISO 5167-1 (1994). As equações desse modelo foram implementadas no aplicativo comercial *Engineering Equation Solver – EES®*, versão 10.836 (KLEIN, 2020), para a obtenção do valor da velocidade de fluidização requerido nos experimentos.

Figura 15 – Medidor de vazão do ar de fluidização da UFRAF, do tipo placa de orifício



Fonte: Oliveira (2019)

Após passar pela placa de orifício, o ar é direcionado para a base do *riser*, onde se localiza uma placa distribuidora de ar do tipo *tuyere* (Figura 16). Esta peça tem a função de melhorar a distribuição do ar fornecido à coluna *riser*, além de manter as partículas acima da base do *riser*.

Figura 16–Placa distribuidora de ar do tipo *tuyere* instalada na UFRAF



Fonte: Pecete (2014)

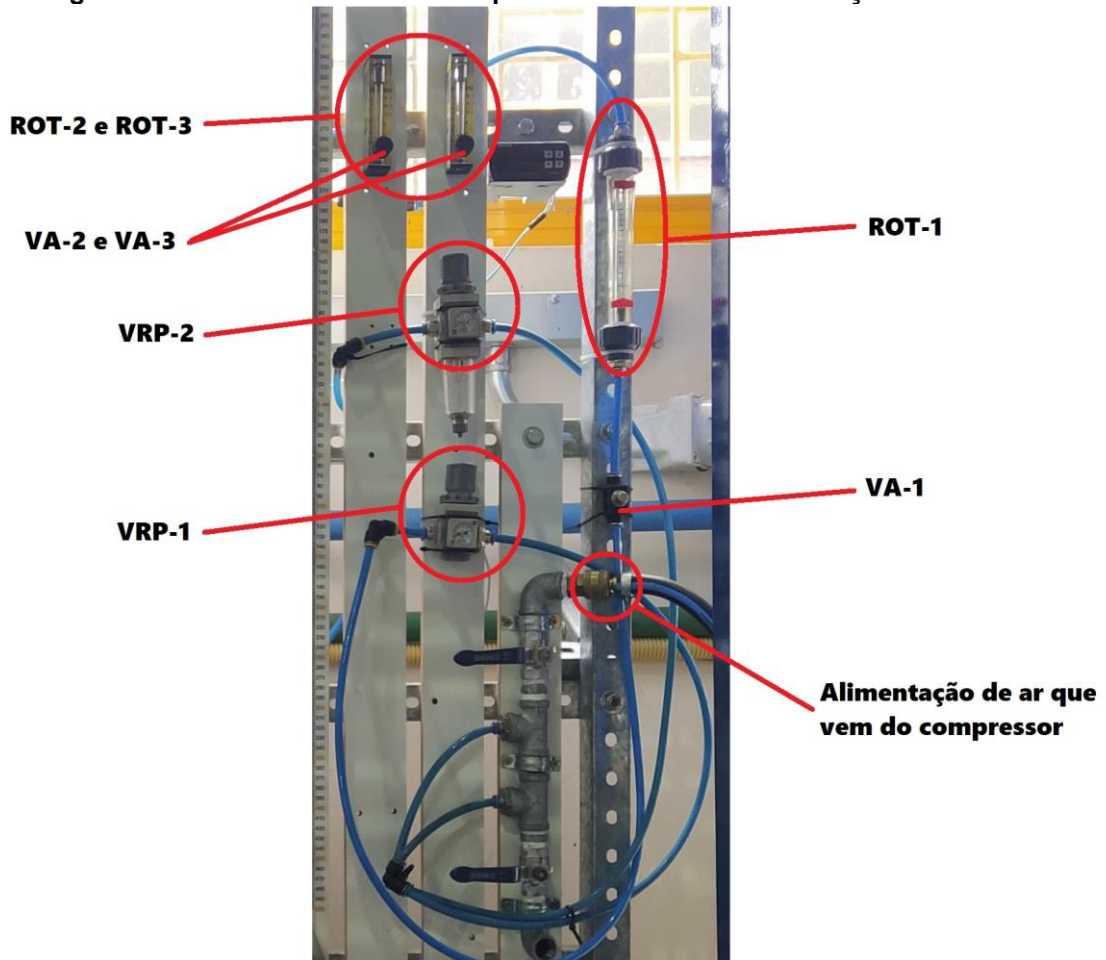
3.1.3 Subsistema de fornecimento da aeração

A aeração na válvula *loop seal* é responsável por ativar a recirculação das partículas sólidas na UFRAF. Para tanto, utiliza-se ar proveniente de um compressor do tipo parafuso, CO-1, da marca FIAC, com motor elétrico de 25 cv de potência. A válvula *loop seal* possui dois bicos para a aeração, um na câmara de alimentação e outro na câmara de reciclagem.

Neste trabalho, a vazão de aeração foi aplicada na base da câmara de alimentação em todos os experimentos, com uma parte dessa aeração sendo distribuída também na parte baixa do *standpipe* em metade dos ensaios realizados. A parcela da aeração injetada na base da câmara de alimentação da válvula *loop seal* foi controlada pelo regulador de pressão (VRP-1), uma válvula agulha e um medidor de vazão (VA-1 e ROT-1) da marca OMEGA™. Já, a outra parcela (quando usada), que fornece aeração na parte baixa do *standpipe*, foi controlada com o regulador de pressão (VRP-2), dois reguladores e dois medidores de vazão (VA-2, VA-3, ROT-2 e ROT-3) instalados em paralelo, da marca OMEGA™, modelo FL-2516-V, com diâmetro nominal de entrada de 1/8 de polegada.

A Figura 17 mostra os instrumentos de medição da vazão e de regulação da pressão da aeração que foram instalados na UFRAF para o propósito deste trabalho.

Figura 17– Instrumentos utilizados para o fornecimento da aeração na UFRAF



Fonte: autoria própria (2021)

3.2 Propriedades do material do leito

Para a realização dos experimentos, a UFRAF foi carregada com areia quartzosa, fornecida pela empresa GR Extração de Areia e Transrodoviarios Ltda, localizada na cidade de Ponta Grossa/PR. Este tipo de areia possui um amplo uso como material inerte em sistemas de LFC, os quais envolvem processos de conversão termoquímica, tais como combustão e gaseificação. As propriedades do material do leito que foram determinadas são o diâmetro médio de *Sauter*, a densidade aparente e a esfericidade.

Para encontrar o diâmetro médio de *Sauter*, as partículas do leito foram inicialmente pré-classificadas em peneira de escala industrial com abertura de 300 μm , sendo utilizada apenas a massa de areia passante nessa abertura. A determinação do diâmetro médio de *Sauter* das partículas selecionadas foi feita mediante a técnica de peneiramento, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), onde

foi utilizado um peneirador eletromagnético com as peneiras de abertura de malha 75 μm , 150 μm , 180 μm , 212 μm , 300 μm da série Tyler. O valor médio de *Sauter* destas partículas foi de 162 μm .

A densidade aparente da areia foi calculada por picnometria, conforme a ME 093/94 (DNER, 1994), fornecendo o valor médio de 2652 kg/m^3 . Finalmente, para a esfericidade das partículas da areia, foi considerado o valor previamente determinado por Turini (2017), que utilizou o método recomendado por Peçanha e Massarani (1986 apud CORTEZ *et al.*, 2008). Neste método, o valor da esfericidade é encontrado por meio da razão entre o diâmetro inscrito e o diâmetro circunscrito da partícula. As medições desses diâmetros foram feitas com auxílio de um microscópio ótico, marca Olympus, modelo BX60, com resolução de 1000x, localizado no Laboratório de Metalografia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa. Foram coletadas amostras contendo aproximadamente 30 partículas, as quais foram fotografadas com a câmera Evolution® LC Color, que faz parte do microscópio. Com base nessas amostras e na metodologia mencionada foi encontrado um valor médio para a esfericidade de 0,69.

A partir das propriedades de partícula anteriormente descritas, foi determinada a velocidade mínima do ar requerida na UFRAF para a obtenção do regime de fluidização rápida, a qual corresponde à velocidade de transporte dos sólidos (2,5 m/s). Foi possível também calcular a velocidade mínima de fluidização (0,026 m/s), usada como valor de referência para operar a válvula *loop seal*.

3.3 Procedimentos dos testes experimentais

Neste trabalho foram realizados experimentos com o objetivo principal de verificar as características da aeração (vazão e localização) sobre os parâmetros de rendimento do ciclone, especificamente, em termos da eficiência de captura e queda de pressão. Para tanto, foram escolhidas as seguintes variáveis de entrada: inventário de sólidos (I_s), vazão de aeração (Q_a) e posição da aeração (P_a). Os valores de entrada para cada uma destas variáveis são mostrados a seguir:

- Dois valores para I_s : 3 kg e 5 kg;
- Quatro valores para Q_a : de 3,4 m^3/h a 5,4 m^3/h , variando a cada 0,65 m^3/h .
Esses valores correspondem a números de aeração ($z = u_f/u_{mf}$), variando

de 5,0 a 8,1, respectivamente. É importante destacar que estes valores de número de aeração são bem superiores aos que Monazam, *et al.* (2007) recomendam, os quais, em condições normais, sugerem que o número de aeração varie de 0,5 (operação como leito móvel) a 1,5 (operação como leito borbulhante), para aeração feita na câmara de alimentação e no *standpipe*. O propósito dessa escolha foi o de anular a dependência do fluxo da recirculação dos sólidos com a vazão da aeração.

- Duas situações para P_a :
 - A) situação 1 (*LS*): correspondente a aeração aplicada somente na câmara de alimentação da *loop seal* com quatro valores variando de 3,40 m³/h a 5,40 m³/h, sem distribuição de aeração no *standpipe*;
 - B) situação 2 (*LS+SP*): referente a aeração aplicada na câmara de alimentação da *loop seal* (*LS*) com quatro valores variando de 1,70 m³/h a 3,70 m³/h, e aeração no *standpipe* (*SP*) mantida com valor único de 1,7 m³/h.

A combinação dos valores das variáveis de entrada acima descritas resultou em 16 experimentos diferentes. Uma vez que foram incluídas repetições para o cálculo do erro experimental e a posterior determinação dos efeitos estatísticos das variáveis, foram executados 32 experimentos no total.

A Tabela 4 mostra a matriz de planejamento dos 16 experimentos diferentes, com os valores de cada variável de entrada. É importante destacar que alguns parâmetros operacionais do sistema de LFC foram mantidos fixos. Além do diâmetro médio das partículas do leito, foram mantidos, com valor constante, o tempo de experimento ($t_e=30$ minutos) e a velocidade de fluidização ($u_f=3,5$ m/s).

O tempo dos experimentos foi fixado com o propósito de anular a influência desse parâmetro no desgaste das partículas pelo atrito, o que poderia levar à alteração da distribuição granulométrica por duração de teste, interferindo na eficiência de coleta. Já, os valores da velocidade de fluidização e do diâmetro médio das partículas foram mantidos constantes por ter a sua influência conhecida em pesquisas prévias da literatura. Dos testes realizados, foram obtidas a eficiência de coleta do ciclone e a sua queda de pressão, além de outras variáveis operacionais,

como o fluxo de recirculação dos sólidos e o perfil de pressão ao longo dos principais componentes da UFRAF.

Tabela 4 - Matriz de planejamento contendo as variáveis e seus respectivos valores de entrada
Variáveis de entrada

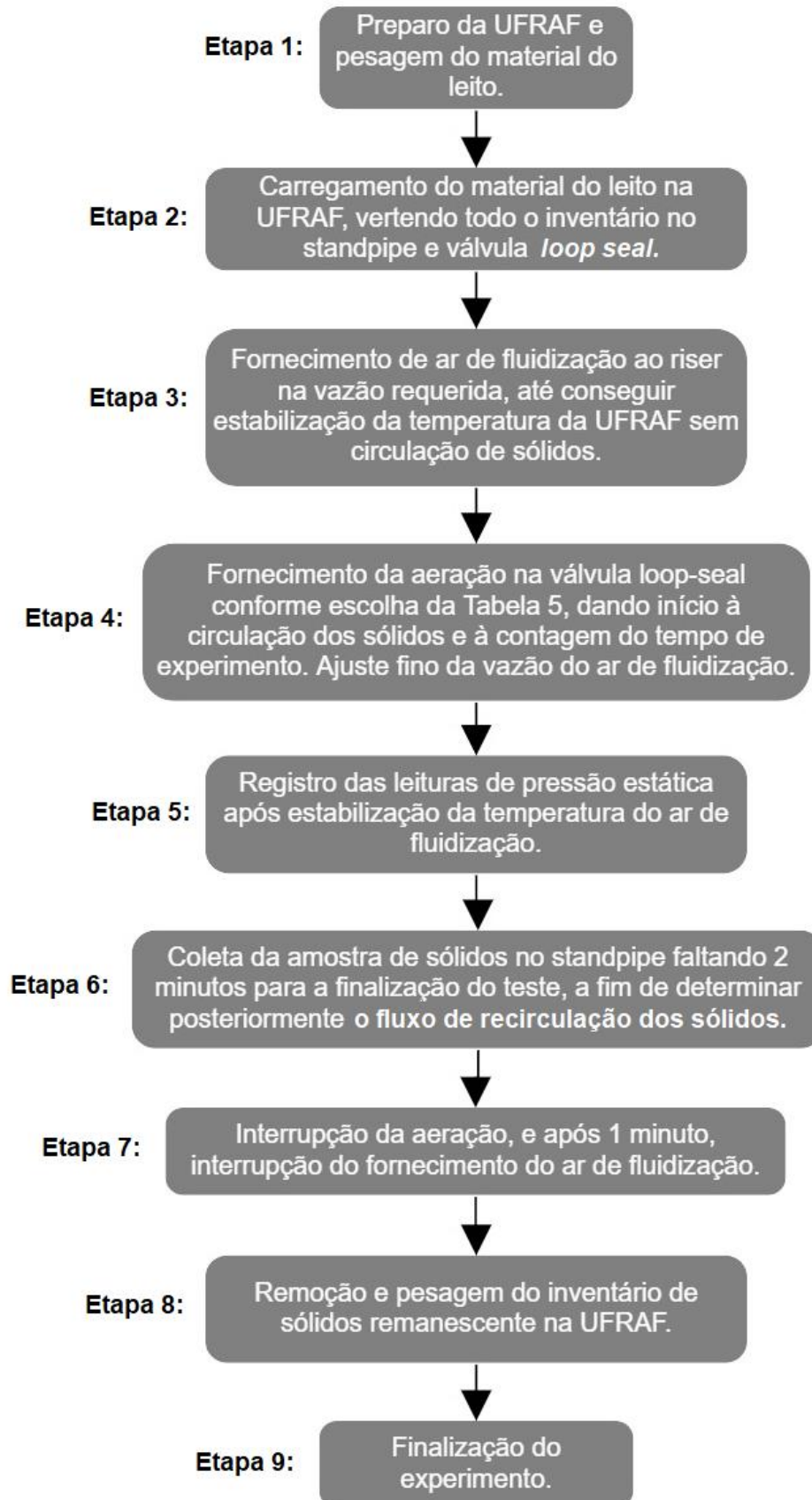
Experimento	Inventário de sólidos - I_s (kg)	Vazão total de aeração - Q_a (m ³ /h)	Posição da aeração - P_a (-)
1	5	5,40	LS
2	5	4,75	LS
3	5	4,10	LS
4	5	3,40	LS
5	5	5,40	LS+SP
6	5	4,75	LS+SP
7	5	4,10	LS+SP
8	5	3,40	LS+SP
9	3	5,40	LS
10	3	4,75	LS
11	3	4,10	LS
12	3	3,40	LS
13	3	5,40	LS+SP
14	3	4,75	LS+SP
15	3	4,10	LS+SP
16	3	3,40	LS+SP

Fonte: Autoria própria

A eficiência de coleta do ciclone foi calculada experimentalmente utilizando como base a Equação (2), porém integrada no tempo para adequá-la a operação em batelada. Para tanto, antes de cada experimento, foi pesado, em uma balança de precisão, a massa total m_t , que corresponde ao valor de I_s carregado no sistema. Após o término de cada experimento, toda a massa retida dentro da UFRAF (m_c), também foi pesada. Dessa forma, tendo-se como base a Equação (2), a eficiência média do ciclone para o tempo de experimento de 30 minutos foi obtida ao dividir a massa retida (m_c) pela massa total inicial (m_t).

A Figura 18 ilustra, por meio de um fluxograma, as etapas executadas durante a realização de cada experimento na UFRAF. A descrição detalhada de cada etapa é apresentada no Apêndice A.

Figura 18 – Sequência das etapas para a realização dos experimentos na UFRAF



Fonte: autoria própria (2023).

3.4 Tratamento dos dados experimentais

Nesta seção, descreve-se o procedimento adotado no tratamento dos dados experimentais, visando determinar os efeitos das variáveis de interesse sobre a eficiência total de separação do ciclone (η_t) e a queda de pressão no dispositivo (ΔP_c).

A partir dos dados experimentais coletados, foi possível gerar gráficos que mostram a relação da η_t e da ΔP_c em função dos seguintes parâmetros: vazão total de aeração (na posição LS e LS+SP), inventário de sólidos (I_s) e fluxo de recirculação dos sólidos (G_s). Também, foram determinados os perfis de pressão estática e de queda de pressão nos componentes da UFRAF, visando encontrar relações com η_{tot} e ΔP_{cicl} . Além disso, foram coletadas amostras do leito após os testes, com o propósito de verificar a distribuição final do tamanho de partícula e a sua relação com a eficiência de coleta.

Adicionalmente, foi realizada uma análise de efeitos das variáveis estudadas, a partir de um planejamento fatorial envolvendo somente os valores extremos de cada variável, conforme proposto por Barros Neto, Scarminio e Bruns (2003). Para tanto, foi realizado uma análise de variância (ANOVA) com o objetivo de verificar a significância dos efeitos causados pela variação dos parâmetros de entrada sobre a resposta. Para realização desta análise ANOVA, foi utilizado o aplicativo EXCEL no qual foram inseridos os dados coletados nos experimentos e organizados conforme a Tabela 5. Nessa análise, o teste de hipótese foi realizado por meio do teste de igualdade entre as médias, utilizando o teste F. Nesse teste, quando a hipótese é nula, todas as médias dos grupos são consideradas iguais, enquanto que uma hipótese alternativa permite afirmar que pelo menos uma média é diferente, considerando um nível de significância (α) previamente definido com o valor de 0,05.

Com essas informações, foram construídos gráficos de Pareto para todas as variáveis de interesse, indicando se os efeitos encontrados são ou não estatisticamente significativos no rendimento operacional do ciclone.

A Tabela 5 mostra a matriz de planejamento contendo apenas as variáveis de interesse com os seus respectivos níveis baixo (-) e alto (+) para a realização da análise dos efeitos. É importante esclarecer que os experimentos 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14 e 15 não são mostrados na Tabela 5, pois eles possuem valores intermediários de Q_a entre o máximo (nível alto) e o mínimo (nível baixo), sendo desconsiderados para a análise estatística.

Tabela 5 - Matriz de planejamento contendo as variáveis e seus respectivos níveis, sem considerar os experimentos com níveis intermediários relativos à vazão de aeração

Experimento	Variável controlada (fator)			Resposta média (\bar{y})
	I_s (kg)	Q_a (m ³ /h)	Pos_a (-)	
1	5 (+)	5,4(+)	LS (+)	\bar{y}_1
4	5 (+)	3,4 (-)	LS (+)	\bar{y}_4
5	5 (+)	5,4 (+)	LS+SP (-)	\bar{y}_5
8	5 (+)	3,4 (-)	LS+SP (-)	\bar{y}_8
9	3 (-)	5,4(+)	LS (+)	\bar{y}_9
12	3 (-)	3,4 (-)	LS (+)	\bar{y}_{12}
13	3 (-)	5,4 (+)	LS+SP (-)	\bar{y}_{13}
16	3 (-)	3,4 (-)	LS+SP (-)	\bar{y}_{16}

Fonte: autoria própria

Para a construção do Gráfico Pareto, foram considerados todos os efeitos possíveis correspondentes a um planejamento fatorial 2^3 . Segundo Barros Neto, Scarminio e Bruns (2003), nesse planejamento deve-se considerar os efeitos principais de cada um dos três parâmetros de entrada (E_A , E_B e E_C), os efeitos de interação entre dois parâmetros (E_{AB} , E_{AC} e E_{BC}) e o efeito combinado dos três parâmetros (E_{ABC}).

Onde E_A , E_B e E_C são os efeitos causados pelo inventário de sólido (I_s), vazão de aeração (Q_a) e posição da aeração (P_a), respectivamente.

Tabela 6 – Coeficientes de contraste dos experimentos

Experimento	Efeitos (E)							Resposta média (\bar{y})
	E_A	E_B	E_C	E_{AB}	E_{AC}	E_{BC}	E_{ABC}	
1	+	+	+	+	+	+	+	\bar{y}_1
4	+	-	+	-	+	-	-	\bar{y}_4
5	+	+	-	+	-	-	-	\bar{y}_5
8	+	-	-	-	-	+	+	\bar{y}_8
9	-	+	+	-	-	+	-	\bar{y}_9
12	-	-	+	+	-	-	+	\bar{y}_{12}
13	-	+	-	-	+	-	+	\bar{y}_{13}
16	-	-	-	+	+	+	-	\bar{y}_{16}

Fonte: Adaptado de Barros Neto, Scarminio e Bruns (2003).

A Tabela 6, adaptada da matriz de planejamento (Tabela 5), mostra os coeficientes de contraste, na qual são mostrados todos os efeitos possíveis.

Também, de acordo com Barros Neto, Scarminio e Bruns (2003), o efeito principal de cada parâmetro de entrada é calculado mediante a média dos efeitos nos dois níveis, alto (+) e baixo (-). Para os parâmetros de entrada do presente trabalho, as Equações (4) a (10) mostram o cálculo de todos efeitos, principais e de interação:

$$E_A = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_4 + \bar{y}_5 + \bar{y}_8) - (\bar{y}_9 + \bar{y}_{12} + \bar{y}_{13} + \bar{y}_{16})}{4} \quad (4)$$

$$E_B = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_5 + \bar{y}_9 + \bar{y}_{13}) - (\bar{y}_4 + \bar{y}_8 + \bar{y}_{12} + \bar{y}_{16})}{4} \quad (5)$$

$$E_C = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_4 + \bar{y}_9 + \bar{y}_{12}) - (\bar{y}_5 + \bar{y}_8 + \bar{y}_{13} + \bar{y}_{16})}{4} \quad (6)$$

$$E_{AB} = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_5 + \bar{y}_{12} + \bar{y}_{16}) - (\bar{y}_4 + \bar{y}_8 + \bar{y}_9 + \bar{y}_{13})}{4} \quad (7)$$

$$E_{AC} = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_4 + \bar{y}_{13} + \bar{y}_{16}) - (\bar{y}_5 + \bar{y}_8 + \bar{y}_9 + \bar{y}_{12})}{4} \quad (8)$$

$$E_{BC} = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_8 + \bar{y}_9 + \bar{y}_{16}) - (\bar{y}_4 + \bar{y}_5 + \bar{y}_{12} + \bar{y}_{13})}{4} \quad (9)$$

$$E_{ABC} = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_8 + \bar{y}_{12} + \bar{y}_{13}) - (\bar{y}_4 + \bar{y}_5 + \bar{y}_9 + \bar{y}_{16})}{4} \quad (10)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais que foram obtidos na unidade de leito fluidizado circulante a partir das informações registradas no Apêndice B. Para cada inventário de partículas testado, inicialmente é realizada a análise operacional do sistema com base nos comportamentos do fluxo de recirculação dos sólidos, do perfil axial de pressão estática, e da queda de pressão nos componentes principais, todos avaliados em termos da vazão volumétrica e da posição da aeração injetada na válvula *loop seal*. Em função dessas mesmas variáveis, discutem-se, posteriormente, os resultados relativos ao desempenho do ciclone, especificamente, em relação à sua eficiência de coleta e queda de pressão.

A avaliação dos resultados descritos acima é submetida também a uma análise estatística, visando determinar a significância dos efeitos que foram causados na operação do LFC em virtude das condições de funcionamento impostas ao mecanismo da recirculação dos sólidos.

4.1 Análise operacional do sistema de leito fluidizado circulante

Nesta seção analisa-se o comportamento do fluxo de recirculação de sólidos e da pressão estática em função da vazão de aeração e da posição da aeração, observado o inventário de sólidos utilizado. Além disso, avaliam-se as características das quedas de pressão nos componentes da UFRAF.

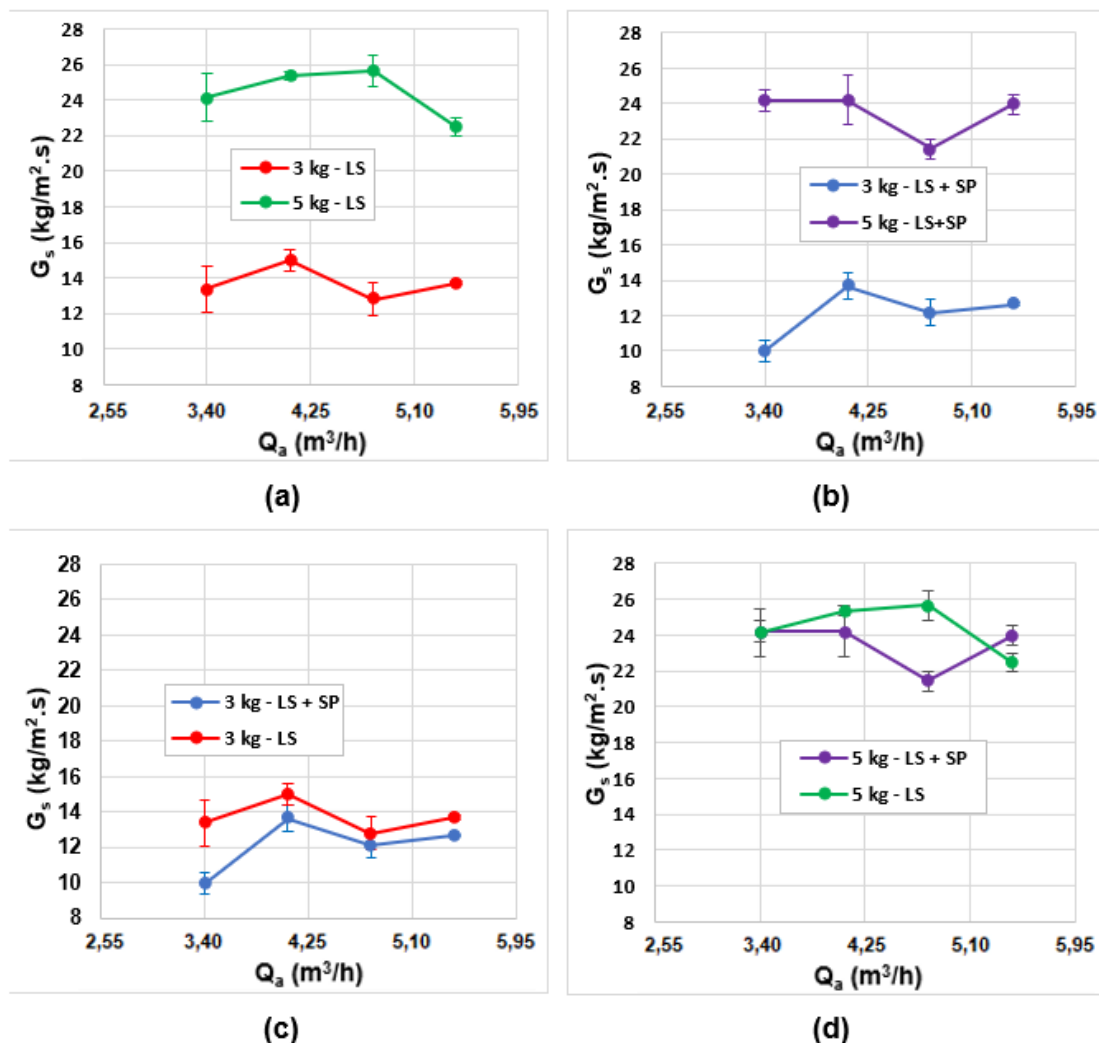
4.1.1 Comportamento do fluxo de recirculação dos sólidos em função da vazão de aeração, posição da aeração e inventário de sólidos

Os experimentos realizados neste trabalho foram à procura de condições estáveis de operação do sistema de LFC com o uso de altas vazões de injeção de ar na válvula *loop seal*, a fim de que o efeito da aeração sobre o rendimento do ciclone pudesse ser investigado sem interferência atribuída às variações do G_s . Nesse sentido, praticaram-se vazões de aeração na válvula *loop seal* na faixa de 3,4 m³/h a 5,4 m³/h em condições de referência de 1 atm e 20°C, que correspondem a números de aeração (z) variando de 5,0 a 8,1, respectivamente. Tais números de aeração são

consideravelmente maiores aos recomendados por Monazam *et al.* (2007), que oscilam de 0,5 a 1,5.

Yao *et al.* (2011) encontraram que, ao incrementar gradativamente a vazão volumétrica de aeração, é possível alcançar uma condição crítica de operação, a partir do qual, o fluxo de recirculação dos sólidos se mantém quase constante. Wang *et al.* (2014) confirmaram essa característica de funcionamento, ao realizar experimentos com números de aeração variando de 1 a 7 que foram aplicadas na câmara de alimentação de válvulas *loop seal* do tipo U. Os pesquisadores concluíram que números de aeração acima de 6 não alteram significativamente o valor de G_s .

Figura 19– Fluxo de recirculação dos sólidos em função da vazão volumétrica de aeração.



Fonte: autoria própria (2023).

A Figura 19 mostra a relação entre o fluxo de recirculação dos sólidos (G_s) e a vazão volumétrica da aeração (Q_a), para os dois valores de inventário de sólidos (I_s)

praticados (3 kg e 5 kg), bem como para as duas posições da aeração (LS e LS+SP). O termo LS refere-se à injeção de ar aplicada apenas na base da *loop seal*, enquanto o termo LS + SP indica injeção de ar aplicada de forma distribuída, tanto na base da *loop seal* (LS) quanto na seção vertical do *standpipe* (SP), respectivamente. As barras verticais associadas aos pontos das curvas representam o valor do erro puro, calculado a partir dos dados obtidos nos experimentos realizados em duplicata.

Os resultados do Figura 19 indicam que a variação de Q_a de 3,4 m³/h a 5,4 m³/h não produziu perfis com tendências claras de aumento ou de diminuição no valor de G_s . O desvio padrão de G_s na faixa da vazão de aeração praticada não superou o valor de 1,6 kg/m²s, o que é considerado baixo se comparado com o valor de aproximadamente 14 kg/m²s, obtido por Wang, *et al.* (2014) na faixa de números de aeração de 5 a 7.

Adicionalmente, ao comparar as curvas da Figura 19 (a) e (b) para inventários de sólidos de 3 kg e 5 kg, percebe-se que, independentemente da posição da aeração, os valores de G_s obtidos com o inventário de sólidos de 5 kg foram quase o dobro dos registrados com o inventário de 3 kg. Esse comportamento deve-se ao aumento esperado da concentração de sólidos no sistema de LFC com o uso de uma maior massa de partículas, que na presença de uma mesma velocidade de fluidização no *risere* de número de aeração na válvula *loop seal*, promove um maior arrasto de sólidos para fora da coluna em direção ao ciclone.

Em relação à influência da posição da aeração, os gráficos destacados na Figura 19 (c) e (d) sugerem que não há uma variação importante no comportamento do G_s . No entanto, um ligeiro aumento no valor de G_s parece estar presente com a aplicação da aeração apenas na base da *loop seal* (LS) nos testes realizados com o inventário de 3 kg; todavia, uma análise estatística torna-se necessária para poder afirmar se essa tendência é significativa ou não.

Nessa direção, com o auxílio do aplicativo EXCEL, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para os resultados dos testes simulando um planejamento fatorial 2³ (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2003), em que os fatores controláveis foram o inventário de sólidos (3 kg e 5 kg), as duas posições de aeração (LS e LS+SP), e os dois valores extremos da vazão volumétrica (3,4 m³/h e 5,4 m³/h).

A Tabela 7 resume os tratamentos das oito combinações dos experimentos considerados na análise estatística, com os respectivos níveis (+ e -) das três variáveis

controláveis acima descritas e da variável resposta, neste caso, o fluxo de recirculação dos sólidos (G_s).

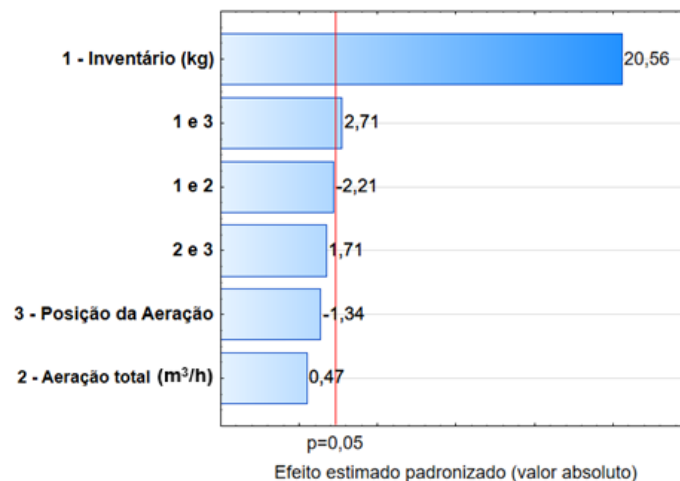
Tabela 7 – Dados utilizados para analisar, estatisticamente, os efeitos dos parâmetros de entrada sobre o fluxo de recirculação dos sólidos.

Experimento	I_s (kg)	Q_a (m ³ /h)	Posição da aeração	G_s (kg/m ² .s)
1	5 (+)	5,4 (+)	LS (+)	22,0
2	5 (+)	5,4 (+)	LS (+)	23,0
3	5 (+)	3,4 (-)	LS (+)	25,5
4	5 (+)	3,4 (-)	LS (+)	22,8
5	5 (+)	5,4 (+)	LS+SP (-)	24,5
6	5 (+)	5,4 (+)	LS+SP (-)	23,4
7	5 (+)	3,4 (-)	LS+SP (-)	24,8
8	5 (+)	3,4 (-)	LS+SP (-)	23,6
9	3 (-)	5,4 (+)	LS (+)	13,6
10	3 (-)	5,4 (+)	LS (+)	13,8
11	3 (-)	3,4 (-)	LS (+)	12,1
12	3 (-)	3,4 (-)	LS (+)	14,7
13	3 (-)	5,4 (+)	LS+SP (-)	12,6
14	3 (-)	5,4 (+)	LS+SP (-)	12,7
15	3 (-)	3,4 (-)	LS+SP (-)	9,4
16	3 (-)	3,4 (-)	LS+SP (-)	10,6

Fonte: autoria própria (2023).

A Figura 20, conhecida como gráfico de Pareto, mostra os efeitos principais e de interação de dois fatores das três variáveis controláveis sobre o valor de G_s .

Figura 20 – Efeitos principais e de interação padronizados das variáveis controláveis sobre o fluxo de recirculação dos sólidos.



Fonte: autoria própria (2023).

Os resultados desse gráfico indicam que, para um nível de confiança de 95%, apenas o efeito principal do inventário de sólidos e o efeito de interação deste com a posição da aeração ultrapassaram o valor marcado pela linha de significância ($p=0,05$), sugerindo que esses parâmetros influenciam significativamente no valor do fluxo de recirculação dos sólidos.

No caso do inventário de sólidos, a intensidade do efeito principal foi altamente expressiva e com valor de sinal positivo. O sinal positivo do efeito indica que a influência é diretamente proporcional, confirmando o resultado visualizado na Figura 19. Já, no caso do efeito de interação do inventário de sólidos e da posição da aeração, a intensidade da significância estatística foi consideravelmente menor, porém, igualmente sugerindo um efeito de sinal positivo. Tal resultado confirma que há realmente um aumento de G_s quando o incremento no inventário de sólidos vai acompanhado da aeração aplicada exclusivamente na base da *loop seal*. O gráfico de Pareto também deixa em evidência que a vazão da aeração não teve efeito significativo sobre o valor de G_s , mesmo interagindo com as outras variáveis controláveis dos experimentos.

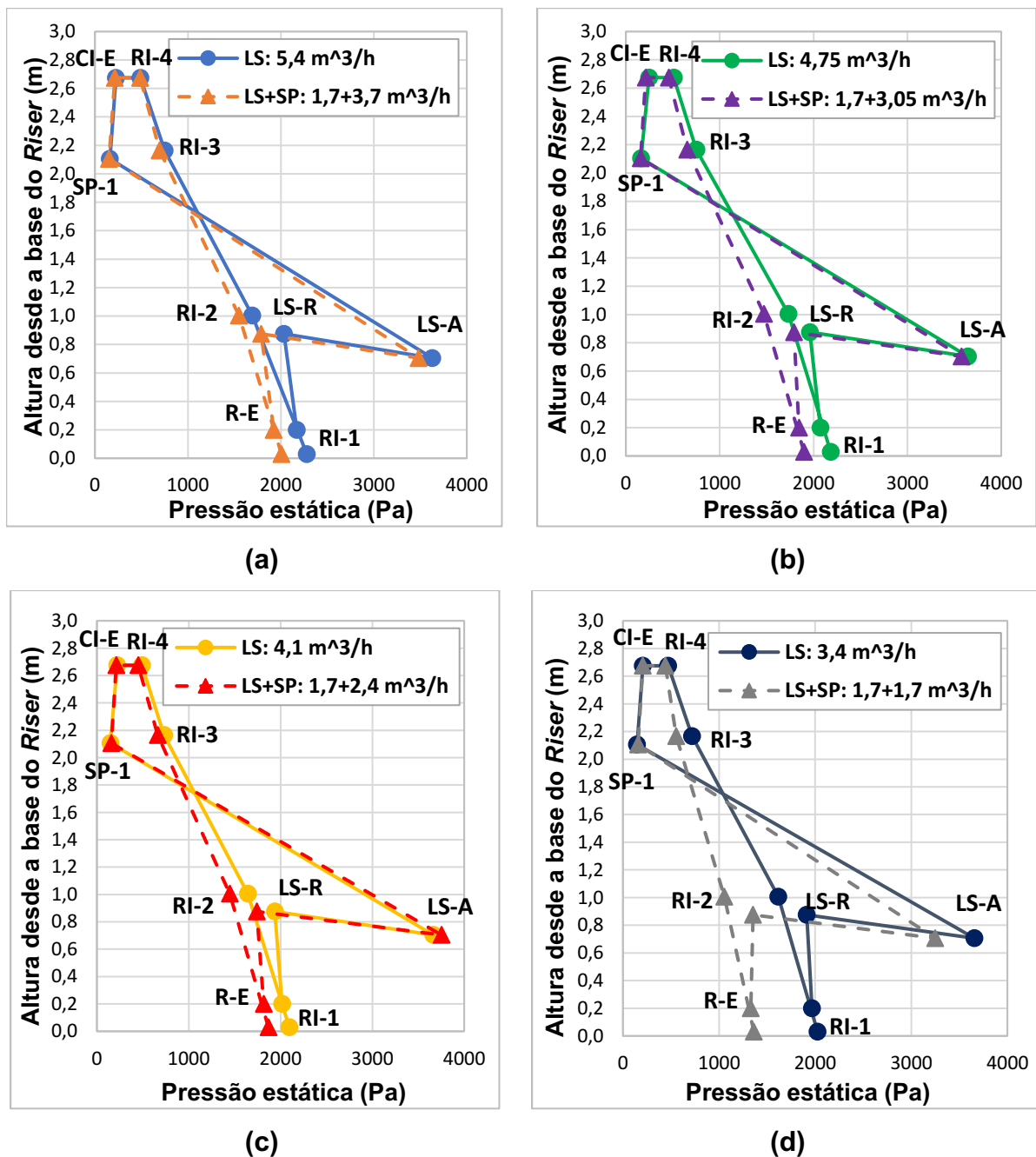
4.1.2 Comportamento dos perfis de pressão estática do escoamento gás-sólido em função da vazão volumétrica e posição da aeração

A determinação do perfil de pressão estática do escoamento gás-sólido é sempre requerida para a verificação da operação apropriada de um sistema de LFC. Conforme vários autores mostram (KIM; KIM, 2002; BASU, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2021), o perfil axial de pressão estática deve seguir um padrão específico característico, com o qual, evita-se o colapso do sistema por causa do desvio de uma parcela do gás de fluidização do *riser* em direção ao tubo de reciclagem da válvula *loop seal*. Dessa maneira, para a obtenção de uma operação estável, esse perfil deverá indicar a presença de um valor máximo de pressão estática na base do dispositivo de recirculação dos sólidos.

As Figura 21 (a, b, c e d) e Figura 22 (a, b, c e d) ilustram o comportamento do perfil axial de pressão estática para as vazões de aeração testadas na faixa de 5,4 m³/h até 3,4 m³/h, respectivamente de (a) até (d), utilizando inventário de sólidos constante de 3 kg e 5 kg, respectivamente. Nesses gráficos, as tomadas de pressão identificadas pelas legendas RI-1, RE, RI-2, RI-3 e RI-4 estão localizadas ao longo do

comprimento do *riser*, enquanto as identificadas como CI-E e SP-1, encontram-se posicionadas no tubo de descarga dos sólidos do ciclone e na base do *standpipe*, respectivamente. Já, as legendas LS-A e LS-R referem-se, nessa ordem, a pontos de medição de pressão estática localizados na base da câmara de alimentação e no topo da câmara de reciclagem da *loop seal*.

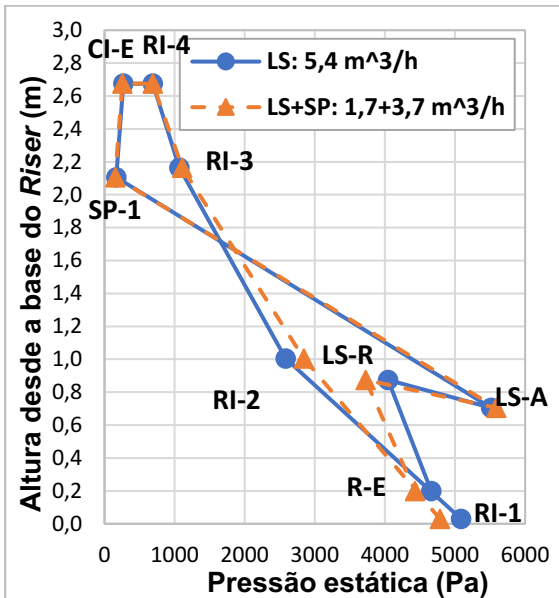
Figura 21 - Perfis axiais de pressão estática média em função da vazão e posição da aeração, para inventário de sólidos de 3 kg.



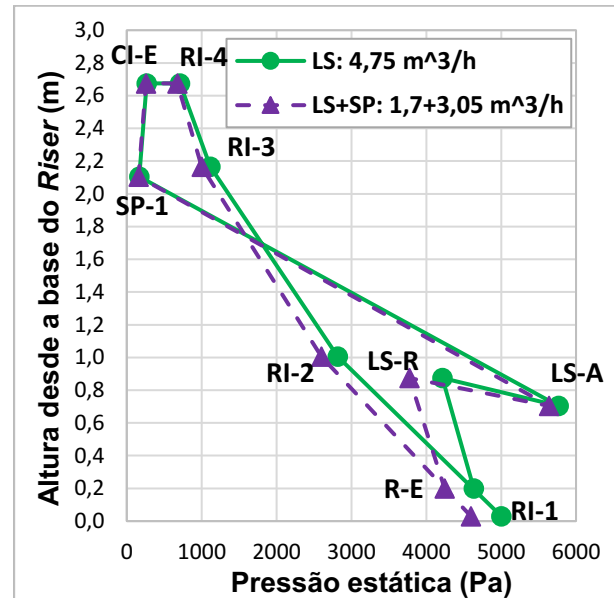
Fonte: autoria própria (2023).

As curvas das Figura 21 e Figura 22 evidenciaram perfis de pressão estática em que o maior valor de pressão é aferido na base da válvula *loop seal* (tomada LS-A), comprovando que todos os experimentos foram realizados sob operação estável.

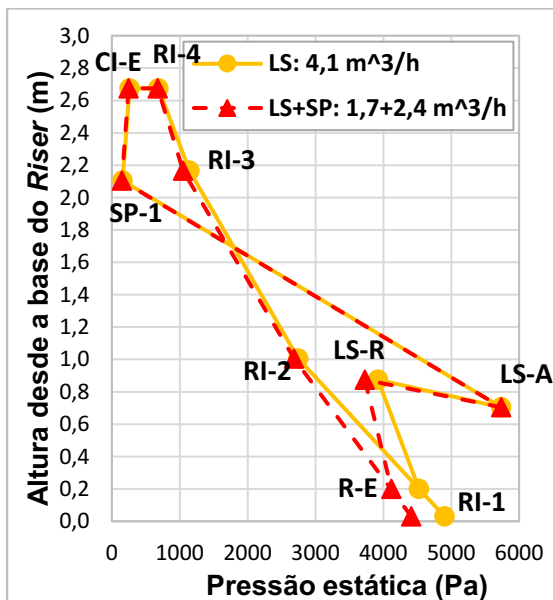
Figura 22 – Perfis axiais de pressão estática média em função da vazão e posição da aeração, para inventário de sólidos de 5 kg.



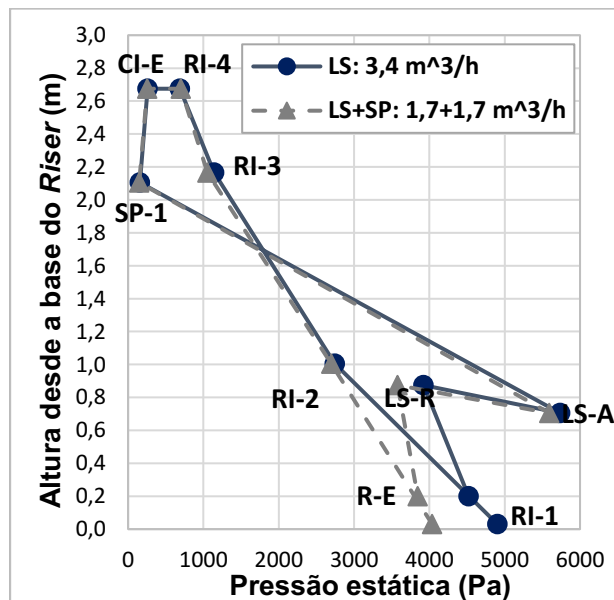
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: autoria própria (2023).

Adicionalmente, percebe-se que, ao manter a mesma posição da aeração, os perfis de pressão estática variaram pouco em relação à vazão de gás aplicada na *loop seal* quando comparado com o resultado obtido por Oliveira (2019), em que o perfil axial de pressão mudou consideravelmente com o aumento na vazão da aeração.

Essa diferença nos comportamentos pode ser explicada pelas altas vazões de aeração praticadas nos testes experimentais do presente trabalho, com as quais, as pequenas variações no fluxo de recirculação dos sólidos obtidas promoveram também alterações insignificantes no balanço de pressão do circuito, preservando assim a forma do perfil de pressão. Resultados parecidos aos alcançados nesta pesquisa foram reportados por Yao *et al.* (2011), onde o uso de elevados números de aeração na válvula de recirculação dos sólidos não provocou mudanças significativas no fluxo de recirculação das partículas e no perfil de pressão estática. Também, como esperado, os valores absolutos de pressão estática foram sempre maiores com o uso do inventário de sólidos de 5 kg, independente da vazão e posição da aeração.

Em relação ao efeito da posição da aeração sobre o perfil axial de pressão estática para cada inventário de sólidos, observa-se uma tendência de alteração na forma dos perfis quando a vazão da aeração passa a ser aplicada de forma distribuída na base da *loop seal* e na seção vertical do *standpipe*. A significância estatística ou não dessa alteração é verificada mediante a realização da análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 8, que compara o valor médio das pressões estáticas em todo o circuito da UFRAF obtidas com as posições de aeração LS e LS+SP, para cada inventário de sólidos com todas as vazões de aeração.

Tabela 8 – Resultados da ANOVA para o valor médio da pressão estática em função da posição.

I_s (kg)	Média LS (Pa)	Variância LS (Pa)	Média LS+SP (Pa)	Variância LS+SP (Pa)	Valor p
3	148,5069	1,104263	130,8403	0,664448	0,002821
5	272,8264	0,231578	258,4028	1,731867	0,004686

Fonte: autoria própria (2023).

Os resultados da ANOVA indicam que, tanto para o inventário de 3 kg, quanto para o de 5 kg, a mudança da posição de aeração de LS para LS+SP reduz de maneira significativa a pressão estática média da UFRAF ao nível de confiança de 95%, uma vez que ambos valores p são menores que 0,05. Esse efeito torna-se mais relevante com o uso do menor inventário de sólidos, como também sugerido ao comparar as

curvas das Figura 21 com as curvas da Figura 22, onde o inventário de sólidos menor deslocou os gráficos mais para a esquerda, implicando em pressões estáticas menores.

4.1.3 Queda de pressão nos componentes do sistema de LFC

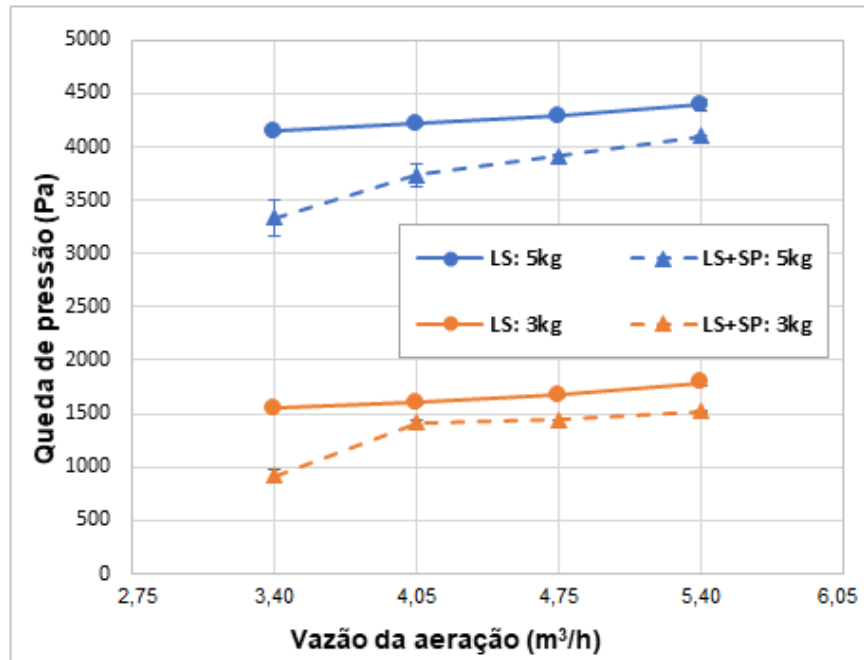
A queda de pressão do escoamento gás-sólido foi medida nos quatro componentes principais do circuito de fluidização da UFRAF. No *riser*, o valor absoluto da queda de pressão correspondeu à diferença dos valores de pressão estática aferidos nas tomadas RE (base do *riser*) e RI-4 (topo do *riser*); no ciclone, entre as tomadas CI-E (entrada) e SP-1 (saída por baixo do ciclone); no *standpipe* e câmara de alimentação da *loop seal*, entre as tomadas LS-A (câmara de alimentação da válvula *loop seal*) e SP-1 (topo do *standpipe*); e na câmara de reciclagem da *loop seal*, entre as tomadas LS-A e LS-R (câmara de reciclagem da válvula *loop seal*).

A Figura 23 mostra o efeito das três variáveis controladas nos experimentos sobre a queda de pressão no *riser*. Neste gráfico é possível observar que, para todas as condições testadas, a queda de pressão no *riser* mostrou tendência à alta com o acréscimo de Q_a . Todavia, a variação média de aproximadamente 10% na queda de pressão, considerando conjuntamente os inventários de 3 kg e 5 kg com injeção de ar apenas na posição de aeração LS, foi considerada baixa, tendo em vista a ampla faixa da vazão de aeração empregada. Em experimentos realizados no mesmo equipamento por Oliveira (2019) com a mesma porcentagem de variação de Q_a , porém na faixa de 1,19 m³/h a 1,92 m³/h, foram observados aumentos próximos a 100% no valor da queda de pressão na coluna principal de fluidização.

Ao analisar a variação da queda de pressão em função da posição da aeração, percebe-se que, para um mesmo inventário de sólidos, a aeração distribuída (LS+SP) tende a promover maior porcentagem de mudança na faixa estudada, porém também menores valores de pressão absoluta em cada vazão de aeração utilizada. Esse resultado sugere, por um lado, que a aeração distribuída induz uma menor concentração de partículas no *riser* que alivia a queda de pressão e, por outro, que tal concentração consegue ser melhor controlada com a regulação da vazão de aeração na base da *loop seal*, principalmente a menores números de aeração. Nota-se também que, como esperado, ao elevar o inventário de sólidos de 3 kg para 5 kg, a queda de pressão no *riser* aumentou de 2,5 a 3,5 vezes, em decorrência da maior

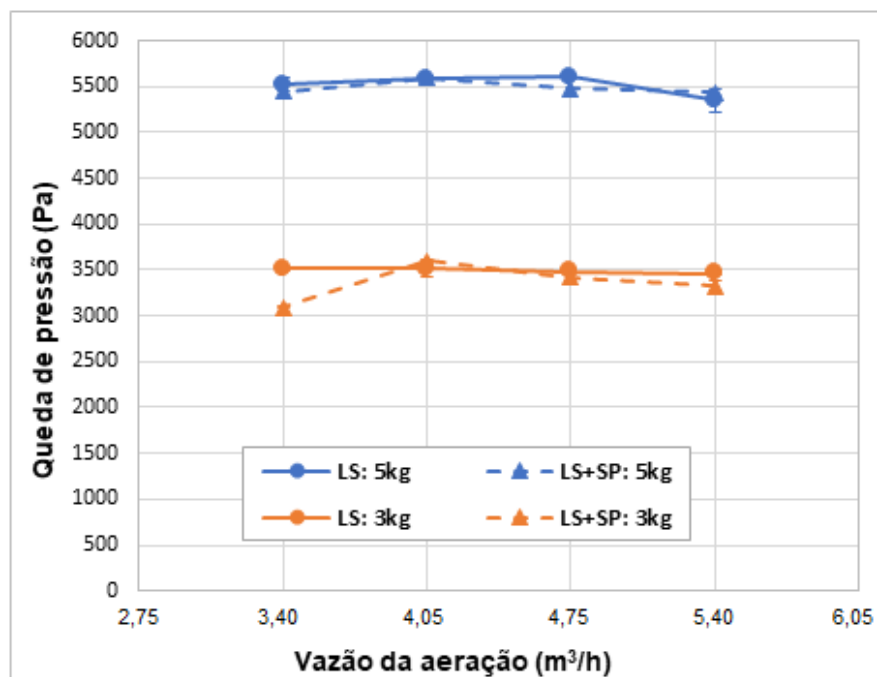
concentração de partículas mantida no mesmo volume de equipamento. Adicionalmente, a posição da aeração foi mais importante ao usar inventário de 5 kg.

Figura 23 - Queda de pressão no *riser* em função das variáveis controláveis.



Fonte: autoria própria (2023).

Figura 24 - Queda de pressão no *standpipe* e na câmara de alimentação da *loopseal* em função das variáveis controláveis.



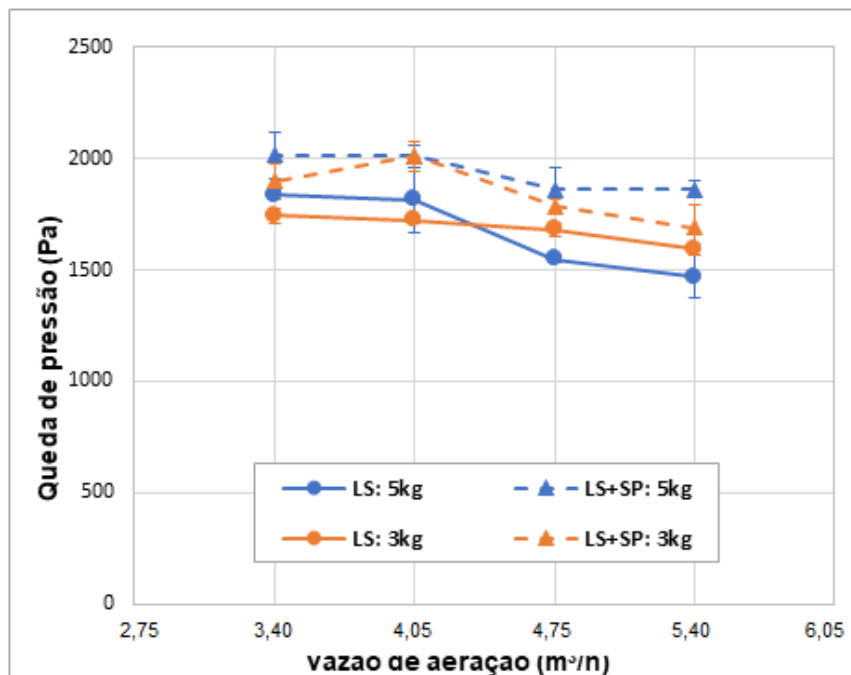
Fonte: autoria própria (2023).

A Figura 24 apresenta os resultados da queda de pressão sofrida conjuntamente pelo *standpipe* e a câmara de alimentação da *loop seal*, verificando-se que este componente não experimenta variações expressivas com a vazão e a posição da aeração, mas apenas com o inventário dos sólidos. Ao igual que no *riser*, quando o inventário dos sólidos subiu de 3 kg para 5 kg, a queda de pressão no *standpipe* aumentou. No entanto, neste caso o acréscimo não superou 60%.

A análise simultânea desse resultado com os do *riser* explica o motivo pelo qual a posição da aeração consegue influenciar o valor de G_s somente quando há um incremento significativo na massa de partículas carregada no sistema.

A Figura 25 apresenta a queda de pressão na câmara de reciclagem da *loop seal*. Em todas as condições testadas observa-se que, para ambos inventários dos sólidos, o aumento de Q_a causa uma redução na queda de pressão do componente. De acordo com Kim e Kim (2002), esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da porosidade do leito na região da câmara de reciclagem, uma vez que a presença de um maior volume de gás nessa câmara desloca a massa de partículas limitada pela altura da barragem da *loop seal*. Resultados que confirmam esta tendência foram também reportados por Oliveira *et al.* (2021).

Figura 25 - Queda de pressão na câmara de reciclagem da *loopseal* em função das variáveis controláveis.

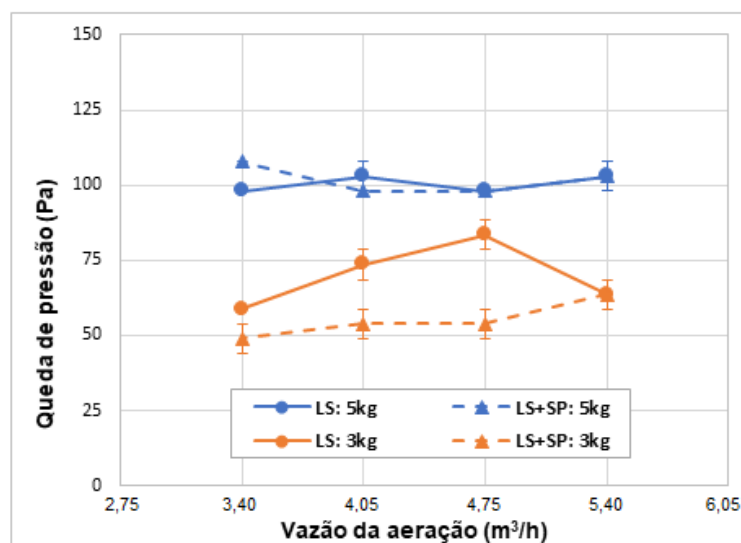


Fonte: autoria própria (2023).

Adicionalmente, nota-se que a mudança da posição da aeração de LS para LS+SP trouxe uma elevação nos níveis da queda de pressão na câmara de reciclagem. Uma possível explicação para esse comportamento estaria na melhoria das condições de fluidização dos sólidos na válvula *loop seal*, devido à passagem de uma maior parcela de ar sendo transportada junto com os sólidos procedentes do *standpipe*. Essa maior parcela de gás tornaria a fluidização das partículas mais homogênea, contribuindo para a intensificação do sinal de pressão medido na base da *loop seal*. Problemas de homogeneização na fluidização do leito de sólidos no interior de uma válvula *loop seal* são associados ao surgimento de zonas mortas durante aeração no modo monocâmara, conforme relatado por Bareschino *et al.* (2014) e Machado (2019).

Finalmente, a Figura 26 ilustra o comportamento da queda de pressão experimentada pelo ciclone no trajeto que faz parte do circuito de fluidização. Esse trajeto envolve somente a porção de equipamento compreendida entre o tubo de entrada do ciclone e o tubo de saída dos sólidos que são coletados e direcionados ao *standpipe*. Essa medida não representa a queda de pressão normalmente aferida num ciclone, a qual leva em consideração o diferencial de pressão aferido entre o duto de entrada da corrente gás-sólido e o duto da saída do gás pelo topo do separador. Esse diferencial de pressão constitui uma variável de desempenho do ciclone, sendo apresentado na seção 4.2.

Figura 26 - Queda de pressão na porção do ciclone conectada ao circuito de fluidização em função das variáveis controláveis.



Fonte: autoria própria (2023).

Ao analisar os resultados da Figura 26 percebe-se que, no geral, não há uma tendência claramente definida entre a queda de pressão e Q_a . Para o caso da operação com o maior inventário de sólidos, a queda de pressão tem pouco efeito com a variação da vazão e posição da aeração. No entanto, quando o inventário dos sólidos cai para 3 kg, a aeração distribuída LS+SP parece levar ao aumento na queda de pressão. Isto poderia estar associado à maior sensibilidade de resposta do ciclone a pequenas variações da concentração de sólidos na corrente gasosa em baixos níveis de G_s . O aumento da queda de pressão com o incremento de G_s na porção do circuito ocupada pelo ciclone foi previamente relatado por Yao *et al.* (2011).

4.2 Desempenho do ciclone

O desempenho do ciclone é composto por dois parâmetros: eficiência de coleta do ciclone e queda de pressão no ciclone. Dessa maneira foi realizado uma discussão dos resultados de cada um desses parâmetros.

4.2.1 Eficiência de coleta do ciclone em função das variáveis controláveis

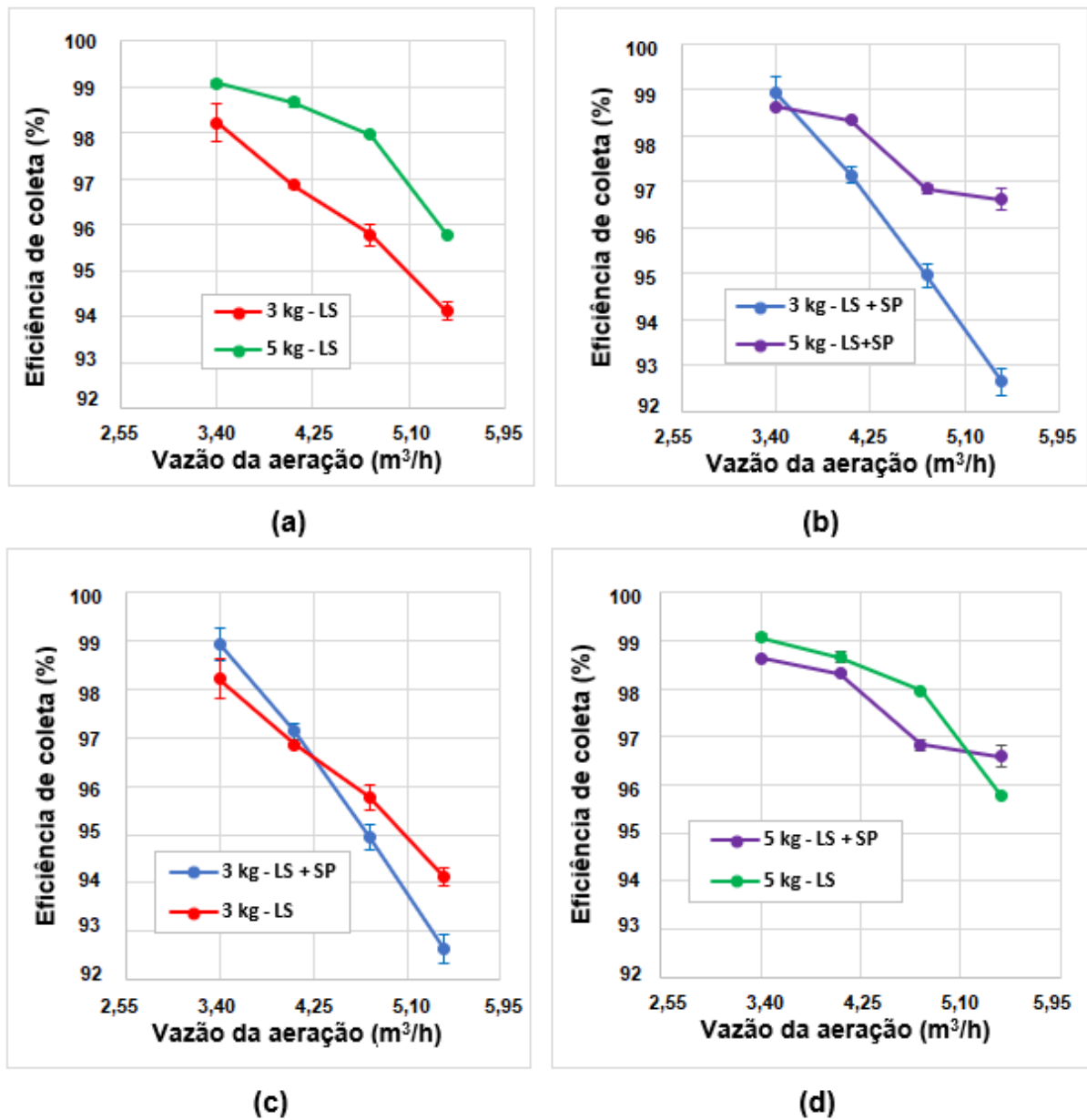
A Figura 27 mostra o comportamento da eficiência de coleta (η) do ciclone em função da aeração (Q_a) para os valores de inventário de sólidos (I_s) de 3 kg e de 5 kg, bem como para as duas posições da aeração, LS e LS+SP.

Os resultados obtidos mostram que, para todos os casos testados, o aumento de Q_a de 3,4 m³/h para 5,4 m³/h causou uma clara redução na eficiência de coleta do ciclone. A maior redução em pontos percentuais (cerca de 6) aconteceu no caso do inventário de sólidos de 3 kg com aeração distribuída aplicada na base da câmara de alimentação da válvula *loop seal* e na parte baixa do *standpipe* (LS + SP). Já, a menor queda em pontos percentuais (aproximadamente 2), ocorreu para a situação com inventário de sólidos de 5 kg e também posição de aeração distribuída LS+SP.

Vários estudos da literatura (BASU; CHENG, 2000; DIETER *et al.*, 2011, YAO *et al.*, 2011; WANG *et al.* 2014; YUKSELENTURK; YUKSELENTURK, YILMAZ, 2019; SUÁREZ; GÓMEZ, 2022) relatam que o aumento da vazão da aeração acima de um valor crítico pode fazer com que uma parcela desta vá em direção à base do ciclone, reduzindo a sua eficiência de coleta. Todavia, uma comparação direta com esses trabalhos não foi possível, uma vez que seus autores não apresentam dados

concretos da redução do desempenho do separador de sólidos, tanto de estudos experimentais quanto de simulações fluidodinâmicas. Dessa maneira, os resultados apresentados neste trabalho confirmam a presença da corrente de gás ascendente pelo *standpipe* em direção à base do ciclone quando se utilizam elevados números de aeração e que a diminuição na eficiência de coleta é proporcional à magnitude da aeração aplicada.

Figura 27– Eficiência de coleta do ciclone em função das variáveis controláveis.



Fonte: autoria própria (2023).

Em relação ao efeito causado pelo nível do inventário de sólidos, as curvas (a) e (b) da Figura 27 indicam que a eficiência do ciclone é consistentemente maior quando o sistema de LFC é carregado com mais massa de partículas. Esse comportamento esperado é consequência do incremento no valor do fluxo de recirculação dos sólidos, que facilita a separação destes da corrente de gás no ciclone, como previamente relatado por Muschelknautz e Greif (1997).

Por outro lado, as curvas (c) e (d) da Figura 27 deixam em evidência que a posição da aeração praticamente não afeta a eficiência de separação do ciclone, mas que o inventário de sólidos tem alguma interação com a vazão de aeração, estabelecendo a intensidade com a qual acontece a redução da eficiência de coleta do ciclone. Nesse sentido, observa-se que a queda de rendimento do ciclone é mais pronunciada ao utilizar-se o menor inventário de sólidos. Na média, a queda de rendimento do ciclone foi de aproximadamente 5 pontos percentuais com inventários de 3 kg, em comparação com os 2,5 pontos percentuais alcançados com inventários de 5 kg. A explicação a este comportamento está em que, ao usar baixos inventários de sólidos, a altura da coluna de leito no *standpipe* fica pequena, facilitando a passagem de uma parcela de gás em direção ao ciclone. Essa passagem de gás ascendente se intensifica com o aumento da vazão da aeração na presença de um baixo fluxo de recirculação dos sólidos, que permanece quase constante e oferece pouca resistência na descida pelo *standpipe*.

Conforme já discutido na seção 4.1.1, o aumento da vazão da aeração não causou variação significativa no valor de G_s , anulando assim qualquer efeito deste sobre a eficiência de coleta do ciclone. Além disso, as quedas de pressão nos componentes do sistema de LFC, apresentadas na seção 4.1.3, permaneceram quase inalteradas. Dessa forma, sob tais condições operacionais, confirma-se a influência isolada da vazão da aeração sobre a eficiência de coleta do ciclone, e que a parcela da aeração que sai da válvula *loop seal* em direção ao *riser* é sempre a mesma, independentemente do valor total de vazão e da posição da aeração. Consequentemente, fica evidente que quanto maior for o valor da vazão de aeração aplicada, maior será a parcela da aeração que vai em direção à base do ciclone, influenciando diretamente na redução de sua eficiência.

Com a finalidade de reforçar a discussão e os resultados mostrados nesse item, foi feita uma análise de variância ANOVA para determinar a significância estatística dos efeitos causados pelos três parâmetros controláveis sobre a variável

de resposta, neste caso, a eficiência de coleta do ciclone (η). A Tabela 9 resume os dados referentes aos tratamentos experimentais realizados em duplicata que foram considerados para essa análise, contendo os respectivos valores do rendimento porcentual do separador de partículas.

Tabela 9 - Dados utilizados para analisar, estatisticamente, os efeitos das variáveis controláveis sobre a eficiência de coleta do ciclone.

Experimento	I_s (kg)	Q_a (m ³ /h)	Posição da aeração	η (%)
1	5 (+)	5,4 (+)	LS (+)	95,80
2	5 (+)	5,4 (+)	LS (+)	95,76
3	5 (+)	3,4 (-)	LS (+)	99,16
4	5 (+)	3,4 (-)	LS (+)	98,98
5	5 (+)	5,4 (+)	LS+SP (-)	96,84
6	5 (+)	5,4 (+)	LS+SP (-)	96,36
7	5 (+)	3,4 (-)	LS+SP (-)	98,64
8	5 (+)	3,4 (-)	LS+SP (-)	98,62
9	3 (-)	5,4 (+)	LS (+)	94,30
10	3 (-)	5,4 (+)	LS (+)	93,93
11	3 (-)	3,4 (-)	LS (+)	98,63
12	3 (-)	3,4 (-)	LS (+)	97,80
13	3 (-)	5,4 (+)	LS+SP (-)	92,33
14	3 (-)	5,4 (+)	LS+SP (-)	92,93
15	3 (-)	3,4 (-)	LS+SP (-)	98,60
16	3 (-)	3,4 (-)	LS+SP (-)	99,27

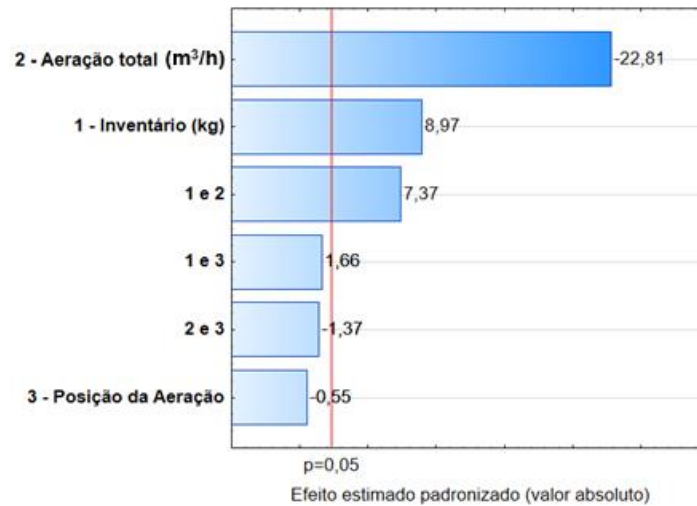
Fonte: autoria própria (2023).

O gráfico de Pareto dos efeitos principais e de interação de dois fatores é ilustrado na Figura 28.

Os resultados da Figura 28 indicam que os efeitos principais da vazão volumétrica de aeração e o inventário de sólidos carregado no sistema, bem como o da interação de ambos os fatores, são estatisticamente significativos ao nível de confiança de 95%. Ao analisar apenas os efeitos principais, percebe-se que o efeito promovido pela vazão da aeração é o mais relevante de todos, levando a uma resposta inversamente proporcional em relação à eficiência de coleta do ciclone, como indicado pelo sinal negativo do efeito. Por outro lado, o inventário de sólidos produziu um efeito significativo de menor intensidade, porém de comportamento diretamente proporcional como confirmado pelo sinal positivo. Em relação à posição da aeração e

às suas interações com os outros fatores controláveis, confirma-se a insignificância do seu efeito sobre o rendimento de captura do separador de partículas.

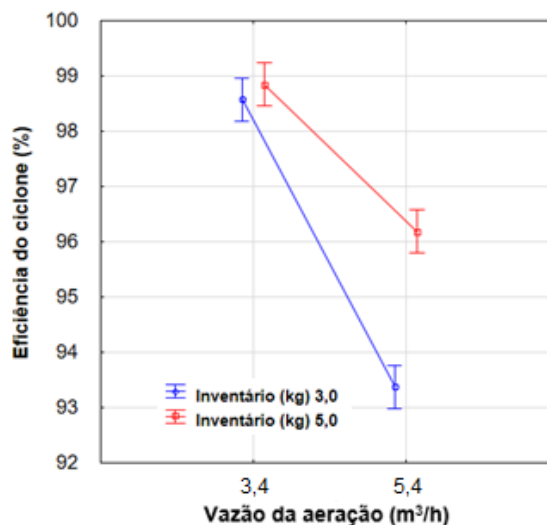
Figura 28 - Efeitos principais e de interação padronizados das variáveis controláveis sobre a eficiência de coleta do ciclone.



Fonte: autoria própria (2023).

A Figura 29 ilustra os valores médios e os intervalos de confiança de 95%, da eficiência de coleta do ciclone quando a vazão de aeração utilizada nos experimentos muda entre os seus valores extremos (3,4m³/h e 5,4m³/h) com o inventário dos sólidos mantido constante.

Figura 29 - Variação da eficiência de coleta do ciclone na faixa da vazão de aeração com o inventário de sólidos mantido constante.

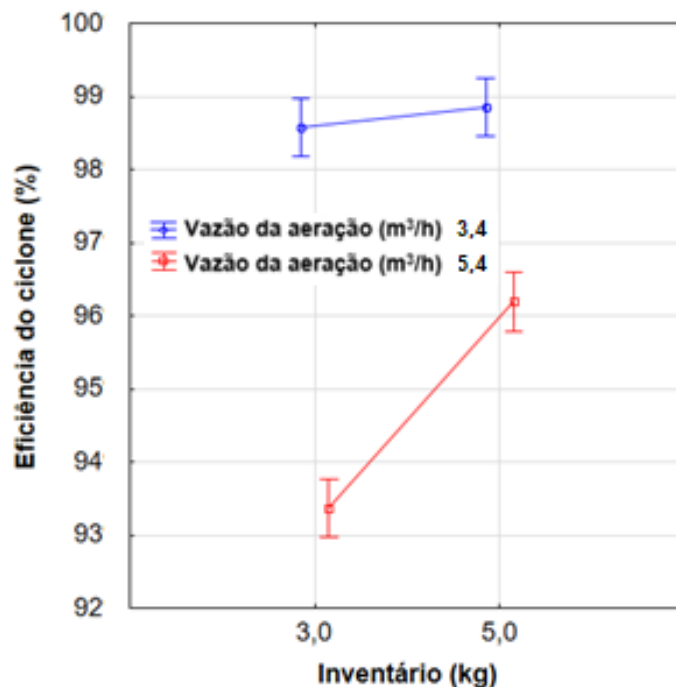


Fonte: autoria própria (2023).

Os resultados confirmam uma queda mais expressiva no rendimento do ciclone quando a vazão de aeração é incrementada utilizando o inventário menor de 3 kg. A variação obtida, em pontos percentuais, foi o dobro da alcançada durante a operação do sistema de LFC com o inventário maior de 5 kg.

A Figura 30 mostra os valores médios, e os intervalos de confiança de 95% da eficiência de coleta do ciclone quando o inventário dos sólidos mudou de 3 kg para 5 kg mantendo a vazão da aeração constante.

Figura 30 - Variação da eficiência de coleta do ciclone na faixa de inventário dos sólidos com a vazão de aeração mantida constante.



Fonte: autoria própria (2023).

Nesta comparação, os resultados indicam que a eficiência de coleta do ciclone tende a ser menos afetada pelo nível do inventário de sólidos à medida que a vazão da aeração injetada na válvula *loop seal* diminui. A variação no rendimento do ciclone obtida com a vazão de aeração de 5,4 m³/h, durante a mudança no nível de inventário dos sólidos, foi aproximadamente 5 vezes maior que a constatada com a vazão de aeração de 3,4 m³/h para o mesmo intervalo de massa carregada no sistema de LFC.

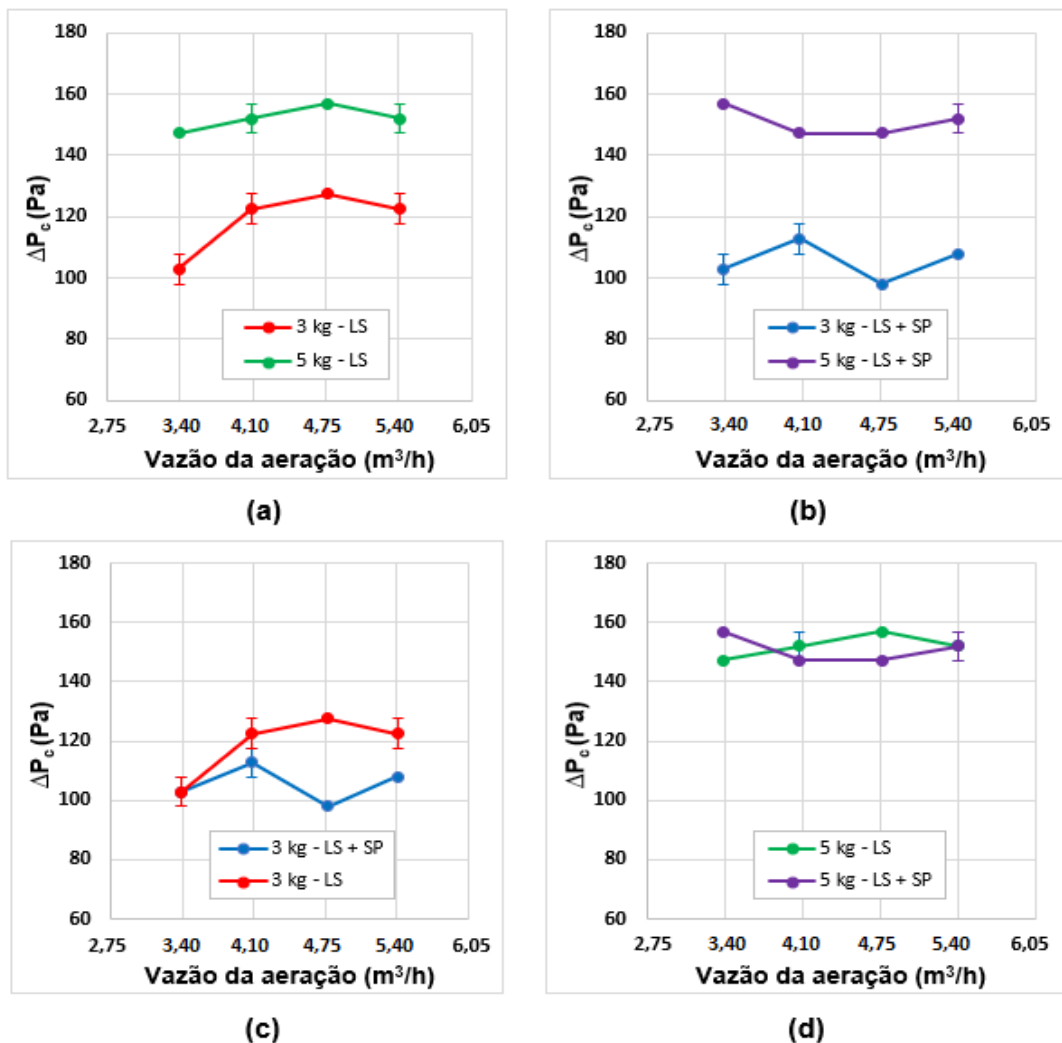
Dessa maneira, as diferenças nas inclinações apresentadas pelas retas das Figura 29 e Figura 30 deixam em evidencia que existe interação importante entre a vazão da aeração e o inventário dos sólidos. Conforme o diagrama de Pareto da Figura 30 o efeito dessa interação tem sinal positivo, sugerindo que, ao aumentar a

vazão da aeração de 3,4 m³/h para 5,4 m³/h, a queda na eficiência de coleta do ciclone diminui quando o inventário de sólidos é incrementado de 3 kg para 5 kg.

4.2.2 Queda de pressão no ciclone em função das variáveis controláveis

A Figura 31 apresenta o comportamento da queda de pressão experimentada pelo ciclone (ΔP_c) em relação à variação na vazão de aeração para os dois valores de inventário dos sólidos, bem como para as duas condições de posição da aeração. Destaca-se que a queda de pressão representada nesse gráfico corresponde à diferença nas leituras de pressão estática aferida entre as tomadas identificadas por CI-E e CI-S na Figura 12, localizadas na entrada e na saída do gás depurado, respectivamente.

Figura 31 - Queda de pressão no ciclone em função das variáveis controláveis.



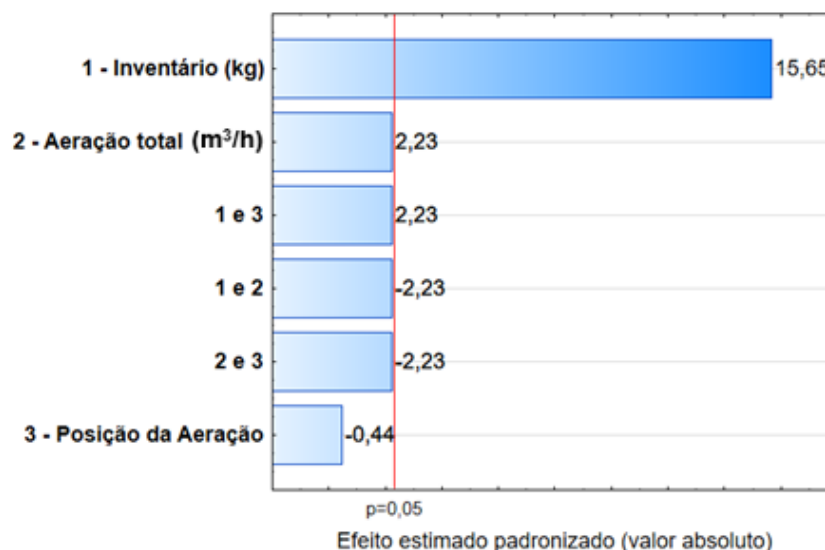
Fonte: autoria própria (2023).

Os resultados mostram que o valor absoluto da queda de pressão no ciclone manteve-se com pouca variação em todos os casos estudados. A queda de pressão média obtida, considerando todos os testes experimentais realizados, foi menor que 160 Pa, menor ao reportado na literatura para ciclones de sistemas de leito fluidizado circulante, nos quais as quedas de pressão no ciclone variaram de 400 a 2000 Pa (DE; NAG, 1999; FASSANI; GOLDSTEIN, 2000; MORIN *et al.*, 2021).

Os Gráficos (a) e (b) da Figura 31 sugerem que o uso de maiores inventários produz um incremento na queda de pressão do ciclone. Esta tendência era esperada pelo aumento do atrito das partículas com as superfícies do separador, como consequência da presença de uma maior concentração delas na corrente gás-sólido (elevação no valor de G_s). O aumento da queda de pressão no ciclone com o incremento da concentração dos sólidos na corrente gasosa de entrada foi previamente reportado na literatura (DE; NAG, 1999; FASSANI; GOLDSTEIN, 2000; KNOWLTON; KARRI, 2008; MORIN *et al.*, 2021).

Por outro lado, os perfis dos Gráficos (c) e (d) da Figura 31 mostram que, em termos da vazão e da posição da aeração, não há uma tendência consistente na relação dessas variáveis com a queda de pressão experimentada pelo separador de partículas. No entanto, percebe-se que os valores absolutos dessa queda de pressão tendem a ficarem mais próximos para as posições de aeração LS e LS+SP quando utilizado o inventário de sólidos de 5 kg.

Figura 32 - Efeitos principais e de interação das variáveis de entrada sobre a queda de pressão no ciclone.



Fonte: autoria própria (2023).

Para estabelecer se essas tendências observadas são ou não estatisticamente significativas, foi realizada uma análise ANOVA dos efeitos das variáveis controláveis sobre a queda de pressão no ciclone. Os resultados são apresentados no gráfico de Pareto da Figura 32 a partir dos dados resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados utilizados para analisar, estatisticamente, os efeitos dos parâmetros de entrada sobre a queda de pressão no ciclone.

Experimento	I_s (kg)	Q_a (m ³ /h)	Posição da aeração	Queda de pressão no ciclone (Pa)
1	5	5,4	LS	157
2	5	5,4	LS	147
3	5	3,4	LS	147
4	5	3,4	LS	147
5	5	5,4	LS+SP	157
6	5	5,4	LS+SP	147
7	5	3,4	LS+SP	157
8	5	3,4	LS+SP	157
9	3	5,4	LS	127
10	3	5,4	LS	118
11	3	3,4	LS	108
12	3	3,4	LS	98
13	3	5,4	LS+SP	108
14	3	5,4	LS+SP	108
15	3	3,4	LS+SP	108
16	3	3,4	LS+SP	98

Fonte: autoria própria (2023).

Os resultados da ANOVA confirmam que apenas o efeito principal do inventário de sólidos é significativo ao nível de confiança de 95%, apresentando sinal positivo de uma relação diretamente proporcional com a queda de pressão no ciclone.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do trabalho realizado, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Com relação ao comportamento do fluxo de recirculação dos sólidos, os resultados mostraram que a posição da aeração e a variação da sua vazão volumétrica, quando aplicada numa faixa de altos números de fluidização na válvula *loop seal*, não produzem tendências claras de aumento ou de diminuição nos valores de G_s . Nas condições operacionais impostas no sistema de LFC, o parâmetro que contribuiu para uma variação altamente significativa do G_s foi o inventário de sólidos, sendo este o único fator que determinou o estudo do rendimento do ciclone em termos da variação de G_s .
- Os experimentos realizados indicaram que, na faixa analisada, a variação na vazão de aeração não provocou uma alteração significativa no valor médio da pressão estática do perfil axial. Conforme verificado pela análise estatística, as alterações no valor médio de pressão circuito de fluidização é atribuída, principalmente, ao nível de inventário dos sólidos, seguido pela posição da aeração aplicada na região da válvula *loop seal*. Isto sugere que a posição de aeração pode ser também um parâmetro que precisa de atenção na busca de um melhor desempenho dos sistemas de LFC.
- De maneira geral, as mudanças impostas na vazão e na posição da aeração levaram a menores diferenças nos valores da queda de pressão nos componentes do sistema de LFC em comparação com os obtidos em outros trabalhos da literatura. Como esperado, o nível do inventário dos sólidos foi o fator relevante neste aspecto, em virtude da relação direta da queda de pressão com a concentração de partículas existente no sistema experimental.
- No que diz respeito à influência dos parâmetros estudados no desempenho do ciclone, os resultados indicam que o aumento da vazão de aeração pode reduzir significativamente a eficiência de coleta do ciclone, e que essa redução é proporcional à magnitude da aeração aplicada. Além disso, as experiências mostram que a eficiência do ciclone é maior quando o sistema de LFC é carregado com mais massa de partículas, e que a posição da aeração (desde que localizada sempre abaixo do nível de inventário dos sólidos acumulados no *standpipe*) não é relevante para o rendimento de separação do ciclone. Outra constatação importante foi que a variação

da eficiência entre valor máximo e mínimo foi maior quando o inventário de sólidos menor foi utilizado. Com isso, conclui-se que a operação do sistema de LFC com altos inventários pode economizar material inerte de reposição do leito e energia perdida com combustível inqueimado no caso de fornalhas. No entanto, será também necessário avaliar o aumento na energia de fluidização requerida, uma vez que as quedas de pressão nos componentes com altos inventários aumentam.

- A análise de variância (ANOVA) demonstrou que a vazão de aeração é a variável que possui o efeito mais significativo e inversamente proporcional sobre a eficiência de coleta do ciclone, enquanto que o inventário de sólidos e a interação da vazão de aeração com o inventário de sólidos foram diretamente proporcionais à eficiência de separação. Neste último caso, o sinal positivo do efeito da interação entre as duas variáveis sugere que a adição de sólidos no leito pode anular a influência negativa promovida pelo incremento da vazão da aeração sobre a eficiência de captura do ciclone.
- Levando em consideração que a vazão de aeração não provocou uma variação significativa no valor de G_s , pode-se afirmar que a variação da eficiência de coleta do ciclone foi exclusivamente afetada pela mudança na vazão da aeração em seus respectivos inventários. Dessa forma, conclui-se que ao operar uma fornalha de LFC com elevados números de aeração, com os quais o G_s não varie significativamente, deve-se ter atenção especial no controle da vazão aplicada no dispositivo de recirculação dos sólidos, a fim de garantir que a redução na eficiência de coleta do ciclone não comprometa de maneira significativa o rendimento da fornalha.
- Com relação à queda de pressão experimentada pelo ciclone com a velocidade de fluidização mantida em valor fixo, observou-se que ela foi influenciada apenas pelo inventário de sólidos e de maneira diretamente proporcional, como resultado da maior concentração de partículas atravessando o separador. Dessa forma, a variação na vazão e na posição da aeração não apresentaram efeitos significativos sobre a queda de pressão.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, surgiram aspectos que despertaram interesse para estudos futuros. Dessa maneira, algumas sugestões para trabalhos posteriores são apresentadas na sequência:

- A medição das granulometrias e o tamanho médio das partículas da areia utilizada depois dos experimentos, e analisar a relação dessas granulometrias com os parâmetros de entrada e com o rendimento operacional do ciclone.
- O desenvolvimento de um sistema de medição de vazão que consiga quantificar a parcela de vazão de aeração que sobe pelo *standpipe* em direção ao ciclone.
- A realização de experimentos que considerem a variação do tempo de operação do sistema de LFC, a fim de analisar a progressão temporal na variação do rendimento operacional do ciclone devido à redução do tamanho médio das partículas por atrito.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 5167-1: Medição de Vazão de Fluidos por meio de Instrumentos de Pressão – Parte 1: Placas de Orifícios, Bocais e Tubos de Venturi Instalados em Seção Transversal Circular de Conduitos Forçados**, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- BARESCHINO, P., SOLIMENE, R., CHIRONE, R., & SALATINO, P. Gas and solid flow patterns in the loop-seal of a circulating fluidized bed. **Powder technology**, v. 264, p. 197-202, 2014.
- 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. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Ed. Taylor & Francis, Boca Raton-U.S.A, 473 p. 2006.
- 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.
- BRIGGS, L. W. Effect of dust concentration on cyclone performance. **Trans. Am. Inst. Chem. Eng**, v. 42, p. 511-526, 1946.
- CHINSUWAN, A.; SOMJUN, 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.
- CHEN, J.; SHI, M. A universal model to calculate cyclone pressure drop. **Powder technology**, v. 171, n. 3, p. 184-191, 2007.
- CORTÉS, C.; GIL, A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. **Progress in energy and combustion Science**, v. 33, n. 5, p. 409-452, 2007.
- DAVAILLES, A.; CLIMENT, E.; BOURGEOIS, F. Fundamental understanding of swirling flow pattern in hydrocyclones. **Separation and Purification Technology**, v. 92, p. 152-160, 2012.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Editora da UNICAMP, 2003.
- DE, S.; NAG, P. K. Pressure drop and collection efficiency of cyclone and impact separators in a CFB. **International journal of energy research**, v. 23, n. 1, p. 51-60, 1999.

PAULA, A. CO; HENRÍQUEZ, J. R.; FIGUEIREDO, F. A. B. Dimensioning a Cyclone Separator for Circulating Fluidized Bed Gasifier: Validation of a Procedure. **Heat Transfer Engineering**, v. 41, n. 15-16, p. 1305-1314, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 093/94: Solos – determinação da densidade real. 1994.

DEWIL, R.; BAEYENS, J.; CAERTS, B. CFB cyclones at high temperature: operational results and design assessment. **Particuology**, v. 6, n. 3, p. 149-156, 2008.

DIETER, H., CHARITOS, A., BIDWE, A. R., WEI, A., & ZIEBA, M. **Study of Standpipe and Loop Seal Behavior in a Circulating Fluidized Bed for Geldart B Particles**. 2011.

FASSANI, F.; GOLDSTEIN, L. A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency. **Powder Technology**, v. 107, n. 1-2, p. 60-65, 2000.

Global Market Insights. **Global Circulating Fluidized Bed Market**. 2019. Disponível em: <<https://www.gminsights.com/industry-analysis/circulating-fluidized-bed-boiler-market>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

GRACE, J. R.; KNOWLTON, T. M.; AVIDAN, A. A. (Ed.). **Circulating fluidized beds**. Blackie Academic & Professional, 1997.

HOFFMANN, A. C., STEIN, L. E., & BRADSHAW, P. **Gas cyclones and swirl tubes**. 2002.

HUANG, A. N., ITO, K., FUKASAWA, T., FUKUI, K., & KUO, H. P. Effects of particle mass loading on the hydrodynamics and separation efficiency of a cyclone separator. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 90, p. 61-67, 2018.

HUGI, E.; REH, L. Focus on solids strand formation improves separation performance of highly loaded circulating fluidized bed recycle cyclones. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 39, n. 3, p. 263-273, 2000.

KARAGOZ, I.; AVCI, A. Modelling of the pressure drop in tangential inlet cyclone separators. **Aerosol Science and Technology**, v. 39, n. 9, p. 857-865, 2005.

KE, X., YAO, Y., HUANG, Z., ZHANG, M., LYU, J., YANG, H., & ZHOU, T. Prediction and minimization of NO_x emission in a circulating fluidized bed combustor: Improvement of bed quality by optimizing cyclone performance and coal particle size. **Fuel**, v. 328, p. 125287, 2022.

KIM, S. W.; KIM, S. D. 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.

KLEIN, S.A., **EES – Engineering Equation Solver, Version 10.836**, June 2020, F-Chart Software, <https://fchartsoftware.com>.

KNOWLTON, T.; KARRI, S. B. R. Cyclone systems in circulating fluidized beds. **Proc. of CFB12, Krakow, Poland**, p. 47-64, 2017.

KNOWLTON, T.; KARRI, R. Differences in cyclone operation at low and high solids loading. In: **Proceedings of the International Fluidization South Africa Conference, Johannesburg**, South Africa. 2008. p. 19-20.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. USA: Butterworth-Heinemann, 1991. 491 p.

LI, G.; LU, Y. Cyclone separation in a supercritical water circulating fluidized bed reactor for coal/biomass gasification: Structural design and numerical analysis. **Particuology**, v. 39, p. 55-67, 2018.

LI, C.; LI, H.; ZHU, Q. A hydrodynamic model of loop seal for a circulating fluidized bed. **Powder Technology**, China, n. 252, p.14-19, 2014.

LI, C.; ZOU, Z.; LI, H.; ZHU, Q. A hydrodynamic model of loop seal with a fluidized standpipe for a circulating fluidized bed. **Particuology**, China.p.1-9, 2017.

MACHADO, V. O. O. BEHAINNE, J. J. R. PARISE, M. R. Caracterização operacional e simulação computacional do escoamento gás-sólido em leito fluidizado circulante: Experiências em escala de laboratório. In: MARTINS, F. JAVAREZ, L. J. VILLANOVA, R. L. **A Engenharia Mecânica na UTFPR**. Ponta Grossa: Texto e Contexto, 2019. p.244 – 277.

MACHADO, V. O. O. **Simulação computacional do escoamento gás-sólido de um leito fluidizado circulante**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MONAZAM, E.; SHADLE, L.; MEI, J. Impact of the circulating fluidized bed riser on the performance of a loopseal nonmechanical valve. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 46, n. 6, p. 1843-1850, 2007.

MORIN, M., RAYNAL, L., KARRI, S. R., & COCCO, R. Effect of solid loading and inlet aspect ratio on cyclone efficiency and pressure drop: Experimental study and CFD simulations. **Powder Technology**, v. 377, p. 174-185, 2021.

MORITA, E. S. **Estudo experimental das emissões de NOx na combustão de carvão mineral brasileiro em leito fluidizado rápido**. 2009.

MUSCHELKNAUTZ, E.; GREIF, V. Cyclones and other gas-solids separators. In: **Circulating Fluidized Beds**. Springer, Dordrecht, 1997. p. 181-213.

OLIVEIRA, F. **Estudo da influência do modo de aeração de uma válvula loop-seal na operação de um leito fluidizado circulante**. 2019. 91 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

OLIVEIRA, F., FURQUIM, G. S., PARISE, M. R., & BEHAINNE, J. J. R. Operational influence of the mono-chamber aeration mode in the loop seal of a circulating fluidized bed. **Latin American Applied Research-An international journal**, v. 51, n. 1, p. 15-20, 2021.

PEÇANHA, R. P.; MASSARANI, G. Dimensão Característica e Forma de Partículas in XIV Encontro Sobre Escoamento Em Meios Porosos (Enemp), Campinas – SP, 1986. **Anais do XIV Encontro Sobre Escoamento mm Meios Porosos (Enemp)**, v. 1. pp. 302-312, 1986

PECETE, A. S. **Estudo experimental do perfil axial de pressão a frio de um leito fluidizado circulante com distribuidor de ar**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 106 f., 2014.

PELL, M.; DUNSON, J. B.; KNOWLTON, T. M. Gas Solid Operation and Equipment. In: GREEN, Don W.; PERRY, Robert H. (ed.). **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. 8. ed. [S. l.]: The McGraw-Hill Companies, 2008. cap. 17.

RAMÍREZ-BEHAINNE, J.J. **Estudo das Emissões de Mercúrio na Combustão de Carvão Mineral Brasileiro em Leito Fluidizado Rápido**. 2007. 234 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

RAOUFI, A.; SHAMS, M.; KANANI, H. CFD analysis of flow field in square cyclones. **Powder Technology**, v. 191, n. 3, p. 349-357, 2009.

SHEPHERD, C. B.; LAPPLE, C. E. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 31, n. 8, p. 972-984, 1939.

SHIN, D.; JANG, S.; HWANG, J. Combustion characteristics of paper mill sludge in a lab-scale combustor with internally cycloned circulating fluidized bed. **Waste Management**, v. 25, n. 7, p. 680-685, 2005.

SHUKLA, S. K.; SHUKLA, P.; GHOSH, P. The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators. **Applied Mathematical Modelling**, 2013, 37.8: 5774-5789.

SOUZA, D. R. C. **Desenvolvimento de um software aplicativo em linguagem C para cálculo de eficiência e perda de carga em ciclones**. 1994.215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 1994.

SUÁREZ, M.; GÓMEZ, A. On the comprehension of the gas split in loop seal devices. **Powder Technology**, v. 408, p. 117777, 2022.

STAIRMAND, C. J. Pressure drop in cyclone separators. **Engineering**, v. 168, n. 4369, p. 409, 1949.

SWIFT, P. **Dust control in industry-2**. Steam Heat. Engr., v. 38, p. 453-464, 1969.

TURINI, B. A. F. **Avaliação experimental do coeficiente de transferência de calor suspensão-parede em regime de leito fluidizado borbulhante monitorado pelo método da frequência central gaussiana**. 2017.131 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017

YAO, X., YANG, H., ZHANG, H., ZHOU, C., LIU, Q., & YUE, G. Gas– solid flow behavior in the standpipe of a circulating fluidized bed with a loop seal. **Energy & fuels**, v. 25, n. 1, p. 246-250, 2011.

YANG, J.; SUN, G.; ZHAN, M. Prediction of the maximum-efficiency inlet velocity in cyclones. **Powder Technology**, 2015, 286: 124-131.

YANG, W. (Ed.). **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. CRC press, 2003.

YUKSELENTURK, Y.; YILMAZ, B. Analysis of fluidization behavior in the loop seal of a circulating fluidized bed gasifier using particle-in-cell method. **Particulate Science and Technology**, v. 37, n. 8, p. 993-1006, 2019.

WANG, H. Study on Separation Efficiency of Cyclone Separator for 75t/h Circulating Fluidized Bed Boiler. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2020. p. 012037.

WANG, P., LU, J., XING, W., YANG, H., & ZHANG, M. Impact of loop seal structure on gas solid flow in a CFB system. **Powder technology**, v. 264, p. 177-183, 2014.

WEINSTEIN, H.; SHAO, M.; SCHNITZLEIN, M. Radial variation in solid density in high velocity fluidization. In: **Basu, P. Circulating Fluidized Bed Technology**. Pergamon Press. p. 201-206, 1983.

WEI, Q.; SUN, G.; YANG, J. A model for prediction of maximum-efficiency inlet velocity in a gas-solid cyclone separator. **Chemical Engineering Science**, 2019, 204: 287-297.

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DOS TESTES EXPERIMENTAIS

ETAPA 1 - Preparo da UFRAF, peneiramento e pesagem do material do leito: inicialmente é feita a limpeza de todas as tomadas de pressão da UFRAF para garantir que não haja erro de medição, bem como a checagem de ausência de vazamento em todas as conexões de ar da UFRAF. O peneiramento é feito vertendo os sacos de areia sobre uma peneira industrial (500 mm x 500 mm x 100 mm) com malha de 300 μm de abertura. O material passante por essa peneira é recolhido no prato de fundo e utilizado nos testes experimentais. A parcela de areia que fica acima da peneira é descartada. O tempo de peneiramento por batelada é de 3 min, e a massa colocada para peneirar é de aproximadamente 3 kg. A quantidade que passa pela peneira varia de 2,2 a 2,5 kg. A quantidade recolhida para teste (3 kg ou 5 kg) é pesada em balança digital com 1,0 g de resolução. Entre um peneiramento por batelada e outro, a malha da peneira é limpa utilizando uma escova de cerdas duras.

ETAPA 2 - Carregamento do material do leito na UFRAF: com o sistema ainda desligado, o material de leito previamente pesado é vertido no tubo do *standpipe* e da câmara de alimentação da *loop seal*. Essa operação é realizada com o auxílio de um funil, posicionado na abertura superior da conexão em T localizada na saída do ciclone.

ETAPA3 - Fornecimento do ar de fluidização ao riser sem circulação de sólidos: após o carregamento do material de leito na UFRAF e fechamento da abertura da conexão T do ciclone, liga-se o soprador de ar (SO-1) com o inversor de frequência (regulador de rotação), IF, indicando 41,5 Hz para 3 kg de inventário e velocidade de fluidização de 3,5 m/s, ou na frequência de 46,0 Hz para inventário de 5 kg e mesma velocidade de fluidização. Depois disso, espera-se a estabilização da temperatura do ar de fluidização medida na placa de orifício do sistema.

ETAPA 4 - Fornecimento da aeração na válvula *loop-seal* para início da circulação dos sólidos e ajuste final da velocidade de fluidização: nessa etapa é importante já saber previamente se a aeração será feita somente na válvula *loop seal* (situação 1) ou se será fornecida também no *standpipe* (situação 2). Caso a situação escolhida seja a 1 deve-se abrir apenas p regulador de pressão VRP-1, conectado à linha da aeração que fornece ar na câmara de alimentação da válvula *loop seal*. De maneira conjunta inicia-se a contagem do tempo de teste utilizando um cronômetro. Em seguida, ajusta-se, simultaneamente, o valor da vazão (em m^3/h) requerida para o experimento, utilizando o regulador de fluxo VA-1, e a pressão, utilizando a válvula VRP-1, no valor de 2 bar. Já para a situação 2 é necessário abrir: os dois reguladores

de pressão, VRP-1 e VRP-2; o regulador de vazão VA-1 na vazão fixa de 1,7 m³/h, bem como garantir que os reguladores de vazão VA-2 e VA-3 sejam abertos juntos na vazão requerida pelo experimento. Após isso, deve-se ler o valor de pressão à montante da placa de orifício e alimentar o programa EES™ com esse valor, bem como com o valor de temperatura do ar de fluidização, a fim de obter a pressão diferencial requerida na placa de orifício. O valor da pressão diferencial lida no manômetro deve ser igual ao valor da pressão diferencial que o programa EES™ fornece. Realiza-se o ajuste da pressão diferencial aumentando ou reduzindo a rotação do soprador com o inversor de frequência até que a vazão e a temperatura do ar estabilizem. Essa etapa tem duração aproximada de 5 minutos.

ETAPA 5 - Registro das leituras de pressão estática: com a finalidade de construir gráficos com o perfil de pressão estática em função da altura do leito nessa etapa é coletado os valores de pressão estática das seguintes tomadas de pressão: *RI-1, RI-2, RI-3, RI-4, CI-1, CI-S, SP-1, LS-A e LS-R*. As leituras das tomadas de pressão foram realizadas por meio de manômetros do tipo U conectados em cada uma delas.

ETAPA 6 - Determinação da taxa de recirculação dos sólidos: o procedimento para o cálculo da taxa de recirculação dos sólidos é iniciado faltando aproximadamente 2 minutos para finalizar o tempo do experimento. Para isso, uma quantidade de sólidos é desviada para um recipiente ao acionar a alavanca do amostrador de sólidos posicionado no *standpipe*. O tempo de acionamento da alavanca para coleta da amostra é de 4 segundos. Posteriormente, a massa coletada é pesada em balança digital com 1 g de resolução, a fim de determinar a respectiva taxa de recirculação dos sólidos.

ETAPA 7 - Interrupção da aeração e do fornecimento do ar de fluidização: quando resta 1 min para finalizar o experimento, a aeração é interrompida ao fechar o(s) registro(s) que alimentam a válvula *loop seal* e o *standpipe* (se for o caso). Esse período de tempo é suficiente para que o ar de fluidização arraste, para a válvula *loop seal*, as partículas contidas nesse momento no *riser*. Seguidamente, o soprador (SO-1) do sistema de fornecimento do ar de fluidização é desligado, finalizando-se o tempo do teste com duração de 30 minutos.

ETAPA 8 - Remoção e pesagem do inventário de sólidos remanescente na UFRAF: finalizado o experimento, retira-se todo o material particulado remanescente na UFRAF com ajuda de um aspirador de pó. Para isso, inicialmente

abre-se a conexão em “Y” que fica na base do *standpipe* e acima da válvula *loop seal*, por onde ingressa a mangueira do aspirador de pó para a retirada da massa de inventário de sólidos na *loop seal* e *standpipe*. Posteriormente, remove-se o tubo de reciclagem dos sólidos localizado entre a válvula *loop seal* e a base do *riser*, a fim de permitir a introdução da mangueira do aspirador e retirar eventuais partículas remanescentes na base do *riser* e na sua placa distribuidora de ar. Após a coleta do inventário de sólidos remanescente, a massa de partículas é pesada em balança digital com 1 g de precisão. Na contagem do inventário final, inclui-se o valor da massa retirada do sistema para a determinação da taxa de recirculação dos sólidos. Finalmente, 100 gramas da amostra desviada pelo amostrador de sólidos é armazenada para posterior caracterização da sua distribuição granulométrica.

ETAPA 9 - Registro dos dados em planilha e finalização do experimento:

As informações coletadas durante o teste são registradas em planilha de cálculo do aplicativo Microsoft Excel™, elaborada para a determinação imediata da eficiência de coleta do ciclone e de outros resultados relevantes do desempenho operacional da UFRAF, finalizando-se assim o respectivo experimento.

APÊNDICE B - PLANILHAS DE REGISTRO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 1	Data: 01/04/2022	Hora início: 15:53	Hora fim: 15:23	Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme									
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:	Tempo de experimento:	Vazão da aeração:	Posição da aeração:	Inventário de sólidos:					
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$	$\phi_s: 0,69$	$d_p: 162 \mu\text{m}$	$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$	$t_e: 30 \text{ min}$	$Q_a: 5,4 \text{ m}^3/\text{h}$	$P_a: \text{LS}$	$I_s: 5 \text{ kg}$						
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)						Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:					
Horário:	Tomada de pressão:						$m_c: 4,790 \text{ kg}$	$m_s: 0,210 \text{ kg}$	$\eta: 95,8 \%$				
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
15:58	520,0	257,0	110,0	66,0	28,0	12,0	17,0	550,0	410,0	0,443 kg	4,2 seg	$G_s: 22,07 \text{ kg/m}^2.\text{s}$	
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 1*	Data: 01/04/2022	Hora início: 16:33	Hora fim: 17:03	Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme									
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:	Tempo de experimento:	Vazão da aeração:	Posição da aeração:	Inventário de sólidos:					
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$	$\phi_s: 0,69$	$d_p: 162 \mu\text{m}$	$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$	$t_e: 30 \text{ min}$	$Q_a: 5,4 \text{ m}^3/\text{h}$	$P_a: \text{LS}$	$I_s: 5 \text{ kg}$						
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)						Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:					
Horário:	Tomada de pressão:						$m_c: 4,788 \text{ kg}$	$m_s: 0,212 \text{ kg}$	$\eta: 95,76 \%$				
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
16:38	517,0	270,0	108,0	74,0	27,0	12,0	17,0	575,0	415,0	0,462 kg	4,2 seg	$G_s: 23,02 \text{ kg/m}^2.\text{s}$	
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF												
Experimento n°: 2	Data: 24/06/2021	Hora início: 08:28	Hora fim: 08:58	Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme								
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa			Velocidade de fluidização:	Tempo de experimento:	Vazão da aeração:	Posição da aeração:	Inventário de sólidos:					
ρ_s : 2712 kg/m ³	ϕ_s : 0,69	d_p : 162 μ m	u_{fl} : 3,5 m/s	t_e : 30 min	Q_a : 4,75 m ³ /h	P_a : LS	I_s : 5 kg					
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):												
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)						Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:				
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,899 kg	m_s : 0,101 kg	η : 97,98 %
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
08:32	510,0	300,0	110,0	72,0	27,0	11,0	17,0	591,0	435,0	0,507 kg	4 seg	G_s : 26,53 kg/m ² .s
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF												
Experimento n°: 2*	Data: 24/06/2021	Hora início: 09:21	Hora fim: 09:51	Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme								
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa			Velocidade de fluidização:	Tempo de experimento:	Vazão da aeração:	Posição da aeração:	Inventário de sólidos:					
ρ_s : 2712 kg/m ³	ϕ_s : 0,69	d_p : 162 μ m	u_{fl} : 3,5 m/s	t_e : 30 min	Q_a : 4,75 m ³ /h	P_a : LS	I_s : 5 kg					
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):												
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)						Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:				
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,897 kg	m_s : 0,103 kg	η : 97,94 %
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
09:26	510,0	275,0	118,0	73,0	27,0	11,0	17,0	585,0	425,0	0,475 kg	4 seg	G_s : 24,85 kg/m ² .s
* Repetição												

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF												
Experimento n°: 3	Data: 24/06/2021	Hora início: 10:10	Hora fim: 10:40	Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme								
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:	Tempo de experimento:	Vazão da aeração:	Posição da aeração:	Inventário de sólidos:				
ρ_s : 2712 kg/m ³	ϕ_s : 0,69	d_p : 162 μ m	u_{fl} : 3,5 m/s	t_e : 30 min	Q_a : 4,10 m ³ /h	P_a : LS	I_s : 5 kg					
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):												
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)						Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:				
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,928 kg	m_s : 0,072 kg	η : 98,56 %
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
10:15	500,0	270,0	117,0	72,0	27,0	11,0	16,0	580,0	410,0	0,480 kg	4 seg	G_s : 25,11 kg/m ² .s
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF												
Experimento n°: 3*	Data: 24/06/2021	Hora início: 10:55	Hora fim: 11:25	Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme								
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:	Tempo de experimento:	Vazão da aeração:	Posição da aeração:	Inventário de sólidos:				
ρ_s : 2712 kg/m ³	ϕ_s : 0,69	d_p : 162 μ m	u_{fl} : 3,5 m/s	t_e : 30 min	Q_a : 4,10 m ³ /h	P_a : LS	I_s : 5 kg					
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):												
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)						Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:				
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,938 kg	m_s : 0,062 kg	η : 98,76 %
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
11:00	500,0	290,0	116,0	68,0	26,0	11,0	16,0	590,0	390,0	0,480 kg	4 seg	G_s : 25,64 kg/m ² .s
* Repetição												

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF												
Experimento n°: 4	Data: 24/06/2021	Hora início: 13:56	Hora fim: 14:26	Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme								
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa						Velocidade de fluidização:	Tempo de experimento:	Vazão da aeração:	Posição da aeração:	Inventário de sólidos:		
ρ_s : 2712 kg/m ³	ϕ_s : 0,69	d_p : 162 μ m	u_{fl} : 3,5 m/s	t_e : 30 min	Q_a : 3,40 m ³ /h	P_a : LS	I_s : 5 kg					
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):												
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)									Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,958 kg	m_s : 0,042 kg	η : 99,16 %
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
14:01	490,0	270,0	103,0	69,0	25,0	10,0	15,0	585,0	400,0	0,488 kg	4 seg	G_s : 25,53 kg/m ² .s
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF												
Experimento n°: 4*	Data: 24/06/2021	Hora início: 14:39	Hora fim: 15:09	Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme								
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa						Velocidade de fluidização:	Tempo de experimento:	Vazão da aeração:	Posição da aeração:	Inventário de sólidos:		
ρ_s : 2712 kg/m ³	ϕ_s : 0,69	d_p : 162 μ m	u_{fl} : 3,5 m/s	t_e : 30 min	Q_a : 3,40 m ³ /h	P_a : LS	I_s : 5 kg					
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):												
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)									Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,949 kg	m_s : 0,051 kg	η : 98,98 %
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
14:44	490,0	270,0	107,0	65,0	25,0	10,0	15,0	570,0	380,0	0,436 kg	4 seg	G_s : 22,81 kg/m ² .s
* Repetição												

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 5		Data: 01/04/2022		Hora início: 10:48		Hora fim: 11:18		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Jhon Jairo Ramirez Behainne					
PARÂMETROS CONSTANTES:							VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa					Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:	
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 5,4 m ³ /h		P_a : LS	I_s : 3 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)									Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 2,829 kg		m_s : 0,171 kg	η : 94,30 %
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
10:53	230,0	176,0	93,0	85,0	25,0	12,0	17,0	373,0	210,0	0,304 kg		4,65 seg	G_s : 13,68 kg/m ² .s
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 5*		Data: 01/04/2022		Hora início: 12:01		Hora fim: 12:31		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Jhon Jairo Ramirez Behainne					
PARÂMETROS CONSTANTES:							VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa					Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:	
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 5,4 m ³ /h		P_a : LS	I_s : 3 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)									Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 2,818 kg		m_s : 0,182 kg	η : 93,93 %
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
12:06	220,0	193,0	77,0	52,0	24,0	12,0	17,0	375,0	225,0	0,285 kg		4,32 seg	G_s : 13,81 kg/m ² .s
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRF													
Experimento n°: 6		Data: 01/04/2022		Hora início: 13:49		Hora fim: 14:19		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Jhon Jairo Ramírez Behainne					
PARÂMETROS CONSTANTES:							VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa					Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:	
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 4,75 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS}$	$I_s: 3 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRF (mm H2O)									Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									$m_c: 2,887 \text{ kg}$		$m_s: 0,113 \text{ kg}$	$\eta: 96,23 \%$
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
13:54	220,0	176,0	73,0	52,0	25,0	12,0	16,0	368,0	200,0	0,276 kg		4,2 seg	$G_s: 13,75 \text{ kg/m}^2.\text{s}$
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRF													
Experimento n°: 6*		Data: 01/04/2022		Hora início: 14:38		Hora fim: 15:08		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Jhon Jairo Ramírez Behainne					
PARÂMETROS CONSTANTES:							VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa					Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:	
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 4,75 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS}$	$I_s: 3 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRF (mm H2O)									Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									$m_c: 2,859 \text{ kg}$		$m_s: 0,141 \text{ kg}$	$\eta: 95,30 \%$
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
14:43	225,0	177,0	80,0	52,0	25,0	12,0	17,0	375,0	200,0	0,245 kg		4,3 seg	$G_s: 11,92 \text{ kg/m}^2.\text{s}$
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 7		Data: 25/06/2021		Hora início: 13:45		Hora fim: 14:15		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Jhon Jairo Ramírez Behainne					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:	
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 4,75 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS}$	$I_s: 3 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)								Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:		Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									$m_c: 2,907 \text{ kg}$		$m_s: 0,093 \text{ kg}$	$\eta: 96,90 \%$
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
13:50	215,0	175,0	76,0	50,0	23,0	10,0	15,0	383,0	200,0	0,299 kg		4 seg	$G_s: 15,64 \text{ kg/m}^2.\text{s}$
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 7*		Data: 25/06/2021		Hora início: 14:24		Hora fim: 14:54		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Jhon Jairo Ramírez Behainne					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:	
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 4,10 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS}$	$I_s: 3 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)								Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:		Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									$m_c: 2,904 \text{ kg}$		$m_s: 0,096 \text{ kg}$	$\eta: 95,80 \%$
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
14:29	212,0	160,0	73,0	50,0	22,0	10,0	15,0	364,0	195,0	0,276 kg		4 seg	$G_s: 14,44 \text{ kg/m}^2.\text{s}$
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRF													
Experimento n°: 8		Data: 25/06/2021		Hora início: 15:03		Hora fim: 15:33		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Jhon Jairo Ramirez Behainne					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:	
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 3,40 m ³ /h		P_a : LS	I_s : 3 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 2,959 kg	m_s : 0,041 kg	η : 98,63 %	
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
13:08	205,0	160,0	75,0	46,0	21,0	10,0	15,0	376,0	190,0	0,232 kg	4 seg	G_s : 12,14 kg/m ² .s	
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRF													
Experimento n°: 8*		Data: 25/06/2021		Hora início: 15:42		Hora fim: 14:47		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Jhon Jairo Ramirez Behainne					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:	
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 3,40 m ³ /h		P_a : LS	I_s : 3 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 2,934 kg	m_s : 0,066 kg	η : 97,80 %	
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
14:29	208,0	170,0	72,0	50,0	21,0	11,0	15,0	370,0	200,0	0,281 kg	4 seg	G_s : 14,70 kg/m ² .s	
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF														
Experimento n°: 9		Data: 26/06/20221		Hora início: 08:31		Hora fim: 09:01		Operadores: Andrel de Souza Pecete						
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):								
Material do leito: areia quartzosa						Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 5,4 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS+SP}$		$I_s: 5 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):														
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Tomada de pressão:										$m_c: 4,842 \text{ kg}$		$m_s: 0,158 \text{ kg}$	$\eta: 96,84 \%$	
Horário:	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
08:36	488,0	290,0	120,0	70,0	26,0	10,0	15,0	574,0	380,0	0,470 kg		4 seg	$G_s: 24,59 \text{ kg/m}^2.\text{s}$	
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF														
Experimento n°: 9*		Data: 26/06/20221		Hora início: 09:16		Hora fim: 09:46		Operadores: Andrel de Souza Pecete						
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):								
Material do leito: areia quartzosa						Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 5,4 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS+SP}$		$I_s: 5 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):														
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Tomada de pressão:										$m_c: 4,818 \text{ kg}$		$m_s: 0,182 \text{ kg}$	$\eta: 96,36 \%$	
Horário:	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
09:21	488,0	290,0	106,0	70,0	26,0	11,0	16,0	566,0	380,0	0,449 kg		4,2 seg	$G_s: 23,49 \text{ kg/m}^2.\text{s}$	
* Repetição														

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 10		Data: 26/06/2021		Hora início: 09:59		Hora fim: 10:29		Operadores: Andrel de Souza Pecete					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa						Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 4,75 m ³ /h		P_a : LS+SP	I_s : 5 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,847 kg	m_s : 0,153 kg	η : 96,94 %	
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
10:04	468,0	265,0	106,0	70,0	26,0	11,0	16,0	590,0	390,0	0,401 kg	4 seg	G_s : 20,98 kg/m ² .s	
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 10*		Data: 26/06/2021		Hora início: 10:42		Hora fim: 11:12		Operadores: Andrel de Souza Pecete					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa						Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 4,75 m ³ /h		P_a : LS+SP	I_s : 5 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,836 kg	m_s : 0,164 kg	η : 96,72 %	
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
10:47	469,0	265,0	98,0	68,0	26,0	11,0	16,0	560,0	380,0	0,422 kg	4 seg	G_s : 22,09 kg/m ² .s	
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 11		Data: 28/06/2021		Hora início: 08:16		Hora fim: 08:46		Operadores: Andrel de Souza Pecete					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:	
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 4,10 m ³ /h		P_a : LS+SP	I_s : 5 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,918 kg	m_s : 0,082 kg	η : 98,36 %	
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
08:21	440,0	271,0	109,0	70,0	25,0	10,0	15,0	580,0	380,0	0,490 kg	4 seg	G_s : 25,64 kg/m ² .s	
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 11*		Data: 28/06/2021		Hora início: 09:03		Hora fim: 09:33		Operadores: Andrel de Souza Pecete					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:	
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 4,10 m ³ /h		P_a : LS+SP	I_s : 5 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,914 kg	m_s : 0,086 kg	η : 98,28 %	
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
09:08	460,0	277,0	105,0	68,0	25,0	10,0	15,0	590,0	380,0	0,437 kg	4 seg	G_s : 22,86 kg/m ² .s	
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 12		Data: 28/06/2021		Hora início: 09:48		Hora fim: 10:18		Operadores: Andrel de Souza Pecete					
PARÂMETROS CONSTANTES:							VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:	
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 3,40 m ³ /h		P_a : LS+SP	I_s : 5 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,932 kg	m_s : 0,068 kg	η : 98,64 %	
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
09:53	430,0	290,0	106,0	73,0	26,0	10,0	15,0	575,0	380,0	0,475 kg	4 seg	G_s : 24,85 kg/m ² .s	
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 12*		Data: 28/06/2021		Hora início: 10:30		Hora fim: 11:00		Operadores: Andrel de Souza Pecete					
PARÂMETROS CONSTANTES:							VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:	
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 3,40m ³ /h		P_a : LS+SP	I_s : 5 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 4,914 kg	m_s : 0,086 kg	η : 98,62 %	
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
10:35	393,0	260,0	109,0	70,0	26,0	10,0	15,0	566,0	350,0	0,452 kg	4 seg	G_s : 23,65 kg/m ² .s	
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 13		Data: 26/01/2021		Hora início: 15:04		Hora fim: 15:34		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme Furquim					
PARÂMETROS CONSTANTES:							VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa					Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:	
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 5,4 m ³ /h		P_a : LS+SP	I_s : 3 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)									Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 2,770 kg		m_s : 0,230 kg	η : 92,33 %
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
15:09	202,0	156,0	74,0	48,0	22,0	11,0	15,0	350,0	180,0	0,241 kg		4 seg	G_s : 12,61 kg/m ² .s
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 13*		Data: 26/01/2021		Hora início: 15:46		Hora fim: 16:16		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme Furquim					
PARÂMETROS CONSTANTES:							VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa					Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:	
ρ_s : 2712 kg/m ³		ϕ_s : 0,69		d_p : 162 μ m		u_{fl} : 3,5 m/s		t_e : 30 min		Q_a : 5,4 m ³ /h		P_a : LS+SP	I_s : 3 kg
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)									Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									m_c : 2,788kg		m_s : 0,212 kg	η : 92,93 %
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
15:51	207,0	160,0	68,0	51,0	22,0	11,0	16,0	360,0	185,0	0,44 kg		4 seg	G_s : 12,77 kg/m ² .s
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 14		Data: 26/01/2021		Hora início: 16:24		Hora fim: 16:54		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme Furquim					
PARÂMETROS CONSTANTES:							VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa					Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:	
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 4,75 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS+SP}$	$I_s: 3 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)									Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									$m_c: 2,841 \text{ kg}$		$m_s: 0,159 \text{ kg}$	$\eta: 94,70 \%$
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
16:29	193,0	146,0	64,0	46,0	21,0	11,0	16,0	359,0	180,0	0,247 kg		4 seg	$G_s: 12,92 \text{ kg/m}^2.\text{s}$
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 14*		Data: 26/01/2021		Hora início: 17:07		Hora fim: 17:37		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme Furquim					
PARÂMETROS CONSTANTES:							VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):						
Material do leito: areia quartzosa					Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:	
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 4,75 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS+SP}$	$I_s: 3 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)									Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									$m_c: 2,856 \text{ kg}$		$m_s: 0,144 \text{ kg}$	$\eta: 95,20 \%$
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:		Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:
17:12	194,0	154,0	69,0	47,0	22,0	12,0	16,0	370,0	185,0	0,218 kg		4 seg	$G_s: 11,41 \text{ kg/m}^2.\text{s}$
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 15		Data: 28/06/2021		Hora início: 13:45		Hora fim: 13:15		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme Furquim					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:	
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 4,10 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS+SP}$	$I_s: 3 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)								Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:		Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									$m_c: 2,919 \text{ kg}$	$m_s: 0,081 \text{ kg}$	$\eta: 97,30 \%$	
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
13:50	195,0	153,0	72,0	48,0	22,0	10,0	16,0	382,0	175,0	0,276 kg	4 seg	$G_s: 14,44 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$	
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 15*		Data: 28/06/2021		Hora início: 14:26		Hora fim: 14:56		Operadores: Andrel de Souza Pecete e Guilherme Furquim					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa				Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:		Inventário de sólidos:	
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 4,10 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS+SP}$	$I_s: 3 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)								Massa final de areia coletada pelo ciclone:		Massa de areia que saiu da UFRAF:		Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:									$m_c: 2,909 \text{ kg}$	$m_s: 0,091 \text{ kg}$	$\eta: 96,97 \%$	
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
14:31	186,0	142,0	63,0	44,0	21,0	10,0	16,0	383,0	180,0	0,248 kg	4 seg	$G_s: 12,98 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$	
* Repetição													

DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 16		Data: 28/06/2021		Hora início: 15:04		Hora fim: 15:34		Operadores: Andrel de Souza Pecete					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa						Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 3,40 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS+SP}$	$I_s: 3 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:										$m_c: 2,958 \text{ kg}$	$m_s: 0,042 \text{ kg}$	$\eta: 98,60 \%$
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
15:09	140,0	105,0	55,0	41,0	21,0	10,0	15,0	330,0	140,0	0,181 kg	4 seg	$G_s: 9,47 \text{ kg/m}^2.\text{s}$	
DADOS EXPERIMENTAIS DETALHADOS EM UNIDADE DE FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA A FRIO - UFRAF													
Experimento n°: 16*		Data: 28/06/2021		Hora início: 15:42		Hora fim: 16:12		Operadores: Andrel de Souza Pecete					
PARÂMETROS CONSTANTES:						VARIÁVEIS CONTROLADAS (PARÂMETROS DE ENTRADA):							
Material do leito: areia quartzosa						Velocidade de fluidização:		Tempo de experimento:		Vazão da aeração:		Posição da aeração:	Inventário de sólidos:
$\rho_s: 2712 \text{ kg/m}^3$		$\phi_s: 0,69$		$d_p: 162 \mu\text{m}$		$u_{fl}: 3,5 \text{ m/s}$		$t_e: 30 \text{ min}$		$Q_a: 3,40 \text{ m}^3/\text{h}$		$P_a: \text{LS+SP}$	$I_s: 3 \text{ kg}$
VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS (PARÂMETROS DE SAÍDA):													
Pressão estática medida no circuito de fluidização da UFRAF (mm H2O)										Massa final de areia coletada pelo ciclone:	Massa de areia que saiu da UFRAF:	Eficiência total de separação do ciclone:	
Horário:	Tomada de pressão:										$m_c: 2,978 \text{ kg}$	$m_s: 0,022 \text{ kg}$	$\eta: 99,27 \%$
	RI-1	RI-2	RI-3	RI-4	CI-E	CI-S	SP-1	LS-A	LS-R	Massa de areia no amostrador:	Tempo de amostragem:	Fluxo de recirculação dos sólidos:	
15:47	138,0	110,0	58,0	49,0	21,0	11,0	17,0	333,0	136,0	0,204 kg	4 seg	$G_s: 10,67 \text{ kg/m}^2.\text{s}$	
* Repetição													