



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Estudo de desempenho e avaliação para melhorias de um ciclone para remoção de finos em um processo petroquímico

Autor: Isabelle Ricardo Alves

Orientador: Liliana Amaral Feris

Coorientador: Keila Guerra Pacheco Nunes

Porto Alegre, outubro de 2022

Autora: Isabelle Ricardo Alves

Estudo do desempenho e avaliação de melhorias de um ciclone para remoção de finos em um processo petroquímico

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do
Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química*

Coorientador: Keila Guerra Pacheco Nunes

Coorientadora: Keila Guerra Pacheco Nunes

Banca Examinadora:

Professor Pedro Juarez Melo, UFRGS

Doutoranda Julia Toffoli de Oliveira, UFRGS

Porto Alegre

2022

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Lillana Amaral Feris e a minha coorientadora Keila Guerra Pacheco Nunes pela orientação, conhecimentos repassados e tempo dedicado ao trabalho.

Aos meus colegas e amigos, pela amizade e por tornarem esses anos de faculdade mais fáceis e divertidos, sem eles tudo seria mais difícil.

À minha família, pelo apoio e incentivo constante durante minha trajetória acadêmica, que mesmo de longe ajudaram a me manter motivada em relação aos estudos.

E à minha líder do estágio, Lisandra Silveira, pela colaboração, disponibilidade e ensinamentos.

RESUMO

Ciclones são equipamentos utilizados para separar misturas heterogêneas, como uma corrente sólido-gás. A separação dos materiais ocorre a partir da força centrífuga que promove um caminho espiralado jogando as partículas sólidas para a parede e direcionando o gás para o topo do equipamento. O objetivo deste trabalho foi avaliar a performance e identificar melhorias em dois ciclones localizados em plantas petroquímicas. Os equipamentos estudados demonstraram cenários de obstrução no fundo e arraste de sólidos pelo topo, levando a presença de partículas finas nos equipamentos a jusante dos ciclones. Para avaliação, foi realizada amostragem granulométrica com o objetivo de verificar o tamanho das partículas que adentram os equipamentos, também foi verificado a velocidade de arraste das partículas, bem como a velocidade mínima de fluidização. Ainda, determinou-se a eficiência de coleta com base nas equações de Lapple. A eficiência de coleta individual dos equipamentos indicou boa performance para partículas de 74 μm , entretanto a experiência na planta indica arraste de finos na área, por isso verificou-se, através de amostra acumulada no fundo do ciclone por 1 hora, uma eficiência global de 75%. Com base nos testes realizados na planta e a eficiência global estimada, verificou-se que os ciclones arrastam mais sólidos do que o projetado originalmente. Isso está relacionado com o fato de a geometria dos equipamentos não estar adequada e desrespeita as restrições para impedir arraste direto das partículas junto ao gás. Além disso, a velocidade de entrada e carga de sólidos foi reduzida desde a partida das plantas, afetando a força centrífuga que promove a separação sólido-gás.

Palavras-chave: ciclone, eficiência de coleta, arraste de sólidos, granulometria.

ABSTRACT

Cyclones are equipment used to separate heterogeneous mixed, such as a solid-gas stream. The separation of materials occurs from the centrifugal force that promotes a spiral path throwing particles to the wall and directing the gas to the top of the equipment. The objective of this work is to evaluate the performance and identify improvements in two cyclones plants used in petrochemical plants. The equipment studied showed scenarios of obstruction at the bottom and dragging of solids from the top, leading to the presence of fine particles in the equipment downstream of the cyclones. For evaluation, granulometric samples was realized with the objective of check particles size that enter the equipment. The drag velocity of the particles was also verified, as well as the minimum fluidization velocity. Furthermore, the collection efficiency was determined based on the Lapple models. The partial collection efficiency indicates good performance to particles of 74 μm , however the plant experience shows fines drag in the area, through the sample test accumulated for 1-hour in the cyclone bottom, it was possible to verify a global efficiency of 75%. Based on the plant testes and the estimated global efficiency, cyclones have been dragging more particles to the top than originally projected. This is related to the fact that the geometry of the equipment is not adequate, and it is disrespecting restrictions to prevent direct dragging of particles along with the gas. In addition, the inlet velocity and solids loading were reduced since the plants started, affecting the centrifugal force that promotes solid-gas separation.

Keywords: *cyclones, collection efficiency, solids dragging, granulometric.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Fluxograma simplificado do processo produtivo do polímero.	13
Figura 2. Esquema representando as dimensões geométricas de um ciclone convencional.	16
Figura 3. Predição da eficiência de coleta global, mantendo constante a concentração de sólidos, variando a vazão de gás na entrada.....	17
Figura 4. Fluxograma simplificado do esquema do processo de vaporização de hidrocarbonetos e secagem do polímero	19
Figura 5. Distribuição granulométrica do produto PEAD 1, PEAD 2 e PEAD 3.....	27
Figura 6. Curvas de velocidade mínima de fluidização e arraste.....	30
Figura 7. Previsão de eficiência variando a densidade de partícula (ρ_s).	32
Figura 8. Predição da eficiência do ciclone de acordo com a velocidade de entrada.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades dos polímeros de alta densidade (PEAD), baixa densidade (PEBD) e baixa densidade linear (PEBDL).	12
Tabela 2. Relação entre as demais dimensões do ciclone e o diâmetro interno do cilindro para as famílias Lapple, Stairmand e Americano.	16
Tabela 3. Peneiras da série Tyler usadas para determinadas a granulometria das amostras coletadas.	20
Tabela 4. Comportamento da velocidade do gás no interior do cilindro e na zona expandida do secador D-2.	29
Tabela 5. Quantidade de sólidos abatidos pelo ciclone.	29
Tabela 6. Determinação da eficiência do ciclone CI 2 para operação com diferentes granulometrias na POLI 1.	31
Tabela 7 . Determinação da eficiência do ciclone CI 2 para diferentes condições para POLI 2.	32
Tabela 8. Dados de projeto e de operação de queda de pressão nas plantas POLI 1 e POLI 2 no ciclone CI 2.	34
Tabela 9. Dados de projeto e de operação da velocidade de salto nas plantas POLI 1 e POLI 2, no ciclone CI-2.	34
Tabela 10. Projeção de velocidade do <i>underflow</i> e <i>overflow</i> dos ciclones.	36
Tabela 11. Relações geométricas do ciclone CI-2 frente as proporções das famílias Lapple e Stairmand.	36
Tabela 12. Relações das restrições geométricas dos ciclones segundo literatura.	37

SUMÁRIO

1	Introdução	9
1.1	Objetivo:	10
1.1.1	Objetivos específicos	10
2	Revisão Bibliográfica	11
2.1	Polímeros	11
2.2	Processo de produção de polímeros	12
2.3	Granulometria das partículas	13
2.3.1	Peneiramento	13
2.3.2	O ajuste de distribuição granulométrica de Rosin-Rammeler-Bennet (RRB)	14
2.3.3	O ajuste de distribuição granulométrica de Gates-Gaudin-Schumann (GGS)	14
2.4	Ciclone	15
2.4.1	Família de ciclones	16
2.4.2	Eficiência de coleta	17
2.4.3	Perda de carga	17
3	Formulação do Problema ou Estudo de Caso	18
4	Materiais e Métodos	20
4.1	Plano de amostragem granulométrica	20
4.2	Cálculo das velocidades do gás e de partícula	20
4.2.1	Velocidade do secador D-2	21
4.2.2	Velocidade mínima de fluidização	21
4.2.3	Velocidade de arraste	22
4.2.4	Velocidade de entrada do gás	23
4.2.5	Velocidade de salto	23
4.3	Eficiência de ciclone e diâmetro de corte	24
4.4	Fluxo de entrada	25
4.5	Perda de carga	25
5	Resultados e discussão	27
5.1	Distribuição granulométrica	27
5.2	Velocidade de arraste/terminal e fluidização do secador D-2.	28
5.3	Comparativo de dados de projeto e condições de operação	31
5.3.1	Densidade da partícula	32
5.3.2	Velocidade de entrada do gás e perda de carga	33
5.3.3	Critério de velocidade de salto	34
5.3.4	Carga e granulometria de sólidos	35
5.3.5	Design do equipamento	36
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	38
	REFERÊNCIAS	40

1 Introdução

Ciclones são equipamentos de baixo custo e necessitam de pouca manutenção, são comumente usados na indústria petroquímica, metalúrgica e ambiental para separação em duas fases de misturas gás-sólido. Shepherd e Lapple (1940) desenvolveram correlações empíricas para determinar o projeto dos ciclones utilizando ciclones de vidro que possibilitavam a visualização do escoamento no interior do equipamento. As equações de projeto desenvolvidas podem determinar a eficiência de coleta, que mede a capacidade de separação, e a queda de pressão, que determina o consumo de energia (BABAĞLU et al., 2021). O principal parâmetro relacionado a eficiência é o diâmetro de corte, que representa o ponto em que 50% da amostra é coletada.

A geometria do equipamento consiste em uma parte cilíndrica e outra cônica, possuindo uma entrada e duas saídas. O fluxo de gás contendo sólidos entra tangencialmente pelo equipamento, sendo separado em duas fases: gasosa e sólida. O gás é enviado para o topo do equipamento, designado *overflow*, enquanto os sólidos são direcionados para o fundo, chamado de *underflow*. Os parâmetros geométricos dos equipamentos podem ser determinados através de proporções em relação ao diâmetro classificadas por famílias, como Lapple, Stairmand e Americano.

Idealmente, a quantidade de sólido arrastada pelo gás de topo do ciclone deveria ser ínfima, porém, em análises realizadas nos ciclones (CI-2) avaliados nesse trabalho, a separação de partículas de polímero do gás indica o contrário. Esses ciclones estão localizados em duas plantas de produção de polietileno pertencentes a empresa petroquímica, nomeadas POLI 1 e POLI 2, em que são produzidos polímeros PEDBL e PEAD. O PEAD possui maior densidade o que provoca uma redução na resistência ao impacto, isso faz com que as partículas dessa resina sejam menores que o PEDBL, piorando o problema de abatimento.

O processo em que os equipamentos estão localizados é utilizado para secagem do polímero com nitrogênio em um vaso fluidizado (D-2), após vaporização para remoção de hidrocarbonetos. Uma amostra da vazão total de polímero é arrastada junto ao nitrogênio para o ciclone que separa as partículas do gás. Esse gás contendo residual sólido é enviado para equipamentos a jusante afim de recuperá-lo de volta para o processo de secagem. Nos últimos anos, esses ciclones apresentaram problemas de abatimento de sólidos, levando a obstruções que resultaram em paradas de planta.

Para avaliação do problema foram realizados plano de amostragem granulométrica, determinação de velocidades e mapeamento dos pontos que podem interferir na eficiência dos

ciclones. Os dados de operação atuais foram comparados com as condições determinadas no projeto. Devido ao processo em questão ser sigiloso, todos os dados aqui apresentados foram normalizados.

1.1 Objetivo:

O objetivo desse trabalho foi avaliar a performance e identificar melhorias de dois ciclones utilizados para remoção de finos em uma área de secagem de polímeros em uma indústria petroquímica, a fim de aprimorar sua eficiência de coleta e reduzir o arraste de finos para os equipamentos localizados a jusante.

1.1.1 Objetivos específicos

1. Determinar a granulometria da partícula de entrada e saída dos ciclones;
2. Determinar a velocidade de arraste e mínima de fluidização das partículas dentro do secador, para visualização da quantidade de sólidos arrastada para o ciclone;
3. Comparar as condições operacionais atuais com as originais de projeto, visando identificar pontos de melhoria;
4. Analisar comparativamente as proporções geométricas das famílias de ciclone, visando identificar melhorias no projeto do equipamento estudado;
5. Descrever e analisar os pontos que podem impactar a eficiência de operação do ciclone.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados alguns assuntos para entendimento do trabalho, tais como o funcionamento dos ciclones, a granulometria das partículas, o processo em que estão localizados os equipamentos e o problema que motivou o desenvolvimento do estudo.

2.1 Polímeros

Polímeros são moléculas formadas por longas cadeias de carbono, entre eles o polietileno, gerado a partir do eteno. O polietileno é um polímero parcialmente cristalino e flexível, sendo um dos mais utilizados na indústria petroquímica para produção de embalagens, sacos plásticos, revestimentos (SAVINI, 2019).

O polietileno pode ser fabricado a partir de diversas tecnologias, entre elas, utilizando o catalisador Ziegler-Natta. O sistema catalítico Ziegler-Natta baseia-se na combinação de tetracloreto de titânio ($TiCl_4$) pré-catalisado com dialquilcloroaluminio para formar um sítio ativo de titânio (Ti^{3+}). Tal processo pode ser utilizado para formar uma ampla variedade de produtos, entre eles polietileno de baixa densidade linear (PEBDL), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno de alta densidade (PEAD) (BOSSERS et. al, 2021).

A primeira tentativa de síntese a partir do catalisador Ziegler-Natta gerou pouquíssimas ramificações, resultando em um polímero altamente cristalino, conhecido como PEAD, para a formação de PEBDL adicionou-se comonômeros, como buteno e hexeno, a fim de gerar ramificações na cadeia de carbono e alterar sua densidade (BITTENCOURT, 2010). A Tabela 1 mostra as propriedades dos diferentes tipos de polímeros.

Tabela 1. Propriedades dos polímeros de alta densidade (PEAD), baixa densidade (PEBD) e baixa densidade linear (PEBDL).

Propriedades	PEAD	PEBD	PEBDL
Densidade (g/cm ³)	0,94 – 0,97	0,91 – 0,94	0,90 – 0,94
Grau de cristalinidade (%)	62 - 82	42 - 62	34 - 62
Grau de cristalinidade (% calorimetria)	55 - 77	30 - 54	22 - 55
Módulo de flexão (psi)	145 - 225	35 - 48	40 - 160
Módulo de tensão (psi)	115 - 200	250 - 500	38 - 130
Resistência à ruptura (psi)	2,6 – 4,5	1,3 – 2,8	1,1 – 2,8
Dureza Shore tipo D	66 – 73	44 - 50	55 - 70
Resistência ao impacto	0,4 – 4,0	Não rompe	0,35 – não rompe
Temperatura de fusão (°C)	125 – 132	98 - 115	100 - 115
Calor de fusão (cal/g)	38 - 53	21 - 37	15 - 43

Fonte: Adaptado de Peacock, 2000.

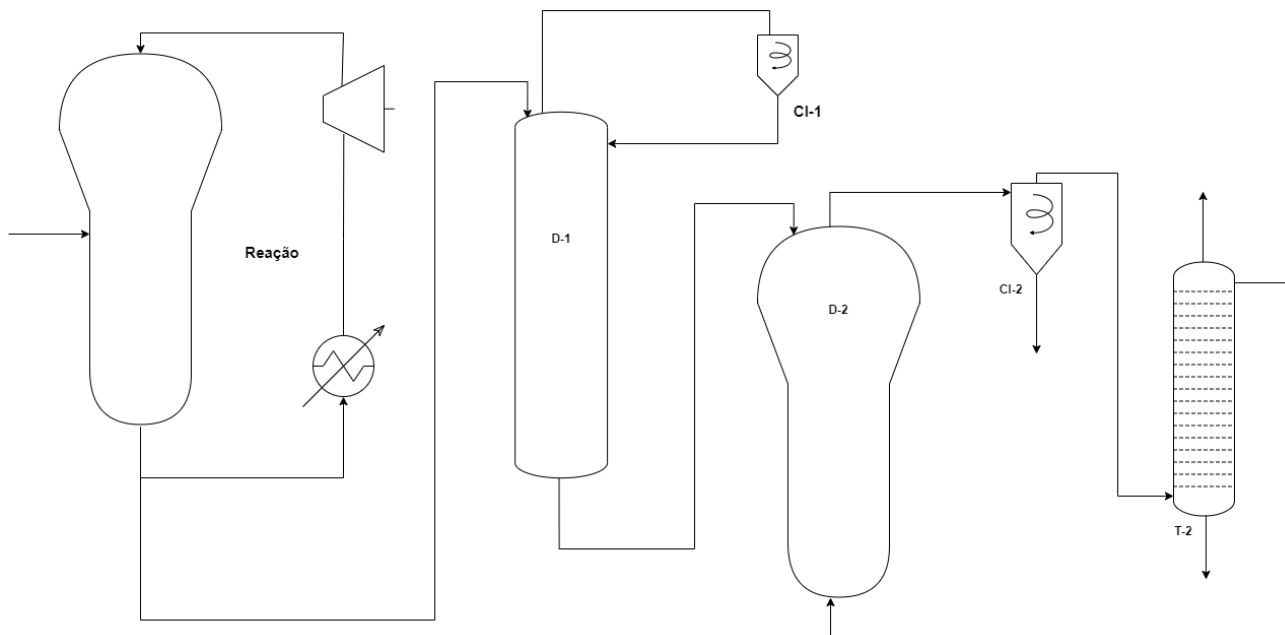
O PEAD possui maior cristalinidade em relação aos outros tipos de polietileno, já que sua cadeia polimérica é menos ramificada e com ramificações mais curtas, com isso permite maior aproximação entre as cadeias e formação da fase cristalina. A rigidez, a resistência a tração, a viscosidade e a contração aumentam com o aumento da densidade. Por outro lado, a resistência ao impacto diminui com o aumento de densidade, por isso ao comparar com PEBDL verifica-se menor granulometria em PEAD (COUTINHO, MELLO e SANTA MARIA, 2003).

2.2 Processo de produção de polímeros

A produção de polímero exige uma série de operações unitárias que são realizadas a depender do processo produtivo empregado. Entre elas, tem-se o emprego de reator fase gás, que consiste em um sistema circular com reator, trocador e compressor. O produto é descarregado do reator e enviado para um vaporizador (D-1), em que o polímero é lavado com vapor d'água em contracorrente para remoção de hidrocarbonetos, o vapor é enviado para o topo do vaporizador e arrasta um percentual de polímero que será separado no CI-1. A etapa de lavagem de hidrocarbonetos é empregada para evitar a presença de material inflamável na extrusão do processo. O polímero úmido flui para um vaso fluidizado em contracorrente com nitrogênio a fim de secar o produto e enviar para etapa de aditivação (GUARITA, 2005). A corrente de topo do secador (D-2) é enviada para um ciclone (CI-2) a fim de separar o gás das partículas arrastadas de polímero. O residual de polímero é enviado para a etapa de extrusão e silagem ou diretamente para caixas localizada abaixo do ciclone. O gás

contendo água e finos é direcionado para uma torre lavadora (T-2) a fim de recuperá-lo e enviá-lo de volta ao processo. O fluxograma simplificado do processo pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 : Fluxograma simplificado do processo produtivo do polímero.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

2.3 Granulometria das partículas

O produto gerado no processo em questão pode ser tanto o PEBDL ou PEAD, esse último tem maior geração de finos por se tratar de uma resina com maior densidade, o que provoca menor resistência ao impacto. Essas partículas menores acabam por serem arrastadas do reator para a área de desativação de secagem do polímero, causando obstruções na unidade.

Para determinação das partículas de uma amostra existem os métodos de ajuste de Rosin-Rammeler-Bennet (RRB) e o de Gates-Gaudin-Schumann (GGs). Entretanto o método mais comum para determinação da granulometria das partículas é o peneiramento, que permite classificar a amostra pelo diâmetro da partícula (SOUZA, 2022).

2.3.1 Peneiramento

O padrão de peneiras mais conhecido é a série Tyler que é adotado pela norma ASTM E-11-61. No Brasil, utiliza-se a norma ABNT NBR ISO 3310 – 1: 2010 (PEÇANHA, 2014).

As peneiras da série de Tyler são classificadas pela ordem do *mesh*, que representa o número de aberturas da malha por polegada linear. Quanto maior o número de *mesh*, menor o diâmetro da malha. O processo é empírico e consiste na alocação das peneiras de menor para maior *mesh* e ao fundo insere-se uma peneira de malha fechada. Através da fração retida em cada peneira determina-se o tamanho da partícula e a distribuição granulométrica (COSTA, 2014).

2.3.2 O ajuste de distribuição granulométrica de Rosin-Rammeler-Bennet (RRB)

O ajuste de Rosin-Rammeler-Bennet é um dos mais populares modelos estatísticos de distribuição granulométrica. Segundo Alderliesten (2013), a equação do ajuste pode ser determinada pelo diâmetro da partícula (d) e a fração das partículas com diâmetro menor que (d), conforme equação (1):

$$X = 1 - \exp\left(-\left(\frac{d}{d'}\right)^n\right) \quad (1)$$

Em que:

X : fração em massa ou volume de partículas com tamanho menor que D

d : tamanho da partícula (m)

d' : tamanho da partícula com uma fração volumétrica de 0,368 (m)

n = parâmetro de dispersão da distribuição ($n > 0$)

2.3.3 O ajuste de distribuição granulométrica de Gates-Gaudin-Schumann (GGS)

Outro modelo estatístico bastante popular é o de Gates-Gaudin-Schumann (GGS), é utilizado na indústria desde 1940. Segundo Vítěz e Travníček (2014), o modelo é determinado pela equação (2):

$$f(d) = \frac{d^m}{d_{m\acute{a}x}} \quad (2)$$

Em que:

$f(d)$: fração com partículas menores que d

d : diâmetro da partícula (m)

$d_{m\acute{a}x}$: tamanho máximo das partículas contidas na amostra (m)

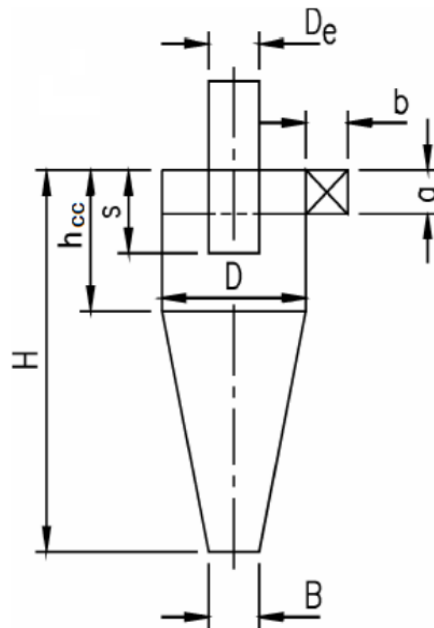
m : módulo da distribuição

2.4 Ciclone

Ciclones são utilizados para separação de partículas sólidas de uma corrente de gás e podem ser aplicados em diferentes processos, como na indústria química, metalúrgica e na área ambiental (LACERDA, 2007). Seu nome é designado devido ao escoamento radial no interior do equipamento semelhante ao observado no fenômeno natural de mesmo nome. Segundo Dziubak (2021), ciclones tem muitas vantagens em relação a outros equipamentos de purificação, tais como: baixo custo de operação, possibilidade de operar em alta temperatura e pressão e alto rendimento, que consiste em separar uma fração grande quantidade de sólido de um fluxo alto de gás. Entretanto, também possui desvantagens como: a perda de eficiência no caso de falta de estanqueidade do equipamento, aumento da perda de carga com o aumento da velocidade de entrada e baixa eficiência de coleta com granulometria menor que 10 μm .

O equipamento consiste em um vaso composto por uma entrada e duas saídas, seu corpo é formado por uma parte cilíndrica e outra cônica. A corrente sólido-gás é introduzida tangencialmente no topo do ciclone formando o campo centrífugo, assim a partícula se desloca radialmente através de um movimento do tipo espiral (PEÇANHA, 2014). Pela ação da força centrífuga as partículas são deslocadas para parede e coletadas ao fundo do ciclone. No interior do ciclone, o gás inicia o movimento com alta velocidade e turbulência. Essa turbulência conduz a um movimento giratório com fluxo reverso, enviando o gás para o topo do equipamento (LACERDA, 2007). O gás que sai pelo topo deve possuir uma quantidade residual mínima de partículas sólidas, geralmente determinada pela eficiência do ciclone.

A Figura 2 mostra o esquema de um ciclone com as principais dimensões geométricas para seu equacionamento, são elas: diâmetro da parte cilíndrica (D), diâmetro do duto de saída do gás (D_e), altura do duto de saída do gás, ou *vórtex finder*, dentro do ciclone (S), altura do corpo cilíndrico (h_{cc}), altura do ciclone (H), diâmetro do fundo da seção cônica (B), altura do duto de entrada da alimentação (a), largura do duto de entrada da alimentação (b).

Figura 2. Esquema representando as dimensões geométricas de um ciclone convencional.

Fonte: Junior, 2016

2.4.1 Família de ciclones

Como os ciclones são compostos por diversas dimensões surgiram algumas famílias de ciclones seguindo certas proporções geométricas. A Tabela 2 mostra as relações geométricas para as famílias com maior número de citações na literatura, Lapple, Stairmand e Americano.

Tabela 2. Relação entre as demais dimensões do ciclone e o diâmetro interno do cilindro para as famílias Lapple, Stairmand e Americano.

Dimensão	Lapple	Stairmand	Americano
D	1,00	1,00	4,20
De	0,500	0,500	1,90
S	0,625	0,560	3,00
hcc	2,00	1,50	3,20
H	4,00	4,00	6,70
a	0,500	0,500	-
b	0,250	0,200	-
B	0,250	0,375	-

Fonte: Adaptado de Junior, 2016

Nota-se que, ao contrário da família de ciclones Lapple e Stairmand, o dimensionamento de ciclones do tipo americano baseia-se no diâmetro do duto de entrada (D_e) do equipamento, enquanto as outras, no diâmetro da seção cilíndrica (D). Segundo Lapple (1951), para determinar o

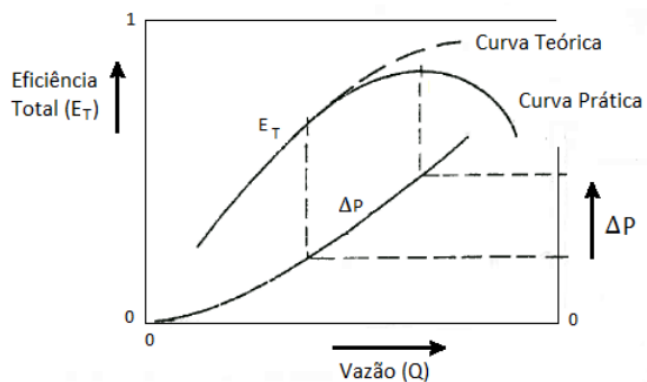
desempenho de ciclones avalia-se desempenho de coleta global, a eficiência de coleta parcial e a perda de carga.

2.4.2 Eficiência de coleta

A eficiência de separação é determinada pelas condições de operação, a geometrias do ciclone e as propriedades físicas do material sólido (NUNES et. al, 2020). A eficiência de coleta global fornece a razão entre a vazão coletada no *underflow* e a vazão total de sólidos, enquanto a eficiência de coleta parcial mostra a capacidade de separação a partir do tamanho das partículas.

Segundo Svarovsky (1981), maior vazão de gás acarreta maior intensidade no campo centrífugo, aumentando a eficiência de coleta. A Figura 3 mostra a curva teórica de predição da eficiência que aumenta até um ponto máximo no qual, a partir dali, passa a diminuir. Isso ocorre devido ao aumento da turbulência acarretando a reentrada das partículas coletadas de volta para o corpo do ciclone (BOF, 2018).

Figura 3. Predição da eficiência de coleta global, mantendo constante a concentração de sólidos, variando a vazão de gás na entrada.



Fonte: Adaptado de Svarovsky, 1981

2.4.3 Perda de carga

A perda de carga em um ciclone se refere a soma das pressões estática e dinâmica e possui três contribuições principais: perda de carga na entrada, perda de carga no corpo do ciclone e perda de carga no duto de saída do gás (BOF, 2018). As perdas no corpo do ciclone ocorrem principalmente devido a fricção, enquanto as da entrada podem ser desprezadas. E as perdas no duto de saída do gás são as mais significativas (HOFFMANN e STEIN, 2008).

3 Formulação do Problema ou Estudo de Caso

O polímero é enviado para a área em que estão localizados os ciclones para remoção dos hidrocarbonetos e secagem de polímero. O vaporizador, D1, é responsável pela vaporização dos hidrocarbonetos presentes no polímero. Na sua saída encontra-se o ciclone, CI-1, responsável por recircular as partículas finas de polímero de volta para o equipamento. Após a passagem pelo vaporizador o polímero úmido é enviado para o secador, D-2, onde é seco em contracorrente com nitrogênio aquecido. No secador D-2, o polímero faz um caminho espiralado, conduzido pelos vertedouros internos do secador, e o nitrogênio aquecido gera um leito fluido de polímero removendo a água. Após secagem, o nitrogênio contendo pó remanescente, é enviado para o ciclone, CI-2, localizado no topo do secador D-2. Este separa o gás das partículas e envia o nitrogênio para a torre lavadora, T-2 que possui um processo de reciclo com filtro autolimpante, F-2, e trocador de placas, E-2. Esse processo é realizado em duas plantas de produção de polietileno, nomeadas POLI 1 e POLI 2. O esquema simplificado do processo pode ser visualizado na Figura 4.

Nos últimos anos ocorreram diversos cenários de obstrução no fundo do CI-1 na POLI 1. Devido a estas obstruções, ocorre passagem de pó do vaporizador para a torre lavadora de hidrocarbonetos, T-1. Esse pó obstruiu as tomadas de controle de nível e a ineficiência deste controle leva ao esgotamento do nível de fundo da torre, podendo ocorrer passagem de hidrocarbonetos para atmosfera, levando a um evento de classificado como de alto risco.

Para controlar a obstrução no fundo do CI-2 é realizado o desvio do fundo do equipamento para *big bag*, onde em operação normal o pó é enviado de volta para o processo. Esse desvio é realizado para facilitar a desobstrução na linha da rotativa localizada no fundo do equipamento, pois ocorre geração de ponte nesse ponto. Com o acúmulo de polímero no fundo do ciclone, a ineficiência de abatimento aumenta e os finos começam a ser arrastados para os equipamentos a jusante. Com a obstrução da torre lavadora (T-2), do filtro autolimpante (F-2) e do trocador de placas (E-2), o F-2 aumenta o ciclo de limpeza, gerando maior vazão de efluentes e o E-2 perde eficiência de troca térmica, aumentando necessidade de parada para limpeza. O principal problema da geração de efluentes, além do desperdício de água, é que as águas residuais de contato com polímero possuem alta viscosidade, o que pode resultar em suspensões sólidas (SUN et al., 2020). Devido a isso, essas águas precisam ser tratadas antes de serem reutilizadas ou descartadas para o meio ambiente (LIU et al., 2018).

4 Materiais e Métodos

O presente trabalho consiste no estudo do desempenho e avaliação de melhorias do ciclone CI-2 em ambas as plantas POLI 1 e POLI 2. Para tal, foram percorridos os seguintes passos: plano de amostragem granulométrica, determinação das velocidades do gás e de partícula e eficiência de coleta e cálculo da perda de carga do equipamento.

4.1 Plano de amostragem granulométrica

O plano de amostragem foi realizado levando em conta três pontos: entrada do vaporizador de hidrocarbonetos D-1, fundo do secador D-2 e fundo do CI-2. As coletas foram realizadas durante estabilidade da planta e carga plena. As amostras foram levadas para o laboratório de análises químicas para peneiramento nas peneiras de série de Tyler conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3. Peneiras da série Tyler usadas para determinadas a granulometria das amostras coletadas.

Mesh	Projeto		POLI 1	POLI 2
	ASTM (μm)	Tyler Standard (μm)	Mesh	Mesh
5	4000	3962	5	-
7	2830	2794	7	-
10	2000	1651	10	10
18	1000		18	18
35	500	417	35	35
80	177	175	80	80
150		104	200	200
200	74	74	230	230
270	53	53	270	270
Fundo	<37 ou 44	<38 ou 43	Fundo	Fundo

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Durante o mesmo período de coleta das amostras, a operação desviou o fundo do ciclone CI-2 para *big bag*, acumulando polímero durante 1 hora para determinar a vazão do *underflow*. O *overflow* do ciclone não é possível coletar devido à falta de disponibilidade para manobra na planta. Esse procedimento foi realizado na POLI 1 e na POLI 2.

4.2 Cálculo das velocidades do gás e de partícula

Visando verificar a quantidade arrastada de polímero do secador para o ciclone, foram determinadas as velocidades de arraste e fluidização da partícula, além da velocidade do gás no corpo e zona expandida do secador.

4.2.1 Velocidade no secador D-2

O secador possui em seu interior um duto vertedouro que conduz o polímero por um caminho espiralado. A velocidade do nitrogênio no interior do secador foi determinada através da equação (3):

$$v_{D-2} = \frac{4Q_{N_2}}{\pi\rho(D_{D-2}^2 - d_{D-2}^2)} \quad (3)$$

Em que

Q_{N_2} : Vazão de nitrogênio no interior do equipamento ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

D_{D-2} : diâmetro do cilindro do secador D – 2 (m)

d_{D-2} : diâmetro do duto vertedouro no interior do secador D – 2 (m)

ρ : massa específica do gás ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

O equipamento possui uma zona expandida para evitar arraste exagerado de partículas para o ciclone, a velocidade nessa seção é calculada pela equação (4):

$$v_{Z_{D-2}} = \frac{4Q_{N_2}}{\pi\rho(D_{Z_{D-2}}^2)} \quad (4)$$

Em que $D_{Z_{D-2}}$: diâmetro da zona expandida do secador D – 2 (m).

4.2.2 Velocidade mínima de fluidização

A velocidade mínima de fluidização é a mínima necessária para levantar as partículas sem arraste, pode ser determinada pelo número de Reynolds conforme mostra a equação (5):

$$umf = \frac{R_{e,mf}\mu}{\rho d} \quad (5)$$

Em que d é o diâmetro da partícula e $R_{e,mf}$ é determinado pela equação (6), para partículas finas em regime turbulento:

$$R_{e,mf} = -33,95 + [33,95^2 + 0,0465Ar]^{1/2} \quad (6)$$

E Ar , número de Arquimedes, que representa o movimento de um corpo em um fluido, é encontrado através da equação (7)

$$Ar = \frac{9,8d^3\rho(\rho_s - \rho)}{\mu^2} \quad (7)$$

Em que:

ρ_s e ρ : massa específica da partícula e do gás ($\frac{kg}{m^3}$)

μ : viscosidade do gás (Pa.s)

4.2.3 Velocidade de arraste

A velocidade de arraste das partículas no interior do secador D-2 foi determinada utilizando o conceito de velocidade terminal, que é a velocidade máxima e constante que um corpo pode atingir. Segundo Haider and Levenspiel (1988), é possível determinar a velocidade terminal das partículas através da equação (8):

$$u_t = u^* \left[\frac{g\mu(\rho_s - \rho)}{\rho^2} \right]^{1/3} \quad (8)$$

Em que:

u_t : velocidade terminal ($\frac{m}{s}$)

u^* : parâmetro adimensional da velocidade terminal

g : aceleração da gravidade ($\frac{m}{s^2}$)

Ainda segundo Haider and Levenspiel (1988), u^* é determinado pela equação (9) para partículas com esfericidade $\phi = 1$:

$$u^* = \frac{18}{d_*^2} + \frac{0,591}{d_*^{0,5}} \quad (9)$$

Em que d_* se refere a um parâmetro adimensional de diâmetro de partícula determinado pela equação (10):

$$d_* = d \left[\frac{g\rho(\rho_s - \rho)}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (10)$$

Onde d se refere ao diâmetro da partícula.

4.2.4 Velocidade de entrada do gás

A velocidade de entrada do gás é determinada a partir da vazão de nitrogênio e a área da seção de entrada. A grandeza é determinada pela equação (11):

$$v_e = \frac{Q_{N_2}}{\rho ab} \quad (11)$$

Em que:

Q_{N_2} : Vazão de nitrogênio no interior do equipamento ($\frac{kg}{s}$)

a : altura do duto de entrada da alimentação do ciclone (m)

b : largura do duto de entrada da alimentação do ciclone (m)

ρ : massa específica do gás ($\frac{kg}{m^3}$)

4.2.5 Velocidade de salto

De acordo com Kalen e Zenz (1984), existe uma velocidade de entrada a partir da qual a eficiência começa a diminuir, determinada velocidade de salto. A velocidade de salto é aquela próxima a parede do ciclone que faz com que as partículas coletadas retornem para o fluxo de gás, sendo enviadas radialmente em direção ao *vórtex finder*, saindo da região de ação da força centrífuga (HUSSEIN et al., 2020). Essa velocidade pode ser determinada através da equação (12):

$$V_s = 4,912 \left(\frac{4g\mu\rho_s}{3\rho} \right)^{1/3} \left[\frac{\left(\frac{b}{D} \right)^{0,4}}{1 - \left(\frac{b}{D} \right)^{1/3}} \right] D^{0,0067} v_e^{2/3} \quad (12)$$

V_s : Velocidade de salto das partículas ($\frac{m}{s}$)

v_e : velocidade de entrada do gás ($\frac{m}{s}$)

D : diâmetro do cilindro do ciclone (m)

b : largura do duto de entrada da alimentação (m)

4.3 Eficiência de ciclone e diâmetro de corte

O diâmetro de corte é o tamanho em que 50% das partículas são coletadas. A expressão utilizada para determinação da grandeza (LAPPLE, 1951) é apresentada na equação (13):

$$Dp50 = \frac{9\mu b}{2\pi N e v_e (\rho_s - \rho)} \quad (13)$$

Em que:

$Dp50$: diâmetro de corte (m)

N_e : número de voltas no gás no interior do ciclone

v_e : velocidade de entrada do gás ($\frac{m}{s}$)

Segundo Shepherd e Lapple (1951), o número de voltas que uma partícula percorre no interior do ciclone depende da geometria do equipamento. A equação (14) determina a grandeza:

$$N_e = \frac{\left[H + \frac{(H - h_{cc})}{2} \right]}{a} \quad (14)$$

N_e : número de voltas no interior do ciclone

a : altura do duto de entrada da alimentação do ciclone (m)

h_{cc} : altura da seção cilíndrica ciclone (m)

H : altura d do ciclone (m)

A coleta de eficiência parcial pode ser obtida segundo aproximação de Massarani (1997) através do diâmetro de corte, apresentada na equação (15):

$$n(D) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Dp50}{d}\right)^2} 100\% \quad (15)$$

Essa aproximação é válida seguinte o para o caso de ciclones Lapple ou Stairmand.

A eficiência global é definida como a fração da massa de sólidos alimentada que é retirada pelo ciclone, apresentada na equação (16).

$$n = \frac{W_{su}}{W_s} 100\% \quad (16)$$

n: eficiência global (%)

W_{su}: massa de sólidos no fluxo descendente do ciclone (kg)

W_s: massa de sólido alimentada no ciclone (kg)

4.4 Fluxo de entrada

Para estimativa inicial da quantidade de sólidos adentrando o ciclone, foi utilizado uma aproximação com base na porcentagem de sólidos arrastado do secador D-2 para o CI-2, determinada a partir da velocidade de arraste e das curvas de distribuição granulométrica. O fluxo de entrada é obtido a partir da equação (17):

$$\text{Fluxo de Entrada} = Q_{\text{sólidos\%arrastada}} \quad (17)$$

Fluxo de entrada: Vazão de entrada de sólidos do ciclone $\left(\frac{kg}{h}\right)$

%arrastada: relação de sólidos arrastada do secador para o ciclone determinada pela velocidade de arraste e as curvas de distribuição granulométrica (%).

4.5 Perda de carga

A perda de carga é calculada levando em conta a entrada, a saída e o interior do ciclone, conforme equação (18).

$$\Delta P = \xi \rho \frac{v_e^2}{2} \quad (18)$$

ξ: fator constante para cada tipo de ciclone

Segundo Sherperd e Lapple (1939), é possível determinar *ξ* através das dimensões a, b e De do ciclone, segundo Eq (19):

$$\xi = \frac{16ab}{De^2} \quad (19)$$

a: altura do duto de entrada da alimentação do ciclone (m)

b: largura do duto de entrada da alimentação do ciclone (m)

De: diâmetro do duto de saída do gás no interior do ciclone (m)

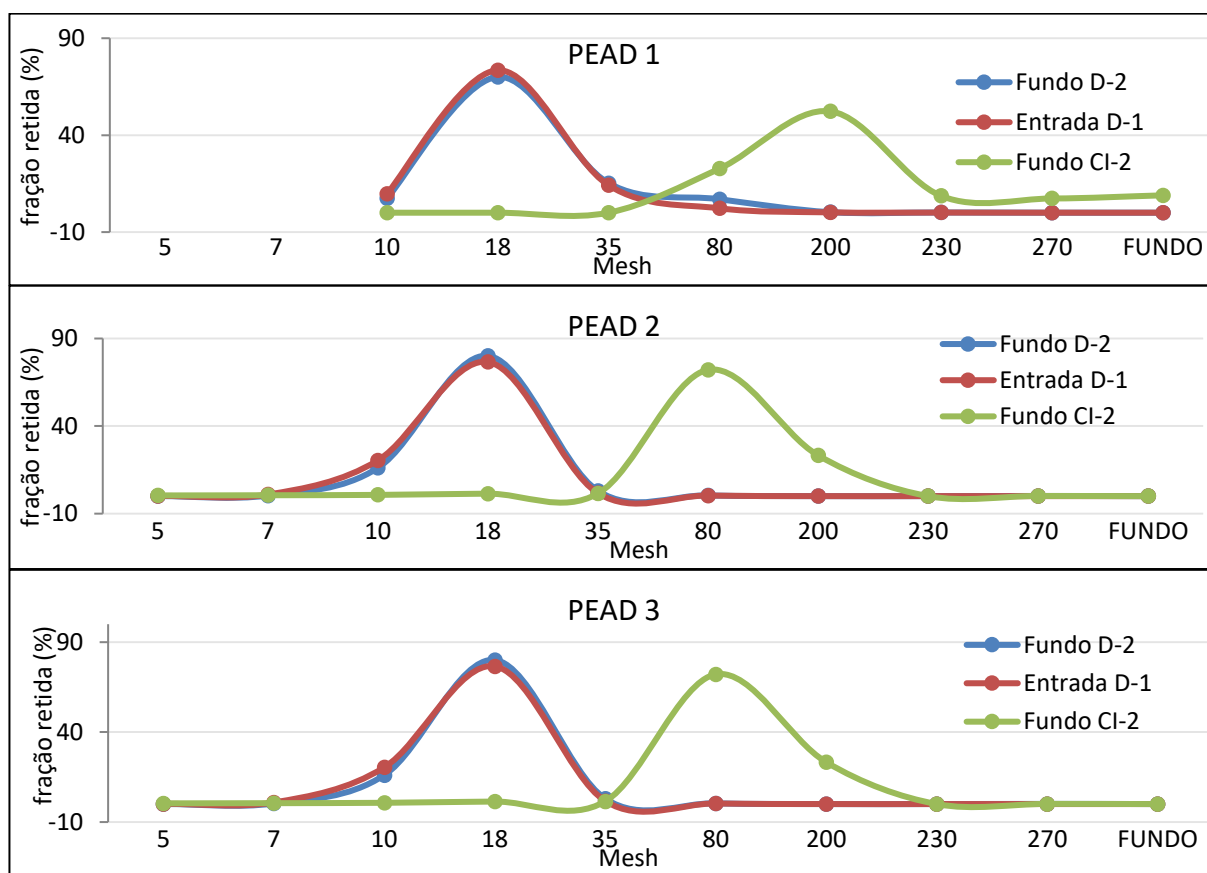
5 Resultados e discussão

A fim de comparar o projeto original dos equipamentos com a operação atual dos ciclones foram realizadas análises granulométricas dos produtos. Para isso, fez-se necessário um plano de amostragem para coleta das granulometrias do sistema a fim de verificar as vazões do *underflow* e *overflow* do CI-2 de ambas as plantas.

5.1 Distribuição granulométrica

Através do plano de amostragem realizaram-se as coletas de amostras, e para o presente trabalho analisou-se os casos extremos das plantas que são as resinas de polietileno de alta densidade, pois possuem menor granulometria. Os produtos serão chamados de PEAD 1, PEAD 2 e PEAD 3. Para todos os produtos, as amostras foram coletadas nos três pontos: entrada D-1, fundo D-2 e fundo CI-2. As plantas produzem os mesmos produtos com as mesmas condições operacionais, por isso não houve diferenciação entre as curvas de distribuição granulométricas observadas na Figura 5.

Figura 5. Distribuição granulométrica do produto PEAD 1, PEAD 2 e PEAD 3.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Pela análise das curvas apresentadas na Figura 5, pode-se concluir que o ciclone CI-2 abate partículas de até 200 *mesh*, ou seja, partículas maiores que 74 μm com eficiência de pelo menos 50%. Partículas menores são arrastadas pelo gás para o topo do equipamento, levando os finos para os equipamentos a jusante. Com a curva de distribuição granulometria e a velocidade de arraste do secador é possível prever o tamanho de partícula e a quantidade de sólidos que está sendo enviada para a torre, filtro e trocador.

Pelo plano de amostragem também foram realizadas coletas no fundo do ciclone durante 1 hora para verificar o fluxo do *underflow*, os dados para os produtos PEAD 1, PEAD 2 e PEAD 3 podem ser verificados na Tabela 5.

5.2 Velocidade de arraste/terminal e fluidização no secador D-2.

O interior do secador possui um vertedouro onde o polímero flui em contracorrente com o nitrogênio formando um leito fluidizado e ao chegar na zona expandida essa velocidade passa a diminuir. Na Tabela 4 é possível verificar a velocidade do gás no cilindro e na zona expandida do secador determinadas a partir das equações (3) e (4). Comparando esses resultados com os obtidos na Figura 6, verifica-se que todas as partículas com granulometria superior a 7 *mesh* são fluidizadas no interior do cilindro e as partículas com granulometria de 200 *mesh* são arrastadas para o topo do equipamento e enviadas para o ciclone na POLI 1, no caso das condições da POLI 2 as partículas são arrastadas a partir de 80 *mesh*. Os dados da Figura 6 foram determinados a partir das equações (5) e (8).

Na Tabela 4, observa-se que a velocidade projetada no corpo cilíndrico do D-2 é maior que a atualmente operada para ambas as plantas, assim como da zona expandida. A velocidade ideal de operação do secador é aquela em que a menor partícula contida na amostra fluidiza, garantindo eficiência de secagem. Entretanto, deve-se levar em conta a maior quantidade de sólidos para o topo do secador e o quanto isso pode afetar a performance do ciclone.

Tabela 4. Comportamento da velocidade do gás no interior do cilindro e na zona expandida do secador D-2.

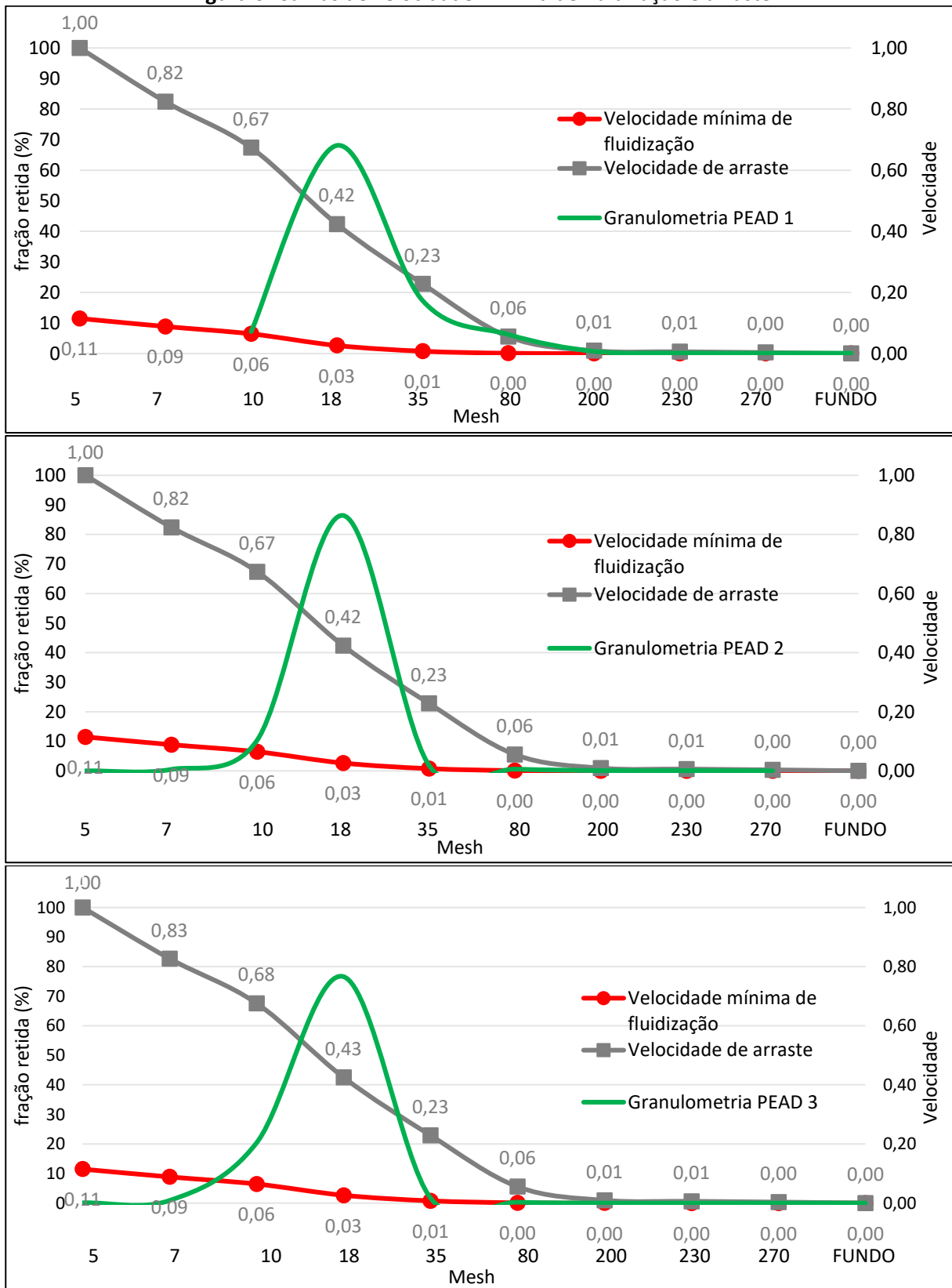
	Projeto – POLI 1	POLI 1	Projeto – POLI 2	POLI 2
Velocidade no corpo cilíndrico do D-2	0,12	0,09	0,13	0,10
Velocidade na zona expandida	0,06	0,05	0,08	0,06

Com base nas curvas de distribuição granulométrica, velocidade de arraste das partículas e velocidade do gás no interior do secador, Figura 5, 6 e Tabela 4 respectivamente, determinou-se a quantidade de sólidos arrastada para o ciclone e a eficiência global, indicando uma média de 0,68% e 75%, respectivamente para os produtos PEAD 1, PEAD 2 e PEAD 3, conforme observa-se na Tabela 5. A eficiência global foi determinada a partir da equação (16) e a o fluxo de entrada pela equação (17).

Tabela 5. Quantidade de sólidos abatidos pelo ciclone.

Produto	% arrastada para o ciclone	Fluxo de entrada	Fluxo do <i>underflow</i>	Eficiência global
PEAD 1	1,10%	0,6	0,3	78%
PEAD 2	0,64%	1,0	0,5	67%
PEAD 3	0,3%	0,2	0,0	80%
Média	0,68%	-	-	75%

Figura 6. Curvas de velocidade mínima de fluidização e arraste



Fonte: Elaborado pela autora, 2022

5.3 Comparativo de dados de projeto e condições de operação

O projeto original dos ciclones previu eficiência de 95% para partícula com diâmetro de 10 μm , entretanto, seguindo o método de Shepperd e Lapple (1940), observou-se que para as mesmas condições especificadas na folha de dados e partículas de 10 μm , a eficiência foi de 47% e 44% para POLI 1 e POLI 2, respectivamente, obtidas pela equação (15). Na POLI 1, para atingir a eficiência indicada pelo projeto o diâmetro de corte do equipamento deveria ser menor que o determinado pela equação (13), conforme Tabela 6.

Na Tabela 7, verificou-se os dados para POLI 2, em que o diâmetro de corte para eficiência de 95% em partículas de 10 μm , deveria ser menor que o encontrado pela equação (13), de 0,76. Para partículas maiores que 74 μm verificou-se eficiência de 97%, comportamento semelhante ao observado nas curvas de distribuição granulométrica do CI-2. Para fins de simplificação, foi considerado partículas esféricas.

Tabela 6. Determinação da eficiência do ciclone CI 2 para operação com diferentes granulometrias na POLI 1.

CI -2 – POLI 1	Projeto - 10 μm	Projeto - 37 μm	Projeto - 74 μm	Projeto - 177 μm	Operação- 74 μm	Operação - 177 μm
Eficiência de coleta projetada	95%	95%	95%	95%	-	-
Diâmetro de corte pela eficiência	0,00	1,00	0,09	0,24		
Eficiência de coleta CI-2	47%	92%	98%	100%	97%	99%
Diâmetro de corte	0,71	0,71	0,71	0,71	0,99	0,99
v_e	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
N_e	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
ρ_s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02
ρ	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00

Apesar dos dados das Tabelas 5 e 6 indicarem alta eficiência para o ciclone, a performance do equipamento pode ser afetada por parâmetros como design do equipamento, densidade da partícula, velocidade de entrada do gás e condições de saída do equipamento (GIMBUN et. al, 2012). Ainda deve-se levar em consideração que a teoria utilizada para a determinação da eficiência foi baseada em equações de testes empíricos que não levavam em conta a rugosidade das paredes dos equipamentos (REPPENHAGEN, 2000). Outro ponto a se destacar sobre o modelo é que o número de voltas utilizado é obtido a partir da equação (14) que leva em conta apenas a geometria do equipamento, entretanto segundo Wei et. al (2019), a força centrífuga tende a aumentar com o

aumento da velocidade de entrada, promovendo a separação e aumentando o caminho espiralado percorrido pela partícula.

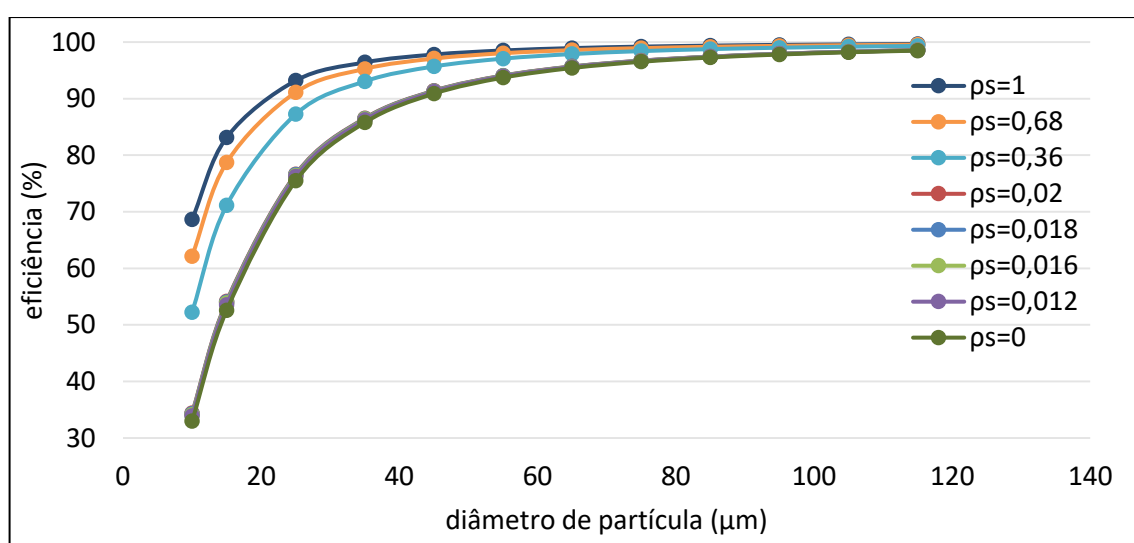
Tabela 7. Determinação da eficiência do ciclone CI 2 para diferentes condições para POLI 2.

CI-2 – POLI 2	Projeto - 10 μm	Projeto - 37 μm	Projeto - 74 μm	Projeto - 177 μm	Atual - 74 μm	Atual - 177 μm
Eficiência de coleta projetada	95%	95%	95%	95%	-	-
Diâmetro de corte pela eficiência	0,00	1,00	0,09	0,24	-	-
Eficiência de coleta CI-2	44%	92%	98%	99,6%	97%	98%
Diâmetro de corte	0,76	0,76	0,76	0,76	0,89	0,76
ve	0,61	0,61	0,61	0,61	0,12	0,12
Ne	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
ρ_s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02
ρ	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00

5.3.1 Densidade da partícula

Segundo Gimbut et al. (2012), quanto maior a diferença entre a densidade da partícula e a densidade do gás, maior força centrífuga atuando sobre a partícula. O aumento dessa força tende a aumentar a eficiência de separação, pois direciona mais partículas para a parede do equipamento. A remoção das partículas ocorre devido a força centrífuga que é diretamente proporcional a massa e o diâmetro da partícula, portanto partículas menores e menos densas possuem menor força e tendem a escapar pelo *vórtex finder* (HAIG et. al, 2014).

Figura 7. Previsão de eficiência variando a densidade de partícula (ρ_s).



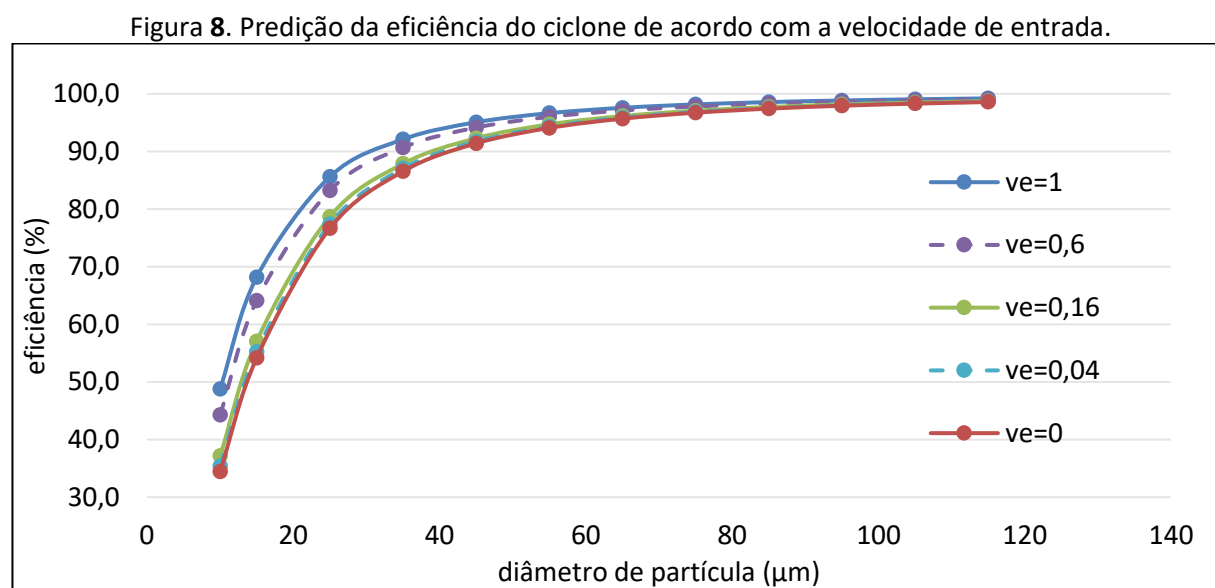
Fonte: Elaborado pela autora, 2022

A eficiência do ciclone varia com a densidade do sólido, conforme observado na Figura 7. Para partículas de mesmo diâmetro, aumentando a densidade, aumenta-se a eficiência de separação.

Atualmente as plantas operam com resinas de densidades (ρ_s) entre 0 e 0,02, que conforme Figura 7 estão sobrepostas, mostrando que mesmo para diferentes produtos há pouco impacto na variação da eficiência. Ainda foi estimado a eficiência com as condições operacionais e densidade de projeto ($\rho_s=0$), verificando também sobreposição nas curvas, indicando que a densidade dos produtos, devido sua baixa variação, não está afetando a eficiência de abatimento do equipamento.

5.3.2 Velocidade de entrada do gás e perda de carga

Ao entrarem no corpo do ciclone, as partículas colidem entre si. Uma baixa velocidade de entrada faz com que as partículas rebatidas sejam direcionadas para parede, reduzindo sua energia com o tempo. Conforme as partículas colidem, o raio do caminho espiral que o sólido faz dentro do equipamento diminui, o que diminui sua eficiência de separação (WEI et al., 2019). Na Figura 8, observa-se o efeito da variação da velocidade de entrada no ciclone, quanto maior a velocidade, maior a eficiência de separação. A velocidade de entrada foi determinada pela equação (11).



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Entretanto, quanto maior a velocidade, mais as partículas podem adentrar o duto de saída do gás, sendo arrastadas para o *overflow*. O que determina a velocidade de entrada ideal é o raio do caminho espiral formado pela ação da força centrífuga. A máxima eficiência é obtida quando o raio do caminho espiral for equivalente a dimensão S (comprimento do duto de saída do gás dentro do ciclone) (WEI et al., 2019).

Ao longo dos anos, foram realizadas modificações nas plantas e a operação passou a operar com velocidades que variam entre $ve = 0$ e $ve = 0,16$. Essa modificação na velocidade de entrada, causou redução da eficiência de separação sólido-gás (Figura 8). Shepperd e Lapple (1940) recomendam velocidade de entrada na faixa de $ve = 0,31$, entretanto, na prática a velocidade dos ciclones varia entre $ve = 0,06$ e $ve = 1,34$, podendo causar salto nas partículas.

As plantas operam com velocidade de entrada baixa ao serem comparadas com a referência de projeto, o que causa redução da energia e menor número de voltas realizadas pela partícula. Com a redução da força centrífuga, ocorre menor separação gás-sólido.

A queda de pressão é outro parâmetro importante para determinar a performance de um ciclone e pode ser determinada pela equação (18). Essa queda é fornecida a partir da expansão do gás no interior do equipamento e tende a aumentar com o aumento da eficiência (DE PAULA et. al, 2019). A Tabela 8 mostra a comparação entre a queda de pressão estipulada no projeto e a atual a partir das condições atuais de operação. Analisando os resultados, atualmente tem-se uma menor perda de carga permitida, devido a redução da velocidade de entrada, tal fato reduziu a eficiência de abatimento.

Tabela 8. Dados de projeto e de operação de queda de pressão nas plantas POLI 1 e POLI 2 no ciclone CI 2.

Perda de carga	Projeto - POLI 1	Atual - POLI 1	Projeto - POLI 2	Atual - POLI 2
ΔP	1,00	0,00	0,75	0,20
ve	0,45	0,00	0,27	0,05

5.3.3 Critério de velocidade de salto

A Tabela 9 apresenta os resultados para as velocidades de salto, obtida a conforme equação (12), e as velocidades de entrada de projeto e operação para o ciclone CI-2. O critério estabelecido para evitar que partículas coletadas retornem para o fluxo de gás, sendo enviadas radialmente em direção ao *vórtex finder*, segundo Salcedo e Cândido (2001), é quando a relação entre a velocidade de entrada e a velocidade de salto é menor que 1,25. Os equipamentos avaliados cumprem esse critério para as velocidades de projeto e para as condições atuais operadas.

Tabela 9. Dados de projeto e de operação da velocidade de salto nas plantas POLI 1 e POLI 2, no ciclone CI-2

Velocidade de salto	Projeto - POLI 1	Atual - POLI 1	Projeto - POLI 2	Atual - POLI 2
ve	1,00	0,00	0,60	0,03
Vs	0,78	0,00	1,00	0,53
Ps	0,00	1,00	0,00	1,00
ve / Vs	0,70	0,57	0,53	0,47

5.3.4 Carga e granulometria de sólidos

Segundo Haig et. al (2014), a eficiência global tende a diminuir com a redução da concentração de sólidos. Considerando a eficiência global do projeto, de 99,5%, o arraste para *overflow* deveria ser ínfimo. Entretanto, com a experiência de operação na planta, observou-se a presença de finos na área estudada, indicando uma eficiência média de 75%, conforme apresentado na seção 5.2. A partir dessa estimativa e com a amostra acumulada por 1 hora no fundo do ciclone, determinou-se a vazão de sólidos na entrada, conforme Tabela 10, manipulando-se a equação (16). A vazão de entrada estimada foi menor que a de projeto, mesmo com o aumento de produção em 20% desde a partida das plantas. Reafirmando o menor arraste de sólidos do secador para o ciclone avaliado na seção 5.2. E ainda, mesmo com a menor vazão, o arraste de sólidos para o topo do ciclone é maior que o projetado, representando um aumento de 5,7 vezes o projeto original.

Além da menor carga de sólidos, o maior arraste visualizado no topo do ciclone pode ser em decorrência da quebra das partículas ao colidirem entre si ou com as paredes do equipamento, provocando uma mudança na distribuição granulométrica da amostra (HUSSEIN et. al, 2020). Com a mudança na distribuição granulométrica tem-se maior geração de finos no interior do ciclone e isso aumenta a propensão de arraste para o topo, diminuindo a eficiência de coleta. Song et. al (2016) verificaram que o raio que as partículas percorrem no interior do ciclone está relacionado com o diâmetro das partículas, sendo que as maiores se localizam mais próximas da parede e as menores mais próximas do centro, sendo carregadas pelo fluxo de gás do overflow.

Tabela 10. Projeção de velocidade do *underflow* e *overflow* dos ciclones

		massa de sólidos entrada (Ws)	Massa <i>underflow</i> (Wsu)	Massa <i>overflow</i>	Razão <i>overflow</i> operação/projeto
Projeto	POLI 1	0,89	0,89	0,12	-
	POLI 2	0,37	0,38	0,00	-
PEAD 1	POLI 2	0,05	0,04	0,82	5,30
PEAD 1	POLI 2	0,05	0,04	0,79	3,13
PEAD 2	POLI 2	0,02	0,01	0,41	9,67
PEAD 2	POLI 2	0,00	0,00	0,20	9,34
PEAD 2	POLI 1	0,07	0,05	0,99	4,99
PEAD 2	POLI 1	0,06	0,05	0,96	4,87
PEAD 3	POLI 1	0,03	0,02	0,51	2,78
Média					5,73

5.3.5 Design do equipamento

Segundo Gimbin et. al (2012), o design do equipamento também pode afetar a eficiência de coleta. Visando verificar o projeto de dimensionamento dos equipamentos, baseou-se em duas famílias da literatura, Lapple e Stairmand, para comparar as dimensões dos ciclones. Na Tabela 11 pode-se observar as relações dessas famílias de ciclones e o comparativo de projeto dos ciclones CI-2 da POLI 1 e POLI 2.

Tabela 11. Relações geométricas do ciclone CI-2 frente as proporções das famílias Lapple e Stairmand.

Relação	POLI 1	POLI 2	Lapple	Stairmand
D/D	1,00	1,00	1,00	1,00
a/D	0,500	0,600	0,500	0,500
b/D	0,200	0,300	0,250	0,200
S/D	0,900	0,560	0,625	0,560
De/D	0,400	0,500	0,500	0,500
hcc/D	0,800	1,70	2,00	1,50
H/D	2,20	2,80	4,00	4,00
B/D	0,400	0,600	0,250	0,375

Observa-se na Tabela 11, pelas proporções geométricas, que a família de ciclones Stairmand é a que mais se aproxima dos dados obtidos nesse trabalho. Segundo Koch e Litch (1977), para se obter um projeto de ciclone eficiente, certas restrições devem ser observadas: a altura do duto de entrada da alimentação (a) não pode ultrapassar a dimensão do *vórtex finder* dentro do ciclone (S); a largura do duto de entrada da alimentação (b) deve ser menor que metade da diferença entre o diâmetro do

cilindro (D) e o diâmetro do duto de saída do gás (D_e); a dimensão do *vórtex finder* dentro do ciclone (S) deve ser menor que a altura da seção cilíndrica (hcc). Essas dimensões podem ser visualizadas na Figura 2 no Capítulo 2, seção 2.4. A Tabela 12 apresenta essas restrições para os ciclones estudados.

Tabela 12. Relações das restrições geométricas dos ciclones segundo literatura.

Restrição	POLI 1	POLI 2
$s > a$	SIM	NÃO
$b < ((D - D_e)/2)$	SIM	NÃO
$S < h_{cc}$	NÃO	SIM

Na POLI 1, a restrição geométrica não cumprida que pode afetar a eficiência de abatimento para os ciclones é a altura do *vórtex finder* maior que da seção cilíndrica do equipamento, de acordo com a Tabela 12. O *vórtex finder* é uma tubulação da saída de gás que se estende no interior da câmara cilíndrica e tem como função impedir que o gás passe diretamente do duto de alimentação para o de saída. Quando essa dimensão penetra a região cônica do ciclone, pode ocorrer arraste das partículas depositadas (Koch e Litch, 1997). Visando se adequar a essa restrição, o recomendado manter o duto do *vórtex finder* para 56% do diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone.

Na POLI 2, a restrição geométrica não cumprida também envolve o *vórtex finder*, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 12. Entretanto, seu comprimento é menor que o recomendado por Koch e Litch, resultando na passagem direta das partículas, ou seja, estas não realizam o caminho espiralo dentro do equipamento e são enviadas diretamente para o topo junto com o gás (Koch e Litch, 1997). Para aumentar a eficiência, o recomendado é aumentar o comprimento *vórtex finder* para 56% do diâmetro do ciclone. E ainda, tem-se a seção de entrada maior que metade da diferença entre os diâmetros, quando isso acontece pode ocorrer contrações bruscas no caminho espiralado a ser formado, reduzindo o número de voltas e, conseqüentemente, a eficiência de separação. Por isso, é necessário diminuir a largura da seção de entrada do ciclone, entretanto essa é uma manobra mais difícil de executar devido a posição do ciclone.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

O desempenho do ciclone das plantas POLI 1 e POLI 2 foi avaliado a partir das equações do modelo de Shepherd e Lapple (1939) e comparado com os dados do projeto original. Verificou-se as proporções geométricas dos equipamentos com base na literatura e realizou-se o planejamento de amostragem a fim de determinar a distribuição granulométrica das partículas, visando determinar o acúmulo de sólidos enviados e abatidos pelo equipamento.

Pelas curvas de distribuição granulométrica os ciclones abatem partículas maiores que 74 μm (200 *mesh*) com eficiência de pelo menos 50% para ambas as plantas. A eficiência global do processo foi de 75% determinada pelas curvas de distribuição granulométrica e vazão do *underflow* coletada. As curvas de velocidade de arraste e mínima de fluidização indicam que todas as partículas com granulometria superior a 7 *mesh* são fluidizadas no D-2 e, no pior caso, partículas com granulometria de 80 *mesh* são arrastadas para o topo do secador e enviadas para o ciclone.

Os resultados obtidos indicaram eficiência individual de coleta para partículas de 74 μm de 97% e 98% para POLI 1 e POLI 2, respectivamente. Entretanto, esses dados foram obtidos a partir de correlações empíricas que não levam em conta a rugosidade do equipamento e a mecânica dos fluidos. A densidade é um parâmetro que afeta a eficiência de abatimento, entretanto para as condições das plantas, o efeito é ínfimo. A redução da velocidade de entrada também causou diminuição na queda de pressão do equipamento, prejudicando a eficiência de separação. Ainda é importante atentar-se para o fenômeno de rebatimento das partículas coletadas, que pode ser causado quando ultrapassado o critério da velocidade de salto, porém o critério é cumprido, com razão ve/Vs de 0,57 e 0,47 para POLI 1 e POLI 2, respectivamente, quando o recomendado é 1,25. A carga de sólidos também impacta a performance do equipamento, sua redução tende a reduzir a força centrífuga atuante. Atualmente, as plantas operam com vazão de entrada do ciclone menor que o projeto, entretanto o fluxo de overflow é 5,7 vezes maior que o projeto original, o que se justifica pelo sentimento da planta de maior presença de pó na torre, trocador e filtro.

Baseando-se na família de ciclones Stairmand, algumas melhorias físicas podem ser realizadas nos equipamentos. Para POLI 1, é necessário estender o duto do *vortex finder* para 56% do diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone, visando impedir o arraste das partículas depositadas. Para POLI 2, é necessário diminuir a largura da seção de entrada do ciclone, entretanto essa é uma manobra de

difícil execução devido a posição do ciclone e aumentar o comprimento *vórtex finder* para 56% do diâmetro do ciclone para evitar a passagem direta das partículas para o duto de gás.

A fim de dar continuidade a esse trabalho, propõe-se realizar estudo de escoamento no interior do ciclone através de simulação por fluidodinâmica computacional (CFD). O objetivo do estudo será verificar o perfil de velocidade no interior do equipamento e o impacto da rugosidade na eficiência de coleta. O trabalho de Foroozesh et. al (2021), indicaram que a rugosidade das paredes afeta significativamente o comportamento do gás e, conseqüentemente, a performance do ciclone. Comparando com os modelos clássicos, simulação em 3D através de fluidodinâmica computacional tem a vantagens de levar em conta a assimetria e instabilidade do fluxo sólido-gás (NAKHAEI, 2020), disponibilizando informações mais precisas do complexo comportamento dos ciclones com base na mecânica de fluidos e nos modelos de turbulência do escoamento. Além disso, deve-se concluir o presente estudo com análise de microscopia eletrônica de varredura das amostras de entrada e fundo do ciclone, a fim de verificar possível fragmentação das partículas.

REFERÊNCIAS

ALDERLIESTEN, M. Mean Particle Diameters. Part VII. The Rosin-Rammler Size Distribution: Physical and Mathematical Properties and Relationships to Moment-Ratio Defined Mean Particle Diameters. *Particle & Particle Systems Characterization*. Alemanha, v. 30, n. 3, p. 244–257, mar. 2013.

BABAOĞLU, N. U., PARVAZ, f.; HOSSEINI, S. H., ELSAYED, K., AHMADI, G. Influence of the inlet cross-sectional shape on the performance of a multi-inlet gas cyclone. **Powder Technology**, [s.l], v. 384, p. 82–99, maio 2021.

BITTENCOURT, M. P. Processo Spherilene: controle de características de polietilenos de baixa densidade lineares e de alta densidade. 2010. 42f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <www.lume.ufrgs.br>. Acesso em: 03 de jul. de 2022.

BOF, Claudia G. Desenvolvimento de um ciclone para separação de material particulado de uma corrente de gás de combustão de coqueria “heat recovery”. 2018. 94f. Dissertação (Mestrado) - - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://186.202.79.107>>. Acesso em: 15 de set. de 2022.

BOSSERS, K. W., VALADIAN, R., GARREVOET, J., VAN MALDEREN, S., CHAN, R., FRIEDERICHS, N, SEVERN, J., WILBERS, A., ZANONI, S., JONGKIND, M., WECKHUYSEN, B. M., MEIRER, F. Heterogeneity in the Fragmentation of Ziegler Catalyst Particles during Ethylene Polymerization Quantified by X-ray Nanotomography. **JACS Au**, [s.l], v. 1, n. 6, p. 852–864, 4 maio 2021.

COSTA, E. N. Peneiramento de partículas finas e ultrafinas com adição de dispersantes. 2014. 54f. Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Regional Catalão, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2014.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. DE. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 01-13, jan. 2003.

DE PAULA, A. C. O.; HENRÍQUEZ, J. R.; FIGUEIREDO, F. A. B. Dimensioning a Cyclone Separator for Circulating Fluidized Bed Gasifier: Validation of a Procedure. **Heat Transfer Engineering**, Eslovênia, v. 41, n. 15-16, p. 1305–1314, 2 jul. 2019.

DZIUBAK, T.; BAŃKAŁA, L. Computational and Experimental Analysis of Axial Flow Cyclone Used for Intake Air Filtration in Internal Combustion Engines. **Energies**, Suíça, v. 14, n. 8, p. 2285, 1 jan. 2021.

FENG, H., CHEN, X., GU, X., FENG, L., WANG, D., YANG, G., GAO, Y., ZHANG, C., HU, G. Modeling of the molecular weight distribution and short chain branching distribution of linear low-density polyethylene from a pilot scale gas phase polymerization process. *Chemical Engineering Science*, p. 117952, 29 jul. 2022.

FOROOZESH, J., PARVAZ, F., HOSSEINI, S. H., AHMADI, G., ELSAYED, K., BABAOĞLU, N. Computational fluid dynamics study of the impact of surface roughness on cyclone performance and erosion. **Powder Technology**, [s.l], v. 389, p. 339–354, 2021.

GUARITA, M.B. Modelagem e simulação de equipamentos para remoção de voláteis de polietileno. 2005. 121f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. Disponível em: <lume.ufrgs.br>. Acesso em: 01 de jul. de 2022.

GIMBUN, J., CHOONG, T. S. Y., FAKHRU’L–RAZI, A., CHUAH, T. G. Prediction of the Effect of Dimension, Particle Density, Temperature, and Inlet Velocity on Cyclone Collection Efficiency. **Jurnal Teknologi**, Malásia, v. 40, p.37-50, 2012.

HAIG, C. W., HURSTHOUSE, A., MCILWAIN, S., & SYKES. The effect of particle agglomeration and attrition on the separation efficiency of a Stairmand cyclone. **Powder Technology**, [s.l], v. 258, p. 110–124, 2014.

HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. **Powder Technology**, Corvallis, v. 58, n. 1, p. 63–70, 1989.

HOFFMANN, A. C., STEIN, L. E., *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation – 2nd Edition – Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2008*

HUSSEIN, N., YUSOF, M. R. M., JAMIAN, N. R., HASHIM, N. H., HASSAN, C. H. C., ZAIDI, N. S.. Performance of MR-DE’duster in capturing low density particulate. **IOP conference series: Materials science and engineering**, [s.l], v. 884, n. 1, p. 012045, 2020.

KALEN, B. AND ZENZ, F. A 1974 Theoretical-empirical approach to saltation velocity in cyclone design. In *AIChE Symposium Series*, [s.l], v. 70, n. 137, p. 388-396, 1974.

KOCH, W. H.; LICHT, W. New design approach boosts cyclone efficiency. **Chemical Engineering**. New York, v. 84, n. 24, p. 80–88, 1977.

LACERDA, FERRIRA A. Estudo dos efeitos das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e filtrantes. 2007. 132f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br>>. Acesso em: 02 de ago. de 2022.

C. E. Lapple, "Processes use many collector types. **Chemical Engineering**. New York, v. 58, p. 144-151, 1951.

LIU, G., LI, L., QIU, L., YU, S., LIU, P., ZHU, Y., HU, J., LIU, Z., ZHAO, D., YANG, H. Chemical cleaning of ultrafiltration membranes for polymer-flooding wastewater treatment: Efficiency and molecular mechanisms. **Journal of Membrane Science**, [s.l.], v. 545, p. 348–357, 2018.

MASSARANI, G. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados. Editora UFRJ, Rio de Janeiro RJ, 1997, p. 47-77.

NAKHAEI, M., LU, B., TIAN, Y., WANG, W., DAM-JOHANSEN, K., & WU, H. CFD Modeling of Gas–Solid Cyclone Separators at Ambient and Elevated Temperatures. **Processes**, [s.l.], v. 8, n. 2, p. 228, 1 fev. 2020.

NUNES, L. DE S.; VERONEZI, C. M.; LOPES, A. M. Importância do uso de ciclones nos processos de uma usina sucroalcooleira. **Revista Científica**, São Paulo, v. 1, n. 1, 2020.

PEACOCK, A.J., HANDBOOK OF POLYETHYLENE Structure, Properties and Applications, ed. E.C. Company. 2000, Baytown, Texas. p. 1- 537.

PEÇANHA, R. Sistemas Particulados Diluídos. In: Sistemas Particulados: Operações unitárias envolvendo partículas e fluidos.1. ed. - Rio de Janeiro : Elsevier, 2014, cap. 3, p. 125 -222.

REPPENHAGEN, J.; SCHETZSCHEN, A.; WERTHER, J. Find the optimum cyclone size with respect to the fines in pneumatic conveying systems. **Powder Technology**, [s.l.], v. 112, n. 3, p. 251–255, 31 out. 2000.

SALCEDO, R. L. R.; CÂNDIDO, M. G. GLOBAL OPTIMIZATION OF REVERSE-FLOW GAS CYCLONES: APPLICATION TO SMALL-SCALE CYCLONE DESIGN, *Separation Science and Technology*, [s.l.], 2001, v. 36, n. 12, 2707-2731.

SAVINI, Giovanni. Estudo da Tenacificação de Materiais à Base de Polietileno Submetidos a Temperaturas Extremas. 2016. 57f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br>>. Acesso em: 22 set. 2022.

SHEPHERD, C. B.; LÄPPLE, C. E. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors without inlet vane. *Industrial and Engineering Chemistry*, Wilmington, v. 32, p. 1246–1248, 1940.

SOUZA, B. F. DE. Recuperação de fósforo a partir de cinzas de lodo de esgoto: caracterização da matéria-prima e implementação de um reator contínuo para *scale up* do processo. 2022. 68f.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2022. Disponível em < repositorio.ufrn.br>. Acesso em: 30 de jul. de 2022.

SONG, C., PEI, B., JIANG, M., WANG, B., XU, D., CHEN, Y. Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators. **Powder Technology**, [s.l.], v. 294 pp. 437– 448, 2016.

SUN, B., WANG, H., LIU, Y., LAN, W., CHEN, S., LV, X., & CHENG, M. Experimental and numerical analysis of solid particle erosion on grinding tool in polymer-flooding wastewater treatment. **Engineering Failure Analysis**, [s.l.], v. 108, [s.l.], 2020.

SVAROVSKY, L., Solid-Gas Separation. In: WILLIAMS, J. C., ALLEN, T., Handbook of Powder Technology. England: Elsevier, 1981.

VÍTĚZ, T.; TRÁVNÍČEK, P. Particle size distribution of a waste sand from a wastewater treatment plant with use of Rosin-Rammler and Gates-Gaudin-Schumann mathematical model. **Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, [s.l.], v. 59, n. 3, p. 197–202, 2014.

WEI, Q.; SUN, G.; YANG, J. A model for prediction of maximum-efficiency inlet velocity in a gas-solid cyclone separator. **Chemical Engineering Science**, Nova York, v. 204, p. 287–297, 31 ago. 2019.