

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ARTHUR PERINI FERNANDES

**ANÁLISE POR MÉTODOS EMPÍRICOS E DFC DA EFICIÊNCIA DE COLETA DE
UM SEPARADOR CICLÔNICO ENCONTRADO EM UMA INDÚSTRIA LOCAL**

LONDRINA

2022

ARTHUR PERINI FERNANDES

**ANÁLISE POR MÉTODOS EMPÍRICOS E DFC DA EFICIÊNCIA DE COLETA DE
UM SEPARADOR CICLÔNICO ENCONTRADO EM UMA INDÚSTRIA LOCAL**

**Analysis by Empirical methods and CFD of the collection efficiency in a
cyclone separator found in a local industry**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Ricardo de Vasconcelos Salvo.

LONDRINA

2022



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

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

ARTHUR PERINI FERNANDES

**ANÁLISE POR MÉTODOS EMPÍRICOS E DFC DA EFICIÊNCIA DE COLETA DE
UM SEPARADOR CICLÔNICO ENCONTRADO EM UMA INDÚSTRIA LOCAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24/Novembro/2022

Ricardo de Vasconcelos Salvo
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Ismael de Marchi Neto
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Rafael Sene de Lima
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

LONDRINA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala por toda a convivência e compartilhamento de conhecimento.

Aos meus antigos colegas de trabalho e empresa, os quais me deram a possibilidade de realizar este trabalho.

E a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O trabalho tem como objetivo a análise de eficiência de coleta de um separador ciclônico por meio de métodos empíricos e DFC. Será realizada a comparação entre as duas metodologias, para o caso de um ciclone encontrado em uma indústria local, o qual apresenta uma eficiência de coleta abaixo da esperada. Como o ciclone em questão possui geometrias que fogem do padrão das normalmente encontradas na literatura, a aplicação da DFC é um caminho viável para a identificação dos possíveis problemas de operação do equipamento, visto que métodos empíricos são limitados aos limites dos experimentos dos quais foram desenvolvidos, podendo assim levar a resultados não condizentes com a realidade. A correta aplicação da DFC pode levar a uma previsão consistente do funcionamento do equipamento além de possibilitar um redimensionamento sem a necessidade de testes experimentais. Este trabalho conclui que tanto pelos métodos empíricos quanto DFC, este ciclone se encontra corretamente dimensionado para a sua aplicação, onde apresenta eficiência de coleta teórica de 100% para partículas de diâmetro superior a 40 μm , onde a possível razão pelo funcionamento com baixa eficiência pelo equipamento, se deve a fatores de operação não ideais, pois o dimensionamento geométrico encontra-se adequado.

Palavras-chave: separador ciclônico, métodos empíricos, dinâmica dos fluidos computacional.

ABSTRACT

This work aims to analyze the collection efficiency of a cyclone separator by empirical methods and CFD. A comparison between these methodologies will be made, in a specific cyclone separator found in a local industry, which presents a lower collection efficiency than expected. The specific cyclone has geometric dimensions that differs from the standard found in the literature, the application of CFD is a viable way to identify possible equipment operation problems, since empirical methods are limited to the limits of the experiments from which they were derived. The correct application of CFD can lead to a consistent prediction of the equipment's operation, in addition to allowing a resizing without the need for experimental tests. This work concludes that by means of empirical and CFD methods, this cyclone is in fact well designed for its defined application, where it can operate with 100% theoretical collection efficiency with particles that have at least 40 μm of diameter, therefore the possible reason of low efficiency by the equipment, is defined by a non-ideal operation, as showed that geometric dimensions are well suited for the application.

Keywords: cyclonic separator, empirical methods, computational fluid dynamics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de um Ciclone industrial	13
Figura 2 - Esquema do princípio de funcionamento de um ciclone de alta eficiência <i>Stairmand</i>	14
Figura 3 - Representação 3D do ciclone pertencente a empresa	15
Figura 4 - Representação da geometria do ciclone.....	25
Figura 5 - Malha de 511 mil elementos	37
Figura 6 - Geometria do ciclone Hoesktra.....	44
Figura 7 - Malha do ciclone para validação dos resultados	45
Figura 8 – a) Malha 255 mil elementos	48
Figura 8 – b) Malha 511 mil elementos	48
Figura 9 – Linhas no plano XY	49
Figura 10 – Linhas de Corrente de Tempo de Residência	52
Figura 11 – Contorno função parede Y+	53
Figura 12 – Contorno de Pressão médio Plano XY	54
Figura 13 – Contorno de Velocidade Tangencial Média Absoluta no Plano XY	55
Figura 14 – Contorno de Velocidade Axial Média no plano XY	56
Figura 15 – a) Contorno de Velocidade Tangencial Média <i>Stairmand</i>	58
Figura 15 – b) Contorno de Velocidade Tangencial Ciclone Local.....	58
Figura 16 – a) Contorno de Velocidade Axial Média <i>Stairmand</i>	59
Figura 16 – b) Contorno de Velocidade Axial Média Ciclone Local.....	59
Figura 17 – a) Contorno de Pressão Média <i>Stairmand</i>	60
Figura 17 – b) Contorno de Pressão Média Ciclone Local.....	60
Figura 18 – a) Contorno de Pressão Média na entrada <i>Stairmand</i>	61
Figura 18 – b) Contorno de Pressão Média na entrada Ciclone Local	61
Figura 19 – Rastreamento de partículas pelo solver.....	67
Figura 20 – Animação escoamento de partículas	67
Figura 21 – a) Contorno de Pressão Média na geometria principal.....	71
Figura 21 – b) Contorno de Pressão Média na geometria alternativa.....	71
Gráfico 1 - Distribuição Volumétrica	27
Gráfico 2 - Distribuição Volumétrica acumulada.....	27
Gráfico 3 – Perfis de Velocidade Tangencial Média Adimensional.....	46
Gráfico 3 – Perfis de Velocidade Tangencial Média Adimensional.....	47
Gráfico 4 – Perfil de Velocidade Axial Média Adimensional.....	59
Gráfico 4 – Perfil de Velocidade Axial Média Adimensional.....	59
Gráfico 5 – a) Comparação Perfis de Velocidade Tangencial Média Adimensional Linha 1	50
Gráfico 5 – b) Comparação Perfis de Velocidade Axial Média Adimensional Linha 1.....	50
Gráfico 6 – a) Comparação Perfis de Velocidade Tangencial Média Adimensional Linha 2	51
Gráfico 6 – b) Comparação Perfis de Velocidade Axial Média Adimensional Linha 2.....	51
Gráfico 7 – Curvas de eficiência de coleta por métodos empíricos	64
Gráfico 8 – Curva de eficiência de coleta por DFC.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões do ciclone	26
Tabela 2 - Dimensões da Geometria Alternativa	26
Tabela 3 - Dados de operação	28
Tabela 4 - Resultados da análise granulométrica	28
Tabela 5 - Dimensões do ciclone (D = 290 mm).....	44
Tabela 6 - Razões geométricas de diferentes ciclones.....	57
Tabela 7 - Eficiência de coleta inicial por métodos empíricos	62
Tabela 8 - Eficiência de coleta métodos empíricos	63
Tabela 9 - Eficiência de coleta por DFC	63
Tabela 10 - Eficiências de coleta DFC geometria alternativa	69
Tabela 11 - Eficiências de coleta DFC geometria alternativa	71

LISTA DE SIMBOLOS

- C_D - Coeficiente Arrasto
 D - Diâmetro da seção cilíndrica do ciclone (m)
 d_p - Diâmetro da partícula (m)
 g - Aceleração da gravidade (m/s^2)
 k - Energia Cinética Turbulenta (m^2/s^2)
 l_s - Fator de comprimento (m)
 L_{ij} - Tensor calculado (m^2/s^2)
 P - Pressão media estática do gás (N/m^2)
 p' - Pressão flutuante do gás (N/m^2)
 \bar{p} - Pressão estática calculada (N/m^2)
 r - Coordenada Radial (m)
 R - Raio da seção cilíndrica do ciclone (m)
 Re - Número de Reynolds relativo
 S_{ij} - Tensor de razão de deformação média (s^{-1})
 t - Tempo (s)
 T_{ij} - Tensor de escala de sub-malha (m^2/s^2)
 T_L - Integral lagrangiana da escala de tempo (s)
 u - Velocidade instantânea do gás (m/s)
 u' - Velocidade flutuante do gás (m/s)
 $\overline{u'}$ - Velocidade de escala sub-malha (m/s)
 \bar{u} - Velocidade calculada do gás (m/s)
 U - Velocidade média do gás (m/s)
 U_{ax} - Velocidade axial média do gás (m/s)
 U_{in} - Velocidade linear de entrada de gás (m/s)
 U_p - Velocidade média da partícula (m/s)
 U_{tan} - Velocidade tangencial média do gás (m/s)
 u'_{tan} - Velocidade tangencial flutuante do gás (m/s)
 u'_{ax} - Velocidade Axial flutuante do gás (m/s)
 V - Volume de uma célula (m^3)
 δ_{ij} - Delta de Kronecker
 ϵ_{ij} - Razão de dissipação da Energia Cinética Turbulenta (m^2/s^3)
 ν - Viscosidade cinemática do gás (m^2/s)
 ν_T - Viscosidade turbulenta de um turbilhão ($kg/m\ s$)
 μ - Viscosidade dinâmica do gás ($N\ s/m^2$)
 μ_T - Viscosidade turbulenta cinemática do gás (m^2/s)
 ρ - Densidade do gás (kg/m^3)
 ρ_p - Densidade da partícula (kg/m^3)
 τ_p - Tempo de resposta da partícula (s)
 τ_{ij} - Tensor de Reynolds (m^2/s^2)
 v_t - Componente tangencial da velocidade do gás (m/s)
 v_{ts} - Velocidade terminal da partícula (m/s)
 v_{ts}^* - Velocidade terminal da partícula estática (m/s)
 x_{50} - diâmetro de corte, coletado com 50% de eficiência (m)
 N - Número de revoluções do gás dentro do ciclone
 Q - Vazão volumétrica de gás (m^3/s)
 η - Eficiência de coleta
 ψ - Parâmetro de inércia do ciclone

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivos gerais	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	JUSTIFICATIVA	18
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1	Metodos empiricos	19
4.2	Modelos de turbulencia	21
4.3	Modelos de particulado	24
5	METODOLOGIA	26
5.1	Geometria	26
5.2	Dados de operação e granulometria	27
5.3	Métodos empíricos	29
5.3.1	Método de Lapple.....	29
5.3.2	Método de Barth	30
5.3.3	Método de Leicht-Licht	31
5.3.4	Método de Dietz	32
5.3.5	Método de Muschelknaultz.....	33
5.4	Métodos numéricos	34
5.4.1	Método DFC	34
5.4.2	Modelo de turbulencia	34
5.4.3	Modelo de particulado	35
5.5	Malha	36
5.6	Condições de contorno	38
5.6.1	Condições de contorno do escoamento de gás	38
5.6.2	Condições de contorno do particulado	39
5.7	Estratégias de solução	40
5.7.1	Estratégias de solução do escoamento de gás	40
5.7.1	Estratégias de solução do particulado.....	41
5.8	Estudo de independencia de malha	41
5.9	Metodologia para a validação de resultados	42
5.10	Solução final	43

6	VALIDAÇÃO DE RESULTADOS.....	44
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
7.1	Resultados do estudo de independência de malha	45
7.2	Pós processamento do escoamento de uma fase da geometria principal.....	50
7.2.1	Tempo de Residência.....	51
7.2.2	Contorno Y+	52
7.2.3	Contornos de Pressão.....	53
7.2.4	Contornos de Velocidade	54
7.2.5	Comparação com o ciclone padrão <i>Stairmand</i>	57
7.3	Análise da coleta de particulado	62
7.3.1	Resultados da eficiencia de coleta por métodos empíricos	62
7.3.2	Resultados da eficiencia de coleta pelo método DFC	65
7.3.3	Comparação da eficiência de coleta por métodos empíricos e DFC	68
7.3.4	Análise de coleta da geometria alternativa	69
8	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS.....	74

1 INTRODUÇÃO

Ciclones separadores de pó são equipamentos que possuem o objetivo de realizar a separação de partículas sólidas contidas em alguma corrente de gás.

São alternativas mais simples e baratas à utilização de filtros, e devido à ausência de partes móveis são opções de baixo custo e menor manutenção (HOFFMAN e STEIN, 2002).

Estes equipamentos podem operar com diversos tipos de particulado e em temperaturas extremas. São amplamente utilizados em diversos tipos de indústrias, principalmente com o intuito de reduzir a poluição atmosférica por partículas sólidas, como cinzas ou poluentes sólidos.

Também podem ser utilizados com objetivo de reciclo de material particulado, provindo de algum processo industrial, ou seja, devolver um material que seria descartado de volta para um processo produtivo.

Um ciclone convencional, Figura 1, consiste em um corpo cilíndrico sobre um corpo cônico, uma entrada tangencial na seção cilíndrica externa, e um tubo interior chamado de *'vortex finder'* o qual termina acima do corpo cilíndrico.

Figura 1 - Exemplo de um Ciclone industrial



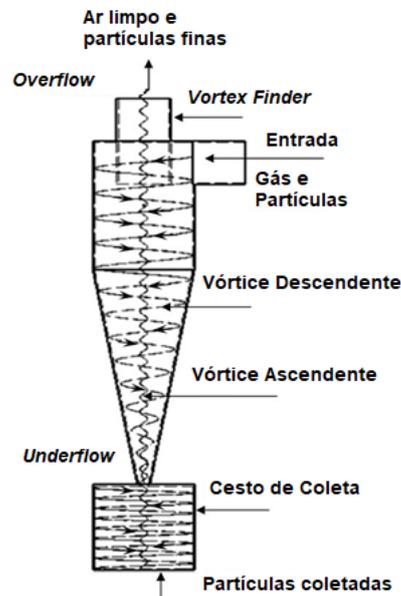
Fonte: GEA produtos, Ciclone de extra eficiência (2022)

Como representado na Figura 2, o ar entra tangencialmente no topo do corpo cilíndrico, escoando próximo a parede externa até a porção inferior do cone, formando um vórtice externo descendente.

O escoamento do ar tangente a parede resulta em uma força centrífuga sobre as partículas, o que as separa da corrente de ar.

As partículas ao chegarem à seção inferior do cone, caem em uma caixa de coleta, em sequência, a corrente de ar forma um vórtice interno ascendente com mesmo sentido de rotação que vórtice externo (WANG et al. 2003).

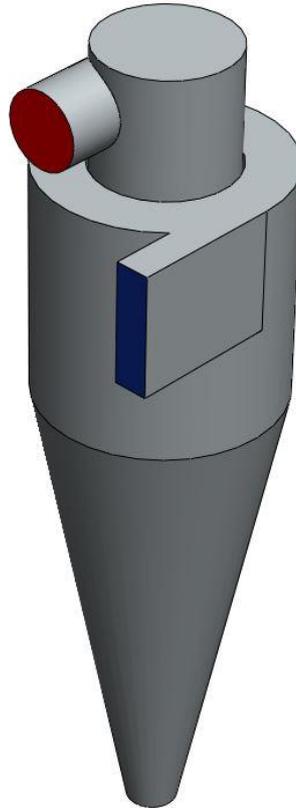
Figura 2 – Esquema do princípio de funcionamento de um ciclone *Stairmand* de alta eficiência.



Fonte: Adaptado SHUKLA et. Al, (2013)

Uma empresa situada em Londrina PR, utiliza-se de um ciclone de reciclo de particulado para um processo específico, onde está visualmente operando com uma eficiência abaixo da desejada, devido ao acúmulo de particulado na chaminé da saída do ciclone. Um modelo 3D do ciclone utilizado pela empresa pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Representação 3D do ciclone pertencente a empresa



Fonte: Autoria Própria (2022)

Como o ciclone separador de pó é um equipamento caracterizado pelo escoamento de ar e partículas, a sua eficiência é definida tanto em termos da capacidade de coleta de particulado, quanto pela queda de pressão promovida pelo separador.

Considerando que métodos numéricos são opções muito eficientes para modelar o escoamento, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC, ou em inglês, *Computational Fluid Dynamics* - CFD) é uma área que tem o objetivo de estudar escoamentos por meio de simulações numéricas.

Por meio desta abordagem, o domínio do escoamento pode ser discretizado em diversas células ou volumes, e em cada uma delas, as equações governantes de um escoamento são resolvidas numericamente.

Para a resolução das equações, as células possuem informações a quais são baseadas na sua localização dentro da geometria, interação com as células vizinhas e condições de contorno ao seu redor.

Desta forma é possível o estudo de geometrias complexas, nas quais resolver as equações analíticas seria algo pouco prático ou até mesmo impossível.

Em contrapartida este método possui um alto custo computacional, devido à alta quantidade de equações a serem resolvidas numericamente, resultantes de muitas células necessárias para discretizar o domínio geométrico com fidelidade.

2. OBJETIVOS

Esta seção apresenta de forma separada os objetivos deste estudo.

2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral do estudo é comparar resultados de eficiência de captação de partículas, obtidos a partir de métodos clássicos empíricos disponíveis na literatura, com resultados de uma simulação computacional (DFC), para um ciclone empregado em uma indústria regional.

Este ciclone opera com eficiência insuficiente para a demanda da empresa, onde os resultados podem identificar as limitações de métodos empíricos, demonstrando a capacidade e potencial de análises numéricas computacionais para este equipamento.

Estudando o comportamento do ciclone por meio destas análises, é possível eliminar hipóteses de baixa eficiência devido a um mal dimensionamento do equipamento.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica acerca de modelos empíricos para o dimensionamento de separadores ciclônicos;
- Implementar diferentes métodos empíricos e prever a curva de eficiência esperada para o ciclone em questão;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a modelagem via DFC de separadores ciclônicos, contemplando os principais modelos de turbulência e modelos de particulado.
- Realização da geometria 3D, malha e simular via DFC para obtenção de valores de eficiência de coleta.

3. JUSTIFICATIVA

O equipamento utilizado pela empresa encontra-se operando abaixo da eficiência desejada. Embora existam diversos métodos empíricos, eles não são generalizados para todas as variações de geometria, na realidade, como qualquer método empírico, só possuem validade dentro dos limites dos testes experimentais utilizados em seu desenvolvimento.

Atualmente não se sabe ao certo se a geometria utilizada foi dimensionada de forma correta ou se devido às restrições de espaço na planta industrial, as adaptações realizadas pela empresa levaram a uma eficiência inadequada. De forma que, a geometria do ciclone em questão aparentemente não se encaixa nas propostas por nenhuma das teorias empíricas mais utilizadas. Assim, uma análise numérica do equipamento via DFC é uma maneira eficiente verificar a eficiência de coleta, além de possibilitar um comparativo com os resultados obtidos por meio de métodos empíricos.

4. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho se baseia em apresentar os principais tópicos estudados pela literatura, conforme o objetivo específico do trabalho.

Nota se que os tópicos de maior importância a serem revisados, são os modelos empíricos para a determinação da eficiência de coleta, modelos de turbulência e modelos de particulado para simulações numéricas DFC.

Esses são os temas que mais possuem variação de escolha entre autores, e a correta escolha e interpretação são cruciais para o desenvolvimento de um trabalho com os objetivos propostos.

4.1. Revisão de modelos empíricos

Desde o início da existência do ciclone diversos autores desenvolveram métodos empíricos para estimar a eficiência de coleta e perda de carga.

No início da década de 1950, Lapple (1950) apresentou um modelo baseado no diâmetro de corte médio, ou conhecido como teoria do diâmetro crítico, onde assumia que o tamanho da partícula que transitasse da metade da largura da entrada até a parede, durante o seu tempo de residência, seria coletada com 50% de eficiência.

Apesar do método de Lapple (1950) ser um estudo reconhecido na literatura, devido a grandes simplificações assumidas, é considerado um método limitado, pois exceto para pequenos diâmetros de partículas e baixa velocidade de entrada, esta teoria subestima a eficiência consideravelmente (DIRGO e LEITH, 2007).

Dirgo e Leith (2007) avaliaram alguns dos métodos de eficiência de coleta mais citados na literatura, comparando os resultados de cada método com o resultado de eficiência de coleta experimental de um ciclone padrão *Stairmand* (STAIRMAND, 1951), ciclone esse baseado em estudos experimentais, e definido por relações de dimensões ideais para o projeto de ciclones.

Outro método empírico que surgiu na mesma década, se trata da abordagem da partícula estática (*Static Particle Approach*), “a qual é uma teoria baseada na análise do balanço de forças atuante em uma única partícula” (WANG et al. 2003).

Este método determina o diâmetro específico da partícula a qual a força centrífuga é exatamente equilibrada pela força de arrasto, assim assumindo que a

mesma rotaciona indefinidamente no centro do ciclone. Porém caso o diâmetro seja menor, a força de arrasto supera a força centrífuga e a partícula escapa pelo duto de *overflow*, caso o diâmetro seja maior, a partícula é coletada devido à força centrífuga superar o arrasto. A eficiência de coleta para a partícula de diâmetro crítico é assumida ser 50% (DIRGO e LEITH, 2007).

Dentro da abordagem de partícula estática, a teoria da eficiência de Barth (1956) é amplamente citada na literatura. Dirgo e Leith (2007) demonstram que esta teoria possui boa capacidade de prever a curva de eficiência para ciclones padrão *Stairmand*, porém cita que para outros modelos de ciclone a sua aplicabilidade é incerta.

Os estudos de Wang et al., (2003) também demonstram a aplicabilidade desta teoria, porém realçam um problema inerente a análise do balanço de forças, onde o modelo matemático é baseado na análise de uma única partícula, desconsiderando a distribuição do tamanho de partículas do material.

Um terceiro tipo de abordagem se trata da eficiência fracional, exemplificado pelas teorias de Leith-Licht (1972) e de Dietz (1981).

A teoria de Leith-Licht baseia-se na ideia de que a turbulência é suficiente para causar a mistura de partículas não coletadas, em qualquer plano perpendicular ao eixo axial do ciclone, produzindo uma concentração de pó uniforme, através de qualquer seção transversal, (*back mixing* em inglês), (WANG, 2004)

Assim desenvolveu-se um modelo para prever a eficiência de coleta de qualquer tamanho de partícula. O estudo de (LEITH e METHA, 1973) afirma que este método atua melhor que outros métodos presentes na literatura até então, considerando a data do estudo.

A teoria de Dietz (1981) baseia-se em um refinamento da teoria anterior, porém dividindo o ciclone em três regiões distintas e assumindo perfis de concentração uniformes para cada uma das regiões.

Os resultados do estudo de Dirgo e Leith (2007) apresentam que as considerações de completa mistura radial das partículas (*back mixing*) das duas teorias podem ter limitações na previsão de eficiência para certos tamanhos de partículas.

Assim Dirgo e Leith (2007) concluiu que esses resultados podem subestimar a eficiência de coleta para diâmetros grandes, e superestimar para as de pequeno diâmetro. Ressaltando novamente que o estudo foi realizado em um ciclone padrão

Stairmand, onde para outras geometrias de ciclone a aplicação é incerta (DIRGO e LEITH, 2007).

Uma abordagem diferente para a eficiência de coleta é desenvolvida por Muschelknautz (1980), categorizando se como teoria do carregamento crítico.

Considerando uma concentração de carregamento sólida, a qual é a capacidade de carregamento pelo gás, qualquer material em excesso deste carregamento é atingido pela parede, inicialmente sem classificação por tamanho. Já o resto do material sólido continua escoando para ser coletado, onde é separado aproximadamente como se o ciclone estivesse operando a baixos carregamentos.

Esta teoria apresenta que a variação do potencial de coleta pode ser analisada assumindo que o ciclone fraciona com uma eficiência inerente independente do carregamento, enquanto o material extra separado devido ao carregamento de sólidos, não é classificado e é removido na entrada do ciclone por algum mecanismo não relacionado (HOFFMAN et al, 1992).

Nessa teoria o cálculo desenvolvido assume que a potência disponível para a suspensão de partículas em um dado volume de gás é igual a razão do trabalho realizada pela perda de pressão.

Hoffman et al., (1992) demonstram que a teoria de Muschelknautz (1980) prevê a queda de pressão causada pelo carregamento de sólidos, devido a redução da velocidade tangencial pela maior fricção com a parede, porém ainda sim bem abaixo do que é observado experimentalmente.

Este método também acaba superestimando grosseiramente o valor de carregamento crítico e tendo as frações de partículas supostamente removidas na entrada não condizendo com os resultados obtidos.

4.2 Revisão de modelos de turbulência

Com o desenvolvimento de métodos numéricos para escoamentos de fluidos, Griffiths e Boysan (1996) demonstraram as capacidades de prever as características de escoamento, trajetória de partículas e perda de carga por meio da utilização da DFC.

Como o escoamento de ciclones se trata de um escoamento altamente turbulento, isso acarreta alguns desafios. Idealmente o método de volumes finitos deveria resolver as equações de *Navier-Stokes* diretamente, assim a turbulência seria

calculada completamente. Porém com exceção de geometrias muito simples, este tipo de processamento é inviável, devido ao altíssimo custo computacional, por isso os modelos de turbulência são utilizados (HOFFMANN e STEIN, 2002).

Diversos autores atribuíram a importância da implementação de um modelo de turbulência adequado, para a melhor representação do comportamento turbulento do escoamento (GRIFFITHS e BOYSAN, 1996).

Na literatura encontram-se modelos de turbulência de variadas complexidades, podendo ser divididos em categorias ou famílias, as quais cada uma possui suas particularidades na abordagem.

As três categorias mais comumente encontradas na literatura são: Simulações médias de Reynolds (RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*), simulações de grandes escalas (SGE ou em inglês LES - *Large Eddy Simulations*) e simulações numéricas diretas (SND ou em inglês DNS - *Direct Numeric Simulations*), sendo que a última especificamente não se trata de um modelo de turbulência, porém possui o mesmo objetivo (SLACK e BOYSAN, 2000).

Dentro da categoria RANS, os métodos tradicionais mais utilizados para geometrias axial-simétricas como $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ demonstraram-se inadequados para escoamentos altamente rotativos (*swirling-flows* em inglês) de acordo com Boysan et al., (1982).

O estudo realizado por Vaitiekunas e Jakstoniene (VAITIEKŪNAS e JAKŠTONIENĖ, 2010) aborda modelos $k-\varepsilon$ e RNG $k-\varepsilon$ para um ciclone, concluindo que os dois modelos apresentam distribuições de velocidade axial não realistas para esse tipo de equipamento.

Uma alternativa para métodos citados anteriormente, e se tratando possivelmente do modelo mais complexo dentro da categoria RANS, é o modelo de Tensões de Reynolds RSM (*Reynolds Stress Model*).

Este modelo é amplamente utilizado para este tipo de escoamento, “onde são resolvidas as equações de transporte para cada uma das tensões de Reynolds e resolvida a dissipação de transporte sem a necessidade de calcular um campo viscoso turbulento isotrópico” (GRIFFITHS e BOYSAN, 1996).

O modelo RSM apresenta um custo computacional maior comparado aos outros modelos RANS, porém com avanços na capacidade de processamento dos computadores, esse maior custo passa a ser aceitável.

O estudo de (VAITIEKŪNAS e JAKŠTONIENĖ, 2010) demonstra a melhor capacidade de previsão do escoamento axial com o método RSM comparado aos outros métodos RANS convencionais como $k-\epsilon$ e RNG $k-\epsilon$.

Estudos como (SHUKLA et al. 2013), (AZADI et al. 2010), (JIAO et al. 2007), (SAFIKHANI et al. 2010) e (HORVATH et al. 2008) demonstram a aplicabilidade do modelo RSM e a sua capacidade de descrever o comportamento rotativo do escoamento tridimensional dentro do ciclone.

Como citado anteriormente, por muito tempo o alto custo computacional foi considerado um problema para os estudos de ciclone, devido ao longo tempo para a execução do cálculo, onde modelos de turbulências mais fiéis ao escoamento fossem utilizados apenas em situações restritas, onde houvesse uma maior necessidade.

Com o avanço no desenvolvimento dos processadores de computadores, modelos de turbulência mais complexos passaram a ser mais utilizados, visto que o seu tempo de cálculo passou a diminuir com o avanço do poder computacional.

Uma família de modelos a qual passou a ser utilizada com maior frequência para o estudo de ciclones foi a SGE, a qual resolve as equações governantes completamente para grandes escalas de escoamentos flutuantes, e utiliza modelos de turbulência sub-malha para pequenas escalas (MARTIGNONI et al. 2007).

O modelo de Smagorinsky (SMAGORINSKY, 1963) é um exemplo de grande escolha dentro da literatura devido sua simplicidade em relação a outros modelos SGE (PISAREV et al. 2010).

Este tipo de abordagem pode trazer resultados mais realistas de turbulência que os métodos RANS, até mesmo prever alguns detalhes da estrutura de escoamentos turbulentos, como flutuações de pressão localizadas, algo que métodos RANS não são capazes (MARTIGNONI et al, 2007).

Porém para que seja possível a obtenção destes resultados é necessária uma malha muito mais refinada e um passo de tempo menor (GRONALD e DERKSEN, 2011).

Os modelos sub-malha são baseados no comportamento universal da turbulência além da sub-zona inercial, e como a malha determina quais turbilhões são resolvidos e quais devem ser modelados, a malha deve ser muito mais refinada, o que leva a um custo computacional muito mais elevado, sendo uma desvantagem da sua aplicação (GRONALD e DERKSEN, 2011).

Por último existe a SND, a qual trata em resolver as equações governantes por completo para o escoamento, sem assumir qualquer modelo de turbulência.

Neste caso mesmo com computadores avançados este método é aplicado apenas para estudos específicos e de geometrias extremamente simples, apenas quando realmente é necessário prever detalhes do escoamento turbulento, até onde se sabe, nenhum estudo envolvendo a SND de separador ciclônico foi publicado.

4.3 Revisão de modelos de particulado

Para a simulação de um escoamento bifásico, sendo a segunda fase sólida, diversas abordagens podem ser utilizadas dentro da DFC. O mais usual é tratar o fluido como um meio contínuo, utilizando um referencial Euleriano e o material particulado como um meio disperso em um referencial Lagrangiano.

Dentro da abordagem Euleriana-Lagrangia a interação entre as fases pode ser modelada com diferentes níveis de complexidade, indo do acoplamento de uma via até o acoplamento de quatro vias.

No acoplamento de uma via, a fase contínua exerce uma força resultante na fase dispersa, no entanto, o contrário não ocorre, ou seja, o material particulado sente a presença do escoamento, mas o escoamento não sente a presença do material particulado.

Na abordagem de duas vias, a interação entre fase dispersa e contínua é mais forte, e ambas as fases interagem entre si. Na abordagem de quatro vias não somente as fases contínuas e dispersa interagem como também a fase dispersa interage com ela mesma. Ou seja, a ocorrência de colisões partícula-partícula passa a ser considerada.

De forma geral, a necessidade de considerar uma maior interação entre as fases está intimamente relacionada com a física a ser simulada.

Como ciclones possuem em sua característica de operação um baixo fator de carregamento de pó, a literatura sugere o acoplamento de uma via entre as fases gás e material particulado, isso quando o objetivo for estudar a eficiência de coleta (MATSUZAKI et al, 2006; SHUKLA et al. 2013; SAFIKHANI et al. 2010; AZADI et al. 2010).

Considerando que as partículas sejam muito menores do que os elementos da malha, as forças envolvidas podem ser calculadas pelo método PIC (*Particle In Cell*).

Esta é a metodologia mais utilizada para escoamentos dispersos. No caso de escoamentos com carregamentos elevados ou densos, outras abordagens são possíveis, como, por exemplo, a abordagem Euleriana-Euleriana, onde tanto fluido quanto as partículas são tratadas como meios contínuos (HOFFMANN e STEIN, 2002).

A abordagem Euleriana-Lagrangiana, com acoplamento de uma via para o material particulado envolve em rastrear cada partícula pelo escoamento de gás, onde utiliza-se de um quadro de referência que segue a partícula pelo escoamento.

Neste caso as equações de movimento da partícula são resolvidas no escoamento de gás pré-calculado, onde as posições e velocidades da partícula são calculadas sucessivamente em intervalos curtos (HOFFMANN e STEIN, 2002).

Dentre diversos softwares de DFC, os quais possuem a opção de escoamento bifásico Euleriano-Lagrangiano, o software *Fluent* apresenta um modelo de fase discreta chamado DPM (*Discrete Phase Model*), onde este possui grande aceitação e utilização por diversos estudos

. Por meio deste modelo as características do material particulado são informadas ao programa, que realiza injeções de partículas conforme a configuração definida pelo autor, sendo utilizado em diversos artigos (SHUKLA et al. 2013; SAFIKHANI et al. 2010; AZADI et al. 2010).

Para estimar a flutuação de velocidade das partículas a literatura sugere a utilização do método DRW (*Discrete Random Walk*). Nesse modelo a flutuação dos componentes de velocidade é uma função do tempo discreta, onde seus valores são mantidos constantes para o intervalo de tempo de vida dos turbilhões.

As flutuações são modeladas assumindo que obedecem a uma distribuição de probabilidade gaussiana (SHUKLA et al, 2013), desta forma é possível estimar a dispersão turbulenta das partículas (AZADI et al. 2010).

O método DRW é o mais adequado para a previsão da flutuação de velocidade das partículas, quando não é possível obter um regime estatisticamente estabelecido para a quantidade de partículas dentro do ciclone (SHUKLA et al. 2013; SAFIKHANI et al. 2010; AZADI et al. 2010).

5. METODOLOGIA

Este tópico apresenta em sequência, os métodos utilizados para todas as simulações.

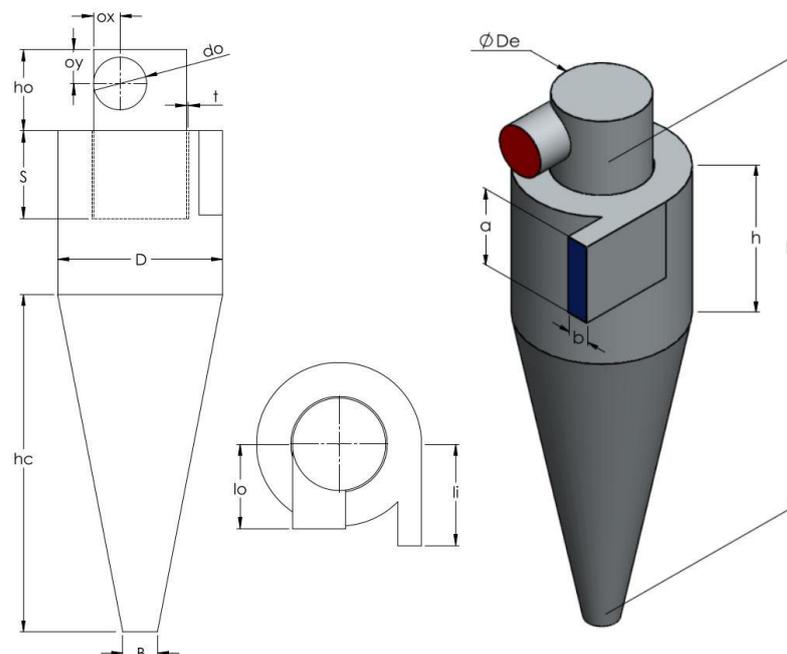
5.1 Geometria

Com as dimensões do ciclone fornecidas pela empresa é realizado o modelamento 3D do equipamento utilizando se do software paramétrico *SolidWorks*, conforme Figura 4.

Dentro das dimensões fornecidas, uma delas é desconhecida pela empresa, no caso o comprimento do *vortex finder* (S). Sabendo que este comprimento pode influenciar na eficiência de coleta, como identificado em estudos por (ELSAYED e LACOR , 2012), comprimentos mais curtos do *vortex finder* podem diminuir a eficiência de coleta, devido ao *bypass* de partículas da entrada para o duto de saída.

Desta forma serão consideradas duas geometrias, a principal com o comprimento do *vortex finder* igual a $0,52 \cdot D$, e uma alternativa, com o comprimento igual a $0,26 \cdot D$, metade do comprimento em relação ao padrão. No restante as geometrias são iguais. A geometria alternativa será analisada apenas para a eficiência de coleta.

Figura 4 - Representação da geometria do ciclone



Fonte: Autoria própria (2022)

As dimensões da geometria principal do ciclone podem ser vistas na tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões da Geometria Principal

Dimensão	Valor (mm)	Descrição
H	2970	Altura principal
h	970	Altura da seção cilíndrica
D	970	Diâmetro da seção cilíndrica
D_e	548	Diâmetro duto de <i>overflow</i>
D_o	312	Diâmetro da saída
h_o	480	Altura do duto de <i>overflow</i>
B	203	Diâmetro do duto de <i>underflow</i>
h_c	2000	Altura da seção cônica
a	500	Altura da entrada tangencial
b	140	Largura da entrada tangencial
S	520	Comprimento do <i>vortex finder</i>
l_i	600	Comprimento da entrada tangencial
l_o	500	Comprimento da saída
o_x	156	Distância horizontal da saída
o_y	20	Distância vertical da saída
t	10	Espessura do <i>vortex finder</i>

Fonte: Autoria Própria (2022)

As dimensões da geometria alternativa do ciclone são iguais ao da geometria principal com exceção da dimensão (S), como podem ser vistas na tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões da Geometria Alternativa

Dimensão	Valor (mm)	Descrição
S	260	Comprimento do <i>vortex finder</i>

Fonte: Autoria Própria (2022)

5.2 Dados de Operação e Particulado

Os dados de operação do ciclone, fornecidos pela empresa estão contidos na Tabela 3, devido aos dados serem específicos ao processo utilizado pela empresa, ela não é identificada por motivos de confidencialidade.

Tabela 3 Dados de operação.

Q_a (m ³ /h)	v_{in} (m/s)	Q_p (kg/h)	D_p (kg/m ³)
7500	29,762	30	200

Fonte: Dados fornecidos pela empresa.

Os dados do estudo de granulometria a laser fornecidos pela empresa, onde foram realizadas duas amostras, estão contidos na Tabela 4, e nos Gráficos 1 e 2.

O Gráfico 1 representa o percentual individual de cada diâmetro presente na distribuição das partículas, onde o Gráfico 2 representa uma distribuição acumulativa dos diâmetros de partículas, ou seja, para cada tamanho existe a o percentual de partículas que é igual ou menor a este.

Tabela 4 – Resultados da análise granulométrica.

Distribuição acumulada	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	$D_{médio}$ (μm)
Média das duas amostras	79,403	318,281	468,748	324,660

Fonte: Dados fornecidos pela empresa.

Gráfico 1– Distribuição Volumétrica

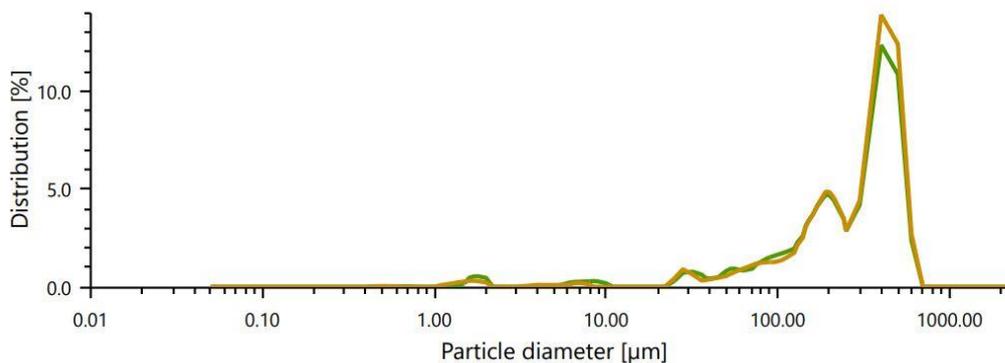
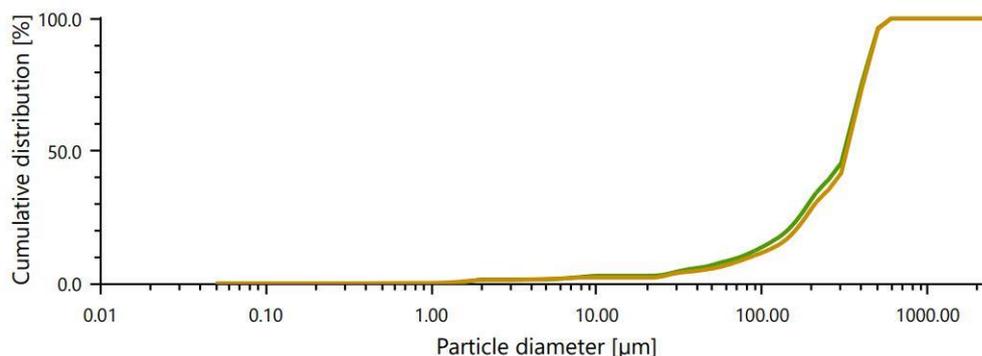


Gráfico 2 – Distribuição Volumétrica Acumulada



5.3 Métodos Empíricos

A eficiência de coleta pode ser determinada por diversos métodos empíricos comuns na literatura os quais necessitam apenas da geometria do equipamento, dados de operação e granulometria. Nesse trabalho, para a implementação de todos os métodos é utilizado o software EES.

5.3.1 Método de Lapple

Dentro da teoria do diâmetro crítico, o método de Lapple (LAPPLE, 1950) é o mais utilizado, onde o diâmetro crítico pode ser calculado pela Eq. (1):

$$x_{50} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi\rho_p v_i N}} \quad (1)$$

O valor de N, o qual representa o número de revoluções em um único tempo de residência, é assumido igual a 5 e foi obtido experimentalmente por (LAPPLE, 1950), porém o autor do método recomenda que para diferentes geometrias de ciclone este valor também deva ser obtido experimentalmente, no entanto, trabalhos publicados posteriormente continuam a utilizar o valor original proposto por Lapple (DIRGO e LEITH, 2007).

A determinação da eficiência de coleta pode ser realizada pela equação (2):

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_p}{x_{50}}\right)^{-2}} \quad (2)$$

5.3.2 Método de Barth

Pela abordagem da partícula estática, aplicando o método proposto por Barth (BARTH, 1956), é necessário estimar a razão da velocidade tangencial da partícula com velocidade tangencial estacionária apresentada na Eq. (3), onde v_{ts}^* é a velocidade tangencial da partícula estática.

$$\frac{v_{ts}}{v_{ts}^*} = \frac{\pi h^* v_t^2 \rho_p d_p^2}{9\mu Q} \quad (3)$$

Onde h^* se trata da altura do centro do ciclone, ou seja do início da seção cônica até o duto de *overflow*, já o valor de v_t^2 se trata da velocidade tangencial na extremidade do centro do ciclone, a qual pode ser determinada pela equação (4):

$$v_t = v_0 \left[\frac{\pi \left(\frac{D_e}{D}\right) (D - b)}{2ab\alpha + h^*(D - b)\lambda\pi} \right] \quad (4)$$

No caso λ é o fator de fricção e é assumido igual a 0,02. E α pode ser calculado pela Eq. (5):

$$\alpha = 1 - 1,2 \left(\frac{b}{D}\right) \quad (5)$$

Por fim a eficiência de coleta é definida pela Eq. (6):

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{v_{ts}}{v_{ts}^*}\right)^{-3,2}} \quad (6)$$

5.3.3 Método Leith- Licht

Para o primeiro método da abordagem por eficiência fracional, o método de Leith-Licht (LEITH e LICHT, 1972) tem a sua eficiência de coleta definida pela Eq. (7):

$$\eta = 1 - \exp \left[-2(C\psi)^{\frac{1}{(2n+2)}} \right] \quad (7)$$

Onde C é um fator de geometria adimensional, o qual pode ser calculado apenas com as razões das dimensões pelo diâmetro, ψ é um parâmetro de inércia modificado, o qual leva em conta as propriedades do gás e do material particulado, sendo definido pela Eq. (8):

$$\psi = \frac{\rho_p d_p^2 v_i (n + 1)}{18\mu D} \quad (8)$$

Para a obtenção do valor de n é necessário utilizar a Eq. (9) (ALEXANDER, 1949), onde n representa a mudança de velocidade tangencial com a variação da posição radial.

$$n = 1 - \left[(1 - 0,67D^{0,14}) \left(\frac{T}{283} \right)^{0,3} \right] \quad (9)$$

5.3.4 Método Dietz

Um segundo método para a abordagem da eficiência fracional é o método de Dietz (DIETZ, 1981), esse método, na realidade, é apenas um refinamento do método de Leicht-Licht, onde utilizam-se três funções K, as quais representam o comportamento de gás e particulado cada seção específica da geometria, visto que este método divide a geometria em três regiões separadas, sendo: a região de entrada, a região de escoamento descendente e a região do núcleo, a eficiência de coleta é dada pela Eq. (10):

$$\eta = 1 - [K_0 - (K_1^2 + K_2^2)^{0,5}] * \exp\left[\frac{-\pi(2S - a)\rho_p d_p^2 v_i}{18\mu ab}\right] \quad (10)$$

Onde os valores de K_0 , K_1 e K_2 são obtidos pelas Eq. (11), (12) e (13) respectivamente:

$$K_0 = 0,5 \left[1 + \left(\frac{D_e}{D}\right)^{2n} \left(1 + \frac{9\mu ab}{\pi\rho_p l d_p^2 v_i} \right) \right] \quad (11)$$

$$K_1 = 0,5 \left[1 - \left(\frac{D_e}{D}\right)^{2n} \left(1 + \frac{9\mu ab}{\pi\rho_p l d_p^2 v_i} \right) \right] \quad (12)$$

$$K_2 = \left(\frac{D_e}{D}\right)^{2n} \quad (13)$$

5.3.5 Método Muschelknautz

Para o método proposto por Muschelknautz (MUSCHELKNAUTZ, 1980) o diâmetro crítico para o carregamento pode ser definido pela Eq. (14) (HOFFMANN e STEIN, 2002):

$$x_{50} = \sqrt{\frac{18\mu(0,9Q)}{2\pi(\rho_p - \rho)v_{\theta cs}^2(H_t - S)}} \quad (14)$$

Para estimar a eficiência de coleta pode ser utilizada a Eq. (15):

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{50}}{d_p}\right)^m} \quad (15)$$

As duas equações apresentadas necessitam do fator de carregamento calculado, e da velocidade tangencial da partícula no centro do ciclone, devido a intenção de manter este tópico conciso, o leitor interessado é direcionado para o livro de Hoffmann e Stein (HOFFMANN e STEIN, 2002).

5.4 Método numérico

5.4.1 Modelo DFC

O solver a ser utilizado é o *Fluent*, o qual pertence a empresa ANSYS. O solver utiliza-se do método de volumes finitos com valores guardados no centróide de cada elemento, onde dentro de cada elemento, os valores variam linearmente em relação ao centróide. Generalizadamente este método se baseia na integração das equações governantes do escoamento para o volume de cada elemento, onde a resolução é específica para cada modelo de turbulência.

5.4.2 Modelo de Turbulência.

O modelo de turbulência utilizado nesse trabalho é o RSM (*Reynolds Stress Model*) que pertence a categoria de modelos RANS.

Tratando se de um escoamento turbulento transiente, isotérmico e incompressível, as equações para a conservação da massa e *Navier-Stokes* para este escoamento, podem ser expressas pelas Eq. (16) e (17) de acordo com o artigo Shukla et al., (2013) e com o guia de teoria do solver *Fluent* (ANSYS, 2013):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (16)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2\mu S_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (17)$$

Onde a velocidade u_i é decomposta no seu componente médio U_i e na flutuação u'_i na, como apresentado na Eq. (18):

$$u_i = U_i + u'_i \quad (18)$$

Os termos τ_{ij} e S_{ij} correspondem respectivamente à tensão de Reynolds e a tensão de deformação média, sendo apresentados nas Eq. (19) e (20).

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j} \quad (19)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (20)$$

Para o modelo RSM a consideração de viscosidade turbulenta isotrópica de Boussinesq não é aplicada, portanto as equações de transporte adicionais para as seis componentes independentes do tensor de Reynolds são resolvidas. A equação de transporte pode ser demonstrada pela Eq. (21)

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\tau_{ik} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \epsilon_{ij} - \prod_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + C_{ijk} \right] \quad (21)$$

O termo ϵ_{ij} representa o tensor de dissipação, \prod_{ij} o tensor correlação de pressão-deformação e C_{ijk} o tensor de transporte turbulento. Apresentados nas Eq. (22), (23) e (24), esses tensores necessitam ser modelados para o fechamento da equação (21).

$$\epsilon_{ij} = 2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \quad (22)$$

$$\prod_{ij} = \overline{p' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} \quad (23)$$

$$C_{ijk} = \overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_j} \delta_{jk} + \overline{p' u'_j} \delta_{ik} \quad (24)$$

5.4.3 Modelo de Particulado.

A abordagem Euleriana-Lagrangiana é escolhida para representar o comportamento do fluido e particulado, com um acoplamento de uma via, devido ao baixo carregamento de sólidos assumido.

Utilizando-se do modelo DPM encontrado no solver *Fluent*, no qual “a trajetória de uma partícula dispersa pode ser determinada pela integração da equação de balanço de forças atuante na partícula em um quadro de referência” (SHUKLA et al, 2013).

As equações simplificadas podem ser obtidas pelo guia teórico do solver *Fluent* (ANSYS, 2013).

O balanço de forças para uma única partícula dispersa pode ser expressa pela Eq. (25).

$$\frac{dU_{pi}}{dt} = F_D(U_i - U_{pi}) + \frac{(\rho_p - \rho)g_i}{\rho_p} + F_i \quad (25)$$

Onde U_{pi} é a velocidade e ρ_p a densidade da partícula, g_i a aceleração gravitacional e $F_D(U_i - U_{pi})$ representa a força de arrasto por unidade de massa, devido o deslizamento entre o gás e a partícula dispersa (SHUKLA et al, 2013). Para a representação de uma partícula esférica a força de arrasto é determinada pela Eq. (26):

$$F_D = \frac{18\mu C_d Re}{\rho_p d_p^2 24} \quad (26)$$

O número de Reynolds relativo pode é calculado pela Eq. (27):

$$Re = \frac{\rho d_p |U_p - U|}{\mu} \quad (27)$$

Para emular a flutuação da velocidade das partículas o método DRW é utilizado. Neste método os valores da flutuação de velocidade que prevalecem durante

a vida de um turbilhão podem ser modelados assumindo uma distribuição gaussiana de probabilidade, Eq. (28):

$$u'_i = \zeta \sqrt{\overline{u'_i u'_j}} \quad (28)$$

Onde ζ é um número de distribuição normal (SHUKLA et al, 2013).

5.5 Malha

Para a construção da malha utiliza-se como base a geometria 3D mostrada anteriormente, sendo importada ao Software *ICEM*. As malhas geradas são não estruturadas com blocagem realizada manualmente para todo o domínio do fluido.

A adequada discretização do domínio do fluido é fundamental para uma a correta solução numérica, por isso optou-se por utilizar apenas elementos hexaédricos. Embora seja possível a utilização de elementos tetraédricos, eles não se distorcerem adequadamente, resultando em elementos de menor qualidade (BHASKER, 2008).

Próximo à parede a malha deve ser refinada, ou seja, o tamanho dos elementos na direção normal a parede, é reduzido, para que seja possível a representação adequada do perfil de velocidade dentro da camada limite.

A variável adimensional Y^+ representa a altura da região da camada limite na qual se situa o primeiro elemento em contato com a parede, definindo assim quais equações serão utilizadas para essa região. Neste estudo o valor de Y^+ nas paredes deve estar entre 30 e 300, para que a lei logarítmica da velocidade média seja válida.

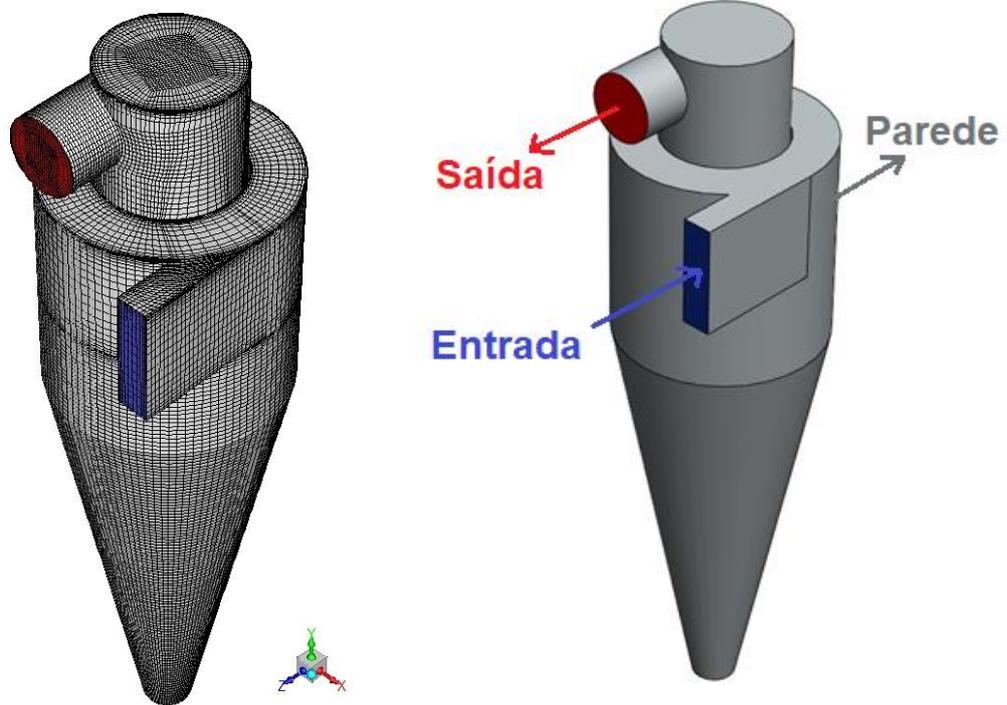
Embora Shukla et al., (2013) defina que o valor de Y^+ esteja entre 11 e 300, o guia do software *Fluent* explicita que deve ser evitado Y^+ de 11 a 30, devido a essa faixa se tratar de uma região de transição (*buffer layer*), a não ser que se trabalhe com a função *enhanced wall functions* presente no solver, a qual não é utilizada nesse trabalho.

A Fig. 5 a) apresenta uma malha citada com aproximadamente 511 mil elementos.

Figura 5 - Malha e Condições de Contorno.

a) Malha de 511 mil elementos

b) Representação condições de contorno



Fonte: Autoria própria

5.6 Condições de Contorno

As condições de contorno são definidas para as regiões de entrada (*Inlet*), paredes (*Wall*), interior (*Interior*) e saída (*Outlet*), tanto para o escoamento de gás, quanto para o modelo de fase discreta, como podem ser vistas na Fig. 5 b).

5.6.1 Condições de contorno do escoamento de gás

Para a condição de contorno da entrada, um perfil de velocidade uniforme é assumido na face da entrada tangencial de gás, sendo normal e constante à seção transversal da entrada, onde a sua magnitude é resultado da vazão média de gás, pela área da seção transversal. Quanto paredes internas (*Wall*), essas possuem condição de não deslizamento.

No duto de *underflow*, onde é realizada a coleta das partículas, será aplicada uma condição de parede sem deslizamento, pois na geometria em questão não é

incluído um tubo de coleta. Esta decisão se dá por finalidade de reduzir a quantidade de elementos da malha.

Ressalta se que no equipamento real, o duto de *underflow* funciona como saída de particulado, porém de acordo com literatura (SHUKLA et al, 2013), é comum tratar essa região como uma parede, ou seja, sem a saída do escoamento.

Essa condição costuma ser aplicada para evitar a possibilidade da entrada de um fluxo de ar ascendente para o interior do ciclone, visto que a pressão no interior é menor que a atmosférica, o que não representaria algo realista fisicamente, pois o duto de *underflow* está acima de um recipiente de coleta fechado.

Para as partículas que entrarem em contato com a parede do *underflow* serão coletadas.

Quanto a região da saída, pertencente ao duto de overflow, a condição de contorno aplicada é de pressão imposta (*Pressure Outlet*), como encontrado em vários estudos (SHUKLA et al, 2013; AZADI et al, 2010; MARTIGNONI et al 2006).

5.6.2 Condições de contorno do particulado

As condições de contorno para o material particulado são definidas no método DPM pertencente ao solver *Fluent*, onde são setadas injeções de partículas na entrada tangencial do ciclone.

Para a região de entrada não é necessário definir nenhuma condição, já para parede é definido como uma condição que reflete as partículas que entram em contato. Para o duto de *underflow* é definido como captura, e para o de *overflow* como escape.

Para cada injeção são definidos os seus parâmetros, como velocidade de entrada, vazão e diâmetro da partícula, pois este método considera a partícula como uma esfera.

A partir das definições da injeção e as características do material particulado, o método DPM define a quantidade de partículas de cada diâmetro a ser injetadas.

Para cada diâmetro a ser avaliado, uma nova injeção é definida, com todos os parâmetros iguais com exceção, do diâmetro em si.

As partículas são rastreadas e as que entrarem em contato com a parede do duto de *underflow* são consideradas como coletadas e as quais saírem pelo *overflow* são consideradas como perdidas.

Ao final da simulação o método informa quantas partículas foram coletadas e quantas escaparam, de acordo com cada diâmetro fornecido. O método DRW, para emular as flutuações do campo instantâneo de velocidade no movimento das partículas é aplicado assim como realizado por Shukla et al., (2013).

5.7 Estratégias de Solução

Como a solução é realizada primeiro apenas com o escoamento de gás, e posteriormente durante o pós-processamento é simulado o escoamento com particulado, este tópico foi separado, visto que para a independência de malha e validação de resultados, foram apenas realizados a simulação do escoamento de gás, sem o particulado.

5.7.1 Estratégias de solução do escoamento de gás.

A solução do modelo RSM se inicia em regime permanente, até atingir uma quantidade indefinida de iterações, onde os valores residuais não continuem diminuindo significativamente e passam a oscilar periodicamente sem grandes variações.

Este primeiro passo é utilizado para acelerar a convergência para os próximos passos. Após atingido esse número de iterações, o cálculo é continuado como um regime transiente, com passo de tempo fixo de 0,1 ms, com o critério de convergência absoluto para todas as variáveis fixo em $1e-5$ (SHUKLA et al, 2013). A simulação continua até que o sejam obtidos pelo menos três tempos de residência.

O tempo de residência é determinado logo após o término da simulação permanente, por meio do pós-processamento, analisando o tempo total em que as linhas de corrente plotadas a partir da entrada demoram para atingir a saída do equipamento.

Para a convergência da solução, dentro dos algoritmos presentes no solver, foi escolhido o SIMPLE para acoplamento pressão e velocidade, onde este algoritmo possui a finalidade de discretizar as equações parciais, pode se notar que este é o mais utilizado devido a sua simplicidade.

Como este método apresentou boa convergência, acabou se dispensando outros métodos como SIMPLEC e *Coupled*. Quanto a interpolação de variáveis na

superfície de controle, onde, velocidade, pressão e turbulência, serão utilizados métodos de segunda ordem (*second order upwind*), conforme sugerido pela literatura.

Para todas as geometrias de ciclone consideradas, foram utilizadas a mesma estratégia de solução.

5.7.1 Estratégias de solução do escoamento de particulado

Para o escoamento de particulado, onde se trata de um escoamento bifásico, foi definido o acoplamento de uma via, portanto o método DPM foi aplicado.

Se tratando de um método utilizado como pós processamento, após o término da simulação em regime transiente, são realizadas as injeções de particulado pelo método DPM, juntamente com a aplicação do modelo DRW.

5.8 Estudos de Independência de Malha

O estudo de independência de malha tem o objetivo de selecionar a malha mais eficiente em razão dos resultados obtidos e custo computacional, como assumido um modelo de turbulência da categoria RANS.

Durante o refino de malha, existe um momento que a malha passa ser refinada o suficiente, a ponto de acréscimos no refino não acarretarem diferenças significativas nos resultados da solução, com a contrapartida de aumentarem o custo computacional, neste momento é razoável assumir que a simulação se tornou independente da malha. Ou seja, os resultados não são afetados por um maior refino da malha.

Considerando o modelo tridimensional e representando o total volume do domínio de escoamento, a quantidade de elementos já é grande o suficiente para levar a tempos de cálculos longos.

Com o objetivo de ter uma relação eficiente de custo computacional, é realizado um estudo com duas malhas com número de elementos diferentes, a primeira com 255 mil elementos e a segunda com 511 mil elementos, o que se aproxima aos valores de quantidade de elementos utilizados em outros estudos (SHUKLA et al, 2013).

Partindo do suposto de que se o escoamento Euleriano encontra-se independente da malha, assume-se que o comportamento Lagrangiano das partículas também será independente.

Desta forma, com a finalidade de reduzir o tempo de solução, os estudos de independência de malha utilizam de todos os métodos citados anteriormente com exceção da injeção de partículas, onde será analisado o perfil de velocidade apenas do escoamento de ar, sem a presença de partículas.

Serão plotados os gráficos de velocidade adimensional no plano XY no comprimento do diâmetro do equipamento em duas alturas diferentes, o primeiro no corpo cilíndrico principal e outro na seção do cone, como realizado no estudo por (SHUKLA et al, 2013), (AZADI et al, 2010) e (MARTIGNONI et al, 2006).

5.9 Metodologia para a validação de resultados

Para garantir que a metodologia aplicada ao ciclone esteja fisicamente coerente com a operação real, é necessário comparar os resultados da simulação com resultados obtidos empiricamente, porém para este ciclone em questão, não existem experimentos realizados.

Uma outra forma de validar os resultados é simular o escoamento de um outro ciclone que já possui resultados experimentais, aplicando exatamente a mesma metodologia utilizada para o ciclone deste estudo.

Para esta validação ser possível, todos os passos anteriores de metodologia, com exceto a geometria e vazão de gás, serão mantidos iguais. Se a aplicação destes métodos propostos simularem perfis de velocidade próximos às coletadas experimentalmente, a física da simulação é coerente com a do experimento.

Para o procedimento de validação optou-se por simular o ciclone estudado por Hoekstra (2000), o qual foi o mesmo utilizado nos estudos de Shukla et Al (2013) e Shukla et Al (2010). O procedimento de validação está descrito no capítulo 6.

5.10 Solução final

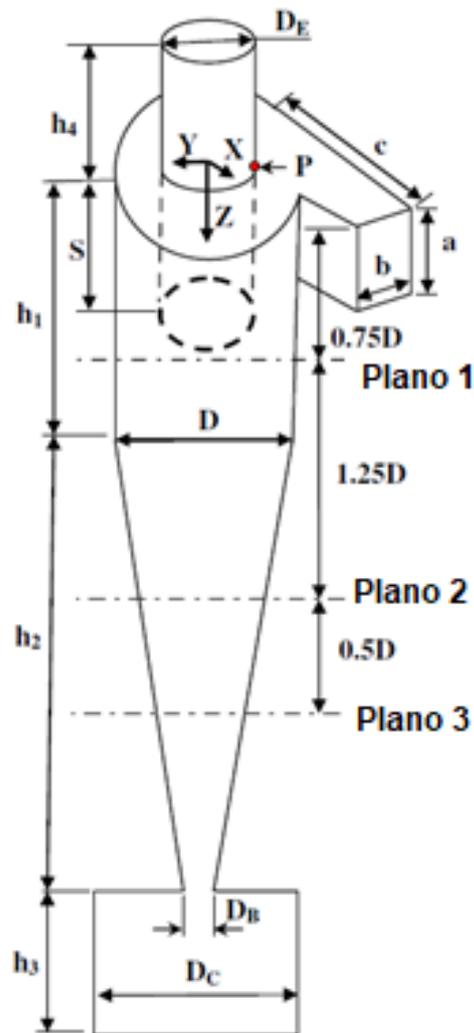
Após definida a malha a ser utilizada e levando em conta a estratégia de solução anterior, a solução final, com a injeção de particulados, pode ser obtida.

Visto que esse estudo não possui resultados experimentais sobre o funcionamento do específico do equipamento em questão. Uma variação da geometria (comprimento do *vortex finder*) também é testada a fim de avaliar mudanças no comportamento do escoamento.

6. VALIDAÇÃO DE RESULTADOS

O ciclone modelado é referente ao experimento realizado por Hoekstra (2000). Sendo suas dimensões apresentadas na Fig. 6 e Tabela 5.

Figura 6 – Geometria do ciclone Hoekstra



Fonte: Adaptado SHUKLA et Al, (2010).

As dimensões são fornecidas pela Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões do ciclone ($D = 290$ mm).

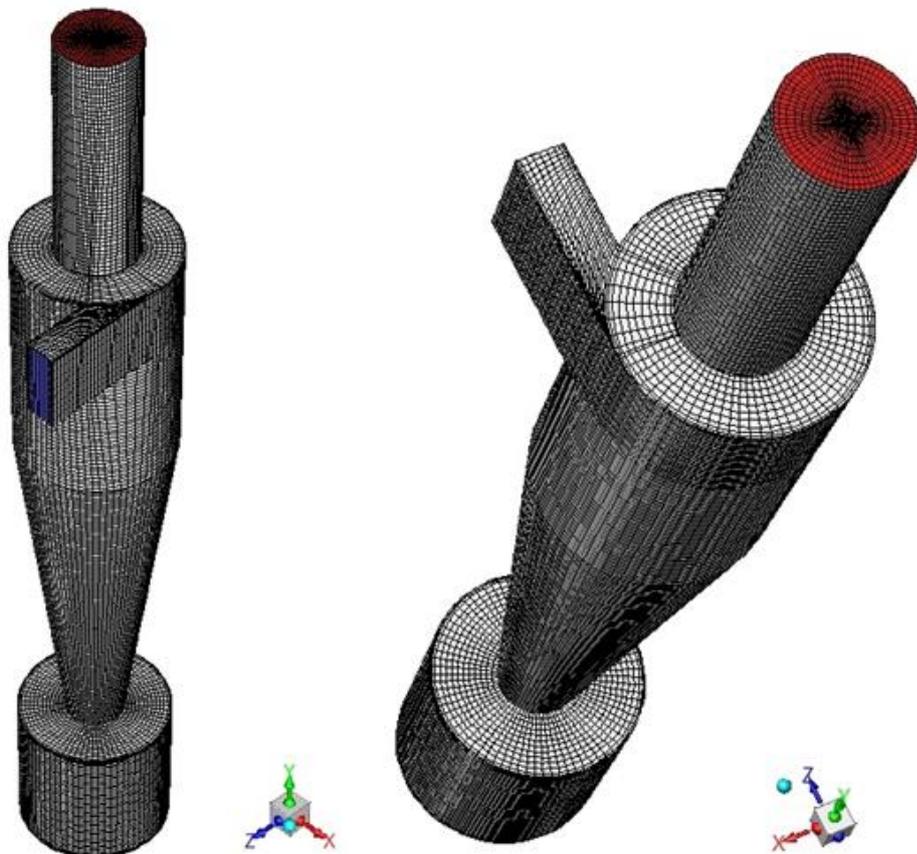
a	b	c	h_1	h_2	h_3	h_4	D_c	D_d	D_e	S
$0,5D$	$0,2D$	$0,85D$	$1,5D$	$2,5D$	$1,0D$	$1,5D$	$1,0D$	$0,37D$	$0,5D$	$0,5D$

Fonte: SHUKLA et Al, (2010).

Um modelo 3D foi realizado a partir da geometria utilizada no experimento (HOESKTRA, 2000), em seguida uma malha de hexaédrica por blocagem manual foi criada no *software* ICEM, com base na mesma metodologia usada anteriormente.

A malha gerada para esse ciclone possui 492 mil elementos, Fig. 7, e considerando que nos estudos de Shukla et. al, (2010) a malha utilizada possuía 462 mil elementos, para esta validação o estudo de independência de malha foi dispensado, visto que os resultados já indicarão se a malha está adequada.

Figura 7 - Malha do ciclone para validação dos resultados



Fonte: Autoria Própria (2022)

As condições de contorno, foram definidas iguais às do ciclone original. Neste caso a vazão de gás gera uma velocidade na entrada igual a 16,1 m/s, como proposto por (HOESKTRA, 2000), se diferenciando da velocidade de entrada do ciclone original, a qual possui a magnitude de 29,762 m/s.

Os modelos de turbulência e estratégias de soluções são exatamente os mesmos definidos anteriormente.

Após o término da simulação, os perfis de velocidade média tangencial e axial adimensionais são plotados e comparados com obtidos por anemometria a laser por Hoekstra, (2000).

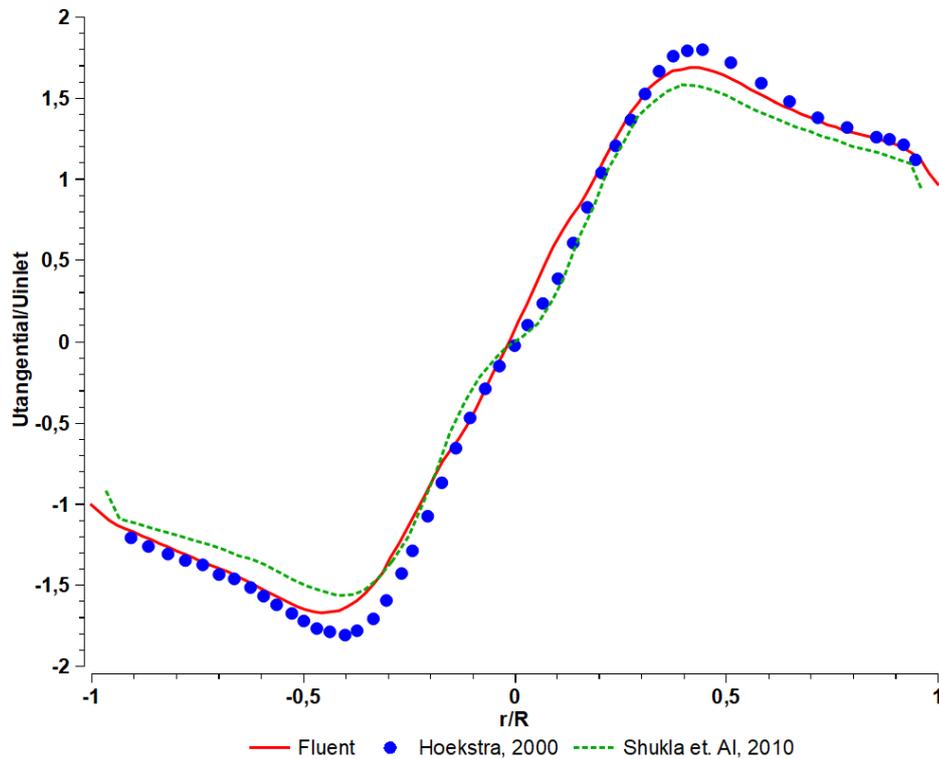
Para a comparação foi utilizado o plano XY, na altura z igual $-0,75*D$, como representado na Fig. 6 por “Plano 1”. Esses gráficos tiveram os seus pontos extraídos como coordenadas pelo *software Engauge*, em seguida importados ao pós-processamento do *Fluent* para poderem ser comparados.

Da mesma forma, os resultados contidos no trabalho (SHUKLA et Al, 2010) também foram extraídos e importados. Especificamente foram importados apenas os perfis de velocidade das simulações que possuíam a mesma solução de estratégia que a simulação do ciclone principal deste estudo.

O escoamento foi simulado até que um regime estatisticamente estabelecido fosse atingido. Isso correspondeu a um tempo físico de aproximadamente 3 segundos.

Os perfis de velocidade tangencial média e velocidade axial média, ambos adimensionais, são apresentados nos Gráficos (3) e (4) respectivamente.

Gráfico 3 - Perfis de Velocidade Tangencial Média Adimensional



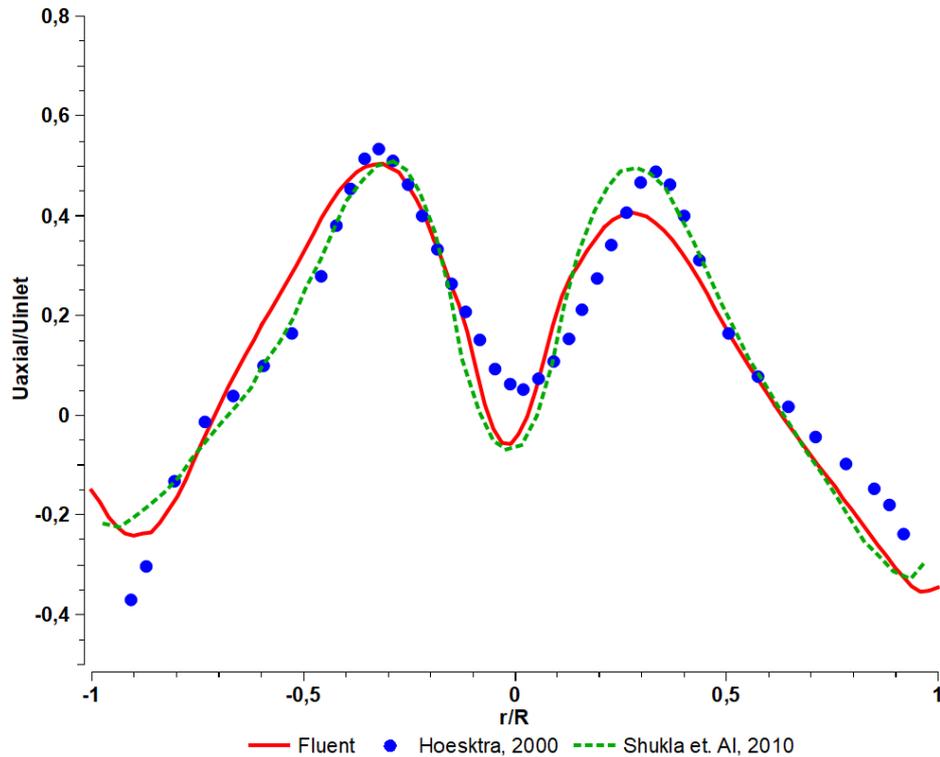
Fonte: Autoria Própria

Onde para o perfil de velocidade tangencial médio a simulação realizada neste estudo (*Fluent*) teve resultados muito próximos aos experimentais, como por exemplo variação inferior a 5% de velocidade para as regiões externas ($-1 < r/R < -0,5$) e ($-0,5 < r/R < 1$), e para a região central ($-0,25 < r/R < 0,25$). Para as regiões de r/R igual a $-0,5$ e $0,5$ a variação foi superior a 5% em alguns pontos devido a característica natural do escoamento, por se tratar da região de maior velocidade tangencial do ciclone, o que pode levar uma variação grande dos valores obtidos, inclusive a simulação *Fluent* previu uma diferença menor do que os valores da simulação de (SHUKLA et al, 2010) em relação ao experimental.

É possível notar que os valores máximos de velocidade tangencial obtidos experimentalmente, são ligeiramente maiores que o obtido na simulação deste trabalho, o que é comum ao comparar resultados experimentais com numéricos.

A partir do Gráfico 4 é possível comparar os resultados de perfis de velocidade axial média.

Gráfico 4 Perfil de Velocidade Axial Média Adimensional



Fonte: Autoria Própria

Para o perfil de velocidade axial médio, ambas as simulações tiveram uma maior discrepância para o experimental em relação ao perfil de velocidade tangencial, isso se deve, devido à complexidade do escoamento altamente rotativo do ciclone, onde velocidades as velocidades axiais são muito mais difíceis de prever que as tangenciais.

Porém mesmo com algumas variações nos picos de velocidade, o perfil de velocidade simulado neste estudo (*Fluent*) se encontra próximo o suficiente dos perfis (SHUKLA et al, 2010) e (HOEKSTRA, 2000).

Portanto conclui se que esta metodologia está validada, assim os resultados obtidos para a geometria do ciclone proposto deste trabalho são validos.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção discute todos os resultados obtidos pelas simulações realizadas na geometria principal do ciclone local e no ciclone utilizado na seção anterior para validação de resultados.

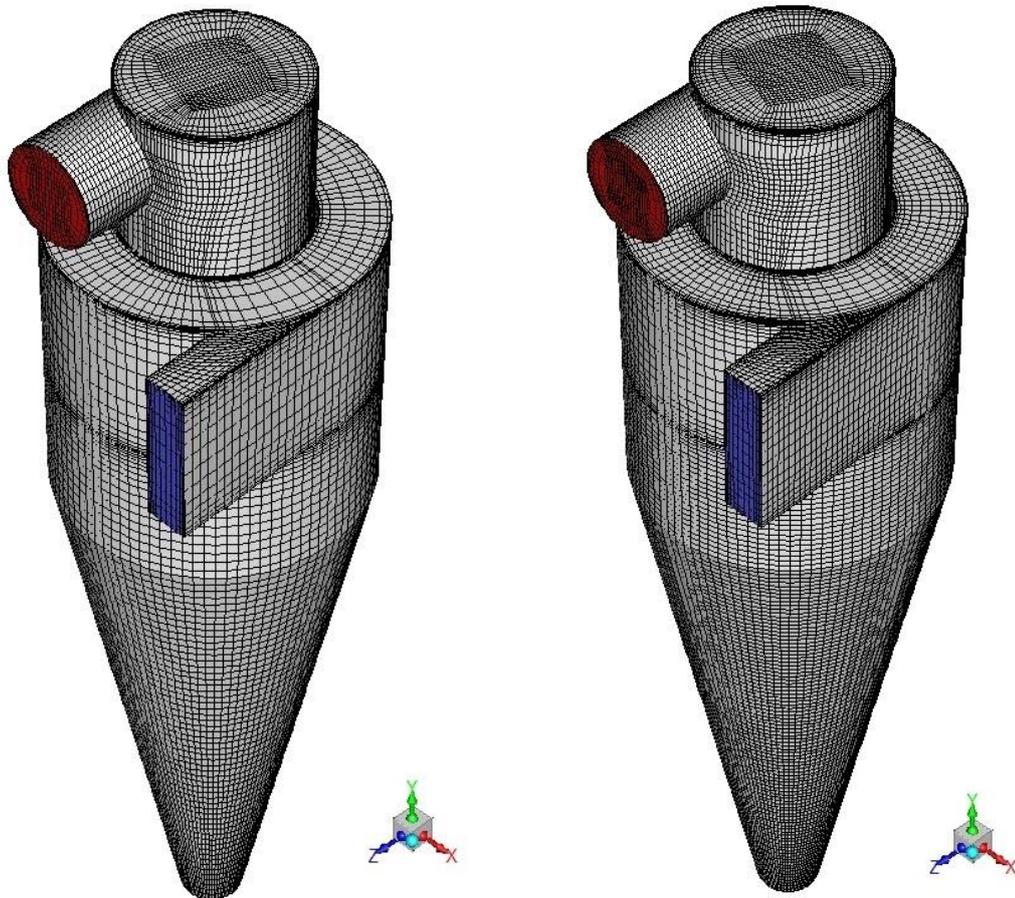
7.1 Resultados do estudo de independência de malha

As malhas de 255 e 511 mil elementos foram utilizadas em simulações por aproximadamente dois tempos médios de residência (~2 segundos). As malhas podem ser vistas na Fig 8.

Figura 8 – Duas resoluções de Malhas

a) Malha 255 mil elementos

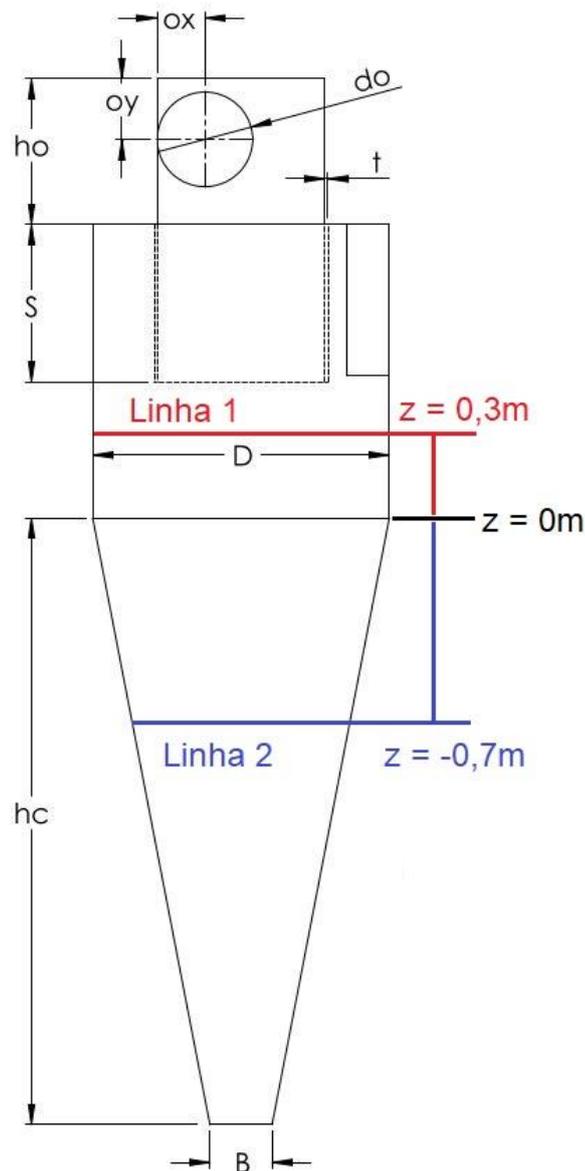
b) Malha 511 mil elementos



Fonte: Autoria Própria

Para cada malha, foram plotados os perfis de velocidade média tangencial e axial, em duas linhas no plano XY, a primeira na altura $z = 0,3\text{m}$ e a segunda em $z = -0,7\text{m}$. As alturas foram escolhidas com base na literatura, uma linha na seção cilíndrica e outra na seção cônica, conforme representado na Fig. 9.

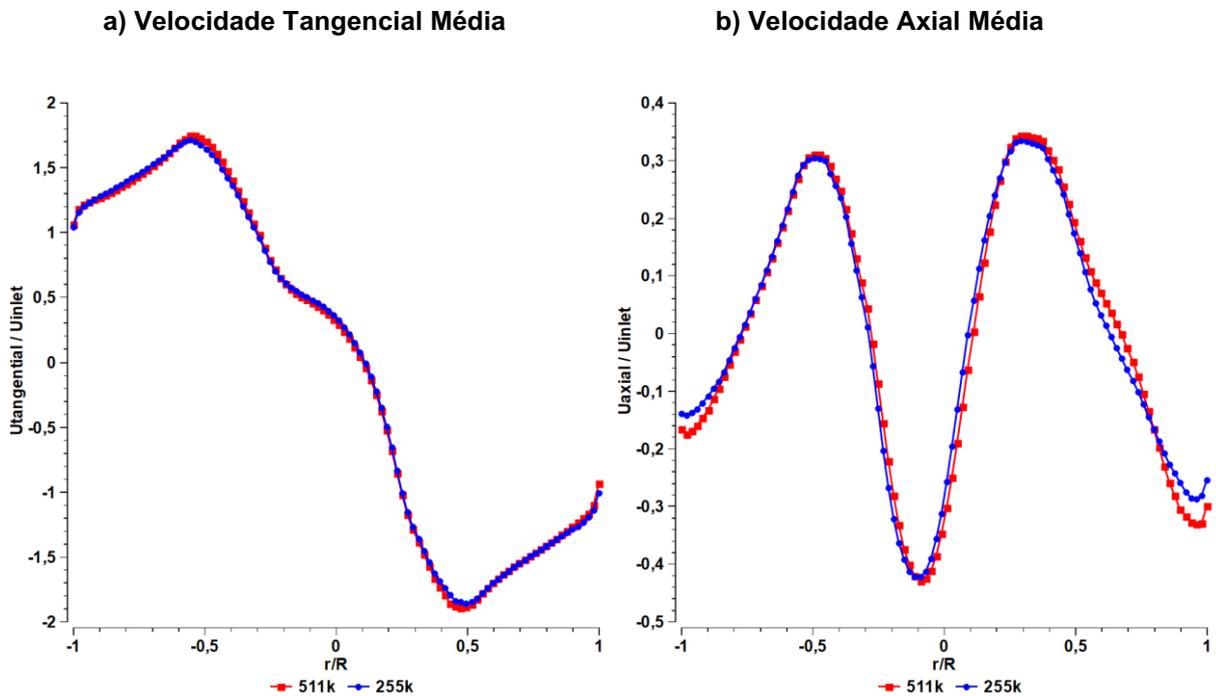
Figura 9 - Linhas no plano XY



Fonte: Autoria Própria (2022)

Na linha 1 os perfis estão representados pelos Gráficos 5 a) e b):

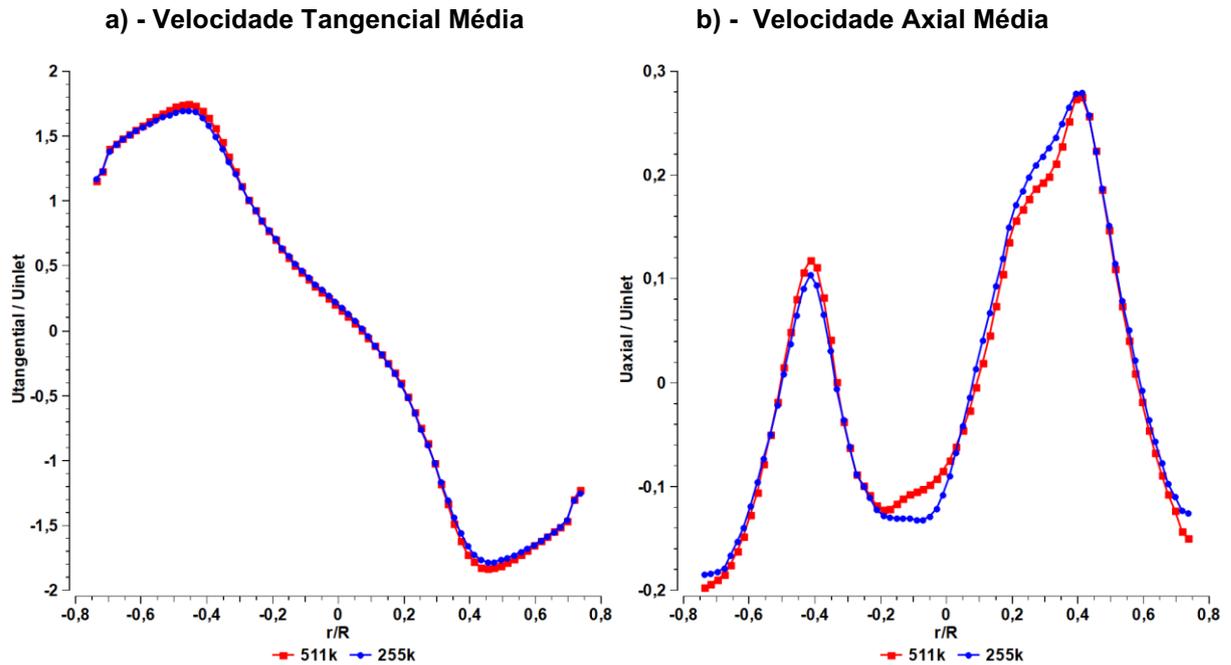
Gráfico 5 – Comparação de Perfis de Velocidade Adimensional na Linha 1.



Para a velocidade tangencial média, a variação é muito pequena na maioria dos pontos, ficando abaixo de 5% entre uma malha e outra. Considerando a velocidade axial média, existe uma variação ligeiramente maior nas regiões próximo a parede, devido o refino da malha ser mais pobre nesta região, para a amostra de 255 mil elementos, porém com exceção desta região de parede, a variação das velocidades entre as amostras encontra se abaixo dos 10%, nota se que apesar de um leve deslocamento das duas curvas, em valores absolutos ambas possuem velocidades máximas e mínimas muito semelhantes.

Semelhantemente na linha 2 os gráficos (6) a) e b) demonstram a mesma comparação.

Gráfico 6 – Comparação de Perfis de Velocidade Adimensional na Linha 2.



O mesmo ocorre na linha 2, onde os gráficos de velocidade tangencial média possuem valores muito próximos, em alguns pontos chegando a 7% de variação.

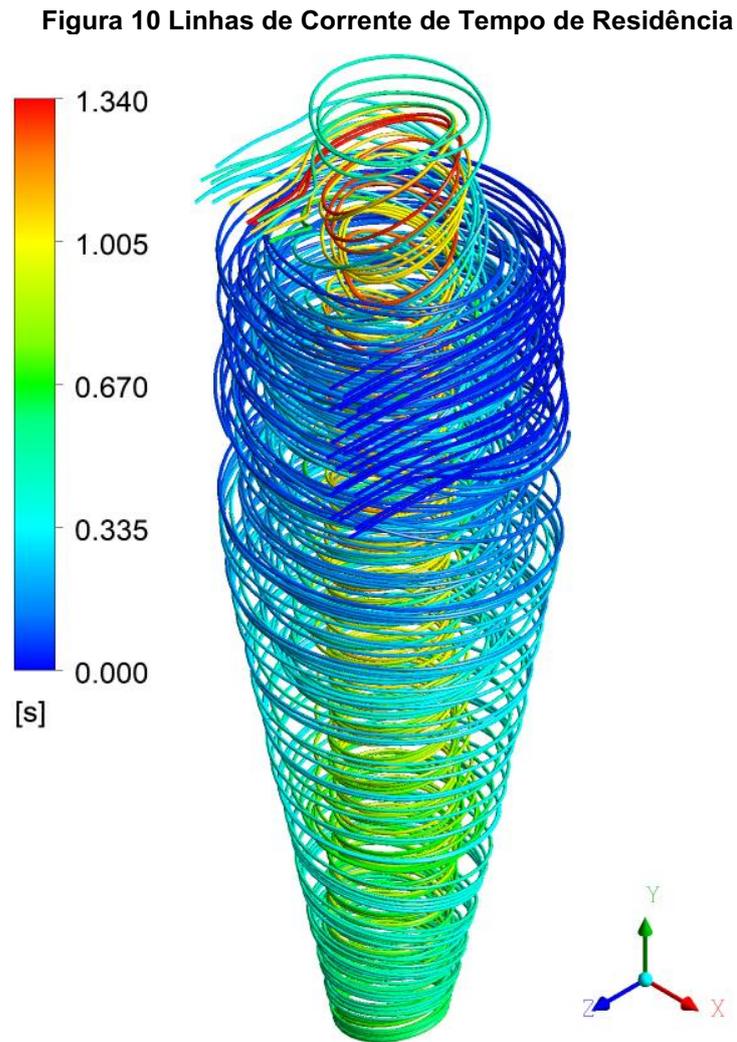
Para o gráfico de velocidade axial média a variação novamente é maior, porém muito se dá pela grande instabilidade do vórtice na região interna.

Como a variação dos perfis de velocidade das duas malhas suficientemente pequena, pode se afirmar que a malha de 511 mil elementos possui os seus resultados independentes da malha.

7.2 Pós processamento do escoamento de uma fase da geometria principal

7.2.1 Tempo de Residência

A partir das linhas de corrente é possível estimar um tempo médio de residência, onde diferentes correntes de ar saem do ciclone com maior ou menor tempo, em média, de 0,335 até 1,34 segundos, como representado na Fig. 10.



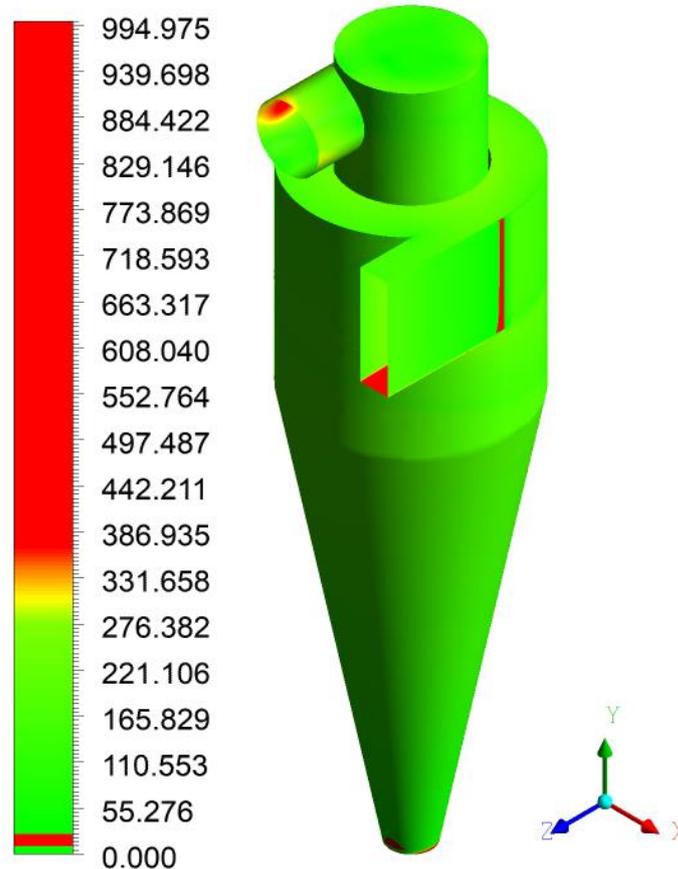
Fonte: Autoria Própria (2022)

O valor de 1 segundo foi considerado como um tempo de residência médio, visto que é apenas um parâmetro aproximado para o tempo de simulação transiente.

7.2.2 Contorno Y+

O contorno Y+ nas paredes do ciclone é apresentado na Fig. 11.

Figura 11 - Contorno função parede Y+



Fonte: Autoria Própria

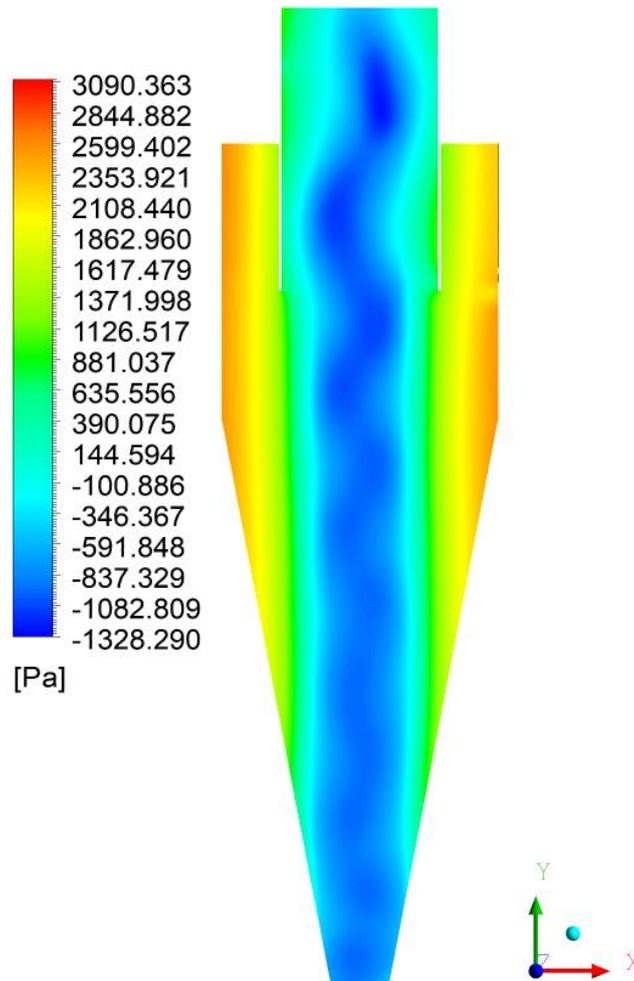
As cores vermelhas representam valores de Y+ indesejados, entre 11 e 30, e maiores que 300. Porém em algumas regiões estes valores não possuem impacto relevante, como por exemplo em alguns elementos da entrada, onde a malha possui uma grande distorção e as velocidades próximas a parede são altas.

Em alguns pontos onde a velocidade cai bastante próximo a parede o valor de Y+ acaba ficando entre 11 e 30, porém são poucos elementos na saída de coleta do ciclone, onde para o resto das paredes, o valor de Y+ fica dentro do desejado.

7.2.3 Contornos de Pressão.

O contorno de pressão foi obtido em uma secção transversal, representada no plano XY. A Fig. (12) representa este contorno.

Figura 12 Contorno de Pressão médio Plano XY



Fonte: Autoria Própria

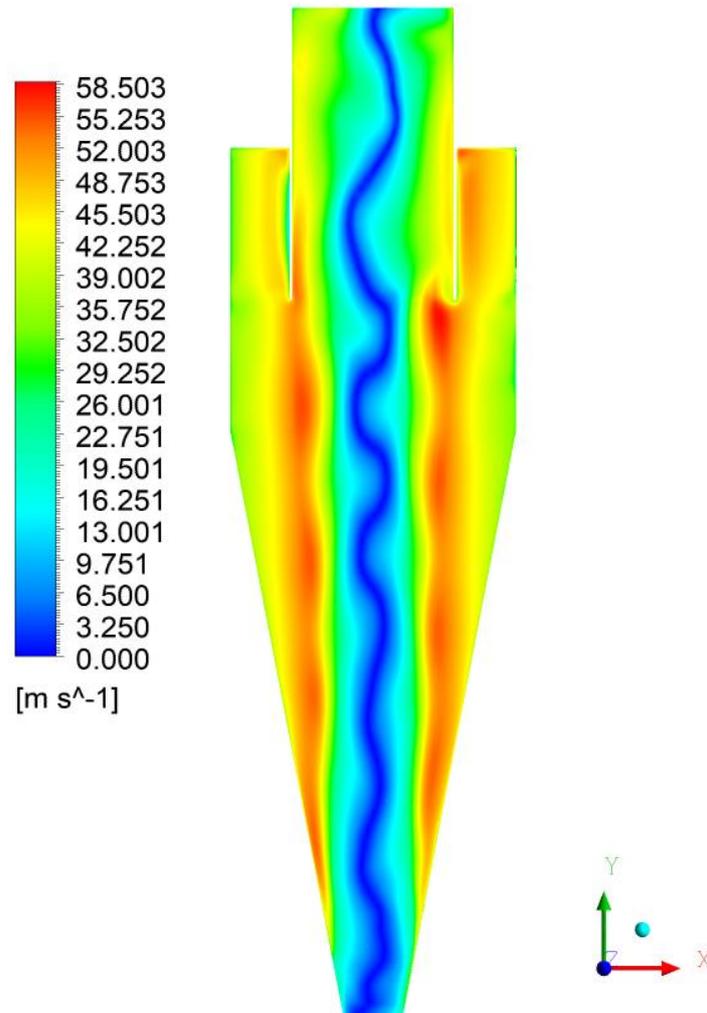
Nota-se, como de usual, que a pressão aumenta radialmente do centro para a parede, ou seja, ocorrem uma elevação da pressão com a distância radial. Neste caso específico existe uma grande diferença de pressão da parede ao centro, algo que pode ser caracterizado pela relação geométrica deste ciclone.

Outro ponto visível neste contorno é a presença de vórtice muito largo e muito instável, onde este é mais largo do que saída de coleta do ciclone, isto devido o cone ser relativamente curto em relação ao diâmetro e a saída ser muito estreita.

7.2.4 Contornos de Velocidade

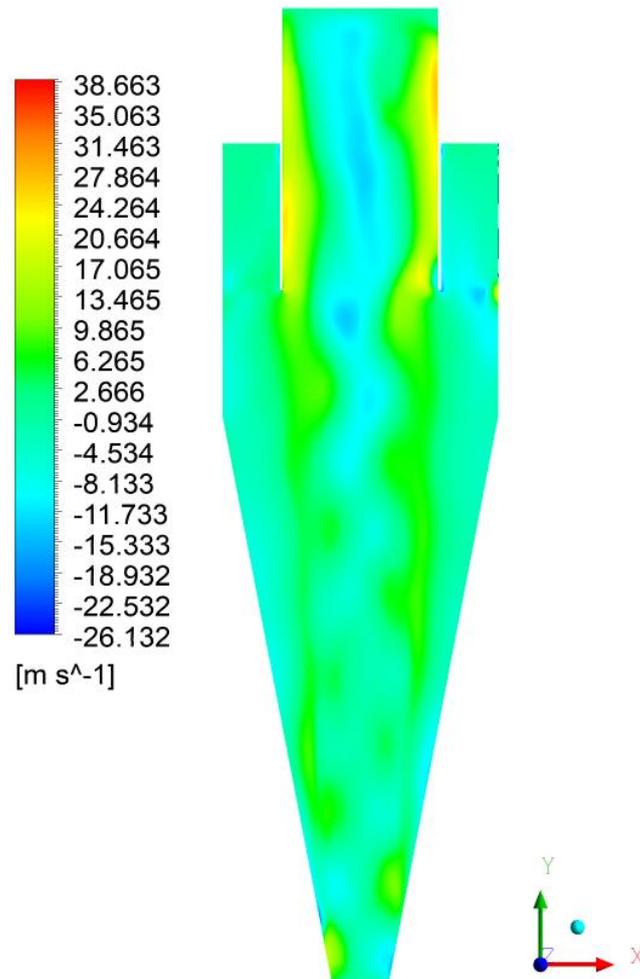
Os contornos de velocidades tangenciais e axiais médios podem ser vistos nas Figs. 13 e 14 respectivamente.

Figura 13 Contorno de Velocidade Tangencial Média Absoluta no Plano XY



Fonte: Autoria Própria

Por meio deste contorno de velocidade, pode se observar novamente a instabilidade de vórtice interno, causado pelos motivos já citados anteriormente.

Figura 14 Contorno de Velocidade Axial Média no plano XY

Fonte: Autoria Própria

Neste contorno é possível demonstrar a grande variação na direção axial do escoamento, no centro do ciclone é observa-se uma região de escoamento reverso, ou seja, descendente, por isso, uma grande dificuldade de obtenção de perfis de velocidades axiais consistentes.

7.2.5 Comparação com o ciclone padrão *Stairmand*

É possível realizar uma comparação não quantitativa dos contornos de diferentes ciclones, neste caso, comparar características do ciclone principal deste estudo com o ciclone que foi utilizado para a validação de resultados.

O intuito da comparação é ressaltar a diferença do comportamento do vórtice interno para ciclones com razões geométricas diferentes. Onde diversos ciclones seguem padrões de geometrias específicas, por exemplo, o ciclone estudado por (HOEKSTRA, 2000) se trata de um ciclone de alta eficiência *Stairmand*.

A Tabela 6 demonstra como ciclone utilizado neste estudo se diferencia dos tipos mais comuns na literatura.

Tabela 6 - Razões geométricas de diferentes ciclones

Tipo	D	a/D	b/D	De/D	S/D	h/D	H/D	B/D
Ciclone Local	1,00	0,5155 D	0,144	0,567	0,515	1,000	3,062	0,209
Stairmand	1,00	0,5 D	0,200	0,500	0,500	1,500	4,000	0,375
Swift	1,00	0,44 D	0,210	0,400	0,500	1,400	3,900	0,400
Lapple	1,00	0,5 D	0,250	0,500	0,625	2,000	4,000	0,250

Fonte: Autoria Própria 2022

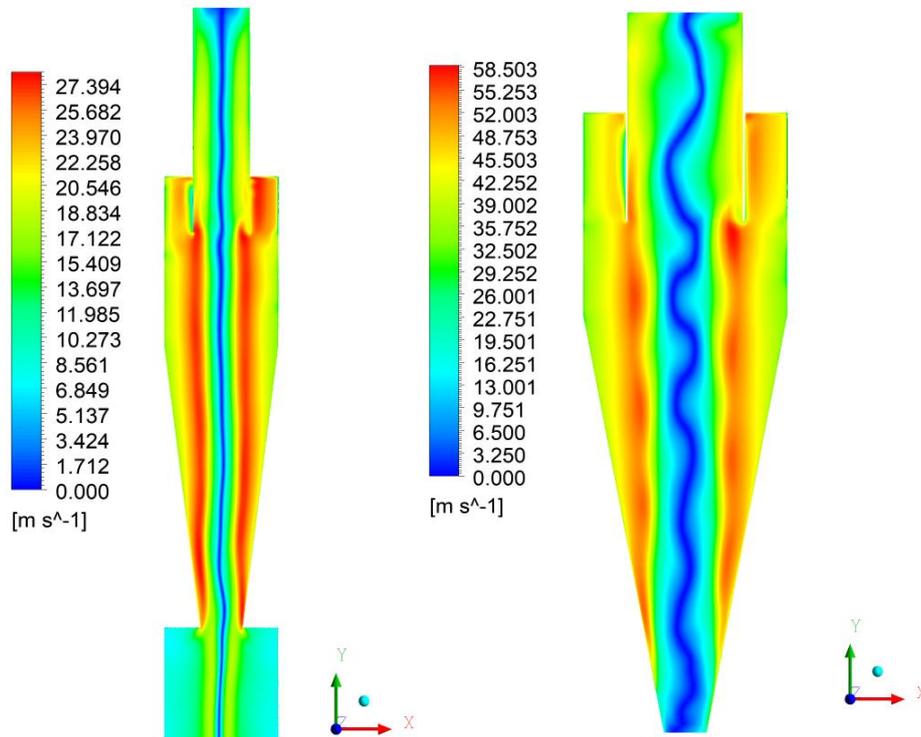
O ciclone utilizado por Hoekstra (2000) possui um volume menor que o ciclone avaliado neste trabalho, além de trabalhar com uma vazão de gás inferior, porém as razões geométricas do projeto do ciclone levam a um vórtice interno muito mais estável e menor perda de carga.

O contorno de velocidade tangencial média no plano XY dos dois ciclones é apresentado na Fig. (15) a) e b).

Figura 15 – Comparação dos Contornos de Velocidade Tangencial média

a) Ciclone padrão *Stairmand*.

b) Ciclone Local



Fonte: Autoria própria (2022)

Nota-se um vórtice muito mais estável e estreito no ciclone estudado por Hoekstra (2000), devido a um maior comprimento da seção cônica em relação ao diâmetro, além de uma abertura maior no duto de *underflow*.

Outro motivo que pode justificar o vórtice mais estável é o comprimento do duto de overflow, a qual é mais comprido e a saída do escoamento é axial, onde no ciclone local, o duto de overflow é mais curto e com uma saída ortogonal, no sentido do eixo Z.

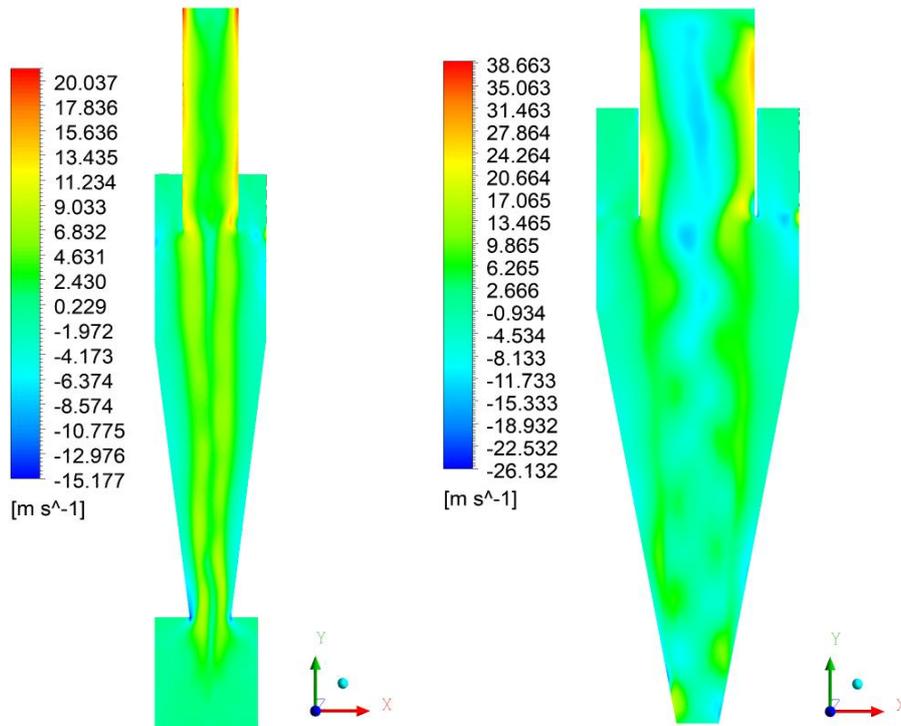
Vale ressaltar que o ciclone local, não teve a geometria do cesto de coleta fornecido, porém mesmo assim, o cesto não seria o suficiente para compensar o fato do diâmetro da saída de coleta ser muito pequeno, portanto, não seria o suficiente para o vórtice ser mais estável.

As figuras (16) a) e b) representam os contornos de velocidade axial dos dois ciclones.

Figura 16 – Comparação dos Contornos de Velocidade Axial média

a) Ciclone padrão *Stairmand*.

b) Ciclone Local



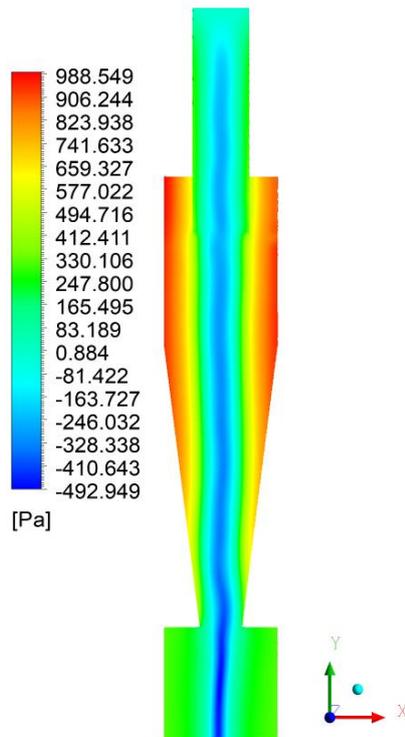
Fonte: Autoria própria (2022)

Por meio desta comparação de escoamentos, é possível notar que valores de velocidade axial negativos no Y, são muito mais comuns no centro do ciclone local, devido ao vórtice altamente rotativo, já para o ciclone *Stairmand*, o escoamento no centro do ciclone é praticamente todo ascendente.

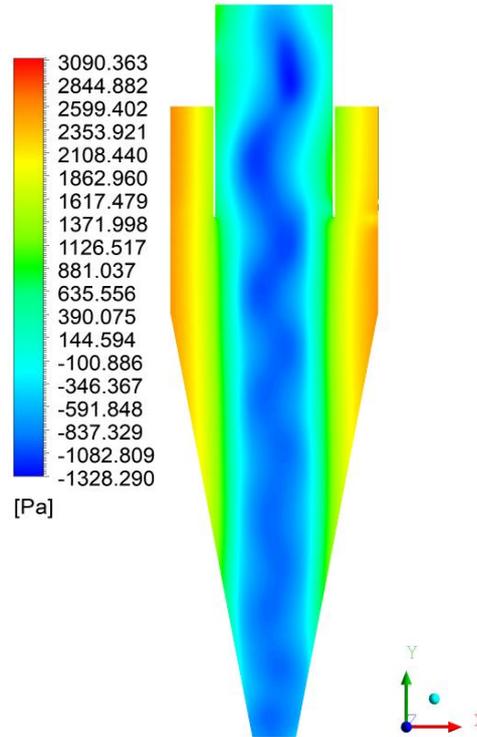
A partir das Figuras (17) a) e b), é possível comparar o contorno de pressão média no eixo XY.

Figura 17 – Comparação dos Contornos de Pressão média

a) Ciclone padrão *Stairmand*.



b) Ciclone Local



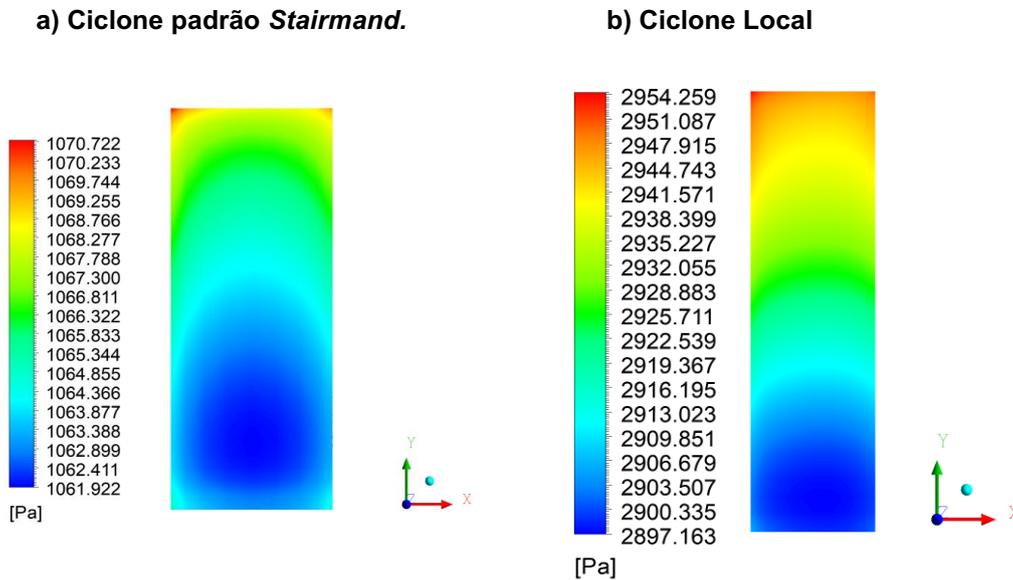
Fonte: Autoria própria (2022)

De forma análoga, o contorno de pressão demonstra como o vórtice interno se comporta em um ciclone com duto de *undeflow* de maior diâmetro, onde a variação de pressão radial consegue acompanhar até o final do ciclone.

Porém como citado anteriormente, para o ciclone deste estudo, este vórtice interno mais forte e instável não é uma qualidade ruim para este equipamento. Visto que um vórtice com maior instabilidade pode melhorar a eficiência de coleta, a custo de uma perda de carga maior.

As Figuras (18) a) e b) mostram a pressão média na entrada dos ciclones.

Figura 17 – Comparação dos Contornos de Pressão média na entrada



Fonte: Autoria própria (2022)

Assumindo um valor médio para a pressão na entrada, e levando em consideração que na saída a pressão é atmosférica, é possível calcular a perda de carga.

Como o fluido é o mesmo para os dois ciclones, de uma forma simplificada, pode se notar que a variação de pressão do ciclone *stairmand* é de aproximadamente 1,065 KPa, já o do ciclone padrão é de 2,924 KPa. O qual representa quase três vezes mais a variação de pressão e perda de carga.

7.3 Análise da coleta de particulado

7.3.1 Resultados da eficiência de coleta por métodos empíricos.

A partir da faixa de diâmetros de partículas contido na análise granulométrica, foram calculadas as eficiências de coletas para cada um dos métodos empíricos. Iniciando em 10 μm até 500 μm , 12 pontos de diâmetros foram utilizados. A eficiência de coleta prevista por diâmetro de partícula por cada método empírico utilizado pode ser vista na Tabela (7).

Tabela 7 Eficiência de coleta inicial por métodos empíricos

d_p (m)	η_{Lapple}	η_{Barth}	$\eta_{\text{L\&L}}$	η_{Dietz}	η_{MM}
1,00E-05	44,51%	1,96%	60,33%	45,35%	45,78%
7,37E-05	97,76%	99,99%	95,44%	99,83%	99,99%
1,00E-04	98,77%	100,00%	97,56%	99,99%	100,00%
1,50E-04	99,45%	100,00%	99,13%	100,00%	100,00%
2,00E-04	99,69%	100,00%	99,64%	100,00%	100,00%
2,50E-04	99,80%	100,00%	99,84%	100,00%	100,00%
3,00E-04	99,86%	100,00%	99,93%	100,00%	100,00%
3,13E-04	99,87%	100,00%	99,94%	100,00%	100,00%
3,50E-04	99,90%	100,00%	99,96%	100,00%	100,00%
4,00E-04	99,92%	100,00%	99,98%	100,00%	100,00%
4,66E-04	99,94%	100,00%	99,99%	100,00%	100,00%
5,00E-04	99,95%	100,00%	99,99%	100,00%	100,00%

Fonte: Autoria Própria (2022)

É possível notar que a partir do diâmetro de 73,7 μm , onde apenas 10% das partículas possuem diâmetro igual ou menor, a eficiência de coleta já passa dos 95% para todos os métodos empíricos.

Desta forma, fica evidente que para a granulometria presente na operação deste ciclone, os métodos empíricos preveem uma eficiência muito alta.

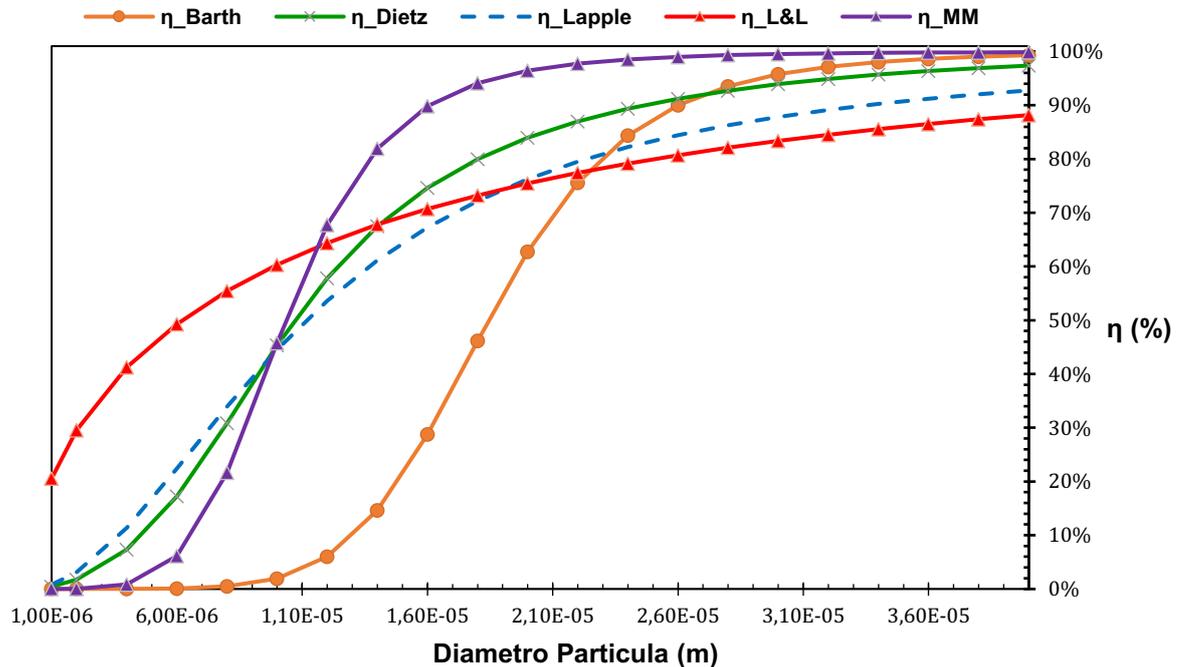
Para uma melhor visualização da curva de eficiência de coleta, foi selecionada uma faixa de partículas de diâmetro menores, a partir de 1 até 40 micrometros, como observado na Tabela 8 e Gráfico 7.

Tabela 8-Eficiência de coleta métodos empíricos

d_p (m)	η_{Lapple}	η_{Barth}	$\eta_{L\&L}$	η_{Dietz}	η_{MM}
1,00E-06	0,80%	0,00%	20,57%	0,44%	0,00%
2,00E-06	3,11%	0,00%	29,53%	1,77%	0,03%
4,00E-06	11,38%	0,01%	41,24%	7,36%	0,86%
6,00E-06	22,41%	0,08%	49,30%	17,25%	6,16%
8,00E-06	33,92%	0,48%	55,43%	30,86%	21,67%
1,00E-05	44,51%	1,96%	60,33%	45,35%	45,78%
1,20E-05	53,60%	6,02%	64,38%	57,85%	67,75%
1,40E-05	61,13%	14,66%	67,79%	67,48%	81,95%
1,60E-05	67,25%	28,76%	70,71%	74,64%	89,85%
1,80E-05	72,22%	46,18%	73,24%	79,96%	94,10%
2,00E-05	76,24%	62,74%	75,46%	83,95%	96,43%
2,20E-05	79,52%	75,60%	77,42%	87,01%	97,75%
2,40E-05	82,21%	84,40%	79,16%	89,37%	98,53%
2,60E-05	84,43%	90,03%	80,72%	91,23%	99,01%
2,80E-05	86,28%	93,55%	82,12%	92,72%	99,32%
3,00E-05	87,83%	95,76%	83,38%	93,92%	99,51%
3,20E-05	89,15%	97,15%	84,52%	94,89%	99,65%
3,40E-05	90,27%	98,05%	85,56%	95,70%	99,74%
3,60E-05	91,23%	98,64%	86,51%	96,36%	99,80%
3,80E-05	92,05%	99,03%	87,38%	96,92%	99,85%
4,00E-05	92,77%	99,30%	88,17%	97,38%	99,88%

Fonte: Autoria Própria (2022)

Gráfico 7 – Curvas de eficiência de coleta por métodos empíricos



Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir do Gráfico 7 é possível notar a diferença de comportamento de cada curva, onde para diâmetros menores do que 20 μm , cada método possui valores bem distintos de eficiência.

O método Lapple, (1950) possui como característica uma curva relativamente plana, onde devido o cálculo de eficiência ser baseado no diâmetro da partícula pelo diâmetro de corte, a curva tende a superestimar eficiências para diâmetros menores que o de corte, e subestimar para maiores (DIRGO e LEITH, 1985).

Esse comportamento também ocorre para os métodos de Leith-Licht (1972) (L&L) e de Dietz (1981), onde o último principalmente prevê a maior eficiência para valores menores que 10 μm , porém com o acréscimo no tamanho das partículas este método passa a subestimar bastante a eficiência de coleta.

O método L&L se baseia na influência que as partículas sofrem pela turbulência, porém com o aumento de diâmetro, as partículas passam cada vez menos a serem influenciadas pelo comportamento da turbulência.

Dos métodos aplicados, o Mulschelknaultz (1980) (MM) foi o que previu melhor uma maior eficiência de coleta a partir de 11 μm de diâmetro. Dentro dos métodos este é o de maior complexidade, considerando um diâmetro de carregamento crítico das partículas.

7.3.2 Resultados da eficiência de coleta pelo método DFC

No software *Fluent*, foi realizado um rastreamento de partículas, onde para um dado diâmetro, um número fixo de partículas foi injetado. O percentual que foi capturado do total, equivale a eficiência de coleta.

A partir da mesma faixa de diâmetros de particulado utilizado inicialmente para os métodos empíricos (10 até 500 μm), os resultados de eficiência de coleta foram de 100% a partir do segundo ponto (73,7 μm)..

Figura 19 - Rastreamento de partículas pelo DPM

```

DPM Iteration ....
number tracked = 264, escaped = 0, aborted = 0, trapped = 264, evaporated = 0, incomplete = 0, incomplete_parallel = 0

Fate                Number      Elapsed Time (s)      Injection, Index
-----            -
                   Min          Max          Avg      Std Dev      Min          Max
Trapped - Zone 12   264      4.843e-01  1.504e+00  7.844e-01  1.812e-01  injection-50  67  injection-50  197

(*)- Mass Transfer Summary - (*)

Fate                Mass Flow (kg/s)
-----            Initial      Final      Change
Trapped - Zone 12   8.333e-03  8.333e-03  0.000e+00

```

Fonte: Autoria Própria (2022)

O método DPM apresenta o sumário das partículas injetadas, onde os valores importantes são, a quantidade rastreada, número de partículas capturadas e que escaparam.

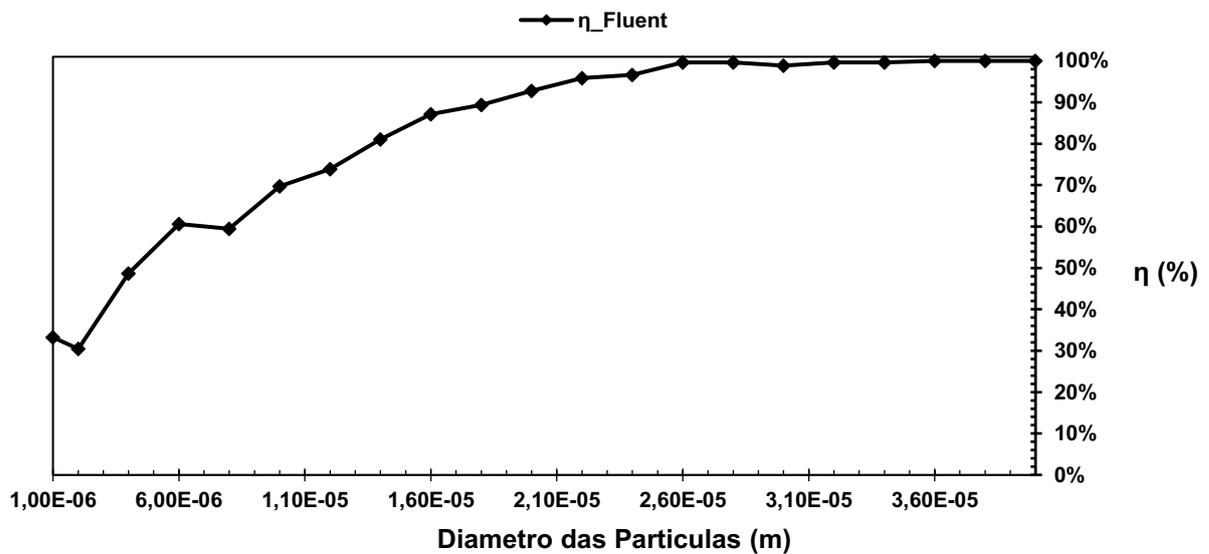
Desta forma, os cálculos foram refeitos e a análise passou a envolver partículas com diâmetro de 1 até 40 μm , similar ao que foi feito com os métodos empíricos. Os resultados das eficiências de coleta podem ser vistos na Tabela 9 e Gráfico 8 respectivamente.

Tabela 9 - Eficiência de coleta por DFC

Dp	Rasteadas	Coletadas	Escapadas	Incompletas	η (%)
1,00E-06	264	88	176	0	33,33%
2,00E-06	264	80	180	0	30,77%
4,00E-06	264	128	136	0	48,48%
6,00E-06	264	160	104	0	60,61%
8,00E-06	264	157	107	0	59,47%
1,00E-05	264	184	80	0	69,70%
1,20E-05	264	195	69	0	73,86%
1,40E-05	264	214	50	0	81,06%
1,60E-05	264	230	34	0	87,12%
1,80E-05	264	236	28	0	89,39%
2,00E-05	264	245	19	0	92,80%
2,20E-05	264	253	11	0	95,83%
2,40E-05	264	255	9	0	96,59%
2,60E-05	264	263	1	0	99,62%
2,80E-05	264	263	1	0	99,62%
3,00E-05	264	261	3	0	98,86%
3,20E-05	264	263	1	0	99,62%
3,40E-05	264	263	1	0	99,62%
3,60E-05	264	264	0	0	100,00%
3,80E-05	264	264	0	0	100,00%
4,00E-05	264	264	0	0	100,00%

Fonte: Autoria Própria (2022)

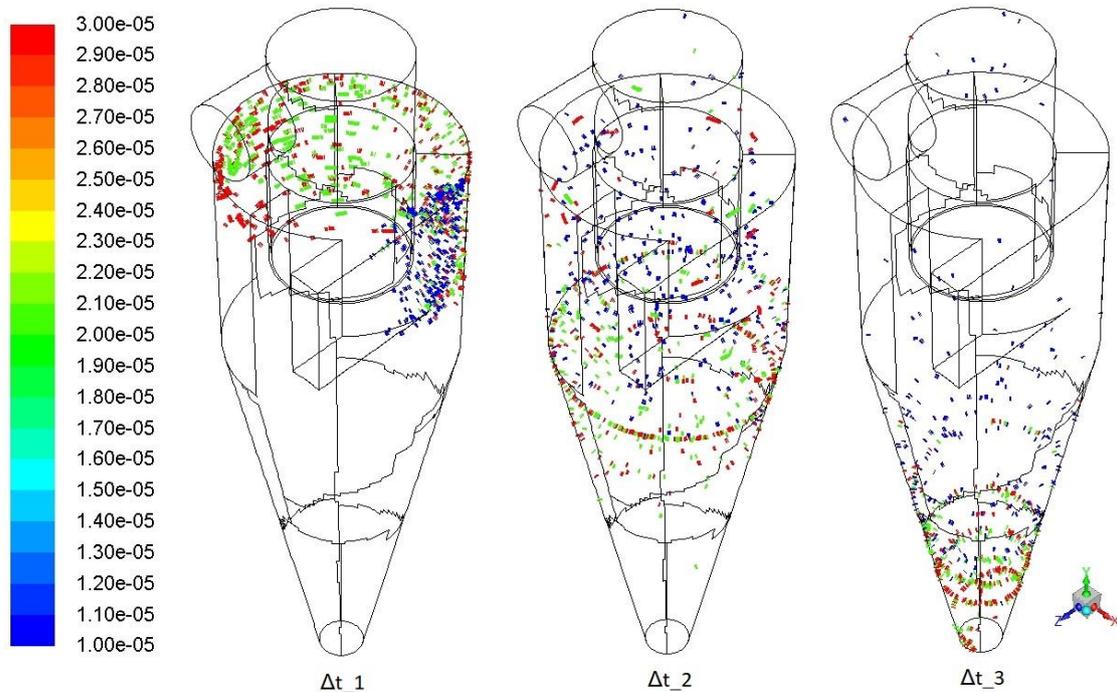
Gráfico 8 - Curva de eficiência de coleta por DFC



Fonte: Autoria própria (2022)

Durante o rastreamento é possível visualizar o escoamento das partículas dentro do ciclone, a Figura (20) mostra um exemplo onde foram injetadas partículas de três diâmetros diferentes, 10, 20 e 30 μm , 264 unidades de cada uma.

Figura 20 Animação escoamento de partículas



Fonte: Autoria Própria (2022)

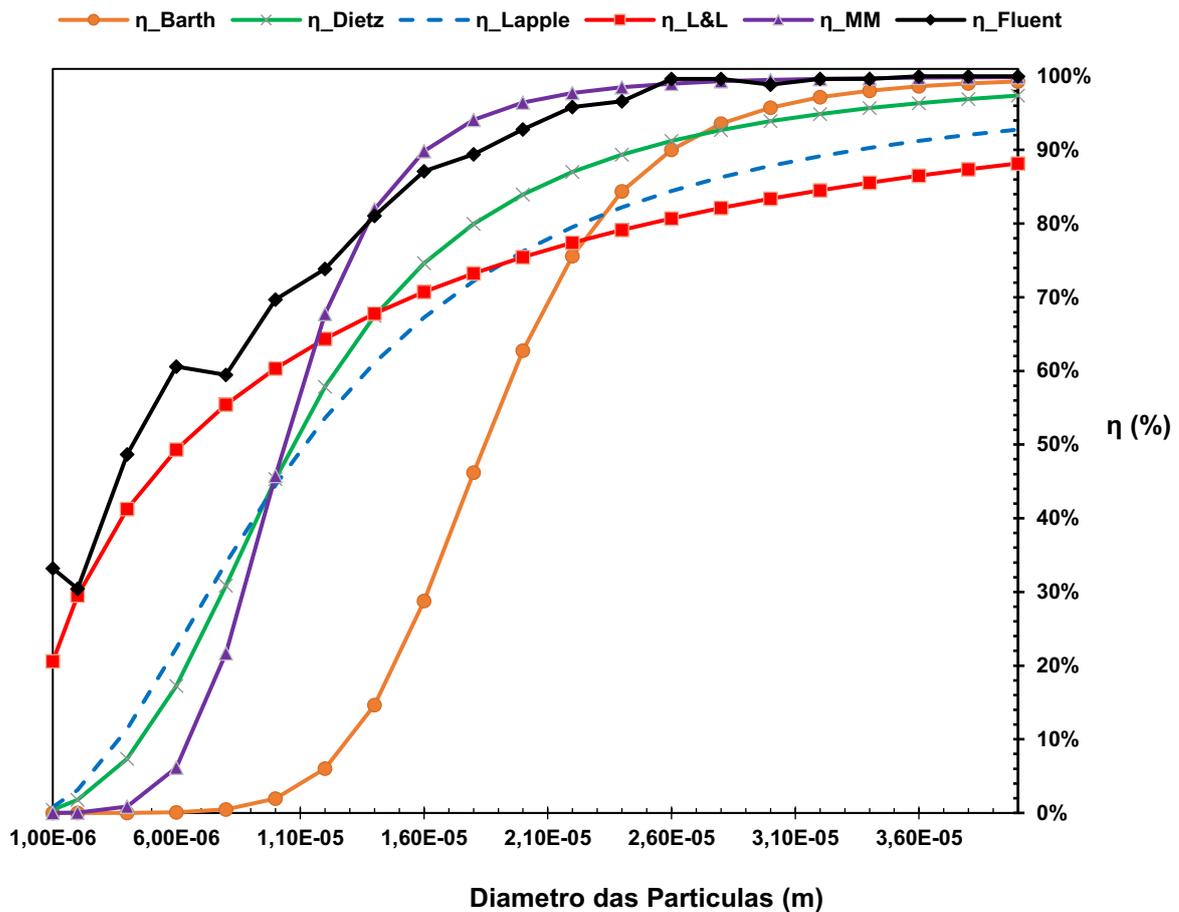
As imagens foram obtidas em três intervalos de tempo diferentes, onde no primeiro já é possível ver que as partículas de maior diâmetro são carregadas mais facilmente pela corrente de ar entrando.

Com o passar do tempo as partículas de 20 e 30 μm já estão circulando próximas a parede, sendo carregadas pelo vórtice externo, devido a sua maior massa. Já partículas de 10 μm tendem a flutuar no interior do ciclone, onde algumas entram no vórtice interno ascendente e escapam pelo duto de *overflow*.

7.3.3 Comparação da eficiência de coleta por métodos empíricos e DFC

Unindo os gráficos (7) e (8) em um só, é possível comparar as curvas de eficiência de coleta dos métodos empíricos com o método DFC. As curvas estão contidas no gráfico (9) a seguir.

Gráfico 9 Comparação curvas de eficiências de coletas empíricas e DFC



Fonte: Autoria Própria (2022)

Por meio destes resultados é possível afirmar que os métodos empíricos em geral, subestimaram a eficiência de coleta para diâmetros pequenos, isso se deve a diversas considerações que cada método utiliza.

Porém o motivo mais provável é que estes métodos foram baseados em ciclones de geometria padrão *Stairmand*, os quais possuem designs de menor perda de carga, onde uma maior perda de carga deve aumentar a eficiência de coleta.

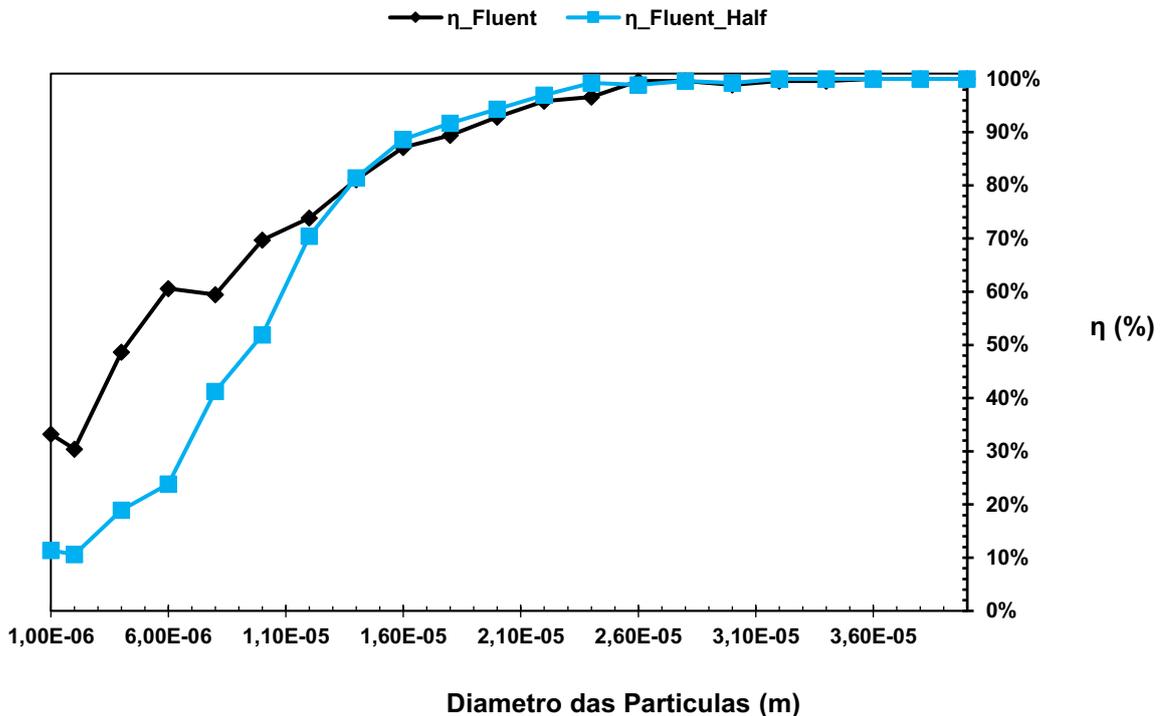
7.3.4 Análise de coleta da geometria alternativa

Os resultados da simulação da geometria alternativa podem ser vistos na Tabela 10 e Gráfico 10 respectivamente.

Tabela 10 - Eficiências de coleta DFC geometria alternativa

Dp	Rasteadas	Coletadas	Escapadas	Incompletas	η (%)
1,00E-06	264	30	234	0	11,36%
2,00E-06	264	28	236	0	10,61%
4,00E-06	264	50	214	0	18,94%
6,00E-06	264	63	201	0	23,86%
8,00E-06	264	109	155	0	41,29%
1,00E-05	264	137	127	0	51,89%
1,20E-05	264	186	78	0	70,45%
1,40E-05	264	215	49	0	81,44%
1,60E-05	264	234	30	0	88,64%
1,80E-05	264	242	22	0	91,67%
2,00E-05	264	249	15	0	94,32%
2,20E-05	264	256	8	0	96,97%
2,40E-05	264	262	2	0	99,24%
2,60E-05	264	261	3	0	98,86%
2,80E-05	264	263	1	0	99,62%
3,00E-05	264	262	2	0	99,24%
3,20E-05	264	264	0	0	100,00%
3,40E-05	264	264	0	0	100,00%
3,60E-05	264	264	0	0	100,00%
3,80E-05	264	264	0	0	100,00%
4,00E-05	264	264	0	0	100,00%

Gráfico 10 – Comparação de curvas de eficiências de coleta DFC geometria principal e alternativa



Fonte: Autoria Própria (2022)

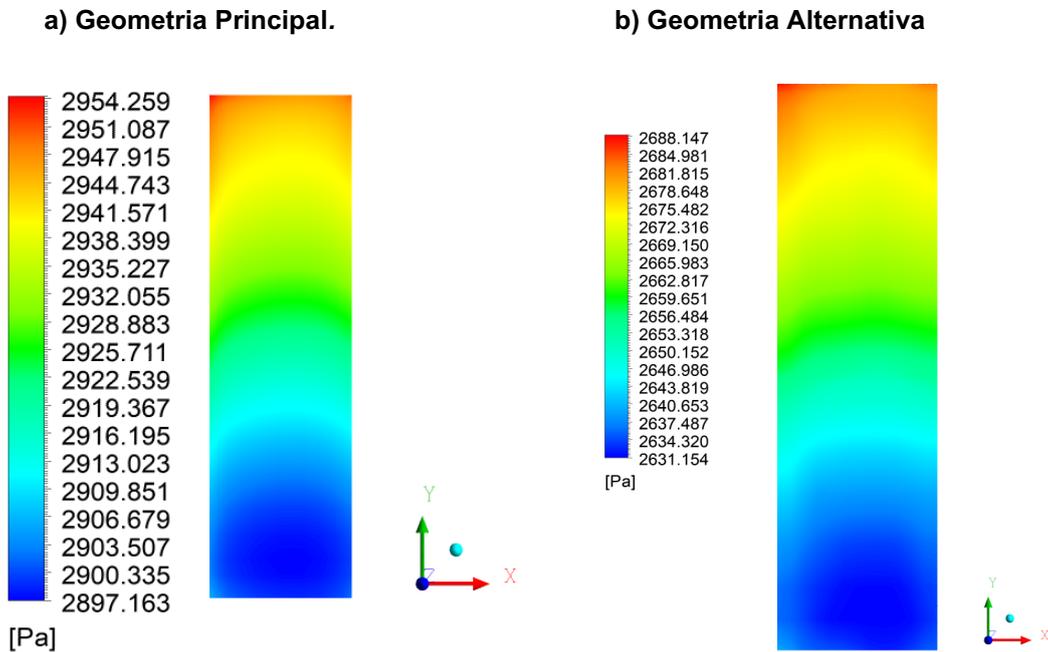
A partir do gráfico, é possível notar que para diâmetros pequenos, inferiores a $15\mu\text{m}$, o ciclone com o *vortex finder* reduzido (geometria alternativa) possui uma queda de eficiência de coleta inferior ao do ciclone principal.

A explicação para essa perda de eficiência deve-se a ocorrência do escoamento de curto-circuito, onde partículas que acabam de entrar no ciclone, acabam passando direto para o duto de *overflow*, devido um comprimento menor do *vortex finder*.

Porém é notável que este comportamento se dá apenas para diâmetros muito pequenos, onde para diâmetros maiores, a eficiência de coleta se iguala para as duas geometrias do ciclone. Pois para uma partícula de maior massa, este curto-circuito passa a não ocorrer, devido a partícula já se aproximar da parede externa (corpo do ciclone) logo após entrar no equipamento, devido a força centrífuga.

Outra explicação para a diminuição da eficiência de coleta, é uma menor perda de carga gerada pelo ciclone, como pode ser visto pelas Figuras 21 a) e b).

Figura 21 – Comparação dos Contornos de Pressão média na entrada das duas geometrias do ciclone local



Fonte: Autoria própria (2022)

Como a perda de carga é resultado da diferença de pressão da entrada e saída sobre a massa específica vezes a aceleração da gravidade. Os resultados de perda de carga podem ser vistos na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 - Comparação de perda de carga entre geometrias

Ciclone	Diferença de Pressão entrada e saída	$\rho * g$	ΔH
Fluent	2,926	12,01725	0,243
Fluent_Half	2,660	12,01725	0,211

Fonte: Autoria Própria (2022)

Calculando variação percentual perda de carga, nota se que ciclone com metade do comprimento do *vortexfinder* (Fluent_Half) possui 86,8% da perda de carga comparada ao ciclone com o *vortexfinder* inteiro (Fluent).

Neste caso a variação é razoavelmente pequena, a ponto de não interferir na coleta de partículas para diâmetros maiores do que 12 μm , porém o diâmetro de corte do ciclone, o qual representa o diâmetro com eficiência de 50%, passa de aproximadamente 4 μm (Fluent) para 10 μm (Fluent_Half).

8. CONCLUSÃO

De acordo com os modelos empíricos e computacionais estabelecidos, onde apenas a operação ideal do ciclone foi considerada, a qual reflete a física deste trabalho, o ciclone encontra-se corretamente dimensionado para a sua aplicação.

Ressaltando que a operação ideal do ciclone se trata apenas do escoamento do material particulado inerte e o ar, sem outras fases sólidas, líquidas ou gasosas que possam interferir no escoamento.

É conhecido que este ciclone opera em um processo no qual existe a possibilidade de vapor de água circular pelo ciclone, junto ao particulado, porém é desconhecido a quantidade e características do vapor, sendo uma operação não ideal. Portanto, para este caso, a interação do vapor de água não pode ser considerada neste trabalho, devido a alteração entre a interação das fases.

Este ciclone se diferencia de vários outros modelos presentes na literatura, onde este possui uma saída não convencional, ortogonal ao tubo de overflow, além uma seção cônica mais curta e mais afunilada. Essas características podem ser benéficas para a eficiência de coleta, porém com a desvantagem de gerarem maior perda de carga pelo equipamento.

De acordo com os métodos empíricos este ciclone pode ter uma eficiência de coleta acima de 90% com partículas de 30 μm de diâmetro em diante, ou seja, partículas com um décimo do diâmetro da partícula de tamanho médio encontrado no estudo granulométrico.

Com o método DFC essa eficiência prevista é ainda maior, onde próximo de 30 μm o ciclone já possui mais de 98% de eficiência de coleta. Visto que apenas 10% das partículas possuem diâmetro menor que 73,7 μm , este ciclone em uma condição ideal de operação deveria atingir uma eficiência de coleta de pelo menos 99%.

Considerando a vazão de particulado fornecida como 30 kg/h, este ciclone deveria perder no máximo 0,3 kg/h de particulado do processo, algo que diferente do que é visto no equipamento real, onde se acumula uma grande quantidade desconhecida de particulado na chaminé.

Por fim, este trabalho cumpre o seu objetivo de eliminar qualquer hipótese de mal dimensionamento do equipamento, onde o causa real de uma eficiência de coleta ruim, está relacionada as condições de operação, e não de um dimensionamento inadequado da geometria.

REFERÊNCIAS

- 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**, Volume 37, Issue 8, Pages 5774-5789, 2013, ISSN 0307-904X. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.11.019>.
- AZADI, Mehd.i; AZADI, Mohsen.; MOHEBBI, Ali.; A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters, **Journal of Hazardous Materials**, Volume 182, Issues 1–3, Pages 835-841, 2010, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.115>.
- VAITIEKŪNAS, P.; JAKŠTONIENĖ, I.; Analysis of numerical modelling of turbulence in a conical reverse-flow cyclone, **journal of environmental engineering and landscape management**, Volume 18, No 4 : 321-328, 2010 .
- GRIFFITHS, W. D.; BOYSAN, F.; Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modeling of the performance of a number of cyclone samplers, **J. Aerosol Sci.** Vol 27, No 2 , 281–304, 1996
- GRONALD, G.; DERKSEN J.J., Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: a comparison of various modeling approaches, **Powder Technology**, Volume 205, Issues 1–3, Pages 160-171, 2011, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.007>.
- BOYSAN, F.; AYERS, W.H.; SWITENBANK; J., A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design, **Trans. IChemE**. 60, 222–230, (1982).
- SLACK, M.D.; PRASAD, R.O.; BAKKER, A.; BOYSAN F., Advances in cyclone modeling using unstructured grids, **Institution of Chemical Engineers Trans IChemE**, Vol 78, Part A, November 2000.
- ELSAYED, K.; LACOR, C., The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES, **Vrije Universiteit Brussel, Research Group Fluid Mechanics and Thermodynamics**, Paper 2. November (2012).
- HOESKTRA, A. J., Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators, 2000. Dissertação (Doutorado), Technische Universiteit Delft (2000).
- MARTIGNONI, W. P.; BERNARDO, S.; QUINTANI, C. L.; Evaluation of cyclone geometry and its influence on performance parameters by computational fluid dynamics (cfD), **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, Vol. 24, No. 01, pp. 83 - 94, January - March, 2007, ISSN 0104-6632.
- PISAREV, G.I. *et al.* Large Eddy Simulation of the vortex end in reverse-flow centrifugal separators, **Applied Mathematics and Computation**, 2010, doi:10.1016/j.amc.2010.07.050.

MATSUZAKI, K. *et al.* Numerical Study on Particle Motions in Swirling Flows in a Cyclone Separator, **J. of Thermal Science**, Vol.15, No.2, 2006.

DIRGO, J.; LEITH, D.; Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions, **Aerosol Science and Technology**, 4:4, 401-415, 2007, doi: 10.1080/02786828508959066.

HOFFMANN, A.C. *et al.* Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones, **Powder Technology**, 70 83-91, 1992.

LEITH, D.; MEHTA, D.; Cyclone performance and design; **Atmospheric Environment Pergamon Press**, Vol. 7, pp. 527-549. 1973.

LAPPLE, C.E.; Gravity and centrifugal separation. **Ind Hyg. Q.** 11, 40, 1950.

STAIRMAND, C.J.; The Design and Performance of Cyclone Separators. **Trans. Inst. Chem. Eng.** Vol. 29, p. 356. 1951.

BARTH, W.; Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations, **Brennst.-Wanne-Kraft**, 8,1–9. 1956.

HOFFMANN, A.C.; STEIN, L.E; **Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation**, Springer-Verlag, Heidelberg, NY, US, 2002.

SAFIKHANI, H. *et al.*; Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separators, **Advanced Powder Technology**, 21, 435–442 , 2010.

LEITH, D.; LICHT, W.; Collection efficiency of cyclone type particle collectors, a new theoretical approach, **A.L Ch.E. Symposium Series: Air**, 68:196, 1972.

ALEXANDER, R. McK.; Fundamentals of cyclone design and operation. **Proc. Australas Inst. Min. Met. (New Series)**, 152-3, 203-228, (1949).

WANG, L.; **Theoretical study of cyclone design**. 2004. Dissertação (Doutorado), M.S., Texas A&M University, 2004.

WANG, L. *et al.*; Analysis of Cyclone Collection Efficiency, The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems, paper nº 034114, 2003.

MUSCHELKNAUTZ, E. ; **Theorie der Fliehkraftabscheider mit besonderer Berücksichtigung hoher Temperaturen und Drücke** (em Alemão). VDI-Berichte 363:49- 60, 1980.

DIETZ, P.W.; Collection Efficiency of Cyclone Separators. **AIC hE Journal**, 27:888-892. 1981.

JIAO, J. *et al.*; Evaluations and modifications on Reynolds stress model in cyclone simulations, **Chem. Eng. Technol.** 30 15–20. (1), 2007.

HORVATH, A. et al; Influence of vortex-finder diameter on axial gas flow in simple cyclone, **Chem. Prod. Process Model.** 3 (1) 1–26. 2008.

ANSYS, **Fluent Theory Guide**, ANSYS, Inc. November, 2013. Disponível em: <http://www.ansys.com> , acessado: 27, maio 2022.

SMAGORINSKY, J. ;General Circulation Experiments with the Primitive Equation I the Basic Experiment. **Monthly Weather Review**, 91, 99-164. 1963.
[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)

BHASKER, C.; Flow simulation in industrial cyclone separator, **Advances in Engineering Software** , 41 220–228, 2010.

GEA produtos, Ciclone de extra eficiência, **Catalogo de produtos**. Disponível em: <https://www.gea.com/pt/products/dryers-particle-processing/spray-dryers/powder-recovery-products/cyclone-powder-separation-extra-efficiency.jsp>, Acesso em 23 de maio 2022.