

GUILHERME QUEIRÓS DE ARAÚJO MACIEL

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FORNOS TRIDIMENSIONAIS E
ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CICLONES**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

UBERLÂNDIA - MG

2024

GUILHERME QUEIRÓS DE ARAÚJO MACIEL

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FORNOS TRIDIMENSIONAIS E
ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CICLONES**

Trabalho apresentado a Universidade Federal de
Uberlândia, como requisito para obtenção do título
de bacharel.

Área de Concentração: Termodegradação de
Resíduos

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de
Carvalho

UBERLÂNDIA - MG

2024

GUILHERME QUEIRÓS DE ARAÚJO MACIEL

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FORNOS TRIDIMENSIONAIS E
ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CICLONES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica, pela
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Termodegradação de
Resíduos

Uberlândia, 23 de julho de 2024.

Solidônio Rodrigues Carvalho – Prof. Dr. (UFU).

Valério Luiz Borges – Prof. Dr. (UFU)

Euclides Antônio Pereira de Lima – Prof. Dr. (UNIUBE)

AGRADECIMENTOS

A Agência Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPPII) e à empresa CALMECON pelo auxílio financeiro.

A toda a equipe do Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) e Laboratório de Sistemas Mecânicos (LSM) pelo apoio e ensinamentos durante os últimos dois anos.

A todos colegas de faculdade e amigos que auxiliaram de alguma forma no meu processo de formação durante a graduação.

À minha família pelo apoio incondicional.

MACIEL, G.Q.A., Análise do comportamento de partículas em um reator com leito fluidizado e ciclones em série. 2024. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

Neste trabalho, estudou-se o comportamento de partículas no interior de um reator termoquímico com o intuito de desenvolver uma grelha que maximize o movimento e homogeneização do leito fluidizado, além de pesquisar o uso de ciclones para separação de partículas e aumento do tempo de residência dos gases no dispositivo. A avaliação destes ciclones se deu pela comparação do uso de um ciclone axial e de um radial semelhantes, além da disposição, individual ou em série, dos mesmos. O reator é utilizado para a termodegradação de biomassa e produção de um combustível, gás de síntese, que consiste em uma mistura multifásica de gás e partículas suspensas. Essas partículas precisam permanecer no interior do sistema até que toda a matéria que possa sofrer gaseificação seja degradada, enquanto as remanescentes são filtradas por ciclones no interior do reator. De forma a entender este comportamento, foram realizadas simulações no software ANSYS® Fluent, onde foi considerado um modelo multifásico DPM (Discrete Phase Model) e um modelo de fechamento de turbulência k- ω SST. Os resultados obtidos permitiram a confirmação de que o uso de ciclones em série promoveu a separação completa das partículas simuladas no interior do reator, assim como o modelo de grelha desenvolvido permite a ausência de pontos de acúmulo de particulado no dispositivo.

Palavras-chave: Simulação. Partículas. Discrete Phase Model (DPM). Ciclone Axial. Ciclone Radial.

MACIEL, G.Q.A., Análise do comportamento de partículas em um reator com leito fluidizado e ciclones em série. 2024. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

ABSTRACT

In this work, the behavior of particles inside a thermochemical reactor was studied with the aim of developing a grid able to maximize movement and homogenization of a fluidized bed, in addition to researching the usage of cyclones to separate particles and increase gas residence time on the device. The evaluation of these cyclones was made by comparing the use of a similar axial and radial cyclone, the disposition, in series or parallel was also discussed. The reactor is used for thermodegradation of biomass and production of a fuel, synthesis gas, which consists in a multiphase mixture of gas and suspended particles. Those particles have to stay inside the reactor until all matter that could undergo gasification is degraded, while the remaining particles are filtered by cyclones inside the reactor. In order to understand this behavior, simulations were carried out in the ANSYS® Fluent software, where a multiphase DPM model (Discrete Phase Model) and a k - ω SST turbulence closure model were considered. The results obtained allowed confirmation that the cyclones in series promotes full separation of particles inside the reactor, as well as the developed grid model allows the absence of accumulation points in the device.

Key-words: Simulation. Particles. Discrete Phase Model (DPM). Axial Cyclone. Radial Cyclone.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 -	Diferenças entre o tratamento Lagrangiano e Euleriano	14
Figura 2 -	Parâmetros geométricos de ciclones radiais	15
Figura 3 -	Ciclone radial construído para a simulação.	17
Figura 4 -	Ciclone axial construído para a simulação.	18
Figura 5 -	Malha do ciclone axial.	18
Figura 6 -	Malha do ciclone radial.	19
Figura 7 -	Geometria da associação de ciclones	20
Figura 8 -	Malha da associação de ciclones.	20
Figura 9 -	Simulação da geometria preliminar da grelha	22
Figura 10 -	Detalhe em corte da grelha modificada com indicações de fluxo.	22
Figura 11 -	Linhas de corrente coloridas pela velocidade no Ciclone Axial	23
Figura 12 -	Linhas de corrente coloridas pelas velocidades no Ciclone Radial	24
Figura 13 -	Linhas de corrente coloridas pelas velocidades na associação de ciclones	25
Figura 14 -	Medição do diâmetro das partículas e suas posições quando as partículas alcançam o terceiro ciclone	26
Figura 15 -	Medição do diâmetro das partículas e suas posições ao final da simulação	26
Figura 16 -	Vazão mássica de partículas que escaparam pelo último ciclone em função do tempo físico de simulação	27
Figura 17 -	Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar no reator em vista isométrica	27
Figura 18 -	Linhas de fluxo coloridas pela velocidade no interior da grelha	28
Figura 19 -	Vista superior do movimento das partículas nos tempos de 2 e 10 segundos	29
Figura 20 -	Vista lateral do movimento das partículas no tempo de 4 segundos	29

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Balanço de massa reportado pela plataforma após simulação	24
----------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RSU	Resíduo Sólido Urbano
CDR	Composto Derivado de Resíduo
SST	Shear Stress Transport
URANS	Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes Equations
DNS	Direct Numerical Simulation
PCI	Poder Calorífico inferior
DPM	Discrete Phase Model
CAD	Computed-Aided Desing
CAE	Computed-Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
RRB	Rosin-Rammler-Bennet

LISTA DE SÍMBOLOS

u	Vetor velocidade
p	Pressão
T	Temperatura
Φ	Potência específica de transformação viscosa
α	Coefficiente de difusão molecular de energia térmica
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa específica de referência
\bar{T}	Temperatura filtrada
\bar{u}_i	Filtragem da componente i do vetor velocidade
C_{p0}	Coefficiente de pressão
\bar{f}_i	Filtragem da componente i do termo forçante
f_i	Componente i do termo forçante
q_j	Fluxo turbulento global de energia térmica
τ_{ij}	Tensor global de Boussinesq-Reynolds
k	Energia cinética específica turbulenta
ν_t	Viscosidade cinemática turbulenta de Boussinesq
ω	Potência específica de transformação viscosa da energia cinética turbulenta
ε	Potência de transformação viscosa da energia cinética turbulenta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1 Objetivos	8
1.2 Justificativa	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 Modelagem Matemática para a Dinâmica dos Fluidos	9
2.1.1 Modelo de Turbulência	11
2.1.2 Modelo de Fechamento da Turbulência	12
2.2 Discrete Phase Model	13
2.3 Construção de Ciclones	14
2.4 Distribuição Granulométrica de Rosin-Rammler-Bennet.....	16
3. METODOLOGIA	17
3.1 Comparação entre Ciclones.....	17
3.2 Associação de Ciclones	19
3.3 Corpo do Reator.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1 Comparação de Ciclones	23
4.2 Associação de Ciclones	24
4.3 Corpo do Reator.....	27
5. CONCLUSÃO	30
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

O surgimento de cidades e a ampliação de áreas urbanas é um fenômeno recorrente na sociedade desde a primeira revolução industrial, que ocorreu entre os séculos XVIII e XIX e permeia até a data deste trabalho. Durante esse processo histórico, se desenvolveu a cultura de consumir produtos industrializados, cuja produção exacerbada está diretamente relacionada com impactos ambientais (MUCELIN, 2008). Um dos maiores efeitos deste fenômeno é a geração de lixo urbano que, em sua maioria encontra uma disposição final não sustentável, que promove a contaminação de corpos d'água, enchentes, proliferação de vetores transmissores de doenças entre outros.

Tendo consciência da necessidade de encontrar uma solução para a melhor gestão destes resíduos, foi aprovado pelo Congresso Nacional a Lei 12.305/2010, que estabeleceu a política nacional de resíduos sólidos. O objetivo principal deste projeto era promover o gerenciamento completo do resíduo, desde sua geração à sua disposição final, tratando também da adoção de políticas de educação ambiental e de sustentabilidade, além de estruturar o serviço público de limpeza e manejo do lixo, que como um todo resultam em soluções efetivas na busca por cidades mais sustentáveis (SILVA, 2013).

Uma das alternativas existentes para a disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) é o reaproveitamento energético por meio de sua gaseificação, que consiste em um processo de conversão de matéria orgânica em espécies gasosas, energeticamente ricas, em alta temperatura com uma entrada de oxigênio sub estequiométrica (MATERAZZI, et al., 2013).

Uma alternativa adequada para a produção deste gás é a utilização de um reator termoquímico com leito fluidizado. Uma vez que este possui uma elevada flexibilidade, é possível trabalhar com uma alta gama de compostos derivados de resíduo (CDR), que consiste no RSU após a passagem por uma série de trituração e secagem. Ademais, este modelo de reator permite o trabalho com diferentes temperaturas, tempo de residência do gás, reagentes, catalizadores e agentes fluidizantes (ARENA, et al, 2010).

De forma geral, o reator é composto por uma câmara cheia de partículas que ficam suspensas devido a ação de uma grelha (ANGEL, et al., 2009). Esse dispositivo promove a distribuição uniforme do ar quente que adentra o reator, garantindo que

todas as regiões do leito sejam fluidizadas de forma homogênea, além de impedir o acúmulo de partículas e formentar a estabilidade do leito fluidizado (KUNII, LEVENSPIEL, 1991).

Após o processo de gaseificação, é obtida uma mistura multifásica de gás e partículas (gás de síntese - syngas), o que não é ideal tendo em vista que este particulado promove a queda da qualidade do gás e aumenta a formação de poluentes após a sua queima. Dessa maneira, uma solução adequada é a utilização de ciclones no interior do reator termoquímico, os quais, além de filtrar o particulado, promovem maior tempo de permanência da mistura no reator, o que permite que o processo de quebra catalítica das cadeias carbônicas do gás mais duradouro, obtendo uma mistura com maior poder calorífico inferior (PCi) e prevenindo a formação de alcatrão. Ao final, o objetivo do reator é a geração de um gás com baixíssimo percentual de partículas sólidas para ser utilizado na geração de energia elétrica por meio de um ciclo RANKINE.

Estes ciclones são dispositivos que separam a fase densa de uma mistura multifásica por meio da ação de forças centrífugas (KARAGOZ, 2005). Seu funcionamento está diretamente atrelado a sua geometria cilíndrica-cônica que permite a formação de um vórtice ascendente, formado pela transformação das forças inerciais do fluido em força centrífuga, permitindo que a parte menos densa da mistura siga o fluxo formado pelo vórtice, enquanto a parte mais densa é separada no inferior do dispositivo.

É possível separar os tipos de ciclones em dois grupos principais, aqueles com entrada tangencial, que são os mais comuns, e aqueles de entrada axial. No primeiro, a entrada de mistura é posicionada de forma tangente à parede interna do cilindro, o que induz a formação do vórtice no seu inferior. Enquanto o outro tipo apresenta palhetas que guiam o fluxo de entrada na parte superior do cilindro, induzindo um movimento centrífugo no seu interior (TSAI, et al, 2004).

1.1 Objetivos

Este trabalho apresenta dois objetivos. O primeiro é realizar uma análise qualitativa do comportamento das partículas em um reator termoquímico durante o processo de termodegradação de biomassa.

O segundo objetivo é analisar e comparar, numericamente, a eficiência de ciclones axiais e radiais na retenção de partículas em mistura bifásica com o gás de síntese, além de entender o comportamento deles ao serem combinados em série.

1.2 Justificativa

Este trabalho tem suas justificativas em cada um dos objetivos descritos no tópico anterior, sendo o primeiro motivado pela necessidade de avaliar o comportamento das partículas no interior de um reator com geometria não convencional, o que permitiu observar pontos de possível acúmulo de partículas, observar o caminho das partículas mais leves até a entrada do primeiro ciclone que realizará sua filtragem, além do nível de homogeneização desta mistura bifásica. O que é importante pois, existe a necessidade de avaliar o tempo de permanência da mistura dentro do reator, que é um fator diretamente proporcional a homogeneidade do gás, devido a quebra das cadeias carbônicas citadas anteriormente.

O intuito da segunda etapa do trabalho é usar essa avaliação para o desenvolvimento de ciclones semelhantes com variáveis e necessidades de projeto distintas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico será discutido os fundamentos teóricos para o entendimento do método de análise deste trabalho. Dos quais, se destacam os princípios da fluidodinâmica computacional e da construção de ciclones.

2.1 Modelagem Matemática para a Dinâmica dos Fluidos

Modelos matemáticos de qualquer natureza precisam ser embasados nos princípios fundamentais, que são o balanço de massa, balanço de energia e o balanço de momentum linear. Os escoamentos de fluidos podem se encontrar em regime laminar, regime turbulento ou pode estar em transição a turbulência. As equações que melhor representam esses fenômenos são:

- Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- Equação de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{f_i}{\rho_0} \quad (2)$$

- Equação da Energia Térmica:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\phi}{(\rho_0 c_{p0})} \quad (3)$$

As equações 1, 2 e 3 compõem um modelo diferencial na qual pode-se modelar os escoamentos de fluidos. Quando o regime desses escoamentos é turbulento, a solução só pode ser determinada computacionalmente.

A grande maioria dos métodos numéricos utilizados para solucionar o modelo diferencial requerem uma malha composta por volumes finitos, juntamente com o volume físico que contém o problema que deve ser discretizado.

Resolvendo todos os graus de liberdade de um escoamento, se está aplicando a Metodologia de Simulação Computacional Direta (DNS – Direct Numerical Simulation). Nos dias atuais os recursos computacionais disponíveis não são suficientes para utilização desse método para simulação de escoamentos de fluidos em regime turbulento, pois esses fenômenos englobam número muito grande de graus de liberdade.

Para a enorme gama de problemas na engenharia na qual se tem escoamentos de fluidos em regime turbulento, outras metodologias vêm sendo propostas para a solução, eliminando a necessidade de resolver todos os graus de liberdade que caracterizam os escoamentos de interesse.

Contudo essas outras metodologias contêm modelos matemáticos abertos, ou seja, mais incógnitas que equações. Esse é o denominado problema de fechamento da turbulência, logo requer modelos adicionais de fechamento. Esse assunto será discutido nos tópicos 2.1.1 e 2.1.2.

2.1.1 Modelo de Turbulência

Um modelo de turbulência é composto por todas as equações de balanço que são usadas para descrever um escoamento turbulento, inclusive as equações para o fechamento da turbulência, que serão aprofundadas no tópico 2.1.2. De modo geral, as equações citadas devem passar por um dos dois processos descritos a seguir.

O primeiro é a aplicação do operador média temporal, proposto por Boussinesq-Reynolds, que ao trabalhar com a decomposição das equações, promove o surgimento de um tensor simétrico, conhecido como Tensor de Boussinesq-Reynolds, que adicionam seis novas incógnitas para a equação, além do vetor que representa o fluxo turbulento de energia térmica, que também acresce três incógnitas ao problema. Estes componentes tem como função modelar a transferência das informações, que no caso são a quantidade de movimento linear e a energia térmica entre os campos médios de velocidade e temperatura e os campos flutuantes. O que representam os processos não lineares de transferência de informações de natureza advectivas-turbulentas (SILVEIRA NETO, 2020).

O modelo de médias apresentado já soluciona diversos problemas fluidodinâmicos de ordem estacionária, todavia a grande maioria das aplicações em engenharia apresenta um comportamento transiente. Desta forma, Smagorinsky (1963) propôs outra maneira de decompor os escoamentos turbulentos. Todavia, ele dividiu a distribuição das informações em duas bandas de frequências, uma com os maiores e a outra com os menores números de onda. O que assim como o modelo anterior, promove a formação de um sistema de equações aberto, com quatro tensores e quatro fluxos adicionais para serem modelados. O que resultam nas equações 4, 5 e 6:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right] + \frac{\bar{f}_i}{\rho_0} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - q_j \right) + \frac{\bar{\phi}}{(\rho_0 c_{p0})} \quad (6)$$

Onde o tensor τ_{ij} e o fluxo q_j são representados por:

$$q_j = \overline{u_j T} - \bar{u}_j \bar{T} \quad (7)$$

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (8)$$

Tendo estas equações e aplicando limites onde as variações do tempo e volume tendem ao tempo e volume característico de Kolmogorov (KOLMOGOROV, 1941), observa-se que o tensor e o vetor descrito acima tende a 0. Ou seja, as equações filtradas tendem as equações de balanço (2.1) a (2.3). Essa aplicação da origem a metodologia URANS (Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes Equations) da modelagem da turbulência.

O objetivo principal da utilização desse modelo é a simulação do comportamento transiente das baixas frequências do escoamento, o que significa interpretar as regiões com baixos números de onda. Em acréscimo ao modelo de fechamento de turbulência, é necessário modelar praticamente todas as interações não lineares e transferir o resultado para o comportamento de baixa frequência. Dessa forma, o método exige métodos numéricos robustos, com o risco de apresentar baixa taxa de convergência. Todavia, o principal ganho desta metodologia é a possibilidade de utilizar uma malha menos refinada para o cálculo, o que permite um menor custo computacional.

2.1.2 Modelo de Fechamento da Turbulência

Modelos de fechamento de turbulência podem ser classificados quanto a dependência direta da viscosidade e da difusividade turbulentas. Neste trabalho, será abordado somente os modelos que dependem dessas variáveis. Dentro deste tipo de modelo, existe uma divisão quanto a quantidade de equações de balanço adicionais. Da mesma forma, será abordada somente modelos a duas equações de balanço.

O primeiro modelo já proposto foi desenvolvido por Kolmogorov (1942), onde foi apresentado a preocupação em encontrar uma nova equação de balanço para a potência específica de transformação viscosa da energia cinética turbulenta, ω . Além de utilizar outra equação para o balanço da energia cinética específica turbulenta, k . Com estas duas grandezas, Kolmogorov modelou a viscosidade turbulenta, ν_t . O que ficou conhecido como modelo de fechamento $k-\omega$. Todavia este modelo apresenta

uma grande fragilidade, sua aplicação é restringida para escoamentos com elevado número de Reynolds, o que impede que seja usado para problemas com escoamentos próximos a paredes.

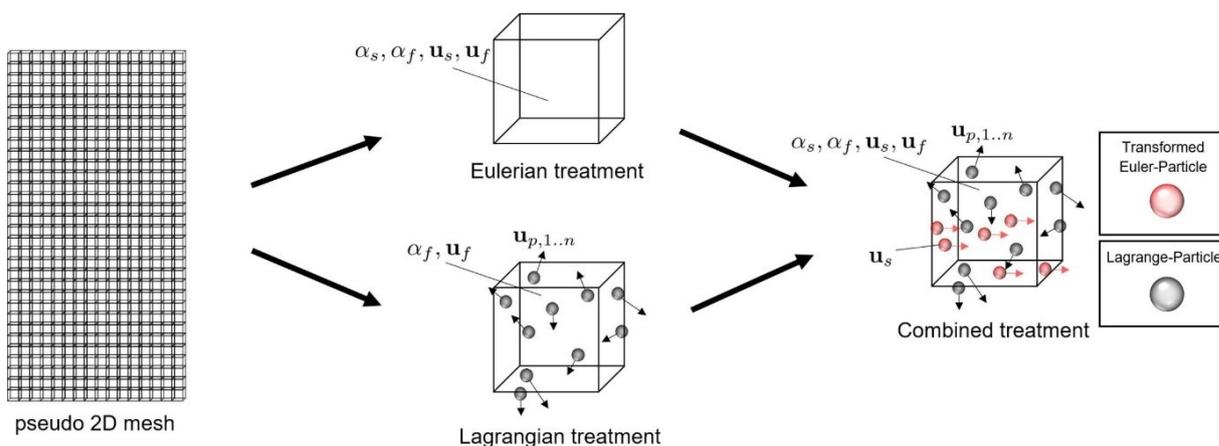
Em um momento posterior, o conceito de potência de transformação viscosa da energia cinética turbulenta, ϵ , que foi modelada em conjunto com o parâmetro k , dando origem ao modelo de fechamento k - ϵ . Vários modelos distintos foram criados para melhorar esse tipo de fechamento, de forma a permitir trabalhar com menores números de Reynolds e não depender da proximidade com as paredes. Contudo, o modelo ainda apresenta algumas deficiências como a necessidade de modelar o amortecimento da viscosidade turbulenta (ν_t) próximas a corpos sólidos. Além disso, existe um problema em que, neste modelo, as tensões cisalhantes na região exterior da camada-limite se encontram sobre preditas, que provoca um sub predição de ϵ , enquanto ocorre uma super predição do comprimento característico da turbulência, o que afeta diretamente o cálculo da viscosidade turbulenta.

Tendo conhecimento destes problemas Menter (1994) propôs o modelo de fechamento SST (Shear Stress Transport) que buscou superar as deficiências dos dois modelos. Para isso, foi utilizado uma divisão do escoamento nas proximidades das paredes, sendo a região interna composta por uma camada logaritmica de natureza não linear, uma subcamada viscosa de natureza linear e uma região entre as duas, enquanto a região externa corresponde a uma região de natureza turbulenta e com elevado número de Reynolds. Nessa região foi utilizado o método k - ϵ , enquanto na região interna, o k - ω . Com a utilização deste método é possível fechar o sistema de equações no modelo de turbulência, permitindo sua simulação.

2.2 Discrete Phase Model

Uma das maneiras de avaliar fluxos multifásicos é o modelo de fases discretas (Discrete Phase Model – DPM). O objetivo de utilizar esse método é avaliar o comportamento de partículas com uma visão lagrangiana, enquanto o fluxo de fluido é medido com uma visão euleriana baseada nos elementos finitos utilizados na simulação. Isso significa que as partículas apresentam um tratamento independente da malha. A Figura 1 apresenta uma representação gráfica do que ocorre em cada uma das situações.

Figura 1 – Diferenças entre o tratamento Lagrangiano e Euleriano



Fonte: HIRCHE, 2019.

Desta maneira, o DPM consegue resolver a fase contínua utilizando dos modelos de turbulência descritos no tópico anterior, enquanto usa ferramentas para calcular o percurso das partículas após sofrerem a influência do fluido estipulado. Estas partículas podem ser desde bolhas, gotas, até partículas sólidas, sendo que elas podem trocar energia térmica, massa e momento linear com o fluido. Além disso, esse método pode ser ainda mais simplificado ao se considerar um volume de controle muito maior que o volume de partículas, uma vez que as colisões entre elas podem ser ignoradas.

O cálculo da posição destas partículas acompanha o passo de tempo da simulação, ou seja, a cada iteração o posicionamento das partículas deve ser calculado. Essa função é realizada pelo modelo de rastreamento estocástico (Random Walk Model) que interpreta o efeito das flutuações de velocidade turbulenta instantânea na trajetória das partículas e permite estimar a dispersão delas.

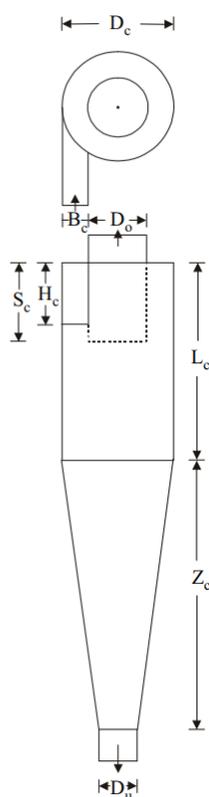
2.3 Construção de Ciclones

Os ciclones são dispositivos que utilizam a ação de um campo centrífugo em seu interior para a separação de partículas. Formado pelo conjunto alimentação e geometria cilíndrico-cônica, o vórtice permite a separação da fase mais densa de uma mistura multifásica.

Existem diversas configurações para a geometria de um ciclone, mas se destacam dois grupos: os ciclones radiais e os axiais. Dentro da gama de ciclones radiais, ainda se encontram mais subdivisões, todas relacionadas as relações

geométricas do ciclone em função do diâmetro do maior cilindro. Na Figura 2, é possível comparar as diferenças geométricas entre dois tipos de ciclone radial: O primeiro tipo, Lapple, e o segundo tipo, Stairmand, são dois modelos de ciclone com eficiências comprovadas pelos estudos de pesquisadores os quais nomeiam o dispositivo.

Figura 2 - Parâmetros geométricos de ciclones radiais



	Ciclone	
	Lapple	Stairmand
B_c / D_c	0,25	0,20
D_o / D_c	0,50	0,50
H_c / D_c	0,50	0,50
L_c / D_c	2	1,50
S_c / D_c	0,62	0,50
Z_c / D_c	2	2,50
D_u / D_c	0,25	0,37

Fonte: MASSARANI, 2001.

Ademais, é possível analisar a performance de um ciclone por sua eficiência de coleta e perda de carga. Tal fator é de extrema importância pois quanto maior a capacidade de coleta dele, menor a complexidade dos equipamentos de controle de qualidade da mistura menos densa (KOCH; LICHT, 1977).

Quanto a configuração dos ciclones axiais, por apresentar uma entrada na face superior, permite se obter uma estrutura simplificada com baixo custo construtivo, além de maximizar o espaço exterior a ele, uma vez que não necessita de uma tubulação ligada tangencialmente ao cilindro externo (CHEN, et al, 2021). Contudo, esse modelo de dispositivo exige um cuidado na confecção das hastes que gera a

força centrífuga, uma vez que o ângulo de saída mais perpendicular ao fluxo gera vórtices com melhores capacidades de separação. Todavia, um ângulo muito próximo a perpendicularidade também pode ser ruim, devido a excessiva perda de carga gerada (GONG, et al, 2012).

Para ciclones radiais, é comum a utilização de ciclones associados em série ou paralelo. O intuito de conectá-los sucessivamente em uma linha é separar os resíduos finos que escapam do primeiro ciclone da série, promovendo uma cadeia de filtragem. No caso, os estágios operam com uma mesma vazão, contudo apresentando uma perda de energia igual a soma das perdas de cada ciclone associado. Enquanto em associações em paralelo, são utilizados dois ciclones iguais com o intuito de aumentar a eficiência de coleta por meio do aumento da velocidade de alimentação de cada equipamento (CREMASCO, 2012).

2.4 Distribuição Granulométrica de Rosin-Rammler-Bennet

Quando se anseia por entender o comportamento de um sistema particulado, é extremamente útil conhecer um modelo de distribuição granulométrica. Essa ferramenta é utilizada para descrever a maneira em que os tamanhos das partículas que estão no sistema estão separados.

Um dos modelos mais conhecidos e utilizados é o modelo de Rosin-Rammler-Bennet (RRB). Nele ocorre o ajuste de uma curva teórica de dados experimentais de distribuição granulométrica, o que permite estimar a porcentagem de partículas que possuem um diâmetro menor do que um determinado valor. Este modelo é definido pela equação 9.

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{D}{D'}\right)^n} \quad (10)$$

Onde X é a fração de partículas com diâmetro menor que D, que é o diâmetro da partícula, D' é o parâmetro característico do material, conhecido como diâmetro médio e n é o parâmetro de dispersão da distribuição.

Este modelo é amplamente utilizado devido a sua simplicidade e eficácia na descrição de uma grande variedade de distribuições granulométricas. Sendo suas principais aplicações em simulação de sistemas particulados, otimização de equipamentos e controle de qualidade.

3. METODOLOGIA

Para a realização da comparação entre os ciclones e da análise do comportamento das partículas do reator, é preciso desenvolver a geometria que será trabalhada em um software de análise numérica-computacional. Neste trabalho foi utilizado o ANSYS® Fluent, especializado em simulação de fluidos, apresenta capacidade avançada de modelagem física. Além de uma interface amigável, com um fluxo de trabalho linear e modelos otimizados para melhorar a performance do computador durante a simulação.

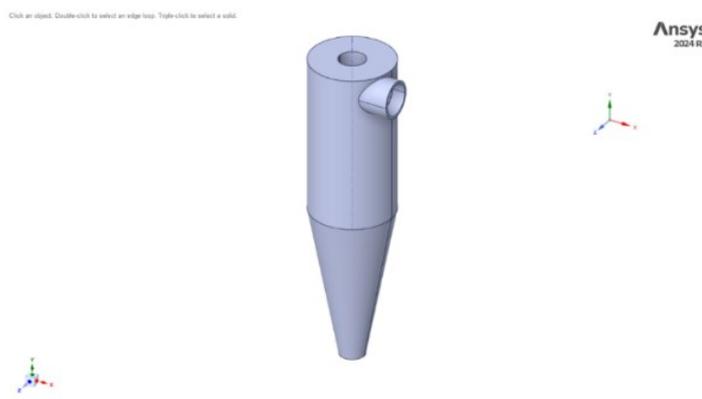
A seguir estão descritos as configurações utilizadas para cada uma das simulações realizadas neste trabalho.

3.1 Comparação entre Ciclones

Este tópico consiste em um estudo preliminar das variações dos ciclones. Conforme explicitado no tópico 2.3, existem diversos tipos de ciclones, contudo, neste trabalho serão comparados dois tipos. O primeiro é um ciclone tangencial Lapple (MASSARANI, 2001), uma configuração padrão com eficiência comprovada (LAPPLE, 1951). Enquanto o segundo é um ciclone axial, o qual deve ser desenvolvido para assemelhar geometricamente com o ciclone Lapple, de forma a validar uma comparação.

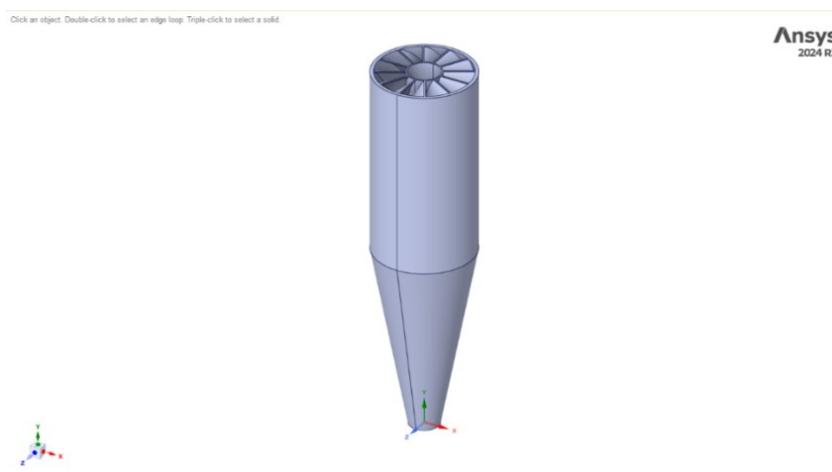
Assim, um ciclone radial foi construído com diâmetro do cilindro externo igual a 381 mm (Figura 3). Da mesma forma foi desenvolvido um ciclone axial, removendo a entrada tangencial e a tampa da parte superior, enquanto se adicionava um conjunto de 12 hastes para guiar o fluxo de entrada e provocar o efeito centrífugo (Figura 4).

Figura 3 – Ciclone radial construído para a simulação.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Figura 4 – Ciclone axial construído para a simulação.

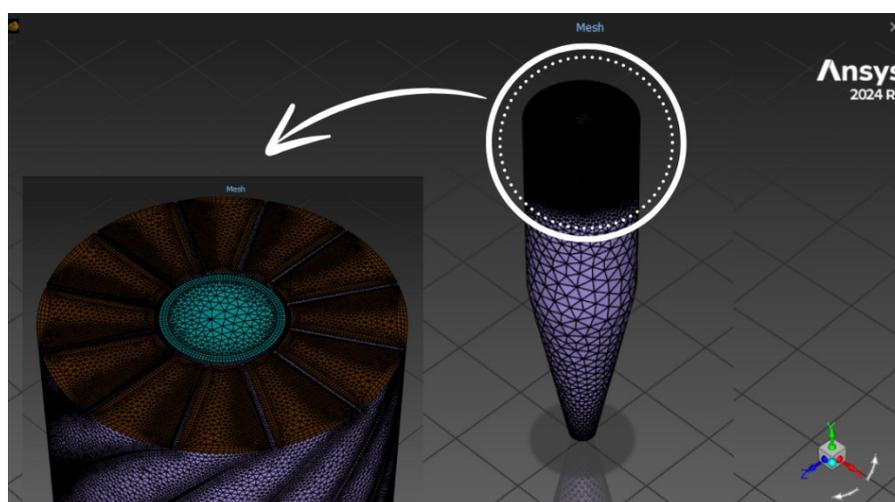


Fonte: Próprio Autor, 2023.

Com as geometrias prontas, foi desenvolvido um modelo numérico em elementos finitos para cada uma, apresentando um refinamento de malha semelhante. Para isso, funções de refinamento em função da proximidade e curvatura da geometria foram estipuladas com um tamanho mínimo de 3 mm e máximo de 3 cm.

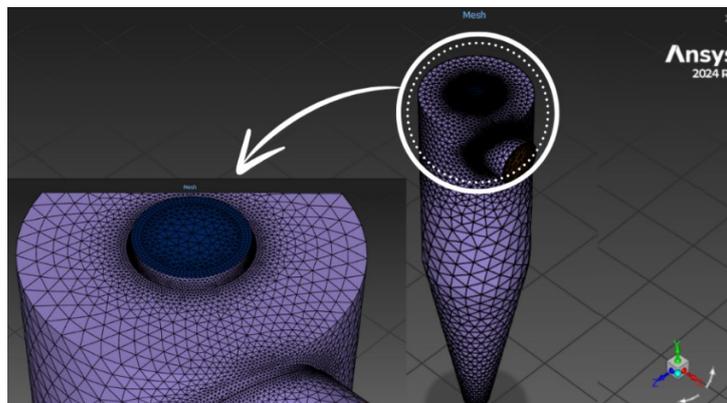
Usando o aplicativo de geração de malha específico para simulações no ANSYS® Fluent (Fluent Meshing), uma malha superficial com elementos de tamanhos limitados entre 5 mm e 50 cm foi gerada. Após identificar as paredes em função de suas condições de contorno, a malha tetraédrica foi formada com tamanho máximo de célula limitado a 7 cm para ambos os ciclones (Figuras 5 e 6).

Figura 5 – Malha do ciclone axial.



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Figura 6 – Malha do ciclone radial.



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Usando o modelo de turbulência URANS, foi escolhido um modelo de fechamento $k-\omega$ -SST. As condições de contorno utilizadas no modelo foram uma vazão mássica nas superfícies de entrada de 0,04 kg/s, pressão nula na saída do ciclone e o balanço de energia foi desconsiderado para melhorar o desempenho da simulação, tendo em vista que comparações de temperatura não seriam interessantes para o caso.

Com estes parâmetros, é possível avaliar a pressão de entrada e obter a perda de carga de cada geometria, que é um dos pontos nos quais pode se avaliar a eficiência de um ciclone.

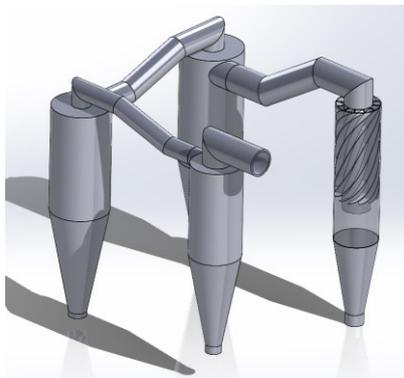
3.2 Associação de Ciclones

Com o modelo acima validado, foi gerado um ciclone axial modificado para se adequar a geometria de um reator cúbico e otimizar o espaço no seu interior. Estas alterações consideraram também o ângulo de hélice, com objetivo de não gerar muita perda de carga (GONG, et al, 2012).

Então foi construída uma montagem (Figura 7) associando quatro ciclones, sendo somente o primeiro com configuração axial. Isso se deu pela geometria complexa da entrada deste tipo de ciclone, a qual possui a saída na mesma direção, o que dificultaria a conexão com um ciclone anterior. Portanto foram usados três ciclones radiais em série após o ciclone axial, sendo que cada um apresentava um diâmetro externo menor que o seguinte, sendo eles respectivamente 355,60/332,80/292,72 mm para os ciclones tangenciais, uma vez que ciclones iguais

apresentariam capacidades de filtragem semelhantes, era necessário melhorar o seu alcance conforme o fluxo de mistura progredia.

Figura 7 – Geometria da associação de ciclones

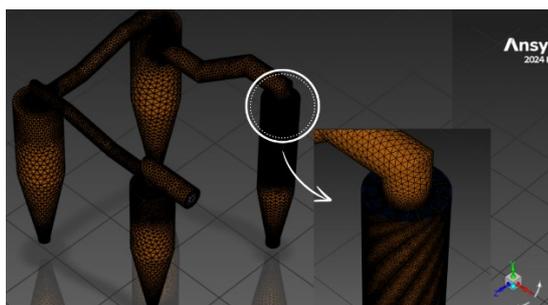


Fonte: Próprio Autor, 2023.

Uma adequação necessária para a economia na construção dos ciclones foi a alteração da entrada dos ciclones radiais. Da literatura, é conhecido que ciclones à gas trabalham com entradas quadradas, enquanto hidrociclones utilizam cilindros para a injeção da mistura. Todavia, com o conhecimento de que a saída dos ciclones é cilíndrica, foi escolhido manter essa geometria para a entrada dos dispositivos em sequência. Para isso, foi mantida a área da entrada indicada na Figura 1, além da tangência na disposição destes cilindros.

Com a finalização dos ajustes da geometria foi criada uma malha com limitações de refino em pontos de proximidade e curvatura com as mesmas dimensões das utilizadas no teste anterior. O que deu origem a uma malha com aproximadamente 800.000 elementos (Figura 8), número que pode ser considerado como satisfatório para o objetivo deste trabalho.

Figura 8 – Malha da associação de ciclones.



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Para a simulação deste problema, foi utilizado o mesmo modelo de turbulência do sistema anterior. Em adição, nesta simulação foi considerada um modelo DPM para calcular o movimento do particulado no interior dos ciclones. Como condição de contorno, foi considerada uma vazão de 0,1985 kg/s de ar e 0,1073 kg/s de partículas, as quais apresentavam uma densidade de 1600 kg/m³ e apresentavam uma variação de 10 diâmetros entre 150 µm e 50 µm, distribuídas com um modelo de distribuição granulométrica de Rosin-Rammler-Bennet (RRB), onde foi utilizado um diâmetro médio (D') de 100 µm e um fator de dispersão (n) de 3,5, além de uma velocidade de injeção equivalente a de entrada do sistema. Além disso todo o sistema estava aquecido a 500°C.

O insuflamento de partículas foi iniciado no começo da simulação e continuou por 0.1 segundos, permitindo a observação de um “grupo” de partículas injetado no sistema. Essa ação foi motivada por duas razões, a primeira é permitir uma observação mais limpa do comportamento das partículas e identificar o funcionamento correto dos ciclones com maior clareza, enquanto a segunda é para evitar uma grande quantidade de partículas injetadas no sistema, o que prejudicaria a eficiência da simulação, exigindo grande custo computacional.

3.3 Corpo do Reator

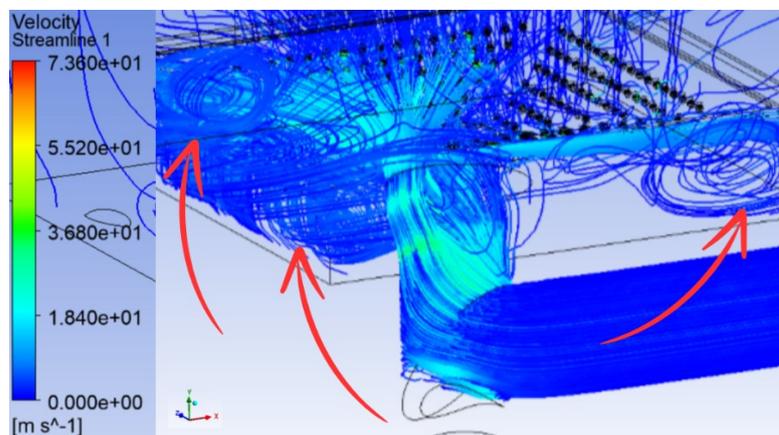
Este trabalho surgiu da necessidade de analisar um reator cúbico. Um dos elementos principais dos reatores com leito fluidizado é a grelha, que em grande maioria consiste em uma peça cônica. Todavia, neste sistema foi necessário desenvolver uma grelha piramidal para se adequar ao restante do dispositivo.

Esta foi construída com um total de 464 furos, sendo 116 em cada uma das superfícies, os quais foram realizados de forma perpendicular a superfície da grelha. Além disso, foram adicionados pinos para guiar o fluxo de ar que entra no reator de forma a induzir um movimento rotativo do leito fluidizado. Essa alteração serviria para impedir acúmulo de particulado em quinas, que é um problema intrínscico a geometria de reator trabalhada.

A princípio a região abaixo da grelha foi desenvolvida como uma caixa, todavia em simulações preliminares, foi notado que havia um problema de recirculação de ar no interior dela (Figura 9), o que exigia alterações devido a grande perda de carga proporcionada. Dessa forma, foi necessário reduzir o espaço entre a caixa e a grelha.

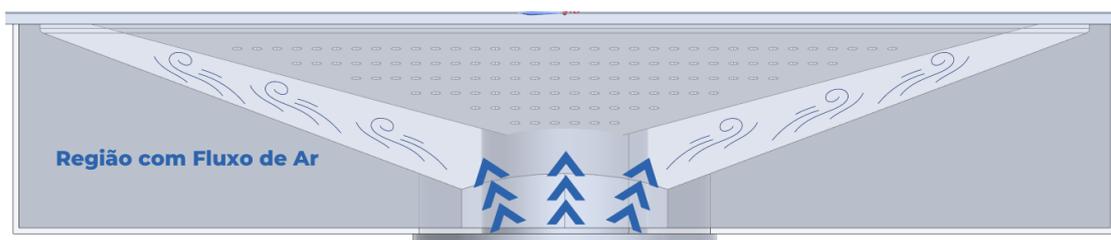
A solução encontrada foi adicionar chapas piramidais maiores que a grelha reduzindo este espaço, conforme demonstrado na Figura 10.

Figura 9 – Simulação da geometria preliminar da grelha.



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Figura 10 – Detalhe em corte da grelha modificada com indicações de fluxo.



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Com as alterações na grelha, faltava apenas uma mudança na geometria para a realização da simulação. Esta foi a desconsideração do volume interno dos ciclones em série, sendo somente o primeiro ciclone, axial, reconhecido no volume da simulação. Esta escolha se deu por não ser necessário simular o comportamento no interior da associação novamente, o que possibilitou uma malha menos detalhada, consequentemente uma simulação com menor esforço computacional.

Assim como nos itens anteriores, a simulação utilizou do modelo de turbulência URANS com um modelo de fechamento $k-\omega$ -SST. Na entrada do sistema foi selecionada uma vazão de ar de 800 kg/h a uma temperatura de 450°C. As partículas foram injetadas por meio de um volume de controle representado por um espaço de 0,9 m³ no interior do reator. Neste espaço foram inseridos 5 kg de partículas com densidade de 500 kg/m³, além de uma distribuição granulométrica seguindo o modelo

RRB com diâmetros variando entre 25 mm e 0,18 mm, apresentando um diâmetro médio (D') de 1 mm e um parâmetro de dispersão (n) de 3,5, totalizando 879.823 partículas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

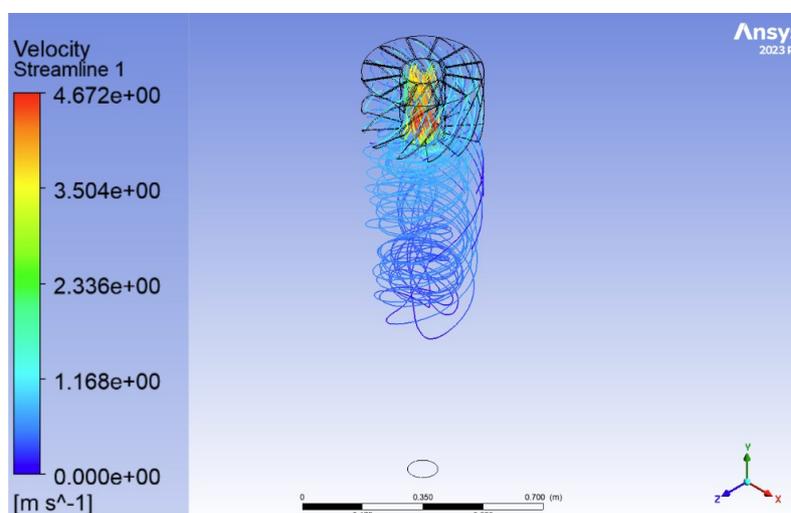
Após o cálculo computacional, foi possível extrair resultados da simulação usando o software de pós-processamento dedicado ao software Fluent, CFD-Post. A seguir serão apresentados os resultados das análises realizadas tanto do comportamento das partículas quanto da fluidodinâmica no interior dos dispositivos.

4.1 Comparação de Ciclones

Nas Figuras 11 e 12 é possível analisar as linhas de corrente, coloridas pela velocidade calculada na simulação, dos dois ciclones. Em ambos os casos foram utilizadas uma vazão mássica equivalente, todavia as velocidades iniciais foram diferentes, uma vez que os dispositivos possuem seções de entrada distintas. No caso, o ciclone axial apresentou uma velocidade inicial de 0.4265 m/s e o radial com 2 m/s.

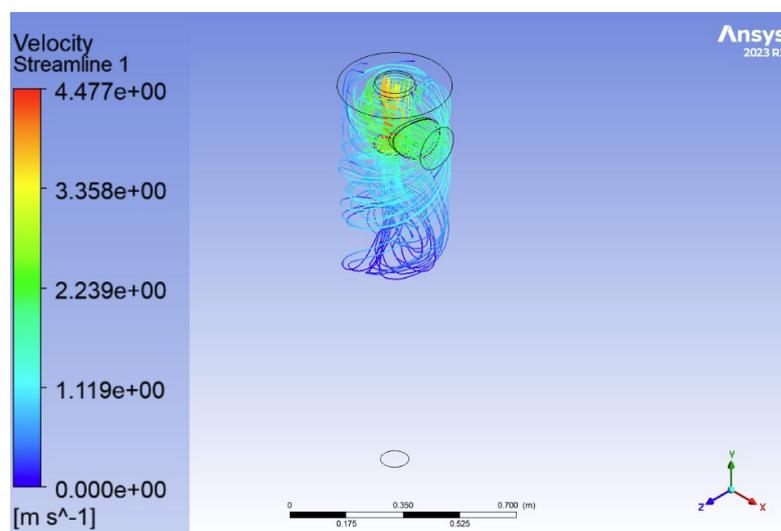
Contudo, mesmo com uma velocidade inicial menor, o ciclone axial apresentou um pico de velocidade maior, além de uma região de atuação de força centrífuga maior. Todavia, essa vantagem trouxe consequências na perda de carga do ciclone axial, que apresentou uma diferença de pressão de 9.9 Pa, enquanto o delta do ciclone tangencial foi de 9 Pa, aproximadamente 10% menor.

Figura 11 – Linhas de corrente coloridas pela velocidade no Ciclone Axial



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Figura 12 – Linhas de corrente coloridas pelas velocidades no Ciclone Radial



Fonte: Próprio Autor, 2023.

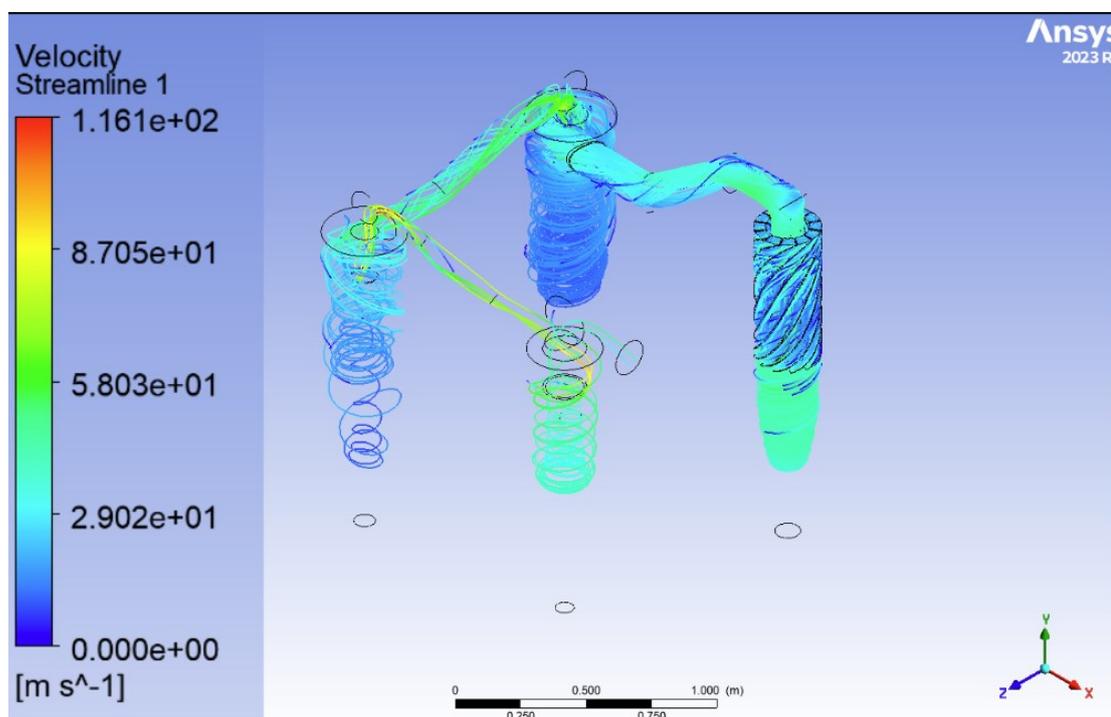
4.2 Associação de Ciclones

Na simulação dos 4 ciclones em série, uma velocidade de entrada de 17,78 m/s foi considerada, ao final uma diferença de pressão de 6762,63 Pa foi encontrada. Na Figura 13, as linhas de fluxo coloridas pela velocidade demonstram o fluxo de gás no interior do dispositivo e ao longo da tubulação que interliga os ciclones. Um aumento na velocidade é observado nas tubulações de ligação entre os ciclones, o que é esperado tendo em vista a redução de área nestas regiões e a vazão mássica que se mantém constante, conforme dados extraídos ao final da simulação e expostos na Tabela 1.

Tabela 1: Balanço de massa reportado pela plataforma após a simulação.

Vazão Mássica [kg/s]	Valores
Entrada	0,19853765
Saída	-0,1979386
Balanço	0,000599052

Figura 13 – Linhas de corrente coloridas pelas velocidades na associação de ciclones

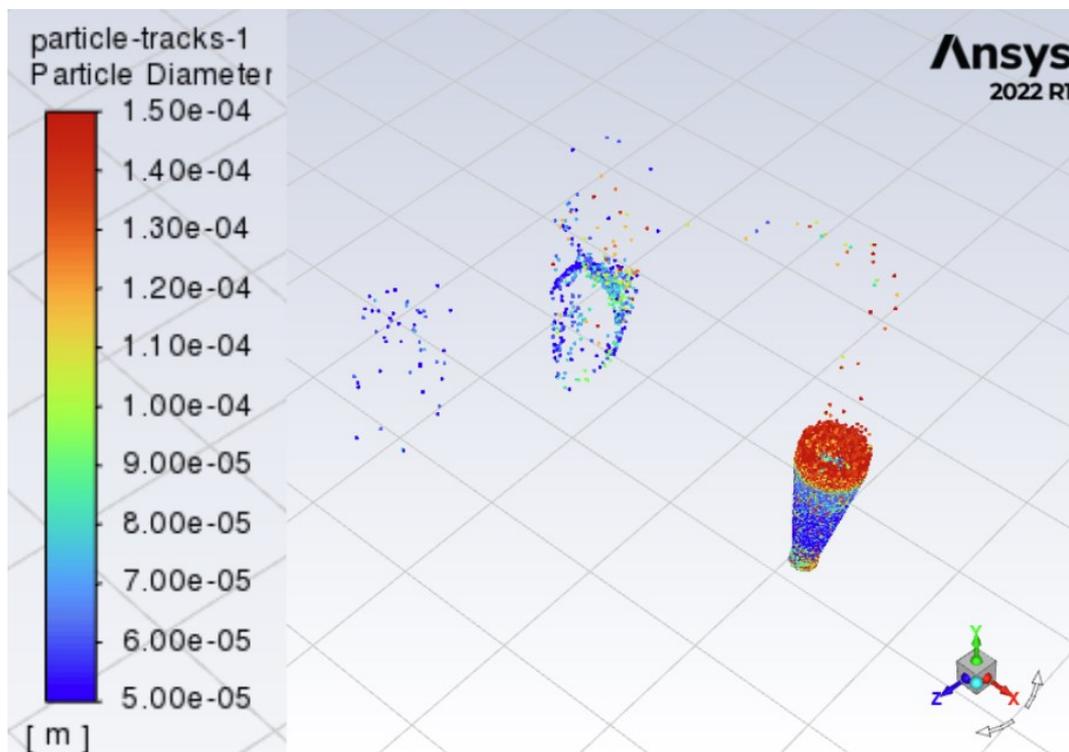


Fonte: Próprio Autor, 2023.

As Figuras 14 e 15 a seguir demonstram a retenção de partículas ao longo dos 4 ciclones associados em tempos diferentes. Nelas é possível observar que as partículas com maiores diâmetros são retidas em sua maioria no ciclone axial, enquanto as partículas com menores dimensões conseguem seguir durante o conjunto, sendo retidas pelos ciclones radiais.

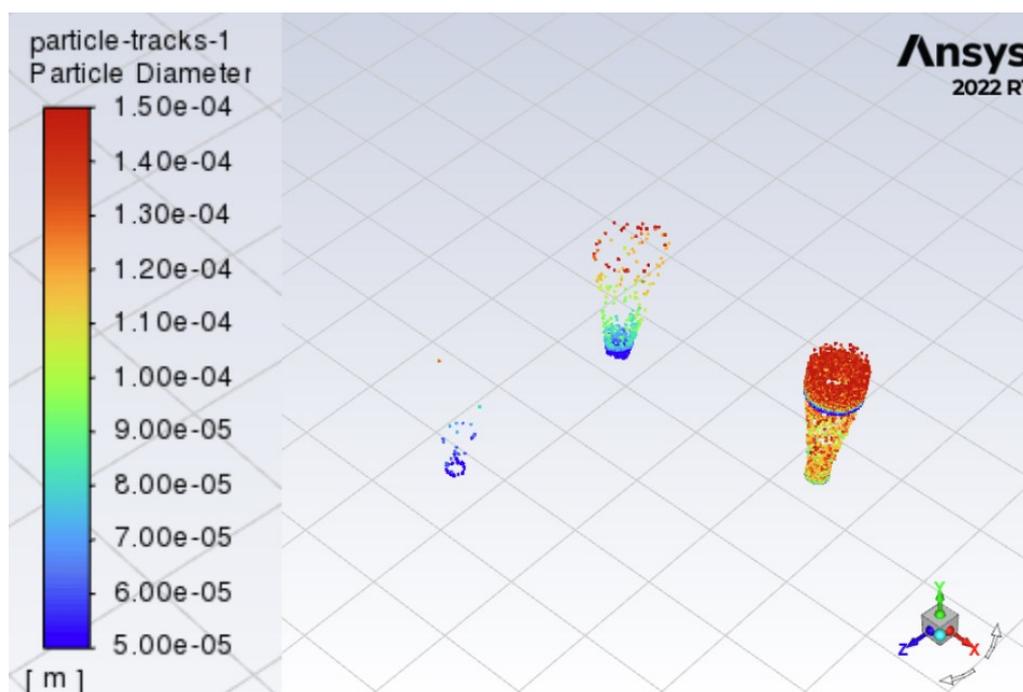
A Figura 16 apresenta a vazão em kg/s de partículas na saída do último ciclone, o que permite observar que a associação de 4 ciclones demonstrou sucesso, tendo em vista que todas as partículas foram retidas pelo conjunto de ciclones. Esse fenômeno pode ser observado durante a simulação gráfica do comportamento das partículas (Figuras 14 e 15).

Figura 14 – Medição do diâmetro das partículas e suas posições quando as partículas alcançam o terceiro ciclone



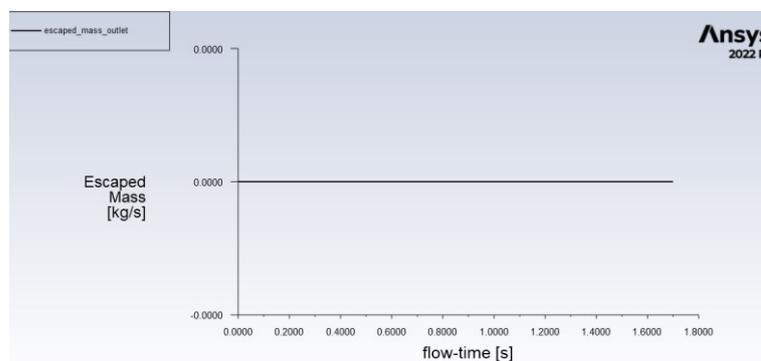
Fonte: Próprio Autor, 2023.

Figura 15 – Medição do diâmetro das partículas e suas posições ao final da simulação



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Figura 16: Vazão mássica de partículas que escaparam pelo último ciclone em função do tempo físico de simulação

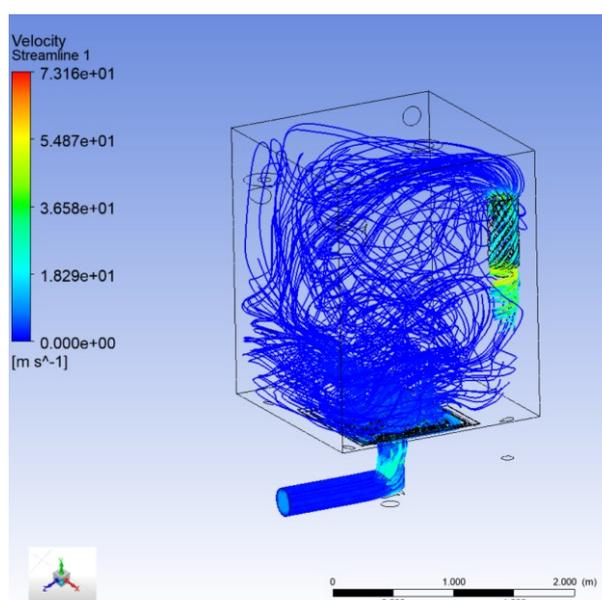


Fonte: Próprio Autor, 2023.

4.3 Corpo do Reator

O primeiro tópico que deveria ser observado ao final da simulação é o fluxo de ar no interior do reator. Era necessário verificar se os bicos posicionados na grelha estavam induzindo um fluxo circular no interior do dispositivo. Na Figura 17, é possível observar as linhas de fluxo desempenhando um padrão esperado, criando “vórtices” que provocam a rotação do leito fluidizado.

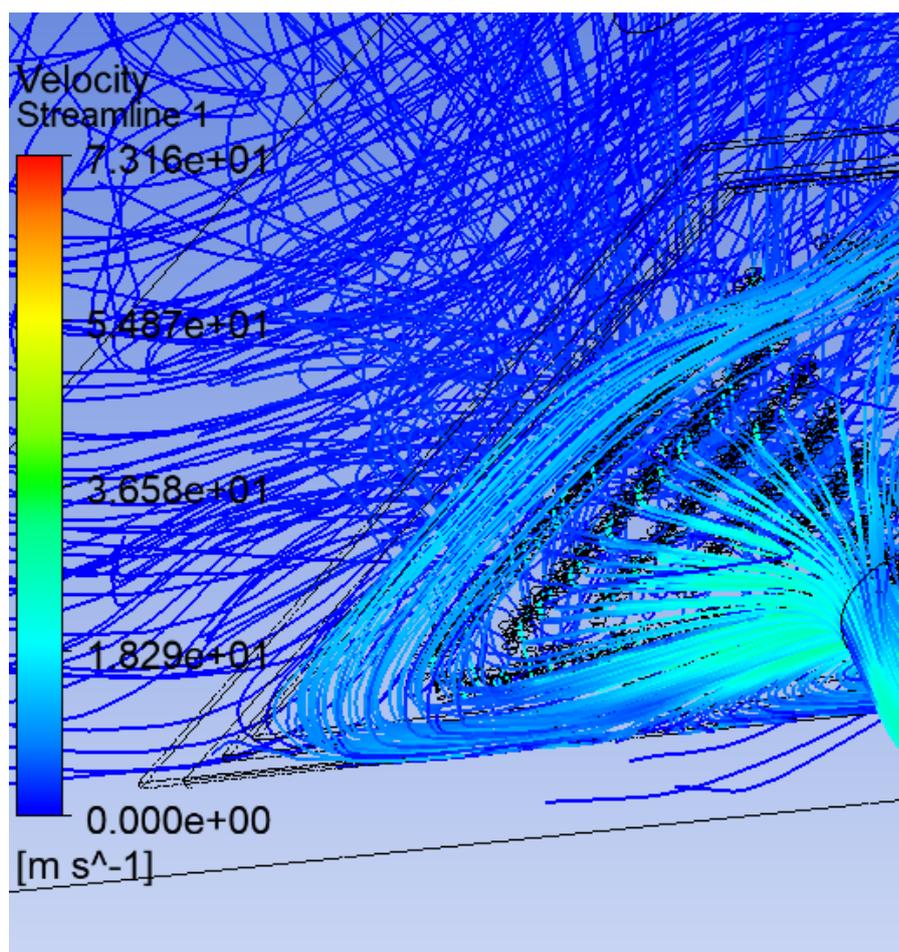
Figura 17 – Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar no reator em vista isométrica



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Já na Figura 18, é possível observar que a recirculação no interior da grelha está minimizada, o que é observável pela baixa quantidade de vórtices nas linhas de fluxo. Esse resultado demonstra a necessidade da adequação piramidal no inferior da grelha e comprova sua eficácia.

Figura 18 – Linhas de fluxo coloridas pela velocidade no interior da grelha



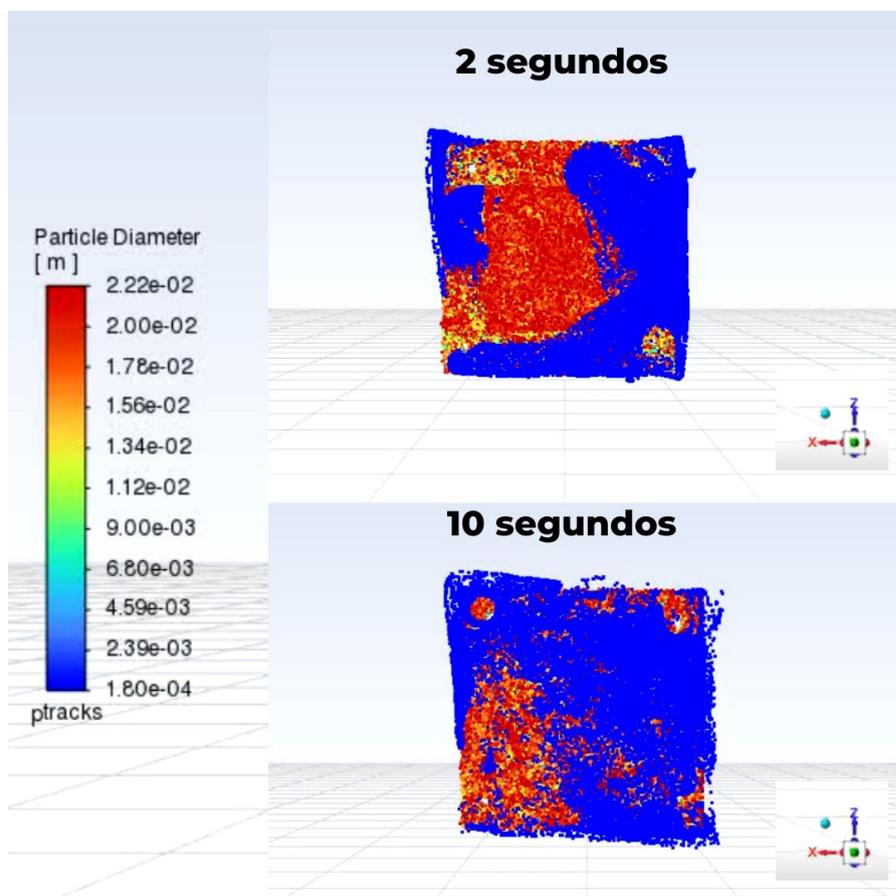
Fonte: Próprio Autor, 2024.

A simulação representou o resultado de 15 segundos físicos de fluxo injetado no interior do reator, assim como o movimento das partículas. Na Figura 19, é possível observar o fluxo de partículas seguindo na direção do ciclone axial, por meio de uma vista em plano superior, no tempo de 2 segundos.

Fazendo uma comparação com o tempo de 10 segundos, o fluxo é intensificado e o movimento do leito fluidizado também pode ser observado. O auxílio da animação é fundamental para melhorar a avaliação do resultado. Ademais, na Figura 20, é

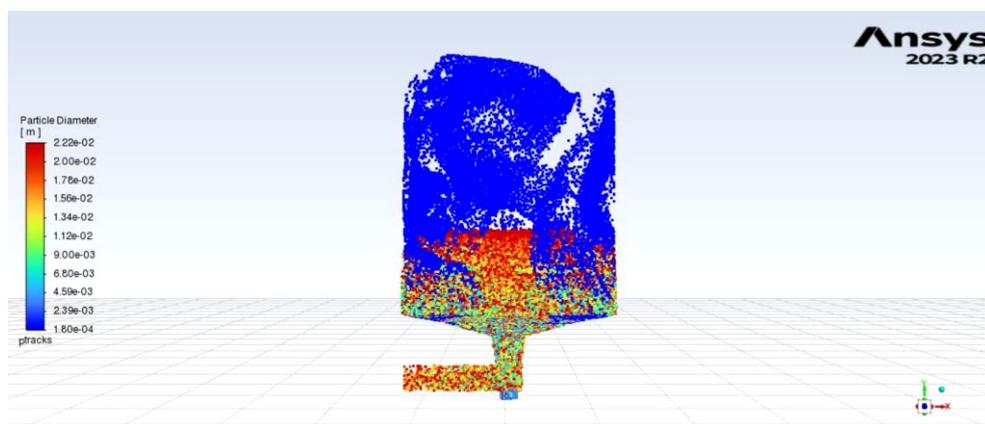
perceptível que somente partículas de menores diâmetros são elevadas pelo ar injetado no inferior do reator, uma vez que apresentam menor massa.

Figura 19 – Vista superior do movimento das partículas nos tempos de 2 e 10 segundos



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Figura 20 – Vista lateral do movimento das partículas no tempo de 4 segundos



Fonte: Próprio Autor, 2024.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs a realização de simulações para o entendimento da fluidodinâmica e do comportamento de partículas no interior de um reator com leito fluidizado e presença de ciclones associados em série.

A priori, é possível concluir pelas simulações dos ciclones isolados que o ciclone axial apresenta um melhor desempenho em comparação com os ciclones radiais, por apresentar uma maior velocidade e conseqüentemente reter um número maior de partículas. É possível inferir também que este ciclone possibilita uma maior economia de energia ao transportar e separar partículas ao se comparar com o radial, uma vez que para uma mesma eficiência o ciclone axial apresentará menor perda de carga.

Em um segundo momento, a utilização do ciclone axial em associação com os 3 ciclones radiais permite uma maior taxa de retenção de partículas, que em sua maioria são captadas pelo primeiro ciclone, enquanto as partículas menores seguem nos demais, sendo removidas parcialmente pelo primeiro ciclone radial e completamente no segundo ciclone radial. Ademais, o último ciclone permite uma garantia da limpeza do gás para partículas com mais de 50 μm , além de auxiliar na filtragem de partículas menores que não estão no escopo da simulação.

Quanto a simulação do reator como um todo, foi observado que as partículas se deslocaram de acordo com a corrente de ar que passou por elas, conforme o esperado após a inclusão dos pinos na grelha. Esta possibilitou um movimento circular do leito fluidizado, que impedirá a acumulação de partículas nas superfícies inferiores do reator, além de indiretamente melhorar a mistura dos resíduos que sofrerão decomposição.

Considerando a distribuição de partículas utilizada na última simulação (conforme tópico 3.3), foi possível constatar que o diâmetro médio que chegou até a entrada do ciclone axial foi de 3 mm. De modo geral, essa análise permitiu garantir, por meio de simulações numéricas, que o reator com ciclones em série proporciona a geração de um gás com baixíssimo teor de material particulado.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi utilizado o método DPM para análise do comportamento de partículas. Todavia, existem vários outros métodos mais completos para análise. Isso se deve ao uso de acoplamento em 2 vias nas simulações com o método utilizado, o que significa que a partícula sofre influência do fluxo em dois sentidos, porém sem considerar a ação entre partículas, que é o conhecido como acoplamento em 4 vias.

No software comercial ANSYS®, existe um programa chamado de Rocky, que é especializado em comportamento de partículas sólidas em um sistema qualquer. Nele existem métodos mais avançados para a realização da simulação de forma a encontrar resultados mais condizentes com a realidade, principalmente com relação ao contato entre partículas.

Tal tipo de solução é ideal para a simulação do leito fluidizado do reator, sendo uma opção que deve ser estudada para encontrar um resultado mais preciso.

REFERÊNCIAS

ANGEL, J.D.M.; VÁSQUEZ, T.G.P.; JUNKES, J.A.; HOTZA, D. Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado. **Química Nova**. v. 32, n. 5, p. 1110-1114, 2009.

ARAUJO, Ramires Menezes da Silva. **Estudo comparativo de processos de gaseificação de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

ARENA, U.; ZACCARIELLO, L.; MASTELLONE, M.L. Fluidized bed gasification of waste derived fuels. **Waste Management**. v. 30, n. 7, p. 1212-1219, 2010.

CHEN, X.; YU, J.; ZHANG, Y. The use of axial cyclone separator in the separation of wax from natural gas: A theoretical approach. **Energy Reports**. v. 7, p. 2615-2624, 2021.

CORRÊA, R.G. **Proposta de um modelo de turbulência híbrido LES-URANS para escoamentos em ciclones**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

CREMASCO, M.A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 1. Ed. Blucher, São Paulo, 2012.

GONG, G.; YANG, Z.; ZHU, S. Numerical investigation of the effect of helix angle and leaf margin on the flow pattern and the performance of the axial flow cyclone separator. **Applied Mathematical Modelling**. v. 36, p. 3916-3930. 2012.

HIRCHE, D.; BIRKHOLZ, F.; HINRICHSEN, O. A hybrid eulerian-eulerian-lagrangian model for gas-solid simulations. **Chemical Engineering Journal**. v. 377, 119743, dez. 2019.

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

KOCH, W.H.; LICHT, W. New design approach boosts cyclone efficiency. **Chemical Engineering Magazine**, v. 84, p. 80-88, 1977.

KOLMOGOROV, A.N. On degeneration of isotropic turbulence in an incompressible viscous liquid. **Doklady Akademii Nauk SSSR**. v. 31, p. 538-541, 1941.

KOLMOGOROV, A.N. The equation of turbulent motion in an incompressible fluid. **Izvestia Acad. Sci.**, v. 6, p. 56-58, 1942.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. Ed. Butterworth-Heinemann, 1991.

LAPPLE, C.E. Processes use many collector types. **Chemical Engineering Magazine**. v. 58, p. 144-151, 1951.

LAUNDER, B.E.; SPALDING, D.B. The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. v. 3, p. 269-289. 1974.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 2. Ed. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2001.

MATERAZZI, M; LETTIERI, P; MAZZEI, L; TAYLOR, R; CHAPMAN, C. Thermodynamic modeling and evaluation of two-stage thermal process for waste gasification. **Fuel**. London, v. 108, p. 356-369, jun 2013.

MATTÉ, R. C.; SILVA, A. M.; SFREDO, G.M. Aplicação dos modelos matemáticos GGS e RRB para distribuição granulométrica de aveia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 20, n.1, p. 45-51, 2016.

MENTER, F.R. Two-Equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA Journal**. v. 32, p. 1598-1605, 1994.

MUCELIN, C.A.; BELLINI, M. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. **Sociedade & Natureza**. Uberlândia, v. 20, n. 1, p. 111-124. jun. 2008.

ORONA, J.D.; ZORRILLA, S.E.; PERALTA, J.M. Computational fluid dynamics combined with discrete element method and discrete phase model for studying a food hydrofluidization system. **Food and Bioproducts Processing**. v. 102, p. 278-288, mar. 2017.

SILVA, E.R. A gestão do “lixo” e suas implicações na construção de cidades sustentáveis. **Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM**. v. 8, n. 2, 2013.

SILVEIRA NETO, A. **Escoamentos turbulentos análise física e modelagem teórica**. 1. Ed. Composer, Uberlândia, 2020.

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations. **Monthly Weather Review**. v. 91, n. 3, p. 99-164, 1963.

TSAI, C.J.; CHEN, D.R.; CHIEN, H.M.; CHEN, S.C.; ROTH, J.L.; HSU, Y.D.; LI, W.; BISWAS, P. Theoretical and experimental study of an axial flow cyclone for the fine particle removal in vacuum conditions. **Journal of Aerosol Science**. v. 35, p. 1105-1118, 2004.

WANG, T.; ZHANG, F.; FURTNEY, J.; DAMJANAC, B. A review of methods, applications and limitations for incorporating fluid flow in the discrete element method. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**. v. 14, p. 1005-1024, 2022.

WILCOX, D.C. **Turbulence modeling for CFD**. DCW Industries, La Canada, California, 1998.