



**ISABELA ALMODOVA ARANDA**

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM  
CICLONE DO TIPO LAPPLE**

**LAVRAS – MG**

**2021**

**ISABELA ALMODOVA ARANDA**

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM CICLONE DO TIPO LAPPLE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Alexandre de Paula Peres  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2021**

**ISABELA ALMODOVA ARANDA**

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM CICLONE DO TIPO LAPPLE  
SIMULATION OF FLOW IN A LAPPLE CYCLONE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Alexandre de Paula Peres UFLA

Prof. Suellen Mendonça Nascimento UFLA

Prof Marlus Pinheiro Rolemberg UNIFAL

Prof. Dr. Alexandre de Paula Peres

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2021**

*A Deus que sempre esteve ao meu lado providenciando todas as coisas.*

*Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, o qual me fez chegar até aqui, por ter me permitido sonhar e realizar, por guiar meus passos e iluminar meu caminho mesmo quando parecia impossível, e principalmente por todas as oportunidades.

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe Rosângela, meu irmão José Ricardo, meus padrinhos Carmen Lúcia e Klaus e aos meus avós Rosa, Carmen e José por sempre acreditarem em mim, pelo amor incondicional e por estarem ao meu lado em todos os momentos. Essa conquista não é só minha, mas sim nossa.

Agradeço aos meus grandes amigos de graduação, José Carlos, Joyce e Karina, pela amizade, por todo apoio e por trilharem essa trajetória junto a mim, tornando-a mais leve.

Agradeço a todos os meus professores, em especial ao Prof. Dr. Irineu Petri por ter me apresentado à fluidodinâmica computacional e ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre de Paula Peres pela orientação, paciência e conhecimento compartilhado.

Agradeço a Universidade Federal de Lavras por ter me proporcionado o privilégio de um ensino público, gratuito e de qualidade.

Deixo aqui, os meus mais sinceros agradecimentos!

## RESUMO

Este trabalho se propôs estudar o escoamento de um gás a 377 K no interior de um ciclone do tipo Lapple por intermédio da fluidodinâmica computacional (CFD). Essa técnica tem se mostrado capaz de prever com sucesso os complexos fenômenos que ocorrem no interior ciclônico, uma vez que os resultados numéricos se assemelham muito aos experimentais. Desta forma, construiu-se uma malha numérica o pré-processador Meshing, empregou-se o código comercial Fluent – versão 2020 R2, da Ansys, o qual utiliza o método dos volumes finitos para a obtenção das soluções das equações de transporte, ademais, utilizou-se o modelo de turbulência *Reynolds Stress*. Observou-se o comportamento fluidodinâmico do gás no interior do equipamento a partir da variação da velocidade de escoamento do fluido. Foram estudadas três diferentes velocidades, sendo elas 6,93 m/s, 12,98 m/s e 20,99 m/s. Constatou-se que a máxima velocidade ocorre próxima a parede do equipamento e a mínima velocidade no eixo central, caracterizando uma simetria neste perfil. Os resultados obtidos comprovaram que a metodologia empregada se mostrou adequada e apta a reproduzir o comportamento fluidodinâmico do escoamento do gás em ciclones, bem como o CFD se mostrou uma excelente ferramenta para prever resultados experimentais, visto que a diferença percentual entre os valores de simulação e os valores experimentais não ultrapassaram os 10%.

**Palavras-Chave:** Fluidodinâmica, escoamento turbulento, ciclone Lapple.

## ABSTRACT

The work aimed to study the flow of a gas at 377 K inside a Cyclone of the Lapple type by means of computational fluid dynamics (CFD). This technique has been shown to be able to successfully predict the complex phenomena that occur in the cyclonic interior, since the numerical results are very similar to the experimental ones. In this way, a numerical mesh was built, the pre-processor Meshing, the commercial code Fluent - version 2020 R2, from Ansys, was used, which uses the finite volume method to obtain the solutions of the transport equations, in addition, the Reynolds Stress turbulence model was used. The fluid dynamic behavior of the gas inside the equipment was observed from the variation of the flow velocity of the fluid. Three different speeds were studied, 6.93 m / s, 12.98 m / s and 20.99 m / s. It was found that the maximum speed occurs close to the equipment wall and the minimum speed on the central axis, characterizing a symmetry in this profile. The results obtained proved that the methodology used proved to be adequate and able to reproduce the fluid dynamic behavior of the gas flow in cyclones, as well as the CFD proved to be an excellent tool to predict experimental results, since the percentage difference between the simulation values and the experimental values did not exceed 10%.

**Keywords:** Fluidodynamics, turbulent flow, Cyclone Lapple.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática das dimensões de um ciclone. ....	14
Figura 2 - Ciclone industrial.....	16
Figura 3 - Representação das curvas fundamentais em um processo de secagem. ....	18
Figura 4 - Tipos de malhas computacionais.....	20
Figura 5 – Geometria construída para um ciclone do tipo Lapple com $D_c = 0,2$ m.....	31
Figura 6 – Malha gerada.....	32
Figura 7 – Parâmetros de qualidade para malha gerada. ....	33
Figura 8 – Método de solução.....	34
Figura 9 –Contorno de velocidade para simulação de 6,93 m/s. ....	35
Figura 10 –Contorno de velocidade para simulação de 12,98 m/s. ....	36
Figura 11 –Contorno de velocidade para simulação de 20,99 m/s. ....	37
Figura 12 – Contornos de Pressão para as corridas 1, 2 e 3.....	38
Figura 13 – Posições utilizadas para estudo da distribuição de velocidade. ....	40
Figura 14 – Gráfico Velocidade x Posição radial para Perfil 1. ....	41
Figura 15 – Gráfico Velocidade x Posição radial para Perfil 2. ....	42
Figura 16 – Gráfico Velocidade x Posição radial para Perfil 3. ....	43
Figura 17 – Gráfico Velocidade x Posição radial Perfil 2 para Temperatura ambiente. ....	44

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Proporções geométricas para um ciclone Lapple.....</b>	<b>15</b>
<b>Tabela 2 – Dados experimentais.....</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 3 - Proporções geométricas para um ciclone Lapple.....</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 4 – Dados de temperatura obtidos para simulação de 6,93 m/s.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 5 – Dados de temperatura obtidos para simulação de 12,98 m/s.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 6 –Dados de temperatura obtidos para simulação de 20,99 m/s.....</b>	<b>39</b>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Geral .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Específicos .....</b>	<b>13</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Ciclone .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Secagem com ciclone .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.1 Fundamentos do processo de secagem.....</b>	<b>17</b>
<b>3.3 Fluidodinâmica computacional em Ciclones.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3.1 Pré-processamento.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3.2 Processamento.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.3 Pós-processamento .....</b>	<b>22</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
<b>5 RESULTADOS E DICUSSÕES.....</b>	<b>30</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>7 SUGESTÕES .....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os ciclones são equipamentos comumente empregado na indústria de processos para separação de sólidos de uma corrente gasosa, sendo cone-cilíndrica a sua forma clássica. Embora apresente uma geometria simples e baixo custo operacional, o regime dinâmico em seu interior é complexo, uma vez que apresenta zonas de recirculação e grande perda de carga.

Importantes trabalhos sugerem a viabilidade da aplicação de ciclones como equipamento de troca térmica, principalmente nos casos em que são necessárias altas taxas de transferência de calor entre as paredes do equipamento e o gás. Assim, a transferência de calor nestes equipamentos tem ganhado atenção especial por se tratar de uma alternativa ao uso de trocadores de calor e secadores, no sentido de que quando a separação pode ser feita a altas temperaturas, duas etapas se unem em apenas uma, economizando tempo e aumentando a rentabilidade do processo. Associado a isso tem-se uma infinidade de materiais que precisam ser submetidos à secagem, havendo a necessidade de aprofundar estudos a cerca de secadores alternativos.

Modernas técnicas responsáveis pelo desenvolvimento de processos de engenharia, como as da fluidodinâmica computacional (CFD), têm se mostrado capazes de auxiliar nas investigações científicas de fenômenos que ocorrem no interior ciclônico. O estudo da dinâmica dos fluidos era anteriormente observado apenas por meio de pesquisas experimentais, os dados eram coletados algumas vezes de forma inadequada, com baixa confiabilidade, dificultando avaliar a performance do equipamento e realizar melhorias em seu projeto, no entanto os métodos numéricos surgiram para auxiliar tal estudo.

Neste sentido, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) surge como uma ferramenta poderosa, com amplas aplicações no ramo da engenharia, capaz de realizar simulações muito próximas à realidade, com o intuito de minimizar o tempo e os recursos financeiros gastos em experimentos. As equações utilizadas são as de Navier-Stokes e a da Continuidade, e são obtidas a partir da conservação de massa, energia e de momento. Estas equações são transformadas em sistemas de equações na forma discreta e aplicadas a cada elemento do volume, para obter campos de temperatura, velocidade e pressão, as soluções numéricas são obtidas pelo método dos volumes finitos e geram resultados com alta capacidade gráfica. É importante enfatizar ainda que, o uso das de simulações computacionais são fortemente

afetadas pela metodologia empregada, modelo de turbulência utilizado e pelos recursos computacionais disponíveis.

Com o intuito de se aprofundar os estudos no tocante ao comportamento fluidodinâmico dos ciclones, objetiva-se com esse trabalho construir a geometria de um ciclone do tipo Lapple de diâmetro igual 0,20 m, gerar uma malha a partir dessa geometria e simular o escoamento turbulento de um gás aquecido no interior do equipamento, variando a velocidade de entrada do gás.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

O presente trabalho tem por finalidade simular o escoamento de um gás aquecido no interior de um ciclone em três diferentes velocidades do tipo Lapple para avaliar o comportamento convectivo e fluidodinâmico do gás.

### **2.2 Específicos**

Para tanto, objetiva-se construir uma geometria tridimensional do ciclone, gerar uma malha e realizar simulações para três diferentes velocidades de fluxo. Os dados experimentais utilizados para comparar com os dados simulados foram obtidos da literatura.

## **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste tópico serão abordados o equipamento a ser estudado, o processo de secagem, a técnica *Computational fluid dynamics* (CFD), os métodos numéricos, o acoplamento pressão velocidade e os modelos de turbulência.

### **3.1 Ciclone**

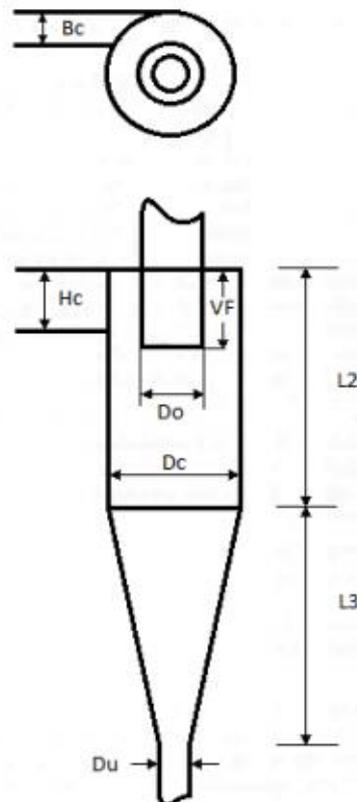
Os separadores ciclônicos são amplamente utilizados em indústrias para processos de separação gás-sólido. Como exemplo, podem ser citados os processos de recuperação de catalisadores, secagem de cimento, processamento de minérios e a etapa de limpeza de gases de combustão em caldeiras, dentre muitas outras existentes (OLIVEIRA, 2019). Estes

equipamentos foram patenteados no final do século XVIII, mas somente após a Segunda Guerra Mundial foram industrialmente empregados e as pioneiras foram as indústrias de extração e processamento de minérios (SOUZA, 2012)

Segundo Mendes (2019), ciclones apresentam geometrias simples sem partes móveis, constituídas essencialmente por uma seção cilíndrica acoplada a uma parte cônica, o que confere suas características de fácil construção e baixo custo de operação e de manutenção. Na literatura podem ser obtidas muitas configurações de ciclones, a partir da variação de suas dimensões características que, na grande maioria das vezes, busca oportunidades de otimização, como aumento da eficiência ou diminuição da queda de pressão (HELKER; BARROS, 2012).

Conforme Figura 1, estes equipamentos possuem basicamente oito parâmetros geométricos, em que  $D_c$  representa o diâmetro do corpo do ciclone;  $D_u$ , diâmetro da saída de sólidos;  $D_o$ , diâmetro da saída de gás;  $L_3$ , altura da seção cônica;  $L_2$ , altura da seção cilíndrica;  $V_F$ , comprimento do tubo de saída de gás;  $H_c$  e  $B_c$  representam, respectivamente, altura e largura da entrada de gás-sólido.

Figura 1 - Representação esquemática das dimensões de um ciclone.



Fonte: (BOF, 2018)

Corrêia (2003) afirma que Lapple e Stairmaind são as famílias de ciclones mais conhecidas. Neste estudo, avaliaremos o comportamento fluidodinâmico em um ciclone do tipo Lapple. Na Tabela 1 têm-se as relações para dimensionamento deste tipo de ciclone, que são geralmente dadas em função do diâmetro  $D_c$ .

Tabela 1 - Proporções geométricas para um ciclone Lapple.

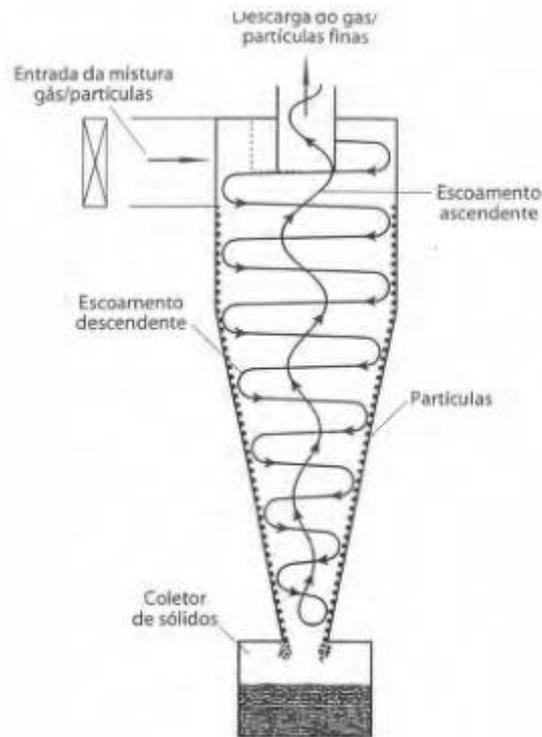
<b>Relação</b>	
Bc/Dc	0,25
Do/Dc	0,50
Hc/Dc	0,50
L2/Dc	2,00
VF/Dc	0,63
L3/Dc	2,00
Du/Dc	0,25

Fonte: Svarovsky (1981, apud BOF, 2018, p.17)

A alimentação da corrente gás-sólido é feita em direção tangencial através de um duto normalmente retangular presente na parte cilíndrica do equipamento (BOF,2018). De acordo com Corrêia (2003) a trajetória desta corrente dependerá da massa das partículas presente nela e do campo de velocidade do escoamento, onde todas as partículas estarão submetidas às forças de gravidade, empuxo e arraste do fluido, de forma que o balanço de forças resultantes é o fator determinante para descrever a trajetória exata de uma determinada partícula presente na corrente. Corrêia (2003) ainda explica que é comum alguns textos apontarem a presença de uma “força centrífuga” para explicar o movimento da partícula em direção a parede, mas que na verdade não há uma força externa atuando em direção ao raio, então o que faz as partículas avançarem em direção à parede, descrevendo uma curva, é sua própria inércia.

Esta corrente é caracterizada por apresentar movimento espiral descendente próxima a parede (CORRÊIA, 2003). Na região central do equipamento, o fluxo de gás sofre inversão na sua direção axial, resultando em um movimento espiral ascendente que vai em direção ao duto central superior (*overflow*) no qual as partículas de pequenos diâmetros e os gases saem para a atmosfera (SILVA, 2016). O comprimento deste duto que se estende para o interior da parte cilíndrica do ciclone é denominado “*vortex finder*”, cuja função é reduzir o “by-pass” (BOF,2018). Partículas de diâmetro maior por sua vez, se movimentam numa trajetória curva e descendente, em direção ao *underflow* (saída localizado no final da seção cônica) (SILVA, 2016). A Figura 2 mostra o esquema de um ciclone industrial.

Figura 2 - Ciclone industrial.



Fonte: Cremasco (2012).

Souza (2012) aponta que os ciclones apresentam um comportamento fluidodinâmico complexo, uma vez que apresentam zonas de recirculação, reversão de fluxo e alta preservação de vórtices. Nesse sentido, apesar de ser um equipamento simples, os ciclones apresentam complexa fenomenologia e qualquer tentativa de mudança estrutural ou operacional que objetive melhorar sua performance, tem como pré-requisito amplo conhecimento da sua fluidodinâmica (PERES, 2002).

### 3.2 Secagem com ciclone

De acordo com Silva (2016), com o aumento populacional e crescente demanda por alimentos, surge a necessidade de aperfeiçoar a produção agrícola e os processos a ela inerentes. Assim, obter novas tecnologias e otimizar o processo de secagem para reduzir custos operacionais e atender a demanda passou a ser uma preocupação constante, tanto de pesquisadores como de engenheiros (SOUZA, 2012). Somado a isso, tem-se a crescente preocupação em reduzir gastos energéticos, em que a secagem é um grande alvo de pesquisas

em busca de alternativas para melhorar a eficiência energética, e conseqüentemente reduzir custos associados ao processo (HELKER; BARROS, 2012).

Pesquisas de ciclone como secadores começaram no Brasil no final dos anos 80 e o primeiro trabalho com resultados experimentais de secagem foi publicado no ano de 1991 (SILVA, 1991). Souza (2012) destaca que nos últimos anos o uso de ciclone como secador tem se mostrado uma alternativa promissora, em virtude de seu baixo custo operacional, simples construção e manutenção em relação a outros dispositivos de secagem, e por poder ser usado em altas temperaturas e pressões.

Comparar a secagem ciclônica, com a secagem em tambor rotativo por exemplo, parece não fazer sentido, por esse último se tratar de um equipamento simples, porém para um setor que necessite de processo contínuo e rápido, o secador ciclônico vai atender melhor a demanda de produção (HELKER; BARROS, 2012).

Corrêa (2003) afirma que partículas que entram em um secador ciclônico com 50% de umidade, chegam a um valor de saída em torno de 20-30% em base úmida. Desta forma, o ciclone pode ser aplicado tanto como separador de partículas, como na redução de umidade, ao promover a transferência de calor e massa por meio da diferença de densidade entre gás e sólido (HELKER; BARROS, 2012).

### **3.2.1 Fundamentos do processo de secagem**

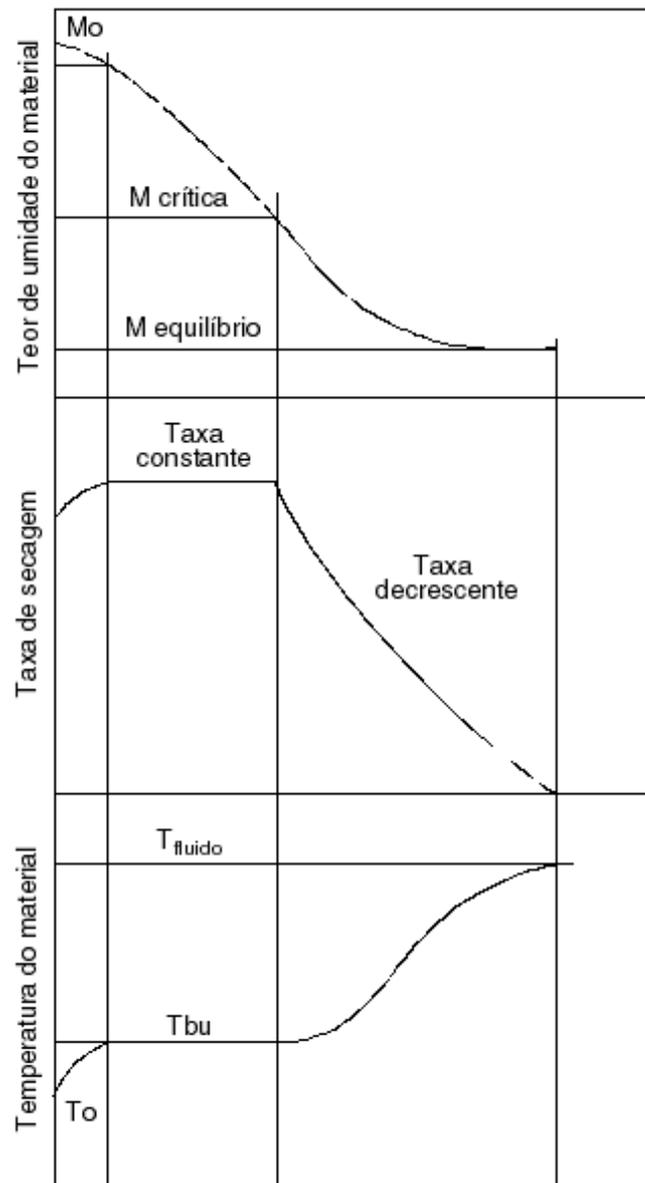
A secagem é uma operação unitária fundamental na preservação de insumos, o processo trata-se de remoção da umidade, a qual pode prolongar o prazo de validade e reduzir custos de transporte e armazenamento (OLIVEIRA, 2020).

Para Silva (2005), os custos de um processo de secagem dependem dos seguintes fatores:

- Teores de umidade final e inicial do produto;
- Características do sistema de secagem utilizado;
- Capacidade efetiva do sistema de secagem;
- Combustível utilizado para aquecimento do ar;
- Manutenção dos equipamentos;
- Mão de obra;
- Insumos utilizados no processo;
- Tipo e volume de produto recebido.

Durante a secagem, os sólidos podem atingir diversos teores de umidade: teor de umidade inicial ( $M_0$ ), teor de umidade crítica ( $M$  crítica) e o teor de umidade de equilíbrio ( $M$  equilíbrio) (SILVA, 2016). A Figura 3 ilustra as curvas de redução de teor de umidade  $M$  do produto, velocidade de secagem ( $dM/dt$ ) ao longo do tempo e evolução da temperatura  $T$  do produto, de cima para baixo, respectivamente. Onde  $T_0$  é a temperatura inicial e  $T_{bu}$  a temperatura de bulbo úmido.

Figura 3 - Representação das curvas fundamentais em um processo de secagem.



Fonte: Arnosti Junior, Innocentini e Pandolfelli (1999).

Farias (2002) explica que a taxa de secagem será constante enquanto houver umidade superficial para acompanhar o processo de evaporação e tanto a temperatura do sólido, como

a temperatura de bulbo úmido do ar vão ser constantes nessa fase. O autor também aponta que quando a temperatura começa a aumentar tem-se o ponto de umidade crítica e o início do período de taxa decrescente, onde a taxa de secagem e a transferência de calor e massa diminuem. Por fim, o sólido chega no ponto de umidade de equilíbrio quando a taxa de secagem atinge valores próximos a zero (FARIAS, 2002).

### **3.3 Fluidodinâmica computacional em Ciclones**

Nos últimos anos pesquisadores e engenheiros tem estudado ciclones tanto como separadores quanto secadores, por meio de métodos experimentais e/ou por intermédio de técnicas de Fluidodinâmica Computacional CFD, com o objetivo de otimizar seu funcionamento. (Silva, 2016)

Para Bof (2018, p.28) “A fluidodinâmica computacional está relacionada com a análise de sistemas envolvendo fenômenos de transporte, como transferência de massa, energia e movimento, por meio de simulações computacionais”.

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a utilização da fluidodinâmica computacional em vários problemas de engenharia só foi possível graças ao moderno desenvolvimento de hardware com enorme capacidade computacional. O emprego de técnicas computacionais robustas favorecem as soluções de complexos modelos matemáticos, incluindo os de comportamento termofluidodinâmico (SILVA, 2016).

De acordo com Bof (2018), o CFD vem sendo amplamente aplicado em indústrias para prever, por exemplo, campos de velocidade, pressão e temperatura, em um sistema ou equipamento. O autor ainda aponta que as principais vantagens dessa técnica em relação aos estudos experimentais nos problemas da engenharia são: resultados extremamente detalhados, redução de tempo e custo na obtenção de dados, possibilidade de estudar sistemas em condições de risco e por fim, a possibilidade de considerar as dimensões reais do fluxo e assim, eliminar problemas relacionados a “scale up”. Em contrapartida o custo computacional das simulações é um fator limitante (LUCIANO et al., 2017).

Versteeg e Malalasekera (2007) dividem um problema utilizando CFD em três etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento.

### 3.3.1 Pré-processamento

Em primeiro lugar, tem-se a construção da geometria do equipamento em questão, ela é responsável por definir a região espacial na qual os fenômenos de transporte serão avaliados (BOF, 2018). A partir da geometria, é necessário a discretização do domínio contínuo por meio da construção de uma malha (SEGANTINE, 2017).

A discretização nada mais é do que a divisão do domínio (geometria) em subdomínios, denominados elementos, delimitados por faces e pontos, estes chamados de nós, onde as equações do problema são resolvidas e quanto mais subdomínios forem criados, menores eles serão, e melhor será a resposta aproximada obtida para o problema (MENEZES, 2019). Esses subdomínios são formados por triângulos ou quadriláteros em duas dimensões, e tetraedros e hexaedros em três dimensões (RAMIREZ, 2009).

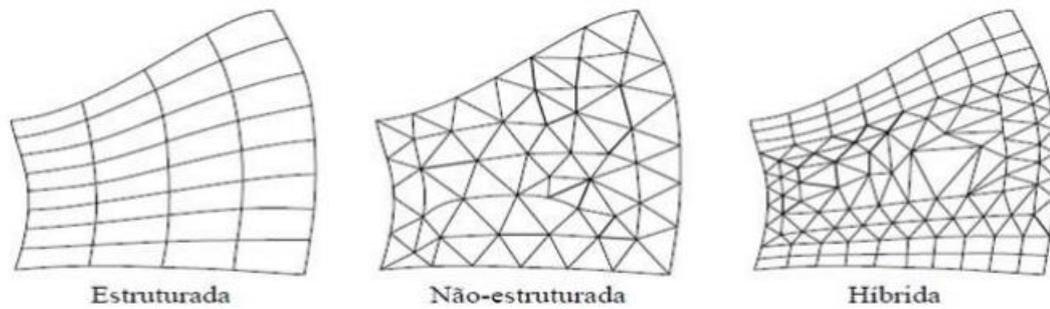
Geralmente, os problemas, mesmo que simples, são resolvidos por malhas com um número de elementos que extrapolam os limites humanos para a realização dos cálculos, fator que justifica a tamanha necessidade de computadores na resolução numérica dos problemas (MENEZES, 2019).

A qualidade da malha é fundamental para ter uma solução mais precisa (RAMIREZ, 2009). Existem três principais fatores capazes de auxiliar no entendimento de quão boa está a qualidade da malha, são eles: razão de aspecto, razão Jacobiana e *Skewness*. A razão de aspecto é a razão entre o máximo e o mínimo comprimento da borda de um elemento e idealmente, o valor da razão de aspecto deveria ser 1 para garantir os melhores resultados. A razão Jacobiana mede o desvio entre o elemento em questão e um elemento idealmente moldado, valores iguais a 1 representa um elemento perfeito moldado. Por último, o *skewness* mede a torção na malha e, portanto, altos valores de *skewness* podem facilmente degradar a solução numérica, logo valores mais próximos a 0 são mais apropriados (VATAMBE, 2015).

A precisão da resolução de um problema envolvendo CFD depende fortemente do número de elementos presentes na malha e como eles estão distribuídos, uma vez que malhas com maior número de elementos garantem maior precisão na resposta de problemas, mas também exigem maior custo computacional, por isso é necessário ponderar entre o refinamento da malha e esforços computacionais (SILVA, 2016).

As malhas computacionais podem ser classificadas de acordo com sua estrutura em três tipos, estruturadas, não-estruturadas ou híbridas, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Tipos de malhas computacionais.



Fonte: Adaptado de Santos (2010) Citado por (SILVA, 2016).

No primeiro caso, a malha possui distribuição regular entre todos os elementos, sendo representados tridimensionalmente por hexaedros (SEGANTINE 2017). Esse tipo de malha é facilmente identificada pelo seu padrão de organização, onde todos os seus elementos (exceto os da fronteira) possuem a mesma quantidade de vizinhos, essa organização traz vantagens na montagem das matrizes para resolução de equações, implicando em menor demanda computacional (MENEZES, 2019).

No segundo caso, Segantine (2017) afirma que não há uma ordem pré-definida entre as células no domínio. Os elementos desse tipo de malha são triângulos e quadriláteros em geometrias bidimensionais ou tetraedros e pirâmides em geometrias tridimensionais (RAMIREZ, 2009).

Diferente das malhas estruturadas, a posição das células nas malhas não estruturadas não está associada a um sistema de coordenadas e seus elementos podem assumir qualquer forma, com variados números de vértices e diferentes números de vizinhos, o que dificulta a organização de sua estrutura de dados, tornando os algoritmos de discretização mais complexos e a resolução dos sistemas de equações são mais lentos (MENEZES, 2019).

Apesar disso, as malhas não estruturadas são geradas automaticamente na maioria dos pacotes comerciais de CFD (BOF, 2018) e de acordo com Ramirez (2009), as vantagens desse tipo de malha é que são muito automatizadas e requerem menos esforço e menos tempo para construção.

Por fim, nada impede que ambas sejam aplicadas a um mesmo problema, se isso for vantajoso. Nesse caso, segundo Bof (2018) as malhas possuem elementos quadriláteros ou hexaédricos.

### 3.3.2 Processamento

Após a etapa de pré-processamento, tem-se a simulação do escoamento propriamente dita, onde é feita a discretização e resolução das equações diferenciais pelo método dos Volumes Finitos, até que se atinja o critério de convergência desejado (PERES, 2002).

A precisão da solução e o tempo de processamento estão relacionados ao número de elementos da malha, quanto maior o número de elementos mais precisa é a solução e maior é o tempo de processamento (SEGATINE, 2017).

### 3.3.3 Pós-processamento

A etapa de pós-processamento, também denominada como fase de visualização de dados, consiste na obtenção, interpretação e visualização dos resultados obtidos no código FLUENT através de gráficos, vetores, e contornos. Os dados podem também ser enviados para outros *softwares* para análise por meio de tabelas, regressões e outros.

## 3.4 Modelo matemático

Iniciaremos essa abordagem tratando do número de Reynolds demonstrado na Equação 1, esse número de Reynolds indica se o escoamento é laminar ou turbulento. De acordo com Fox, Mcdonald e Pritchard (2010) tem-se um escoamento laminar para  $Re \leq 2.000$  e turbulento para  $Re \geq 2400$ , valores intermediários são considerados escoamento de transição. É importante ressaltar que gases tem escoamento turbulento, na grande maioria das vezes, devido aos altos valores do número de Reynolds (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1)$$

Em que:  $\rho$  é a massa específica do fluido;  $\mu$  é a viscosidade do fluido;  $v$  é a velocidade de escoamento do fluido;  $D$  diâmetro do duto de entrada do fluido (algumas vezes, abordado como diâmetro hidráulico).

O modelo matemático para o fluido utilizado neste trabalho tem como base as equações de Navier-Stokes (Equação 2), sendo o balanço de massa sempre ajustado pela equação da continuidade (Equação 3). As leis físicas de conservação de massa e de

quantidade de movimento são as equações básicas que descrevem os fenômenos relacionados com escoamento de fluidos:

Equações do momentum em notação vetorial para escoamento incompressível e viscosidade constante (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010):

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

na qual:  $\rho \frac{D\vec{V}}{Dt}$  representa os termos convectivos ou inerciais (Termo de Transporte de quantidade de movimento);  $\rho \vec{g}$  representa a força gravitacional por unidade de volume (Força de Campo);  $\nabla p$  representa a Força de Pressão por unidade de volume (Força de Superfície);  $\mu \nabla^2 \vec{V}$  representa a Força viscosa por unidade de volume (Termo de difusão de quantidade de movimento)

A suposição de fluido incompressível se deve ao fato de que as variações de pressão e temperatura do escoamento não implicam em variação significativa da densidade do ar.

Equação da continuidade (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3)$$

Sendo que o primeiro termo representa a taxa de variação de massa no interior do volume de controle e o segundo termo representa a taxa líquida de fluxo de massa para fora através da superfície de controle.

### 3.5 Métodos numéricos

Para Lacerda e Couras (2018) os métodos numéricos objetivam resolver equações diferenciais parciais transformando-as em um conjunto de equações algébricas aproximadas. Os autores propõem que para tanto, é necessário antes discretizar o domínio destas equações diferenciais, ou seja, dividir o domínio em um número discreto de pontos, para os quais serão estabelecidos os valores da variável dependente.

O método de volumes finitos foi elaborado para solucionar equações diferenciais que regem os fenômenos de transferência de *momentum*, calor e massa por meio de discretização das mesmas, transformando-as em equações algébricas lineares a serem resolvidas em um número finito de volumes, chamados de volumes de controle (MALISKA, 1995). Determinados os pequenos volumes de controle, o método dos volumes finitos parte da integração das equações diferenciais parciais sobre cada um deles, o que requer métodos numéricos de integração (MENEZES, 2019).

Esse método apesar de poder ser aplicado a qualquer tipo de malha, com qualquer tipo de volume de controle, e é geralmente utilizado em malhas não estruturadas, o que lhe assegura utilização em domínios de geometrias complexas (MENEZES, 2019). Somando-se a isso, Patankar (1980) destaca como vantagem do método dos volumes finitos, maior precisão e estabilidade quando comparado aos outros métodos, uma vez que é baseado nas formas integrais e não diferenciais das leis da conservação. Quando as equações são integradas espacialmente em um volume de controle tridimensional, para uma variável genérica  $\phi$  transformam-se na Equação 4 (PATANKAR, 1980):

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV + \iint_A (\rho\vec{u}\phi) dA = \iint_A (\Gamma\nabla\phi) dA + \iiint_V S dV \quad (4)$$

Onde,  $\Gamma$  representa o coeficiente de difusão,  $S$  o termo fonte, e a variável dependente  $\phi$  representa uma variável escalar genérica e pode representar uma variedade de grandezas, como a temperatura, um componente de velocidade, etc. Para cada uma dessas possíveis variáveis, são necessários um coeficiente de difusão  $\Gamma$  e um termo fonte  $S$  adequados (PATANKAR, 1980).

No MVF o nó computacional se estabelece no centro de cada volume de controle onde o valor de uma variável deve ser obtido e uma é usada uma interpolação em função dos valores nodais para determinar valores de variáveis da superfície do volume de controle (RAMIREZ, 2009). O autor também afirma que esse é um método conservativo, uma vez que as integrais de superfície (que representam fluxos convectivos e difusivos) são as mesmas para volumes de controle que compartilham a mesma face.

A etapa final do processo de solução numérica limita-se em solucionar o sistema de equações algébricas gerado na etapa de discretização, para alcançar os valores da variável desejada (BOF, 2017). Independente de o problema ser bidimensional ou tridimensional, a discretização das equações gera um sistema linear que pode ser escrito na forma matricial (RAMIREZ, 2009).

De acordo com Bof (2017), os métodos de solução podem ser tanto diretos como iterativos. E conforme explica Ramirez (2009), no método direto faz-se a inversão da matriz completa, enquanto no método iterativo o sistema de equação é resolvido parcialmente a cada iteração, onde é feita uma estimativa inicial e a cada passo tem-se uma resposta mais próxima da solução, dessa maneira, são necessárias muitas iterações para satisfazer as equações, de modo que a diferença entre a solução real e a solução obtida seja satisfatória. Logo, o método iterativo é baseado na aplicação de algoritmos relativamente simples de forma repetitiva até o problema convergir, de acordo com a tolerância estabelecida (BOF, 2017). Os autores

Versteeg e Malalasekera (2007) acrescentam ainda que, a solução iterativa também tem a vantagem de armazenar na memória apenas coeficientes diferentes de zero.

### **3.6 Acoplamento Pressão-Velocidade**

Na resolução das equações diferenciais por intermédio da discretização, é necessário ajustar um campo de pressões que, quando inserido nas equações de momentum, produza um campo de velocidades que satisfaça a equação da continuidade (MALISKA, 1995). Este processo é denominado acoplamento pressão-velocidade e através de iterações corrige os valores de pressão e de velocidade.

Para resolver as equações da continuidade e da quantidade de movimento é necessário resolver o campo de pressão. Uma vez que não existe equação de transporte para a pressão, o acoplamento entre pressão e velocidade pode ser obtido com base numa restrição da solução do campo de escoamento: se for aplicado o campo de pressão correto nas equações da conservação da quantidade de movimento, o campo de velocidades resultantes deve satisfazer a equação da continuidade (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Segundo Bof (2018), essa metodologia obtém a solução do sistema de equações para cada variável de forma sequencial e, por isso, é chamado de segregado, podendo-se citar o SIMPLE e PISO como alguns dos mais empregados entre os segregados em CFD.

### **3.7 Modelo de Turbulência**

A turbulência é caracterizada pela instabilidade que promove não linearidade no movimento do escoamento de um fluido, ou seja, a formação de vórtices, que podem ter diferentes escalas (tamanhos de turbilhões), sendo os maiores da ordem de grandeza do escoamento e os menores limitados pela dissipação viscosa de energia (BOF, 2018).

Para Menter (2011), a parte mais desafiadora da dinâmica dos fluidos é a turbulência, pois é um fator limitante para a obtenção de soluções exatas em simulações computacionais. O regime de escoamento turbulento não é apenas de interesse teórico, uma vez que a grande maioria dos casos de escoamento na engenharia são turbulentos, e por esse motivo a mecânica dos fluidos necessita de ferramentas que deem acesso a física e a modelagem envolvida em fenômenos turbulentos (RAMIREZ, 2009).

Em função da complexidade matemática relacionada à descrição da turbulência, ainda não há um tratamento teórico completo, com solução geral desenvolvida, para este fenômeno (BOF, 2018). No entanto ele pode ser inicialmente avaliado aplicando a equação de Reynolds, pois essa equação fornece uma razão entre os efeitos convectivos e difusivos, onde elevados números de Reynolds sugerem que os efeitos convectivos (não lineares) são dominantes, ou seja, tem-se um escoamento turbulento (BOF, 2018).

Atualmente é possível contar com modelos que apresentam uma solução aproximada, mas não exata, para um escoamento turbulento, onde as variáveis instantâneas das equações da Continuidade e de Navier-Stokes são decompostas em uma componente média e uma flutuante (BOF, 2018).

Conforme Ferziger e Peric (2002), as principais abordagens computacionais para a resolução de problemas que envolvam escoamentos turbulentos são: *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS), *Large Eddy Simulation* (LES) e *Direct numerical simulation* (DNS). Os autores apontam ainda, a principal diferença entre cada uma delas:

- RANS: É a mais simples entre as três e define o escoamento através de valores médios das propriedades do fluxo e de suas flutuações, onde geralmente, a resolução de todas as equações requer o uso de aproximações.
- LES: Resolve apenas as estruturas turbulentas de grande comprimento, enquanto as estruturas de menor comprimento são modeladas.
- DNS: As equações de Navier-Stokes são resolvidas para todo o escoamento, portanto é a mais complexa entre as três, como consequência também requer maior custo computacional.

A abordagem RANS surge da não linearidade do termo convectivo da equação de Navier Stokes, que quando multiplicado pela densidade, dá origem ao tensor de Reynolds, introduzindo seis novas variáveis ao problema que, somadas às quatro originais (pressão e as três componentes do vetor velocidade) totalizam 10 incógnitas e quatro equações (Continuidade e Navier-Stokes para cada componente da velocidade), e uma vez que há mais incógnitas do que equações, surge o problema de fechamento (BOF, 2018).

Essa abordagem pode ser dividida em duas principais categorias: modelos lineares de viscosidade turbulenta, e o modelo de tensões de Reynolds (RSM, do inglês *Reynolds Stress Model*), sendo o último mais robusto (OLIVEIRA, 2019).

A equação de transporte exata para os tensores de Reynolds é exposta pela Equação 5 (FLUENT, 2020):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + C_{ij} = -D_{T,ij} + D_{L,ij} - P_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} - F_{ij} \quad (5)$$

Em que:  $C_{ij}$  é o termo de convecção

$D_{T,ij}$  é o termo de difusão turbulenta

$D_{L,ij}$  é o termo de difusão molecular

$P_{ij}$  é o termo de produção de tensão

$\Phi_{ij}$  é o termo de deformação da pressão

$\varepsilon_{ij}$  é o termo de dissipação

$F_{ij}$  é o termo de produção por rotação do sistema

Segundo Bof (2018), para o modelo RSM além das seis variáveis adicionais, ainda tem uma equação de transporte, associada à escala de comprimento da turbulência, totalizando sete equações de transporte adicionais para a modelagem do escoamento. No entanto, apesar de melhorar a acurácia dos resultados quando comparado aos modelos mais simples, conforme visto nos estudos de Elsayed e Lacor (2011), também implica em maior esforço computacional.

A intensidade turbulenta, expressa pela Equação 6, é definida como a razão da raiz quadrada média das flutuações de velocidade, para a velocidade média de fluxo (FLUENT, 2020):

$$I = 0,016Re^{-0,125} \quad (6)$$

Uma intensidade de turbulência de menor que 1% é geralmente considerada baixa e intensidades de turbulência superiores a 10% são consideradas altas (FLUENT, 2020).

Por operarem em elevadas velocidades, ciclones tem perfil de escoamento bastante turbulento e complexo (OLIVEIRA, 2019). Tal aspecto torna inadequado o uso de modelos simples como o k- $\varepsilon$ , que consideram a turbulência isotrópica, e por esse motivo não obtém corretamente o escoamento de ciclones em simulações numéricas (LUCIANO et al., 2017).

Muitos autores estiveram estudando modelos de turbulência que melhorem a representação do perfil da velocidade tangencial, e o modelo mais utilizado em simulação de ciclones atualmente é o modelo das tensões de Reynolds (Reynolds Stress Model - RSM). De acordo com Carvalho (2015) esse modelo prevê com boa precisão fluxos complexos ao considerar desenvolvimentos em forma de curvatura, redemoinhos, rotação, altas taxas de deformação e turbilhões.

Hoekstra, Derksen e Van Den Akker (1999) testaram modelos baseados em viscosidade turbulenta e concluíram que eles não são capazes de descrever corretamente as

componentes médias da velocidade para o escoamento rotacional verificado no interior de um ciclone, uma vez que o modelo RSM se mostrou mais adequado ao apresentar soluções mais próximas dos resultados experimentais.

Lundberg e Wallgren (2013 citado por SEGATINE, 2017, p. 35) observaram diferentes geometrias de ciclones no sentido de melhorar a eficiência de separação em ciclones, e o modelo de turbulência RSM empregado teve grande sucesso.

Segatine (2017) enfatiza que o uso do modelo *Reynolds Stress Model* pode apresentar dificuldades de convergência devido ao grande número de incógnitas, por isso, o uso de estratégias devem ser adotadas a fim de obter a convergência.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

O presente trabalho trata de um fenômeno que envolve a transferência de momentum, pelo escoamento do gás e a transferência de calor entre parede e gás.

Escolheu-se construir uma malha não estruturada na etapa de pré-processamento deste trabalho, uma vez que esse tipo de malha é gerada automaticamente no FLUENT sendo necessário menor tempo e esforço para sua construção.

### **4.1 Modelo de Turbulência**

O custo computacional ainda é um fator proibitivo, uma vez que uso das abordagens LES e DNS necessitam de níveis de discretização espacial e temporal muito pequenos, aumentando significativamente o tempo e o custo computacional (FERZIGER; PERIC, 2002). Logo, essas duas abordagens não foram utilizadas neste trabalho.

O modelo de turbulência escolhido para ser empregado foi o *Reynolds Stress*, uma vez que este modelo é o mais complexo dentro do método RANS, e de acordo com vários estudos esse modelo se mostrou mais adequado ao apresentar soluções mais próximas dos resultados experimentais do que os outros.

### **4.2 Métodos numéricos**

Existem muitos métodos numéricos, são exemplos, o método das diferenças finitas (MDF), o método dos elementos finitos (MEF), o método dos elementos de contorno (MEC),

o método dos volumes finitos (MVF) (MENEZES, 2019). Neste trabalho limitaremos os estudos ao método dos volumes finitos, uma vez que ele está inserido nos principais códigos comerciais de CFD (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007), como no FLUENT, da Ansys, que é o “solver” que será empregado neste trabalho.

Utilizou-se o método SIMPLE para acoplamento pressão-velocidade, pois segundo Bof (2018), ele é um dos mais empregados entre os segregados em CFD. Foi empregado o método QUICK para discretização de energia, visto que Hreiz, Gentric e Midoux (2011) observaram que ele obtém melhores resultados para esta variável do que os esquemas de primeira ordem. Para interpolação de pressão foi adotado o esquema PRESTO! e para os demais, primeira ordem *upwind*.

O gás de entrada está a temperatura de 377 K, sendo necessário que a equação de energia fosse habilitada.

### 4.3 Estratégias de solução

Hreiz, Gentric e Midoux (2011) testaram os esquemas de primeira ordem e QUICK para a discretização dos termos convectivos, sendo que os melhores resultados foram obtidos utilizando o esquema QUICK. Dessa forma, o método de solução empregado neste trabalho para discretização da energia foi o QUICK.

Peres (2002) menciona como estratégia de solução em seu trabalho que inicialmente empregou o estado estacionário com o intuito de garantir a estabilidade da solução, e a partir deste resultado preliminar, efetuou as simulações em estado transiente.

A simulação foi realizada inicialmente para 1000 time steps, em regime estacionário. Essa etapa inicial demandou aproximadamente 4 horas de simulação. Posteriormente, empregou-se regime transiente, com um time-step size de 0,001 segundos e um número de 5000 time-steps, resultando em um escoamento de 5 segundos em unidade de tempo real. Foi também estipulado um máximo de 200 iterações/time-step e o critério de convergência estabelecido foi da ordem de  $1 \times 10^{-7}$  para todos os parâmetros da simulação.

Variou-se a velocidade de entrada do fluido para observar seu comportamento fluidodinâmico no interior do equipamento, sendo testadas as velocidades de 6,93 m/s, 12,98 m/s e 20,99 m/s.

#### 4.4 Dados Experimentais

Os dados experimentais utilizados para conduzir este estudo foram obtidos no trabalho de Meier et al. (1998), o qual utilizou um ciclone do tipo Lapple em escala piloto construído com chapas de aço galvanizado e isolado termicamente com 25,40 mm de fibra cerâmica e 0,15 mm de alumínio corrugado, o gás de entrada estava aquecido a 377 K e a parede estava inicialmente a Temperatura ambiente. Na montagem, os autores citam que fizeram o uso de termopares fixos nas seções de entrada e saída do ciclone para medidas de temperatura média, e de um termopar móvel numa posição axial correspondente a 0,18 m a partir do topo do equipamento, para medidas de distribuição radial de temperaturas na região cilíndrica do ciclone. Por fim, os autores também explicam que utilizaram um medidor venturi convencional para vazão de ar de alimentação. Os dados experimentais coletados por Meier et al. (1998), em três vazões distintas, estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados experimentais

	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	0,0347	0,0649	0,1050
Velocidade tangencial de entrada (m/s)	6,93	12,98	20,99
Temperatura média na entrada (K)	377,0	377,0	377,0
Temperatura média na saída (K)	363,8	362,0	360,0
Temperatura ambiente (K)	303,0	303,0	303,0
Posição radial(m)		T(r) (K)	
0,000	355,1	352,0	352,5
0,020	353,2	349,9	347,8
0,040	362,1	359,5	355,0
0,060	372,2	371,8	370,8
0,080	375,0	375,3	375,0
0,095	376,1	376,2	376,2

Fonte: Meier et al. (1998)

## 5 RESULTADOS E DICUSSÕES

### 5.1 Pré-Processamento

De acordo Meier et al. (1998) o ciclone utilizado em seu trabalho foi do tipo Lapple com  $D_c = 0,2$  m. Logo, para obter as dimensões da geometria do ciclone utilizaram-se as

correlações para ciclone do tipo Lapple presentes na Tabela 1 deste trabalho. Na Tabela 3 estão as dimensões obtidas para realizar a construção da geometria.

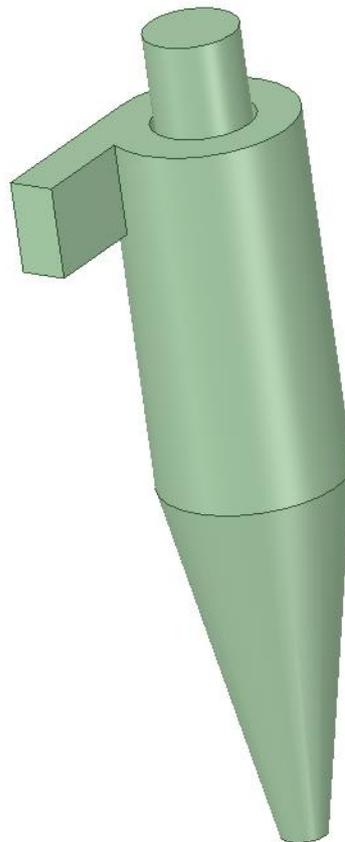
Tabela 3 - Proporções geométricas para um ciclone Lapple.

	Dimensões (m)
Bc	0,050
Do	0,100
Hc	0,100
L2	0,400
VF	0,126
L3	0,400
Du	0,050

Fonte: Autor

A construção da geometria tridimensional foi elaborada no *Spaceclaim* de acordo com as dimensões obtidas na Tabela 3 e pode ser observada na Figura 5.

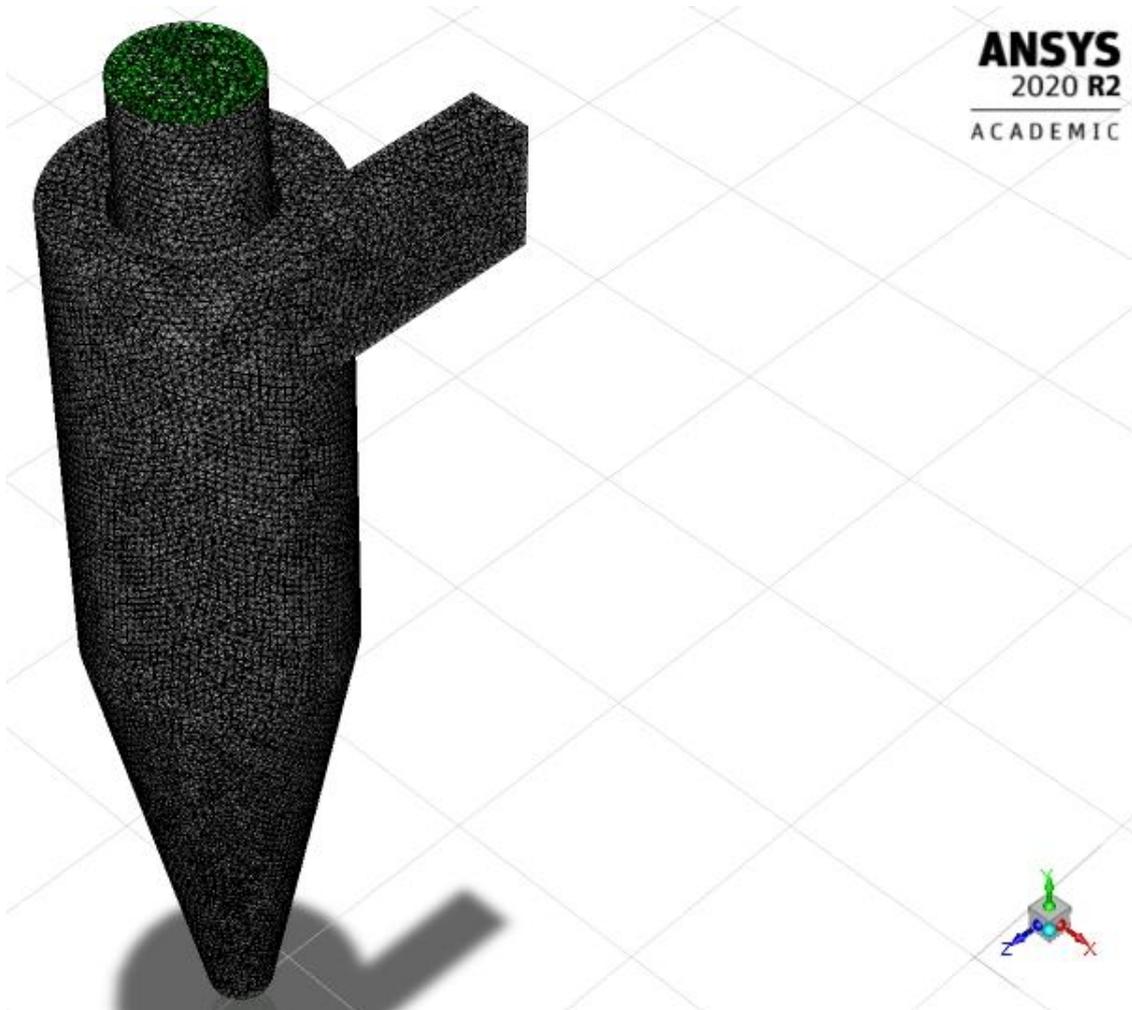
Figura 5 – Geometria construída para um ciclone do tipo Lapple com  $D_c = 0,2$  m.



Fonte: Autor

A partir da geometria da Figura 5 gerou-se uma malha não estruturada no código *meshing* da ANSYS pelo método automático com predominantes tetraedros, 88489 nós e 484575 células, conforme pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Malha gerada.



Fonte: Autor

Para garantir que a malha gerada fosse adequada, analisou-se os parâmetros de qualidade da mesma. Os valores de *Skewness*, razão Jacobiana e razão de aspecto da malha podem ser observados na Figura 7.

Figura 7 – Parâmetros de qualidade para malha gerada.

Quality			
Check Mesh Quality			
	Default (0.900000)	Default (0.900000)	Default (0.900000)
	Medium	Medium	Medium
Mesh Metric	Skewness	Jacobian Ratio (MAPDL)	Aspect Ratio
<input type="checkbox"/> Min	5,6072e-007	1,	1,1579
<input type="checkbox"/> Max	0,84702	1,	10,095
<input type="checkbox"/> Average	0,20377	1,	1,7906

Fonte: Autor.

Os parâmetros de qualidade obtidos para malha foram satisfatórios, uma vez que de acordo com Vatambe (2015) para *skewness* valores mais próximos a 0 são mais apropriados, a razão Jacobiana é melhor quanto mais próxima de 1 estiver e o valor da razão de aspecto em um cenário ideal deveria ser próxima a 1 para garantir melhores resultados.

Uma alternativa para reduzir esforços computacionais seria ter realizado um teste de independência de malha, onde analisaria-se quantitativamente até que ponto uma malha mais refinada pode influenciar na qualidade dos resultados. Este estudo não pode ser realizado neste trabalho, uma vez que cada simulação exige muito tempo para ser concluída.

## 5.2 Processamento

A simulação foi realizada utilizando o *software* Ansys Fluent 2020R2, inicialmente em regime estacionário e posteriormente em regime transiente conforme mencionado por Peres (2002) em seu trabalho como estratégia de solução para garantir maior estabilidade a simulação. A Figura 8 mostra todo o método de solução empregado.

Figura 8 – Método de solução.

<b>Solution Methods</b>	
<b>Pressure-Velocity Coupling</b>	
Scheme	SIMPLE
<b>Spatial Discretization</b>	
Pressure	PRESTO!
Momentum	First Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
Energy	QUICK
<b>Transient Formulation</b>	
	First Order Implicit

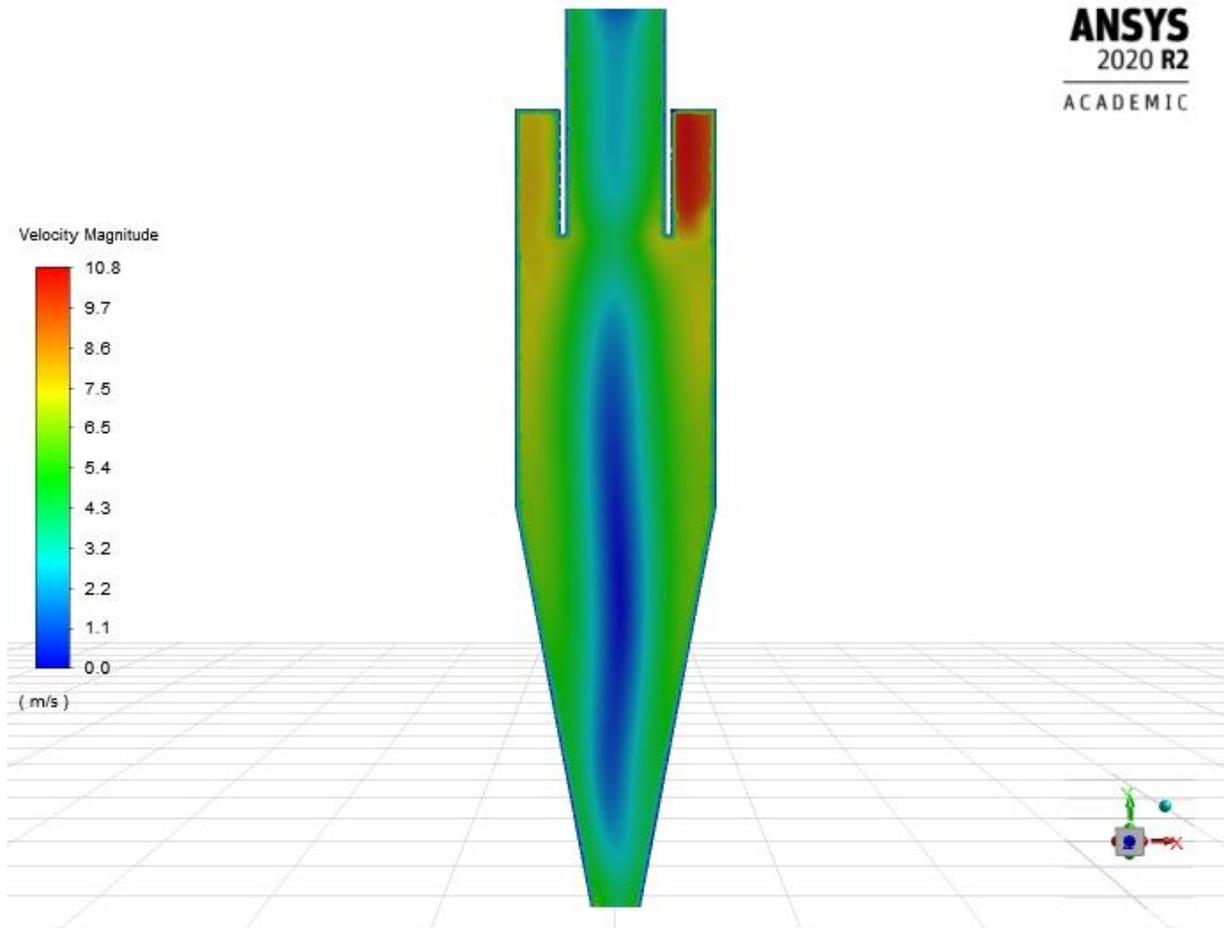
Fonte: Autor.

É válido ainda enfatizar que cada uma das simulações, para cada uma das velocidades, demandou um tempo de aproximadamente 30 dias para ser concluída, ou seja, grande esforço computacional.

## 5.2 Pós-Processamento

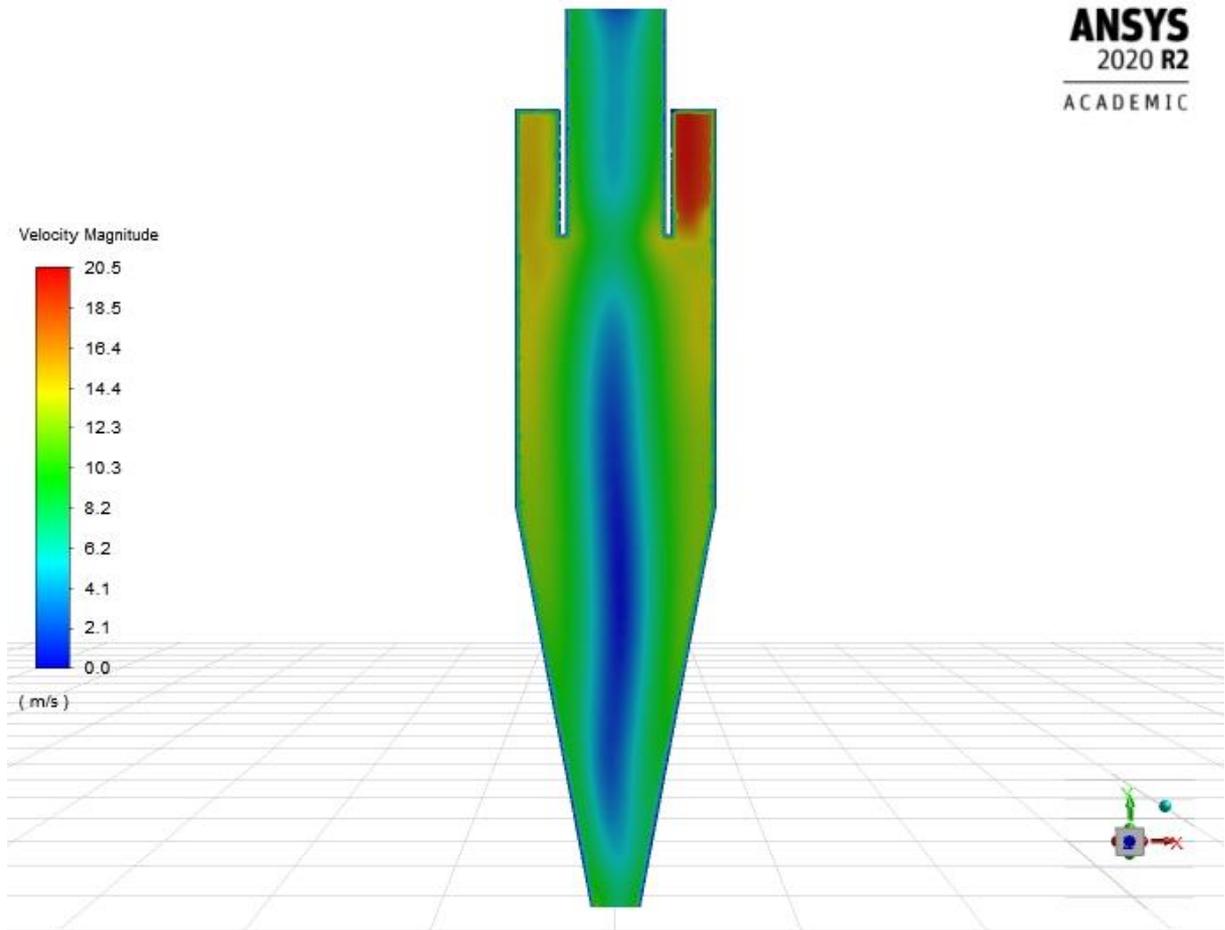
Os contornos de velocidade para cada uma das simulações podem ser observados nas Figuras 9, 10 e 11, sendo correspondentes as simulações de velocidades de 6,93 m/s, 12,98 m/s e 20,99 m/s respectivamente.

Figura 9 –Contorno de velocidade para simulação de 6,93 m/s.



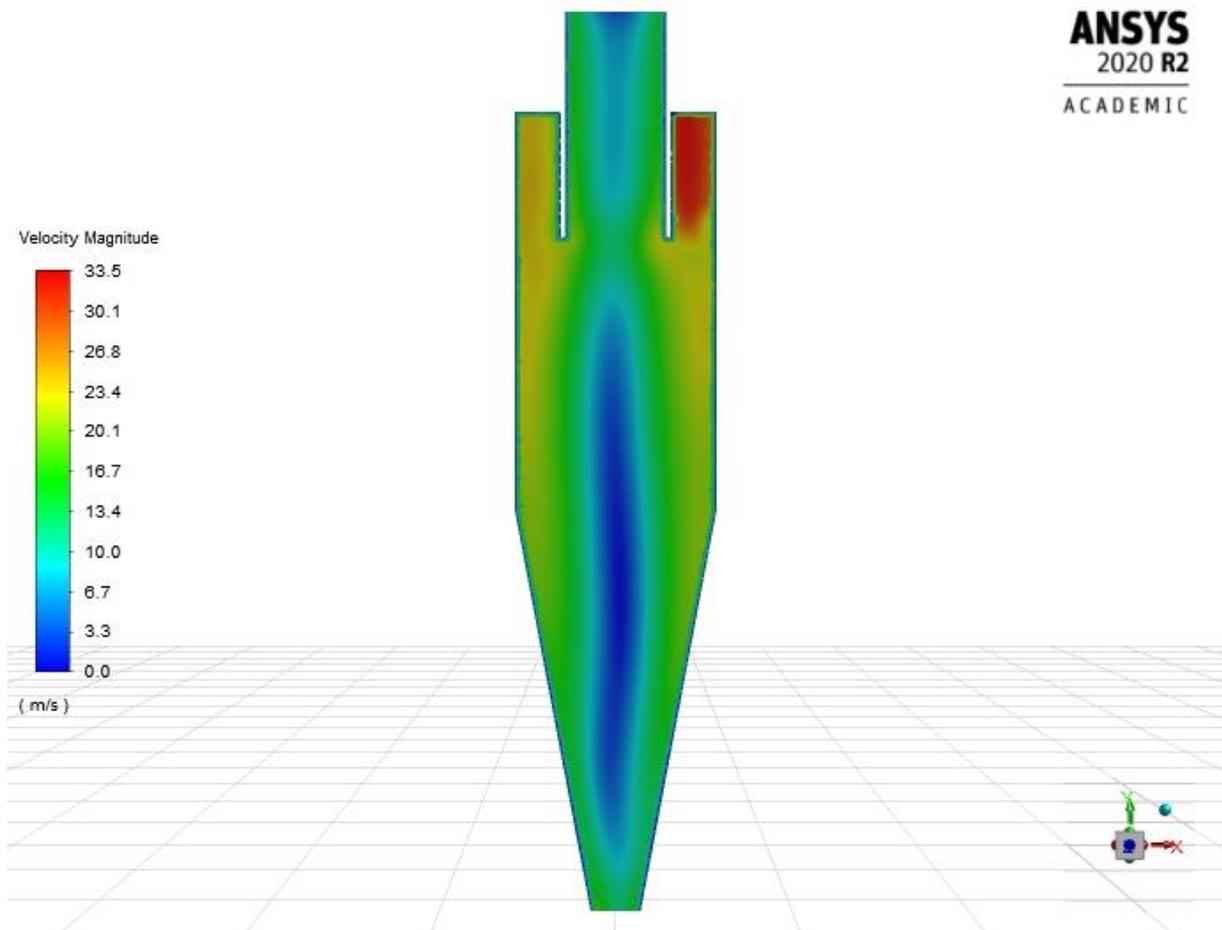
Fonte: Autor.

Figura 10 –Contorno de velocidade para simulação de 12,98 m/s.



Fonte: Autor.

Figura 11 –Contorno de velocidade para simulação de 20,99 m/s.



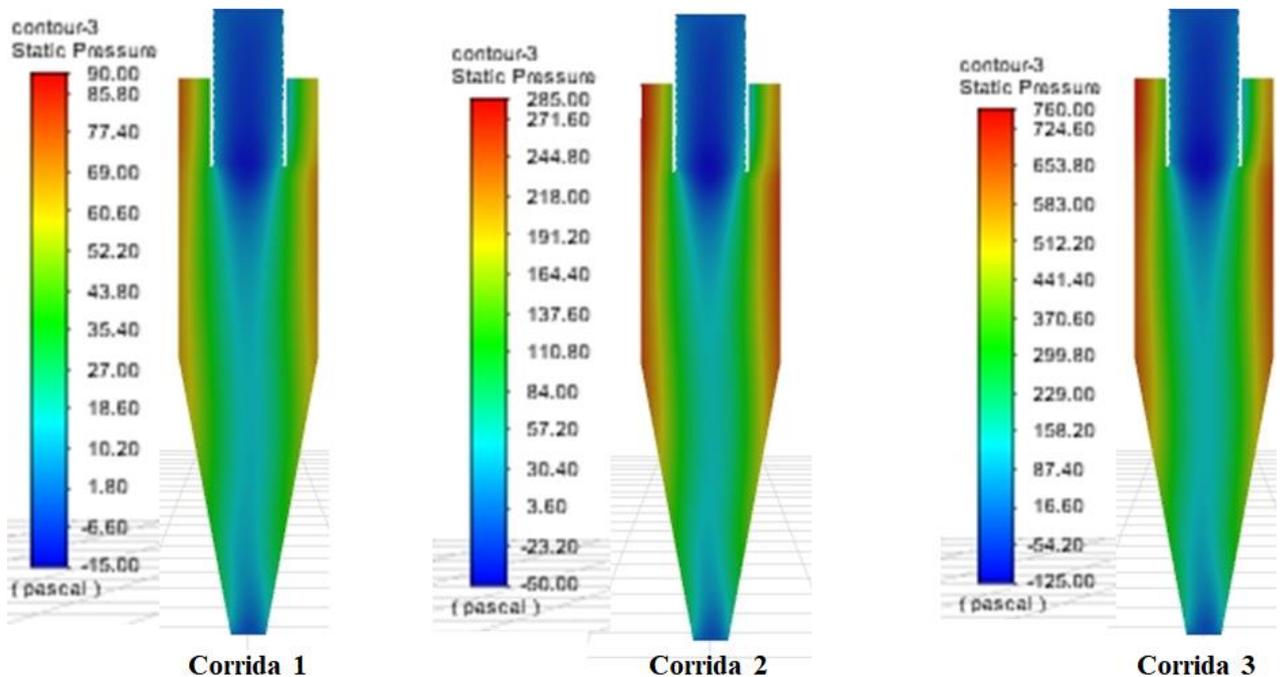
Fonte: Autor.

Comparando os contornos presentes nas figuras 9, 10 e 11 é possível observar nas escalas que a máxima magnitude para velocidade do fluido aumenta de uma figura para outra e por meio desta constatação é possível concluir que a velocidade no interior do equipamento apresenta valores coerentes, uma vez que ao aumentar a velocidade de alimentação do fluido, aumentou-se proporcionalmente a máxima velocidade na escala .

Tanto para a figura 9, quanto para as figuras 10 e 11 notou-se que as maiores velocidades estão presentes próximas ao duto de alimentação e também próximo a parede do equipamento, enquanto no meio observa-se a mínima velocidade. Este é o comportamento esperado, visto que ciclones apresentam correntes com característica de movimento espiral descendente próxima a parede até o fundo do equipamento e movimento espiral de subida no centro.

Geraram-se contornos de pressão para as três corridas realizadas, sendo a com velocidade de entrada do gás de 6,93 m/s denominada corrida 1, a de 12,98 m/s denominada corrida 2 e a de 20,99 m/s corrida 3. Os três contornos estão presentes na figura 12.

Figura 12 – Contornos de Pressão para as corridas 1, 2 e 3.



Fonte: Autor.

Vale ressaltar que os contornos de pressão para as 3 corridas presentes na figura 12 estão em diferentes escalas. Logo, ao observar esses contornos, é possível afirmar que a medida que a velocidade de entrada do gás aumentou, a queda de pressão no interior do equipamento também aumentou. Além disso, também é possível assegurar que a pressão máxima ocorre próxima a paredes do equipamento, isso pode ser justificado pelo fato de esses pontos serem locais de recirculação de fluido, logo haverá uma maior pressão. Essa informação de máxima pressão pode ser interpretada também como um alerta para reforçar a parede nesses pontos, uma vez que pontos de altas pressões podem causar danos no equipamento.

Nas tabelas 4, 5 e 6 estão representados os dados de temperatura obtidos em posições radiais para as simulações de 6,93 m/s 12,98 m/s e 20,99 m/s respectivamente, bem como o erro percentual quando comparamos esses dados com os dados experimentais.

Tabela 4 – Dados de temperatura obtidos para simulação de 6,93 m/s.

Corrida 1			
Velocidade tangencial de entrada (m/s)	6,93		
Temperatura média na entrada (K)	377,0		
Posição radial(m)	T(r) (K) simulada	T(r) (K) experimental	erro (%)
0,000	376,69	355,1	6,08
0,020	376,73	353,2	6,67
0,040	376,76	362,1	4,05
0,060	376,76	372,2	1,23
0,080	376,79	375,0	0,48
0,095	376,81	376,1	0,20

Fonte: Autor.

Tabela 5 – Dados de temperatura obtidos para simulação de 12,98 m/s.

Corrida 2			
Velocidade tangencial de entrada (m/s)	12,98		
Temperatura média na entrada (K)	377,0		
Posição radial(m)	T(r) (K) simulada	T(r) (K) experimental	erro (%)
0,000	376,82	352,0	7,05
0,020	376,88	349,9	7,71
0,040	376,91	359,5	4,84
0,060	376,94	371,8	1,38
0,080	376,94	375,3	0,44
0,095	376,95	376,2	0,20

Fonte: Autor.

Tabela 6 –Dados de temperatura obtidos para simulação de 20,99 m/s.

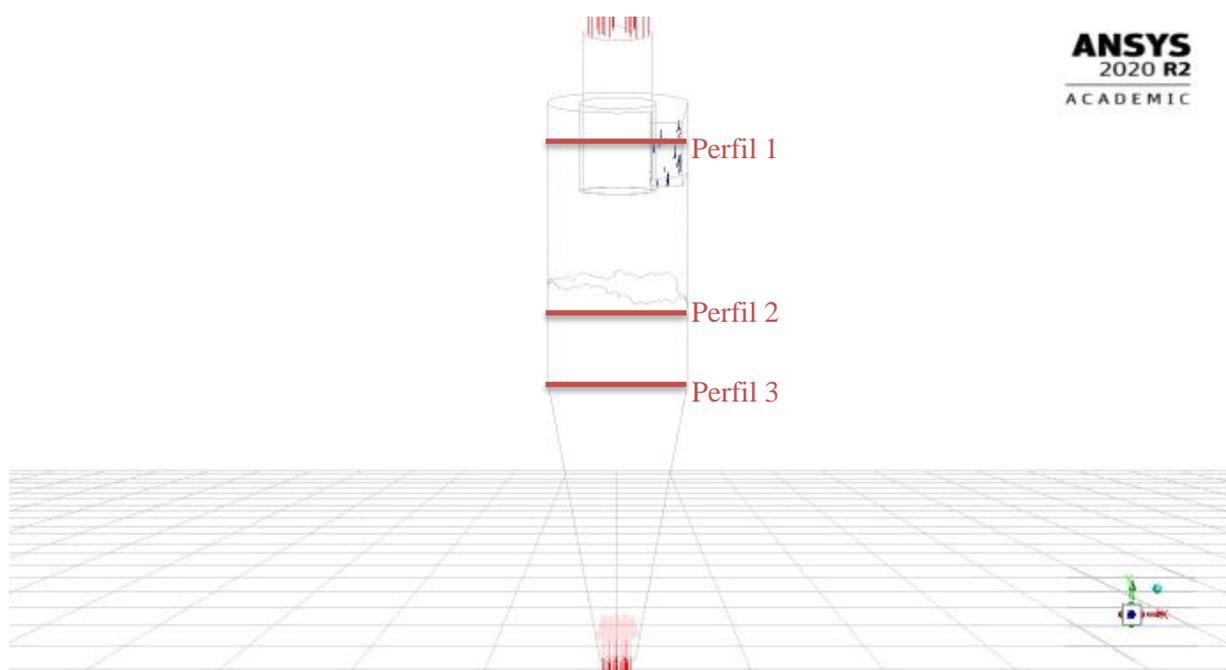
Corrida 3			
Velocidade tangencial de entrada (m/s)	20,99		
Temperatura média na entrada (K)	377,0		
Posição radial(m)	T(r) (K) simulada	T(r) (K) experimental	erro (%)
0,000	376,88	352,5	6,92
0,020	376,91	347,8	8,37
0,040	376,91	355,0	6,17
0,060	376,94	370,8	1,66
0,080	376,97	375,0	0,53
0,095	376,97	376,2	0,20

Fonte: Autor.

Observa-se em ambas as tabelas 4, 5 e 6 que a temperatura obtida na simulação, assim como a temperatura obtida no experimento, variou radialmente no interior do equipamento, sendo maior próxima as paredes e menor no centro confirmando o que já havia sido constatado nos contornos. Apesar dessa variação radial da simulação ter sido pequena quando comparada a variação experimental, pode-se perceber que o erro percentual de uma para outra é menor do que 10 % em todos os casos, mostrando o quão próximo a realidade uma simulação pode ser. Cientistas da linha de pesquisa da fluidodinâmica computacional geralmente adotam um erro de até 20% como sendo aceito em simulações, portanto o erro obtido está dentro da tolerância comumente adotada. Adicionalmente, é importante enfatizar que além dos erros associados à convergência das soluções matemáticas na simulação, também existem erros associados ao experimento de Meier et al. (1998), como por exemplo o fato dessa temperatura não ser constante e variar ao longo do tempo de experimento, provavelmente esses valores experimentais são valores médios obtidos pelos autores.

Para avaliar a simetria do perfil de velocidade realizou-se um estudo no interior do ciclone. A figura 13 pode ser utilizada para melhor visualização dos três locais estudados, nela estão presentes três linhas e em cima dessas linhas avaliaram-se alguns pontos em posição radial a fim de observar o comportamento da velocidade no equipamento.

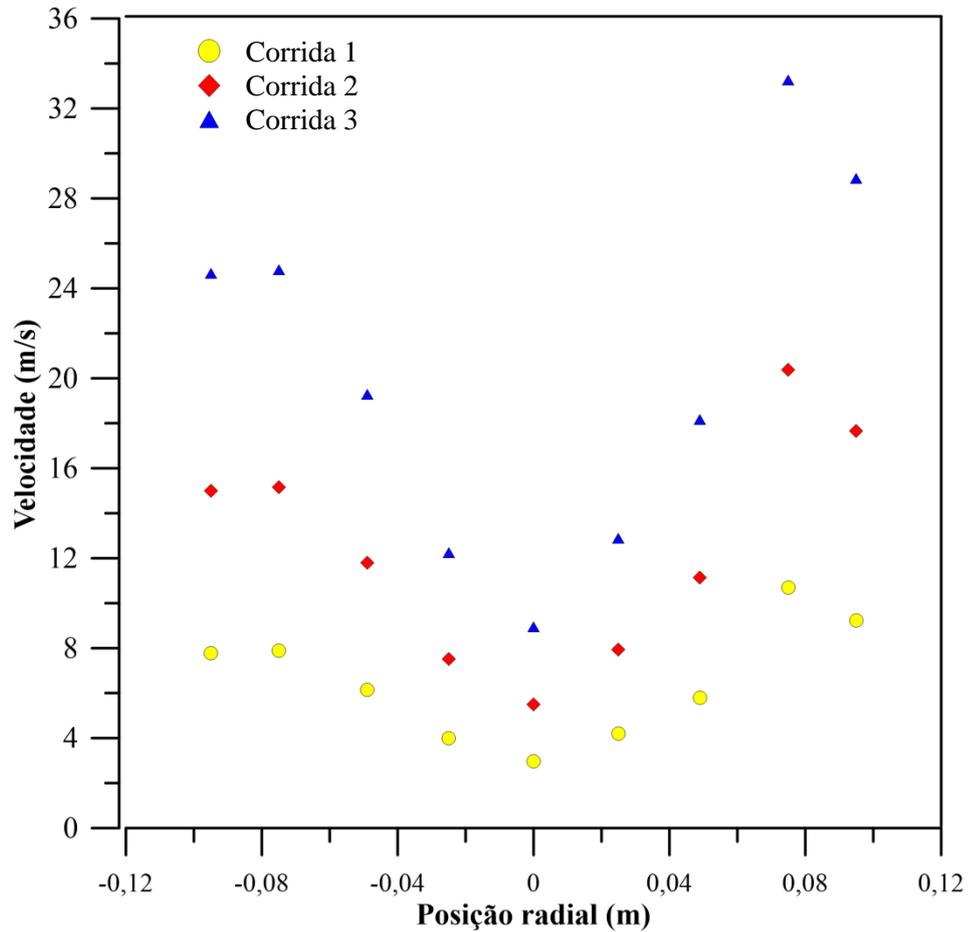
Figura 13 – Posições utilizadas para estudo da distribuição de velocidade.



Fonte: Autor.

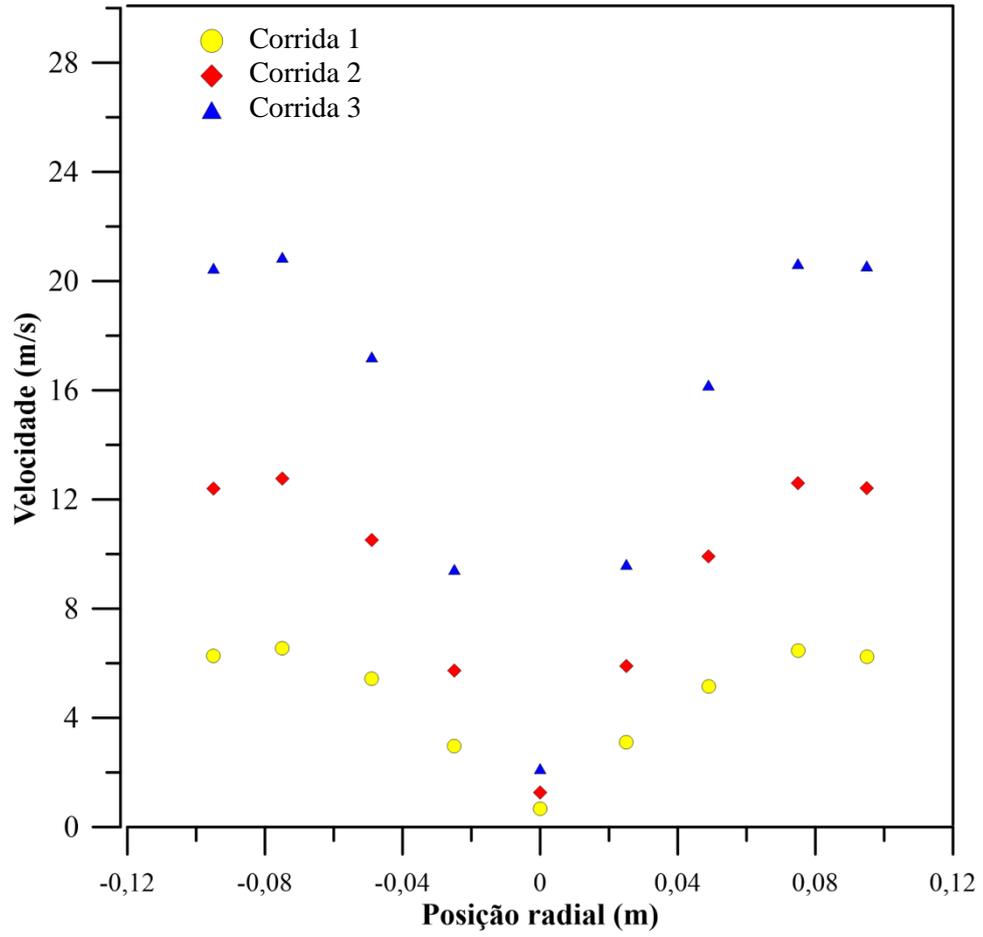
Foram plotados três gráficos com os dados de velocidade obtidos, sendo representado pela figura 14, 15 e 16 o gráfico correspondente aos perfis 1, 2 e 3 respectivamente. Na legenda a Corrida 1 se refere a simulação com velocidade de entrada do gás de 6,93 m/s, a Corrida 2 a simulação de 12,98 m/s e por último a Corrida 3 a velocidade de 20,99 m/s.

Figura 14 – Gráfico Velocidade x Posição radial para Perfil 1.



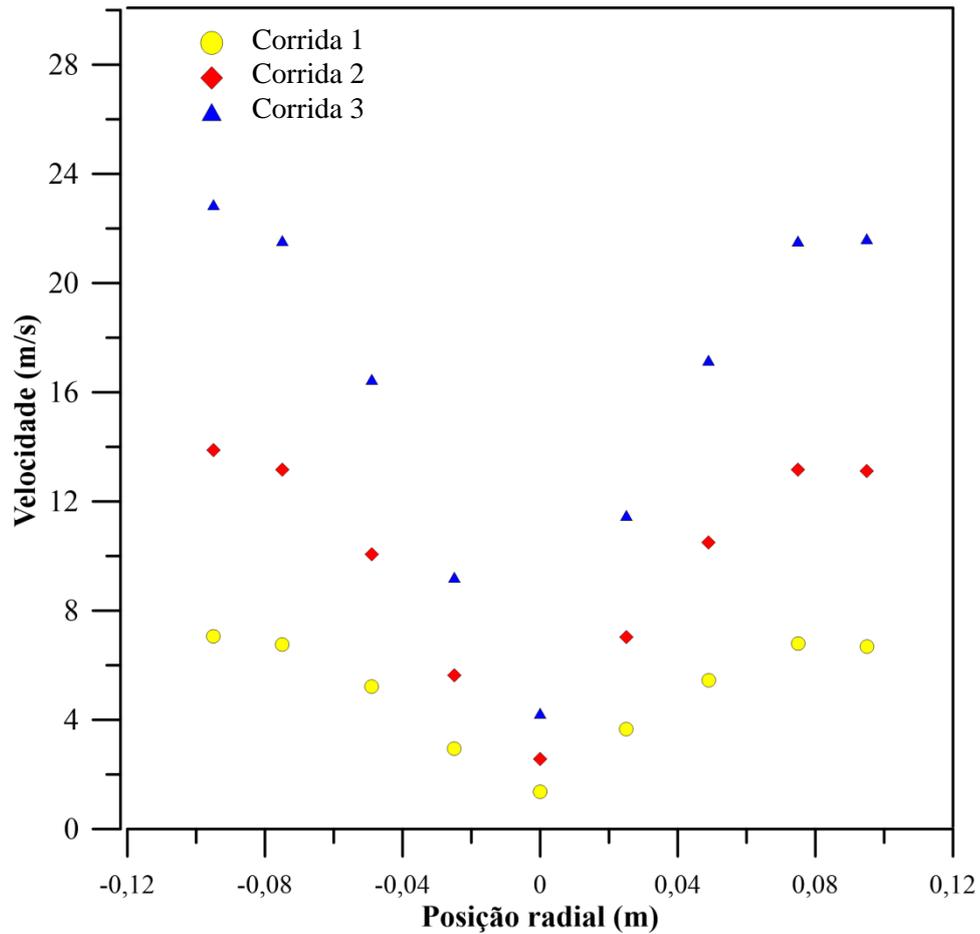
Fonte: Autor.

Figura 15 – Gráfico Velocidade x Posição radial para Perfil 2.



Fonte: Autor.

Figura 16 – Gráfico Velocidade x Posição radial para Perfil 3.



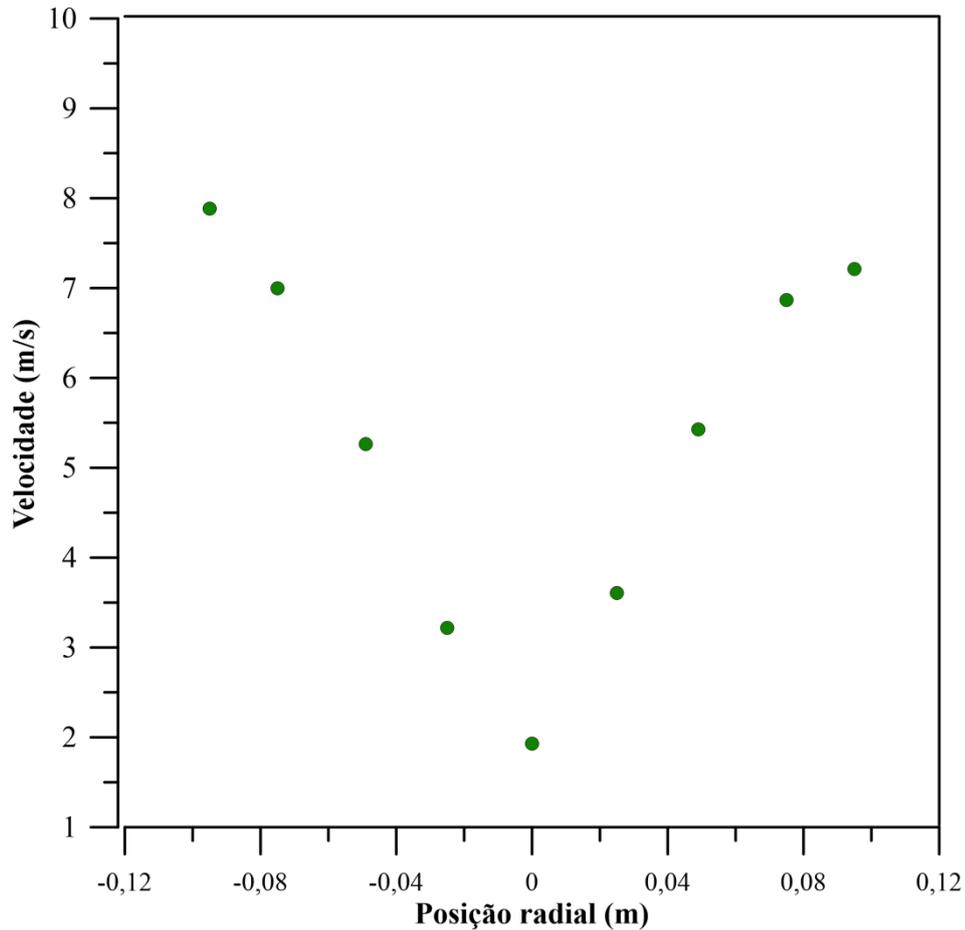
Fonte: Autor.

A partir destes três gráficos é possível avaliar que existe a presença de uma simetria no comportamento do perfil de velocidade. Os dois extremos (paredes) apresentam máxima velocidade com valores aproximadamente iguais entre si, essa velocidade vai diminuindo a medida que se afasta da parede até atingir a mínima velocidade no eixo central do equipamento. Esse comportamento já havia sido observado anteriormente nos contornos, e se trata de uma característica do movimento espiral presente em ciclones.

Além disso, notou-se que o perfil 1 apresenta velocidades mais altas quando comparado com o perfil 2, e este segundo, por sua vez, também apresenta valores de velocidade maior do que o perfil 3. A partir desta análise é possível afirmar que a velocidade é mais alta quanto mais próxima a alimentação ela está e a medida que o gás vai descendo em direção ao *underflow* e se afastando do duto da alimentação, o mesmo vai perdendo velocidade.

Por último, realizou-se uma quarta simulação com o intuito de observar o comportamento fluidodinâmico para o gás a temperatura ambiente. A partir dos dados coletados referentes ao Perfil 3 da Figura 13 construiu-se um gráfico que se encontra na Figura 17.

Figura 17 – Gráfico Velocidade x Posição radial Perfil 2 para Temperatura ambiente.



Fonte: Autor.

É possível constatar a partir da Figura 17 que quando o gás não sofre aquecimento, ou seja, entra no equipamento a Temperatura ambiente, o mesmo também apresenta comportamento simétrico, da mesma forma que o observado anteriormente para as Figuras 14, 15 e 16. Portanto, a simetria no perfil de velocidade de escoamento do gás não sofre influência da Temperatura, independentemente da mesma.

## 6 CONCLUSÃO

Portanto, a variação das velocidades obtiveram resultados de simulação muito satisfatórios ao comparar com o trabalho de Meier et al. (1998), uma vez que todas as três simulações apresentaram erros menores que 10% para os dados de temperatura em posição radial. Para a velocidade máxima, foi possível notar que em todos os casos, os pontos de máxima velocidade ocorriam próximo a parede do equipamento, assim como a máxima pressão. Já a velocidade mínima foi observada em todos os casos, no eixo central do equipamento. Verificou-se um comportamento simétrico no perfil de velocidade do escoamento do fluido e, verificou-se também que, esse perfil não sofre influência da temperatura do gás no interior do equipamento.

Observou-se que a geometria reproduzida do trabalho de Meier et al. (1998), bem como a malha de 484575 células construída foram suficientemente adequadas para realizar as simulações, garantindo bons resultados.

Embora o tempo requerido para a solução de todas as equações envolvidas na simulação computacional seja ainda bastante elevado, as principais características do escoamento no interior ciclônico foram reproduzidas com êxito neste trabalho pelo método dos volumes finitos. Além disso, o modelo de turbulência *Reynold Stress* representou satisfatoriamente bem o escoamento giratório do gás no ciclone tipo Lapple.

Com isto, foi possível realizar e validar um estudo integral do comportamento fluidodinâmico do ciclone, avaliando o comportamento do equipamento para suas diferentes velocidades. O que demonstrou a eficiência de simuladores e softwares para cálculos da engenharia, muito embora existam ainda alguns pontos a serem melhorados para que os resultados da simulação sejam ainda mais próximos a realidade.

## 7 SUGESTÕES

Durante o trabalho foi exposta a importância de uma malha suficientemente refinada, mas contrapartida expôs-se também que, malhas mais refinadas exigem maior esforço computacional. Neste sentido, sugere-se inicialmente, realizar um teste de independência de malha para definir quantitativamente até que ponto os resultados sofrem influência do refino da malha. Este teste não foi realizado no presente trabalho por não haver tempo hábil para isso, uma vez que cada uma das simulações demora cerca de 30 dias para ser realizada.

Mostrou-se ainda neste estudo a importância da modelagem numérica adequada para garantir bons resultados. Assim, sugere-se aperfeiçoar a simulação, utilizando modelos mais complexos, de forma que estes traduzam com mais fidelidade o escoamento do gás no interior ciclônico. Apesar de atualmente as abordagens LES e DNS necessitarem de níveis de discretização espacial e temporal muito pequenos, aumentando significativamente o tempo e o custo computacional, o constante aperfeiçoamento dos códigos e o demasiado crescimento dos recursos computacionais disponíveis, podem possibilitar a obtenção de resultados mais consistentes em menor tempo de CPU no futuro e conseqüentemente tornar possível o uso dessas abordagens em computadores domésticos.

Sugere-se ainda, realizar a coleta de dados experimentais com equipamentos mais modernos, uma vez que o estudo de Meier et al. (1998) foi realizado a mais de 20 anos atrás e atualmente os equipamentos mais modernos podem garantir resultados mais precisos em experimentos, assim vão haver dados mais confiáveis para validar através da simulação computacional .

Por fim, sugere-se dar continuidade a este estudo aplicando a presença de partículas no interior do equipamento. Através disso, será possível a realização de estudos sobre o tempo de residência dos sólidos no interior do ciclone.

Com isto, será possível prever o real comportamento dos ciclones, controlando suas variáveis operacionais para que um melhor desempenho seja alcançado, além de aumentar a vida útil destes equipamentos.

## REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO

ARNOSTI JUNIOR, S. et al. **Criticas no processo de secagem de concretos cerâmicos**. Ceramica, v. 45, n. 292-293, 1999.

BLAZEK, J. **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications**. 1<sup>a</sup> Edition. Badden-Daettwil, Switzerland: Elsevier, 2001.

BOF, C. G. **Desenvolvimento de um ciclone para separação de material particulado de uma corrente de gás de combustão de coqueria “heat recovery”**. 2018. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

CARVALHO, J. F. T. **Aplicação da fluidodinâmica computacional em um aerofólio para comparação de diferentes modelos de turbulência com dados experimentais e analíticos**. 2015. 68p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

CORRÊIA, J. L. G. **Discussão de Parâmetros de Projeto de Secadores Ciclônicos**. 2003. 189 p. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos** 2<sup>a</sup> ed. 2014.

ELSAYED, K.; LACOR, C. **The Effect of Cyclone Inlet Dimensions on the Flow Pattern and Performance**, Applied Mathematical Modelling, Vol 35. 2011 p.1952-1968.

FARIAS, S. N. **Secagem de sólidos esferodais usando o método de Galerkin**. 2002, 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2002

FERZIGER, J. H., PERIC, M.; **Computational Methods for Fluid Dynamics**, 3 ed., Springer, 2002.

FLUENT, **Theory Guide**, 2020.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 8<sup>a</sup> ed. Editora: LTC, 2010

HELKER, P. V. T.; BARROS, W. F. **Avaliação do Processo de Secagem ciclônica de embalagens cartonadas trituradas**. 2012. 69 p. Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória 2012.

HOEKSTRA, A.J.; DERKSEN, J.J.; VAN DEN AKKER, H.E.A. **An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclone**. Chemical Engineering Science, v. 54. 2018. p. 2055–2065.

HREIZ, R.; GENTRIC, C.; MIDOUX, N. **Numerical Investigation of Swirling Flow In Cylindrical Cyclones** – Chemical Engineering Research and Design, 2011.

LACERDA, A. C. S.; COURAS, D. J. N. P. **Estudo comparativo entre duas fontes de calor analíticas em soldagem Mig/Mag do aço 1020 utilizando simulação numérica baseada no métodos dos volumes finitos.** 2018. 13p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do semiárido, 2018.

LUCIANO, R. D. et al. **Implementação de modelo anisotrópico de turbulência para simulação de escoamento giratório de ciclones.** RETEC, Ourinhos, v. 10, n. 1. 2010. p. 62-74.

MEIER et al. **Aplicação de um Modelo Termofluidodinâmico para Análise da Transferência de Calor em Ciclones.** XXVI ENEMP (XXVI COBRASP - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados), Teresópolis, Rio de Janeiro, 1998. p.67-74.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas.** Rio de Janeiro: LTC, 1995.

MENDES, F. Q. **Modelagem e simulação de sistemas gás-sólido polidispersos: ciclones com alta carga.** 2019. 159p. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

MENEZES, J. B. **Resolução de equações diferenciais parciais em malhas não estruturadas via método dos volumes finitos utilizando um método de alta ordem.** 2019. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

MENTER, F. R. **Turbulence Modeling for Engineering Flows** - Research and Development Fellow. ANSYS, Inc. 2011.

OLIVEIRA, R. A. F. **Análise do escoamento em um ciclone adaptado com bicos aspersores de água utilizando fluidodinâmica computacional (CFD).** 2019. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

OLIVEIRA, W. L.; MARTINS, J. H. **Simulação de secagem de milho em camada estacionária por meio de modelagem computacional.** Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 8. Curitiba: 2020. p. 56128- 56154.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow.** Estados Unidos da América: Taylor & Francis, 1980.

PERES, A. P. **Técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) aplicadas a escoamentos em ciclones.** 2002. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)- Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RAMIREZ, M. V. **Simulação da perda de carga e da eficiência de coleta em ciclones através da fluidodinâmica computacional (CFD).** 2009. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

SEGANTINE, E. J. **Estudo da Fluidodinâmica de separadores ciclônicos no interior de Poços Petrolíferos através da técnica de CFD.** 2017. 185 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2017.

SILVA, J. E.; AFONSO, A. D. L.; SCHERMACK, P. V. **Uma metodologia de custeio eficiente para o processo de secagem de grãos: um estudo de caso em uma cooperativa Agrícola.** In: ENEGEP, 2005, Porto Alegre, 2005.

SILVA, J. P. A. **Secador ciclônico: Modelagem e Simulação via CFX.** 2016. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SILVA, M. A. **Estudo da secagem em ciclone.** 1991. 139 p. Tese de doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

SOUZA, J. A. R. **Secagem de sólidos via ciclones: Modelagem e simulação.** 2012. 137 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

VATAMBE, A. **Simulation and validation of automotive seat using the regulation FMVSS 207/210.** Indian Journal of Scientific Research, 2015, p. 385.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finit Volume Method**, 2ª edição, Pearson Education Limited, 2007.