

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO HENRIQUE XAVIER MASSO

SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM UM SEPARADOR CICLÔNICO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2015

GUSTAVO HENRIQUE XAVIER MASSO

SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM UM SEPARADOR CICLÔNICO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina TCC 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Lourenço

Co-Orientador: Prof. Dr. Ricardo Vasconcelos Salvo

CORNÉLIO PROCÓPIO
2015



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio Departamento Acadêmico de
Mecânica Curso de Engenharia Mecânica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gustavo Henrique Xavier Masso

Simulação de escoamento em um Separador Ciclônico

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 08:30hs do dia 15/06/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Marcos Antonio de Souza Lourenço - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Ricardo de Vasconcelos Salvo - (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Rubens Gallo - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Henrique Cotait Razuk – (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho à minha família, principalmente à minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Lourenço e Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo, pela sabedoria com que me guiaram nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação, e também à coordenação do curso de engenharia Mecânica da UTFPR-Londrina, pela receptividade no campus.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

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

RESUMO

XAVIER, G. H. **Simulação de escoamento em um separador ciclônico**. 2015. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Os ciclones são elementos abundantes nas indústrias, e como forma de aprimorar este dispositivo foi utilizado como passo final para seu desenvolvimento a DFC (Dinâmica de fluidos computacional) que faz a simulação dos escoamento em qualquer tipo de objeto. Para este trabalho foi utilizado o método de volumes finitos para a obtenção de 10 resultados, tanto para simulação transiente quanto permanente, que foram analisados por meio de gráficos comparados com o artigo de Slack et al, (2000) em que ele faz a simulação do mesmo separador ciclônico e expõe os resultados juntamente com um experimental, exatamente o que foi feito neste trabalho, utilizando como modelo de turbulência o método K-Epsilon e o RSM (Reynolds Stress Model) para se obter um melhor custo computacional que pôde ser simulado em um computador pessoal. Além disso o trabalho também aborda os mais importantes modos de discretização, a experiência de utilizar um software comercial como o STAR CCM+ e a evolução do ciclone desde sua invenção.

Palavras-chave: DFC. RANS. RSM. Ciclone. K-Epsilon.

ABSTRACT

XAVIER, G. H.. *Flow simulation in a cyclone separator*. 2015. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Cyclones are abundant elements in industries, and in order to enhance this device was used as a final step in its development CFD (computational fluid dynamics) that makes the simulation of flow in any type of object. For this study we used the finite volume method to obtain 10 results both for transient simulation as permanent, that were analyzed by comparison with the graphic article Slack et al, (2000) in which he makes the simulation of the same cyclonic separator and displays the results with an experimental, exactly what was done in this work, using as turbulence model the K-Epsilon method and RSM (Reynolds Stress Model) to obtain a better computational cost that could be simulated on a personal computer. In addition the work also addresses the most important ways of discretization, the experience of using a commercial software like STAR CCM + and the evolution of the cyclone since its invention.

Keywords: CFD. RANS. RSM. Cyclone. K-Epsilon.

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE VELOCIDADE TANGENCIAL MÉDIA.....	40
GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE VELOCIDADE AXIAL MÉDIA...	40
GRÁFICO 3 – VELOCIDADE AXIAL NA SIMULAÇÃO K- <i>EPSILON</i> PERMANENTE	49
GRÁFICO 4 – VELOCIDADE TANGENCIAL NA SIMULAÇÃO K- <i>EPSILON</i> PERMANENTE.....	49
GRÁFICO 5 – VELOCIDADE AXIAL NA SIMULAÇÃO RSM PERMANENTE.....	50
GRÁFICO 6 – VELOCIDADE TANGENCIAL NA SIMULAÇÃO RSM PERMANENTE.....	51
GRÁFICO 7 – VELOCIDADE AXIAL NA SIMULAÇÃO K- <i>EPSILON</i> TRANSIENTE.....	52
GRÁFICO 8 – VELOCIDADE TANGENCIAL NA SIMULAÇÃO K- <i>EPSILON</i> TRANSIENTE.....	52
GRÁFICO 9 – VELOCIDADE AXIAL NA SIMULAÇÃO RSM TRANSIENTE.....	53
GRÁFICO 10 – VELOCIDADE TANGENCIAL NA SIMULAÇÃO RSM TRANSIENTE.....	54
GRÁFICO 11 – VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS – VELOCIDADE AXIAL.....	55
GRÁFICO 12 – VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS – VELOCIDADE TANGENCIAL.....	56
GRÁFICO 13 – VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS – VELOCIDADE TANGENCIAL.....	57
GRÁFICO 14 – VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS – VELOCIDADE TANGENCIAL.....	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	12
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 Objetivo geral.....	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
2 SEPARADOR CICLÔNICO	15
2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	15
2.2 ESCOAMENTO NO INTERIOR DE UM CICLONE.....	17
2.2.1 Escoamentos secundários.....	18
2.2.2 Componentes do vetor velocidade.....	19
2.2.2.1 Velocidade tangencial.....	19
2.2.2.2 Velocidade axial.....	20
2.2.2.3 Velocidade radial.....	21
2.3 PRESSÃO ESTÁTICA E DINÂMICA.....	21
2.3.1 Pressão estática.....	23
2.3.2 Pressão dinâmica.....	23
2.3.3 Pressão total.....	23
3 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	24
3.1 O QUE É DFC.....	25
3.2 POR QUE UTILIZAR DFC.....	25
3.3 COMO É FEITA A SIMULAÇÃO.....	26
3.3.1 Pré-processamento.....	26
3.3.2 Processamento.....	27
3.3.3 Pós-Processamento.....	28
4 MÉTODOS NUMÉRICOS.....	29
4.1 DISCRETIZAÇÃO.....	29
4.1.1 Discretização espacial.....	29
4.1.2 Malha estruturada e não estruturada.....	30
4.2 MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO.....	31
4.2.1 Abordagens de discretização.....	32
4.2.1.1 Diferenças finitas.....	32
4.2.1.2 Volumes finitos.....	33
4.2.1.3 Elementos finitos.....	33

4.3 ANÁLISE DE TURBULÊNCIA.....	34
4.3.1 Modelos de turbulência utilizados.....	36
4.3.1.1 Modelo K-Epsilon.....	36
4.3.1.2 Modelo RSM (<i>Reynolds Stress Model</i>)	37
5 REFERENCIAL TEÓRICO.....	38
5.1 SLACK ET AL., 2000	38
5.2 ANÁLISE DO ARTIGO	42
6 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	43
6.1 GERAÇÃO DA GEOMETRIA.....	43
6.2 GERAÇÃO DA MALHA.....	43
6.3 CONFIGURAÇÕES DO PROGRAMA.....	44
6.3.1 Forma geométrica.....	45
6.3.2 Forma temporal.....	45
6.3.3 Condições de contorno.....	45
6.3.4 Acoplamento entre as variáveis.....	46
6.4 PÓS-PROCESSAMENTO.....	47
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	48
7.1 INDEPENDÊNCIA DA MALHA.....	49
7.1.1 Escoamento K-Epsilon permanente.....	49
7.1.2 Escoamento RSM permanente.....	51
7.1.3 Escoamento K-Epsilon transiente.....	52
7.1.4 Escoamento RSM transiente.....	54
7.2 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	55
7.2.1 Validação da malha de 300 000 elementos.....	56
7.2.1.1 Validação da velocidade axial.....	56
7.2.1.2 Validação da velocidade tangencial.....	57
7.2.2 Comparação com o experimental.....	57
7.2.2.1 Velocidade axial.....	58
7.2.2.2 Velocidade tangencial.....	58
7.3 CAMPOS DE VELOCIDADE.....	59
7.3.1 Velocidade axial.....	59
7.3.2 Velocidade tangencial.....	62
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Historicamente separadores ciclônicos apresentaram uma rápida ascensão, de sua primeira patente em 1885 (Hoffmann e Stein, 2008) até 1920, os ciclone foram de um equipamento inexistente à equipamentos largamente utilizados em processos industriais onde se requer a separação de uma fase mais densa em escoamentos bifásicos. Essa rápida ascensão ocorreu pelo seu princípio de funcionamento: na época de sua primeira patente o senso comum dizia que a separação de particulados do ar (por exemplo, detritos de palha do ar ambiente em moinhos) se daria pela ação da gravidade e ocorreria melhor caso o ar permanecesse em repouso. O funcionamento dos ciclones se baseia na utilização da força centrífuga, possibilitando uma separação muito mais rápida, algo essencial em ambiente industrial. Atualmente, separadores ciclônicos são, provavelmente, os equipamentos mais utilizados na indústria, estando presentes em praticamente todos os ramos - de preto-químicas à indústria alimentícia - onde a separação gás-sólido e/ou controle de emissão de poluentes para a atmosfera são necessários. As principais vantagens desse equipamento são: geometria simples, o que possibilita redução nos custos de fabricação; não possuem peças móveis, reduzindo os custos de manutenção; apresentam baixo consumo de energia e dependendo do material utilizado em sua fabricação, podem trabalhar em altas temperaturas. Embora largamente utilizado, esse separador também possui algumas desvantagens, dentre as quais se destacam: baixa eficiência quando operando fora das especificações de projeto; escoamento muito complexo, o que dificulta o projeto.

Esse complexo escoamento apresenta zonas de recirculação de fluido além de alta anisotropia devido ao movimento de *swirl*. Essa complexidade fez com que projetistas se baseassem em relações empíricas para poderem prever a performance do equipamento. Relações empíricas são derivadas da análise de dados experimentais, incluindo os efeitos de variáveis geométricas e parâmetros de operacionais. Portanto, esses modelos sofrem de uma deficiência inerente a qualquer modelo empírico: o modelo só pode ser utilizado dentro dos limites extremos dos dados experimentais sobre os quais foi desenvolvido, então houve outra evolução da forma de se projetar o ciclone, o meio computacional.

Na década de 80 tornou-se possível realizar simulações bidimensionais deste equipamento, através da DFC (Dinâmica dos Fluidos Computacional) (BOYSAN et al., 1982; BOYSAN et al., 1983; BOYSAN et al., 1986). Estes estudos iniciais demonstraram o potencial da metodologia e a importância da modelagem da turbulência, indicando que modelos tradicionais, como por exemplo o modelo κ - ϵ padrão, não são adequados para a simulação do escoamento em ciclones. Considerando a simulação numérica de ciclones um grande avanço foi a utilização de simulações tridimensionais com a metodologia SGE (Simulação de Grandes Escalas) para a modelagem da turbulência, este avanço se deu com os trabalhos iniciais de Derksen et al., 2000 e Slack et al., 2000.

Derksen et al., 2000 foi capaz de reproduzir corretamente não só os valores médios e RMS das componentes da velocidade, mas também o fenômeno de precessão do vórtice (PVC - *Precessing Vortex Core*), e as condições de operação utilizadas no trabalho de Slack et al., 2000, incluíam um número de Reynolds relativamente alto. Embora nos últimos anos simulações de grandes escalas de separadores ciclônicos têm se tornado mais comuns, esse trabalho visa uma comparação dos resultados obtidos com simulações URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*), baseadas nos modelos Realizable κ - ϵ e no modelo das tensões de Reynolds (RSM - Reynolds Stress Model).

Os trabalhos iniciais de Boysan indicaram que o modelo κ - ϵ padrão não deve ser utilizado na simulação de ciclones, no entanto, existem vários trabalhos disponíveis na literatura onde os autores afirmam que o modelo Realizable κ - ϵ é capaz de fornecer resultados satisfatórios na simulação de tais dispositivos. Dessa forma o presente trabalho vem como uma investigação sobre a aplicabilidade de tal modelo na simulação de escoamentos altamente rotativos. Simulações com o modelo RSM também são apresentadas como controle. Como ciclone base optou-se pelo ciclone simulado por Slack et al., 2000, o qual fornece tanto dados experimentais quanto resultados de simulações com as metodologias SGE - baseada no modelo de turbulência de Yakhot et al., 1982 - e URANS - baseada no modelo de turbulência RSM, para comparação dos resultados obtidos.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Desenvolveu-se neste trabalho um estudo baseado no artigo “*ADVANCES IN CYCLONE MODELLING USING UNSTRUCTURED GRIDS*” que explica os métodos utilizados pelo autor para simular o escoamento em um separador ciclônico e compara os resultados da simulação com métodos numéricos diferentes, sempre simulando escoamento turbulento.

O desenvolvimento do trabalho será dado com a teoria sobre separadores ciclônicos, como seu escoamento funciona, qual a sua utilidade, o histórico e a evolução deles com o passar dos anos e a ênfase na sua grande importância no setor industrial.

Então será explicado, de forma breve, o procedimento de simulação numérica via DFC, o que é, como funciona, por que utilizá-la, quais são os métodos mais utilizados, suas principais vantagens e desvantagens.

Durante o desenvolvimento do estudo, será necessário aprofundar os conhecimentos sobre tópicos complexos como, por exemplo, escoamentos turbulentos e sua modelagem numérica e a simulação de escoamentos altamente rotativos (*swirling flows*).

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Ao se verificar a utilização de separadores ciclônicos nos mais diversos ramos industriais nota-se a importância dos mesmos. Assim, a otimização no projeto desses equipamentos é fundamental para uma maior eficiência de separação e sua consequente economia de recursos.

A principal dificuldade no projeto deste equipamento reside na complexidade do escoamento no interior do mesmo. Esta complexidade impede a solução analítica do escoamento e torna difícil até mesmo a obtenção de correlações empíricas, de tal forma que a maior parte das correlações desenvolvidas possuem pequena faixa de utilização. Uma alternativa ao desenvolvimento empírico é a

utilização da Dinâmica dos Fluidos Computacional para a simulação do escoamento. Embora seja uma ferramenta extremamente poderosa, a DFC também possui limitações, sendo a principal delas o custo computacional.

Sabe-se que o escoamento no interior de separadores ciclônicos é altamente rotativo, e que a melhor metodologia de modelagem da turbulência a ser utilizada nesse caso é Simulação de Grandes Escalas. Entretanto essa é numericamente onerosa. Isso favorece à utilização das Equações Médias de Reynolds (RANS), as quais, na maior parte dos casos de interesse industrial oferecem uma melhor relação custo benefício. Novamente devido às características do escoamento em questão, teoricamente, o único modelo RANS capaz de prever corretamente o campo de velocidade no interior do equipamento é o modelo das tensões de Reynolds (RSM) em regime transiente. No entanto, é relativamente comum a publicação de artigos em periódicos internacionais onde o modelo κ - ϵ em suas versões Realizable ou RNG são utilizados com aparente sucesso.

Assim, esse trabalho busca verificar a real aplicabilidade do modelo κ - ϵ Realizable na simulação do escoamento turbulento no interior de um separador ciclônico operando em regime permanente (vazão mássica constante) e a um número de Reynolds moderado.

Além disso, pesquisar as origens do separador ciclônico e suas mudanças conforme o tempo, seu complexo escoamento e peculiaridades sobre o ciclone. Especificar as formas de escoamento dentro do ciclone como também os tipos de velocidades encontradas no seu interior, como o movimento de *swirl* e a ação da força centrífuga no mesmo.

Ressalta-se aqui que todas as simulações executadas nesse trabalho serão realizadas em um notebook de uso pessoal. Um computador com processador i5 - 2400 MHz, 4 Gb de memória RAM gerando assim uma dificuldade adicional.

1.3 OBJETIVOS

O trabalho será desenvolvido primeiramente com o uso de softwares para pré-modelagem do separador e para o desenvolvimento das malhas numéricas (pré-processamento). Depois desta etapa será feita a simulação numérica (processamento, que é a simulação do escoamento no interior do separador). Por último será realizada a análise dos resultados obtidos (pós-processamento).

Para um bom desenvolvimento do trabalho é necessário entender algumas peculiaridades de escoamentos turbulentos altamente rotativos, dessa forma, também apresenta-se uma revisão a respeito do escoamento no interior do separador. As simulações serão feitas considerando modelos RANS os quais utilizam as equações médias de Reynolds, garantindo grande economia de tempo na etapa de processamento. Enfim, os resultados obtidos dos perfis de velocidades em uma específica posição no separador serão comparados aos resultados do trabalho de Slack et al., 2000.

1.3.1 Objetivo geral

Este estudo tem como principal objetivo a introdução à Dinâmica dos Fluidos Computacional, considerando a aplicação da mesma a escoamentos industriais e sobre tudo à simulação de separadores ciclônicos

1.3.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos desse trabalho podem ser resumidos em:

- Introdução à Dinâmica dos Fluidos Computacional;
- Obtenção dos conhecimentos sobre o escoamento em um separador ciclônico;
- Avaliação da aplicabilidade do modelo de turbulência Realizable $k-\epsilon$ e RSM à simulação de ciclones, para regimes permanente e transiente, por meio de comparação com dados experimentais e resultados numéricos obtidos por Slack et al., 2000.
- Análise do artigo de Slack et al., 2000.

2 SEPARADOR CICLÔNICO

Nesse item serão apresentados, de forma breve, o princípio de funcionamento e as principais características do escoamento no interior de separadores ciclônicos. Embora ciclones possam promover a separação, em casos especiais, até mesmo de misturas do tipo líquido-líquido, aqui, por simplicidade será considerado somente misturas gás-sólido. Pelo mesmo motivo, também será considerado apenas o tipo mais comum de ciclones, os ciclones de fluxo reverso com entrada tangencial.

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O separador ciclônico é basicamente constituído por cinco partes:

- A entrada da mistura, gás e partículas sólidas;
- O corpo do ciclone, normalmente com formato cônico-cilíndrico ao qual a entrada é tangencialmente acoplada;
- Saída do gás limpo, denominada de *Overflow*;
- Saída da fase dispersa, ou particulada, chamada de *Underflow*;
- Tubo central para direcionar a saída do gás limpo para o duto de *Overflow*, chamado de *Vortex finder*.

Todos os elementos descritos acima podem ser visualizados na Fig. 1. A seguir explica-se como é o funcionamento do ciclone

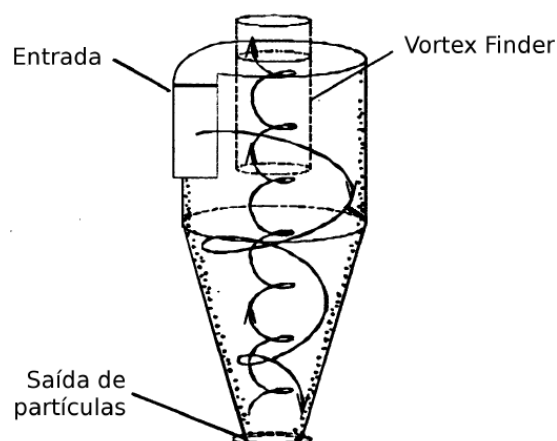


Figura 1 – Ciclone
 Fonte: Adaptado de Hoffman e Stein(2008).

A mistura (gás + partículas) entra tangencialmente no ciclone, isso gera um escoamento altamente rotativo dentro do corpo do mesmo (comumente denominado *swirling flow*). Existe uma divisão de dois tipos ideais de escoamento rotativo:

- O primeiro tipo gera o escoamento denominado de vórtice forçado, que gira com a mesma velocidade tangencial de um corpo sólido, também em rotação.
- O segundo tipo corresponde ao escoamento denominado de vórtice livre, que é uma forma idealizada, um redemoinho sem atrito.

A distribuição de velocidade tangencial dentro de um ciclone, é uma mistura das duas formas, denominada de vórtice de Rankine, ou vórtice real, como ilustrado na Fig. 02.

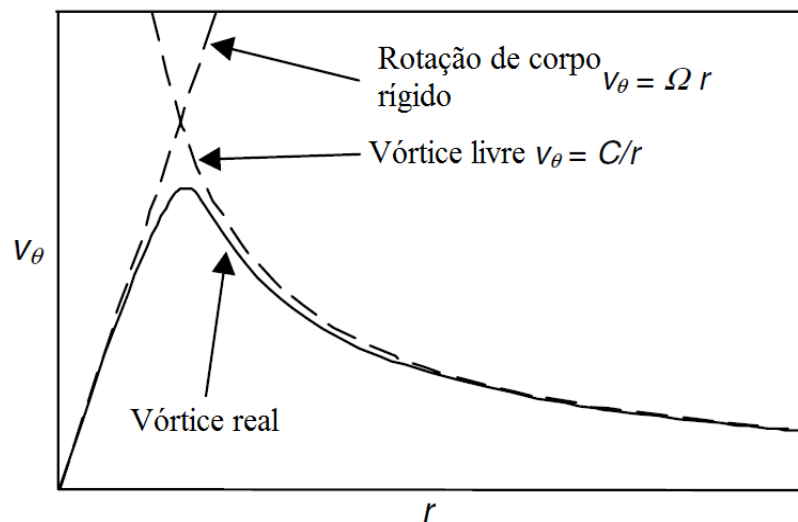


Figura 2 – Esquema apresentando os dois movimentos ideais e o vórtice real resultante da combinação dos mesmos.

Fonte: Adaptado de Hoffman e Stein, 2008, cap. 2, p.26.

Devido ao movimento de rotação a aceleração centrípeta se faz presente. Embora em princípio as equações do movimento de Newton aplicam-se somente em um sistema que não acelera. Matematicamente é comum a utilização de uma pseudoforça para compensar tal aceleração. Hoffmann e Stein (2008) trazem essa discussão de forma bastante didática:

Se fossemos capazes de diminuir em tamanho e pegássemos uma carona em uma pequena bola conectada por uma corda a um pino central, e está

bola estivesse girando em torno desse pino, a única força que iríamos experienciar seria a força direcionada para dentro (ou tensão) exercida pela corda. Assim, para explicarmos porque a tensão atuante na corda não nos puxa para dentro, em direção ao pino central, nós criamos uma pseudoforça direcionada para fora cuja magnitude é igual a massa do objeto girando multiplicada pela aceleração centrípeta.

A pseudoforça em questão é a força centrífuga. Para um fluido a força centrífuga é criada por um gradiente de pressão estático, que atua como se fosse a corda do exemplo anterior, e é esta força que atua na direção do eixo de rotação mantendo o elemento em seu trajeto. Como pode ser visto na figura 3, é possível dizer que a força exercida pela pressão do fluido aumenta com a força centrífuga, além disso a pressão em um escoamento rotativo aumenta conforme a distância do seu eixo de rotação.

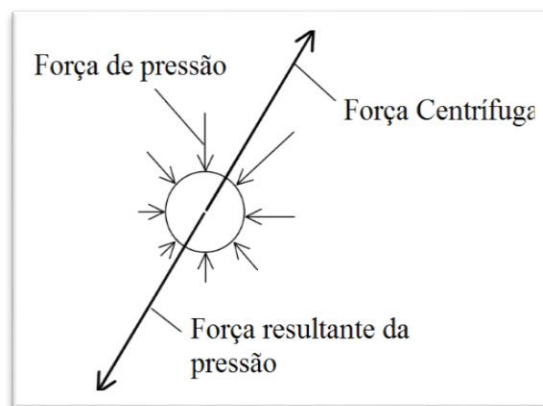


Figura 3 – Força centrífuga
Fonte: Hoffmann e Stein (2008, cap.2, p. 3).

2.2 ESCOAMENTO NO INTERIOR DE SEPARADORES CICLÔNICOS

Após entrar tangencialmente no corpo do ciclone a mistura gás sólido inicia um movimento rotativo para baixo (em direção ao *underflow*), isso gera uma espiral descendente. Devido a ação da aceleração centrípeta partículas mais densas tendem

a se deslocar em direção a parede do separador. Ao se aproximar do *underflow* o gradiente de pressão faz com que o fluxo reverta sua direção axial, e, dessa forma, o mesmo passa a se movimentar em uma espiral ascendente. As partículas mais densas que escoam junto a parede no movimento descendente não acompanham a reversão no movimento axial sendo separadas no *underflow*. Assim o escoamento básico dentro de separador ciclônico pode ser descrito como composto por uma espiral externa descendente - em direção ao *underflow* - e uma espiral interna ascendente - em direção ao *overflow* - como indicado na Fig. 4.

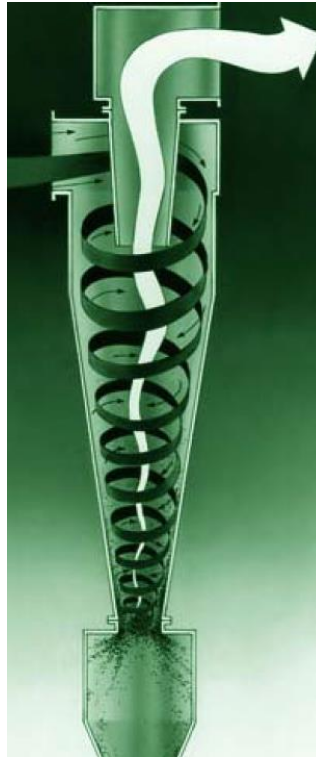


Figura 4 – Espiral externa descendente e espiral interna ascendente.

Fonte: Adaptado de *Envirotech web site*.

2.2.1 Escoamentos secundários

Além do escoamento básico descrito acima, existe uma série de escoamentos secundários dentro do ciclone, os quais afetam diretamente a eficiência de separação do equipamento. Dentre esses, os mais importantes são resumidos abaixo:

- Escoamento de curto circuito: é caracterizado por uma zona de velocidade axial negativa próxima ao *vortex finder*. Esse escoamento é indesejado, uma vez que possibilita a passagem de parte do fluxo diretamente da entrada do ciclone para o duto de *overflow*, sem que a separação ocorra.
- Reversão axial dentro ciclone (zonas de recirculação): na realidade a reversão axial da velocidade não ocorre somente próximo ao *underflow*, mas sim ao longo de toda a extensão axial do ciclone, promovendo assim a mistura das espirais ascendente e descendente. Isso possibilita tanto a separação de partículas que escapariam quanto que partículas que seriam separadas escapem.

Além dos escoamento secundários descritos, ainda é comum encontrar alguns fenômenos como o movimento de precessão do vórtice (PVC) e a quebra do vórtice no duto de *overflow* (*vortex breakdown*). No entanto, esses não serão abordados aqui.

2.2.2 Componentes do vetor velocidade

Devido à complexidade do escoamento no interior do separador, é comum a divisão do vetor velocidade em suas componentes básicas:

- Velocidade tangencial;
- Velocidade radial;
- Velocidade axial;

2.2.2.1 Velocidade tangencial

A componente tangencial da velocidade normalmente é tratada como a principal responsável pelo efeito de separação do ciclone. Quanto maior for a velocidade tangencial dentro do separador maior será a aceleração centrípeta exercida sobre o fluido. O perfil de velocidade tangencial em uma dada posição axial

dentro de um ciclone se aproxima muito do vórtice real apresentado na Fig. 02, como pode ser visto na Fig. 5.

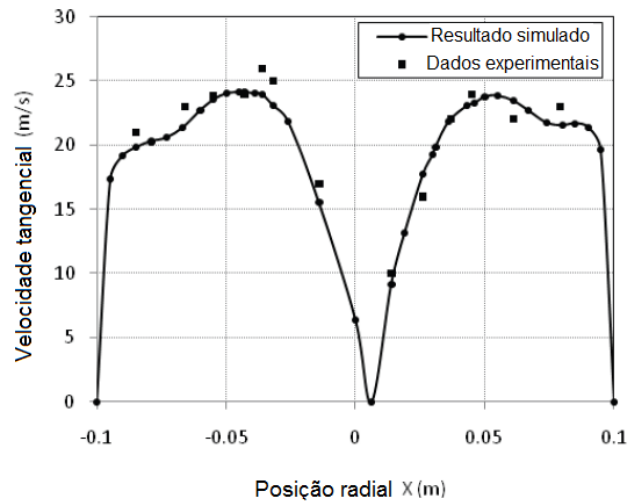


Figura 5 – Gráfico típico de velocidade tangencial
Fonte: Utikar et al (2010, cap.4, p. 252).

Observando a Fig. 5, nota-se que aumentando-se a distância radial em relação ao eixo do ciclone a velocidade tangencial aumenta até um valor máximo, e então passa a decrescer com o aumento da distância radial, à medida que se aproxima da parede. Com relação à distribuição axial da velocidade tangencial, os valores máximos normalmente são observados na porção cilíndrica do corpo do ciclone e a medida que se percorre o corpo do ciclone em direção ao *underflow* os valores de velocidade tangencial tendem a decrescer.

2.2.2.2 Velocidade Axial

A componente axial da velocidade é a de maior influencia no transporte de partículas para a saída do ciclone (para o *underflow*). Existem dois vórtices no ciclone, o externo, que é descendente, e o interno, que é ascendente e direcionado ao *vortex finder*. Tipicamente o fluxo descendente mostra um máximo perto da parede do separador. No centro do ciclone há a possibilidade da velocidade axial ser posicionada tanto em direção ao duto de *overflow* quanto de *underflow* (pico ou vale local de velocidade axial). Com essas informações é possível identificar a forma dos gráficos de velocidade axial versus posição. Podem existir duas formas: em forma da letra “V” ou da letra “W”, como mostrado na Fig. 6.

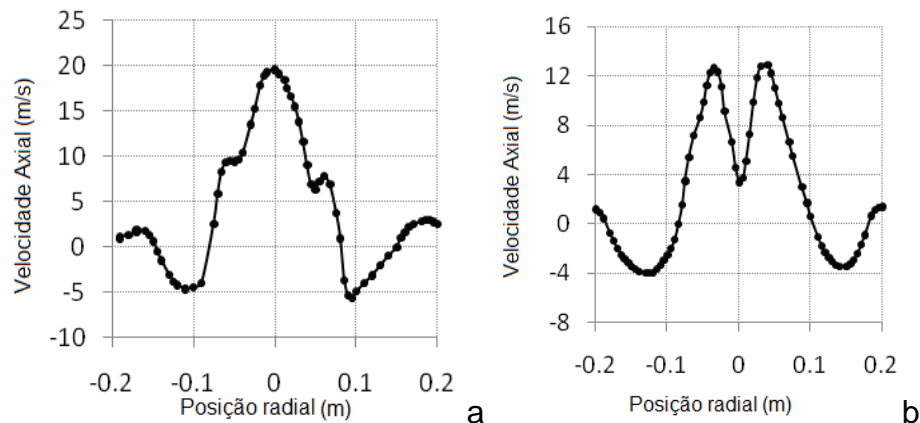


Figura 6 – Perfil de velocidade axial. (a) Gráfico em forma da letra “V”. (b) Gráfico em forma da letra “W”

Fonte: Adaptado de Utikar et al (2010, cap.4, p. 251).

A forma do perfil de velocidade axial - ser em “V” ou “W” - depende da relação entre os diâmetros do *vortex finder* e do diâmetro externo do ciclone. Esta relação não altera apenas a velocidade axial como também a eficiência de separação no ciclone.

2.2.2.3 Velocidade Radial

A velocidade radial afeta a coleta de partículas e a eficiência do ciclone, porém tem menor importância em relação as outras componentes estudadas aqui, já que possui menor magnitude (normalmente uma ordem de magnitude a menos que a componente tangencial). No entanto, isto é válido apenas no vórtice externo, próximo ao *vortex finder* esta velocidade aumenta bastante em direção ao centro do ciclone, de tal forma que a mesma possui importância marcante do escoamento de curto circuito.

2.3 PRESSÃO ESTÁTICA E DINÂMICA

Neste tópico será apresentada a teoria sobre as pressões estática e dinâmica, assim como suas definições e propriedades.

2.3.1 Pressão estática

A pressão estática é definida como a pressão exercida por um líquido ou gás, é a pressão que sempre pode ser definida, mesmo que o fluido esteja em repouso, então geralmente quando se mede qualquer pressão em um meio, por exemplo a pressão ao nível do mar, é a estática que é medida.

2.3.2 Pressão dinâmica

Já a pressão dinâmica é a energia cinética por unidade de volume de uma partícula, a qual pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$p_{din} = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Onde ρ é a densidade, e V , a velocidade.

2.3.3 Pressão total

A pressão total é a soma das pressões dinâmica e estática. Quando se fala em queda de pressão em separador ciclônico, se fala na pressão estática. Dessa forma, grande parte da queda de pressão que ocorre nesse tipo de separador tem origem na transformação de pressão estática em pressão dinâmica devido ao aumento da velocidade no interior do equipamento. Uma vez que o movimento do fluido no duto de *overflow* ainda é altamente giratório, para recuperação de parte da pressão (estática) perdida no separador é necessário a utilização de dispositivos para quebrar o movimento giratório no duto de *overflow*. Se isso não for feito, grande parte

da energia será dissipada na forma de atrito com as paredes o duto, resultando assim em queda de pressão total.

3 DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

De acordo com White (2011) existem três abordagens básicas para análise de problemas aleatórios de escoamento de fluidos:

1. Análise de volume de controle, ou de grande escala;
2. Análise diferencial, ou de pequena escala;
3. Análise dimensional, ou experimental.

Estas três formas de análise possuem basicamente a mesma importância dentro do escopo da mecânica dos fluidos, a utilização de uma ou outra forma de análise depende principalmente do problema estudado, do nível de detalhamento desejado e do tempo e custo envolvido em tal análise.

A primeira forma, análise de volume de controle, pode ser executada rapidamente e a um baixo custo, entretanto a resposta obtida é global, ou seja, essa análise é uma análise macro, a qual normalmente oculta variáveis importantes do processo. Por isso, é muito utilizada no desenvolvimento/estudo inicial.

A terceira forma, experimental, é a base do estudo da mecânica dos fluidos, sendo muito utilizada e poderosa. Infelizmente, o estudo experimental de determinado escoamento ou fenômeno nem sempre é possível, seja devido aos custos envolvidos (a montagem e instrumentação de um experimento pode ser extremamente custosa) seja devido à impossibilidade de monitorar as variáveis de interesse (existem casos onde as ferramentas atuais utilizadas para monitoração não são suficientes para fornecer a informação desejada) ou seja pelo tempo necessário para a montagem e execução do experimento.

Normalmente os custos envolvidos são o maior fator limitante, por isso é comum a utilização de protótipos em escala reduzida - análise dimensional - no entanto, segundo Ferziger e Peric (2002) este processo é interessante apenas quando as dimensões do modelo são proporcionais às do protótipo, além de manter número de *Reynolds*, ou seja, levar em consideração os parâmetros massa específica, viscosidade, velocidade e a própria dimensão da peça analisada. Ainda assim continua um processo caro. Por isso, a solução é aliar a análise diferencial - segundo método - com a execução de protótipos.

A análise diferencial está diretamente relacionada à solução das equações que regem o escoamento de fluidos em sua forma diferencial. O comportamento dos

fluidos pode ser predito por meio das equações de momento de Cauchy associadas à uma relação constitutiva entre viscosidade e velocidade para expressar a tensão cisalhante. Considerando fluidos Newtonianos - para os quais a relação entre taxa de deformação e deslocamento é linear - a aplicação de tal relação constitutiva leva às equações de Navier-Stokes.

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais de segunda ordem não lineares e sua solução analítica só pode ser obtida em casos muito simples - onde grandes simplificações são feitas - ou em alguns escoamentos idealizados. A solução analítica de tais equações para problemas práticos de engenharia ainda é desconhecida. Desta forma, utiliza-se métodos numéricos para solução das mesmas, ou seja, a chamada Dinâmica dos Fluidos Computacional - DFC sobre a qual uma pequena discussão é apresentada no restante desse item.

3.1 O QUE É DFC?

É um mecanismo que resolve problemas de escoamento de forma numérica. DFC ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*), como é mais conhecida, é a técnica de substituição de derivadas parciais ou integrais nas equações de Navier-Stokes pela forma algébrica discretizada, que por sua vez são resolvidos para se obter resultados numéricos para os valores do campo de escoamento em pontos discretos no tempo e/ou espaço. Então é uma ferramenta que nos permite resolver problemas de escoamento que não tem solução analítica e não pode ser resolvida de outra forma

3.2 POR QUE UTILIZAR DFC?

A DFC pode ser utilizada sem a produção de protótipo, ou seja, em vários casos, por si só, ela possibilita entender o escoamento, sendo muito utilizada em novos projetos (onde o objeto/equipamento em questão ainda não existe) ou para testar possíveis soluções de problemas existentes em equipamentos/plantas

industriais. A mesma também pode ser utilizada em conjunto com experimentos, incrementando os resultados do mesmo que por algumas vezes é insuficiente para melhorar a percepção do escoamento.

As principais vantagens da DFC são: é relativamente rápido e barato, além disso o custo computacional diminui em função do tempo, tanto devido ao aumento do poder computacional quanto pela evolução dos métodos e algoritmos utilizados. Como dito anteriormente é possível a simulação um dado objeto/escoamento fornecendo dados importantes sem que o mesmo tenha que ser fisicamente construído. A DFC possibilita a obtenção de dados em todos os pontos da malha, ou seja, as informações referentes à velocidade, pressão e espécies (quando for o caso) estão disponíveis em todo o escoamento, algo impensável para a maior parte dos experimentos. Também existe a possibilidade de simular falhas, vazamentos, cuja experimentação seria muito cara.

Como desvantagens pode-se ressaltar: que a qualidade do modelo é relativa pois depende diretamente da qualidade da malha, embora os algoritmos para geração automática de malhas estejam sendo aprimorados cada vez mais, a qualidade final da malha ainda depende fortemente da habilidade do operador, dos métodos de discretização e, fortemente, do modelo de turbulência utilizado (no caso de escoamentos turbulentos). Isto pode prejudicar a precisão e a confiabilidade da simulação.

3.3 COMO É FEITA A SIMULAÇÃO

Há três passos para executar a DFC, são eles o pré-processamento, processamento e o pós processamento.

3.3.1 Pré-processamento

No pré-processamento é interessante analisar a geometria do sólido - quando aplicável - e se ter uma ideia sobre as linhas de fluxo, além do material a ser simulado, densidade e a vazão do fluido. Com estas informações defini-se o melhor

método de discretização a ser utilizado e a partir disso defini-se o domínio computacional a ser simulado.

Conhecendo as propriedades do fluido e o domínio computacional é verificada a estratégia para modelagem da turbulência (a imensa maioria dos escoamentos de interesse são turbulentos e a Simulação Numérica Direta, onde todas as escalas do escoamento são resolvidas, ainda é muito cara para ser executada em simulações de interesse prático). As principais metodologias para a modelagem da turbulência são a utilização de modelos RANS ou a SGE.

Além destes parâmetros outro fator importante é escolher as condições de contorno a serem utilizadas no domínio, como, por exemplo, a condição de não-deslizamento em paredes sólidas ou até mesmo se a simulação será executada em regime permanente ou transiente, entre outros. De posse de todas essas informações é construída a malha numérica. Essa etapa é extremamente importante e pode demorar tanto quanto, e em alguns casos até mais que, a própria etapa de processamento.

3.3.2 Processamento

Para iniciar o processamento primeiro carrega-se a malha numérica feita na etapa de pré-processamento e seleciona-se no software os parâmetros escolhidos previamente, ou seja, as aproximações numéricas e algoritmos de solução. Seleciona-se os critérios de convergência e divergência, como por exemplo, valor do resíduo obtido para determinada variável, assim como os parâmetros de controle da simulação, como número total de iterações, número de iterações por passo de tempo, número de passos de tempo, dentre outros. Após a entrada de todos os dados inicia-se o processamento, o qual pode levar de poucos minutos em um computador pessoal a vários dias em cluster de alta performance, dependendo da malha e dos parâmetros da simulação.

3.3.3 Pós-processamento

Para o pós-processamento é preciso perceber alguns fatores importantes para validar ou não os resultados obtidos, para entender se há sentido no resultado obtido ou se aqueles dados estão incorretos. Nesta fase os dados já estão disponíveis para a validação, então existem inúmeros parâmetros para serem escolhidos para uma comparação como velocidades, pressões, vorticidade, etc. para se chegar à algum resultado, já esperado ou não.

4 MÉTODOS NUMÉRICOS

Existem algumas escolhas a se fazer para a simulação, já que é impossível chegar a um método geral de solução para qualquer escoamento, ou seja, utilizar o mesmo método para um ciclone, para uma aeronave supersônica, ou para o escoamento em um meio poroso, então a abordagem deve ser diferente, e essas diferenças se resumem ao jeito que se soluciona as equações de Navier-Stokes, como o modelo matemático, o método numérico a ser utilizado, a discretização do método e a modelagem da turbulência.

4.1 DISCRETIZAÇÃO

O fato de discretizar um problema é diminuir a complexidade dele sem perder sua essência, é a simplificação do problema em algumas situações, como temporal e espacial, ou seja, a discretização nada mais é que dividir as equações de Navier-Stokes em pequenas partes, fazer algumas aproximações para então resolver essas aproximações.

4.1.1 Discretização espacial

Na discretização espacial, há a substituição do espaço que abrange o objeto estudado por um número finito células, este conjunto é chamado de malha, onde os valores numéricos das variáveis são determinados - basicamente, transforma-se um espaço contínuo em discreto.

Em termos de discretização espacial, é possível distinguir entre uma malha estruturada e não estruturada. A geração de uma malha com alta qualidade é muito demorada, mas é também muito importante. Como afirma Hirsch (2004):

A geração da malha e a qualidade dela são elementos essenciais de todo o processo de discretização. Não só é a geração da malha hoje um elemento crítico do custo de execução de simulações de CFD, mas o mais importante, a precisão dos resultados numéricos obtidos depende criticamente da qualidade da malha.

A precisão na verdade está relacionada não só com o tamanho da malha, mas também sob a forma da malha. E como o tamanho de cada elemento da malha tende a ser minúsculo, no limite de um número infinito de células da grade, o erro de discretização também tenderá a zero. E o ritmo dessa variação, a tendência em direção a zero é dada pela chamada ordem do discretização numérica.

4.1.2 Malha estruturada e não estruturada

A malha estruturada (Fig.7) tem como característica uma ligação regular que pode ser expressa como uma matriz de duas ou três dimensões. Então essas matrizes restringem a geometria da malha estruturada para quadriláteros, em duas dimensões, ou hexaedros em três dimensões. A quantidade de ligações da família de linhas paralelas com linhas concorrentes é apenas uma por família de linhas, por exemplo, numa intersecção entre malhas concorrentes há apenas um elemento em comum, já em malhas paralelas consecutivas todos os elementos se encostam mas nunca se cruzam.

Já as malhas não-estruturadas (Fig.8) são caracterizadas por ligações irregulares, o que dificulta o processamento no computador devido ao grande número de dimensões nas matrizes, mas em geral a malha não-estruturada é interessante pois ela permite a qualquer elemento que seja resolvido desta forma. Neste tipo de malha é possível aproximar essas malhas com uma forma mais precisas em relação

as geometrias mais complexas, pois neste caso as famílias de linhas podem se cruzar mais do que uma vez.

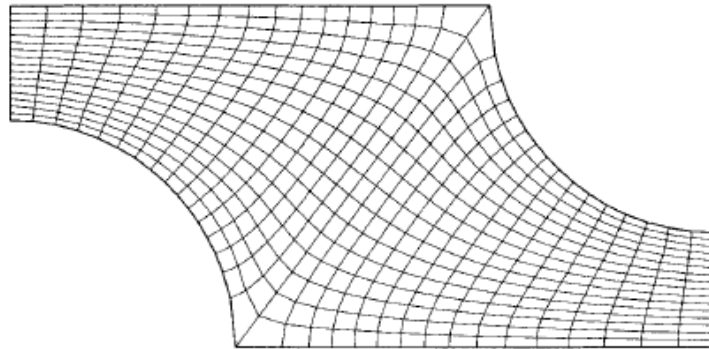


Figura 07 – Malha estruturada
Fonte: Ferziger et al (2002).

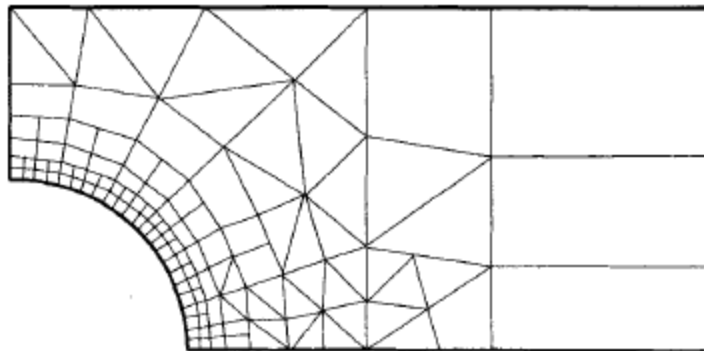


Figura 08 – Malha não estruturada
Fonte: Ferziger et al (2002).

4.2 MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO

Existem diferentes métodos de discretização, aqui serão abordados de forma resumida apenas os três mais utilizados: o método de diferenças finitas, o método dos volumes finitos, e o método dos elementos finitos. Esses métodos irão aproximar as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas para as variáveis. Essas formas de discretização sempre tendem para a mesma solução com o refinamento da malha, mas alguns métodos são mais indicados para determinados problemas do que outros.

4.2.1 Abordagens de discretização

4.2.1.1 Diferenças finitas

No método de diferenças finitas a discretização é baseada em pontos como mostrado na Fig. 09:

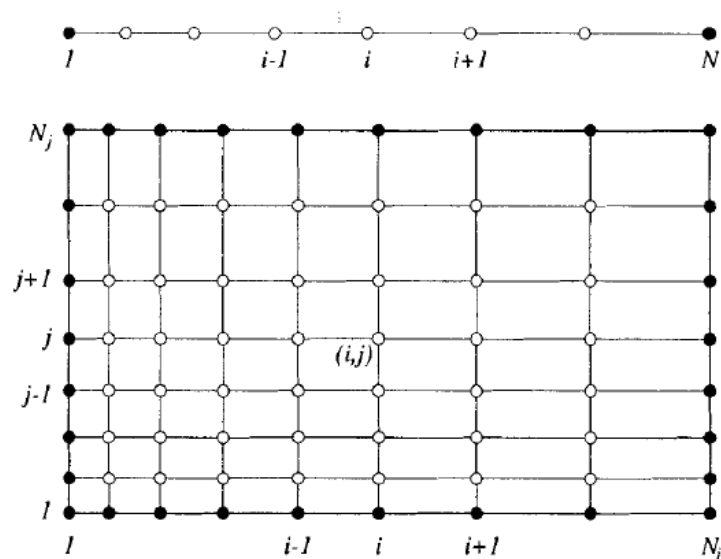


Figura 09 – Malha no método das diferenças finitas
Fonte: Ferziger et al (2002).

Este método provém da forma diferencial da equação da conservação, onde uma malha é gerada no domínio de solução, e em cada ponto dessa malha há uma equação diferencial aproximada. Nesta equação derivadas parciais são substituídas por aproximações em termos dos valores nodais das funções. Isso resulta em uma equação algébrica por nó na malha, onde o valor da variável nó e em um certo número de nós vizinhos aparecem como incógnitas. Os principais valores numéricos são de fato os valores locais nesses pontos da malha. De acordo com Ferziger e Peric (2002), o método de diferenças finitas é o mais tradicional, também o método mais antigo e, embora teoricamente possa ser aplicado a qualquer tipo de malha, na prática, é restrito às malhas estruturadas.

Em malhas estruturadas o método das diferenças finitas é muito simples e efetivo. No entanto, o mesmo fica restrito à aplicação em geometrias simples, uma vez que esse método não é conservativo por natureza. De tal forma que as equações

de diferenças finitas podem facilmente perder pelo menos uma ordem de precisão e, por vezes, até mesmo duas em malhas gerais não uniformes, então algumas orientações para uma malha não uniforme são muito importantes, como variar suavemente as malhas, com a mudança de tamanho entre células consecutivas que se encontra na segunda ordem do tamanho da grade. Evitar discontinuidades no tamanho da malha de células próximas e manter a suavidade da malha e densidade nas regiões onde existem grandes gradientes de fluxo.

4.2.1.2 Volumes finitos

O método de volumes finitos além de utilizar a forma integral das equações de conservação, também discretiza o espaço contínuo em volumes, ou seja, o domínio é subdividido em um número finito de volumes de controle. No centroide de cada volume, há um nó computacional no qual os valores das variáveis devem ser calculados. Como consequência obtém-se uma equação algébrica para cada volume de controle, na qual aparece uma série de valores nodais dos vizinhos do volume.

O método dos volumes finitos pode ser utilizado com qualquer tipo de malha, dessa forma esse método é adequado para a utilização em geometrias complexas. O método é conservativo por natureza, desde que as integrais de superfície (que representam os fluxos convectivos e difusivos) sejam as mesmas para os volumes de controle que dividem a fronteira (face). O mais interessante desta forma de discretização é que os termos que precisam ser aproximados tem algum significado físico, por isso é, provavelmente, o mais simples de entender e programar, porém, como desvantagem, é mais difícil de se desenvolver em programas de três dimensões pois requer três níveis de aproximação, que são, interpolação, integração e diferenciação.

4.2.1.3 ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos se origina a partir do trabalho sobre mecânica estrutural. Como o método de volumes finitos, também discretiza o espaço

em elementos contínuos. Mas aqui as principais variáveis numéricas são valores locais em pontos de malha, ao invés de nós, além de discretizar a forma integrante das equações, e é também um método muito adequado e flexível para trabalhar com uma malha aleatória.

Este modelo, que também se aplica a qualquer geometria, tem como característica a multiplicação de suas equações por uma função peso antes de serem integradas por todo o domínio. A solução é aproximada por uma função de forma linear dentro de cada elemento, garantindo assim a continuidade da solução nos limites do mesmo.

Dentre as vantagens do método dos elementos finitos estão a capacidade de lidar com geometrias arbitrárias, as malhas são facilmente refinadas, normalmente os elementos são simplesmente divididos. Sua principal desvantagem é comum a qualquer método que utilize uma malha não estruturada: as matrizes de equações lineares não são tão bem estruturadas como se fossem em malhas regulares o que dificulta um método mais eficiente de resolução.

4.3 ANÁLISE DE TURBULÊNCIA

As equações de Navier-Stokes são suficientes para tratar qualquer problema envolvendo o escoamento de fluidos Newtonianos, desde que o escoamento em questão possa ser tratado como contínuo. Ou seja, estas equações são aplicáveis tanto a escoamentos laminares quanto a escoamentos turbulentos, os quais são a grande maioria, tanto do ponto de vista de engenharia quanto aos encontrados na natureza.

De acordo com Ferziger e Peric (2002) Os escoamentos turbulentos são classificados por uma série de propriedades:

- Escoamentos turbulentos são altamente instáveis. Um gráfico da velocidade em função do tempo na maior parte das posições no escoamento iria parecer aleatório para um observador que não esteja familiarizado com este tipo de escoamento;

- São tridimensionais. A média temporal pode ser função de apenas duas coordenadas, mas o escoamento instantâneo varia rapidamente nas três dimensões;
- São ricos em vorticidade;
- Aumentam o efeito de mistura/difusão;
- São altamente dissipativos. A energia perdida é convertida, de forma irreversível, em energia interna do fluido;
- Escoamentos turbulentos contêm estruturas coerentes. Eventos repetíveis e essencialmente determinísticos que são responsáveis por grande parte do processo de mistura. No entanto, o componente aleatório dos escoamentos turbulentos faz com que esses eventos difiram uns dos outros em tamanho, força e intervalo de tempo entre ocorrências;
- Escoamentos turbulentos flutuam em uma grande gama de escalas de tempo e comprimento.

Bardina et al. (1980, apud Ferziger e Peric, 2002) afirmam existir seis categorias de métodos numéricos para estudar este tipo de escoamento, onde a maior parte das categorias pode ser subdividida em sub-categorias:

- A primeira envolve o uso de correlações como as que fornecem o fator de atrito em função do número de Reynolds. Este é um método útil mas limitado a escoamentos simples;
- O segundo utiliza equações integrais. O que normalmente reduz o problema a uma ou mais equações diferenciais ordinárias;
- O terceiro é baseado em equações médias do movimento sobre o tempo (para escoamentos em regime estatisticamente estabelecido). Esta aproximação conduz a um conjunto de equações diferenciais parciais denominado, equações médias de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations* - RANS);
- O quarto tipo de método é chamado de fechamento de dois pontos. Este método normalmente só é utilizado para turbulência homogênea;

- O quinto é a Simulação de Grandes Escalas (SGE) que resolve as grandes escalas do movimento, enquanto aproxima/modela apenas as menores escalas do movimento;
- Por último existe a Simulação Numérica Direta (SND) na qual as equações de Navier-Stokes são resolvidas para todos os movimentos em um escoamento turbulento.

A metodologia utilizada neste trabalho para a modelagem da turbulência é a apresentada no terceiro item. Ressalta-se que o presente trabalho não tem a pretensão de discutir de forma profunda métodos e modelos para a modelagem da turbulência.

4.3.1 MODELOS DE TURBULÊNCIA UTILIZADOS

Serão abordados nesse tópico apenas modelos utilizados no presente trabalho, sendo eles o modelo de duas equações Realizable $k-\epsilon$ e o modelo a sete equações RMS, ambos estão disponíveis no *software* STAR CCM+.

4.3.2 MODELO K-EPSILON

Neste modelo duas equações de transporte adicionais são resolvidas para a energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação, representadas por k e ϵ , respectivamente. Várias formas deste modelo foram desenvolvidas para o uso, em sua maioria, industrial. Só que alguns ramos do setor industrial tem que tomar cuidado ao usar este tipo de modelo pois há bastante imprecisão em escoamentos com desprendimento da camada limite, mudanças repentinas na taxa de cisalhamento médio, escoamentos de fluidos em rotação e escoamentos sobre superfícies curvadas.

Entre as variações deste modelo as três mais relevantes são: o $k-\epsilon$ *Standard*, $k-\epsilon$ *RNG* e o $k-\epsilon$ *Realizable*, as três formas são muito parecidas. Dentre pequenas diferenças entre elas estão o número de *Prandtl*, o método de calcular a

viscosidade turbulenta e os termos de geração e destruição da taxa de dissipação. Neste trabalho optou-se por testar a versão *Realizable*.

4.3.3 MODELO RSM (*REYNOLDS STRESS MODEL*)

Este é o modelo de turbulência mais complexo e completo disponível no STAR CCM+, nele são resolvidas equações de transporte adicionais para cada componente do tensor de Reynolds e para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta para simular a turbulência no escoamento. É ideal para movimento de fluido em que se tem anisotropia, forte movimento de vórtices, mudanças rápidas na taxa de deformação e fluxos secundários em dutos.

Algumas desvantagens também são evidentes neste modelo pois o mesmo possui um maior custo computacional necessitando de mais memória e tempo de processamento, a convergência da simulação também é mais difícil de ser obtida.

Entre suas versões no software utilizado para a simulação do ciclone estão os modos *Linear Pressure-Strain*, *Quadratic Pressure-Strain* e o *Linear Pressure-Strain Two Layer*. Dentre estes três o utilizado neste trabalho é o *Quadratic Pressure-Strain* porém é importante ressaltar suas características e diferenças. A opção *Linear Pressure-Strain* oferece uma abordagem para modelar o termo pressão-deformação em três formas, a lenta, a rápida e a parede onde os nós nesse modelo tem suas próprias características. Já a opção *Linear Pressure-Strain Two Layer* fornece elementos para resolver a subcamada viscosa do escoamento para número de Reynolds baixo. Nesta abordagem o cálculo é dividido em duas camadas. Na camada junto à parede, tanto a taxa de dissipação turbulenta quanto a viscosidade turbulenta são especificados como função de distância da parede e os valores da camada próxima a parede são diluídos aos poucos com os valores calculados a partir da resolução da equação de transporte, longe da parede. Enfim, como última abordagem, que será utilizada neste trabalho, o *Quadratic Pressure-Strain* que obtém uma boa performance em escoamentos com elementos cisalhantes, principalmente em fluidos com alguma curva, pois esta aproximação é bem precisa, comparado aos outros.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

A principal referencia utilizada para realização desse trabalho é o artigo desenvolvido por Slack et al. (2000), dessa forma, esse tópico traz informações importantes abordadas no artigo.

5.1 SLACK ET AL., 2000

O ciclone simulado por Slack et al., 2000 é apresentado na Fig. 10:

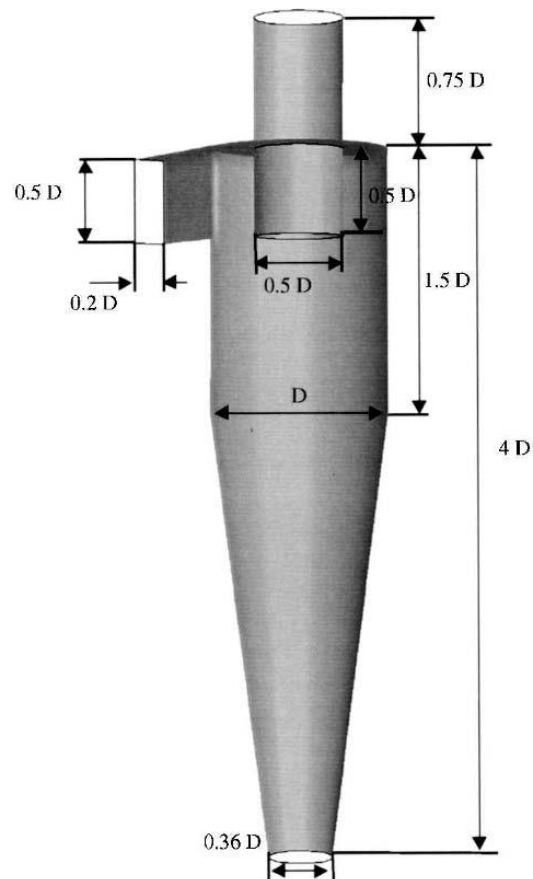


Figura 10 – Dimensões do Ciclone simulado
Fonte: Adaptado de Slack et al (2000).

Os principais parâmetros utilizados nas simulações estão dispostos na Tabela 1. Ressalta-se que estes parâmetros também foram utilizados no presente trabalho.

Tabela 1 – Principais parâmetros utilizados na simulação de Slack et al – 2000

Variável	Valor	Unidade
Comprimento “D”	0.205	<i>m</i>
Densidade	1.225	<i>kg.m⁻³</i>
Vazão	0.08	<i>m³.s⁻¹</i>
Viscosidade	0.000017894	<i>kg.m⁻¹.s⁻¹</i>
Volume	0.0203	<i>m³</i>
Velocidade de entrada	19.04	<i>m.s⁻¹</i>

Fonte: Autoria própria.

Slack e coautores realizaram duas simulações, ambas baseadas no método dos volumes finitos aplicado à malhas não estruturadas. Nestas simulações os autores optaram por testar duas metodologias para a modelagem da turbulência: a Simulação de Grandes Escalas (SGE) com o modelo de turbulência proposto por Yakhot et al., 1982 e as equações médias de Reynolds - RANS - com o modelo das tensões de Reynolds (RSM). Para a simulação de grandes escalas os autores utilizaram uma malha contendo cerca de 640.000 volumes enquanto que para a simulação RANS optaram por uma malha com aproximadamente 40.000 volumes.

O comportamento obtido nas simulações para as componentes tangencial e axial da velocidade pode ser visualizado na Fig. 11

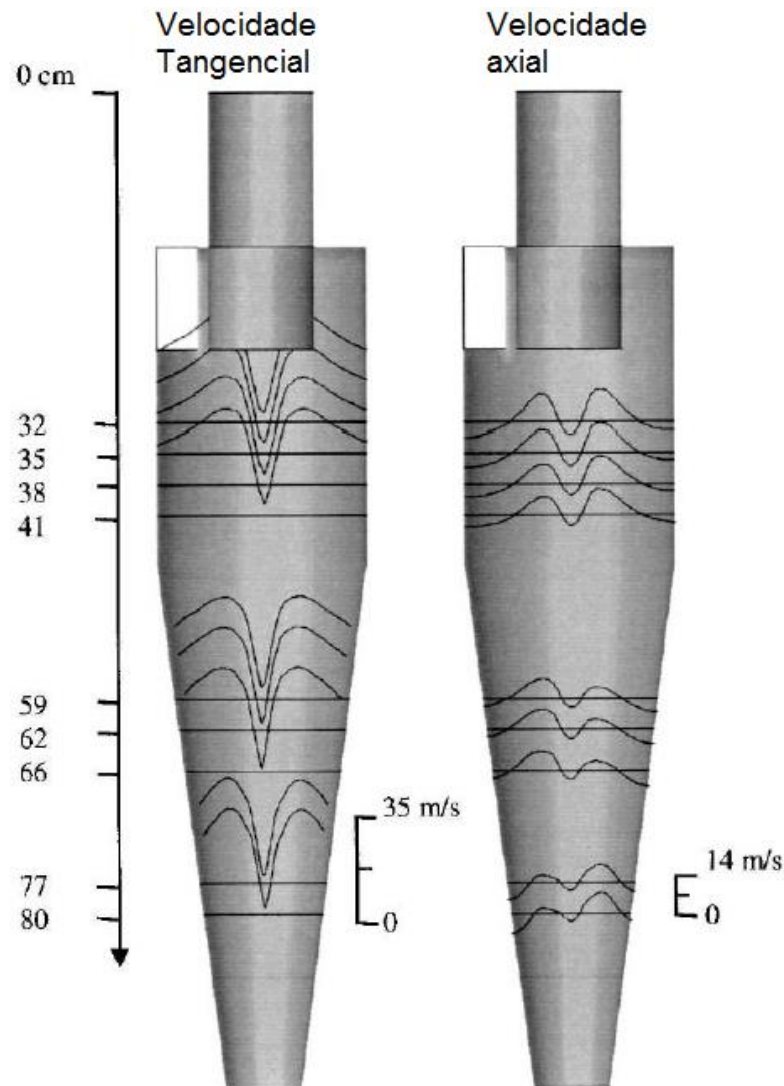


Figura 11 – Posição de estudo
Fonte: Adaptado de Slack et al (2000).

Como pode ser visto na Fig. 11 os autores optaram por posicionar o centro do eixo de coordenadas, eixo posicionado à esquerda e orientado para baixo, no plano de saída do duto de *overflow*. Assim, os perfis de velocidade mostrados acima foram retirados no plano central do ciclone e nas posições axiais correspondentes às mostradas no eixo coordenado (valores em centímetros). A escala utilizada para a velocidade, em m/s, é mostrada a direita da representação do ciclone. Note que, na forma como os autores posicionam o eixo coordenado, as posições utilizadas para retirada dos perfis de velocidade 0.32, 0.35, 0.38, 0.41, 0.59, 0.62, 0.66, 0.77, 0.8 (em metros) são dependentes do comprimento do duto de *overflow* simulado.

Considerando os resultados obtidos, os autores afirmam que os perfis de velocidade encontrados na simulação com o modelo RSM, se aproximaram mais dos

dados experimentais na posição 0,32 m - logo abaixo do *vortex finder* - em relação aos perfis obtidos com a metodologia SGE, como pode ser visto nos gráficos 1 e 2 principalmente para o perfil de velocidade axial.

Considerando outras posições axiais, os resultados obtidos com a metodologia SGE se aproximam mais dos resultados experimentais. Fato esperado, uma vez que a Simulação de Grandes Escalas fornece detalhes que a metodologia RANS/URANS não é capaz de fornecer, como os vórtices menores, e estes podem afetar a dinâmica do escoamento no interior do ciclone.

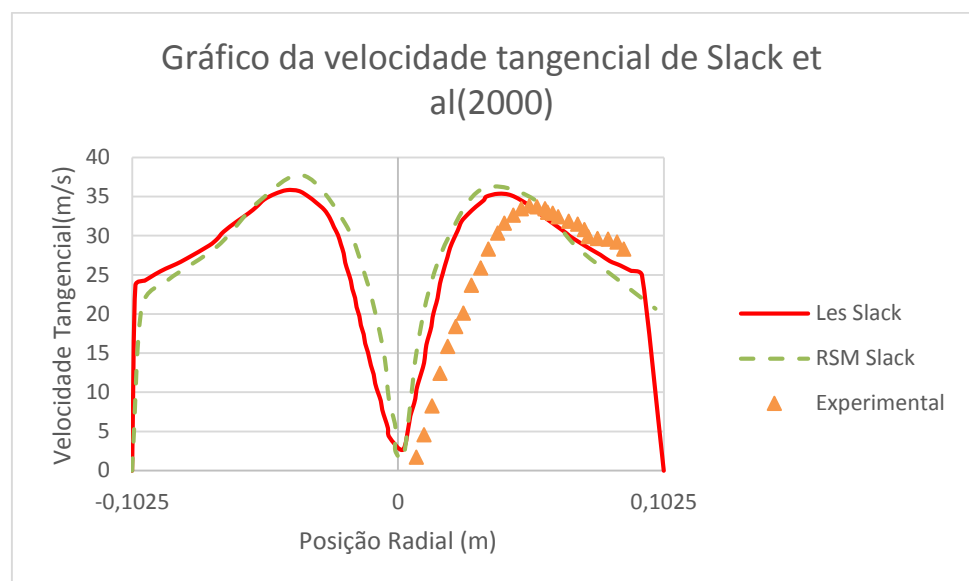


Gráfico 1 – Comparação dos perfis de velocidade média: Tangencial na posição 0,32 m
Fonte: Adaptado de Slack et al (2000).

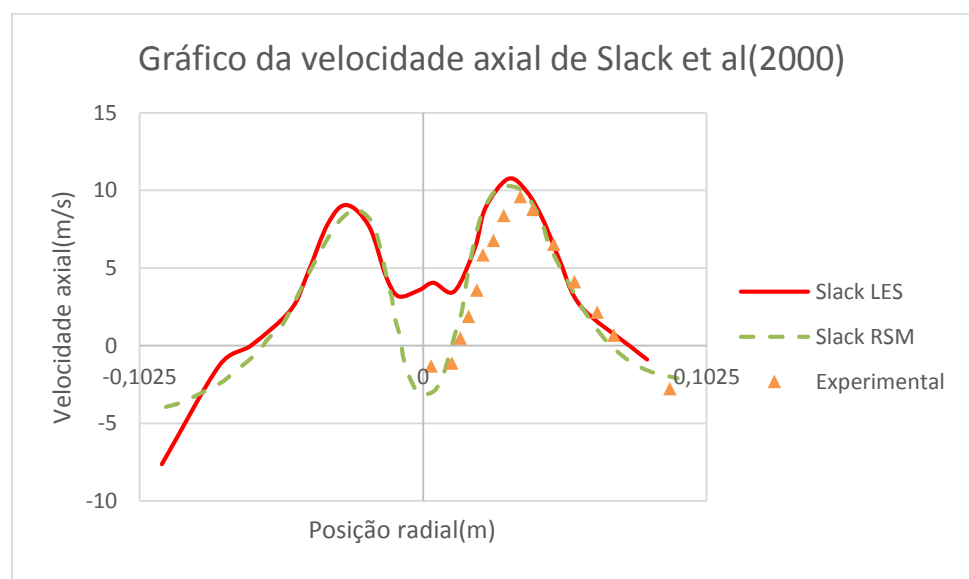


Gráfico 2 – Comparação dos perfis de velocidade média: Axial na posição 0,32 m
Fonte: Adaptado de Slack et al (2000).

Slack et al., 2000 concluem que o modelo RSM é capaz de fornecer bons resultados na simulação do escoamento no interior de ciclones a um custo relativamente baixo, sendo assim uma alternativa viável para simulação de tal equipamento. Também expõem que a metodologia SGE produz um resultado interessante mais próximo à parede do ciclone, enquanto no centro do separador o resultado obtido se afastou mais dos dados experimentais.

Para finalizar o artigo os autores exaltam os resultados obtidos e afirmam que utilizando o modelo RSM obtiveram uma boa relação custo-benefício, pois é uma análise mais grosseira porém barata. Já o modelo LES revelou muita dependência das oscilações dos vórtices o que certamente impactaria na eficiência da separação no ciclone.

5.2 ANÁLISE DO ARTIGO

Os autores não apresentaram um teste de independência de malha para nenhum dos casos, no entanto, considerando o número de Reynolds do escoamento em questão, as malhas utilizadas tanto na simulação com modelo RSM quanto na simulação com o modelo de Yakhot et al., 1982 provavelmente podem ser consideradas grosseiras. Provavelmente porque para uma análise, mesmo que preliminar, seria necessário conhecer o volume das menores células utilizadas na malha. Deve se ter em mente que o estudo foi realizado no ano 2000, assim o poder computacional disponível na época também era consideravelmente menor, o que por si só é uma forte justificativa para uso de tais malhas.

A despeito da malha utilizada, os resultados numéricos apresentados pelos autores se aproximam muito dos dados experimentais. A principal diferença está no perfil de velocidade axial na posição 0,32 m que será o ponto de estudo deste trabalho. Essa diferença talvez possa ser explicada pela intensidade do movimento de *swirl* no plano de saída do duto de *overflow*. Infelizmente os autores não apresentam nenhuma informação sobre o escoamento no duto de saída impossibilitando uma análise mais precisa.

6 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

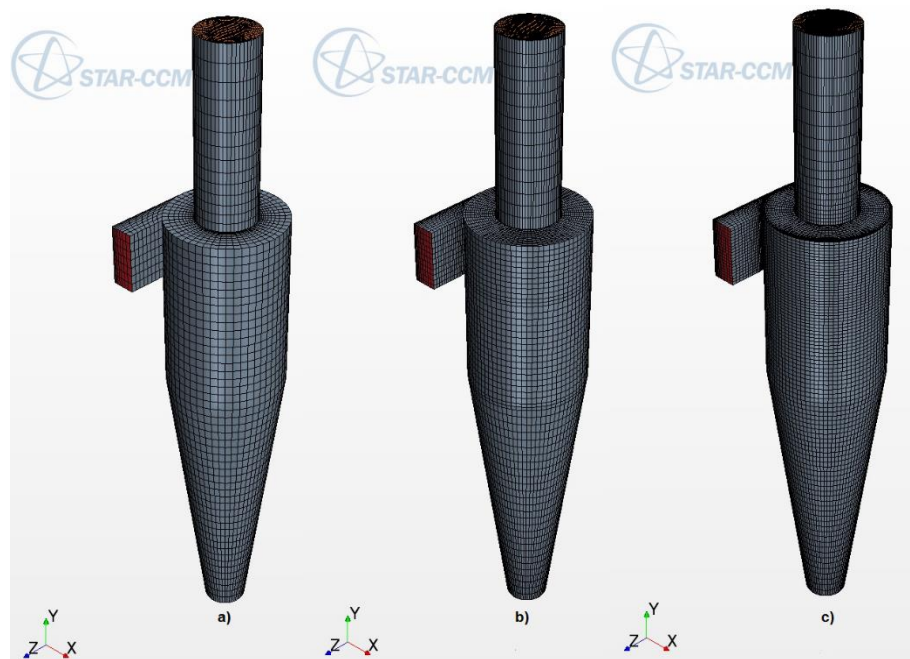
Este tópico tem o intuito de explicar como foi realizada a configuração dos programas utilizados no trabalho. À princípio foi gerada uma geometria e a respectiva malha na qual as variáveis dependentes foram discretizadas no software comercial STAR CCM+.

6.1 GERAÇÃO DA GEOMETRIA

Para se gerar a geometria foi utilizado um *software* CAD, tomando como base a geometria de Slack et al (2000), com o aumento do tamanho do *vortex finder*, que facilita a convergência da simulação e não tem influência nos resultados obtidos. A geometria corresponde à Fig.11.

6.2 GERAÇÃO DA MALHA

Para geração da malha optou-se por utilizar outro software para a melhor aproximação do ciclone. Todas as malhas utilizadas são compostas exclusivamente por elementos hexaédricos. Após a geração das malhas as mesmas foram exportadas para o processamento no STAR CCM+. Ao todos foram utilizadas três malhas diferentes, com número total de elementos variando de aproximadamente 70.000 à aproximadamente 300.000. As malhas geradas podem ser vistas na Fig. ??



**Figura 12 – Comparação das malhas:
a)70.000; b) 150.000; c)300.000 elementos
Fonte: Autoria própria**

6.3 SETUP DO PROGRAMA

O último *software* utilizado na simulação para a simulação do escoamento é o STAR-CCM+ no qual, como último passo para o pré-processamento, foi preciso entrar com as informações físicas, tipos de resolução para as equações e modos de discretização delas, assim como escoamento permanente ou transiente, condições de contorno e condições iniciais da simulação. Neste *software* há ainda a possibilidade de escolher os tipos de escoamento conforme a sua necessidade, que são separados em três itens: geometria, tempo e movimento. Este último é importante para simulações da interação fluido estrutura, onde a re-malhagem se faz necessária, logo não será abordado aqui.

6.3.1 Forma geométrica

Neste caso há a possibilidade de escolher entre escoamentos em duas ou três dimensões, além de um modelo 2D idealizado, que é o axissimétrico e seu funcionamento corresponde a um escoamento, no qual todas as suas posições em relação a um mesmo ponto no raio, possui a mesma característica física. Há mais um caso, além dos três primeiros chamado *Shell Three-Dimensional* que é um modelo que representa uma superfície no espaço em que sua estrutura é muito pequena para ser considerada um volume. Esta escolha deve ser selecionada como uma região de isolamento para as demais.

6.3.2 Forma temporal

A forma temporal consiste na escolha entre três possibilidades: regime permanente, transiente implícito e transiente explícito, teoricamente tanto a utilização da metodologia implícita quanto explícita devem gerar os mesmos resultados, no entanto, do ponto de vista numérico a metodologia explícita exige um passo de tempo menor enquanto que a metodologia implícita consome mais memória. Nesse trabalho optou-se por utilizar a metodologia implícita para os escoamentos em regime transiente.

6.3.3 Condições de contorno

Existem muitas possibilidades para a imposição das condições de contorno no *software* utilizado. Para a simulação do ciclone foram utilizados a condição de não deslizamento, velocidade constante na entrada e saída à pressão constante (na direção do escoamento). Em todas as simulações foram mantidas sempre as mesmas condições de contorno.

A condição de não deslizamento é aplicada quando não há escorregamento de fluido quando o mesmo se encontra em contato com o sólido. Isto ocorre por não existir diferença de velocidade entre eles, ou seja, a velocidade da parede é a mesma

que a velocidade do fluido. Já a velocidade de entrada é definida pela velocidade normal em relação ao plano de entrada do escoamento. Optou-se por não utilizar um perfil desenvolvido de velocidade por saber a priori que a utilização de tal perfil não traz benefícios na simulação do escoamento no interior de ciclones. Por último, esta a condição saída à pressão constante, nessa condição de contorno iguala-se gradativamente a pressão interna próxima a superfície de saída a uma pressão externa pré-definida.

6.3.4 Acoplamento entre as variáveis

Para o escoamento há duas opções importantes de seleção que geralmente não estão presentes em outros *softwares* que são os modelos *coupled* e o *segregated*. No primeiro as equações de conservação (incluindo conservação da energia - quando necessário) são resolvidas de forma simultânea utilizando uma aproximação falsa de tempo. Este modelo é mais indicado para a solução de escoamento compressíveis, sobre tudo na presença de ondas de choque. No entanto, o mesmo também pode ser utilizado em escoamentos compressíveis a baixo Mach e até mesmo incompressíveis. Por isso parte das simulações realizadas neste trabalho tiveram este modelo como base. Suas principais desvantagens são dificuldade para convergência em escoamentos incompressíveis e maior requisito de memória.

Já o segundo modelo resolve as equações de fluxo de uma forma separada (marchante) em que quando é identificado algum erro no escoamento, já há uma correção imediata na solução. Este modelo é mais indicado para escoamentos incompressíveis e compressíveis a baixo Mach. Embora possua uma menor necessidade de memória, o custo computacional tem uma maior dependência em relação ao número de elementos utilizados na malha. Por isso optou-se por utilizar este modelo somente nas malhas mais grosseiras (aproximadamente 70.000 elementos).

6.4 PÓS-PROCESSAMENTO

Para finalizar, foram exportados pontos de médias de velocidades para a plotagem dos gráficos e comparação com os valores obtidos por Slack et al. (2000). O *software* livre *Engauge* foi utilizado para a seleção e retirada dos pontos dos gráficos do artigo possibilitando assim que os mesmos sejam plotados junto aos resultados obtidos nesse trabalho.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O intuito do trabalho é o de simular o escoamento em um ciclone, comparar as velocidades axial e tangencial entre as simulações feitas, entender e discutir os resultados comparando os mesmos aos apresentados no trabalho de Slack et al (2000) , verificando também a capacidade de predição do modelo κ - ϵ *Realizable*. Ao todo foram utilizadas três malhas diferentes, contendo aproximadamente 70.000, 150.000 e 300.000 elementos. Como o escoamento no interior de separadores ciclônicos é inerentemente instável, foi necessário a simulação do escoamento em regime transiente. Para isto, partiu-se da simulação em regime permanente - procedimento que gera grande economia no tempo computacional total da simulação. Buscando uma melhor análise dos resultados, o teste de independência de malha foi realizado tanto nas simulações em regime permanente quanto em regime transiente. Isto gerou um total de 10 simulações, sendo que os principais parâmetros numéricos utilizados em cada uma está disposto de forma resumida na Tabela 02 - ressalta-se aqui, que devido ao custo computacional de cada simulação, a malha de 150.000 elementos não foi utilizada em conjunto com o modelo *RSM*.

Tabela 2 – Parâmetros das simulações – 2015

Ciclone	Número de elementos	Situação temporal	Modelo de turbulência	Passo de tempo (s)	Discretização espacial/temporal
1	68 614	Permanente	K-Epsilon	-	1/-
2	68 614	Transiente	K-Epsilon	$1.0E - 4$	1/2
3	68 614	Permanente	RSM	-	1/-
4	68 614	Transiente	RSM	$1.0E - 4$	1/2
5	154 303	Permanente	K-Epsilon	-	2/-
6	154 303	Transiente	K-Epsilon	$1.0E - 3$	2/1
7	311 775	Permanente	K-Epsilon	-	2/-
8	311 775	Transiente	K-Epsilon	$1.0E - 3$	2/1
9	311 775	Permanente	RSM	-	2/-
10	311 775	Transiente	RSM	$1.0E - 3$	2/1

Fonte: Autoria própria.

Para análise e comparação dos resultados os perfis de velocidade média axial e tangencial foram retirados no plano central do ciclone e na posição axial 0,32m (conforme sistema de coordenadas apresentado na Fig. 11). Optou-se por esta posição axial por ter sido a posição onde Slack et al., (2000) encontraram as maiores diferenças entre os resultados de suas simulações e os dados experimentais, caracterizando assim um maior desafio (este fato é esperado uma vez que se trata de uma posição próxima à entrada do ciclone e logo abaixo do *vortex finder*). Nos subitens abaixo serão apresentados, respectivamente, os testes de independência de malha e a validação dos resultados.

7.1 INDEPENDÊNCIA DE MALHA

Os gráficos plotados para a apresentação de resultados foram feitos a partir de pontos de velocidades médias, calculados automaticamente pelo programa STAR CCM+, e estão separados pelo tipo de velocidade, modelo de turbulência e modo temporal.

7.1.1 escoamento K-Epsilon permanente

Neste tipo de escoamento é esperado que o resultado da simulação esteja muito aquém do experimental pois há muitas simplificações, tanto o modo de turbulência escolhido quanto a simplificação temporal do escoamento. Além disso a quantidade de elementos das malhas deve influenciar diretamente na precisão do resultado. Outro fator importante é que o modo de discretização escolhido nas malhas de 150.000 e 300.000 elementos foi de primeira ordem, o que influencia muito no resultado obtido, gerando ainda mais simplificações e erros. A velocidade axial obtida nas três malhas pode ser vista no gráfico 3:

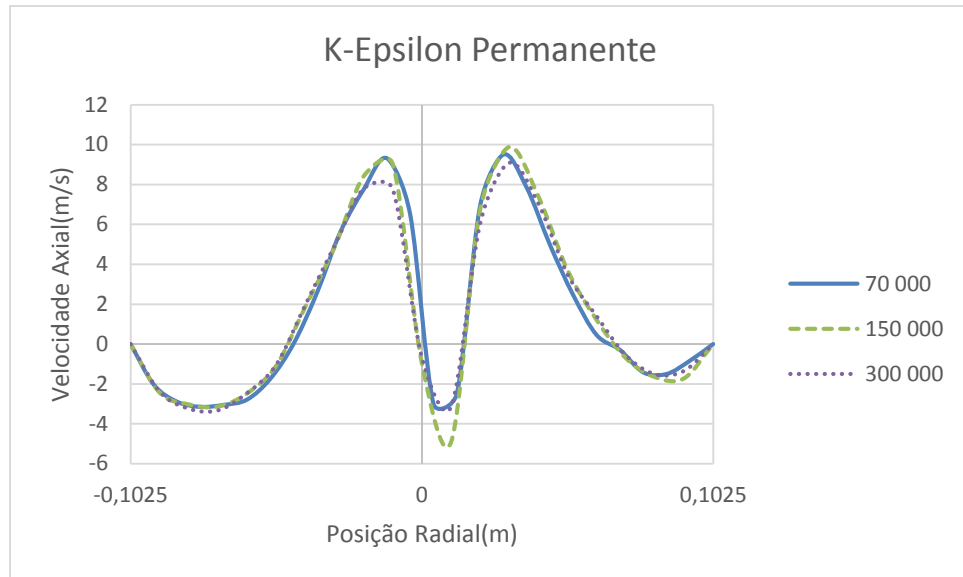


Gráfico 03 – Velocidade axial na simulação K-Epsilon Permanente
Fonte: Autoria Própria

Neste gráfico fica evidente que os resultados se aproximam muito. A simulação da velocidade tangencial é representada pelo gráfico 4:

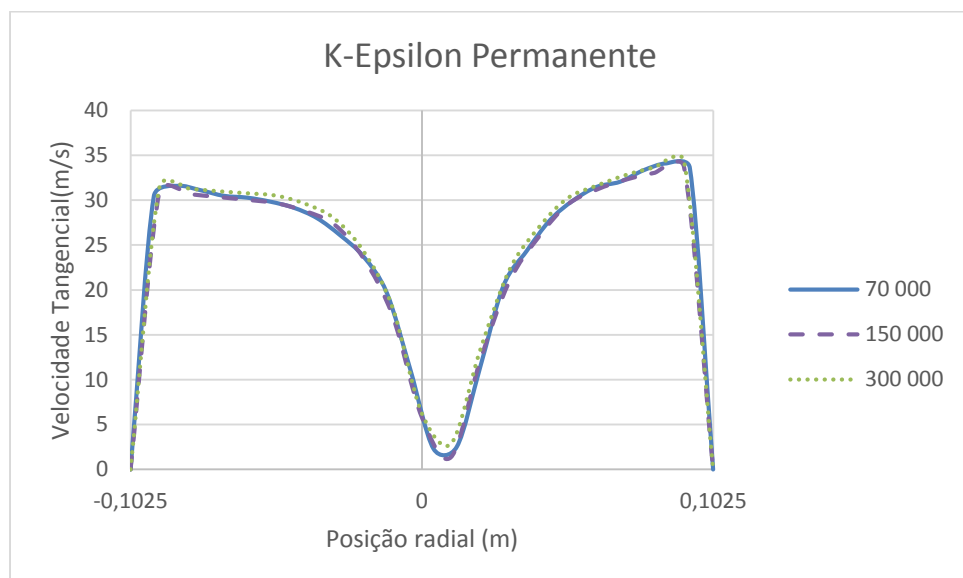


Gráfico 04 – Velocidade tangencial na simulação K-Epsilon Permanente
Fonte: Autoria Própria

Neste gráfico nota-se que, assim como a velocidade axial, existem poucas diferenças no escoamento. Dessa forma, considerando a simulação em regime permanente, independentemente da escolha da malha, a precisão dos resultados será

bem semelhante entre eles. A ressalva é em relação ao vórtice de Rankine que não está visível neste gráfico, o que significa que a eficiência deste método não é o suficiente próximo às extremidades.

7.1.2 Escoamento RSM permanente

Comparado ao escoamento anterior (K-Epsilon), se espera um desempenho mais preciso na simulação com discrepância de velocidades entre os dois métodos simulados. A malha de 150.000 elementos não foi simulada com o modelo RSM devido ao alto custo computacional. Então, foi preferível escolher as outras malhas para a simulação ao invés desta. A simulação do modelo RSM permanente é representada pelo Gráfico 5:

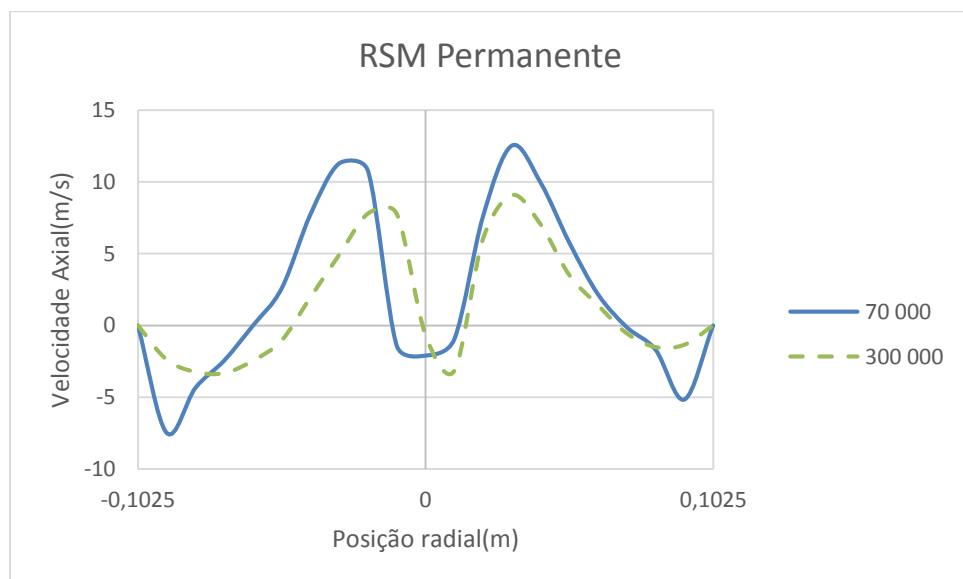


Gráfico 05 – Velocidade axial na simulação RSM Permanente
Fonte: Autoria Própria

Este gráfico apresenta algumas peculiaridades do ciclone como as posições onde há maior movimento rotativo no ciclone, nos picos e vales do ciclone, e a forma da letra “W” invertida na velocidade axial, e também as mudanças de sentido do escoamento na posição indicada. Já os resultados estão bem distantes em termos da velocidade, o que pode ter duas causas principais: o modo de discretização de

segunda ordem no ciclone, ou a pequena quantidade de elementos na malha. Já a simulação da velocidade tangencial é representada pelo gráfico 6:

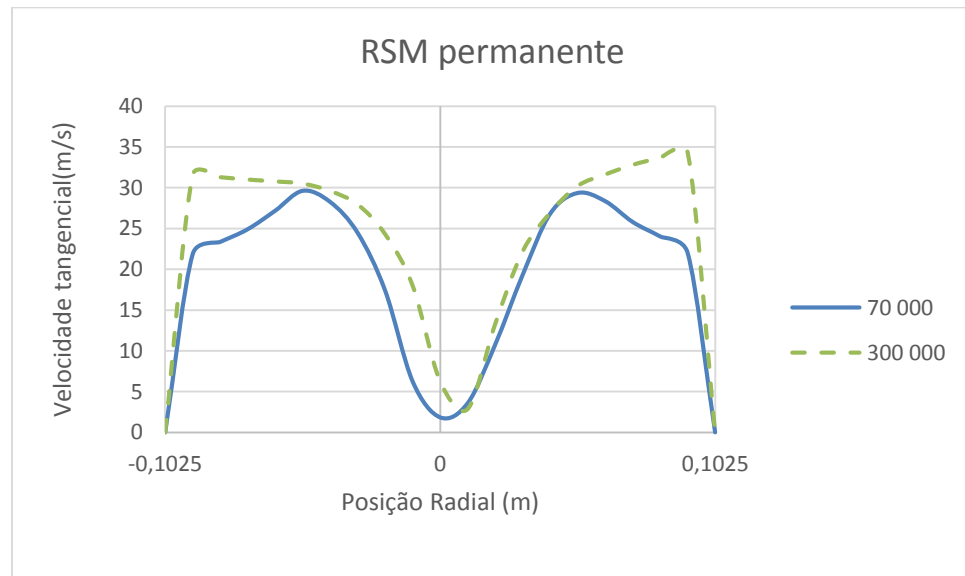


Gráfico 06 – Velocidade tangencial na simulação RSM Permanente
Fonte: Autoria Própria

Na velocidade tangencial representada acima é possível identificar grande diferença entre as simulações, principalmente mais próximo à parede do ciclone, onde, na malha de 70 000 elementos, há a identificação do vórtice de *Rankine*, não identificado na malha de 300.000 elementos. Ou seja, a simulação, neste caso está comprometida e isto certamente ocorreu devido ao modo de discretização utilizado na simulação, que faz algumas simplificações que, por sua vez, prejudicam a qualidade final dos resultados.

7.1.3 escoamento K-Epsilon transiente

Neste tipo de simulação espera-se que a precisão, relacionado ao mesmo modelo, porém, transiente, aumente, mesmo tendo a possibilidade do escoamento carregar erros do início do escoamento até o final. As velocidades devem ser maiores que aquelas do escoamento transiente e espera-se que na velocidade tangencial se identifique o vórtice de *Rankine*. A seguir é apresentado o gráfico 7:

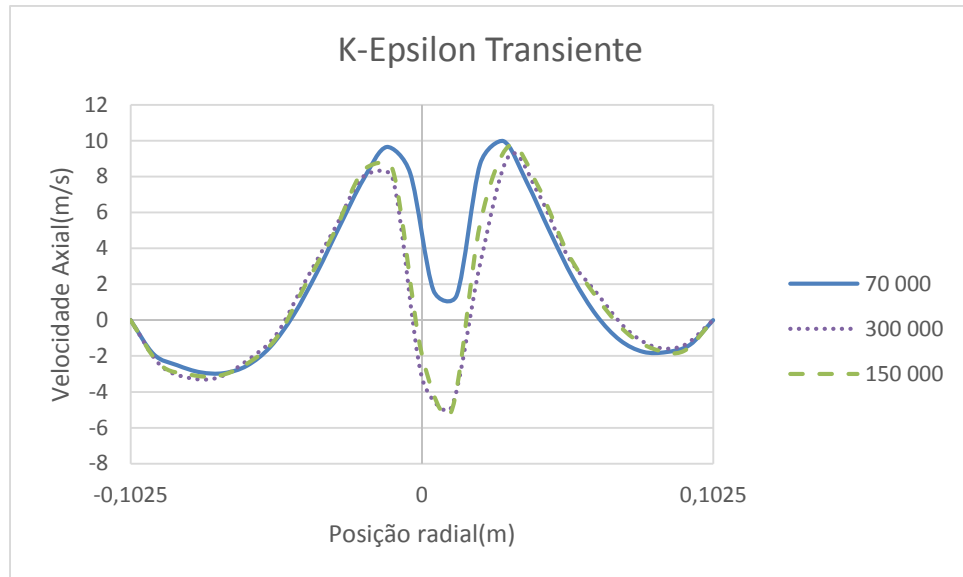


Gráfico 07 – Velocidade axial na simulação K-Epsilon Transiente
Fonte: Autoria Própria

É possível identificar que a malha de 70.000 elementos ficou aquém das outras, na região central do ciclone. Esta diferença pode ter ocorrido devido a diferença do número de elementos na malha ou pela escolha no tipo de escoamento para a malha com um número menor de elementos: *segregated flow*. O gráfico 8 se refere à velocidade tangencial para este modelo de turbulência:

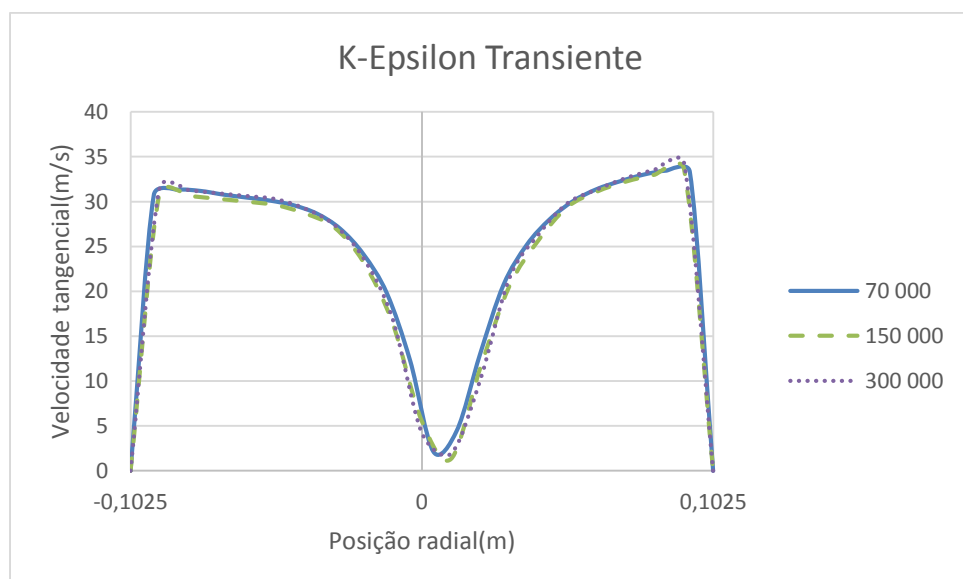


Gráfico 08 – Velocidade tangencial na simulação K-Epsilon Transiente
Fonte: Autoria Própria

Observa-se, neste caso, que as velocidades encontradas para a velocidade tangencial são muito próximas, porém, o vórtice do *Rankine* não foi identificado neste modelo.

7.1.4 Escoamento RSM transiente

Para estas simulações espera-se que os resultados se aproximem mais do escoamento real no interior de um separador ciclônico. Assim é possível analisar o gráfico 9:

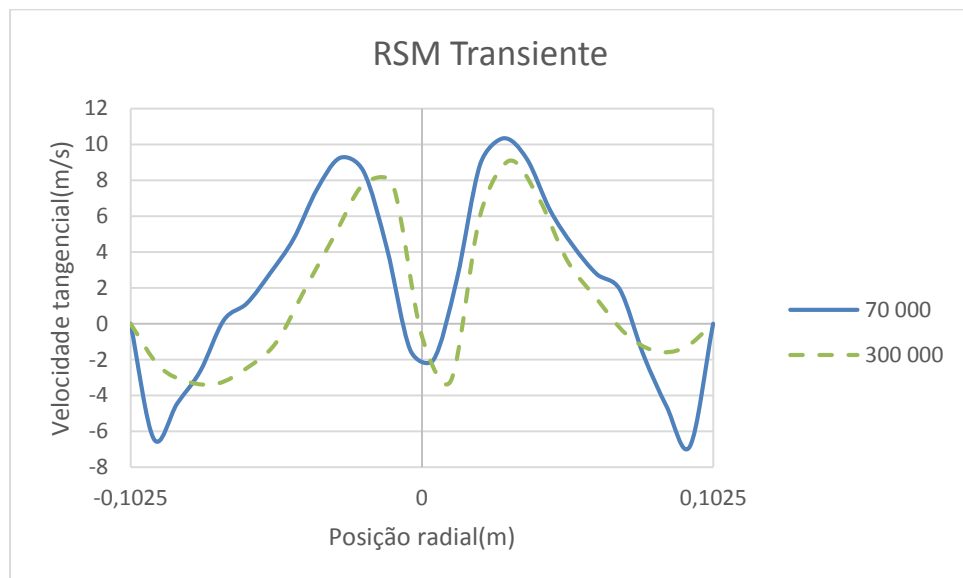


Gráfico 09 – Velocidade axial na simulação RSM Transiente
Fonte: Autoria Própria

Neste caso é possível observar os perfis em forma da letra “W” invertida. Este perfil é o mais interessante de estudar, pois assim é possível distinguir os grandes vórtices no escoamento, que equivalem às posições de vales e picos no gráfico.

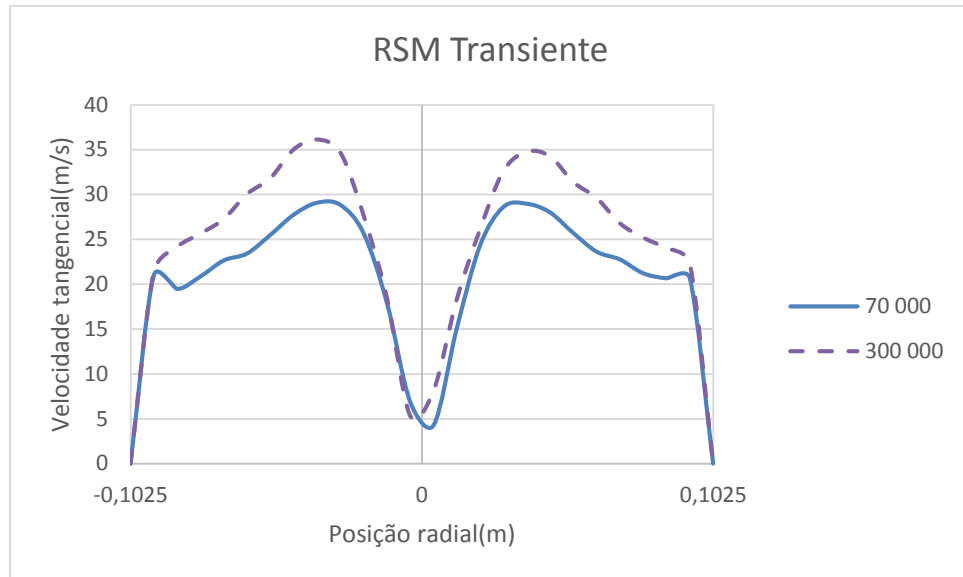


Gráfico 10 – Velocidade tangencial na simulação RSM Transiente
Fonte: Autoria Própria

Neste caso é possível ver que a velocidade da malha de 70.000 elementos está bem abaixo da velocidade da malha de 300.000, ou seja, próximo ao centro há um resultado até semelhante, mas nos outros pontos do ciclone há uma discrepância interessante de se observar.

7.2 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Na validação dos resultados são apresentados gráficos da velocidade axial e tangencial que comparam os resultados determinados no trabalho com os obtidos no artigo base. Neste tópico serão feitas duas análises: a primeira com os resultados obtidos no trabalho do artigo de Slack et al. (2000) e o experimental; na segunda serão expostos somente os resultados deste trabalho, juntamente com a coleta experimental. Como os resultados obtidos pela malha de 300.000 elementos mostraram a melhor eficiência, serão aqueles utilizados na validação

7.2.1 Validação da malha de 300 000 elementos

7.2.1.1 Validação da velocidade axial

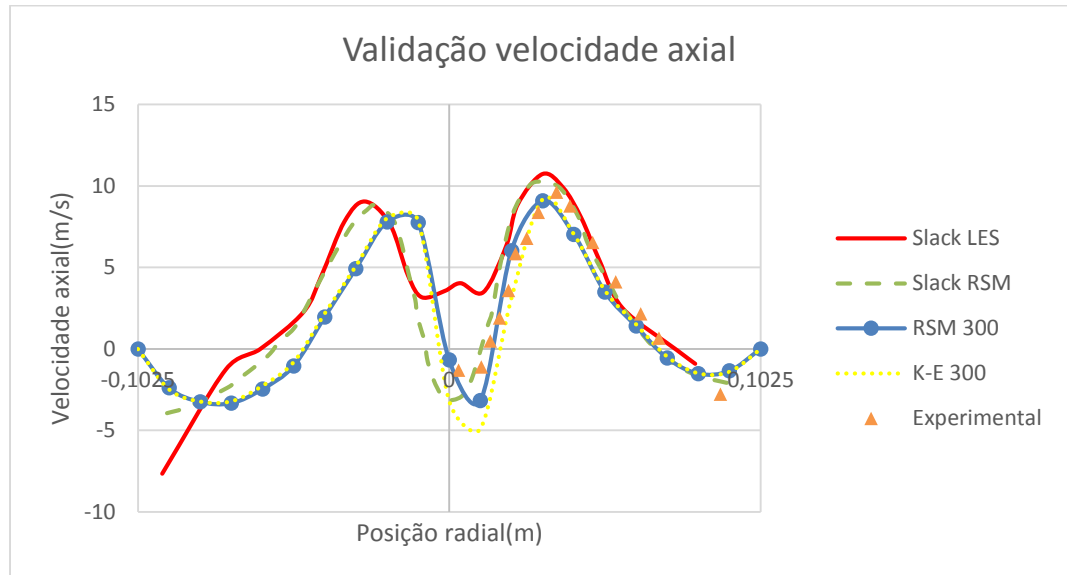


Gráfico 11 – Validação dos resultados – Velocidade Axial
Fonte: Autoria Própria

Podemos ver neste gráfico que os resultados no centro do ciclone ficaram um pouco distantes do experimental, mas não tão ruins quanto ao modelo SGE de Slack. Enquanto isto, nesta área, o resultado RSM de Slack é muito interessante. Com o aumento da posição radial há uma aproximação considerável dos escoamento simulado com a malha de 300.000 elementos do resultado experimental, em que o RSM e o K-Epsilon chegam bem próximos ao experimento. Porém, mais próximo da parede externa do separador, é visível uma discrepância de valores o que ocorre devido à precisão do modelo de turbulência.

7.2.1.2 Validação da velocidade tangencial

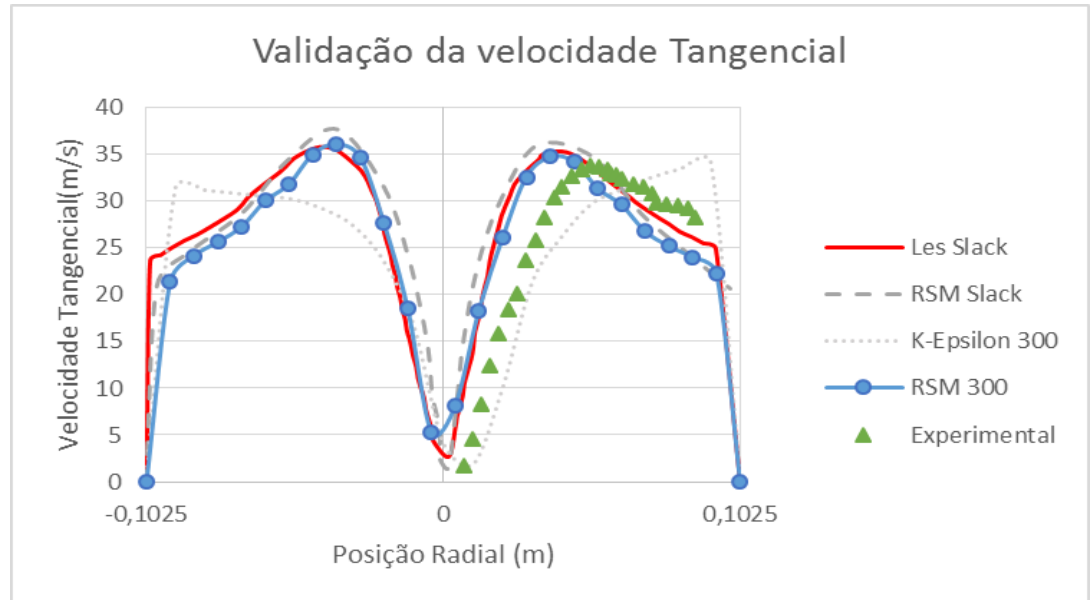


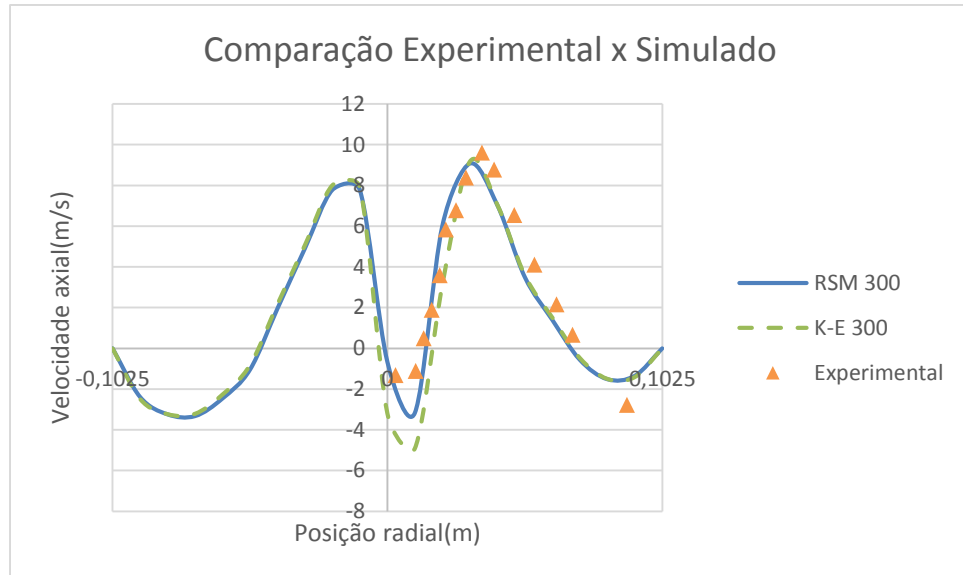
Gráfico 12 – Validação dos resultados – Velocidade Tangencial
Fonte: Autoria Própria

Neste caso é possível observar que o resultado do modelo K-Epsilon na malha de 300.000 elementos está totalmente fora do padrão de velocidade tangencial de um ciclone, já que próximo à parede externa não é captado o vórtice de *Rankine*. Nota-se também que as outras simulações ficaram, durante toda a simulação, com valores próximos entre eles, porém um pouco distantes do resultado experimental.

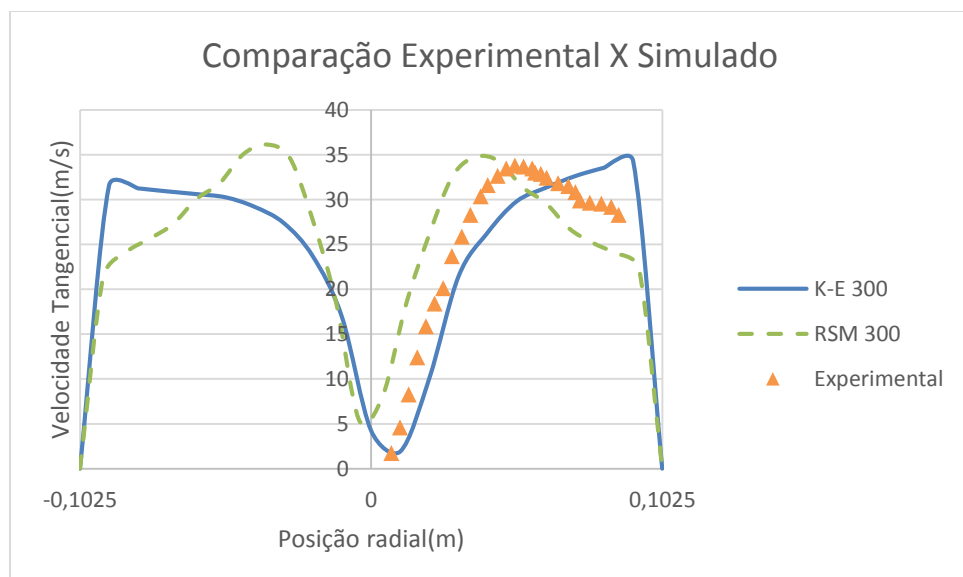
7.2.2 Comparação com o experimental

Neste tópico só haverá a apresentação dos gráficos expostos anteriormente de uma forma mais leve, ou seja, sem as simulações de Slack, por isso não haverá comentários sobre os gráficos

7.2.2.1 Velocidade axial



7.2.2.2 Velocidade tangencial



7.3 CAMPOS DE VELOCIDADE

Para entendermos mais um pouco sobre o fenômeno das velocidade no ciclone foram retirados do software comercial STAR CCM+ o perfis de velocidade tangencial e axial de todos os ciclones simulados. Esta conferência visual é interessante, pois poderia existir algum erro com os gráficos e estas figuras são a prova real (qualitativamente), de que os valores dos gráficos estão corretos. A apresentação será sobre a velocidade axial, para escoamentos permanente e transiente, e depois, velocidade tangencial, também para os dois modos de tempo.

7.3.1 Velocidade Axial

Para o campo de velocidade axial, tanto para escoamento permanente como escoamento transiente, as figuras 13 e 14 as representam:

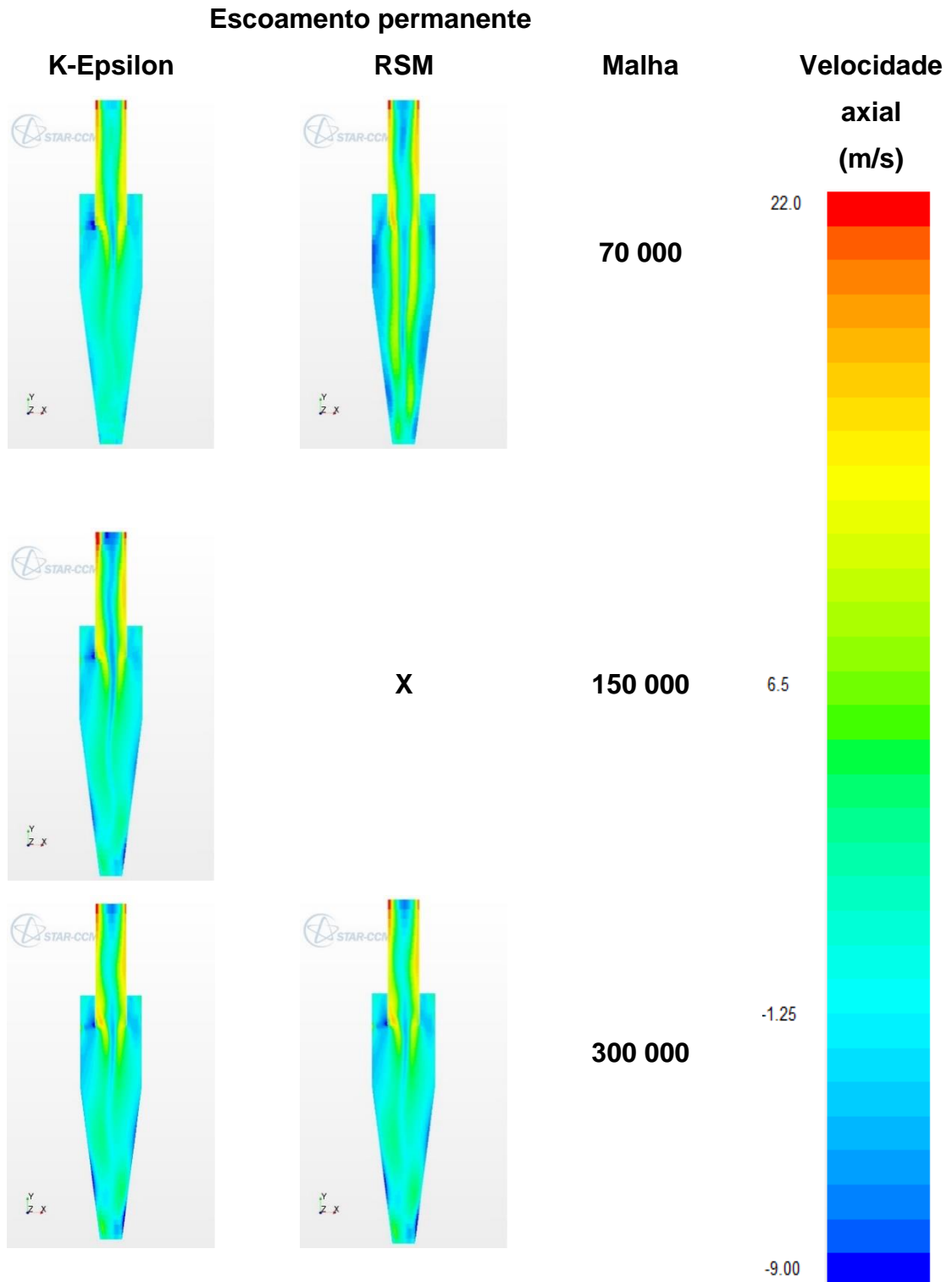


Figura 13 – Campos de velocidade axial – Escoamento permanente
Fonte: Autoria Própria

Escoamento Transiente

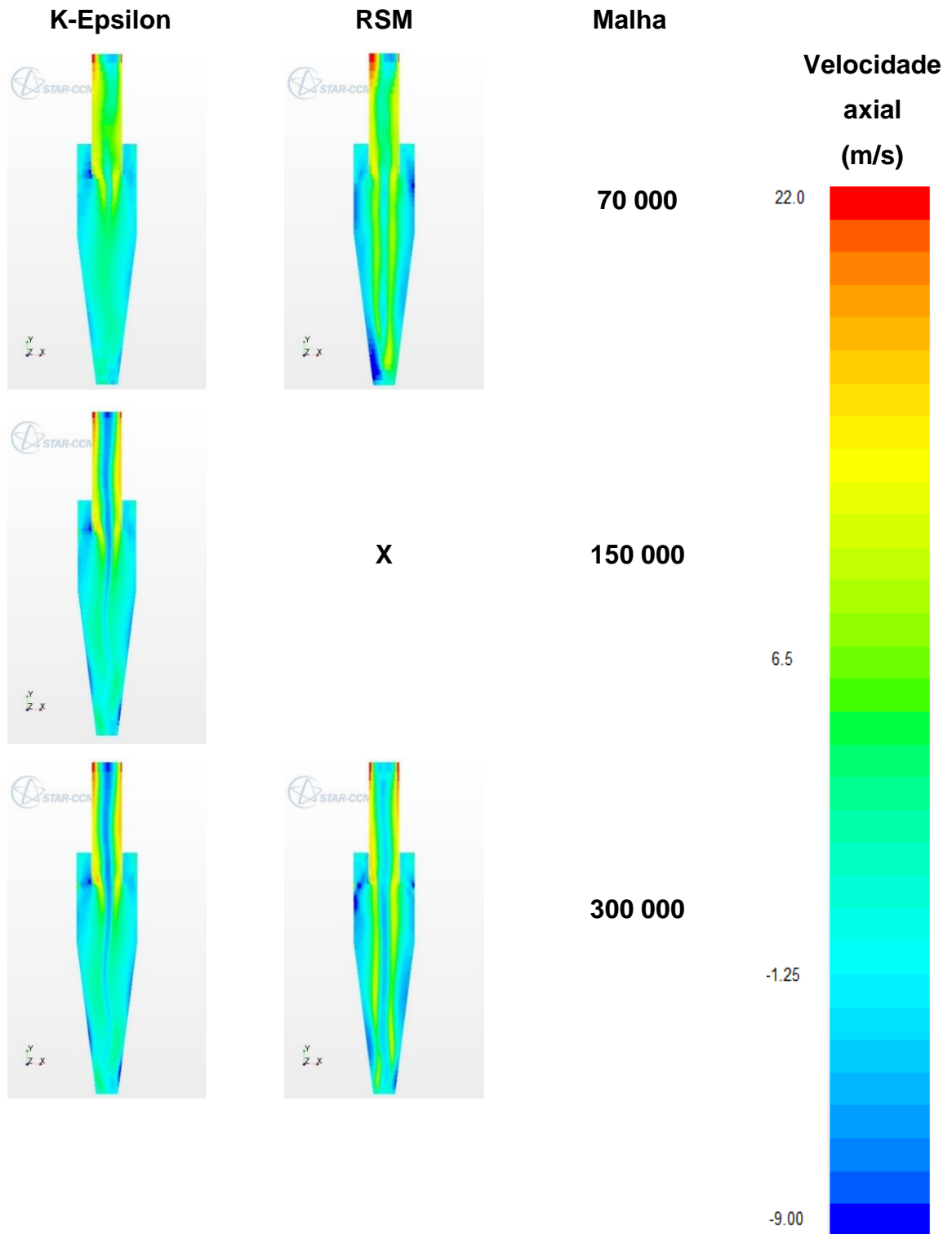


Figura 14 – Campos de velocidade axial – Escoamento Transiente

Fonte: Autoria Própria

Nessas figuras é possível identificar muitos detalhes sobre a simulação do ciclone, como a aplicação da condição de não-deslizamento nas paredes do ciclone que indica baixa velocidade nas suas extremidades, e algumas curiosidades como na saída do *vortex finder*, com a saída do fluido nas extremidades do cilindro porém há sucção no centro dela. Mais uma observação é que nem sempre o centro geométrico do ciclone coincide com o do escoamento, então é visível que a um pequeno deslocamento na simetria da passagem dos fluidos.

7.3.2 Velocidade Tangencial

O perfil de velocidade tangencial está representado nas figuras 15 e 16, tanto em regime permanente, quanto para transiente, para todas as simulações apresentadas nesse trabalho:

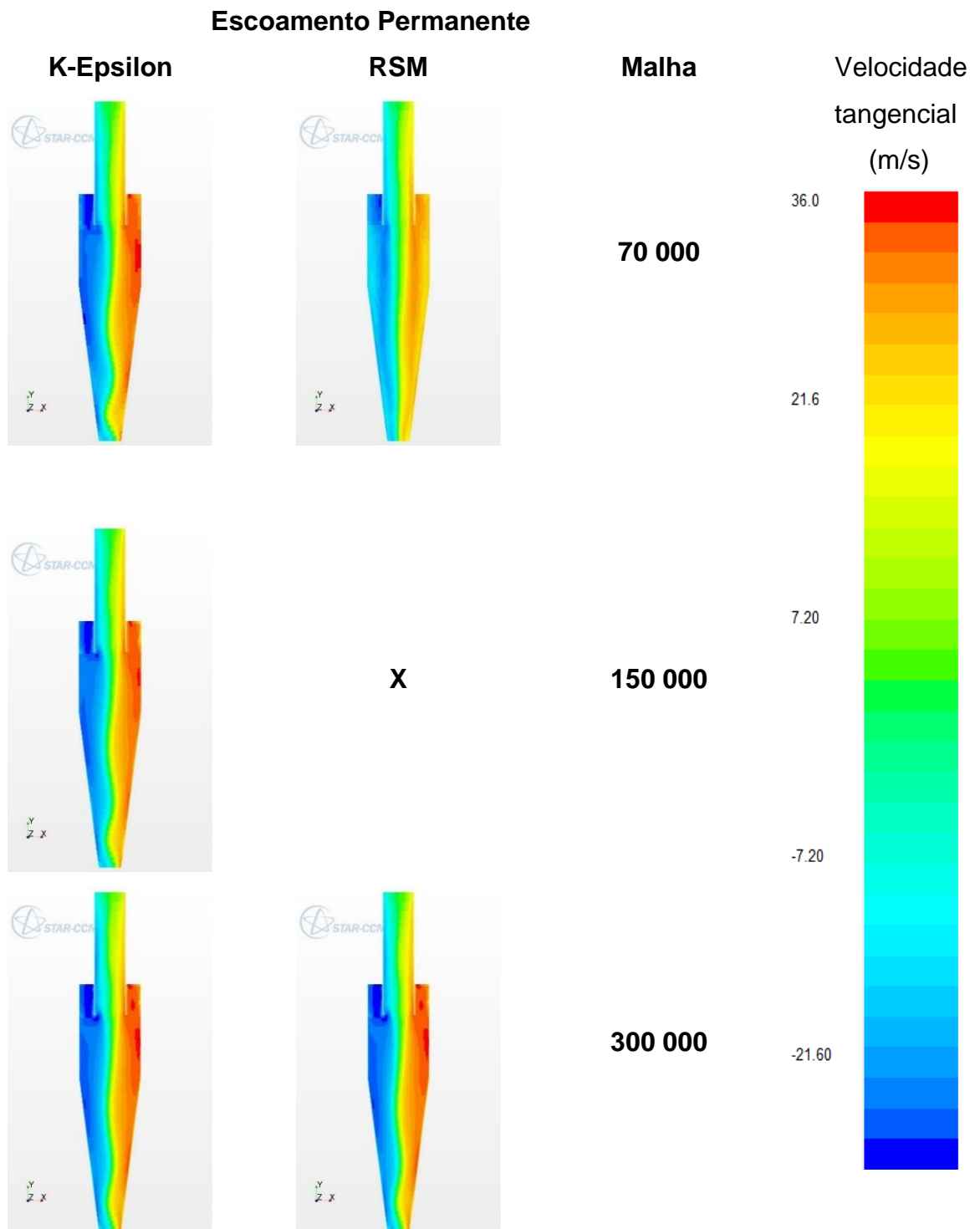


Figura 15 – Campos de velocidade tangencial – Escoamento Permanente

Fonte: Autoria Própria

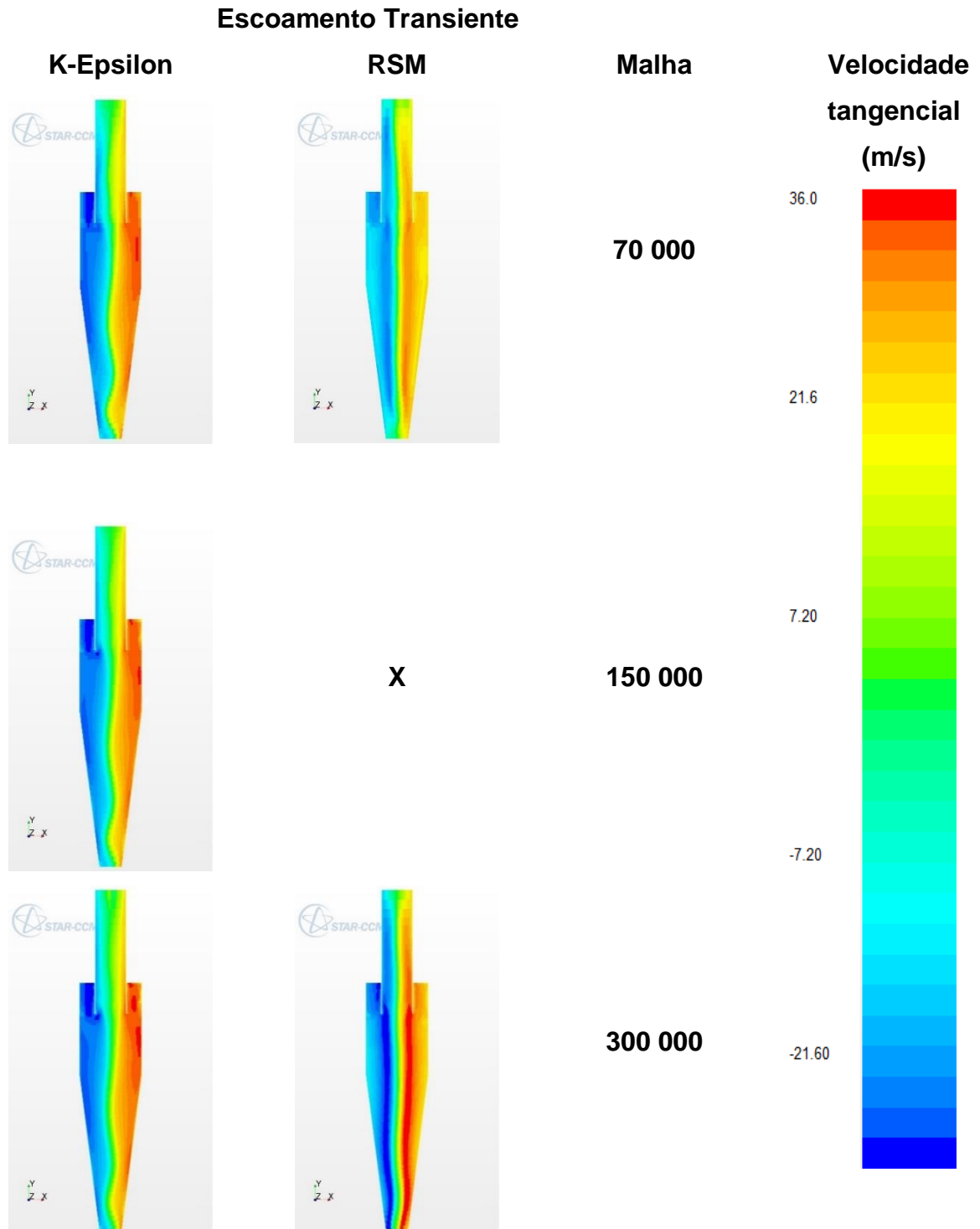


Figura 16 – Campos de velocidade tangencial – Escoamento Permanente

Fonte: Autoria Própria

Nessas figuras é possível observar uma grande diferença na estabilidade do escoamento da simulação K-Epsilon em relação ao RSM, porém isto já era esperado. Além disso a simulação RSM expõe muito bem o movimento de *swirl* do escoamento, principalmente na malha de 300.000 elementos, com o vórtice de

Rankine sendo identificado pelo fato da velocidade próxima ao vortex finder ser o pico no escoamento, e gradativamente, diminui quando se direciona à parede do ciclone.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A DFC é uma ferramenta fundamental para se projetar da forma mais precisa possível, porém são muitos detalhes que tem que se levar em consideração, desde a geometria escolhida, passando pela geração da malha, até a escolha dos tipos de *solvers* escolhidos para a simulação do escoamento. Mesmo assim é uma forma barata, comparada à tentativa e erro que é uma análise dimensional direta.

Sobre as simulações dos ciclones apresentadas neste trabalho o resultado foi significativo, principalmente para a simulação RSM de 300.000 elementos pois conseguiu chegar a distâncias também encontradas por Slack et al.,(2000) comparado ao experimental, porém os resultados obtidos nas simulações com o modelo de turbulência K-Epsilon Realizable, ficaram aquém dos valores experimentais, em nenhuma das simulações realizadas o modelo κ - ϵ Realizable foi capaz de prever o *vórtice de Rankine*. No entanto, na região central do separador os valores preditos por este modelo se aproximam dos dados experimentais. Este trabalho não é conclusivo sobre a utilização do κ - ϵ Realizable na simulação de separadores ciclônicos, mas é mais um forte indicio da inabilidade do mesmo em predizer o escoamentos fortemente rotativos.

Este foi um estudo inicial, e um primeiro contato com a dinâmica dos fluidos computacional. Espera-se que na sequencia deste estudo o efeito da ausência do vórtice de Rankine nas simulações com o modelo de turbulência κ - ϵ Realizable possa ser investigado na eficiência de coleta do ciclone. Outro tema interessante passa pela possibilidade de alteração das constantes do modelo, as quais podem melhorar os resultados obtidos. Existiram muitos problemas durante o trabalho que serviram para desenvolver muitos conhecimentos para a sequência de estudos para a DFC, como critérios de convergência, identificação de erros na simulação, tentativas frustradas de fazer as malhas, e os conhecimentos teóricos, até chegar a este ponto, de término do trabalho de conclusão de curso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. C. Hoffman, L. E. Stein, Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation, Springer, 2008.

F. Boysan, W. H. Ayres, J. A. Swithenbank, Fundamental Mathematical Modeling Approach to Cyclone Design, Inst. of Chemical Engineers, 60 (1982) 222-230.

F. Boysan, B. C. R. Ewan, J. A. Swithenbank, W. H. Ayres, Experimental and theoretical studies of cyclone separator aerodynamics, IChemE Symp. Series, 69 (1983) 305-320.

F. Boysan, R. Weber, J. A. Swithenbank, C. J. Lawn Modeling Coal-Fired Cyclone Combustors, Combustion and flame, 63 (1986) 73-86.

FERZIGER, Joel H. *et al. Computational Method for Fluid Dynamics*. 3rd ed. Berlin: Springer, 2002.

Gibson, M.M. and Launder, B.E. 1978. "Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer", *J. Fluid Mech.*,86(3), pp. 491-511.

Hirsch, C., Bouffieux, V., Wilquem, F. 2002. "CFD simulation of the impact of new buildings on wind comfort in an urban área". Workshop Proceedings, Cost Action C14, Impact of Wind and Storm on City Life and Built Environment, Nantes, France.

Hoffmann, A. C., Stein, L. E., 2008, "Gas Cyclones And Swirl Tubes – Principles, Design and Operation", Second Edition, Spinger – Verlag Verlin Heidelberg

Indian Yellow Pages, *Cyclone Separator*. Disponível em: <<http://www.indianyellowpages.com/ssenvirotech/products.htm?sno=181137>> Acesso em: 26 de maio de 2015.

J. J. Derksen, H. E. A. van den Akker, Simulation of Vortex Core Precession in a Reverse-Flow Cyclone, *AIChE Journal* 46 (2000) 1317-1331.

Jiao, J., Zheng, Y., Sun, G. and Wang, J., 2006, "Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone", *Separation and Purification Technology*

M. D. Slack, R. O. Prasad, A. Bakker, F. Boysan, 2000 "Advances in cyclones modeling using unstructured grids", *Transactions of the Institution of Chemical engineers*, 78A, 1098.

Salvo, R. V. "Efeitos de modelos submalha em escoamentos em ciclones." 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

STAR CCM+ Tutorial. Versão 9.02.005. New York. CD-ADAPCO., 2012

Utikar, R., Darmawan, N., Tade, M., Li, Q, Evans, G., Glenny, M. and Pareek, V. (2010). Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators, Computational Fluid Dynamics, Hyoung Woo Oh (Ed.), ISBN: 978-953- 7619-59-6, InTech,

WHITE, Frank M. Mecânica dos fluidos. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. xiii, 880 p. ISBN 9788563308214.

Wilcox, D.C. 1998. "Turbulence Modeling for CFD", 2nd edition, DCW Industries, Inc.

**ANEXO A – Direitos autorais - Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.
Disposições preliminares**



Presidência da Casa
Subchefia para Assuntos Jurídicos

República Civil

LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998.

Mensagem de veto Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

O PRESIDENTE DA REPÚBLICA Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Título I

Disposições Preliminares

Art. 1º Esta Lei regula os direitos autorais, entendendo-se sob esta denominação os direitos de autor e os que lhes são conexos.

Art. 2º Os estrangeiros domiciliados no exterior gozarão da proteção assegurada nos acordos, convenções e tratados em vigor no Brasil.

Parágrafo único. Aplica-se o disposto nesta Lei aos nacionais ou pessoas domiciliadas em país que assegure aos brasileiros ou pessoas domiciliadas no Brasil a reciprocidade na proteção aos direitos autorais ou equivalentes.

Art. 3º Os direitos autorais reputam-se, para os efeitos legais, bens móveis.

Art. 4º Interpretam-se restritivamente os negócios jurídicos sobre os direitos autorais.

Art. 5º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - publicação - o oferecimento de obra literária, artística ou científica ao conhecimento do público, com o consentimento do autor, ou de qualquer outro titular de direito de autor, por qualquer forma ou processo;

II - transmissão ou emissão - a difusão de sons ou de sons e imagens, por meio de ondas radioelétricas; sinais de satélite; fio, cabo ou outro condutor; meios óticos ou qualquer outro processo eletromagnético;

III - retransmissão - a emissão simultânea da transmissão de uma empresa por outra;

IV - distribuição - a colocação à disposição do público do original ou cópia de obras literárias, artísticas ou científicas, interpretações ou execuções fixadas e fonogramas, mediante a venda, locação ou qualquer outra forma de transferência de propriedade ou posse;

V - comunicação ao público - ato mediante o qual a obra é colocada ao alcance do público, por qualquer meio ou procedimento e que não consista na distribuição de exemplares;

VI - reprodução - a cópia de um ou vários exemplares de uma obra literária, artística ou científica ou de um fonograma, de qualquer forma tangível, incluindo qualquer armazenamento permanente ou temporário por meios eletrônicos ou qualquer outro meio de fixação que venha a ser desenvolvido;

VII - contrafação - a reprodução não autorizada;

VIII - obra:

a) em co-autoria - quando é criada em comum, por dois ou mais autores;

b) anônima - quando não se indica o nome do autor, por sua vontade ou por ser desconhecido;

c) pseudônima - quando o autor se oculta sob nome suposto;

d) inédita - a que não haja sido objeto de publicação;

e) póstuma - a que se publique após a morte do autor;

f) originária - a criação primígena;

g) derivada - a que, constituindo criação intelectual nova, resulta da transformação de obra originária;

h) coletiva - a criada por iniciativa, organização e responsabilidade de uma pessoa física ou jurídica, que a publica sob seu nome ou marca e que é constituída pela participação de diferentes autores, cujas contribuições se fundem numa criação autônoma;

i) audiovisual - a que resulta da fixação de imagens com ou sem som, que tenha a finalidade de criar, por meio de sua reprodução, a impressão de movimento, independentemente dos processos de sua captação, do suporte usado inicial ou posteriormente para fixá-lo, bem como dos meios utilizados para sua veiculação;

IX - fonograma - toda fixação de sons de uma execução ou interpretação ou de outros sons, ou de uma representação de sons que não seja uma fixação incluída em uma obra audiovisual;

X - editor - a pessoa física ou jurídica à qual se atribui o direito exclusivo de reprodução da obra e o dever de divulgá-la, nos limites previstos no contrato de edição;

XI - produtor - a pessoa física ou jurídica que toma a iniciativa e tem a responsabilidade econômica da primeira fixação do fonograma ou da obra audiovisual, qualquer que seja a natureza do suporte utilizado;

XII - radiodifusão - a transmissão sem fio, inclusive por satélites, de sons ou imagens e sons ou das representações desses, para recepção ao público e a transmissão de sinais codificados, quando os meios de decodificação sejam oferecidos ao público pelo organismo de radiodifusão ou com seu consentimento;

XIII - artistas intérpretes ou executantes - todos os atores, cantores, músicos, bailarinos ou outras pessoas que representem um papel, cantem, recitem, declamem, interpretem ou executem em qualquer forma obras literárias ou artísticas ou expressões do folclore.

Art. 6º Não serão de domínio da União, dos Estados, do Distrito Federal ou dos Municípios as obras por eles simplesmente subvencionadas.