UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO E GÁS
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO E GÁS

MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL DE SEPARADORES DE AREIA DO TIPO CICLÔNICO UTILIZANDO MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

LUCAS AFONSO BARRETO SALOMÃO

MANAUS – AM
2018

LUCAS AFONSO BARRETO SALOMÃO
21106485

MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL DE SEPARADORES DE AREIA DO TIPO CICLÔNICO UTILIZANDO MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

Projeto apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo e Gás como requisito final ao desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso – TCC.

Orientador: Prof. MSc. Sávio Raider Matos Sarkis

Manaus, 05 / 12 / 2018

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S173m

Salomao, Lucas Afonso Barreto
Modelagem e simulação numérica computacional de separadores de areia utilizando método de volumes finitos / Lucas Afonso Barreto Salomao. 2018
76 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Prof. Sc.M. Sávio Raider Matos Sárkis
TCC de Graduação (Engenharia de Petróleo e Gás) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Separador de areia. 2. Propano. 3. OpemFOAM. 4. SimFlow. I. Sárkis, Prof. Sc.M. Sávio Raider Matos II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

LUCAS AFONSO BARRETO SALOMÃO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL DE SEPARADORES DE AREIA DO TIPO CICLÔNICO UTILIZANDO MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado a Universidade Federal do Amazonas, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Petróleo e Gás.

Manaus, 05 de dezembro de 2019

Aprovado em 05 de dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Sc.M. Sávio Raider Matos Sarkis

Ketson Patrick de M. Freitas

Prof. Ketson Patrick de Medeiros Freitas

Ana Carolina Monte Almeida

Profª. Ana Carolina Monte Almeida

O povo padece por falta de conhecimento

- Oséias, Bíblia

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo conhecimento e discernimento em todos os momentos da minha vida, no berço, hoje e sempre. A Ele toda honra e toda a glória.

À minha mãe Giovanna Alexsandra e ao meu pai Lúcio Salomão, pelo apoio, carinho e por sempre nutrirem o desejo de ter um filho com saúde e sucesso.

Aos meus irmãos, Davi Tufic e Thiago Salomão, pelo companheirismo e amor.

À minha namorada, Flávia Vitória, pela força, paciência e por me fazer acreditar em um mundo melhor.

Ao meu grande amigo, Tiago Libório, pela grande influência positiva na minha vida.

Ao meu orientador Prof. MSc. Sávio Raider Sarkis pelo incentivo durante toda a graduação, inspirando alunos a desenvolverem conhecimento acadêmico a todo momento.

A todos os integrantes do grupo Exóticos, os originais e os agregados, que me proporcionaram desenvolvimento pessoal e autoconhecimento.

Aos irmãos de coração do intercâmbio em Portland, pelo suporte e parceria em momentos longe da família.

Ao Prof. João Salgado, um exemplo para o curso de Engenharia de Petróleo e Gás da UFAM.

Aos demais professores e alunos da Universidade Federal do Amazonas que contribuíram para o meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

RESUMO

Partículas de areia presentes no fluido produzido, provenientes do reservatório de petróleo, seja pelo fraturamento da formação rochosa ou pelo desgaste do reservatório, são consideradas contaminantes e extremamente prejudicais aos equipamentos de superfície, podendo ocasionar quebras, travamentos e corrosão nos mesmos. Portanto, para que o fluido produzido possa ser introduzido nos processos de produção e escoamento, faz-se necessário o processo de separação da areia contaminante do fluido desejado. Este trabalho apresenta uma análise de parâmetros controlados da separação através do software comercial de modelagem *SolidWorks* e simulação numérica através do software *SimFlow*. Utilizando o modelo de separador projetado, pôde-se simular o processo de separação da areia contaminante presente no escoamento de Propano em sua forma gasosa. Sendo possível, então, obter valores que, baseados nas análises, indicassem a melhor rotina de funcionamento para o separador.

Palavras-chave: Separador de areia. Propano. OpemFOAM. *SimFlow*.

ABSTRACT

Sand particles present in the fluid produced from the oil reservoir, either due to the fracture of the rock formation or due to the wear of the reservoir, are considered to be a contaminant and extremely harmful to surface equipment, resulting in cracks, blockages and corrosion. Therefore, in order for the fluid produced to be introduced into the production and flow processes, it is necessary to separate the contaminant sand from the desired fluid. This work presents an analysis of controlled parameters of the separation through the commercial software of modeling *SolidWorks* and numerical simulation through the *SimFlow* software. Using the designed separator model, it is possible to simulate the process of separating the contaminant sand present in the Propane flow in its gaseous form. It is possible to obtain values based on the analyzes, indicating the best operating routine for the separator.

Key words: Sand Separator. Propane. OpenFOAM. *SimFlow*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema básico do processo de separação de areia.....24
Figura 2 - Dados para a seleção de equipamentos de separação de particulados.....25
Figura 3 - Filtro de manga.....26
Figura 4 - Separador Ciclônico.....27
Figura 5 - Logo do software *SolidWorks*.....28
Figura 6 - Interface do software *SolidWorks*.....29
Figura 7 - Painel de ferramentas do software *SolidWorks*.....30
Figura 8 - Painel de visualização do projeto do *SolidWorks*.....30
Figura 9 - Logo do software *SimFlow*.....30
Figura 10 - Interface do software *SimFlow*.....31
Figura 11 - Painel de Ferramentas do software *SimFlow*.....32
Figura 12 - Ferramentas de visualização do projeto do software *SimFlow*.....32
Figura 13 - Esquema representativo do desenvolvimento de volumes finitos.....33
Figura 14 - Ferramentas Sketchup básicas para esquema rápido do software *SolidWorks*.....36
Figura 15 - Esboço, em visão frontal, do Separador de areia.....37
Figura 16 - Geometria resultante da extrusão do esboço do Separador modelado.....37
Figura 17- Plano paralelo ao plano frontal com distância igual ao comprimento do bocal de entrada 38
Figura 18 - Geometria finalizada.....38
Figura 19 - Separador concluído para simulação com cotas em centímetros.....39
Figura 20 - Mesh do Separador de areia concluído.....41
Figura 21 - Ferramentas *Last Frame*, *Clip* e *Stream Tracer*, respectivamente.....43
Figura 22 - Dados residuais para velocidade de injeção de 10 m/s.....44
Figura 23 - Dados residuais para velocidade de injeção de 15 m/s.....45
Figura 24 - Dados residuais para velocidade de injeção de 20 m/s.....46
Figura 25 - Dados residuais para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³.....47
Figura 26 - Dados residuais para massa específica da fase discreta de 2500 kg/m³.....48
Figura 27 - Dados residuais para massa específica da fase discreta de 3334 kg/m³.....49

Figura 28 - Dados residuais para massa total injetada da fase discreta de 0.817 kg.....50
Figura 29 - Dados residuais para massa total injetada da fase discreta de 1.225 kg.....51
Figura 30 - Dados residuais para massa total injetada da fase discreta de 1.633 kg.....52
Figura 31 - Dados residuais para distribuição granulométrica inicial.....53
Figura 32 - Dados residuais para distribuição granulométrica inicial aumentada em 50%.....54
Figura 33 - Dados residuais para distribuição granulométrica inicial aumentada em 100%.....55
Figura 34 - Comportamento da pressão com velocidade de injeção a 10 m/s.....56
Figura 35 - Comportamento da pressão com velocidade de injeção a 15 m/s.....56
Figura 36 - Comportamento da pressão com a velocidade de injeção a 20 m/s.....57
Figura 37 - Comportamento da pressão com a massa específica da fase discreta a 1667 kg/m³ 57
Figura 38 - Comportamento da pressão com a massa específica da fase discreta a 2500 kg/m³.....58
Figura 39 - Comportamento da pressão com a massa específica da fase discreta a 3334 kg/m³.....58
Figura 40 - Comportamento da pressão com a massa total injetada da fase discreta a 0.817 kg.....59
Figura 41 - Comportamento da pressão com a massa total injetada da fase discreta a 1.225 kg 59
Figura 42 - Comportamento da pressão com a massa total injetada da fase discreta a 1.633 kg.....60
Figura 43 - Comportamento da pressão com a distribuição granulométrica básica.....60
Figura 44 - Comportamento da pressão com a distribuição granulométrica básica aumentada em 50%.....61
Figura 45 - Comportamento da pressão com a distribuição granulométrica básica aumentada em 100% 61
Figura 46 - Modelo de pressão na estrutura do Separador para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente.....62

Figura 47 - Modelo de velocidade angular do fluido para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente....62
Figura 48 - Modelo de velocidade resultante do fluido para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente....63
Figura 49 - Modelo de vorticidade do fluido para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente....63
Figura 50 - Modelo de rotação do fluido para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente....63
Figura 51 - Modelo de pressão do fluido para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente....64
Figura 52 - Modelo de pressão da estrutura do Separador para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente.64
Figura 53 - Modelo de velocidade angular para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente....64
Figura 54 - Modelo de velocidade resultante do fluido para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente....65
Figura 55 - Modelo de vorticidade do fluido para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente....65
Figura 56 - Modelo de rotação do fluido para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente....65
Figura 57 - Modelo de pressão do fluido para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente....66
Figura 58 - Modelo de pressão da estrutura do Separador para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente....66
Figura 59 - Modelo de velocidade angular do fluido para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente....66
Figura 60 - Modelo de velocidade resultante do fluido para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente....67
Figura 61 - Modelo de vorticidade do fluido para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente....67
Figura 62 - Modelo de rotação do fluido para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente....67
Figura 63 - Modelo de pressão do fluido para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente....68

Figura 64 - Modelo de pressão na estrutura do Separador para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente.....68
Figura 65 - Modelo de velocidade angular do fluido para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente.....68
Figura 66 - Modelo de velocidade resultante do fluido para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente.....69
Figura 67 - Modelo de vorticidade do fluido para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente.....69
Figura 68 - Modelo de rotação do fluido para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente.....69
Figura 69 - Modelo de pressão do fluido para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente.....70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de análise granulométrica para partículas grosseiras.....21
Tabela 2 - Métodos de análise granulométrica para partículas finas.....21
Tabela 3 -Tabela de ferramentas oferecidas por pacote pelo software SolidWorks.....28
Tabela 4 - Cotas do Separador de areia.....39
Tabela 5 - Dados de entrada das coordenadas de pontos mínimos e máximos da geometria.....40
Tabela 6 - Dados de entrada do Mesh nos eixos x, y e z.....40
Tabela 7 - Dados de especificação dos limites da geometria.....40
Tabelo 8 - Especificações do tempo de análise e processo.....42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD - Computer Aided Design

CFD - Computational Fluid Dynamics

LES - Large Eddy Simulation

DPM - Discrete Phase Modelling

MPPICFoam - Multiphase Particle-in-Cell

RANS - Reynolds-averaged Navier-Stokes

SPE - Society of Petroleum Engineering

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....16

2 JUSTIFICATIVA.....18

3 OBJETIVOS.....19

3.1 OBJETIVO GERAL 19

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 19

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....20

4.1 A PROBLEMÁTICA DA PRODUÇÃO DE AREIA.....20

4.1.1 CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS.....20

4.1.2 GRANULOMETRIA DAS PARTÍCULAS..... 21

4.2 MÉTODOS DE PREVENÇÃO E CONTROLE DA PRODUÇÃO DE AREIA.....21

4.3 SEPARADOR CICLÔNICO.....26

4.4 *SOFTWARES*.....27

4.4.1 *SOLIDWORKS*.....28

4.4.2 *SIMFLOW*.....30

4.4.2.1 *RESIDUALS*.....33

4.4.2.2 MÉTODOS FINITOS.....33

4.4.2.2.1 SOLUÇÃO POR MÉTODOS DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS.....34

4.4.3 *PARAVIEW* 35

4.5 OUTROS SOFTWARES.....35

5 METODOLOGIA.....36

5.1 SOLIDWORKS - MODELAGEM.....36

5.2 SIMFLOW - SIMULAÇÃO.....39

5.2.1 DADOS DE ENTRADA.....39

5.2.2 PARÂMETROS PARA ANÁLISE.....42

5.3 *PARAVIEW*.....43

5.3.1 *POSTPROCESSIN*G - PROCESSAMENTO DE DADOS.....43

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....44

6.1 ANÁLISE OSCILATÓRIA.....44
6.1.1 VELOCIDADE DE INJEÇÃO.....44
6.1.2 MASSA ESPECÍFICA DA FASE DISCRETA.....47
6.1.3 MASSA TOTAL INJETADA DA FASE DISCRETA.....50
6.1.4 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS.....53
6.2 PRESSÃO X TEMPO.....66
6.3 *PARAVIEW*.....62
6.3.1 VELOCIDADE DE INJEÇÃO.....62
6.3.2 MASSA ESPECÍFICA DA FASE DISCRETA.....64
6.3.3 MASSA TOTAL INJETADA DA FASE DISCRETA.....66
6.3.4 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS.....68
6.4 PREVISÃO DE COMPORTAMENTO PARA PROJETOS DE MONITORAMENTO E ENGENHARIA DE PROCESSOS.....71
6.5 CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO.....71

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....72

REFERÊNCIAS 74

1. INTRODUÇÃO

A indústria do Petróleo movimenta um mercado global de inovações no âmbito de equipamentos de produção. Seus avanços não só impactam o setor petroleiro quanto o desenvolvimento de tecnológico global em diversas áreas (ZITHA; FELDER; ZORNES; BROWN; MOHANTY, 2018). Hoje, apesar da evolução no setor energético em todas as categorias (transmissão, geração e distribuição), sabe-se que a indústria ainda é muito valorizada e possui tempo de vida longo. Tais equipamentos visam tanto à otimização quanto à segurança da produção de reservatórios ainda ativos (THOMAS, 2001).

O reservatório de petróleo e gás natural é, de maneira simplificada, uma rocha porosa, acumuladora de matéria orgânica que passou por diversos processos em condições extremas e específicas de temperatura e pressão, principalmente (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006; PGT, 2010). Diante disso, é de conhecimento da comunidade acadêmica e profissional do setor petrolífero, que o fluido produzido pode apresentar contaminantes, como gases indesejados e partículas sólidas presentes no interior do reservatório (MARTINS, 2011). Tais contaminantes, em sua maioria, são prejudiciais aos equipamentos de produção podendo gerar entupimento de tubos, corrosão, desgaste, travamento e até quebra de equipamentos (CARVALHO, 2008).

Separadores, ou desareadores, foram equipamentos projetados como solução para a retenção do material sólido produzido pelo reservatório. Sua geometria é cilíndrica no topo, onde apresenta a entrada do fluido contaminado, e sua base é afunilada, por onde o material particulado, ou fase discreta, é coletado ((BIKMUKHAMETOV, 2016). Funcionam, basicamente, pelo princípio da força centrífuga, onde o material sólido ou de densidade mais elevada tende a permanecer nas paredes do separador, e o material fluidizado, no caso o gás natural ou petróleo, após atingir uma velocidade específica de rotação, tende a permanecer no centro do equipamento (LACERDA, 2007). Sua base afunilada, gera um tipo de ciclone fazendo com que o fluido seja redirecionado para a parte superior central do desareador, por onde é coletado (MAROULLIS; KREMALLS, 1995).

A comunidade científica e acadêmica possui algumas bases de cálculo para desenvolvimento de soluções na engenharia. Nesse contexto, o método de volumes finitos se apresenta nos dias de hoje como solução mais próxima do que se espera para cálculos de interações dinâmicas com materiais sólidos, pois gera dados de variáveis controladas presentes dentro de *finite cells* (células finitas) (SALCEDO; PINHO, 2003). Sua vantagem

provém, justamente, da aproximação da variável desejada por condições dentro de *volumetric cells* (células volumétricas) e não pelo cálculo dessas variáveis em nós ou limites das células, como é feito pelo método de elementos finitos (ZUBIK-KOWAL, 2010). De maneira simplificada, condições são analisadas volumetricamente e não pontualmente.

Softwares de simulação numérica e modelagem computacional foram desenvolvidos a partir do método de volumes finitos, para análise de comportamento e interação de fluidos com projetos, sejam equipamentos, ferramentas ou partes sólidas presentes na engenharia. Dentre suas principais aplicações podemos citar: aerodinâmica, escoamento de fluidos e estresse de partes fixas ou móveis (SIMFLOW, 2018). No caso do presente trabalho, propõe-se caminhos para o estudo da interação de partículas sólidas pequenas e o gás ou petróleo produzido.

2. JUSTIFICATIVA

Diante da economia global do setor energético cada vez mais aquecida, torna-se imprescindível o desenvolvimento de tecnologias que permitam um melhor aproveitamento e otimização dos processos de produção petrolífera. Com o objetivo de retirar partículas sólidas dos fluidos produzidos provenientes do reservatório, apresenta-se o processo de separação de areia, que consiste na utilização do princípio da força centrífuga para descontaminação do fluido (DERE; SREE; BABU; RAO, 2014). A separação dessa areia tem como finalidade preservar os equipamentos utilizados na produção do petróleo, prevenindo travamentos, entupimentos, corrosão e até quebra dos mesmos.

Dentre os principais métodos de separação de areia, este trabalho destaca o separador ciclônico, bastante conhecido e utilizado pela indústria do petróleo. A justificativa para uma maior aderência ao uso do separador ciclônico está no seu alto custo benefício, pois utiliza apenas a própria vazão do fluido particulado e geometria do separador para que ocorra a separação, sem a necessidade de qualquer outra intervenção que demande energia ou manutenção durante seu uso. Em outras palavras, o processo ocorre apenas por meio da vazão do fluido (NETAFIM, 2018).

O presente estudo tem o intuito e finalidade de promover uma abordagem compreensiva e analítica do processo de separação de areia, de ampla utilização em escala global, através da modelagem do separador realizada pelo software SolidWorks e simulação numérica do processo realizada pelo software SimFlow, bastante conhecido no meio acadêmico e profissional por apresentar dados compatíveis com o processo real.

Os resultados obtidos pela modelagem e simulação são considerados de grande valia e precisão, visto que a análise computacional leva em conta o uso do método de volumes finitos para desenvolvimento das previsões com destaque para dados de pressão, rotação, vorticidade, velocidade angular, velocidade resultante e vibração (SALCEDO; PINHO, 2003).

Almeja-se que este estudo possa ser base para futuras análises e trabalhos científicos no que diz respeito à modelagem, ou seja, a construção do separador de areia, e também para a simulação do processo de separação para fins de otimização e previsão de comportamento.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivos gerais

Estudar parâmetros preditivos e controláveis para otimização do processo de separadores de areia do tipo ciclônico através da modelagem e simulação do equipamento.

3.2 Objetivos específicos

- Modelar o Separador de areia através do software *SolidWorks* compatível com os requisitos de simulação do *SimFlow*;
- Simular o Separador modelado através do *software SimFlow* com foco na variação de velocidade de injeção, massa específica da fase discreta, massa total injetada da fase discreta e distribuição granulométrica das partículas;
- Analisar impactos na rotina de processo do Separador através dos dados de pressão obtidos pelos softwares *SimFlow* e *ParaView*;

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 A problemática da produção de areia

A produção de areia é uma adversidade que a indústria do petróleo vem enfrentando desde o início de sua existência. Nada mais é do que a produção de minerais sólidos naturalmente presentes no reservatório ou do poço perfurado, devido ao desgaste da coluna com o tempo (KAHMEHCHI; AMERI; ALIZADEH, 2014). Normalmente, areia e silte são classificados pelo seu tamanho e sua natureza química. Sabe-se atualmente, que as partículas de areia produzidas possuem uma faixa média de tamanho, variando de 50 - 150 μm. Já a silte, não aparece com tanta frequência. Quando ocorre, normalmente é produzida em baixas concentrações.

Essas partículas começam a ser produzidas juntamente com os fluidos provenientes do reservatório, gerando diversos problemas na cadeia produtiva (LACERDA, 2007). São eles:

i. Entupimento de colunas de produção;
ii. Diminuição da produção de óleo e/ou gás;
iii. Corrosão nas colunas de produção;
iv. Corrosão no equipamentos de sub-superfície e de superfície;
v. Erosão da coluna de produção;
vi. Fechamento do poço;
vii. Gastos fora do planejado com métodos de tratamento

4.1.1 Classificação das partículas

Dentre as partículas produzidas, pode-se separá-las em dois grupos:

1. <u>Partículas Naturais</u> - Principalmente areia e silte, oriundas da formação. Tais partículas podem estar tanto presentes no reservatório, quanto podem ter sido originadas através da penetração do rocha pela perfuração ou pelo processo de canhoneamento.

2. <u>Partículas Artificiais</u> - Estas, por sua vez, são originadas dos fluidos de perfuração, completação e/ou métodos de recuperação de pressão nos reservatórios. Partículas artificiais raramente ocasionam problemas para o processo, uma vez que sua granulometria é bem superior à de partículas naturais, ficando, assim, retida pelos métodos preventivos de produção de areia usuais.

4.1.2 Granulometria das partículas

A Natureza apresenta partículas de diâmetros e geometrias diferentes, partículas estas que vão desde a ordem de centímetros de diâmetro até micrômetros (ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006). Por isso, na indústria do Petróleo, torna-se imprescindível o entendimento e desenvolvimento de conhecimentos de análises granulométricas, uma vez que a prevenção de produção de areia está diretamente ligada ao tamanho do sólido.

A análise granulométrica pode então ser definida como a determinação através de ensaios de amostras das partículas, e consequente tratamento estatístico dessa informação. Estuda-se então o tamanho dessas partículas, através de métodos como o peneiramento e a distribuição em relação ao peso, volume ou quantidade. Algumas vezes, convêm-se utilizar os três métodos juntos.

Tabela 1 - Métodos de análise granulométrica para partículas grosseiras

PARTÍCULAS GROSSEIRAS
Peneiramento
Sedimentação

Tabela 2 - Métodos de análise granulométrica para partículas finas

PARTÍCULAS FINAS
Dispersão
Levigação
Pipetagem
Sedimentação

4.2 Métodos de prevenção e controle de produção de areia

Como a produção de areia em campos de petróleo trazem diversos problemas econômicos, algumas soluções foram criadas com o passar do tempo para prever e minimizar os impactos à cadeia produtiva. As soluções levam em conta as seguintes etapas de estratégia (SPE, 2015):

1. Detecção
2. Separação
3. Coleta
4. Limpeza

5. Desumidificação
6. Transporte

Uma vez detectada a produção de areia na linha de produção, por meio das soluções propostas para tal, o fluido com presença de areia é então direcionado para unidades de separação de sólidos. Lá, a areia é separada do fluido multifásico proveniente do poço (óleo-gás-água) por técnicas já conhecidas como vasos de decantação gravitacional, hidrociclones, filtros e "armadilhas". Uma vez separada, a areia é então direcionada para vasos coletores afastados da linha de produção e, posteriormente, levada para a área de limpeza de areia. Algumas partículas de areia, por estarem contaminadas com óleo do reservatório, necessitam ser tratadas para que o descarte não gere nenhum impacto ambiental. Vasos de limpeza podem ou não ser acoplados ao sistema de coleta e de separadores. O que, de fato, determina esse acoplamento é o direcionamento do projeto, viabilidade física e econômica.

Uma vez limpo, a areia pode ser desumidificada, processo utilizado para gerar economia no transporte da mesma. Uma vez que a areia deixa o processo de limpeza em estado demasiado úmido, o transporte pode ser prejudicado com uma carga excessiva de água indesejada. Novamente, vale ressaltar que o processo em questão depende da viabilidade do projeto. Como etapa final, a areia é transportada para a área desejada, podendo ser influenciada por fatores como a localização da produção, sendo *offshore* ou *onshore* também da limpeza e condições da área de descarte. Quando a limpeza é eficiente, algumas técnicas de mistura com água e descarte no próprio oceano podem ser consideradas. Esta última técnica, necessitando de aprovações mais rigorosas.

i. Sensores de areia

Uma das soluções básicas de projeto para o controle e gerenciamento de produção de areia é o uso de equipamentos de monitoramento e medição de areia. Estes, capazes de detectar em tempo real qualquer variação da concentração arenosa produzida juntamente com o gás ou óleo (MARTINS, 2011). Sendo assim, este equipamento não é capaz de prevenir a produção de areia, e sim, de prever qualquer curva acentuada de futura produção de areia, para que as medidas necessárias, como a utilização de algum dos métodos de tratamento que serão abordados a seguir, possam ser tomadas. Vale ressaltar que, uma vez que o dado de concentração de areia no fluido é deveras importante para averiguar se a taxa de areia produzida está sendo recuperada, é provável que o sensor de concentração arenosa seja utilizado do início da produção do poço até o seu abandono.

ii. *Gravel Pack*

Segundo a *Society of Petroleum Engineering*, 2016, o estudo para dimensionamento de *gravel packs* são de grande relevância, levando em conta a coleta de amostras da formação. Deve-se ao fato de que *gravel packs* com dimensões superiores às requeridas implicarão na produção de areia. O SPE, 2016, segue afirmando que para tais coletas devem ser levadas em consideração múltiplas técnicas de coleta de amostras, podendo viabilizar, assim, um dimensionamento eficiente do *gravel* e, por conseguinte, diminuição da produção de areia.

iii. Limitação de Produção

A limitação de produção adentra o escopo relacionado ao estresse que o poço possa vir a sofrer. Isto é, quanto mais sobrecarregado, com alta produção, maior a produção de areia. Nesse sentido, apreende-se que a limitação de produção é uma alternativa paliativa, visto que nenhuma produção visa produção limitada; porém, em determinados momentos, por questões de segurança do poço, faz-se necessária a intervenção para limitar a produção.

iv. Completação

A completação é uma grande aliada da produção de areia. Deve-se ao fato de que poços mais consolidados, estruturalmente, oferecem menos riscos para a produção de areia, tanto por partículas naturais, quanto principalmente por partículas artificiais. Sabe-se que completações de qualidades superiores proporcionam tanto segurança do poço quanto a viabilidade de um uso eficiente de quaisquer outros equipamentos (MATANOVIC; CIKES; MOSLAVAC, 2021).

v. Telas

O uso de telas é comum e amplamente utilizado mesmo que a formação não indique a produção de areia. Isto porque a produção de areia é um incidente que ainda se apresenta em toda e qualquer produção de reservatórios. Deve-se atentar para o fato de que a produção é reduzida em alguns poços e maior em outros, mas telas são sempre viáveis para inclusão em qualquer projeto.

vi. Separadores de areia

O separador de areia nada mais é do que a utilização de ciclones onde, através da atuação da força centrífuga, o fluido pode ser separado das partículas sólidas, como a areia

(CARVALHO, 2008). Abaixo, na figura 1, pode-se ter uma visão mais elucidativa do processo de separação esperado:

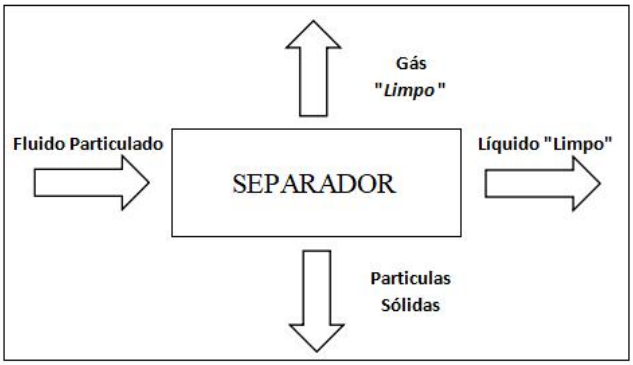

Figura 1 - Esquema básico do processo de separação de areia. Fonte: (O AUTOR, 2018).

Atualmente, existem diversos tipos de separadores sendo utilizados, variando principalmente em sua forma, tamanho e capacidade. Dentre os principais aspectos que devem ser observados na escolha do tipo de separação, temos:

a) Eficiência do Separador - totalmente relacionada à quantidade de partículas que o projeto permite que possam continuar presentes no fluido “limpo”. Ou seja, mediante prévio estudo, determinadas quantidades de partículas finas podem ser aceitáveis (BIKMUKHAMETOV, 2016).

b) Custo Energético - Normalmente, este custo não é muito alto dependendo da utilização, haja vista que a própria vazão fornecida na alimentação se torna suficiente para a separação das partículas dentro do ciclone. E quando não, em casos em que seja necessário algum tipo de fornecimento energético, o próprio gás proveniente do poço pode ser viabilizado para suprir essa demanda.

c) Custo Total de Fabricação - Intrinsecamente ligado ao tipo de fluido que operará dentro do separador, para prevenir possível corrosão do material. Sendo necessária a realização de estudos de interação fluidal de alimentação e material de fabricação do separador.

d) Composição das Partículas - Dependendo do tipo de partícula, o desenho do separador deve ser alterado (PAIVA; SALCEDO; ARAUJO, 1994). Devido ao tamanho e composição química, diferentes projetos de separadores devem ser sugeridos, uma vez que partículas finas são captadas de formas diferentes das de partículas mais grossas (DITRIA; HOYACK, 1994).

e) Segurança - O mais relevante item a ser considerado, pois todo o sistema deve ser planejado de forma a evitar vazamentos e explosões, bem como a localização de uma área segura para operação e eventuais manutenções do separador, de modo que não ofereça riscos de acidentes aos operadores (VILELA; JUNIOR;FILHO;ALMEIDA, 2015).

f) Faixa de Operação - Relativo aos esforços mecânicos que serão aplicados ao sistema, adicionado ao fator da pressão de atuação dentro do separador e faixa de temperatura do fluido. Esse ponto aproxima-se do estudo do tipo de material das paredes do separador, bem como a estrutura que servirá de suporte para o mesmo (BIKMUKHAMETOV, 2016).

Equipamento	ϕ (a)	Δp (b)	Grau de limpeza esperado	η (c)	T (d)	IC (e)	CO (f)	ΔP (g)
	µm	mmH_2O	%	%	°C			
Ciclones	>10	25-75	80 (ϕ<20) 80 (ϕ>50)	85	500	1	1	1
Torres de nebulização	>3	50-175	98 (ϕ>5) 50 (ϕ<3)	95	200-250	2	2-3	0,3
Lavadores tipo Venturi	>3-1,0	375-750	90-95 (ϕ<5)	99	200-250	2-3	3-4	3-4
Filtros de manga	>0,5-1,0	25-250	95-99 (ϕ<5)	99	200-250	8-10	2-3	0,8
Separadores Eletrostáticos	>0,001	6-12	80-99,9 (ϕ<5)	99	500	10-15	1-2	0,3

a) Dimensões das partículas;
b) Queda de pressão;
c) Eficiência global para um pó típico;
d) Temperatura máxima do gás;
e) Investimento de capital relativo ao ciclone;
f) Custo de operação relativo ao ciclone;
g) Consumo médio de potência relativo ao ciclone.

Figura 2 - Dados para a seleção de equipamentos de separação de particulados (HANLY & PETRONKA, 1993; SILVA & HERVAS, 1998).

Compreendendo os parâmetros necessários para o desenvolvimento de um bom separador, pode-se então dividi-los em determinadas categorias, sendo elas:

a) Separadores de fundo de poço, para prevenção de produção de areia;

b) Separadores de cabeça de poço ou superfície, para controle de areia produzida.

vii. Consolidação de areia através de agentes químicos

A consolidação da areia por meio de agentes químicos, dá-se na forma de injeção de fluidos com capacidade de aglutinação de pequenas partículas com a finalidade de aumentar a granulometria da areia presente na região próxima ao canhoneado (BRITISH PETROLEUM, 2018).

viii. Filtros

1. Precipitadores Eletrostáticos **-** De pouco uso, funcionam basicamente pela ionização do gás, de forma a gerar cargas elétricas negativas. Quando as partículas são então carregadas negativamente, paredes precipitadoras de carga positiva atraem essas partículas, e estas por sua vez permanecem retidas (MEIRA, 2009). Tal método é utilizado somente com gases, devido aos perigos de se carregar eletricamente um fluido líquido.

2. Filtros de manga **-** Seu princípio de funcionamento baseia-se em um funil com filtros porosos, por onde o fluido particulado, uma vez injetado pela parte inferior do funil, é forçado para a parte superior do mesmo, onde entrará em contato com um meio altamente poroso. Sua aplicação é normalmente realizada para fluidos gasosos (BARBOSA, 2014). Abaixo, na figura 3, segue uma demonstração básica de como se dá o funcionamento do mesmo:

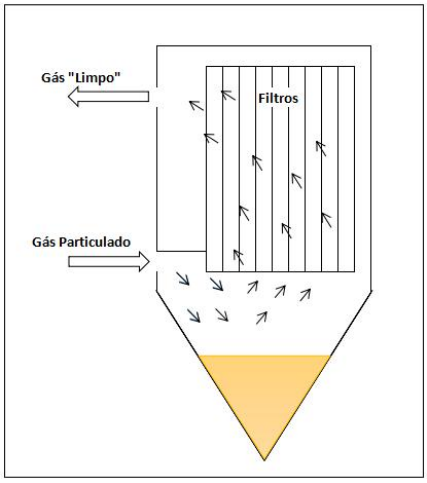

Figura 3 - Filtro de manga. Fonte: (O AUTOR, 2018).

Sua eficiência é extremamente alta. Alguns estudos estimam eficiências que chegam a 99% dentro de certos limites de operação. Apresenta moderada perda de carga e é, em sua maioria, resistente a corrosão. Apesar de pontos muito interessantes, para que possa suportar altas vazões, seu tamanho deve ser expandido, tornando a dimensão do mesmo para determinadas necessidades, algo não tão favorável. Apresenta um alto custo e alta possibilidade de entupimento, uma vez que não trabalha com altas vazões e possui filtros por onde passam materiais úmidos e/ou poluentes condensáveis.

4.3 Separador Ciclônico

Os ciclones, separadores centrífugos ou, como são chamados na indústria, desareadores, funcionam com ação da força centrífuga criada pelo funil. As partículas sólidas

são direcionadas para a parede, enquanto o gás ou fluido adotam um comportamento helicoidal sendo suspenso pelo centro do funil para cima (SPE, 1994).

O esquema abaixo (Figura 4) representa o processo básico dos ciclones:

Figura 4 - Separador Ciclônico (Fonte:CARVALHO,2008).

Por utilizarem a força centrífuga a seu favor, proveniente da vazão de alimentação, o sistema em si, não precisa de nenhuma atuação interna ou externa. O processo ocorre de maneira simples e puramente pelo direcionamento do fluido para o funil, e consequente ação da aceleração centrífuga. Apresenta baixo custo, baixa perda de carga, resistência a corrosão e temperatura e seu projeto é de simples implementação e posteriori manutenção (SALCEDO; PINHO, 2003).

Apesar de ser prático, rápido e econômico, possui baixa eficiência para partículas muito finas (< 5 μm). Nesses casos, sugere-se a utilização de métodos complementares de tratamento, como uma lavagem. Baixa resistência a abrasão e possibilidade de entupimento por partículas finas são consequências que podem surgir devido à introdução de partículas desse tamanho (PAIVA; SALCEDO; ARAUJO, 2010).

4.3 *Softwares*

4.4.1 *SolidWorks*

Figura 5 - Logo do *software SolidWorks* (Fonte: SOLIDWORKS, 2018)

O *SolidWorks* é amplamente utilizado, principalmente, para modelagem de componentes e/ou equipamentos. Possui ferramentas variadas que permitem desenvolver projetos complexos e com bastante acuracidade. Sua versão completa disponibiliza ao usuário acesso a simulações de dinâmicas de fluido.

O *software* utiliza de pacotes de CAD 2D e 3D para desenvolver modelos produtos e está disponível em versões para estudantes, universidade e empresas (SOLIDWORKS, 2018). Seus pacotes comerciais são:

i. *Standard*
ii. *Professional*
iii. *Premium*

Abaixo, na tabela 3, as ferramentas disponíveis para cada pacote:

Tabela 3 - Tabela de ferramentas oferecidas por pacote pelo software SolidWorks. Fonte: (SOLIDWORKS, 2018)

SolidWorks	Manage	PDM Professional	PDM Standard
Acesso seguro	x	x	x
Controle de revisão	x	x	x
Localizar e reutilizar dados de projeto	x	x	x
Trilha de auditoria	x	x	x
Pesquisa Integrada	x	x	x
Visualização integrada de edrawnings	x	x	x
Visualização de múltiplos documentos	x	x	
Escalabilidade	x	x	
Criação automatizada de arquivo morto	x	x	
Importação e exportação automatizada de dados	x	x	
Configuração personalizada	x	x	
Geradores de número de série	x	x	
Equipes de projeto distribuídas	x	x	
Acesso remoto	x	x	
Processo de aprovação básico e automatizado	x	x	
Notificações por e-mail	x	x	
Gerenciamento de projetos	x		
Gerenciamento de processos	x		
Gerenciamento de itens	x		
Tarefas do usuário	x		
Painéis e relatórios	x		

No presente trabalho, foi utilizada a versão disponível para estudantes que apresenta grandes limitações. A versão dispõe de apenas ferramentas para desenvolvimento de equipamentos ou instrumentos simples. A grande vantagem do uso dessa ferramenta para a construção do Separador é que este possui esquema muito simples. Na área da indústria do petróleo, é considerado um dos equipamentos mais simples de serem desenvolvidos, justamente por sua eficiência estar diretamente ligada à geração de força centrífuga através de sua geometria, e consequente geração de um ciclone no interior do mesmo.

As principais ferramentas utilizadas nesse projeto foram:

i. *Line* - Linha simples
ii. *Centerline* - Linha guia
iii. *Corner Rectangle* - Retângulo com centro na borda
iv. *Circle* - Círculo
v. *Offset Surface* - Corte de superfície
vi. *Revolved Boss Base* - Extrusão da peça
vii. *Rapid Sketch Plan* - Plano de desenho esquemático rápido

O *software* possui a interface apresentada na figura 6:

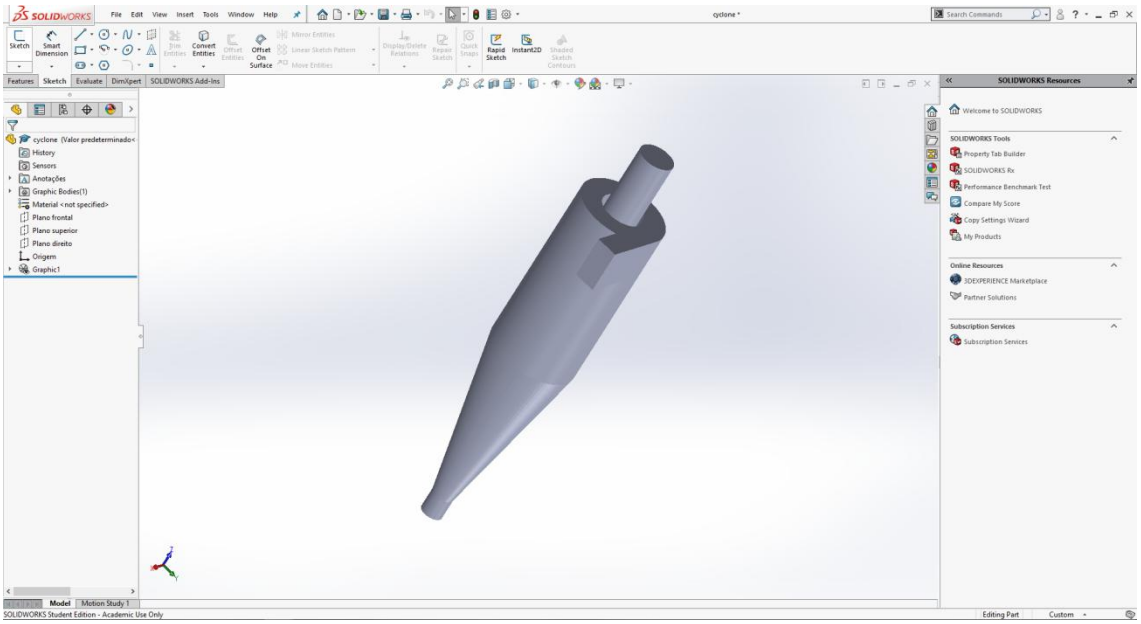

Figura 6 - Interface do *software SolidWorks.* Adaptado de (*SolidWorks, 2018).*

Vale destacar que as ferramentas se encontram todas de fácil acesso no canto superior esquerdo da interface e para seu uso não é necessário qualquer conhecimento de lógica de programação.

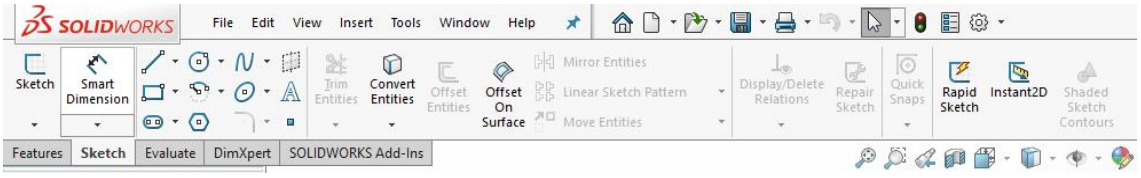

Figura 7 - Painel de ferramentas do *software SolidWorks.* Adaptado de (*SolidWorks, 2018).*

A atualização dos modelos que estão sendo trabalhados encontra-se no lado esquerdo central da interface, permitindo assim, uma rápida visualização dos módulos que estão sendo adicionados no projeto bem como seus planos de orientação. A figura 8 apresenta o painel:

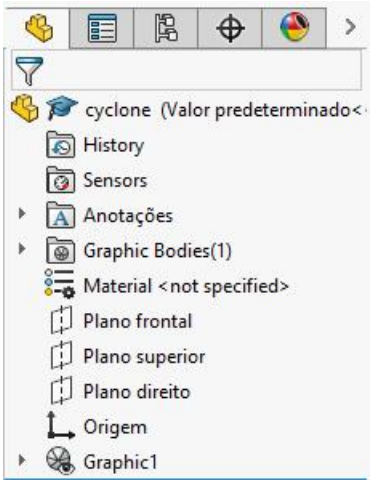

Figura 8 - Painel de visualização do projeto do

SolidWorks. Adaptado de (*SolidWorks, 2018).*

4.4.2 SimFlow

Figura 9 - Logo do *software SimFlow.* Adaptado de (*SimFlow, 2018).*

O SimFlow é uma alternativa para *softwares* de simulação numérica de escoamento de fluidos. Sua praticidade provém de uma base de dados aberta, também chamada de *open-source OpenFOAM libraries*, a qual permite um compartilhamento de projetos e soluções a todos os usuários da interface. Seus principais usos são: escoamento de fluidos compressíveis e incompressíveis, escoamento turbulento, transferência de calor, fluidos multifásicos, cavitação e reações químicas (SIMFLOW, 2018). O *software* permite a simulação desses

processos em regime estacionário e transiente, através do método de volumes finitos tratados mais à frente.

Os principais processos conhecidos pelo uso do SimFlow são:

i. Condução Térmica
ii. Radiação
iii. Convecção natural e forçada
iv. Eficiência de reatores químicos
v. Combustão de carvão
vi. Previsão de emissão de poluentes
vii. Queda de pressão aerodinâmica
viii. Força de levantamento e arraste
ix. Velocidade aerodinâmica

Sua interface é dinâmica e de simples utilização, como observado na figura 10:

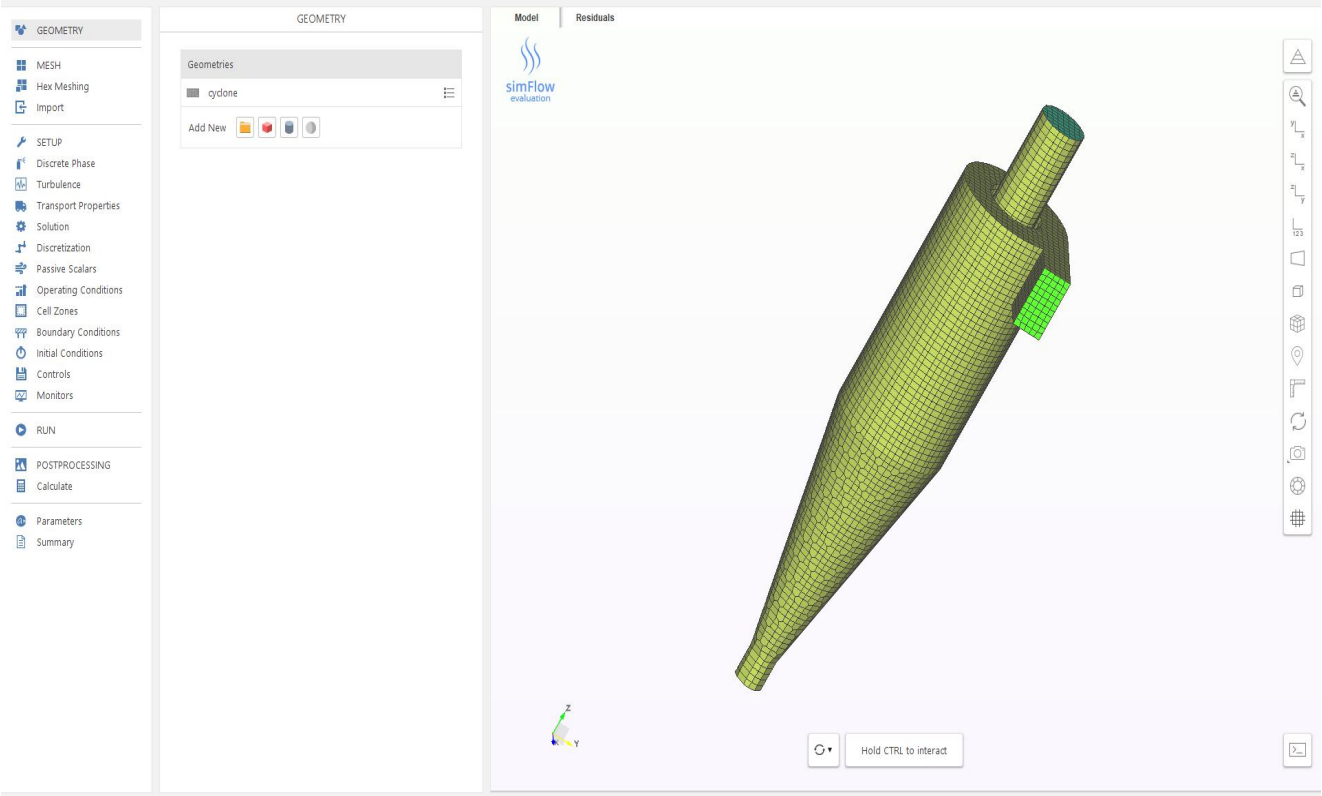

Figura 10 - Interface do *software SimFlow.* Adaptado de (*SimFlow, 2018).*

Seu painel de comandos e ferramentas localiza-se no canto esquerdo da interface, apresentado na figura 11:

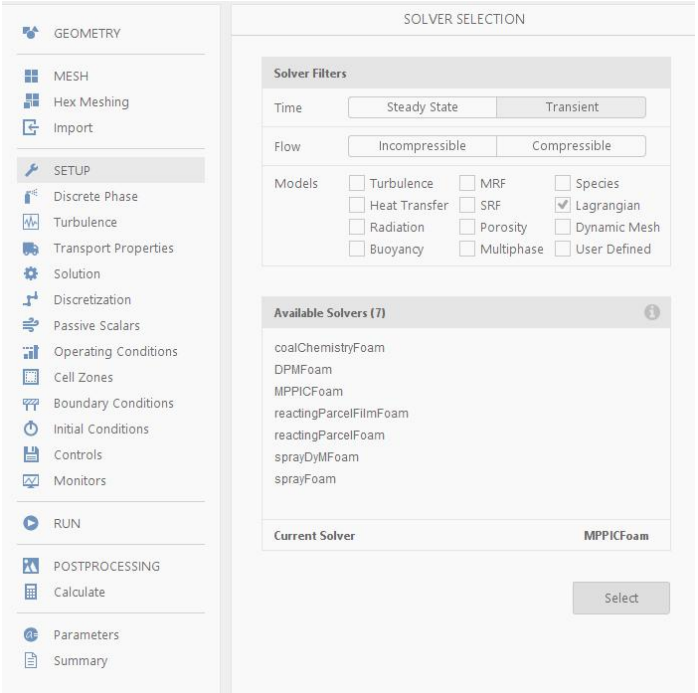

Figura 11 - Painel de Ferramentas do *software SimFlow.* Adaptado de (*SimFlow, 2018).*

Entre suas opções de ferramentas, podemos destacar:

i. *Geometry* (Geometria)
ii. *Mesh*
iii. *Discrete Phase* (Fase Discreta)
iv. *Turbulence* (Turbulência)
v. *Transport Properties* (Propriedades de Transporte)
vi. *Boundary Conditions* (Condições dos limites)
vii. *Initial Conditions* (Condições Iniciais)
viii. *Controls* (Controles)

Já no canto direito da interface, podemos ter acesso a ferramentas de visualização do projeto com perspectivas, dimensões e planos de orientação.

Figura 12 - Ferramentas de visualização do projeto do *software SimFlow.*Adaptado de (*SimFlow, 2018).*

4.4.2.1 *Residuals*

O *software* oferece a interface chamada *Residuals*, na qual é possível visualização em tempo real de parâmetros específicos. Através dele podemos constatar se o processo está ocorrendo de forma coerente ou se há desvios considerados anormais. Isso permite ao usuário rápida intervenção para correção de erros e reinicio da simulação.

É importante destacar que em caso de parada de simulação, qualquer mudança de variável, uma vez que a simulação já iniciou previamente, deve ser descartada e reiniciada do começo. Caso a simulação não seja descartada, as alterações realizadas partirão do momento de parada da simulação, oferecendo dados novos incoerentes com os já coletados. Apesar de poder ser um problema, essa opção pode ser interessante para quem deseja fazer uma comparação, em tempo real e em um único gráfico, das alterações realizadas.

O *Residuals* proporcionou dados em tempo real de pressão e velocidades nos eixos x, y e z, principalmente.

4.4.2.2 Volumes Finitos

O método de volumes finitos é amplamente utilizado como base de cálculo para simulações numéricas na comunidade tecnológica. Apresenta aproximações comportamentais de variáveis como pressão, tensão, rotação, aceleração, estresse, força centrípeta, transferência de calor, comportamento aerodinâmico e muitos outros, em modelos volumétricos (EYMARD;GALLOUET;HERBIN, 2000).

A essência do cálculo baseia-se na divisão de espaços volumétricos em espaços menores com planos complementares. Isso quer dizer que, por exemplo, uma placa de aço de 4 m², poderia ser simulada em 4 espaços de 1 m², 8 espaços de 0,5 m² e assim por diante.

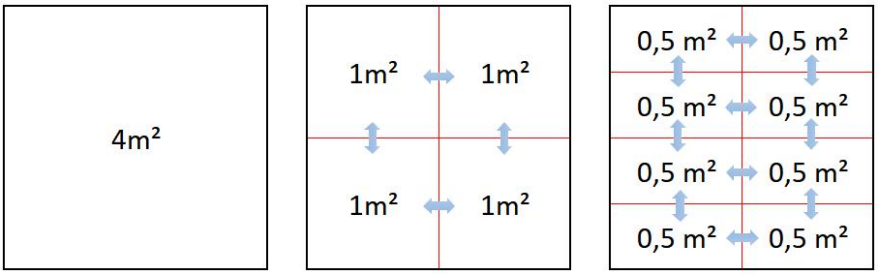

Figura 13 - Esquema representativo do desenvolvimento de volumes finitos. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para tal, o método utiliza de equações de conservação de massa e energia, possuindo interações entre células limitadas por células vizinhas (ZUBIK-KOWAL, 2010).

4.4.2.2.1 Solução por métodos de equações diferenciais ordinárias

A base dos métodos finitos tem sua essência na Integral da Lei de Conservação de massa e energia. Segundo Zubik-Kowal, 2010, a ideia central é dividir um modelo estudado em volumes de controle múltiplos aplicando a integral da Lei de Conservação em cada volume criado.

$$\frac{d}{dt}\int_{\Omega} U dA + \int_{\partial\Omega} \vec{F}(U)\cdot\vec{n} ds = \int_{\Omega} S(U,t) dA \qquad (1)$$

A equação (1) representa a Lei de Conservação básica, onde U representa o vetor dos estados físicos, F representa o vetor de tensão ou magnitude do fluxo correspondente a U, e S entropia. Em sua forma unidemensional, temos a seguinte equação:

$$\frac{d}{dt}\int_{xl}^{xr} U dx + F(U)\big|_{xr} - F(U)\big|_{xl} = \int_{xl}^{xr} S(U,t) dx \qquad (2)$$

Aplicando então a ideia de volumes de controle, e assumindo que *S* por convenção seja igual a 0, (2) torna-se então

$$\frac{d}{dt}\int_{x_{i-\left(\frac{1}{2}\right)}}^{x_{i+\left(\frac{1}{2}\right)}} U dx + F(U)\Big|_{x_{i+\left(\frac{1}{2}\right)}} - F(U)\Big|_{x_{i-\left(\frac{1}{2}\right)}} = 0 \qquad (3)$$

Para prosseguir com a discretização das equações, é necessário que se defina os valores médios de U, onde

$$U_i \equiv \frac{1}{\Delta x_i}\int_{x_{i-\left(\frac{1}{2}\right)}}^{x_{i+\left(\frac{1}{2}\right)}} U dx \text{, para } \Delta x_i \equiv x_{i+\left(\frac{1}{2}\right)} - x_{i-\left(\frac{1}{2}\right)} \qquad (4)$$

Substituindo (3) pelos valores médios de U definidos em (4), obtém-se

$$\Delta x_i \frac{dU_i}{dt} + F(U)\Big|_{x_{i+\left(\frac{1}{2}\right)}} - F(U)\Big|_{x_{i-\left(\frac{1}{2}\right)}} = 0 \qquad (5)$$

Até a equação (5), nenhuma aproximação se faz necessária, no entanto é preciso assumir que as soluções dentro dos volumes de controle são constantes devido ao tamanho do mesmo proveniente da integração (WILLCOX; WANG, 2014), logo

$$U(x,t) = U_i(t) \text{ para } x_{i-\left(\frac{1}{2}\right)} < x < x_{i+\left(\frac{1}{2}\right)} \qquad (6)$$

Portanto,

$$U\left(x_{i+\left(\frac{1}{2}\right)}, t^{+}\right) = \begin{cases} U_i(t) \rightarrow u(t) > 0 \\ U_{i+1}(t) \rightarrow u(t) < 0 \end{cases} \tag{7}$$

O fluxo pode então ser encontrado com os valores de U em (7) substituídos em (5),

$$F\left(x_{i+\left(\frac{1}{2}\right)}, t^{+}\right) = \begin{cases} u(t)U_i(t) \rightarrow u(t) > 0 \\ u(t)U_{i+1}(t) \rightarrow u(t) < 0 \end{cases} \tag{8}$$

Usando o método mais apropriado de solução de Equações Diferenciais Ordinárias, é possível realizar a discretização das equações acima. Faz-se uso desses métodos para que uma aproximação discreta completa para a convecção da equação unidemensional seja encontrada (EYMARD;GALLOUET;HERBIN, 2000). Sugere-se o uso do método de Euler, obtendo então,

$$\Delta x_i \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} + F^n_{i+\left(\frac{1}{2}\right)} - F^n_{i-\left(\frac{1}{2}\right)} = 0 \tag{9}$$

Simplificando (9),

$$F^n_{i+\left(\frac{1}{2}\right)} = \frac{1}{2} u^n (U^n_{i+1} + U^n_i) - \frac{1}{2} \left|u^n\right| (U^n_{i+1} - U^n_i) \tag{10}$$

4.4.3 *Paraview* - Processamento de dados

O *ParaView* é um *software* conjugado ao *SimFlow* que oferece a visualização gráfica dos dados gerados pelo simulador (SIMFLOW, 2018). Nele, podemos analisar uma variedade de variáveis em função do tempo principalmente. São elas: pressão, viscosidade cinemática, rotação, velocidade angular, velocidade resultante, entre outras. Além disso, oferece ao usuário interface para escolha de propriedades, gráficos, animações do processo, processo em vistas planares, 3-D e 2-D, bem como a possibilidade de mudança de visualização de vetores, para vetores espaçados, em linha ou em pontos.

4.5 Outros *Softwares*

Há muitos *softwares*, recentemente desenvolvidos, para o fim de simulação numérica de comportamento de processos. Cada um com sua especificidade, limitação e praticidade.

Para o caso de *softwares* na linha de simulação numérica e modelagem do secador, foram cogitados os seguintes:

1. *ANSYS* - Modelagem e Simulação numérica
2. *AUTODESK CFD* - Modelagem e Simulação numérica
3. *FLUENT* - Simulação numérica
4. *SIMSCALE* - Simulação numérica
5. *COMSOL* - Simulação numérica
6. *NASTRAN* - Modelagem e Simulação numérica

Como explicado, a utilização do *SimFlow* e do *SolidWorks* deve-se principalmente ao fato de suas versões gratuitas apresentarem limitações menores em relação a simulação proposta no presente trabalho. No caso, os outros *softwares* apresentavam alto custo ou interface que necessitava de comprometimento com muitos parâmetros que não se enquadravam na realização do estudo proposto.

5. METODOLOGIA

5.1 *SolidWorks* - Modelagem

Para o desenvolvimento do presente estudo, foi utilizado o software SolidWorks para modelagem do separador. A escolha do SolidWorks levou em conta a grande utilização e conhecimento pela comunidade tecnológica de indústria e engenharia global. Também apresenta interface simples para o usuário e muito material acadêmico e científico desenvolvido, útil para suporte no trabalho.

O primeiro passo então é o acesso as ferramentas do *sketchup*, localizada no canto superior da tela. A figura 14 apresenta essas ferramentas.

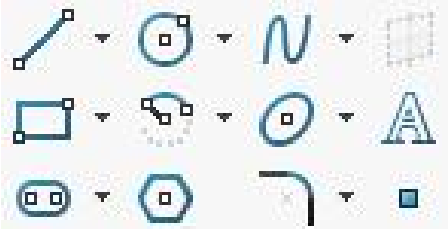

Figura 14 - Ferramentas *Sketchup* básicas para esquema rápido do software *SolidWorks.* Adaptado de (*SolidWorks, 2018)*

Uma das grandes vantagens da modelagem de um separador, e seu próprio uso na indústria, é de que seu modelo é muito simples e apresenta uma parte (superior) cilíndrica e outra parte (inferior) afunilada. Para tal, apenas ferramentas simples de linhas concretas e linhas-guia são necessárias para seu esboço.

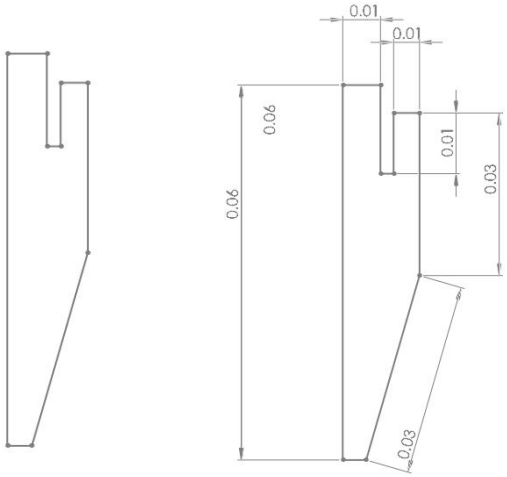

Figura 15 - Esboço, em visão frontal, do Separador de areia. Adaptado de (*SolidWorks, 2018)*

Após o esboço unilateral (Figura 15), podem ser utilizadas, então, as linhas guias de metragem para especificar as medidas de altura total do separador, altura da fase cilíndrica, altura da fase afunilada, raio total da fase cilíndrica, raio de acumulação de partículas na parte inferior e raio da saída do fluido na parte superior.

Prosseguindo, faz-se uso da visualização planar do esboço e também da ferramenta *Boss-Extrude*, responsável pela extrusão revolucionária (360°) para formar o separador.

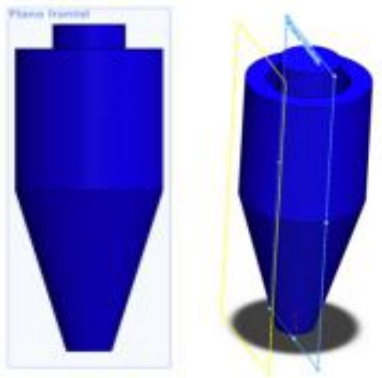

Figura 16 - Geometria resultante da extrusão do esboço do Separador modelado. Adaptado de (*SolidWorks, 2018)*

Com a estrutura do separador completa (Figura 16), cria-se então um plano paralelo ao plano frontal do separador para iniciar a modelagem da entrada do funil, por onde o fluido

particulado adentrará o separador. A partir de cálculos prévios ou especificações desejadas pelo usuário, a distância do plano deverá corresponder a distância da entrada do fluido. A partir desse ponto, o usuário pode definir entre uma entrada circular (cilíndrica) ou uma entrada retangular. Sugere-se o estudo comportamental do escoamento do fluido particulado utilizado.

Figura 17- Plano paralelo ao plano frontal com distância igual ao comprimento do bocal de entrada

Após a criação da geometria de entrada desejada no novo plano, utiliza-se a ferramenta de extrusão até a geometria correspondente no plano frontal inicial com atenção para a especificação de corte até a superfície, como apresentado na figura 17.

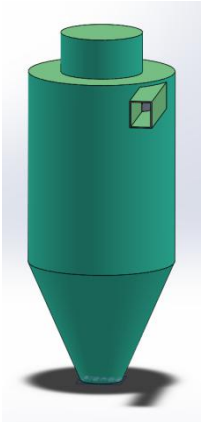

Figura 18 - Geometria finalizada

Com a conclusão da entrada do separador, o modelo está pronto e deve então ser salvo com atenção para o formato que será utilizado no simulador desejado. Com base nos estudos realizados por Lacerda, 2007, o modelo final para o presente trabalho pode ser observado na figura 19.

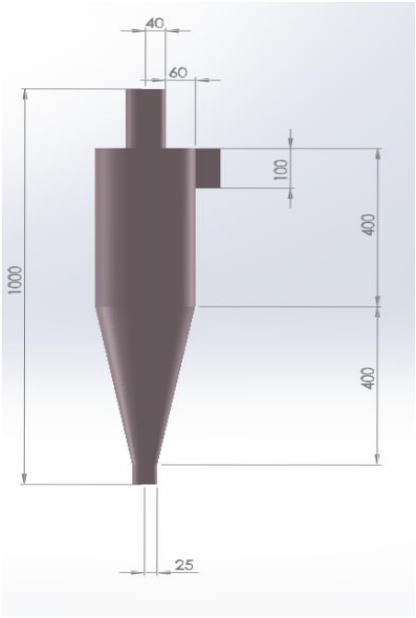

Figura 19 - Separador concluído para simulação com cotas em centímetros. Adaptado de (*SolidWorks, 2018)*

Tabela 4 - Cotas do Separador de Areia

Variável	Medida (cm)
Raio superior (saída de fluido)	40
Raio total da parte cilíndrica	60
Raio da base (saída de partículas)	25
Altura da bocal de entrada do fluido	100
Largura do bocal de entrada do fluido	50
Altura da parte cilíndrica	400
Altura da parte	400
Altura total do Separador	1000

5.2 SimFlow

5.2.1 Dados de entrada

O primeiro passo após o término do modelo é adicioná-lo no simulador. Uma vez adicionado, faz-se necessária a utilização da ferramenta re*scale* para valor uniforme em todas as direções de 0.001, pois a modelagem no *SolidWorks* é diferente da base do SimFlow. Por isso, necessita-se fornecer uma escala sustentável para a simulação.

Para que a simulação possa ocorrer, a ferramenta *Hex Meshing* deve ser utilizada, para que o simulador possa então modelar os volumes finitos e limites da geometria escolhida. De início, a ferramenta pede pela introdução de dados dos pontos mínimos e máximos da geometria, podendo estes serem descobertos com a ferramenta de localização de pontos no

plano disponibilizada na coluna direita da interface (GRYGLAS, 2018). O simulador oferece a opção de ajuste automático, porém, esta ferramenta é apenas útil para limites sem entrada ou saída de fluidos. Ou seja, para os locais de injeção e ejeção de fluido a ferramenta torna-se ineficaz, sendo útil para as paredes do Separador. Abaixo, na tabela 5, os dados de entrada:

Tabela 5 - Dados de entrada das coordenadas de pontos mínimo e máximos da geometria

	X	Y	Z
Ponto Mínimo (m)	-0.1	-0.1	-0.4499
Ponto Máximo (m)	0.1499	0.101	0.5499

Após introduzidos os dados de limites de geometria, deve-se então definir a quantidade de células volumétricas quer serão utilizadas. De maneira simples, quanto mais células, mas preciso o cálculo, devido ao número de discretizações que serão feitas pelo simulador. Porém, a versão acadêmica utilizada nesse presente trabalho, apresenta limitação de 20.000 células. Sendo assim, a análise seguirá com os dados de células da tabela 6:

Tabela 6 - Dados de entrada do Mesh nos eixos x, y e z.

	X	Y	Z
Divisão do *Mesh*	25	20	100

É importante que se escolha o maior número de zonas no eixo em que haverá maior número de interações do processo. No caso do separador, o eixo Z é o eixo em que identificaremos a formação do ciclone no interior do separador.

Neste trabalho, foram identificados planos para configuração de característica dos limites planares, apresentados na tabela 7, os quais serão as paredes do separador não oferecendo qualquer interação além de aprisionamento, saída do fluido, saída das partículas e entrada do fluido particulado:

Tabela 7 - Dados de especificação dos limites da geometria

Coordenada	Descrição (Inglês)	Descrição (Português)	Comando	Comentário
x < 0	*Boundaries*	Parede	*Wall*	-
x > 0	*Inlet*	Entrada	*Patch*	Injeção do fluido particulado
y < 0	*Boundaries*	Parede	*Wall*	-
y > 0	*Boundaries*	Parede	*Wall*	-
z < 0	*Bottom*	Saída Inferior	*Wall*	Saída das partículas
z > 0	*Top*	Saída Superior	*Patch*	Saída do fluido “limpo”

Na aba *Point* pode ser feita a introdução do centro de massa do objeto modelado. No caso, o Separador construído neste trabalho foi feito com seu centro nas coordenadas (0, 0, 0,)

não sendo necessária qualquer alteração desses parâmetros. No entanto, caso o objeto esteja fora do centro equivalente do software, a ferramenta *Pick Location in 3-D view* possibilita ao usuário, configurar o centro manualmente direcionando-o para dentro de sua estrutura. Dá-se início, então, ao processo de *Mesh* na última aba (GRYGLAS, 2018).

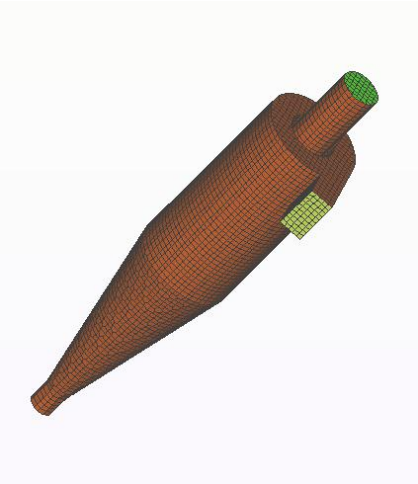

Figura 20 - Mesh do Separador de areia concluído. Adaptado de (*SimFlow, 2018)*

Uma vez concluído o *Mesh* (Figura 20), o resultado é apresentado na tela como o de acima. O *Mesh* pode ser confirmado na opção *Mesh*, onde a interface deve apresentar 4 planos criados: *Boundaries*, *Top*, *Bottom* e *Inlet*, conforme configuração proposta na tabela 7.

Nessa etapa, novas ferramentas são dispostas ao usuário para modelos do fluido e partículas desejadas. O método de solução utilizado foi de regime transiente por possuir variáveis condicionadas à conservação de energia e massa, e também o modelo de Lagrange sugerido pelo estudo publicado na plataforma do *SimFlow*, por Gryglas, 2018. Sendo assim, o próprio simulador direciona a simulação para o pacote de solução *MPPIFoam* que será utilizada nesse trabalho.

O Modelo turbulência de LENS com equações k e filtro anisotrópico foram selecionados para a simulação, devido ao fato de apresentar não só aproximações como o modelo RANS, mas sim a variação flutuante das variáveis desejadas (SOM;SENECAL;POMRANING, 2012). Permitindo assim, não só análises de aproximações, mas de forma integral no tempo.

Para a função de propriedades de transporte, selecionou-se o Gás Propano por ser um gás altamente utilizado em refinarias e possuir considerável proporção volumétrica no Gás Natural produzido em Poços ativos.

As condições de limites são configuradas apenas para a Entrada do fluido (fluido particulado) e de Saída Inferior (partículas), conforme tabela 7. No caso da Entrada, as

partículas devem manter-se no fluido selecionando a opção *rebound* com a velocidade de injeção desejada, e na Saída, as partículas devem ser configuradas na opção *escape* (GRYGLAS, 2018). A tabela 8 mostra os valores dessas especificações:

Tabela 8 - Especificações de tempo de análise de processo

Descrição (Inglês)	Descrição (Português)	Comando	Comentário
Write Control	Controle	*Run Time*	Tipo de controle do tempo
Write Interval	Intervalos Gráfico	0.1 s	-
Time Step	Intervalos	1e-04 s	Intervalos finitos de simulação
End Time	Tempo Total	5 s	Tempo total simulado
SOI	Start da Injeção	1 s	Momento de entrada das partículas

5.2.2 Parâmetros para análises

Com base na dissertação de mestrado de Kegg, 2008, foram adotados 4 parâmetros para análise neste trabalho seguindo os pressupostos abaixo:

a) Velocidade de Injeção - por ser uma variável capaz de ser controlada na entrada do separador com uma bomba ou redutor de escoamento. Foram utilizados os seguintes valores de velocidade de injeção:

Simulação 1 - 10 m/s

Simulação 2 - 15 m/s

Simulação 3 - 20 m/s

b) Massa Específica da fase discreta - por ser uma variável identificável por ensaios em laboratório, corpo de prova, métodos geofísicos e de comportamento do fluido (ROSA;CARVALHO; XAVIER, 2006 & ERNESTO; USSAMI, 2002). Foram utilizados os seguintes valores de massa específica:

Simulação 4 - 1667 kg/m³

Simulação 5 - 2500 kg/m³

Simulação 6 - 3334 kg/m³

c) Massa total da fase discreta - por ser uma variável preditiva através de ensaios e coleta de amostras do fluido. Foram utilizados os seguintes valores de massa total:

Simulação 7 - 0.817 kg

Simulação 8 - 1.225 kg

Simulação 9 - 1.633 kg

d) Distribuição granulométrica das partículas - para confirmar comportamento do item b. Foram utilizados os seguintes valores de distribuição granulométrica das partículas:

Simulação 10

Diâmetro mínimo da partícula = 4e-05 m

Diâmetro máximo da partícula = 3.6e-04 m

Variância do diâmetro da partícula = 5e-05 m

Diâmetros esperados = 2e-05 m

Simulação 11 - valores com aumento de 50 % da Simulação 10 com valor de variância estático

Simulação 12 - valores com aumento de 100 % da Simulação 10 com valor de variância estático

5.3 ParaView

5.3.1 *Postprocessing* - Processamento de dados

Para o processamento de dados e visualização dos dados no modelo 3-D, ainda na interface do *SimFlow*, faz-se uso da ferramenta chamada *Postprocessing*, a qual disponibiliza a abertura de dados no software *ParaView*.

Baseando-se no estudo publicado por Gryglas, 2018, uma vez na interface *ParaView*, deve-se utilizar, para modelagem do fluido do separador, as seguintes ferramentas (Figura 21):

Figura 21 - Ferramentas L*ast Frame, Clip e Stream Tracer, respectivamente.* Adaptado de (*Paraview, 2018)*

Last Frame - para que o software compute todos os dados em função do tempo, faz-se uso desta ferramenta, uma vez que o modelo introduzido automaticamente no software apresenta apenas o último dado adquirido. **Isso quer dizer que, em uma simulação de 5 segundos, o *Paraview*.** Pressionar *apply* para que a ferramenta seja concluída. A janela de erro aparecerá pois o modelo básico do Separador modelado não é padrão do Paraview. Para isso, desmarcar a caixa de ferramenta *lagrangian/kinematicCloud*. Pressionar *apply* novamente para prosseguir.

Clip - indicado para visualização de parte do Separador, para posteriori introdução do fluido através dele, com a ferramenta *Stream Tracer*. Pressionar *apply* para que a ferramenta

seja concluída. Selecionar *Solid Color*, com opacidade de 0.2 para melhor visualização do Separador.

Stream Tracer - com essa ferramenta, é possível a obtenção do modelo visual do fluido durante todo o processo em qualquer ponto do separador. Pressionar *apply* para que a ferramenta seja concluída. Selecionar variável no painel de ferramentas superior que se deseja analisar.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise Oscilatória

Todos os dados residuais foram considerados de forma pontual pertencentes ao gráfico, significando que os números obtidos pelos gráficos são pontos no gráfico de representação do comportamento oscilatório das variáveis de pressão e velocidade nos eixos x, y e z durante o processo.

6.1.1 Velocidade de injeção

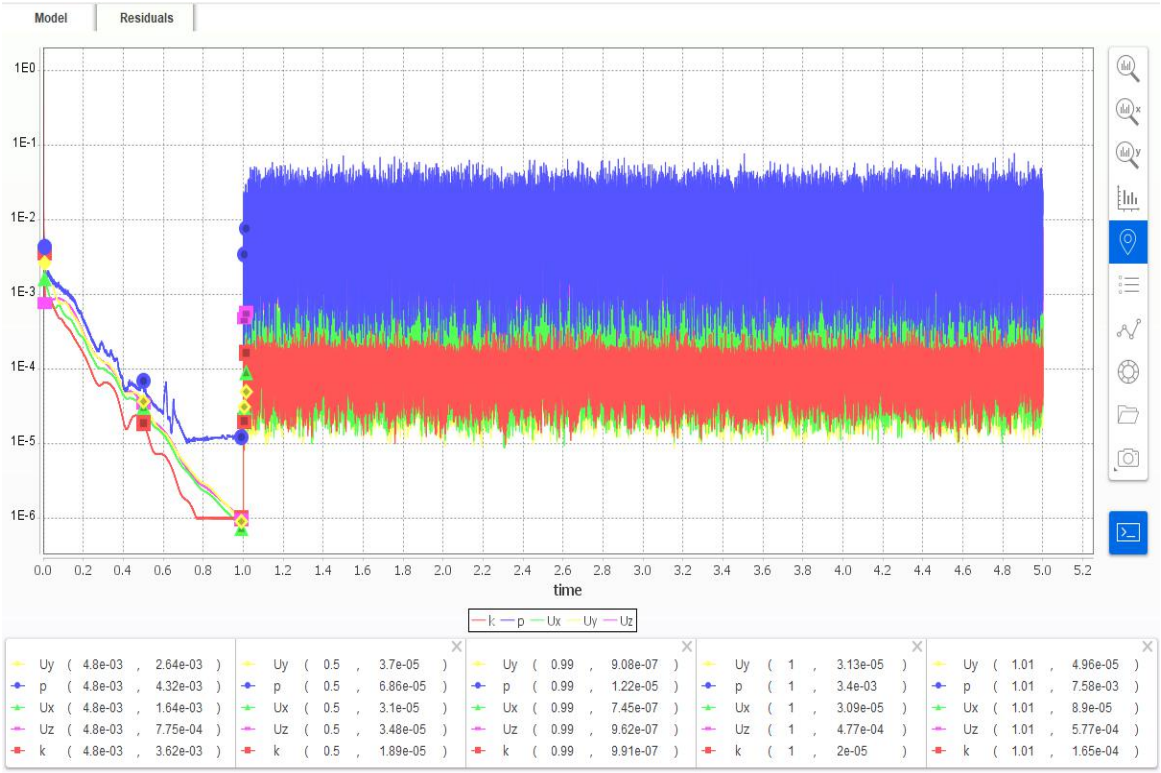

Figura 22 - Dados residuais para velocidade de injeção de 10 m/s. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a velocidade de injeção do fluido particulado a 10 m/s, na figura 22, observou-se resultados com alta oscilação das variáveis. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 1.65e-03, 2.63e-03 e 7.75e-04, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 3.1e-05, 3.7e-05 e 3.48e-05, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte: 7.45e-07, 9.08e-07 e 9.62e-07, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 3.09e-05, 3.13e-05 e 4.77e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 8.9e-05, 4.96e-05 e 5.77e-04.

Já para valores de pressão, temos: 4.32e-03, no início; 6.86e-05, em 0.5 segundos; 1.22e-05, em 0.99 segundos; 3.4e-03, no início da injeção de partículas; 7.58e-03, em 1.01 segundos.

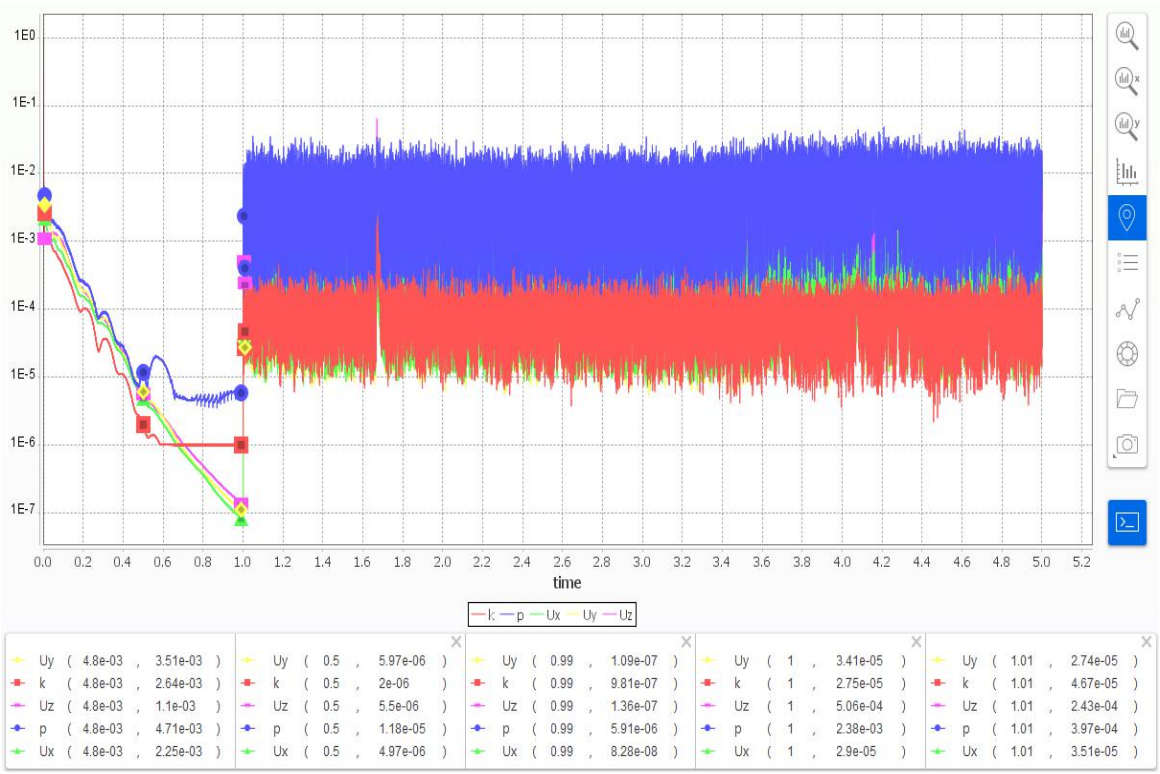

Figura 23 - Dados residuais para velocidade de injeção de 15 m/s. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a velocidade de injeção do fluido particulado a 15 m/s, na figura 23, também se observou resultados com alta oscilação das variáveis. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.25e-03, 3.51e-03 e 1.1e-03, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 4.97e-06, 5.97e-06 e 5.5e-06, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 8.28e-08, 1.09e-07 e 1.36e-07, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 2.9e-05, 3.41e-05 e 5.06e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 3.51e-05, 2.74e-05 e 2.43e-04.

Já para valores de pressão, temos: 4.71e-03, no início; 1.18e-05, em 0.5 segundos; 5.91e-06, em 0.99 segundos; 2.83e-03, no início da injeção de partículas; 3.51e-05, em 1.01 segundos.

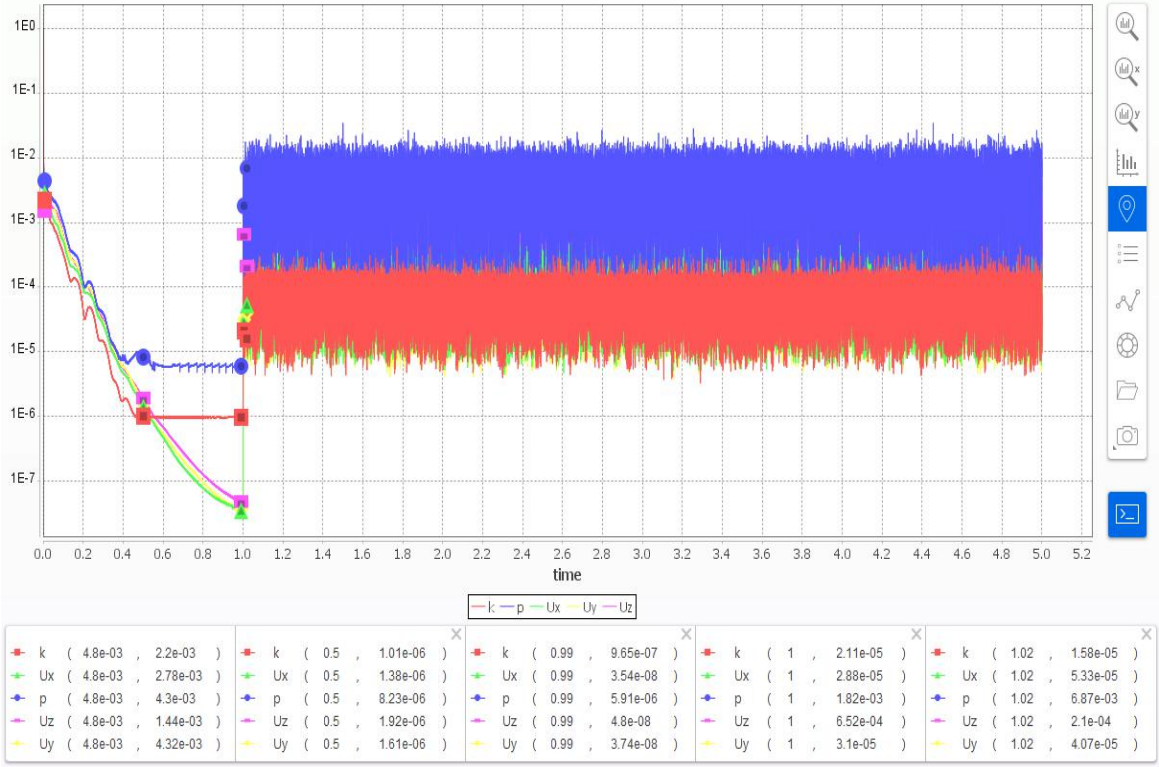

Figura 24 - Dados residuais para velocidade de injeção de 20 m/s. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a velocidade de injeção do fluido particulado a 20 m/s, na figura 24, também se observou resultados com alta oscilação das variáveis. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.78e-03, 4.08e-03 e 1.44e-03, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 1.38e-06, 1.61e-06 e 1.92e-06, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 3.54e-08, 3.74e-08 e 4.08e-08, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 2.88e-05, 3.1e-05 e 6.52e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 5.33e-05, 4.07e-05 e 2.01e-04.

Já para valores de pressão, temos: 4.03e-03, no início; 8.23e-06, em 0.5 segundos; 5.91e-06, em 0.99 segundos; 1.82e-03, no início da injeção de partículas; 6.87e-03, em 1.01 segundos.

6.1.2 Massa específica da fase discreta

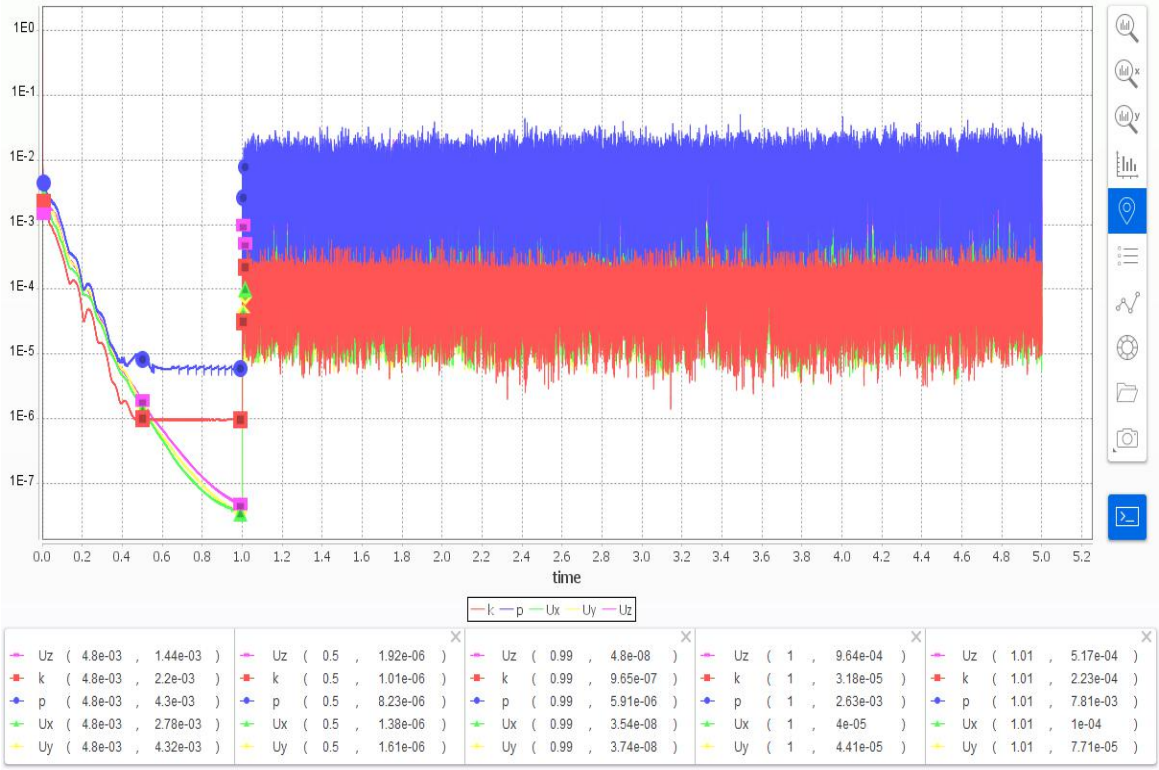

Figura 25 - Dados residuais para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, na figura 25, observou-se resultados com alta oscilação das variáveis. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.78e-03, 4.32e-03 e 1.44e-03, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 1.38e-06, 1.61e-06 e 1.92e-06, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 3.54e-08, 3.74e-08 e 4.08e-08, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 4e-05, 4.41e-05 e 9.64e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 1e-04, 7.71e-05 e 5.17e-04.

Já para valores de pressão, temos: 4.3e-03, no início; 8.23e-06, em 0.5 segundos; 5.91e-06, em 0.99 segundos; 2.63e-03, no início da injeção de partículas; 7.81e-03, em 1.01 segundos.

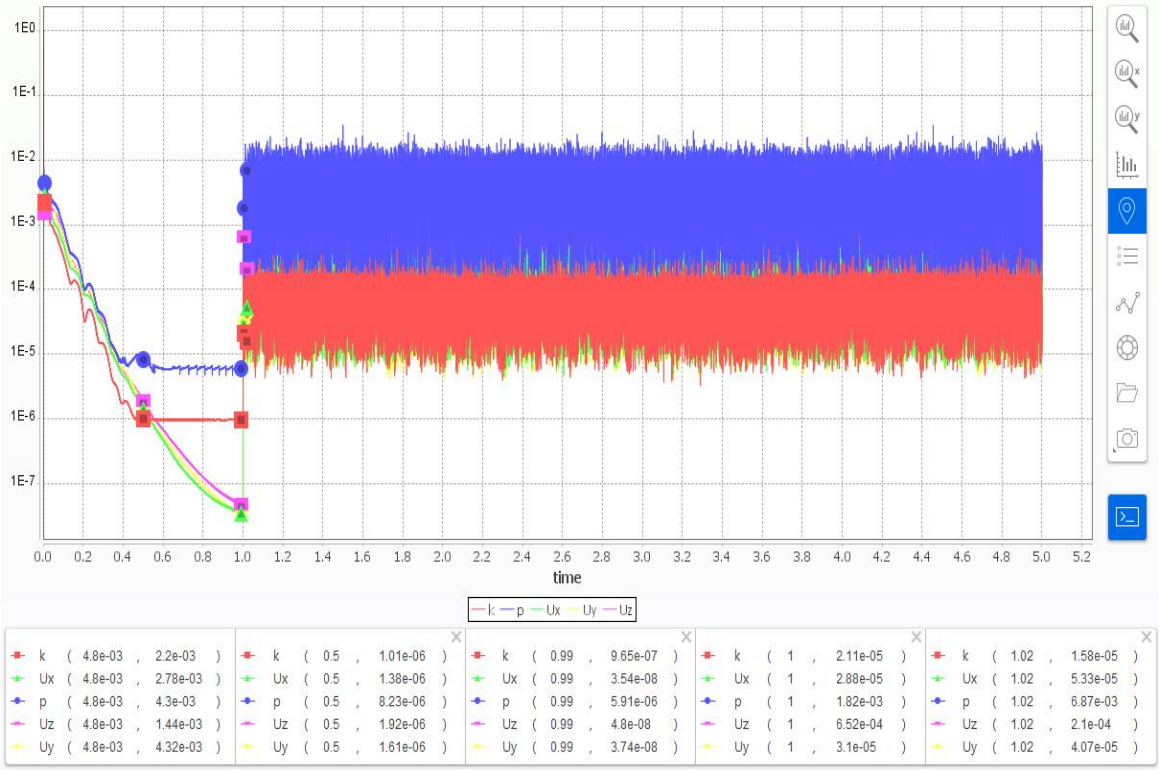

Figura 26 - Dados residuais para massa específica da fase discreta de 2500 kg/m³. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a massa específica da fase discreta de 2500 kg/m³, na figura 26, também se observou resultados com alta oscilação das variáveis. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.78e-03, 4.32e-03 e 1.44e-03, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 1.38e-06, 1.61e-06 e 1.92e-06, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 3.54e-08, 3.74e-08 e 4.8e-08, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 2.88e-05, 3.1e-05 e 6.52e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 5.33e-05, 4.07e-05 e 2.1e-04.

Já para valores de pressão, temos: 4.3e-03, no início; 8.23e-06, em 0.5 segundos; 5.91e-06, em 0.99 segundos; 1.82e-03, no início da injeção de partículas; 6.87e-03, em 1.01 segundos.

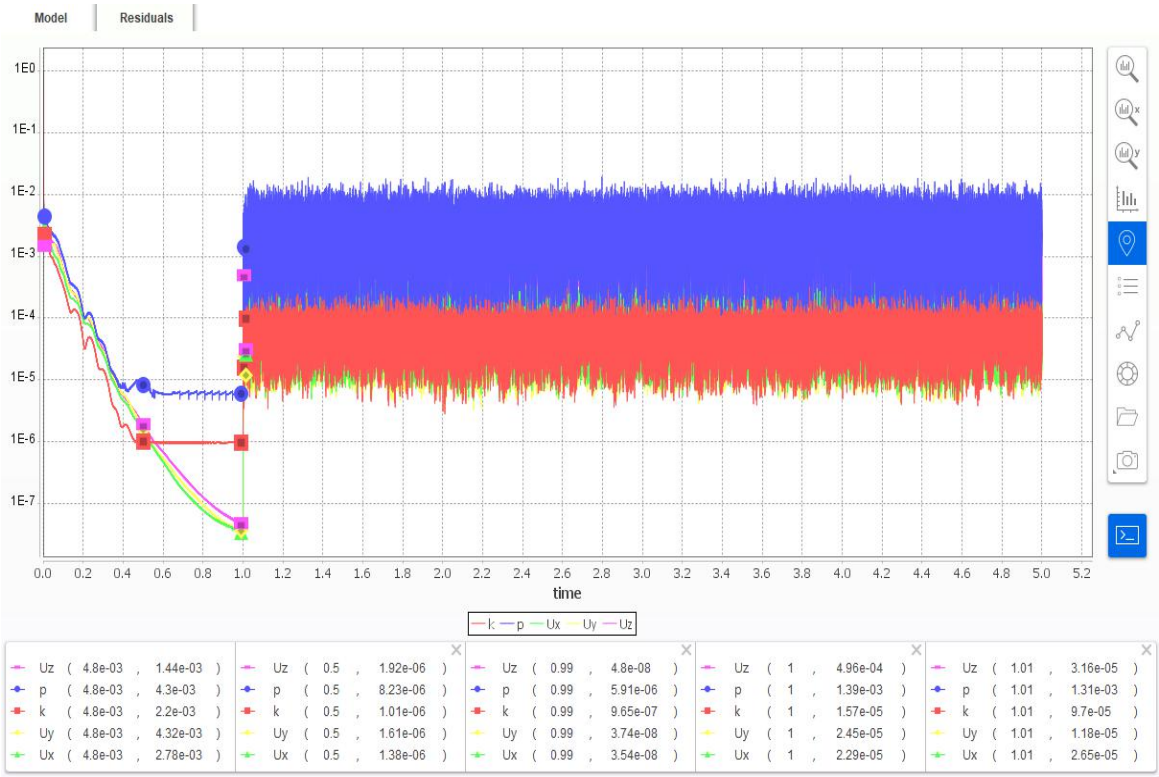

Figura 27 - Dados residuais para massa específica da fase discreta de 3334 kg/m³. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a massa específica da fase discreta de 3334 kg/m³, na figura 27, também se observou resultados com alta oscilação das variáveis. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.78e-03, 4.32e-03 e 1.44e-03, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 1.38e-06, 1.61e-06 e 1.92e-06, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 3.54e-08, 3.74e-08 e 4.8e-08, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 2.29e-05, 2.45e-05 e 4.96e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 2.65e-05, 1.18e-05 e 3.16e-04.

Já para valores de pressão, temos: 4.3e-03, no início; 8.23e-06, em 0.5 segundos; 5.91e-06, em 0.99 segundos; 1.39e-03, no início da injeção de partículas; 1.31e-03, em 1.01 segundos.

6.1.3 Massa total injetada da fase discreta

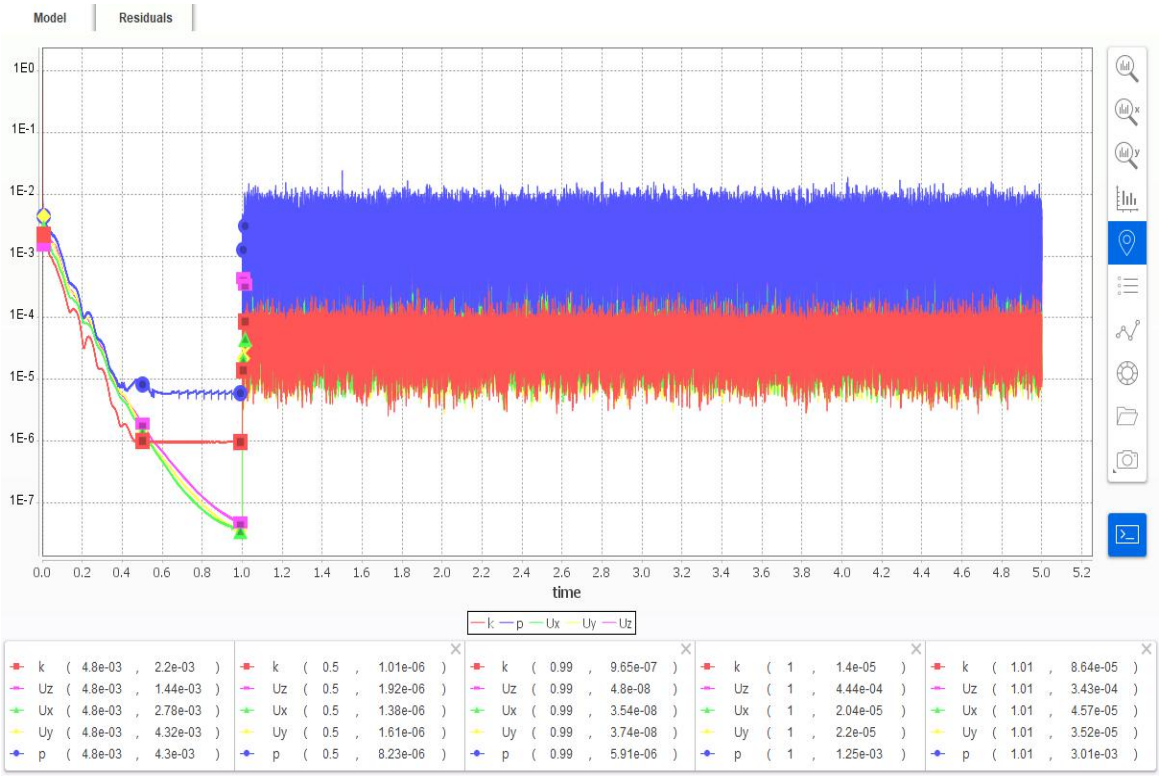

Figura 28 - Dados residuais para massa total injetada da fase discreta de 0.817 kg. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a massa total injetada da fase discreta a 0.817 kg, na figura 28, observou-se resultados com alta oscilação das variáveis. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.78e-03, 4.32e-03 e 1.44e-03, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 1.38e-06, 1.61e-06 e 1.92e-06, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 3.54e-08, 3.74e-08 e 4.8e-08, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 2.04e-05, 2.2e-05 e 2.44e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 4.57e-05, 3.52e-05 e 3.43e-04.

Já para valores de pressão, temos: 4.3e-03, no início; 8.23e-06, em 0.5 segundos; 5.91e-06, em 0.99 segundos; 1.25e-03, no início da injeção de partículas; 3.01e-03, em 1.01 segundos.

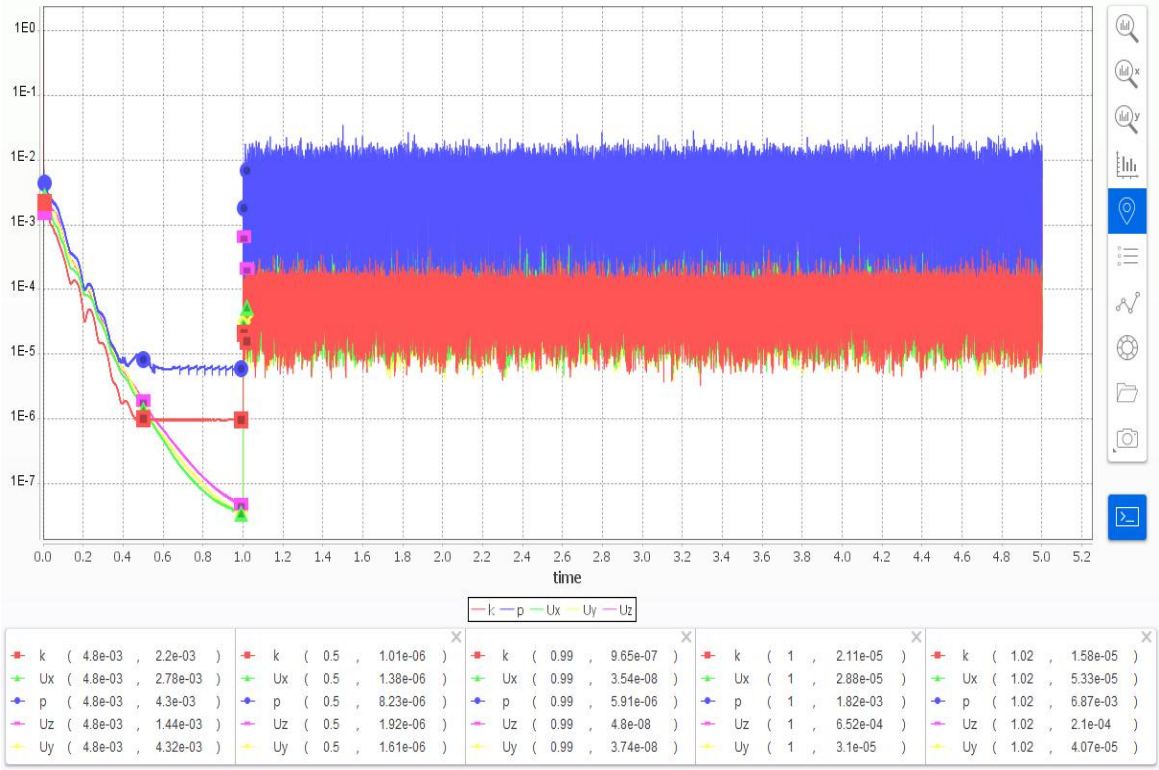

Figura 29 - Dados residuais para massa total injetada da fase discreta de 1.225 kg. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a massa total injetada da fase discreta a 1.225 kg, na figura 29, também se observou resultados com alta oscilação das variáveis. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.78e-03, 4.32e-03 e 1.44e-03, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 1.38e-06, 1.61e-06 e 1.92e-06, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 3.54e-08, 3.74e-08 e 4.8e-08, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 2.88e-05, 3.1e-05 e 6.52e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 5.33e-05 m/s, 4.07e-05 e 2.1e-04.

Já para valores de pressão, temos: 4.3e-03, no início; 8.23e-06, em 0.5 segundos; 5.91e-06, em 0.99 segundos; 1.82e-03, no início da injeção de partículas; 6.87e-03, em 1.01 segundos.

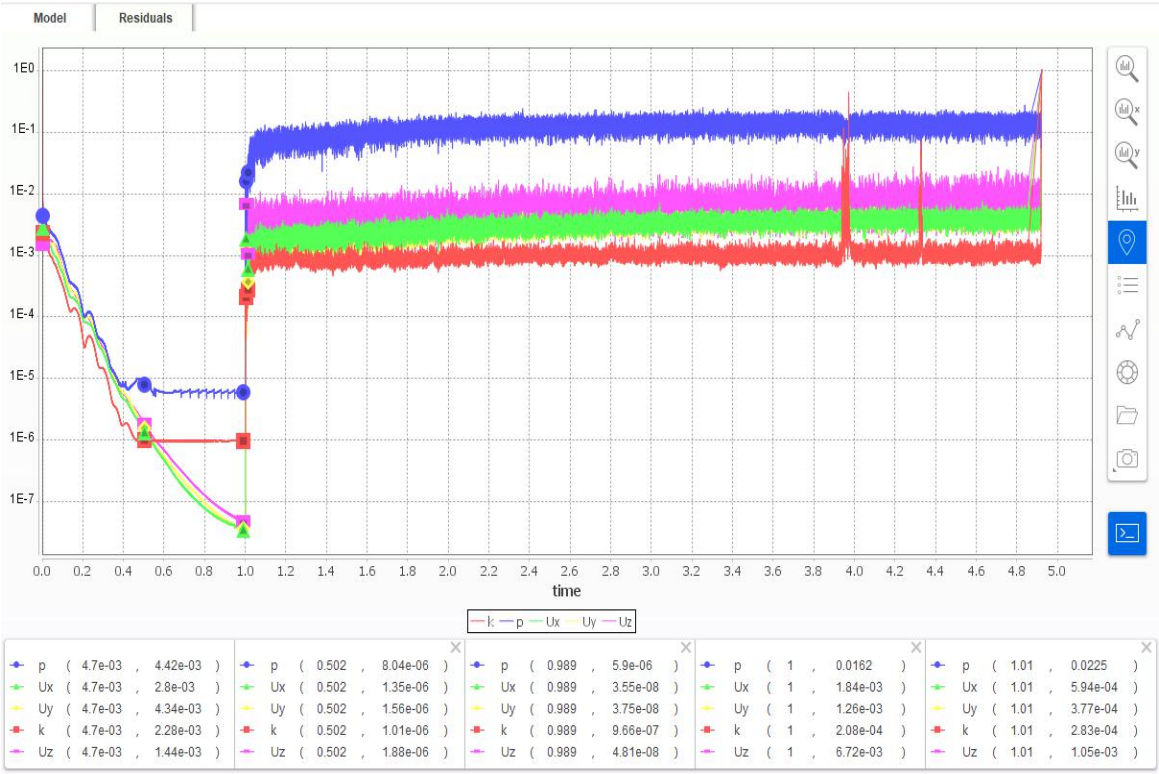

Figura 30 - Dados residuais para massa total injetada da fase discreta de 1.633 kg. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a massa total injetada da fase discreta a 1.633 kg, na figura 30, observou-se queda brusca no comportamento oscilatório das variáveis analisadas. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.8e-03, 4.34e-03 e 1.44e-03, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 1.35e-06, 3.75e-08 e 4.81e-08, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 3.55e-08, 3.75e-08 e 4.81e-08, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 1.84e-03, 1.26e-03 e 6.72e-03, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 5.94e-04, 3.77e-04 e 1.05e-03.

Já para valores de pressão, temos: 4.42e-03, no início; 8.04e-06, em 0.5 segundos; 5.9e-05, em 0.99 segundos; 0.0162, no início da injeção de partículas; 0.0225e-03, em 1.01 segundos.

6.1.4 Distribuição granulométrica de partículas

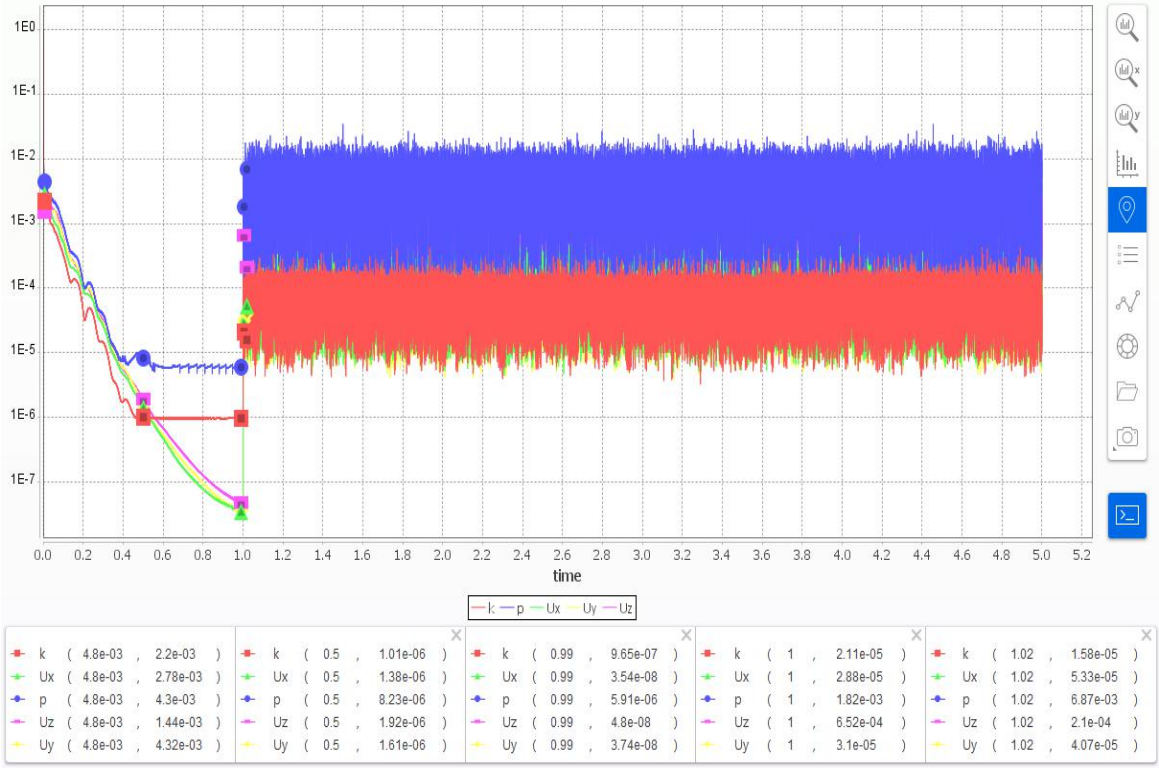

Figura 31 - Dados residuais para distribuição granulométrica inicial. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a distribuição granulométrica inicial, na figura 31, observou-se resultados com alta oscilação das variáveis. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.78e-03, 4.32e-03 e 1.44e-03, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 1.38e-06, 1.61e-06 e 1.92e-06, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 3.54e-08, 3.74e-08 e 6.52e-04, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 2.88e-05, 3.1e-05 e 6.52e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 5.33e-05, 4.07e-05 e 2.1e-04.

Já para valores de pressão, temos: 4.3e-03, no início; 8.23e-06, em 0.5 segundos; 5.91e-05, em 0.99 segundos; 1.82e-03, no início da injeção de partículas; 6.87e-03, em 1.01 segundos.

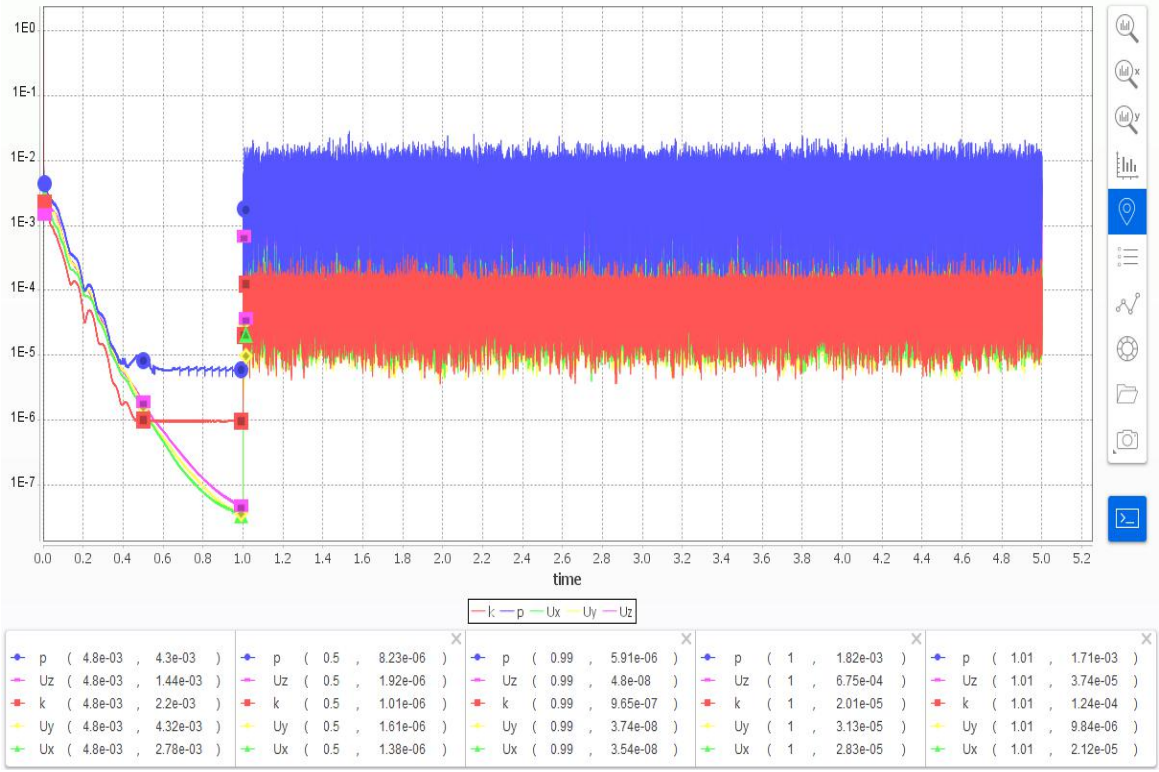

Figura 32 - Dados residuais para distribuição granulométrica inicial aumentada em 50%. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a distribuição granulométrica inicial aumentada em 50%, na figura 32, também se observou resultados com alta oscilação das variáveis. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.78e-03, 4.32e-03 e 1.44e-04, no início do processo. Para o instante 0.5 segundos, 1.38e-06, 1.61e-06 e 1.92e-06, respectivamente. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 3.54e-08, 3.74e-08 e 4.8e-08, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 2.83e-05, 3.13e-05 e 6.75e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 2.12e-05, 9.84e-06 e 3.74e-05.

Já para valores de pressão, temos: 4.3e-03, no início; 8.23e-06, em 0.5 segundos; 5.91e-06, em 0.99 segundos; 1.82e-03, no início da injeção de partículas; 1.71e-03, em 1.01 segundos.

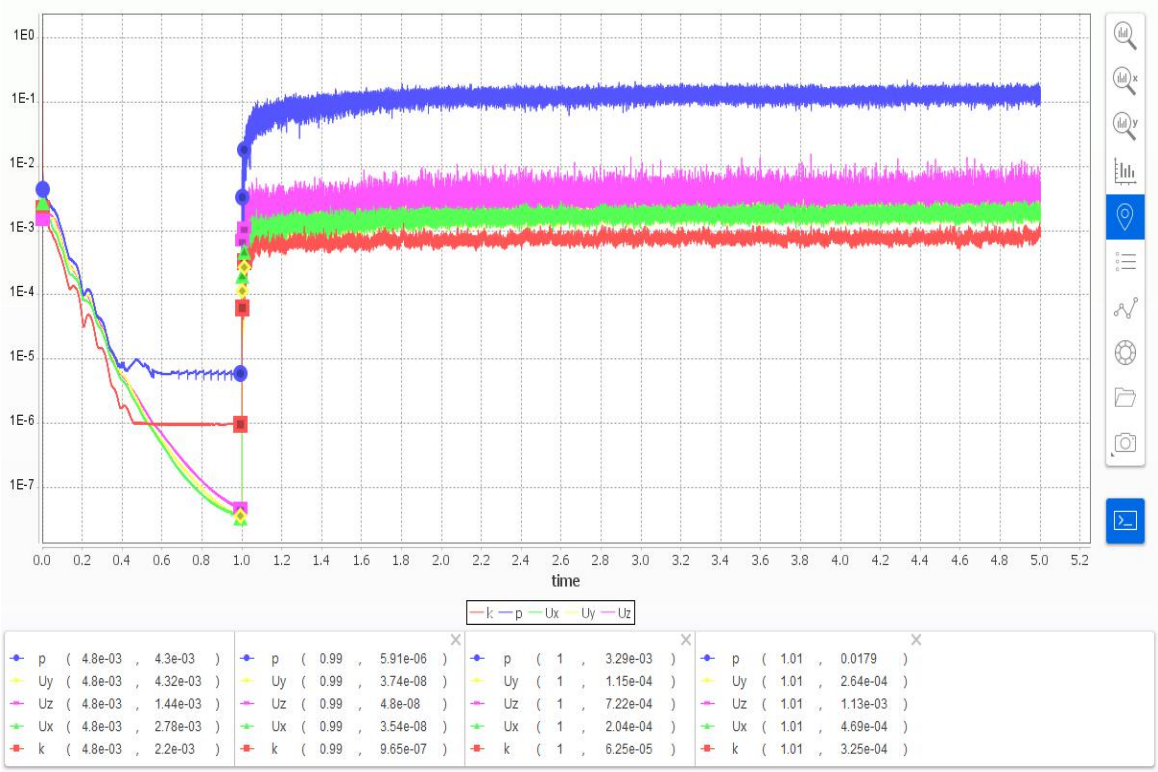

Figura 33 - Dados residuais para distribuição granulométrica inicial aumentada em 100%. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Para a distribuição granulométrica inicial aumentada em 100%, na figura 33, observou-se queda brusca no comportamento oscilatório das variáveis analisadas. Os valores de U (velocidade) nas direções x, y e z, foram, respectivamente, 2.78e-03, 4.32e-03 e 1.44e-03, no início do processo. Para o instante logo antes da injeção de partículas, observou-se o seguinte, 3.54e-08, 3.74e-08 e 4.8e-08, respectivamente. No instante de injeção das partículas, os valores de U nas direções x, y e z, passaram a 2.04e-04, 1.15e-04 e 7.22e-04, respectivamente. Já para o primeiro momento logo após a injeção das partículas (1.01 segundos), temos 4.69e-04, 2.64e-04 e 1.13e-03.

Já para valores de pressão, temos: 4.3e-03; 5.91e-06, em 0.99 segundos; 3.29e-03, no início da injeção de partículas; 0.0179, em 1.01 segundos.

6.2 Pressão x Tempo

O comportamento da pressão, ao longo do processo de separação de areia do Gás Propano, mostrou-se condizente com a imprevisibilidade apontada pela literatura. Todos os gráficos abaixo, representam esse comportamento para todas as variações de parâmetros realizadas, confirmando a inexistência de um padrão de comportamento ao longo do tempo, a não ser pela coleta de dados de faixas de operação máxima e mínima.

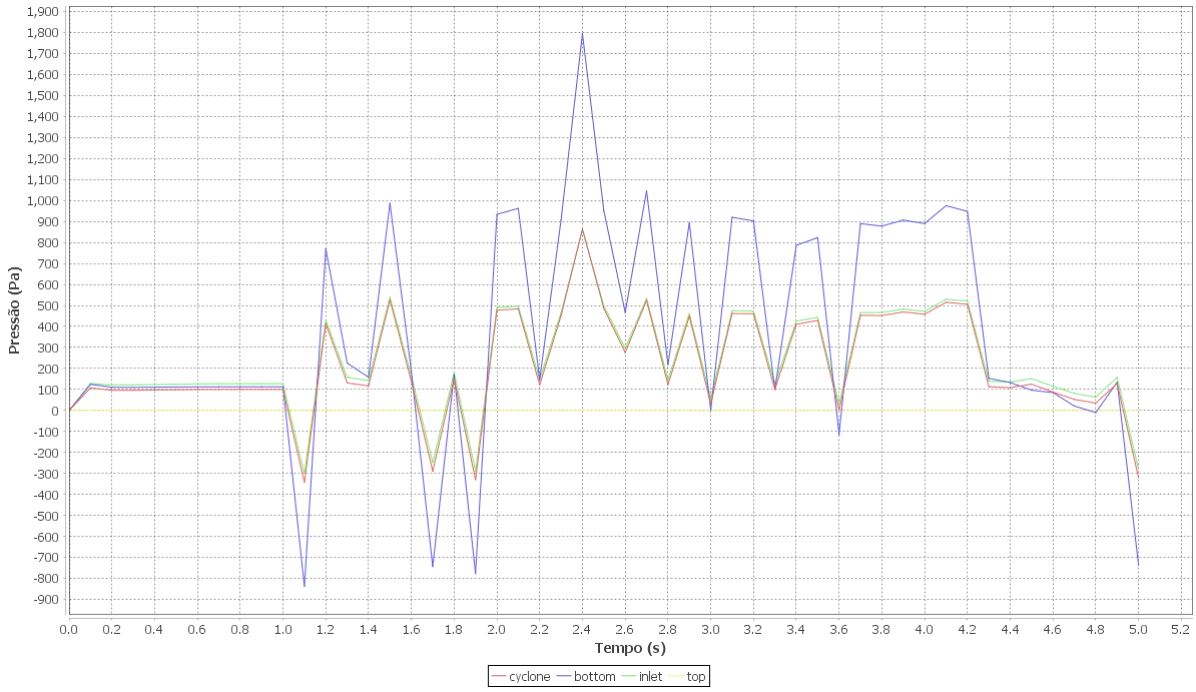

Figura 34 - Comportamento da pressão com velocidade de injeção a 10 m/s. Fonte: (O AUTOR, 2018)

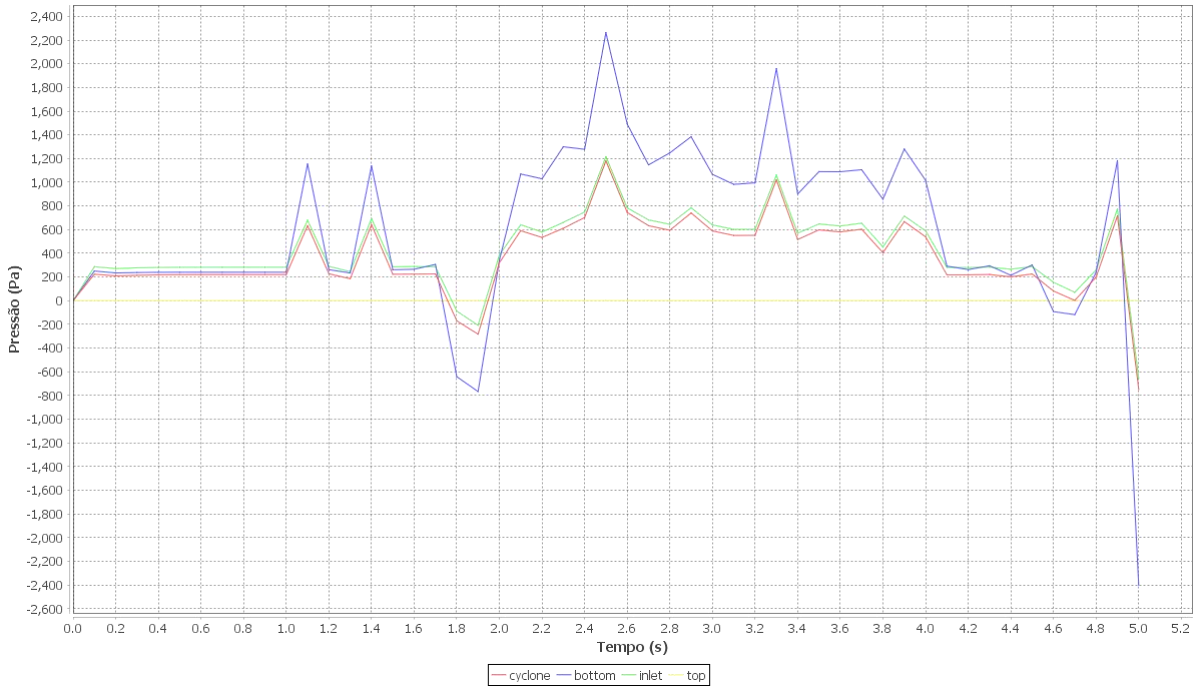

Figura 35 - Comportamento da pressão com velocidade de injeção a 15 m/s. Fonte: (O AUTOR, 2018)

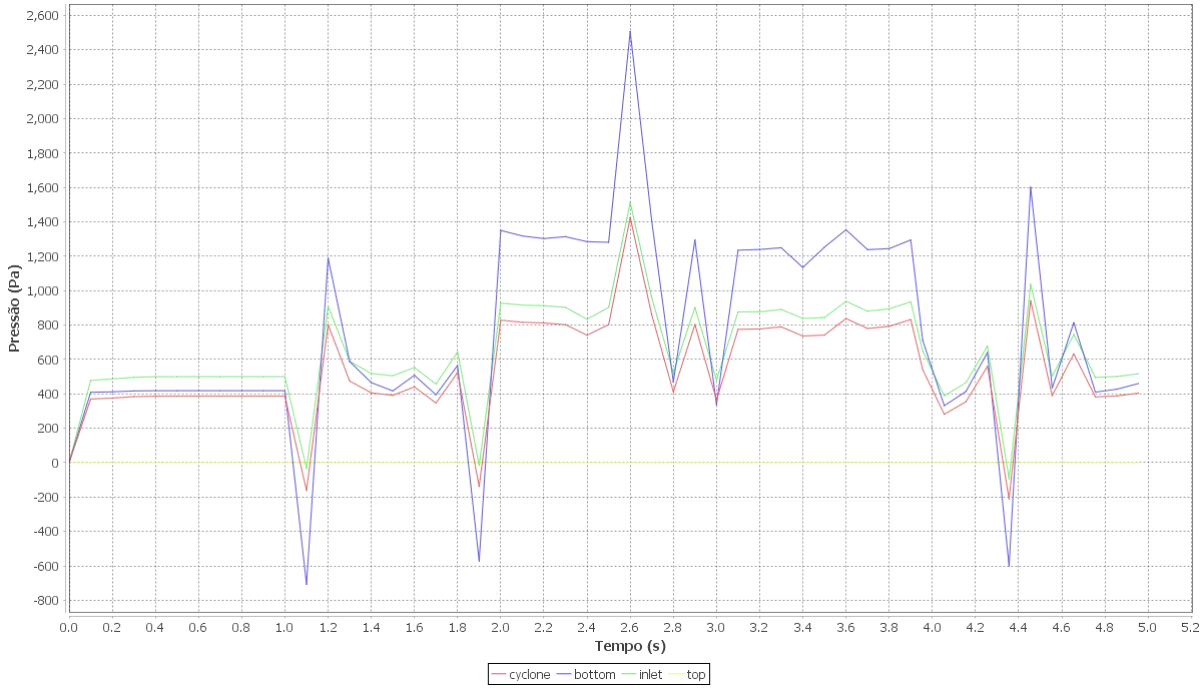

Figura 36 - Comportamento da pressão com a velocidade de injeção a 20 m/s. Fonte:

(O AUTOR, 2018)

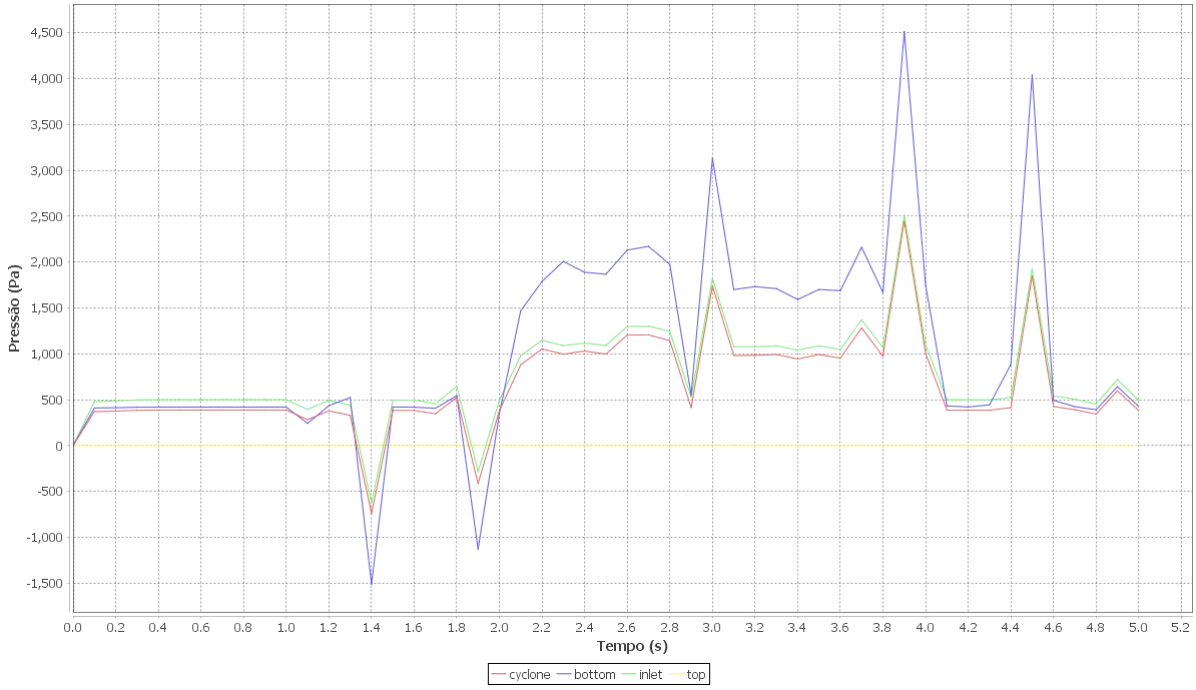

Figura 37 - Comportamento da pressão com a massa específica da fase discreta a 1667 kg/m³ . Fonte: (O AUTOR, 2018)

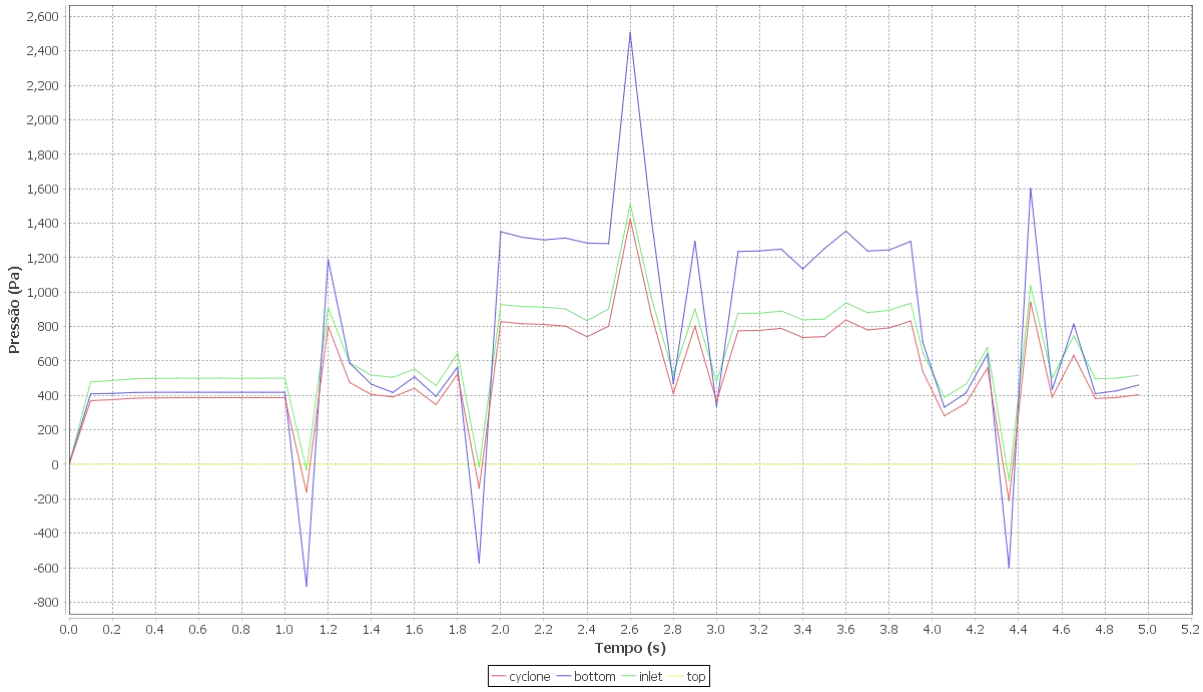

Figura 38 - Comportamento da pressão com a massa específica da fase discreta a 2500 kg/m³. Fonte: (O AUTOR, 2018)

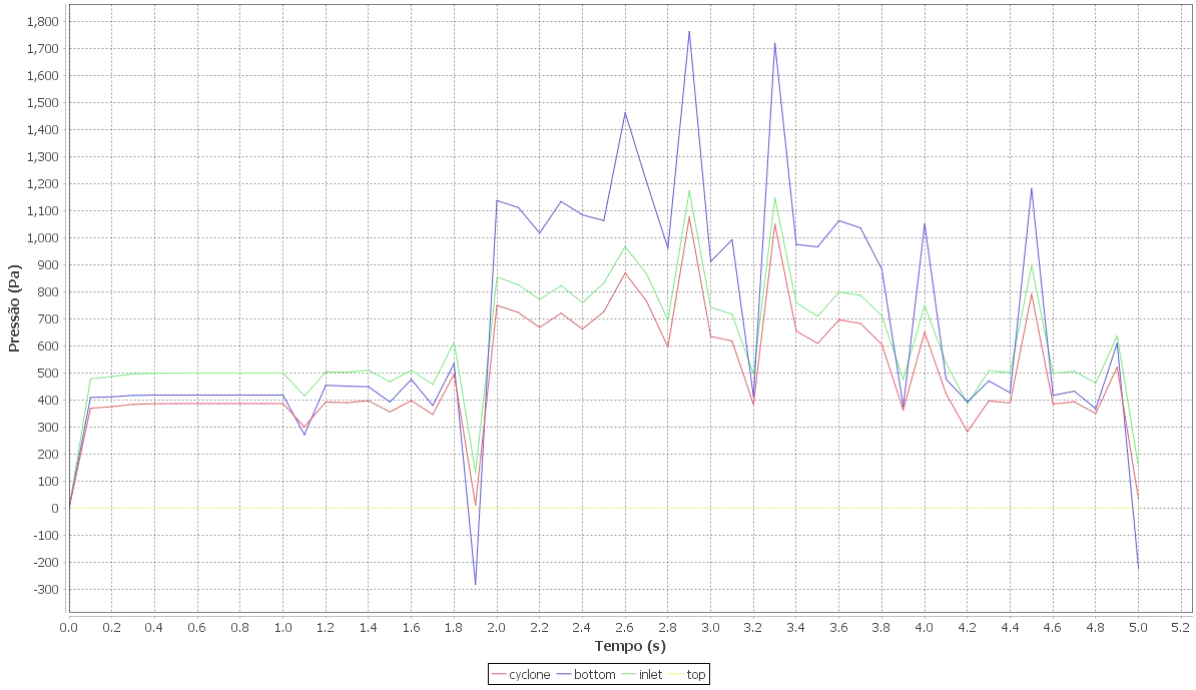

Figura 39 - Comportamento da pressão com a massa específica da fase discreta a 3334 kg/m³. Fonte: (O AUTOR, 2018)

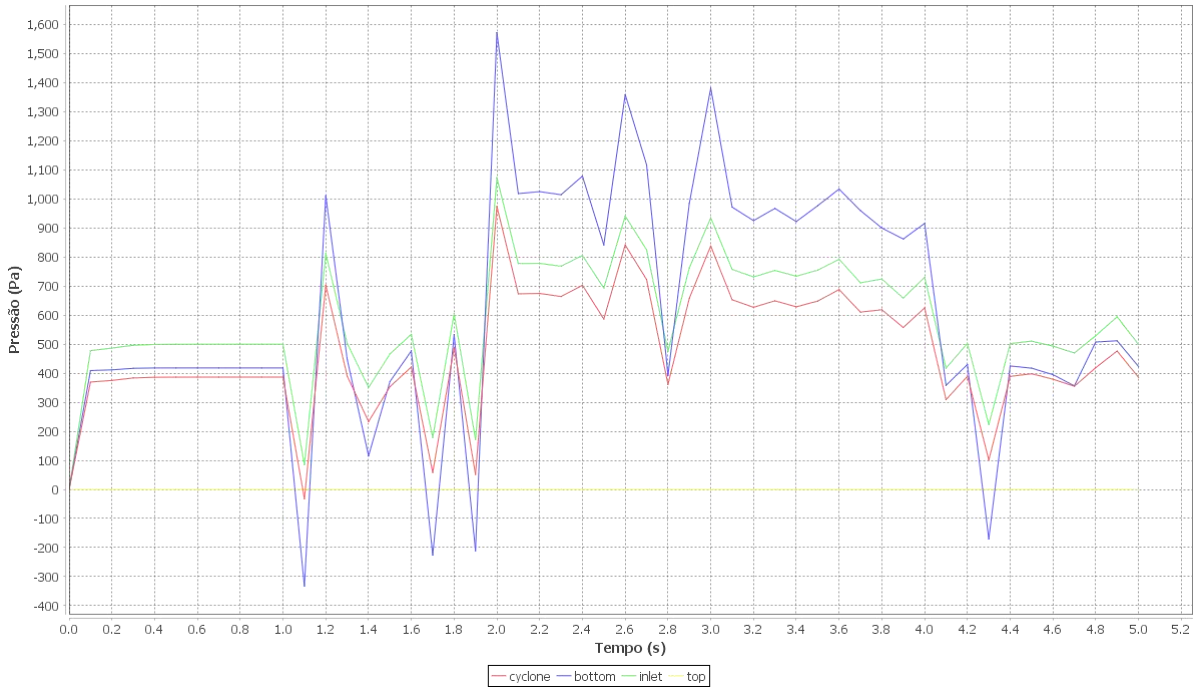

Figura 40 - Comportamento da pressão com a massa total injetada da fase discreta a 0.817 kg. Fonte: (O AUTOR, 2018)

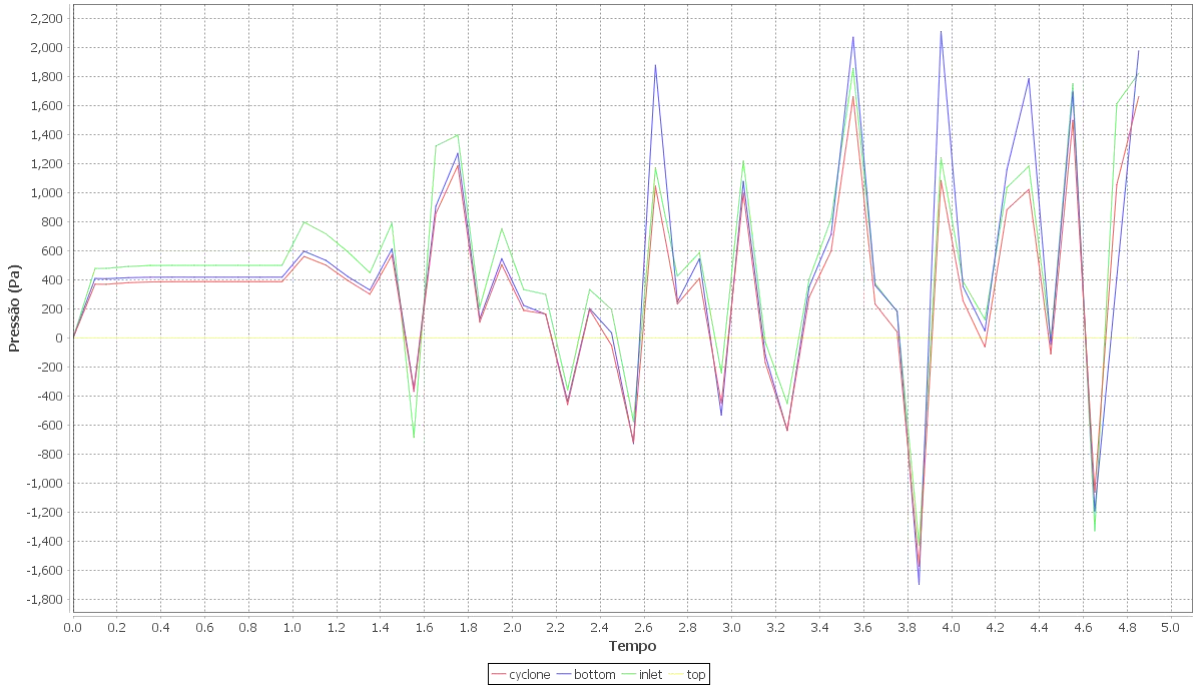

Figura 41 - Comportamento da pressão com a massa total injetada da fase discreta a 1.225 kg . Fonte: (O AUTOR, 2018)

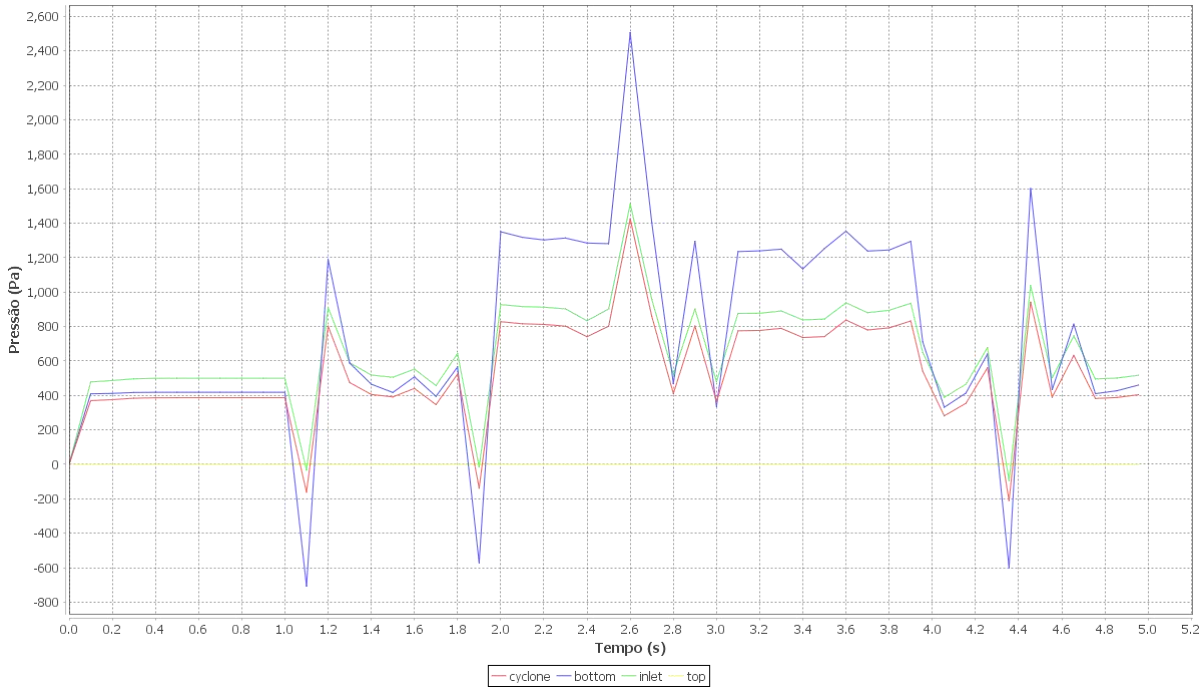

Figura 42 - Comportamento da pressão com a massa total injetada da fase discreta a 1.633 kg. Fonte: (O AUTOR, 2018)

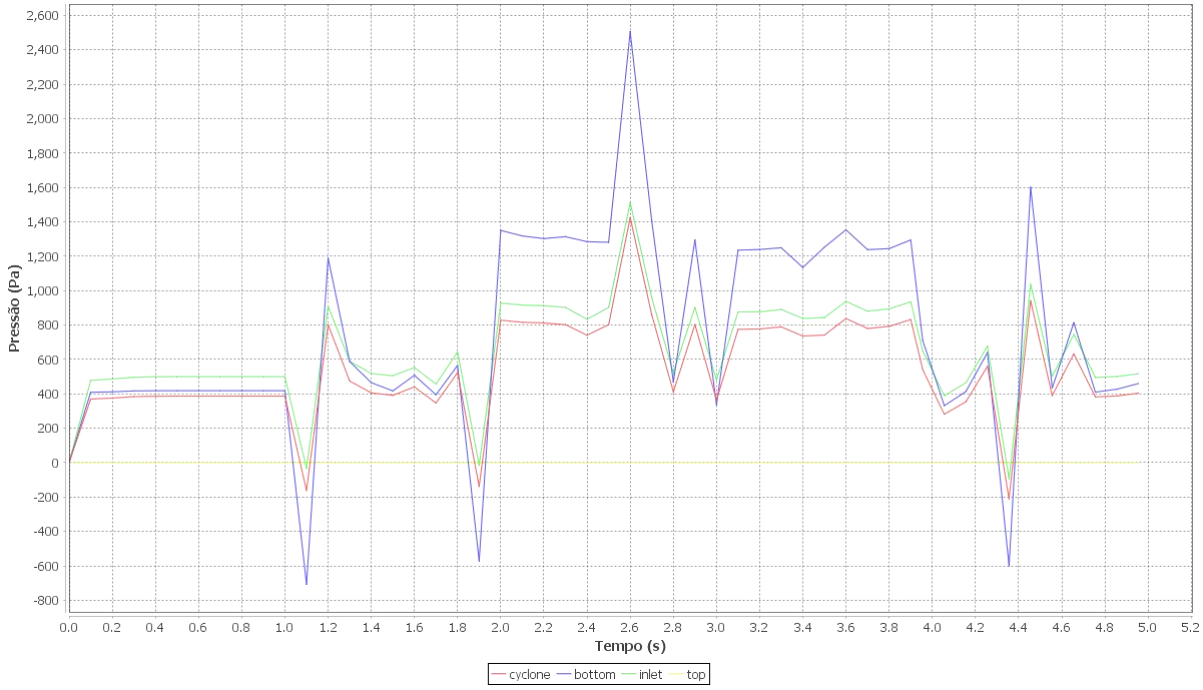

Figura 43 - Comportamento da pressão com a distribuição granulométrica básica. Fonte: (O AUTOR, 2018)

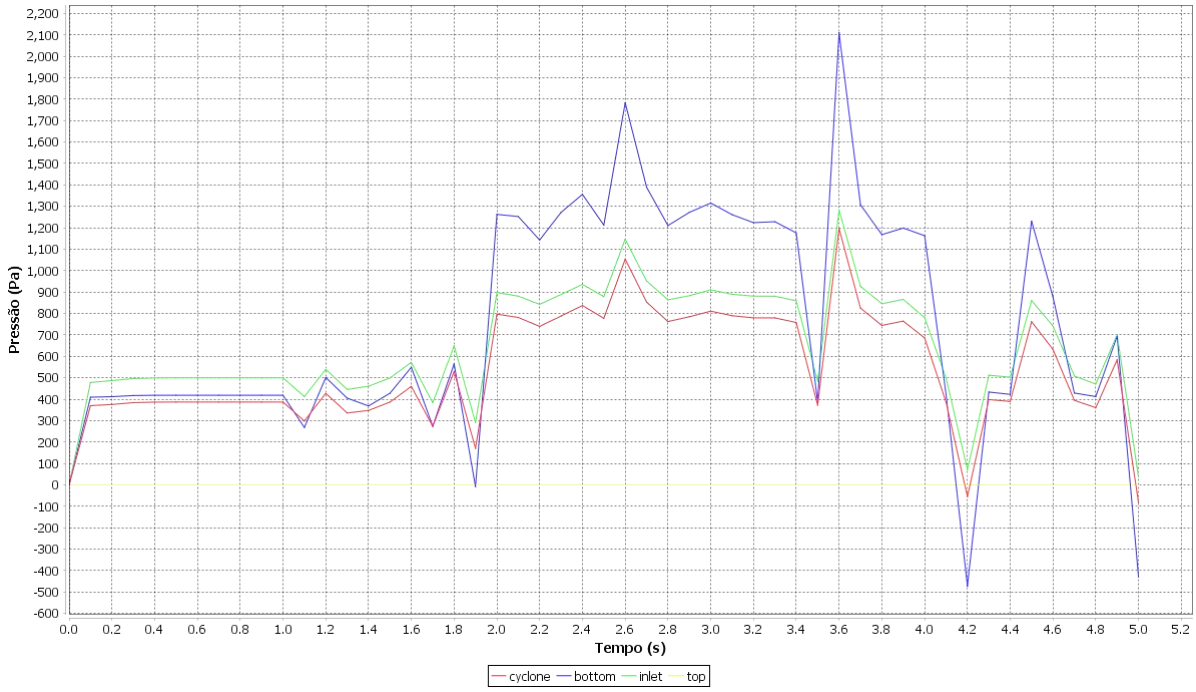

Figura 44 - Comportamento da pressão com a distribuição granulométrica básica aumentada em 50%. Fonte: (O AUTOR, 2018)

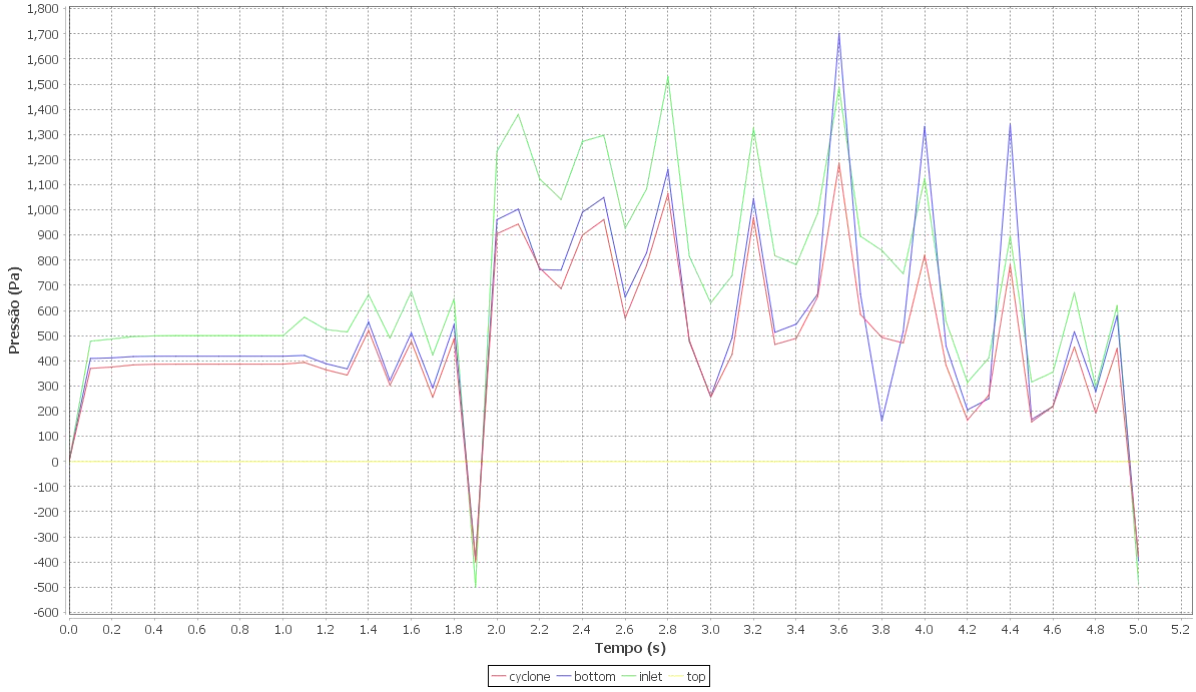

Figura 45 - Comportamento da pressão com a distribuição granulométrica básica aumentada em 100% . Fonte: (O AUTOR, 2018)

6.3 *ParaView*

Para análise dos modelos gerados pelo *ParaView*, não foi considerada uma escala que abrangesse todos as simulações, devido à aproximação da escala para a faixa de operação de cada simulação individualmente. Em outras palavras, cada separador com suas configurações únicas, possui sua própria escala, não podendo assim, ser criada uma escala que abrangesse todas as simulações. As figuras 46 a 69 mostram os resultados obtidos pelo *ParaView.*

6.3.1 Velocidade de injeção

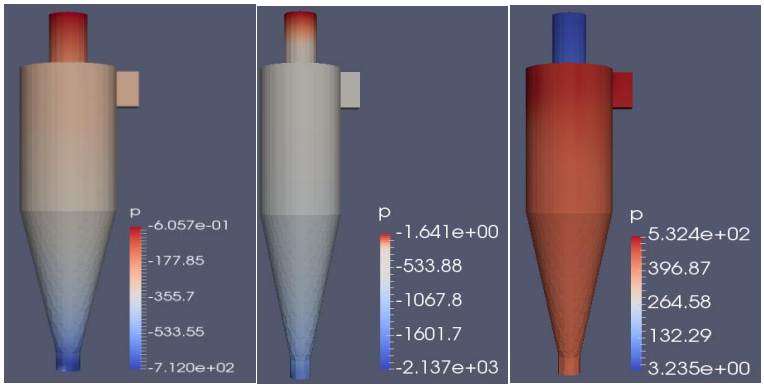

Figura 46 - Modelo de pressão na estrutura do Separador para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

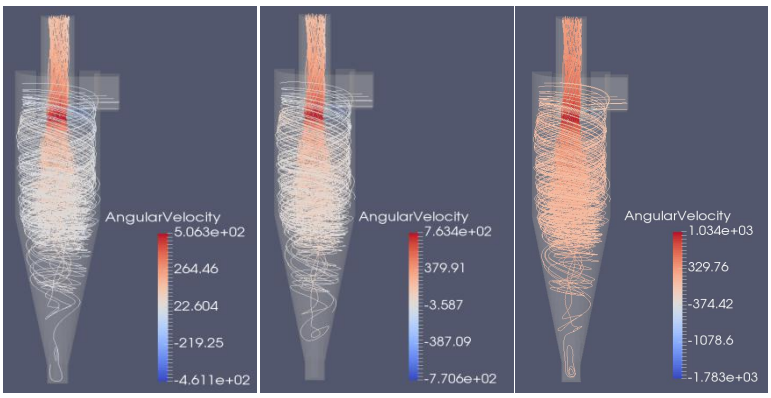

Figura 47 - Modelo de velocidade angular do fluido para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

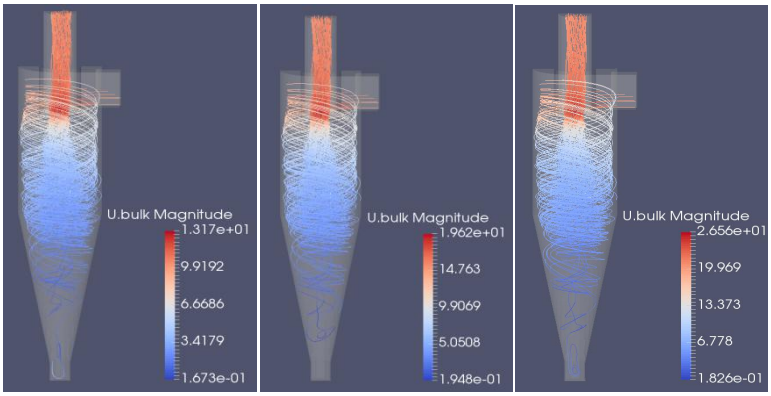

Figura 48 - Modelo de velocidade resultante do fluido para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

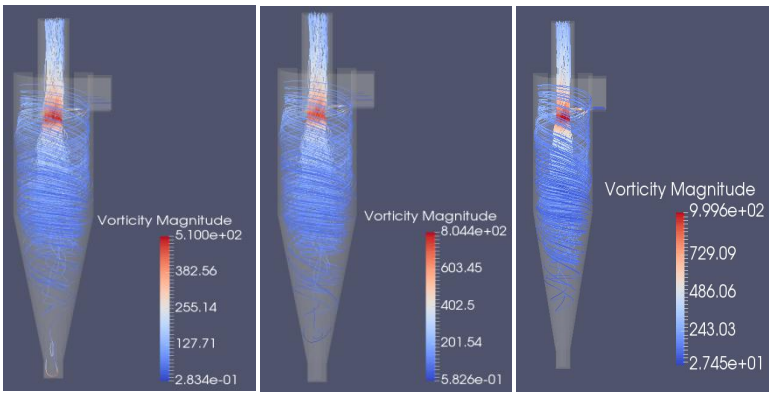

Figura 49 - Modelo de vorticidade do fluido para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

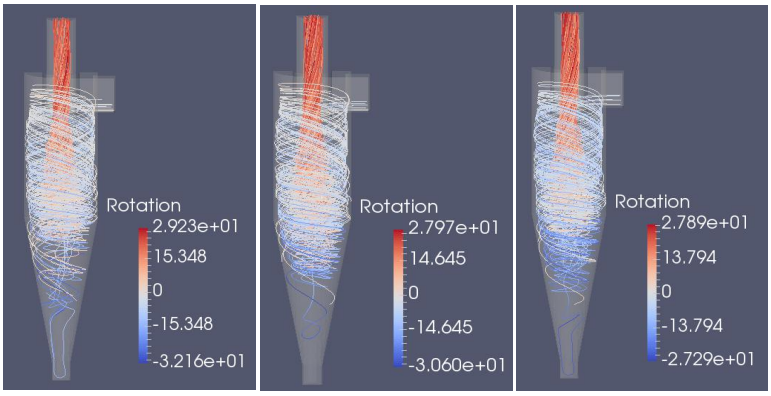

Figura 50 - Modelo de rotação do fluido para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

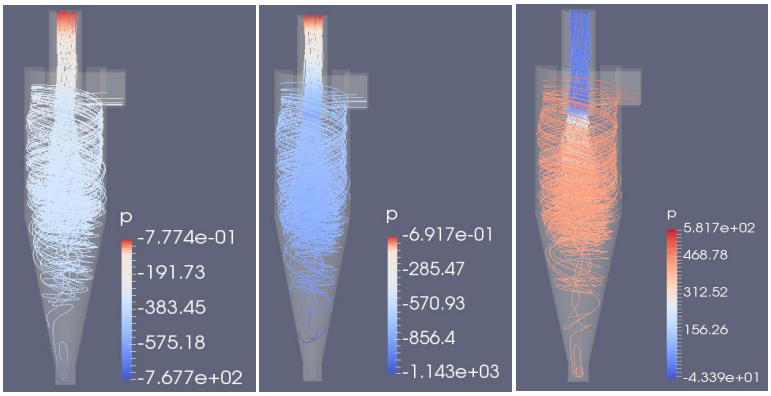

Figura 51 - Modelo de pressão do fluido para velocidade de 10 m/s, 15 m/s e 20 m/s, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Observou-se um aumento na pressão tanto por parte do fluido quanto nas paredes do separador, com o aumento da velocidade de injeção do fluido. O mesmo comportamento foi observado para a vorticidade, velocidade resultante, velocidade angular. Os dados de rotação do fluido permaneceram, consideravelmente, constantes.

6.3.2 Massa específica da fase discreta

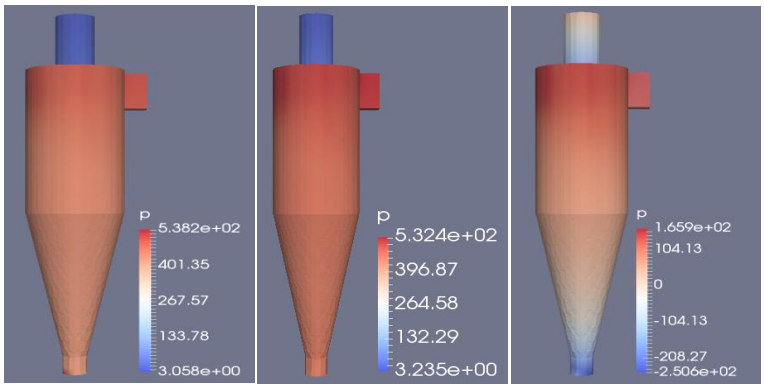

Figura 52 - Modelo de pressão da estrutura do Separador para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

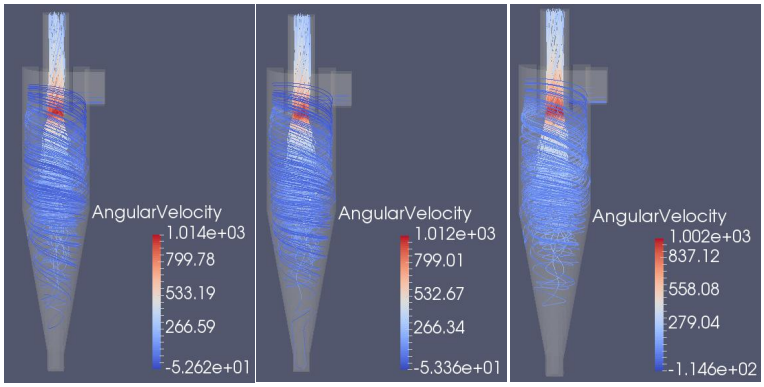

Figura 53 - Modelo de velocidade angular para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

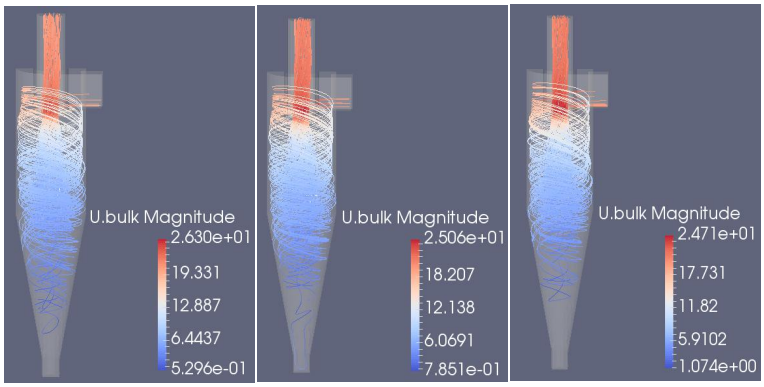

Figura 54 - Modelo de velocidade resultante do fluido para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

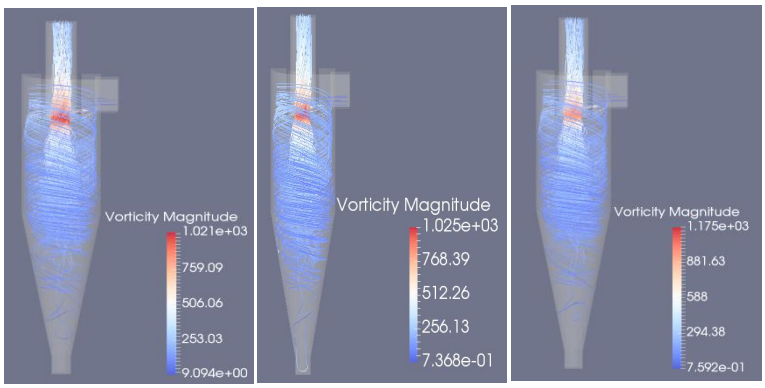

Figura 55 - Modelo de vorticidade do fluido para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

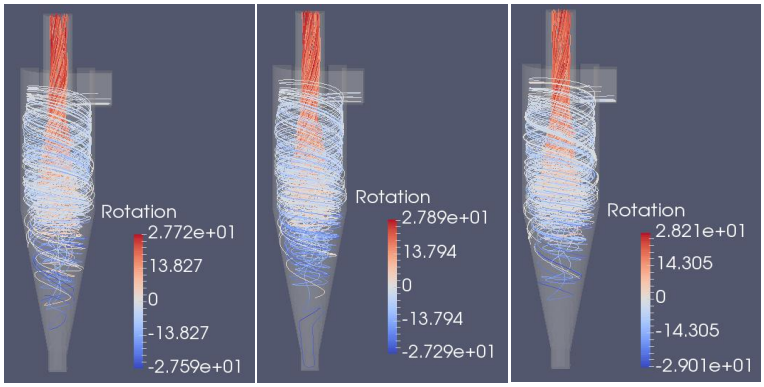

Figura 56 - Modelo de rotação do fluido para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

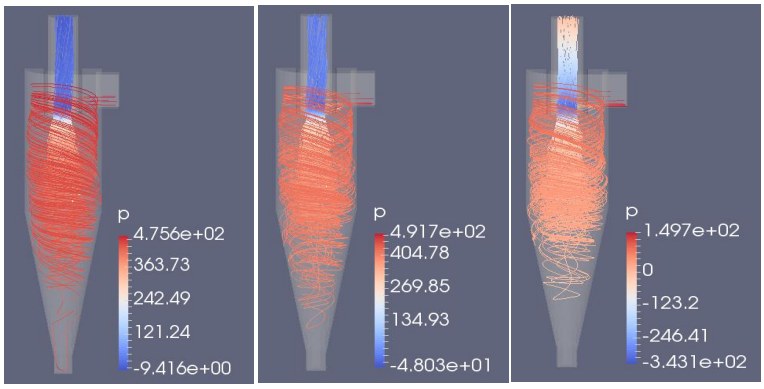

Figura 57 - Modelo de pressão do fluido para massa específica da fase discreta de 1667 kg/m³, 2500 kg/m³ e 3334 kg/m³, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Observou-se uma queda na pressão nas paredes do separador, com o aumento da massa específica da fase discreta. O mesmo comportamento de queda foi observado para a velocidade resultante, velocidade angular. Porém, houve aumento de pressão por parte do fluido, vorticidade e rotação.

6.3.3 Massa total injetada da fase discreta

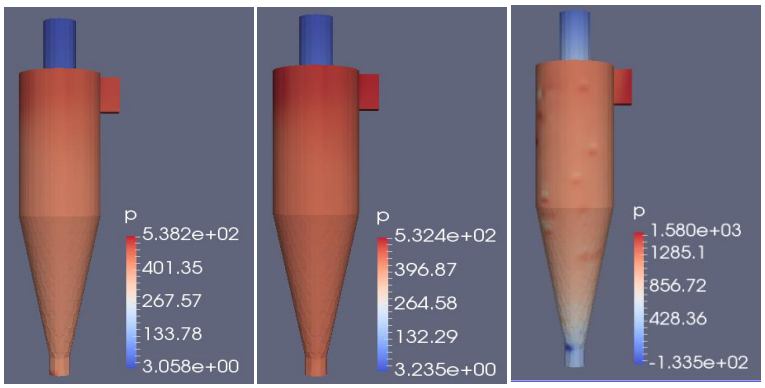

Figura 58 - Modelo de pressão da estrutura do Separador para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

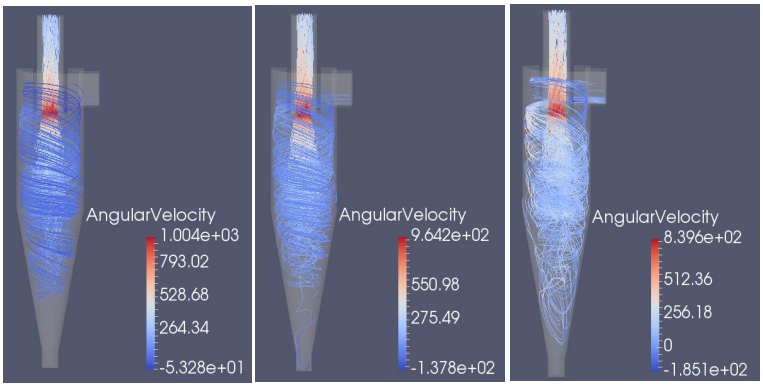

Figura 59 - Modelo de velocidade angular do fluido para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

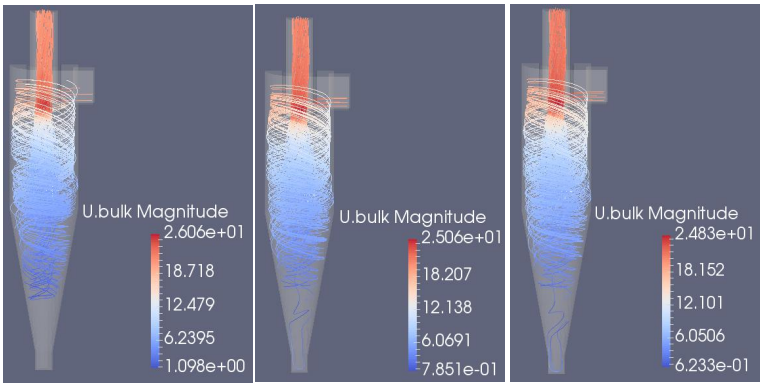

Figura 60 - Modelo de velocidade resultante do fluido para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

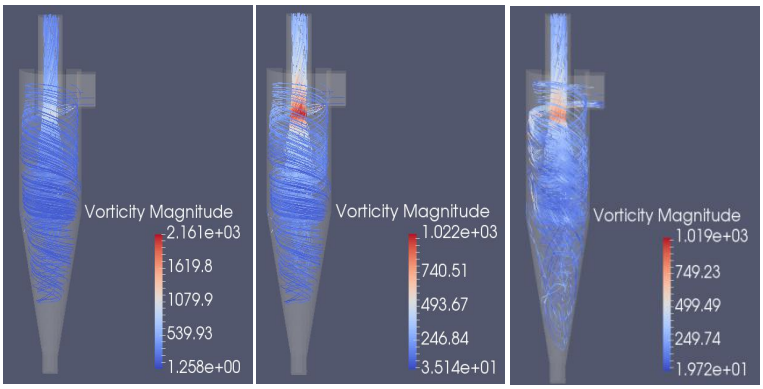

Figura 61 - Modelo de vorticidade do fluido para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

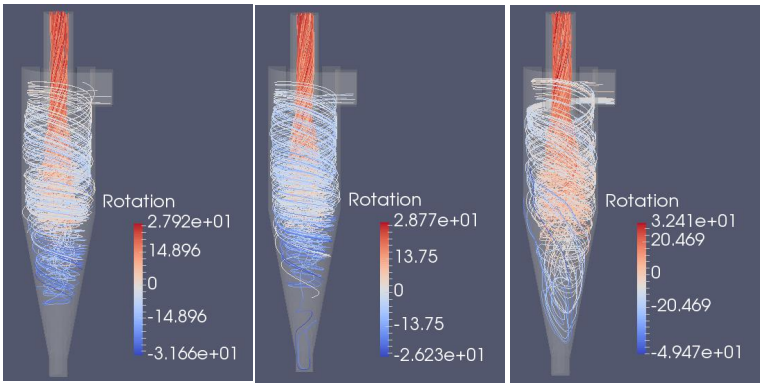

Figura 62 - Modelo de rotação do fluido para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

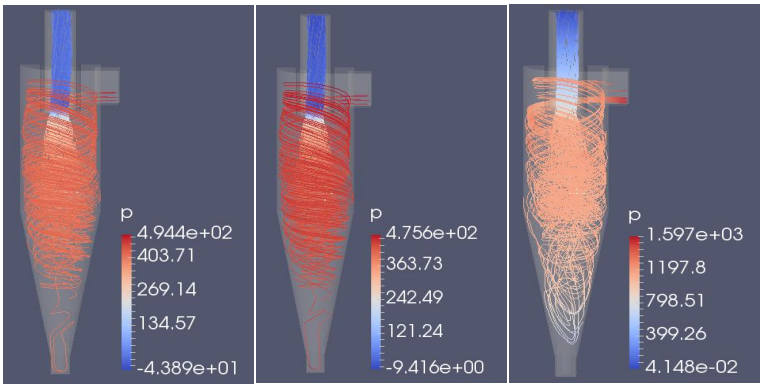

Figura 63 - Modelo de pressão do fluido para massa total injetada de 0.817 kg, 1.225 kg e 1.633 kg, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Observou-se um aumento na pressão nas paredes do separador, com o aumento da massa total injetada da fase discreta. Houve queda na velocidade resultante, velocidade angular, vorticidade. Porém, houve aumento de rotação. A pressão por parte do fluido apresentou dados que não indicavam o comportamento da variável, diminuindo para massa de 1.225 kg e aumentando para a massa de 1.633 kg.

6.3.4 Distribuição granulométrica de partículas

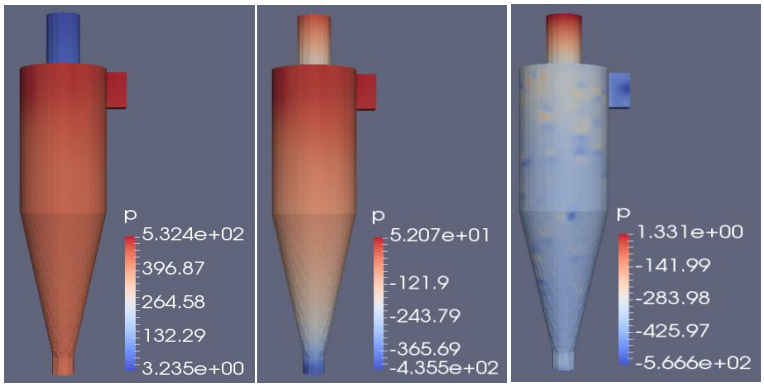

Figura 64 - Modelo de pressão na estrutura do Separador para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

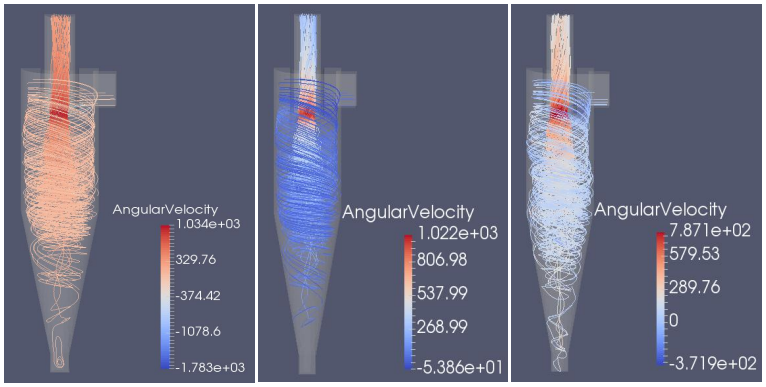

Figura 65 - Modelo de velocidade angular do fluido para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

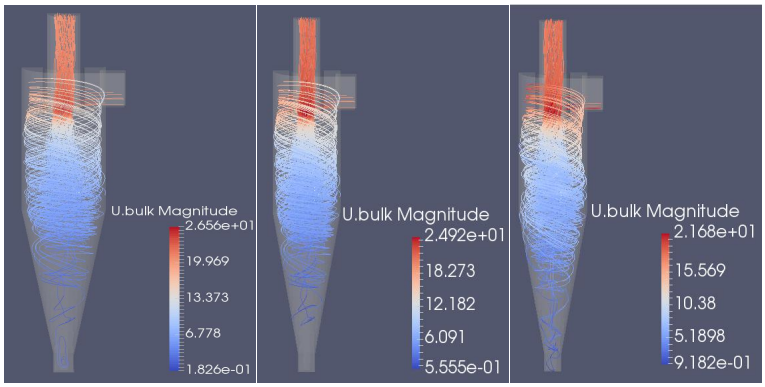

Figura 66 - Modelo de velocidade resultante do fluido para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

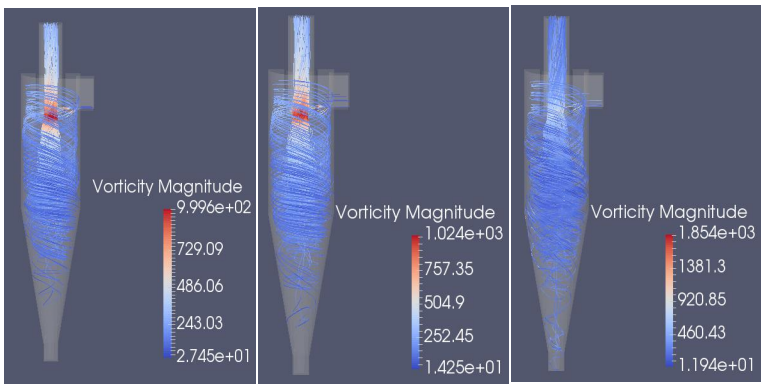

Figura 67 - Modelo de vorticidade do fluido para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

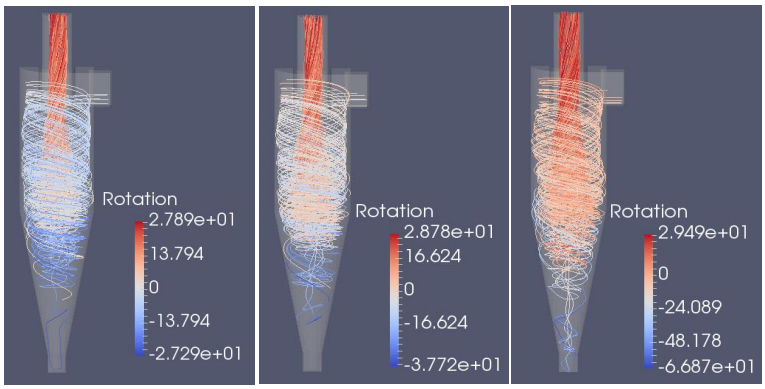

Figura 68 - Modelo de rotação do fluido para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

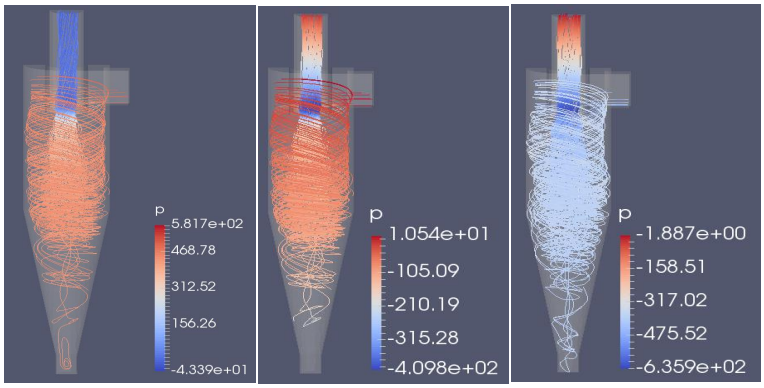

Figura 69 - Modelo de pressão do fluido para distribuição granulométrica inicial, inicial aumentada em 50% e inicial aumentada em 100%, respectivamente. Fonte: (O AUTOR, 2018)

Observou-se uma queda na pressão nas paredes do separador e do fluido, com o aumento da distribuição granulométrica. A vorticidade e a rotação do fluido apresentaram elevação. Porém, houve queda para a velocidade angular e velocidade resultante.

6.4 Previsão de comportamento para projetos de Monitoramento e Engenharia de Processos

Os resultados apresentados pelos gráficos residuais apontam para previsões de comportamento do separador e do fluido como visto nos modelos resultantes originados pelo software *ParaView*.

No que diz respeito à velocidade com que o fluido particulado é injetado, pode-se constatar que materiais mais resistentes para as paredes do separador devem ser considerados, uma vez que a pressão das paredes do separador, bem como do fluido internamente, tende a aumentar. Isso influencia diretamente no coeficiente de resistência do material empregado para as paredes do Separador, assim como sua resistência ao fluido proposto e características físicas e químicas das partículas produzidas. Já para o comportamento de vorticidade, o qual também é elevado segundo aumento da velocidade de injeção, pode-se considerar que eixos de estabilização do Separador devem ser pensados para o centro do mesmo, uma vez que é vórtice criado, eleva a pressão pelo eixo Z com maior valor no centro do Separador. Não foram encontrados pontos inflexão que gerassem riscos à segurança de trabalho para as velocidades analisadas.

Quando o fluido apresentou partículas de massa específica mais elevadas, constatou-se que o material de escolha para fabricação do Separador não necessariamente deve ser analisado pelo quesito resistência ao esforço por tensão, mas sim por resistência a corrosão

por parte das partículas de areia. Isso deve-se ao fato de que quanto mais pesadas as partículas forem, mais resistentes são e, consequentemente, tornam-se agentes corrosivos. O aumento na pressão interior do Separador confirma tal suposição. As velocidades sofreram queda, possibilitando sistemas com menos rigidez estrutural. Isto é, partículas mais pesadas oferecem menos vibração à estrutura externa de suporte do Separador.

Os modelos de aumento de massa específica, granulometria e massa total injetada, as velocidades angulares e resultantes nos três eixos decaíram, podendo assim ser um indicativo do processo. Isso significa que, quando o processo apresentar uma diminuição das velocidades no interior do separador, provavelmente o poço está produzindo areia seja com massa específica, granulometria e/ou massa total elevada.

Constatou-se que a vorticidade e rotação tendem a seguir o mesmo comportamento, sendo diretamente proporcionais uma a outra.

6.5 Controle e otimização do processo

Os modelos de simulações para variações de características do fluido e da partícula, indicam a possibilidade de previsão de comportamento do processo. Isso pode ser constatado, pelo fato de que, apesar de o processo de separação de areia ser um processo consideravelmente instável, a mudança nesses parâmetros apresentou um padrão de comportamento. Vale ressaltar que, esse padrão não visa trazer estabilidade ao processo, mas previsibilidade.

Já para os parâmetros de mudança de velocidade injeção, estes, indicam resultados de controle de processo, e são de grande relevância para a indústria, haja vista que a alteração desse parâmetro pode ser feita de diversas formas. São elas: controle de diâmetro de tubulação, bombas, choke, entre outros.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de areia em poços de petróleo e gás natural é um inconveniente que impacta quaisquer poços ativos, isto é, em produção. Isto ocorre naturalmente, visto que toda formação rochosa, no que diz respeito aos reservatórios de petróleo e gás, possui areia em seu interior. Com a crescente demanda por novas tecnologias no setor de geração de energia, torna-se imprescindível que o âmbito petrolífero se desenvolva, buscando otimização de processos e equipamentos, diminuição de perdas e segurança de processo. O Separador de areia, ainda hoje, é a solução que apresenta melhor aproveitamento na limpeza do fluido. Sendo assim, o aprimoramento do uso desse equipamento é de extrema relevância para uma produção mais eficaz e segura.

Com a utilização dos softwares *SolidWorks* e *SimFlow*, foi possível desenvolver análises coerentes com a literatura, baseando-se na Lei de Conservação de massa e energia e, por conseguinte, no método de volumes finitos. A modelagem do Separador é simples, e foi totalmente desenvolvida pela versão acadêmica do software *SolidWorks*, não se tornando, assim, uma limitação impeditiva. O *SimFlow* mostrou-se um software de simulação de fluidos altamente recomendável, uma vez que abrange todos os parâmetros que necessitam ser levados em consideração por projetos de construção de equipamentos e previsão comportamental de fluidos. Por sua vez, os dados obtidos pela ferramenta *Residuals,* possibilitaram o acompanhamento em tempo real do processo separatório, sendo considerado um modelo de previsão de comportamento do processo simulado.

Os resultados foram satisfatórios, denotando que a estrutura criada pelo software *SolidWorks* foi coerente com o software *SimFlow*, o que permitiu a criação do ciclone necessário para a separação de areia como visto no *ParaView.* Todos os parâmetros alterados (velocidade de injeção, massa específica da fase discreta, massa total injetada da fase discreta e distribuição granulométrica) apresentaram dados concisos para o desenvolvimento de equipamentos, proporcionando, assim, características de faixa de produção, otimização do processo e segurança do trabalho.

As simulações apresentam padrão de comportamento do processo, uma vez que para variáveis de características dos fluidos e partículas, geram uma previsibilidade de comportamento. E as variáveis controladas de processo, possibilitam a otimização da eficiência de separação das partículas. Resultados de oscilação das variáveis, bem como a

faixa de operação da pressão para os parâmetros alterados, demonstraram ser dados de extrema valia para o monitoramento processual.

Para estudos posteriores, sugere-se a obtenção das versões completas dos softwares, SimFlow e SolidWorks, por possuírem maior base de dados e ferramentas, possibilitando, desta maneira, uma análise mais acurada e específica do modelo de estudo desejado. Ademais, em caso de viabilidade econômica, a construção de um protótipo físico tornaria a análise mais ampla no que diz respeito à comparação de dados do modelo numérico e o modelo real, ocasionando um maior aproveitamento dos dados adquiridos. Nesse contexto, outro viés atrativo seria a utilização, no modelo de fluido multifásico, de outro fluido além do propano, como a água ou o próprio petróleo cru. A base de estudos foi realizada dentro de um ambiente neutro, mas encoraja-se que para os próximos estudos, e os softwares permitem tal abordagem, sejam estipuladas condições iniciais, como por exemplo a temperatura e pressão do equipamento. Por fim, o *recyclone* ("reciclone") e ciclones em série, são iniciativas encorajadas ao desenvolvimento por parte da comunidade acadêmico-científica e industrial.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, M. G., **Uso de Filtro de Mangas para Tratamento de Gases Resultantes da Combustão de Bagaço de Cana**. 2014. 90 folhas. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2014.

BIKMUKHAMETOV, T.; **CFD Simulations of Multiphase Flows with Particles**. 2016. 126 folhas. Dissertação de Mestrado - Norwegian University of Science and Technology, Noruega, 2016.

BRITISH PETROLEUM, About BP. Disponível em: <https://www.bp.com/>. Acesso em: 13/10/2018.

CARVALHO, A. T., **Otimização de Ciclone para a Pré-separação de Areia na Produção de Petróleo**, 70 folhas. Dissertação de Mestrado - Programa de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

DERE, B. R. R.; SREE, A. D.;BABU, G. M.; RAO, R. S. **Desing and Analysis of Cyclone Separator**. International Journal of Engineering Research & Technology, IJERT. Vol 3, Issue 8, ISSN 2278-0181, 2014.

DITRIA, J.C.;HOYACK, M.E. **The Separation of Solids and Liquids with Hydrocyclone Based Technology for Water Treatment and Crude Processing**. SPE Journal: Society of Petroleum Engineers (SPE-28815), 1994.

ERNESTO, M.; USSAMI, N., **INTRODUÇÃO À GEOFÍSICA**: Apostila da disciplina AGG0115. Departamento de Geofísica, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2002.

EYMARD, R.; GALLOUET, T.; HERBIN, R.. **Finite volume methods:** Techniques of Scientific Computing, Parte III. P.G. Ciarlet and J.L. Lions, editores, vol. 7, Páginas 713--1020. North-Holland, Amsterdam, 2000.

GRYGLAS, W., **Cyclone Separator**, Artigo publicado em: <https://help.sim-flow.com/userguide/cyclone-separator/>. Acesso em: 25/09/2018.

HANLY, J., AND PETCHONKA, J. J., **Equipment selection for solid gas separation**. Engenharia Química, páginas 83-85, 1993.

KHAMEHCHI, E.; AMERI, O.; ALIZADEH, A.; **Choosing an optimum sand control method**. Egyptian Petroleum Research Institute: Egyptian Journal of Petroleum, vol 24, Páginas 193-202, 2014.

KEGG, S.; **A Numerical Investigation of Gas Cyclone Separation Efficiency with Comparison to Experimental Data and Presentation of a Computer-based Cyclone Desigh Methodology**. 2008. 192 folhas. Dissertação de Mestrado - University of Akron, Akron, 2008.

LACERDA, A. F.; **Estudo dos Efeitos das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e filtrantes**. 79 folhas. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, MG, Fevereiro de 2007.

MAROULIS, Z.B.; KREMALLS, C. **Development of an Effective Cyclone Simulator under Excel**. 1995. Artigo científico - National Technical University of Athens, Grécia, 1995.

MARTINS, J. A.; **Separador Sólido-Líquido para Operação em Fundo de Poços de Petróleo**. 2006. 159 folhas. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2006.

MATANOVIC, D.; CIKES, M.; MOSLAVAC, B.; **Sand Control in Well Construction and Operation** - SPRINGER. Artigo científico - University of Zagreb, Croácia, 2012.

MEIRA, C. R.; **Desempenho de um Precipitador Eletrostático operando na remoção de nanopartículas de aerossóis**. 106 folhas. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

NETAFIM, **Hydrocylone Sand Separators** - Operation, Installation & Maintanance. California: 2018.

PAIVA, S.; SALCEDO, R.; ARÚJO, P. **Impact of Particle Agglomeration in cyclones**: PACYC MODEL, 2010. 15 folhas. Chemical Engineering Journal - Universidade de Porto, Porto, 2009.

ROMUALDO L. SALCEDO; MARIO J. PINHO. **Pilot and Industrial-Scale Experimental Investigation of Numerically Optimized Cyclones**. Ind. Eng. Chem. Res. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Porto, vol 42, Páginas 145-154, 2003.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de reservatórios de petróleo**. Interciência: Rio de Janeiro, 2006.

SIMFLOW. **Simulação de fluidos**: OpenFOAM, Polônia, 2018.

SOLIDWORKS. **Modelagem de Equipamentos**. Dassault Systemes, França, 2018.

SOM, S.; SENECAL, P.K.; POMRANING, E.; **Comparison of RANS and LENS Models Against Constant Volume Diesel Experiments**. 24th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, San Antonio, Texas, Maio de 2012.

SPE - SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERING, **Gravel Pack design**, 2016.

SPE - SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERING, **Predicting sand Production**, 2015.

THOMAS, J.E., **Fundamentos da engenharia de petróleo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

VILELA, R. A. G.; JUNIOR, H. B. N.; FILHO, J. M. J.; ALMEIDA, I. M. **Ameaças à proteção do trabalho**: o caso da segurança em máquinas e equipamentos. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, RBSO. São Paulo, 40, 132, Páginas 113-117, 2015.

WILLCOX, K.; WANG, Q., **Computational Methods in Aerospace Engineering**. Massachusets Institute of Technology, Massachusetts, 2014.

ZITHA, P.; FELDER, R.; ZORNES, D.; BROWN, K.; MOHANTY, K., **Increasing Hydrocarbon Recovery Factors**, SPE - Society of Petroleum Engineers. Artigo Científico. Disponível em: <https://www.spe.org/industry/increasing-hydrocarbon-recovery-factors.php>. Acesso em: 15/11/2018.

ZUBIK-KOWAL, B., **Delay partial differential equations,** Aritgo Científico - Schoolarpedia, Department of Mathematics, Boise State University, Idaho, 2010.