

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

JÉSSICA LINCOLN PETTINATTI

**ESTUDO PRELIMINAR DA SEPARAÇÃO SUPERSÔNICA DO GÁS
NATURAL UTILIZANDO CFD**

SÃO CARLOS
2022

JÉSSICA LINCOLN PETTINATTI

**ESTUDO PRELIMINAR DA SEPARAÇÃO SUPERSÔNICA DO GÁS
NATURAL UTILIZANDO CFD**

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes

SÃO CARLOS
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de TCC da aluna Jéssica Lincoln Pettinatti, realizada em 12/09/2022:

Prof. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes
DEQ - Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Rodrigo Béttega
DEQ - Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega
DEQ - Universidade Federal de São Carlos

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Sonia Regina, por seu apoio e amor incondicionais. Você é e sempre será meu porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus por Sua grandiosidade e bondade. Por conceder tantas graças e estar sempre presente comigo, em todas as etapas da minha vida, mesmo naquelas que eu duvidei de Sua presença.

À minha família pelo o amor e zelo que vocês têm por mim. Principalmente à minha mãe, por sua luta incansável por nós e ter me proporcionado as melhores oportunidades ao seu alcance. Além de agradecer imensamente ao meu padrasto Romulo, por todos os conselhos e aprendizados, me desafiando todos os dias em busca da minha melhor versão. Sem vocês nada disso seria possível!

À minha orientadora Dra. Gabriela Cantarelli, que me apresentou ao tema, orientando e dando suporte ao longo desse período, não medindo esforços de se encontrar comigo para transmitir seu conhecimento.

Ao meu namorado Eduardo, por seu jeito leve e acolhedor que sempre me transmite tranquilidade e segurança.

Aos meus colegas de trabalho da Siemens, principalmente à Aline Abdu e Pedro Araújo, que me acolheram no time de simulação e muito me ensinaram de CFD.

Aos meus amigos e companheiros de turma Sérgio, Paulo Eduardo, Bianca, Beatriz, Milena, Jaqueline e todos da turma 016 que dividiram o cotidiano universitário tornando-o menos estressante.

RESUMO

A reserva brasileira de gás natural chega a ser composta por, aproximadamente, 0,4 trilhões de metros cúbicos. Uma das maiores em volume do Continente Americano. Sua extração em território brasileiro é concentrada na área do Pré-Sal, uma faixa de 800 quilômetros que se estende desde o litoral norte catarinense ao estado de Espírito Santo, destacando-se a bacia sedimentar de Campos no Rio de Janeiro. Indiscutivelmente, junto à alta capacidade produtiva pode-se destacar também os ganhos ambientais advindos do uso do gás natural, uma vez que a capacidade de emissões de CO₂ é muito inferior aos combustíveis fósseis, sendo assim, considerado uma alternativa energética muito atrativa. Contudo, o CO₂ presente na composição do gás natural, juntamente com a água e outros contaminantes, é considerado um problema quando se trata da qualidade do produto final, devendo ser separado do produto de interesse e destinado a fins ambientalmente e comercialmente adequados. Para isso, atualmente, utilizam-se de diversas técnicas de purificação do gás natural, como por exemplo, adsorção, absorção e peneiras moleculares. Mais recentemente, identificou-se o potencial de se utilizar a tecnologia supersônica para a remoção *bulk* dos poluentes do gás natural. O funcionamento do separador supersônico é composto por processos de expansão, separação gás-líquido ciclônica e re-compressão do gás natural. Primeiramente, a temperatura do gás sofre uma queda em até 50°C através de um resfriamento adiabático ao longo do bocal de entrada, de modo a promover a expansão do gás até serem atingidas velocidades supersônicas. Consequentemente, gotículas de água e hidrocarbonetos são condensadas, as quais são separadas do restante do *bulk* por meio de centrifugação na região ciclônica do separador. Apesar de ser uma alternativa muito atrativa para a separação do CO₂, a separação supersônica apresenta escoamentos altamente complexos e turbulentos, com a presença de alta vorticidade, o que dificulta o seu estudo por métodos convencionais. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma investigação preliminar do escoamento em separadores supersônicos por meio de análise em CFD utilizando-se do *software* Simcenter STAR-CCM+. A partir das análises de duas geometrias distintas de defletores, foi possível averiguar a influência direta do diâmetro das partículas na eficiência de separação do gás natural. Para partículas com diâmetros de 2 μm obteve-se eficiência superior à 50%, enquanto para diâmetros inferiores à 0,8 μm a eficiência foi inferior aos 40%. O defletor 1 foi o detentor dos maiores valores de eficiência, contudo o defletor 2 foi o que obteve valores menores de perda de carga.

Palavras-chave: Gás Natural. Separador Supersônico. CFD. Multifásico.

ABSTRACT

PETTINATTI, J. L.. **Preliminary study of supersonic separation of natural gas using CFD**. 2022. 50 p. – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. SÃO CARLOS, 2022.

Brazil's natural gas reserve amounts to approximately 0.4 trillion cubic meters. It is one of the biggest in volume in the American Continent. Its extraction in Brazilian territory is concentrated in the Pre-Salt area, an 800-kilometer stretch that stretches from the northern coast of Santa Catarina to the state of Espírito Santo, with the Campos sedimentary basin in Rio de Janeiro standing out. Undoubtedly, along with the high production capacity, one can also highlight the environmental gains from using natural gas, since its CO However, the CO₂ present in the composition of natural gas, along with water and other contaminants, is considered a problem when it comes to the quality of the final product, and should be separated from the product of interest and destined for environmentally and commercially appropriate purposes. To this end, several techniques are currently being used to purify natural gas, such as adsorption, absorption, and molecular sieves. More recently, the potential has been identified to use supersonic technology for bulk removal of pollutants from natural gas. The operation of the supersonic separator is composed of expansion processes, cyclonic gas-liquid separation, and re-compression of the natural gas. First, the gas temperature is dropped by up to 50°C through adiabatic cooling along the inlet nozzle to expand the gas until supersonic velocities are reached. Consequently, water and hydrocarbon droplets are condensed, which are separated from the rest of the bulk by centrifugation in the cyclonic region of the separator. Despite being a very attractive alternative for the separation of CO₂, the supersonic separation presents highly complex and turbulent flows, with the presence of high vorticity, which makes its study by conventional methods difficult. Thus, the present work aimed to perform a preliminary investigation of the flow in supersonic separators through CFD analysis using the Simcenter STAR-CCM+ software. From the analysis of two different baffle geometries, it was possible to investigate the direct influence of particle diameter on the efficiency of natural gas separation. For particle diameters of 2 µm, efficiency higher than 50% was obtained, while for diameters smaller than 0.8 µm, efficiency was lower than 40%. Deflector 1 had the highest efficiency values, but deflector 2 had the lowest pressure drop values.

Palavras-chave: Natural Gas, Supersonic Separator, CFD, Multiphase.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Previsão da produção líquida de gás natural nacional | 1 |
| Figura 2 – Formação Geológica do Pré-Sal | 7 |
| Figura 3 – Evolução da produção <i>onshore</i> e <i>offshore</i> - Pré-Sal x Pós-Sal | 8 |
| Figura 4 – Movimentação de gás natural por destinação | 8 |
| Figura 5 – Regiões Funcionais do Separador Supersônico | 9 |
| Figura 6 – Comparação esquemática entre os modelos Twister Mark I e II | 11 |
| Figura 7 – Fluxograma de tratamento de gás natural com SS | 12 |
| Figura 8 – Características termodinâmicas do GN ao longo do Separador Supersônico . | 13 |
| Figura 9 – Contorno do Separador Supersônico | 14 |
| Figura 10 – Geometria do Separador Supersônico | 15 |
| Figura 11 – Geometria do Defletor 1 | 16 |
| Figura 12 – Geometria do Defletor 2 | 17 |
| Figura 13 – Geometria SS Completa | 17 |
| Figura 14 – Malha SS com defletor 1 | 19 |
| Figura 15 – Malha SS com defletor 2 | 20 |
| Figura 16 – Exemplo de funcionamento de um <i>Part Injector</i> | 22 |
| Figura 17 – Tratamento de parede <i>Realizable Two-Layer</i> | 23 |
| Figura 18 – Linha de sondagem para análise de escoamento | 27 |
| Figura 19 – Contornos de velocidade para o SS com defletor do tipo 1 para gotículas de diferentes tamanhos | 28 |
| Figura 20 – Dados de velocidade ao longo de uma linha central na direção axial para a geometria com o defletor 1 | 29 |
| Figura 21 – Contornos de velocidade para o SS com defletor do tipo 2 para gotículas de diferentes tamanhos | 29 |
| Figura 22 – Dados de velocidade ao longo de uma linha central na direção axial para a geometria com o defletor 2 | 30 |
| Figura 23 – Formação de vórtice nas geometrias estudadas | 30 |
| Figura 24 – Contornos de pressão para o SS com defletor do tipo 1 para gotículas de diferentes tamanhos | 31 |
| Figura 25 – Dados de pressão ao longo de uma linha central na direção axial para a geometria com o defletor 1 | 32 |
| Figura 26 – Contornos de pressão para o SS com defletor do tipo 2 para gotículas de diferentes tamanhos | 32 |
| Figura 27 – Dados de pressão ao longo de uma linha central na direção axial para a geometria com o defletor 2 | 33 |
| Figura 28 – Eficiência de coleta nos separadores supersônicos | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 29 – Eficiência de coleta em (YANG; WEN, 2017) | 34 |
| Figura 30 – Condição de aprisionamento de partículas | 34 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Objetivos da Abertura de Mercado de O&G | 6 |
| Quadro 2 – Classificação de Escoamentos Compressíveis. | 10 |
| Quadro 3 – Coordenadas para os planos Defletor 1 (m) | 16 |
| Quadro 4 – Coordenadas de localização do Defletor 2 (m). | 17 |
| Quadro 5 – Controles padrões de refinamento de malha | 19 |
| Quadro 6 – Controles customizados de refinamento de malha | 19 |
| Quadro 7 – Qualidade das malhas numéricas obtidas. | 20 |
| Quadro 8 – Composição molecular do GN | 21 |
| Quadro 9 – Configurações dos Solvers | 24 |
| Quadro 10 – Diferentes configurações dos casos simulados | 26 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------------|---|
| AMG | Método Algébrico <i>Multi-Grid</i> |
| ANAC | Agência Nacional de Aviação Civil |
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| CAD | Desenho assistido por computador |
| CBIE | Centro Brasileiro de Infraestrutura |
| CFD | Fluidodinâmica Computacional |
| CFL | Número de Courant |
| CNPE | Conselho Nacional de Política Energética |
| CO ₂ | Gás Carbônico |
| DEM | Modelo dos Elementos Discretos |
| GCI | <i>Grid Convergence Index</i> |
| GN | Gás Natural |
| LPM | Modelo Multifásico Lagrangeano |
| O&G | Óleo e Gás |
| P,D&I | Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação |
| RAM | Memória de Acesso Aleatório |
| RGO | Razão Gás-Óleo |
| SS | Separador Supersônico |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------------|--|
| Ma | Número de Mach |
| u | Velocidade de Escoamento |
| a | Velocidade do Som |
| D_1 | Diâmetro da entrada |
| D_{cr} | Diâmetro da garganta |
| L | Comprimento da seção convergente |
| m_p | Variação de Momento |
| F_s | Forças de Superfície |
| F_b | Forças de Corpo |
| F_d | Força de Arrasto |
| F_p | Força de Gradiente de Pressão |
| F_{vm} | Força da Massa Virtual |
| F_g | Gravidade |
| F_{MRF} | Forces in Moving Reference Frames |
| F_u | Força Corporal definida pelo usuário |
| F_c | Forças de Contato |
| F_{co} | força de Coulomb |
| V_p | Volume da Partícula |
| $\nabla_{p_{static}}$ | Gradiente de pressão estática na fase contínua |
| C_d | Coeficiente de Arrasto |
| ρ | Densidade da fase contínua |
| A_p | Área projetada da partícula. |
| v_s | Velocidade de deslizamento da partícula |
| ϕ_c | Fração de Volume |

| | |
|---------|-------------------------------|
| η | Fração de Vazios |
| V | Volume total da célula |
| V_i^F | Volume de uma fase específica |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS | 3 |
| 1.1.1 Objetivos Gerais | 3 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 3 |
| 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 4 |
| 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 Exploração de Gás Natural | 5 |
| 2.1.1 Retrospectiva Histórica | 5 |
| 2.1.2 Camada do Pré-Sal | 6 |
| 2.2 Separadores Supersônicos | 9 |
| 2.2.1 Fundamentos de Operação | 9 |
| 2.2.2 Termodinâmica do Separador Supersônico | 12 |
| 3 – MATERIAIS E MÉTODOS | 14 |
| 3.1 Geometria | 14 |
| 3.2 Malha Numérica | 18 |
| 3.3 Modelos Físicos | 20 |
| 3.4 <i>Solvers</i> e Critérios de parada | 23 |
| 3.4.1 <i>Setup Solver</i> | 23 |
| 3.4.2 Critérios de Parada | 24 |
| 3.5 Análise de Dados | 25 |
| 3.6 Casos Simulados | 25 |
| 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO | 27 |
| 4.1 Contornos de Velocidade e Pressão | 27 |
| 4.2 Eficiência de separação | 32 |
| 5 – CONCLUSÕES | 35 |
| 5.1 TRABALHOS FUTUROS | 35 |
| Referências | 36 |

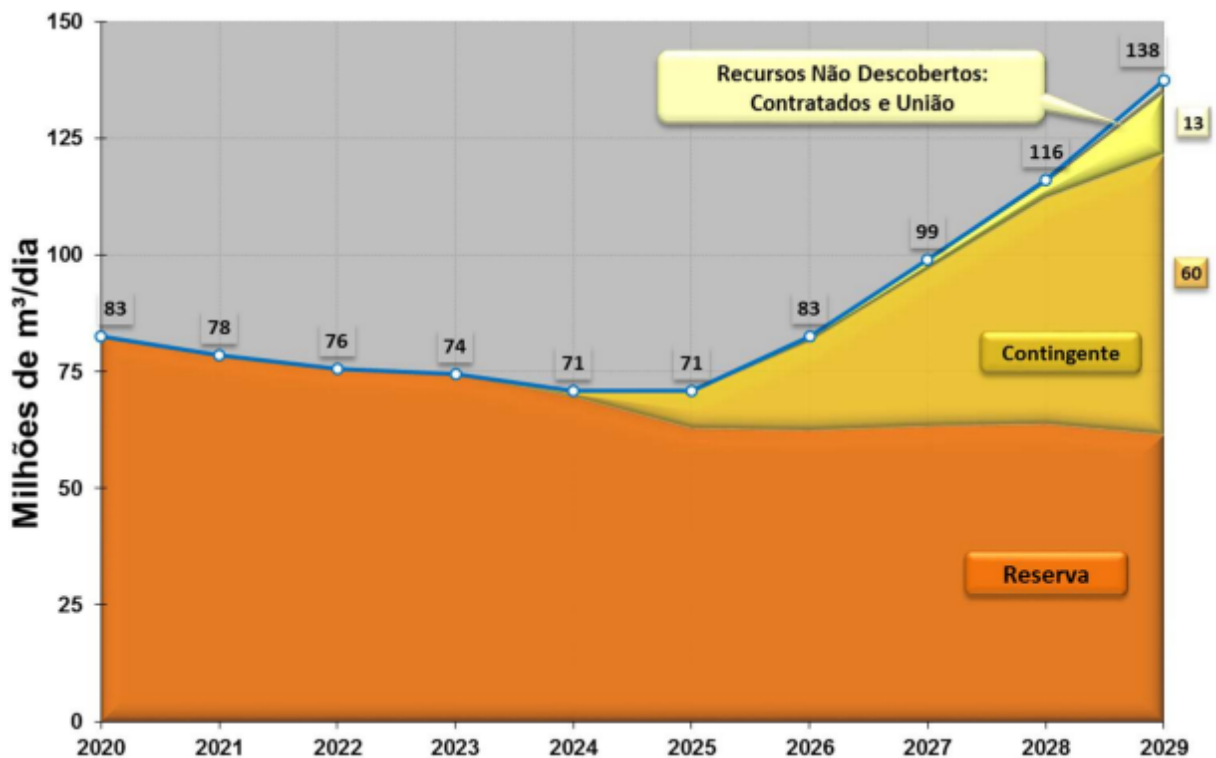
| | |
|--|-----------|
| Apêndices | 39 |
| APÊNDICE A–Diagnóstico Malha Numérica - Geometria 1 | 40 |
| APÊNDICE B–Diagnóstico Malha Numérica - Geometria 2 | 44 |
| | |
| Anexos | 48 |
| | |
| ANEXO A–Equacionamento da fase dispersa | 49 |
| A.0.1 Força de gradiente de pressão | 49 |
| A.0.2 Força de Arrasto | 49 |

1 INTRODUÇÃO

Na corrida contra o aquecimento global e a transição para baixo carbono, o gás natural (GN) vêm se destacando entre as demais fontes alternativas de energia, uma vez que a sua combustão chega a produzir metade das emissões de gás carbônico quando comparado à do carvão (NASCIMENTO, 2012). Contudo, apesar das possibilidades de benfeitoria do uso do gás natural para fins energéticos, boa parte do gás natural extraído ainda é utilizado na reinjeção dos reservatórios a fim de aumentar a produção de petróleo (ENERGÉTICA et al., 2015).

Entretanto, ainda segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética, espera-se uma inversão nesse cenário tanto em relação à produção, como para o melhor aproveitamento desse recurso. Como pode ser observado na Figura 1, observa-se um aumento da produção líquida do gás natural, por meio da abertura de novos projetos para as Bacias de Sergipe-Alagoas e Solimões e início da produção Excedente da Cessão Onerosa. No que tange novas possibilidades econômicas para o gás natural, pode-se atribuir ao Programa Novo Mercado de Gás, administrado pelo Comitê de Promoção da Concorrência do Mercado de Gás Natural no Brasil, que busca ampliar os investimentos por meio de uma abertura de mercado e ampla concorrência (ODDONE, 2019).

Figura 1 – Previsão da produção líquida de gás natural nacional



Fonte: Energética et al. (2015)

Além das promissoras bacias sedimentares do nordeste brasileiro, a principal contribuinte

para a produção de gás natural nacional é a região do Pré-Sal, uma área de 800 quilômetros de extensão que abrange desde o norte do litoral catarinense ao Estado do Espírito Santo. Destacando-se a bacia de Campos no Rio de Janeiro. Somente nessa região, estima-se uma reserva de aproximadamente 0,4 trilhões de metros cúbicos de gás natural (DUDLEY et al., 2018). Todavia, algumas incertezas econômicas ainda rodeiam a exploração desse produto na região do Pré-Sal. Sabe-se que grande parte do gás natural disponível nessa reserva encontra-se associado ao óleo, promovendo assim uma alta Razão Gás-Óleo (RGO), além de possuir altos teores de contaminantes, com destaque para o gás carbônico (ENERGÉTICA et al., 2015).

Dessa forma, se faz necessário um tratamento prévio desse componente antes de ser destinado para fins comerciais e energéticos adequados. Haja vista, que a Petrobras e seus parceiros estão alinhados com os tratados firmados no Acordo de Paris, buscando a diminuição do processo *flaring* em 97,2% para todos os novos projetos a partir de 2021.(PETROBRAS, 2022). Assim, processos de ventilação e queima do gás natural vêm perdendo força para processos mais sofisticados de sequestro de CO₂. Segundo (ARINELLI et al., 2017) os métodos mais tradicionais e consolidados no tratamento do gás natural estão citados a seguir:

- Absorção em alceno-glicóis;
- Adsorção em sólidos, tais como peneiras moleculares;
- Expansão em válvula Joule-Thompson ;
- Ciclos refrigerantes para a remoção de hidrocarbonetos pesados.

Contudo, tais processos, como o de absorção sofrem de duros vieses operacionais devido ao alto custo de regeneração dos solventes, degradação da solução e formação de espuma. Assim como no processo de purificação por membranas enfrenta problemas com umectação e estabilidade das membranas (MONDAL; BALSORA; VARSHNEY, 2012). Nesse cenário, novas tecnologias vêm ganhando espaço para disputar o mercado de processamento de gás natural, como por exemplo a utilização de separadores supersônicos (SS) em plataformas *offshore* para tratar gás natural rico em CO₂, como é o caso das reservas encontradas na região do Pré-Sal.

O separador supersônico utiliza-se dos processos de expansão, separação gás-líquido ciclônica e re-compressão em um único dispositivo compacto e estático e com baixo tempo de residência. Além de possuir um atrativo ecológico adicional, a não-utilização de solventes, permite que o SS seja uma alternativa promissora frente aos demais métodos de captura de gás carbônico e demais componentes presentes no gás natural (SCHINKELSHOEK; EPSOM, 2006).

Em linhas gerais, o dispositivo de separação é constituído de três seções distintas responsáveis pelas operações citadas anteriormente. O processo de expansão por meio do bocal de entrada do equipamento é incumbido pelo decaimento abrupto da temperatura. Segundo dados da fabricante Twister B.V., esse decaimento pode vir a ser em 50°C. Consequentemente, é possível observar a condensação dos componentes mais pesados. Por fim, o princípio de separação centrífuga faz com que haja a separação das gotículas devido à alta velocidade que

o fluido adquire ao longo do tubo que conecta os tubos expansores e recompressores. Essa técnica já é conhecida há tempos na estratégia de secagem de ar. Tendo sua primeira aplicação comercial em 1989 (HAGHIGHI; HAWBOLDT; ABDI, 2015).

A fim de se manter como uma das principais alternativas econômica e sustentável na purificação de gás natural *offshore*, é extremamente necessário a busca do ponto ótimo de operação. Dessa forma, muitos pesquisadores empenham-se no aprimoramento das capacidades do SS e uma das principais formas de fazê-lo é através da Fluidodinâmica Computacional (CFD) por permitir a simulação dos fenômenos envolvidos no sistema sem a necessidade de construção prévia de um protótipo de teste, reduzindo-se os custos e tempo de execução de um projeto. Além dos benefícios comentados, engenheiros utilizam-se da CFD para obter mais detalhes sobre o campo de escoamento, como por exemplo, os perfis de velocidade e pressão, tensões de cisalhamento entre outras características que são difíceis de serem obtidas via análises experimentais (CENGEL; CIMBALA, 2015).

A técnica de CFD nasce com a combinação das áreas de Mecânica dos Fluidos e Cálculo Numérico, objetivando-se solucionar as equações de escoamento de fluídos com o auxílio de métodos de discretização, como por exemplo, o Método dos Volumes Finitos. Desde o surgimento da Fluidodinâmica Computacional, vem-se aprimorando os modelos matemáticos a fim de representar os fenômenos físicos com uma riqueza de detalhes cada vez maior, inclusive fenômenos complexos, como é caso dos escoamentos turbulentos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho foi o estudo preliminar do escoamento e da eficiência de separação em separadores supersônicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Implementar e simular um sistema no Simcenter STAR-CCM+ que utiliza o mecanismo de separadores supersônicos;
- Otimizar a eficiência de separação das geometrias construídas;
- Estudar a influência dos defletores no sistema de separação construído;
- Validar a modelagem multifásica Lagrangeana implementada na simulação.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco sessões. Inicialmente, buscou-se contextualizar e justificar a elaboração desse documento. Em seguida serão apresentados, estudos sobre o atual cenário de exploração de gás natural no Brasil, com destaque para área do Pré-Sal, juntamente com uma revisão sobre os princípios de funcionamento de um separador supersônico. Em seguida, o terceiro capítulo é dedicado à construção da simulação no *software* Simcenter STAR-CCM+ incluindo desde o preparo da geometria e da malha numérica ao setup dos casos e pós processamento. Por fim, os resultados obtidos na simulação são discutidos no capítulo quatro e as conclusões alcançadas estão expostas no capítulo cinco.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo aborda a análise da evolução de exploração do gás em território brasileiro, mais especificamente na área do Pré-sal. Em seguida, revisa-se os fundamentos termodinâmicos e de operação de um separador supersônico aplicado à captura de gás carbônico.

2.1 Exploração de Gás Natural

Nessa seção é apresentada de forma geral as mudanças regulatórias do processo exploratório do gás natural em território brasileiro, desde à sua descoberta, final da década de 30, até os dias atuais e quais seus impactos na economia. Em seguida é comentado a respeito da descoberta recente e mais significativa do setor de óleo e gás, a camada do Pré-sal.

2.1.1 Retrospectiva Histórica

Tem-se registros da exploração de petróleo em território brasileiro desde o século XIX ocorrendo por meio da "livre exploração", ou seja, o proprietário do terreno em que se encontrava a espécie era livre para explorá-lo (ALKIMIM, 2011). Contudo, somente a partir do ano de 1938 com a criação do Conselho Nacional do Petróleo (CNP) há um avanço mais evidente e organizado na exploração de óleo e gás (O&G) (SANTOS; AVELLAR, 2016).

Tal regime de livre exploração teve sua estrutura alterada com a Lei 2004 instituída pelo então Presidente da República Getúlio Vargas com a campanha "O Petróleo é Nosso" por meio da criação da empresa estatal Petrobras em 1953 (ALKIMIM, 2011). Contudo, vale a pena ressaltar que desde esse período em que se buscava reverter os entraves do setor de O&G ocasionados pelo desmonte das estruturas administrativas do Estado Novo, a busca por autossuficiência na produção de petróleo sempre foi a prioridade frente à exploração do gás natural (ODDONE, 2019).

Nesse contexto, após 40 anos exercendo o monopólio nacional de pesquisa, lavra, refino e transporte marítimo de petróleo, seus derivados e gases raros a Petrobras passou a dividir o mercado com empresas nacionais e estrangeiras após a promulgação da Lei nº 9.478 de agosto de 1997 pelo então Presidente Fernando Henrique Cardoso, marco regulatório que dava início ao modelo de concessão (MENDES et al., 2015).

Há uma divisão de opiniões quanto à essa mudança nas atividades exploratórias de O&G. Pesquisadores como (SANTOS; AVELLAR, 2016) acreditam que essas mudanças ganharam força com o discurso neoliberal de que 'empresas estatais eram consideradas um empecilho à modernização do Estado', juntamente com uma crescente pressão no setor industrial por uma atividade aberta à participação de agentes privados. Por outro lado, há quem defenda que essa mudança foi benéfica a fim de trazer mais recursos por meio da atração de novos

investidores para uma atividade considerada de 'alto risco'. O Quadro 1 retrata alguns dos benefícios trazidos pela abertura de mercado segundo (COMPANY, 2010).

Quadro 1 – Objetivos da abertura de mercado de O&G.

| CRESCIMENTO DO SETOR | GARANTIA DO FORNECIMENTO DE O&G |
|-----------------------------------|--|
| | |
| AUMENTO DA COMPETITIVIDADE | Incentivo à competição de mercado |
| | Desenvolvimento e capacitação do mercado de trabalho |
| | Transferência de tecnologias e melhores práticas |

Fonte: Company (2010)

Um outro momento de importância na história de extração e exploração de O&G veio com a descoberta da camada do Pré-Sal resultando em uma nova mudança do marco regulatório brasileiro (ALKIMIM, 2011). Devido às grandes expectativas de produtividade nessa região, surgiu o então modelo de partilha por meio da Lei 12.351, promulgada em dezembro de 2010 que diz:

As atividades econômicas de que trata o art. 4º desta Lei serão reguladas e fiscalizadas pela União e poderão ser exercidas, mediante concessão, autorização ou contratação sob o regime de partilha de produção, por empresas constituídas sob as leis brasileiras, com sede e administração no País. (BRASIL, 2010, Art. 5)

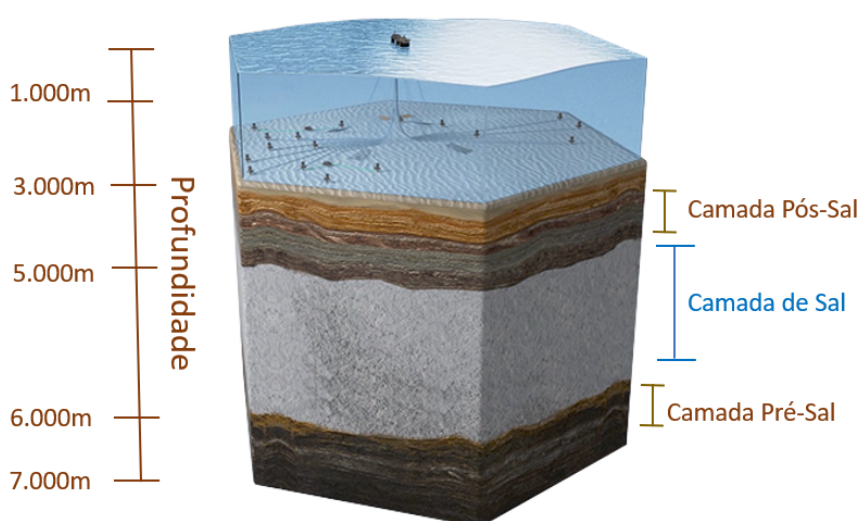
Por fim, com o objetivo de evidenciar a exploração de gás natural, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) aprovou recentemente, junho de 2019, a Resolução N°16/2019 que promove o aperfeiçoamento das políticas vigentes, estimulando a livre concorrência e a modernização do mercado de gás natural (ODDONE, 2019). Uma vez que, diferentemente da exploração de petróleo que já conta com uma economia mista, o mercado de gás ainda conta com um único *player* detentor de 77% da produção e 100% das estruturas básicas de distribuição e refino.

2.1.2 Camada do Pré-Sal

A descoberta da região do Pré-sal, sem dúvidas, é um dos maiores adventos mundiais do ramo da indústria de óleo e gás. Acredita-se que sua formação rochosa advém da sedimentação de matéria orgânica há mais de 150 milhões de anos, quando os continentes Africano e Americano ainda se conectavam formando o grande continente Gondwana (PETROBRÁS, 2018).

Por meio da movimentação das placas tectônicas Sul-Americana e Africana, os dois continentes começaram a se separar e área uma vez existente entre elas ficou submersa pelas águas do Oceano Atlântico. Dessa forma se deu a formação de uma espessa camada de sal, que chega a ter uma espessura de 2 mil metros, que se encontra depositada sob a camada de matéria orgânica assentada (PETROBRÁS, 2018). Conseqüentemente, por conta da ocorrência de processos termoquímicos devido às condições ambientes ali presentes, ocorreu a transformação da então matéria orgânica depositada em hidrocarbonetos, o quais estão impregnados em rochas porosas denominadas de arenito. Na Figura 2, pode-se observar uma representação da formação geológica referente à uma exploração de O&G na região do Pré-sal.

Figura 2 – Formação Geológica do Pré-Sal



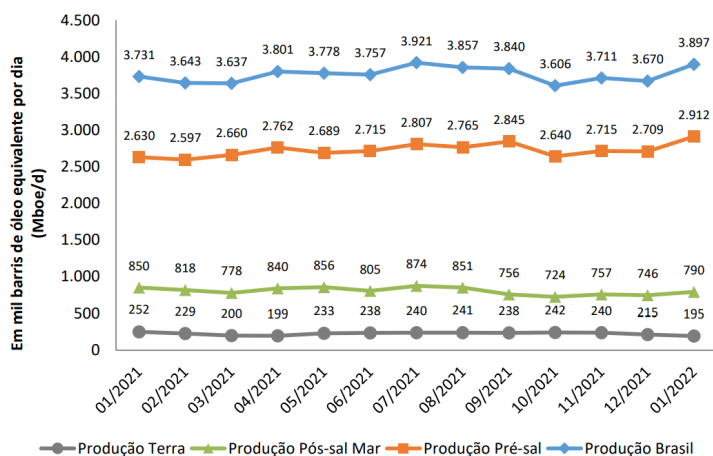
Fonte: Adaptado de PETROBRÁS (2018)

Atualmente, segundo dados do Centro Brasileiro de Infraestrutura (CBIE), o Brasil possui 6.177 poços em exploração ativa, dos quais cerca de apenas 8% do total estão localizados em alto mar, prática denominada de exploração *offshore*. Contudo, mesmo com uma pequena participação em variedade de perfurações, a produção marítima de O&G é responsável por mais de 90% de toda produção nacional (CBIE, 2022). Isso se deve ao fato dos poços marítimos serem muito mais produtivos quando comparado aos terrestres.

A discrepância fica ainda mais evidente ao confrontar a diferença na produção entre a camada do Pós-Sal e Pré-Sal. De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), ao longo do ano de 2021, a produção na área do Pré-sal sozinha correspondeu, por aproximadamente 73,04% da produção nacional. O equivalente a 35446 mil barris de óleo nesse mesmo período. A Figura 3 ilustra essa evolução da produção *offshore* e *onshore*.

Mesmo diante de um cenário tão próspero como é o mercado de O&G para o Brasil, muito ainda deve ser feito para o pleno aproveitamento desse recurso. Inclusive segundo dados de 2022 da ANP (2022), mais de 75% de todo gás natural explorado na área do Pré-Sal é

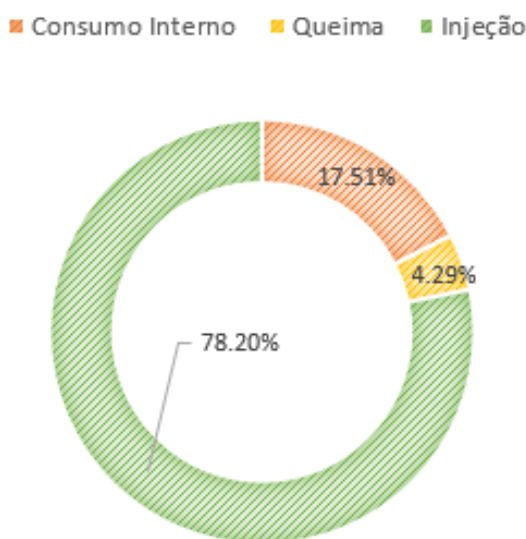
Figura 3 – Evolução da produção *onshore* e *offshore* - Pré-Sal x Pós-Sal



Fonte: ANP (2022)

utilizado para aumentar a taxa de obtenção de óleo por meio da rejeição como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Movimentação de gás natural por destinação



Fonte: ANP (2022)

Uma das formas de reverter esse cenário e atribuir mais valor ao GN direcionando-o para o consumo interno é, de acordo com Mendes et al. (2015), desenvolvendo a logística de transporte e distribuição. Além disso, se fazem necessários investimentos mais expressivos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I) ao melhor aproveitamento do gás natural, como é o caso desse trabalho, buscando novas soluções a fim de promover uma transição energética mais rápida e eficiente.

2.2 Separadores Supersônicos

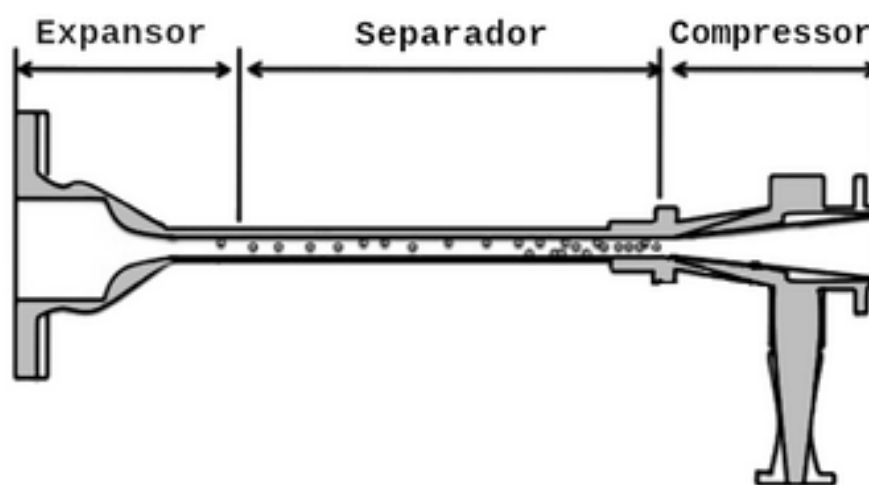
Nessa seção, serão discutidos os princípios de operação de um separador supersônico já mencionados no Capítulo 1, juntamente com os fundamentos termodinâmicos responsáveis por promover a captação do CO₂ e demais impurezas presentes no gás natural.

2.2.1 Fundamentos de Operação

Segundo estudos da Universiti Teknologi PETRONAS (ALTAM; LEMMA; JUFAR, 2017), os separadores supersônicos se baseiam na tecnologia 'turbo vortex', desenvolvida a partir do princípio da diferença de pressão. De forma geral, os separadores supersônicos são usados para separar água e hidrocarbonetos pesados. Contudo, atualmente há estudos que reportam que eles também podem ser usados para a separação de outros contaminantes, como por exemplo, CO₂ e H₂S.

Independente das peculiaridades de cada patente, uma estrutura básica de um SS é contemplada em três regiões distintas: expansora, separadora e compressor, como pode ser visto na Figura 5. Tais regiões possuem funcionalidades específicas na operação do separador.

Figura 5 – Regiões Funcionais do Separador Supersônico



Fonte: Adaptado de Altam, Lemma e Jufar (2017)

O gás natural é introduzido na seção expansora, à altas temperaturas, por meio de um bocal de entrada com geometria convergente-divergente. Devido à essa mudança na estrutura (diminuição da área de escoamento), a velocidade do fluido aumenta, conseqüentemente, pressão e temperatura diminuem. Segundo dados da empresa Twister B.V, fabricante do SS Twister, a temperatura do gás natural pode sofrer uma queda em até 50° C ao passar por essa seção.

Em análises de escoamentos compressíveis, como é o caso do gás natural em escoamento no interior de um separador supersônico, é comum relacionar a velocidade de fluxo ao

adimensional Número de Mach (Ma) (BATCHELOR; BATCHELOR, 2000). O Número de Mach relaciona a velocidade do escoamento de interesse com a velocidade do som correspondente às condições de referência, como demonstrado pela Equação (1).

$$Ma = u/a \quad (1)$$

Sendo u a velocidade do escoamento e a a velocidade do som no ponto considerado. De acordo com o valor obtido nessa relação, pode-se classificar o escoamento como subsônico ou supersônico em um SS. O Quadro 2 resume essa classificação de acordo com os valores indicados no portal da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).

Quadro 2 – Classificação de Escoamentos Compressíveis.

| Escoamentos Compressíveis | | |
|---------------------------|----------------|---------------------------------|
| Número de Mach (Ma) | Característica | Velocidade Relativa (VR) (km/h) |
| $Ma < 3$ | Hipersônica | $VR > 3675,13$ |
| $1,2 < Ma < 3$ | Supersônica | $1470,05 < VR < 3675,13$ |
| $Ma = 1$ | Sônica | $VR = 1225,04$ |
| $0,8 < Ma < 1,2$ | Transônica | $980,04 < VR < 1470,05$ |
| $Ma < 0,8$ | Subsônica | $VR < 980,04$ |

Fonte: ANAC (2013)

Tendo em vista essa classificação, o gás natural é inserido na zona de expansão em uma condição subsônica e ao se deslocar ao longo da geometria do bocal de entrada o gás é acelerado até atingir condições semelhantes à velocidade do som. Esse processo se assemelha à um turboexpansor ao transformar energia potencial - pressão e temperatura - em energia cinética (velocidade) por meio de um resfriamento adiabático.

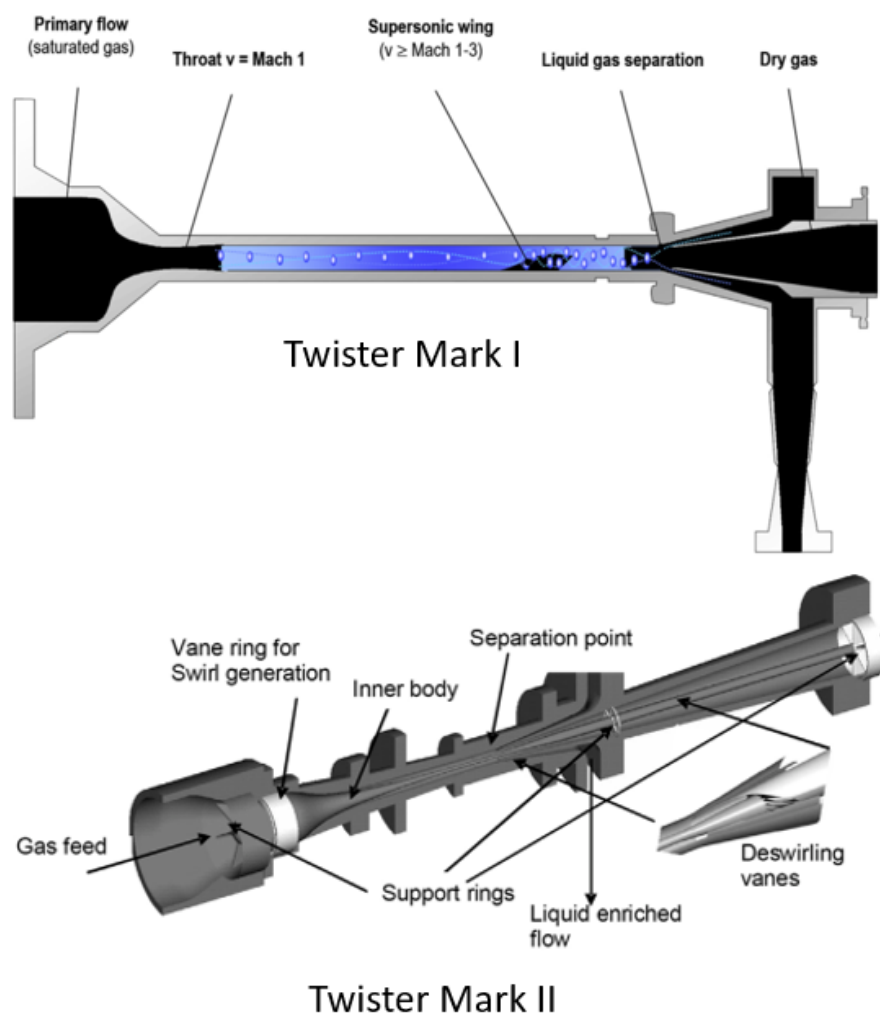
Ao atingir a segunda seção, o gás começa a se liquefazer e as gotículas de hidrocarbonetos condensados são rotacionadas à parede tudo que liga os bocais de entrada e saída devido as intensas forças centrífugas, campo que pode chegar a exercer $500.000 \times$ mais que a força gravitacional (WEN et al., 2010), trazendo o gás à condições supersônicas. Além da denominação de seção de separação, essa região também é conhecida como "garganta" do SS.

De acordo com o levantamento realizado por (HAGHIGHI; HAWBOLDT; ABDI, 2015) em relação aos últimos desenvolvimentos na tecnologia de separadores supersônicos na utilização de tratamento do gás natural. A Twister BV, principal fabricante desse tipo de equipamento, desenvolveu duas formas distintas de promover a nucleação do gás natural, patenteando-as como Twister Mark I e Twister Mark II, responsáveis pelos demais desdobramentos tecnológicos que surgiram posteriormente.

No que diz respeito ao funcionamento do Twister Mark I, esse modelo utiliza de uma lâmina defletora na região da garganta do SS, sendo responsável pela geração de um vórtice que permitirá a separação das partículas. Já o Twister Mark II recebeu uma otimização na

seção expansora recebendo o formato anular e incorporando um corpo central responsável por deslocar a formação do vórtice para a seção subsônica da seção de entrada. A Figura 6 retrata a diferença entre os dois modelos. Como comentado, as patentes dos modelos Twister Mark, motivaram muitos outros trabalhos, inclusive na criação das geometrias utilizadas no presente trabalho, inspiradas no modelo Mark I, que serão melhor detalhadas no Capítulo 3.

Figura 6 – Comparação esquemática entre os modelos Twister Mark I e II



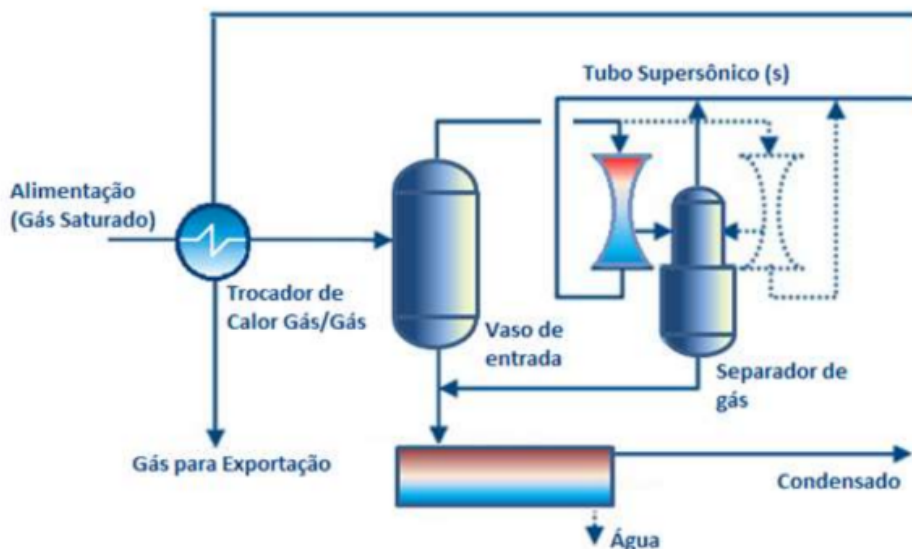
Fonte: Adaptado de Haghighi, Hawboldt e Abdi (2015)

Por fim, com o objetivo de promover a recuperação de uma parcela da pressão do fluido em escoamento, aumenta-se abruptamente o diâmetro do bocal de saída, tornando o gás novamente subsônico. Essa mudança irá causar ao fluido uma onda de choque que irá desacelerá-lo, e conseqüentemente, aquecê-lo. Nessa última seção do separador supersônico também ocorre a coleta da corrente líquida formada e separada do volume gasoso, fruto de um processo de separação altamente eficiente.

Dentre as tantas vantagens ligadas a esse processo mencionadas no Capítulo 1, pode-se complementar ainda a possibilidade de reciclo da corrente líquida coletada na região de

compressão na corrente de entrada, como mostra a Figura 7. Dessa forma, aumentando-se a taxa de recuperação do processo de separação.

Figura 7 – Fluxograma de tratamento de gás natural com SS



Fonte: Nascimento (2012)

Por fim, um dos grandes atrativos para a utilização do separador supersônico é o baixo tempo de residência, chegando a milissegundos. Essa característica de operação não proporciona a formação de hidratos. Dessa forma, não se faz necessário a utilização de produtos químicos na operação do SS, tornando-o uma das alternativas mais sustentáveis para o tratamento de gás natural.

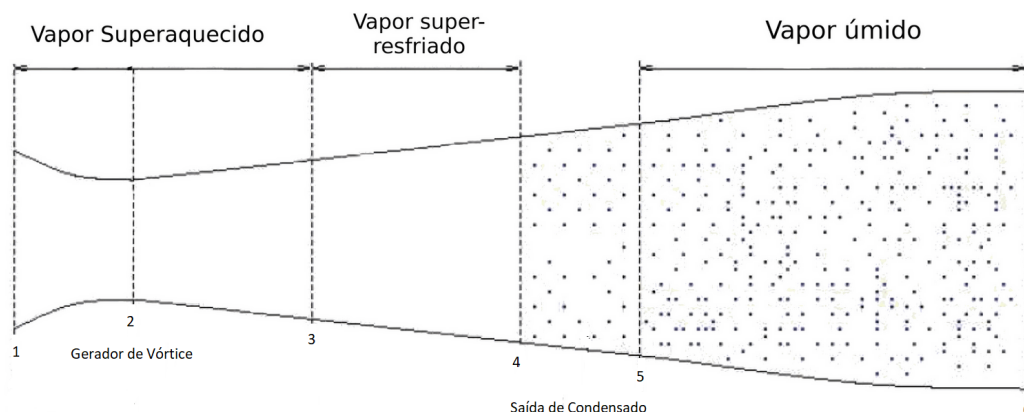
2.2.2 Termodinâmica do Separador Supersônico

Como comentado na seção anterior, a termodinâmica do Separador Supersônico se assemelha a de um turboexpansor por transformar a pressão em potência de eixo. Ao estudar mais profundamente a sua estrutura, é possível categorizar o comportamento do fluido em cada porção do equipamento. Na figura Figura 8, estão esquematizadas, de forma sucinta, as principais características presentes no gás natural no SS.

No bocal de entrada, o GN é introduzido em condições de superaquecimento e devido à geometria divergente do separador supersônico o fluido se expande às condições sônicas, contudo sem, de fato, cruzar a linha de saturação (MACHADO, 2022). Tal fenômeno ocorre entre os pontos 1 e 2. Somente a partir do ponto 2, a depender da geometria e das condições de operação, ocorre a superação desse estado a fim de dar lugar ao início do fenômeno de nucleação, ou seja, começam a surgir aglomerados de moléculas de CO_2 .

Contudo, tal fenômeno começa a se estabilizar, de fato, na região entre os pontos 3 e 4, devido ao aumento da taxa de nucleação e diminuição da expansão do vapor, como vapor

Figura 8 – Características termodinâmicas do GN ao longo do Separador Supersônico



Fonte: Adaptado de Melo et al. (2019)

seco, formando um estado metaestável. O pico da nucleação é atingido na região de número 4, devido à intensa queda de temperatura, processo denominado de super-resfriamento.

Na faixa entre os pontos 4 e 5 a quantidade de gotículas no *bulk* do escoamento permanece constante, uma vez que o processo de nucleação cessa. É possível observar também o aumento do tamanho das gotículas até o momento em que o sistema atinja a condição de equilíbrio termodinâmico, que acarretará em mudança de fase do fluido (MACHADO, 2022). Portanto, com a liberação de calor latente do gás natural advinda da fase líquida, há um aumento da pressão nessa região o que evidencia o processo de evaporação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será discutida a construção das geometrias do separador supersônico, assim como a criação da malha numérica, escolha dos modelos físicos característicos dessa simulação e configurações de pós-processamento e *solver*. Para a elaboração de todas essas etapas utilizou-se o *software* de CFD Simcenter STAR-CCM+.

3.1 Geometria

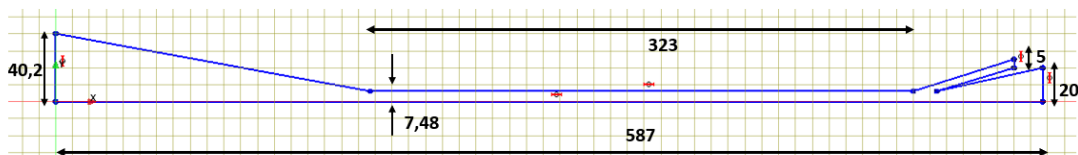
Sabe-se que a geometria do SS é uma parte fundamental para que os fenômenos de condensação e separação dos gás natural ocorram. Dessa forma, a seção convergente do separador, referente ao bocal de entrada é descrita pela Equação (2) abaixo e a seção divergente, região de compressão é dada por Foelsch (1949).

$$\begin{cases} \frac{D - D_{cr}}{D_1 - D_{cr}} = 1 - \frac{1}{X_m^2} \left(\frac{X}{L}\right)^3, & \left(\frac{X}{L} \leq X_m\right) \\ \frac{D - D_{cr}}{D_1 - D_{cr}} = \frac{1}{(1 - X_m)^2} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^3, & \left(\frac{x}{L} > X_m\right) \end{cases} \quad (2)$$

Em que D_1 , D_{cr} , L , X_m , X e D são o diâmetro da entrada, o diâmetro da garganta, comprimento do bocal convergente, a coordenada relativa da curva convergente do bocal de entrada, uma distância arbitrária entre a seção transversal e a entrada do SS e D é o diâmetro utilizado em x , respectivamente.

A geometria do separador supersônico foi construída no ambiente de 3D-CAD do *software* Simcenter STAR-CCM+. Inicialmente, elaborou-se uma geometria bidimensional que representa o plano de simetria do SS, considerando os valores de comprimento, raios do bocal de entrada, saída do difusor, saída de gás úmido e região da garganta. As dimensões utilizadas foram estimadas a partir dos dados disponíveis nos trabalhos desenvolvidos por (YANG et al., 2014), respeitando Equação (2) e Foelsch (1949). O contorno bidimensional, junto com suas dimensões em mm estão esquematizadas na Figura 9.

Figura 9 – Contorno do Separador Supersônico

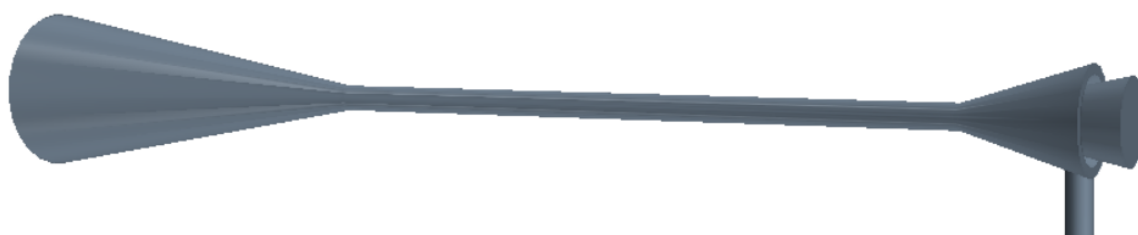


Fonte: Arquivo pessoal

Em seguida, aplicou-se a operação *Revolve* ao redor do eixo X com uma angulação de 360°. Após executada a operação de *Revolve* para a criação da geometria principal do separador

supersônico, criou-se um novo contorno circular paralelo ao eixo X e normal ao bocal de saída do separador a fim de se construir a geometria cilíndrica do coletor de gás úmido. Extrudou-se o contorno à uma altura de 0,05 m em sentido negativo ao eixo Y e subtraiu-se o CAD da geometria do separador supersônico desse novo corpo recém formado a fim eliminar estruturas sobressalentes. Por fim executou-se a operação *Imprint* entre os dois corpos com o intuito de criar contato entre elas e com isso permitir a geração de uma malha numérica conforme posteriormente. O resultado visual dessas operações está ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Geometria do Separador Supersônico



Fonte: Arquivo pessoal

No que diz respeito às estruturas dos defletores internos, para a primeira geometria, suas dimensões foram estimadas pela autora e também inspiradas nos modelos gráficos dispostos nos trabalhos de (YANG; WEN, 2017) a fim de promover uma maior vorticidade no interior do SS. Já para a segunda geometria, completamente autoral, teve como objetivo o direcionamento das partículas para as paredes do equipamento a fim de se aumentar a eficiência de separação. Ambas as geometrias foram construídas no ambiente de 3D-CAD do *software* Simcenter STAR-CCM+, de forma semelhante ao processo de construção da geometria do SS.

Para o defletor 1, foram construídos 8 planos paralelos no sentido positivo ao eixo Y, distanciados 0,005 m entre si, sendo o primeiro à uma distância de 0,39 m do eixo. Em seguida, em cada um dos planos, foram criados contornos concêntricos, que uma vez unidos entre si, formaram superfícies a partir da utilização da operação *Loft* do ambiente de CAD do *software* Simcenter STAR-CCM+, como mostrado em Figura 11. As coordenadas para cada um dos pontos presentes nos oito planos estão sumarizadas em Quadro 3.

Já para o defletor 2, criou-se o contorno da sua geometria também utilizando-se o ambiente de CAD do Simcenter STAR-CCM+, e em seguida, aplicou-se a operação *Revolve* ao redor do eixo Y com angulação de 360°. O resultado desse processo pode ser visto em Figura 12. As coordenadas dos pontos utilizados para a criação dessa geometria estão sumarizadas em Quadro 4

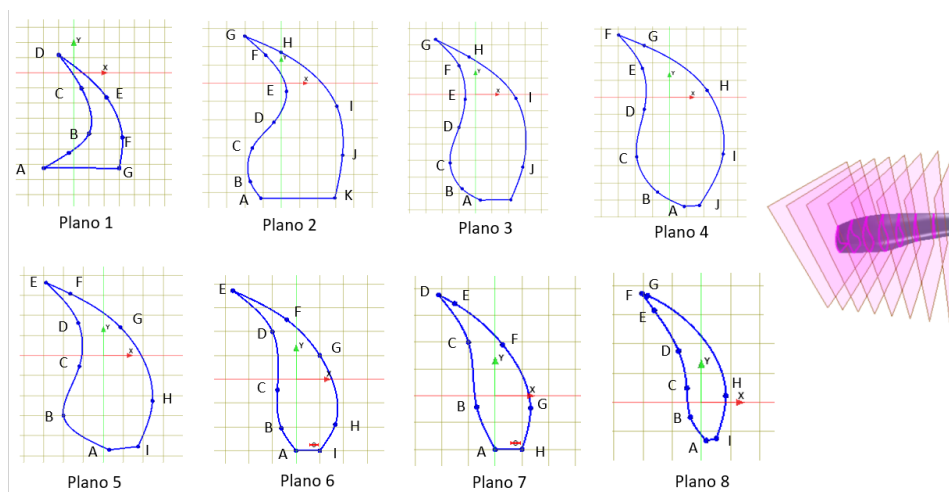
Por fim, a última etapa de construção da geometria do separador supersônico trata-se

Quadro 3 – Coordenadas para os planos Defletor 1 (m)

| | Plano 1 | Plano 2 | Plano 3 | Plano 4 | Plano 5 | Plano 6 | Plano 7 | Plano 8 |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| A | (-0,009, -0,006) | (-0,001, -0,006) | (3,115, -0,006) | (8,639, -0,006) | (2,938, -0,005) | (0,00, -0,003) | (0,00, -0,002) | (1,574, -0,001) |
| B | (0,001, -0,004) | (-0,002, -0,005) | (-8,113, -0,006) | (-6,934, -0,006) | (-0,002, -0,003) | (-6,244, -0,002) | (-6,890, -4,191) | (-3,754, -5,112) |
| C | (4,732, -9,356) | (-0,002, -0,004) | (-0,002, -0,004) | (-0,002, -0,003) | (-0,001, -5,391) | (-7,913, -4,449) | (-0,001, 0,002) | (-4,983, 4,929) |
| D | (-9,313, 0,001) | (-4,033, -0,002) | (-0,001, -0,002) | (-0,001, -7,011) | (-0,001, 0,002) | (-0,001, 0,002) | (-0,002, 0,004) | (-7,852, 0,002) |
| E | (0,002, -0,002) | (2,873, 4,508) | (-6,276, -2,928) | (-0,002, 0,002) | (-0,003, 0,004) | (-0,003, 0,004) | (-0,002, 0,004) | (-0,002, 0,003) |
| F | (0,003, -0,004) | (-8,638, 0,002) | (-9,985, 0,002) | (-0,003, 0,004) | (-0,002, 0,003) | (-4,019, 0,003) | (2,765, 0,002) | (-0,002, 0,004) |
| G | (0,003, -0,006) | (-0,002, 0,003) | (-0,002, 0,003) | (-0,001, 0,003) | (8,499, 0,001) | (0,001, 0,001) | (0,001, -4,613) | (-0,002, 0,004) |
| H | | (-1,615, 0,002) | (-3,937, 0,002) | (0,002, 4,112) | (0,003, -0,002) | (0,002, -0,002) | (0,001, -0,002) | (8,939, 2,253) |
| I | | (0,003, -0,001) | (0,002, -2,344) | (0,003, -0,003) | (0,002, -0,005) | (0,001, -0,003) | | (5,174, -0,001) |
| J | | (0,003, -0,004) | (0,003, -0,004) | (0,002, -0,006) | | | | |
| K | | (0,003, -0,006) | (0,002, -0,006) | | | | | |

Fonte: Arquivo Pessoal

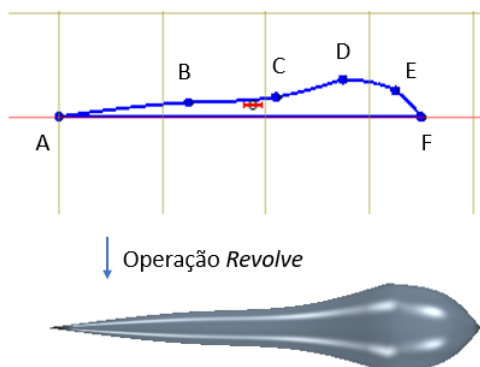
Figura 11 – Geometria do Defletor 1



Fonte: Arquivo pessoal

da inserção do defletor no interior do CAD do SS. Para isso, utilizou-se a operação de malha *Subtract* entre as duas partes. O resultado final obtido, para ambos defletores, pode ser visto na Figura 13 com a opção de cena transparente ativada.

Figura 12 – Geometria do Defletor 2



Fonte: Arquivo pessoal

Quadro 4 – Coordenadas de localização do Defletor 2 (m).

| Pontos | Coordenadas |
|--------|----------------|
| A | (0,39, 0) |
| B | (0,403, 0,001) |
| C | (0,411, 0,002) |
| D | (0,417, 0,004) |
| E | (0,423, 0,003) |
| F | (0,425, 0,0) |

Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 13 – Geometria SS Completa



Fonte: Arquivo pessoal

No Simcenter STAR-CCM+ o domínio da solução é discretizado nas *Regions*, em outras palavras, são nelas em que são definidos o conjunto de equações a serem resolvidas, uma vez que para cada *Region* existe um conjunto de modelos físicos associados. Para a presente simulação foi criada uma única *Region* referente ao fluido em escoamento, na qual conta com três condições de contorno distintas:

- **Velocidade especificada na entrada:** Região de entrada de fluido à velocidade de 20 m/s;

- **Pressão especificada na saída:** para ambas as saídas, difusor e coletor de gás úmido;
- **Condição de parede:** Demais partes que compõe a geometria do SS.

3.2 Malha Numérica

A malha numérica tem um papel muito importante em uma simulação CFD, pois ela é uma representação discretizada de um domínio geométrico da solução. Os *solvers* do *software* resolvem as equações características dos modelos físicos nas localizações indicadas pela malha numérica. No Simcenter STAR-CCM+ especificamente, utiliza-se o Modelo dos Volumes Finitos, e com isso, os valores são computados pelo método de *cell center*. Esse método utiliza como volume de controle o próprio elemento de malha, ou seja, a variável a ser calculada estará sempre no centro do volume de controle, e também, no centro do elemento.

Para ambas as geometrias de separador supersônico criadas, utilizou-se os seguintes modelos: *Surface Remesher*, *Polyhedral Mesher*, *Thin Mesher* e *Prism Layer Mesher* com seus respectivos controles padrão de refino de malha, além da aplicação de controles customizados para algumas regiões específicas da geometria.

O *Surface Remesher* é um recurso de refinamento de qualidade de uma malha superficial já existente a fim de otimizá-la para a utilização dos modelos de malha volumétricos comentados a seguir. O princípio desse modelo baseia-se no comprimento da aresta da geometria provida, além de poder promover o refinamento de características fundamentado na curvatura e proximidade da aresta.

Escolheu-se utilizar uma malha poliédrica uma vez que sua construção não é tão complexa quanto à malha tetraédrica, porém sua estrutura contém cerca de 5x menos células do que uma malha tetraédrica para uma determinada superfície inicial, de acordo com o guia do usuário do Simcenter STAR-CCM+. Sua construção é feita utilizando uma malha tetraédrica subjacente e é a partir dela que o *software* realiza o processo de contagem inicial de células presentes na geometria.

No que diz respeito da utilização de camadas de prisma na construção da malha numérica, ela se faz necessária uma vez que a geração de células prismáticas ortogonais próximas às superfícies ou limites das paredes melhoram a precisão da solução de escoamento.

Por fim, o modelo de *Thin Mesher* foi utilizado pensando nas regiões de estrangulamento ao redor dos defletores, além da estreita geometria do coletor de gás úmido, uma vez que esse modelo foi pensado especialmente para gerar uma malha do tipo prismática para volumes estreitos dentro de peças ou regiões.

No Quadro 5 estão sumarizados os controles padrão da malha numérica utilizados para as duas geometrias de SS estudadas.

Como comentado previamente, criou-se dois controles de refinamento de malha customizados para às regiões dos defletores, assim como, para a região de estrangulamento da garganta. Os valores utilizados para cada um dos controles estão sumarizados no Quadro 6.

Quadro 5 – Controles padrões de refinamento de malha

| Controle | Valor |
|------------------------------------|--------|
| <i>Base Size</i> | 6,0 mm |
| <i>Target Surface Size</i> | 100% |
| <i>Minimum Surface Size</i> | 10% |
| <i>Surface Growth Rate</i> | 1,2 |
| <i>Number of Thin Layer</i> | 3 |
| <i>Number of Prism Layer</i> | 4 |
| <i>Prism Layer Stretching</i> | 1,5 |
| <i>Prism Layer Total Thickness</i> | 33,33% |
| <i>Volume Growth Rate</i> | 1,2 |

Fonte: Arquivo pessoal

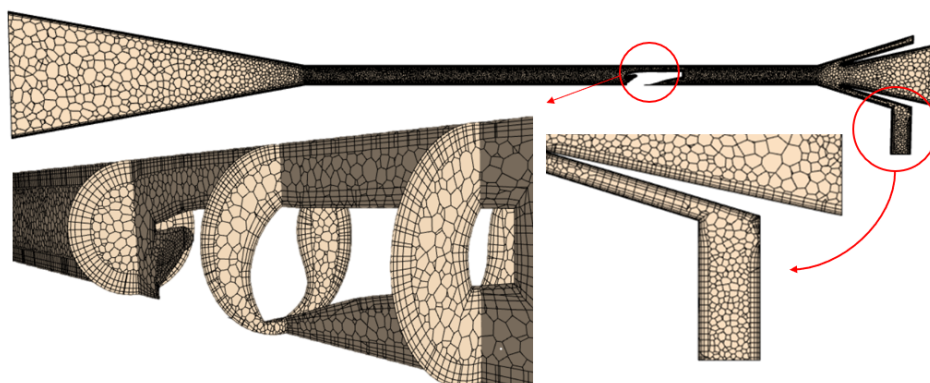
Quadro 6 – Controles customizados de refinamento de malha

| Região | Controle | Valor |
|----------|-----------------------------|---------------|
| Defletor | <i>Target Surface Size</i> | 25% |
| | <i>Minimum Surface Size</i> | 5,0 |
| | <i>Isotropic Size</i> | 20% |
| | <i>Wake Refinement</i> | 1,3 |
| Garganta | <i>Target Surface Size</i> | 10% |
| | <i>Surface Curvature</i> | 20 pts/circle |
| | <i>Surface Growth Rate</i> | 1,2 |

Fonte: Arquivo pessoal

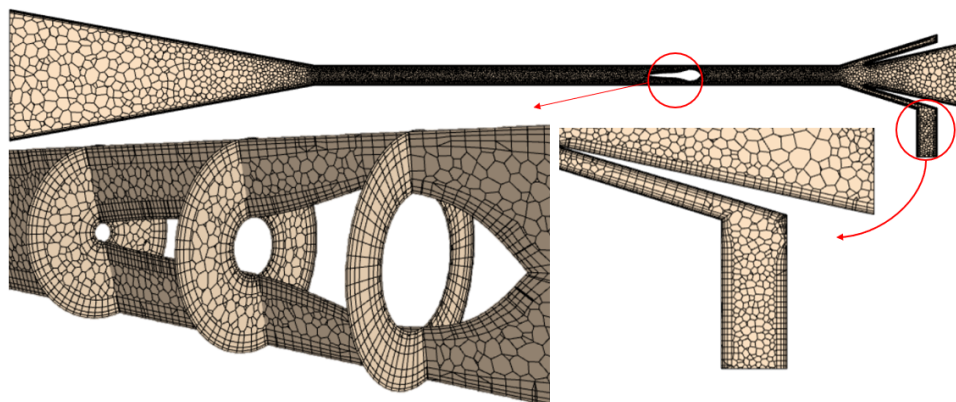
A fim de se averiguar visualmente o resultado dos controles de refinamento de malha aplicados, criaram-se planos normais aos eixos X e Y em uma vista de malha numérica. Os resultados para ambas as geometrias podem ser vistos nas Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 – Malha SS com defletor 1



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 15 – Malha SS com defletor 2



Fonte: Arquivo pessoal

Utiliza-se o método de *Grid Convergence Index* (GCI) com o objetivo de verificar a qualidade da malha numérica obtida por meio dos parâmetros de espaçamento, refino e ordem de acurácia da malha, além de fator de segurança e erros relativos entre análise de duas ou mais malhas Mansour e Laurien (2018). Contudo, uma das premissas para se utilizar tal metodologia é a necessidade de um espaço amostral de no mínimo três malhas contendo diferentes níveis de refinamento. Devido a limitações de tempo, este estudo utilizou-se de apenas duas malhas. Contudo, utilizando-se os trabalhos de (YANG; WEN, 2017) como referência devido à proximidade entre as geometrias utilizadas, confia-se na qualidade da malha obtida, uma vez que a quantidade de elementos obtidos fora semelhante. Os valores de células, faces e vértices alcançados para cada uma das geometrias do SS estão sumarizados no Quadro 7 abaixo. O diagnóstico completo para cada uma das malhas, fornecido pelo Simcenter STAR-CCM+ encontra-se nos Apêndice A e Apêndice B

Quadro 7 – Qualidade das malhas numéricas obtidas.

| | Geometria 1 | Geometria 2 |
|----------|-------------|-------------|
| Células | 293551 | 270063 |
| Faces | 1365891 | 1269904 |
| Vértices | 927458 | 865140 |

Fonte: Arquivo pessoal

3.3 Modelos Físicos

O presente estudo trata-se de uma simulação multifísica e multicomponente, contendo duas fases termodinâmicas: partículas líquidas e um fluxo gasoso contínuo multicomponente. A modelagem das partículas é dada pelo modelo multifásico Lagrangeano (LMP), o qual resolve a equação do movimento das partículas por meio de parcelas representativa da fase dispersa,

enquanto que, para a fase contínua, foi usada abordagem Euleriana. A composição química da fase gasosa foi extraída de (YANG; WEN, 2017) e está sumarizada em quadro Quadro 8.

Quadro 8 – Composição molecular do GN

| Composição Gasosa | Fração Molar (%) |
|----------------------------------|------------------|
| CH ₄ | 91,36 |
| C ₂ H ₆ | 3,63 |
| C ₃ H ₈ | 1,44 |
| i-C ₄ H ₁₀ | 0,26 |
| n-C ₄ H ₁₀ | 0,46 |
| i-C ₅ H ₁₂ | 0,17 |
| n-C ₅ H ₁₂ | 0,16 |
| H ₂ O | 0,03 |
| CO ₂ | 0,45 |
| N ₂ | 2,04 |

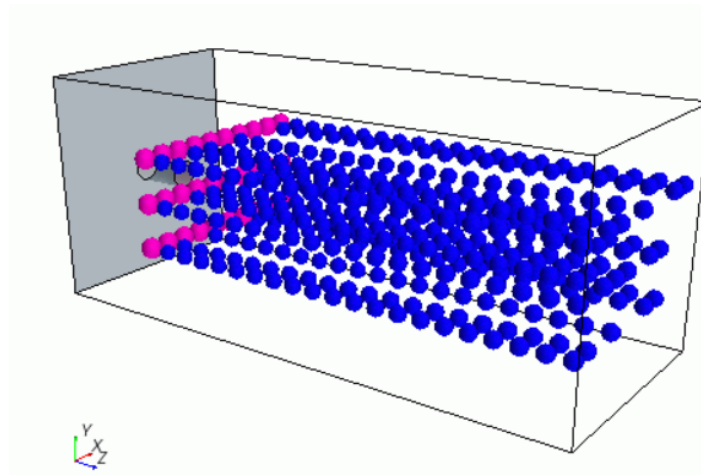
Fonte: (YANG; WEN, 2017)

A fase dispersa, representada pela modelagem Lagrangeana, requer a escolha de modelos específicos dentro do *software*, optou-se pela escolha de partículas materiais, em outras palavras, partículas que possuem massa e volume e seu comportamento é governado pelas leis de conservação. Além da escolha de partículas esféricas e de densidade constante, cujo valor utilizado foi retirado de (YANG; WEN, 2017) e é igual à 3320 kg/m^3 . Optou-se também por ativar os modelos de força de gradiente de pressão e de arraste, cujo coeficiente é dado pela correlação de Schiller-Naumann (SCHILLER, 1933), os equacionamentos de ambos os modelos se encontram no Apêndice A.

No Simcenter STAR-CCM+, as partículas são inseridas no fluxo contínuo através de injetores. É por meio desse artifício que se define a direção e a frequência que as partículas adentram no domínio da solução. Optou-se por utilizar o *Part Injector*. Esse tipo de injetor emprega uma coleção de pontos extraídos da própria geometria selecionada tal qual uma "seção de inserção de partículas", como mostra a Figura 16. No caso do presente trabalho, utilizou-se a região de entrada do bocal do separador supersônico como parte responsável pela inserção das partículas no domínio da solução.

Vale a pena ressaltar, que o fenômeno de nucleação das partículas, em um separador supersônico real, ocorre por meio da condensação dos componentes do gás natural. Por simplicidade da simulação, foi considerado que as gotículas já estão no domínio desde a entrada, por meio dos injetores.

No que diz respeito ao *Setup* do injetor, utilizou-se a taxa de distribuição de fluxo por injetor, indicando que a que a vazão especificada é total para todos os pontos de injeção deste injetor. O total de pontos de injeção de partículas foi de 375, calculado pelo próprio *software* de acordo com o número de elementos da malha numérica presente naquela região. Em relação

Figura 16 – Exemplo de funcionamento de um *Part Injector*

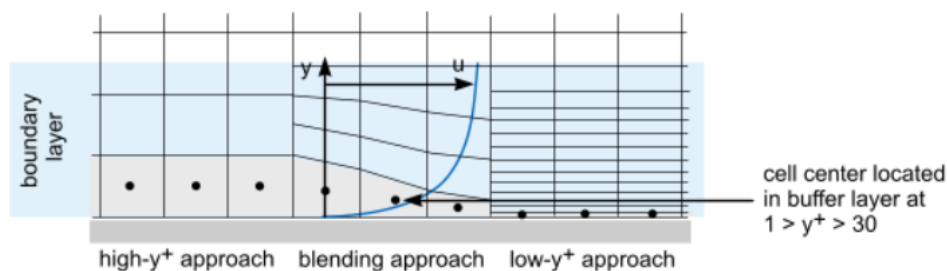
Fonte: Simcenter STAR-CCM+ User Guide

à velocidade de entrada das partículas, o método de injeção utilizado foi de magnitude + direção, cujo valor de 20 m/s foi retirada de (YANG; WEN, 2017) na direção axial. Por fim, o último parâmetro a ser especificado é o diâmetro da partícula, no qual foi estudado uma faixa de diâmetros entre 0,2 à 2 μm , diâmetros característicos de partículas em um separador supersônico, segundo (PRAST; LAMMERS; BETTING, 2006).

Finalmente, como condição de contorno para o comportamento das partículas ao colidirem com uma superfície, foi escolhido o modelo de ricochetear para todas as superfícies do tipo 'parede', dessa forma, as partículas permanecem ativas na simulação, mas com sua velocidade modificada de acordo com as relações de restituição, as quais foram mantidas com o padrão fornecido pelo *software*.

Em relação à modelagem da turbulência, utilizou-se o classe de $k - \epsilon$ do modelo de *Reynolds-Averaged Navier Stokes* (RANS) juntamente com os modelos *Realizable Two-Layer* $k - \epsilon$ como tratamento de parede. A escolha de tais modelos foi feita por já terem sido utilizados em trabalhos semelhantes como (YANG; WEN, 2017), além da robustez, economia computacional e acurácia apresentada pelo modelo $k - \epsilon$. A escolha do tratamento de parede vem de encontro como uma correção ao escoamento turbulento, e o modelo escolhido faz uma combinação de outros dois tratamentos, $low - y^+$ e o $high - y^+$, adequada para malhas que com densidades variadas próximas à parede, como é o caso do SS. Na Figura 17, está esquematizado o tratamento de parede dado pelo modelo escolhido.

No que diz respeito aos demais modelos físicos associados à fase contínua, utilizou-se o acoplamento pressão-velocidade do tipo *Coupled*, uma vez que essa formulação é indicada para escoamentos com termos-fonte dominantes, como é o caso da rotação interna do escoamento. Para a modelagem do tempo utilizou-se o regime permanente e optou-se também em não simular os efeitos de transferência de massa, como por exemplo o processo de condensação das partículas, devido a inviabilidade de tempo. dessa forma, utilizou-se a condição isotérmica e

Figura 17 – Tratamento de parede *Realizable Two-Layer*

Fonte: Simcenter STAR-CCM+ User Guide

centralizou-se os esforços no estudo da separação e não na mudança de fase.

3.4 Solvers e Critérios de parada

Nessa seção será descrito a configuração dos *Solvers* utilizados para computar a solução durante a execução das simulações. O Quadro 9, resume as condições utilizadas. Além disso, também é retratado, nessa seção a respeito dos critérios de convergência utilizados para pressionar o encerramento da simulação.

3.4.1 Setup Solver

No Simcenter STAR-CCM+, é possível configurar os *Solvers* responsáveis pela solução da simulação de acordo com os modelos físicos habilitados, como descrito na Seção 3.3, essas modificações se fazem extremamente necessárias a fim de controlar o cálculo da solução e permitir uma convergência mais eficiente. Foram realizadas alterações, principalmente, no *Solvers* do modelo multifásico Lagrangeano, mais especificamente no acoplamento Pressão-Velocidade e na modelagem do tempo.

No que diz respeito ao mecanismo da influência da fase dispersa na contínua, para o modelo escolhido no Simcenter STAR-CCM+, *Two-Way Coupling*, são considerados todos os efeitos de deslocamento, momento interfásico, massa e transferência de calor. O deslocamento da fase contínua pela fase dispersa é contabilizado através da fração de volume (ϕ_c). Tal dimensão é dada pela fração de volume da célula local que a fase dispersa ocupa. Já para a fase dispersa, a fração de volume, nesse caso representada pela fração de 'vazios' (η), é definida como a relação entre o volume que é ocupado por todas as fases contínuas do fluido e o volume total da célula como mostrado na Equação (3).

$$\eta = \frac{\sum V_i^F}{V} \quad (3)$$

Sendo assim, a fração de volume da fase dispersa pode ser calculada diretamente por Equação (4):

$$\phi_c = 1 - \eta \quad (4)$$

Dessa forma, as equações de fase dispersa quando integradas sobre uma célula, produzem as mudanças no momento, massa e energia de cada partícula entre a entrada e saída da célula. A soma destas mudanças para todas as partículas que atravessam o volume fornece o momento, a massa e a energia que é trocada com a fase contínua. Essas trocas são introduzidas nas equações da fase contínua como termos de fonte.

Também foram efetuadas modificações nos *Solvers* de turbulência, Número de Courant (CFL) e o número de ciclos realizados pelo Método Algébrico *Multi-Grid* (AMG). As alterações realizadas estão sumarizadas em Quadro 9 e para os demais *Solvers* aqui não comentados, como por exemplo partição e distância de parede, permaneceram os valores padrão sugeridos pelo *software*.

Quadro 9 – Configurações dos Solvers

| Solver | Classe | Propriedade | Valor |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------|
| Langrangian Multiphase | <i>Two-way Coupling</i> | <i>Under-Relaxation Factor</i> | 1,0 |
| | | <i>Maximum Volume Fraction</i> | 0,75 |
| | <i>Steady</i> | <i>Maximum Sub-Steps</i> | 20000 |
| | | <i>Verbosity</i> | <i>Low</i> |
| | | <i>Sub-Step Reporting Frequency</i> | 1000 |
| | | <i>Maximum Residence Time</i> | 100 s |
| Coupled Implicit | <i>Automatic CFL</i> | <i>Initial CFL</i> | 1,0 |
| | | <i>Minumum CFL</i> | 0,1 |
| | | <i>Maximum CFL</i> | 100000,0 |
| | | <i>Target AMG Cycles</i> | 4 |
| | <i>Constant Relaxation</i> | <i>Explicit Relaxation</i> | 0,3 |
| K-Epsilon Turbulence | - | <i>Under-Relaxation Factor</i> | 0,8 |
| K-Epsilon Turbulence Viscosity | - | <i>Under-Relaxation Factor</i> | 1,0 |
| | | <i>Maximum Ratio</i> | 1000000,0 |

Fonte: Arquivo Pessoal

3.4.2 Critérios de Parada

A utilização de critérios de parada permite definir por quanto tempo a solução deverá funcionar e sob quais condições ela deverá cessar as iterações e/ou avançar ao longo do tempo. Como a modelagem do tempo dessa simulação é estacionário, a escolha desses critérios ficam limitadas entre a escolha de um número de passos fixos e/ou a partir de configurações de um monitoramento de um parâmetro específico. A partir do acionamento da condição lógica 'ou', assim que uma das condições for satisfeita, a simulação é interrompida. Para as simulações

realizadas para a confecção desse trabalho, utilizou-se as seguintes condições lógicas perante a regra 'ou':

- **Passos Fixos:** 10000;
- **Critério de Continuidade:** Os resíduos do monitoramento da solução da equação da continuidade devem ser menores que 10^{-4} .

3.5 Análise de Dados

Por fim, a última etapa a ser configurada antes de iniciar o processo de solução da simulação é a definição dos recursos de pós-processamento, que irão permitir acompanhar o andamento da solução à cada iteração enquanto a simulação está sendo executada, assim como, permite a visualização dos resultados após a finalização da solução da simulação.

Para o caso em particular do presente trabalho, utilizou-se os recursos de relatórios, mecanismo que calcula os dados da solução e retornam um único valor, monitores, os quais possuem uma funcionalidade oposta aos relatórios, pois realizam uma coleta de dados durante as iterações dos *Solvers*, além de gráficos e dispositivos visuais utilizando planos e *Streamlines* para representar as trajetórias das partículas.

3.6 Casos Simulados

Para a simulação dos casos no *software* Simcenter STAR-CCM+, utilizou-se um notebook da marca Dell com processador Core I7 - oitava geração com 32 GB de RAM. Cada simulação durou, em média, entre um dia e meio e dois dias completos, convergindo entre 1300 e 1500 iterações. Foram simulados um total de 20 casos, dez para cada tipo de defletor caracterizado, as condições encontram-se sumarizadas no Quadro 10. Objetivou-se caracterizar a eficiência de separação por meio do balanço do fluxo material entre a entrada de gás natural e as duas saídas do SS através da utilização de monitores adicionados nessas regiões, os quais computam a quantidade de partículas inseridas ou retiradas do domínio da simulação. Além de estudar também os perfis de velocidade e pressão e perda de carga para os separadores supersônicos utilizando os dois tipos de defletores mencionados e utilizando uma faixa de diâmetro de partículas entre 0,2 à 2,0 μm .

Quadro 10 – Diferentes configurações dos casos simulados

| CASOS ESTUDADOS | | | |
|------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| Diâmetro₁ | 0,2 μm | Defletor ₁ | C ₁ A |
| | | Defletor ₂ | C ₁ B |
| Diâmetro₂ | 0,4 μm | Defletor ₁ | C ₂ A |
| | | Defletor ₂ | C ₂ B |
| Diâmetro₃ | 0,6 μm | Defletor ₁ | C ₃ A |
| | | Defletor ₂ | C ₃ B |
| Diâmetro₄ | 0,8 μm | Defletor ₁ | C ₄ A |
| | | Defletor ₂ | C ₄ B |
| Diâmetro₅ | 1,0 μm | Defletor ₁ | C ₅ A |
| | | Defletor ₂ | C ₅ B |
| Diâmetro₆ | 1,2 μm | Defletor ₁ | C ₆ A |
| | | Defletor ₂ | C ₆ B |
| Diâmetro₇ | 1,4 μm | Defletor ₁ | C ₇ A |
| | | Defletor ₂ | C ₇ B |
| Diâmetro₈ | 1,6 μm | Defletor ₁ | C ₈ A |
| | | Defletor ₂ | C ₈ B |
| Diâmetro₉ | 1,8 μm | Defletor ₁ | C ₉ A |
| | | Defletor ₂ | C ₉ B |
| Diâmetro₁₀ | 2,0 μm | Defletor ₁ | C ₁₀ A |
| | | Defletor ₂ | C ₁₀ B |

Fonte: Arquivo pessoal

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

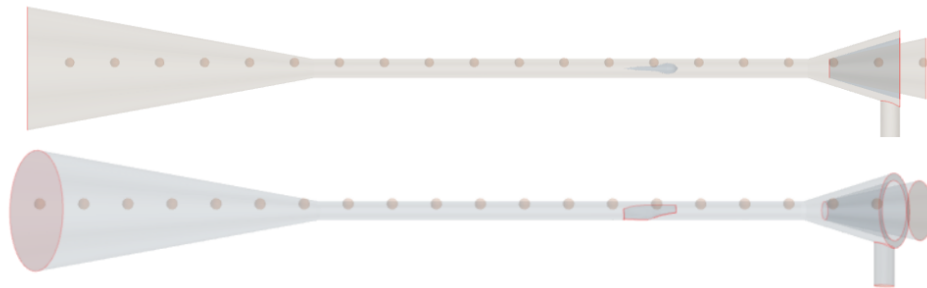
Aqui são apresentados os resultados obtidos para os casos simulados entre as duas geometrias de separadores supersônicos objetivando-se analisar e comparar os perfis de velocidade e pressão, como as partículas se distribuem em ambas as geometrias, e por fim, analisar a eficiência de separação de cada uma das propostas.

Todos os dados referentes à pressão aqui apresentados, se referem ao perfil de pressão estática ao longo do eixo X do separador supersônico. Uma vez estabelecido como condição de contorno zero na saída de fluido do equipamento, a perda de carga do SS é dada diretamente pela média da pressão na região de entrada do equipamento.

4.1 Contornos de Velocidade e Pressão

Nessa seção serão abordados os dados obtidos para os perfis de pressão e velocidade separadamente para cada uma das geometrias dos defletores utilizadas, além de analisar a influência dos mesmos na geração de vórtice no escoamento. Para isso criou-se uma linha de sondagem paralela ao eixo X para capturar tais fenômenos. A linha foi gerada a partir da união dos pontos $[-0,002, -0,001, 2,293]$ e $[0,585, -0,001, 2,293]$ e está ilustrada na Figura 18.

Figura 18 – Linha de sondagem para análise de escoamento

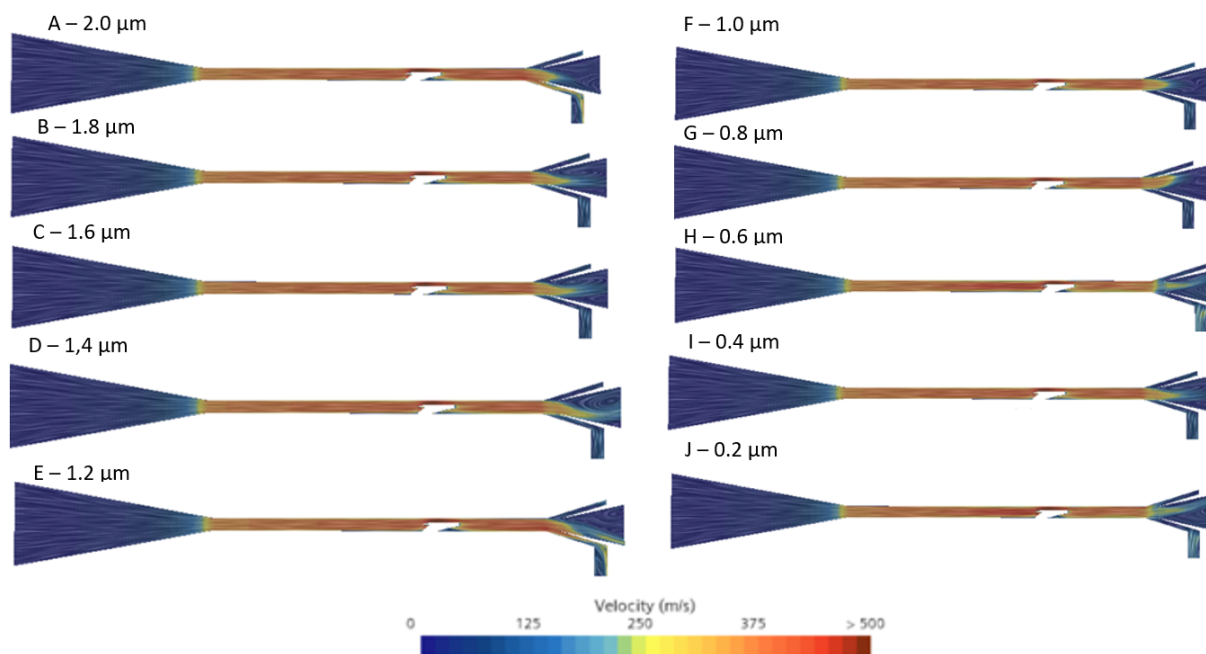


Fonte: Arquivo pessoal

Analisando-se a influência da geometria dos defletores nos perfis de velocidade ao longo do escoamento no SS. Na Figura 19 encontram-se os contornos de velocidade para os dez casos simulados com o defletor 1 em ordem decrescente (A-J) de tamanho de diâmetro das partículas injetadas. Como era de se esperar, na região da garganta encontram-se os maiores valores de velocidade, com valores de 500 m/s na região de estrangulamento causado pelo defletor, indicando a presença de escoamento supersônico. Além disso, é possível observar, com o aumento do diâmetro há um desvio maior da velocidade em direção ao coletor de partículas líquidas, facilitando a separação do gás natural.

A fim de complementar o fenômeno observado, construiu-se o gráfico ilustrado pela Figura 20 utilizando-se da mesma linha de sondagem ao longo do eixo X. Com isso, é possível

Figura 19 – Contornos de velocidade para o SS com defletor do tipo 1 para gotículas de diferentes tamanhos



Fonte: Arquivo pessoal

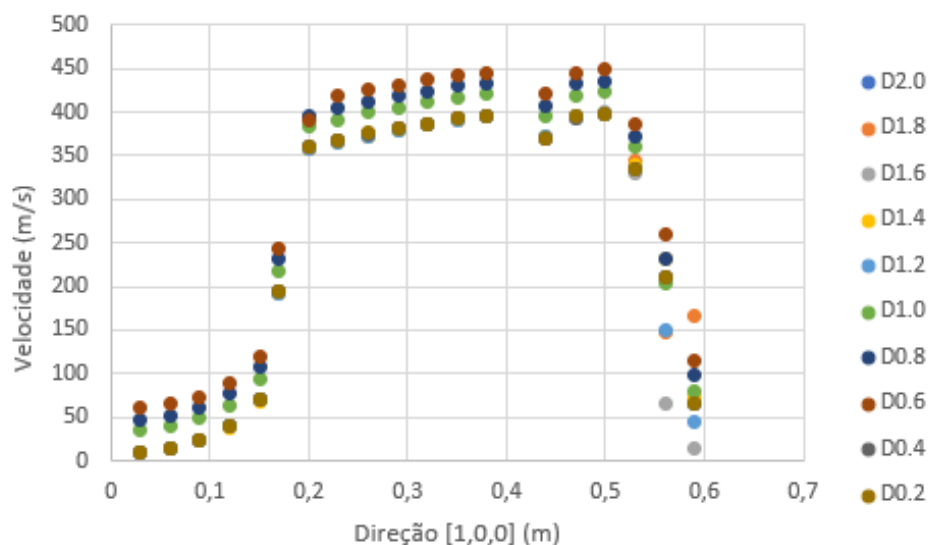
averiguar com maior nível de detalhes a diferença na velocidade de escoamento ao longo do separador supersônico para cada diâmetro de partículas analisado. Dos dados obtidos, é razoável concluir que em termos de magnitude da velocidade, o diâmetro da partícula não tem grande influência. Vale a pena ressaltar também, que as discontinuidades encontradas nos gráficos referem-se as mudanças bruscas no escoamento referente ao início da seção de separação na garganta do SS, assim como, no encontro do fluido com o defletor.

Realizando uma análise equivalente para os perfis de velocidades referentes às simulações contendo o defletor 2, foi possível averiguar um cenário semelhante ao relatado com o primeiro defletor. Partículas maiores são deslocadas com maior velocidade em direção ao coletor facilitando a separação do gás natural. Contudo, esse fenômeno não é tão preponderante quanto ao observado nas simulações com o defletor 1, como pode ser visto na Figura 21. Dessa forma, mais partículas se deslocam no sentido do difusor e não do coletor e esse comportamento reflete, inquestionavelmente, a influência da geometria do defletor na eficiência de separação, como será discutido em Seção 4.2.

Construiu-se também o gráfico do perfil de velocidade para as simulações realizadas com o defletor 2, como mostrado na Figura 22 a seguir. De sua análise é possível averiguar que não há uma mudança significativa nos valores de velocidade de escoamento entre as duas estruturas, mantendo-se os valores máximos de velocidade de escoamento em torno de 500 m/s .

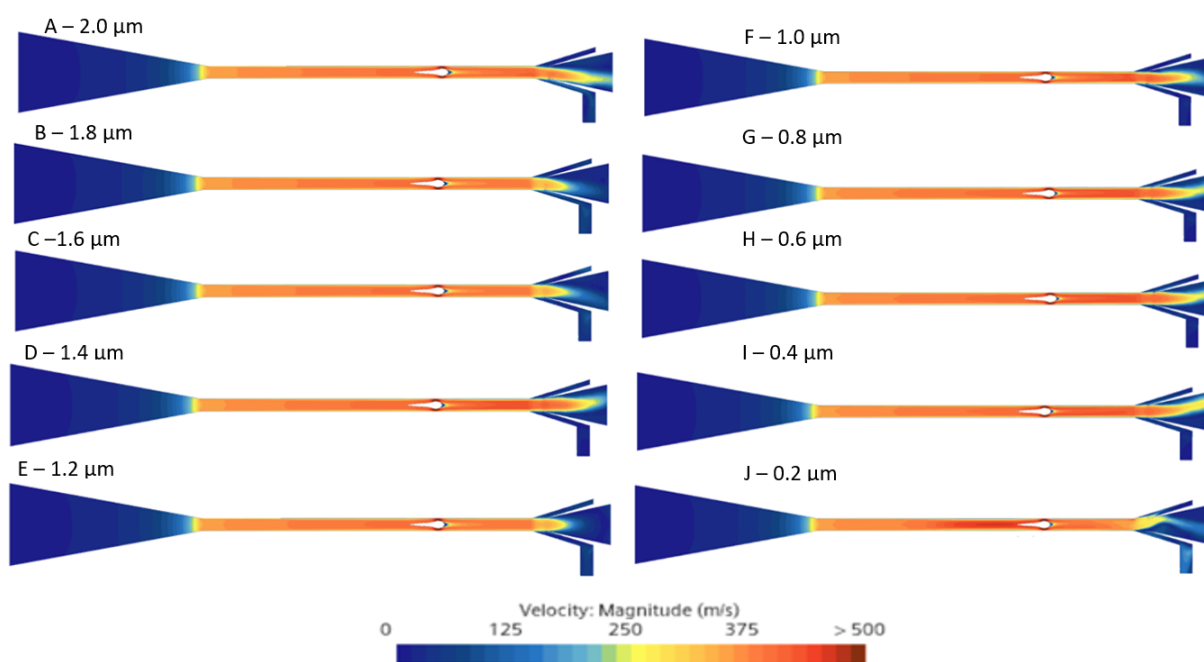
Dessa forma, realizou-se um estudo qualitativo à respeito da vorticidade na seção posterior aos dois tipos de defletores, uma vez que esse fenômeno está diretamente relacionado à

Figura 20 – Dados de velocidade ao longo de uma linha central na direção axial para a geometria com o defletor 1



Fonte: Arquivo pessoal

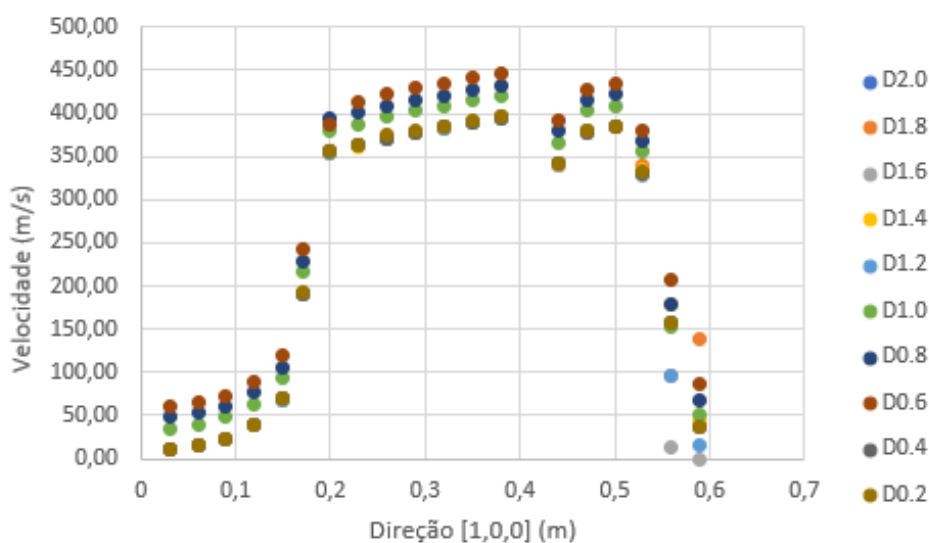
Figura 21 – Contornos de velocidade para o SS com defletor do tipo 2 para gotículas de diferentes tamanhos



Fonte: Arquivo pessoal

velocidade de escoamento junto à a geometria dos defletores e é um dos principais responsáveis pela eficiência de separação do gás natural em separadores supersônicos, segundo (YANG; WEN, 2017). Dessa forma, utilizou-se as duas simulações com partículas de 2,0 μm de diâmetro com os dois tipos de defletores a fim de comparar a formação de vórtice entre elas com o

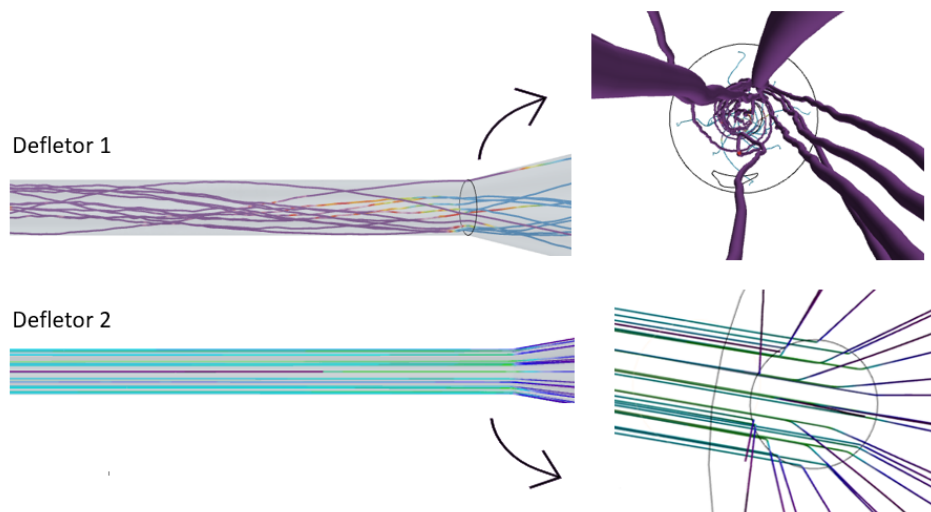
Figura 22 – Dados de velocidade ao longo de uma linha central na direção axial para a geometria com o defletor 2



Fonte: Arquivo pessoal

auxílio de linhas de contorno. Na Figura 23 encontram-se as duas geometrias.

Figura 23 – Formação de vórtice nas geometrias estudadas



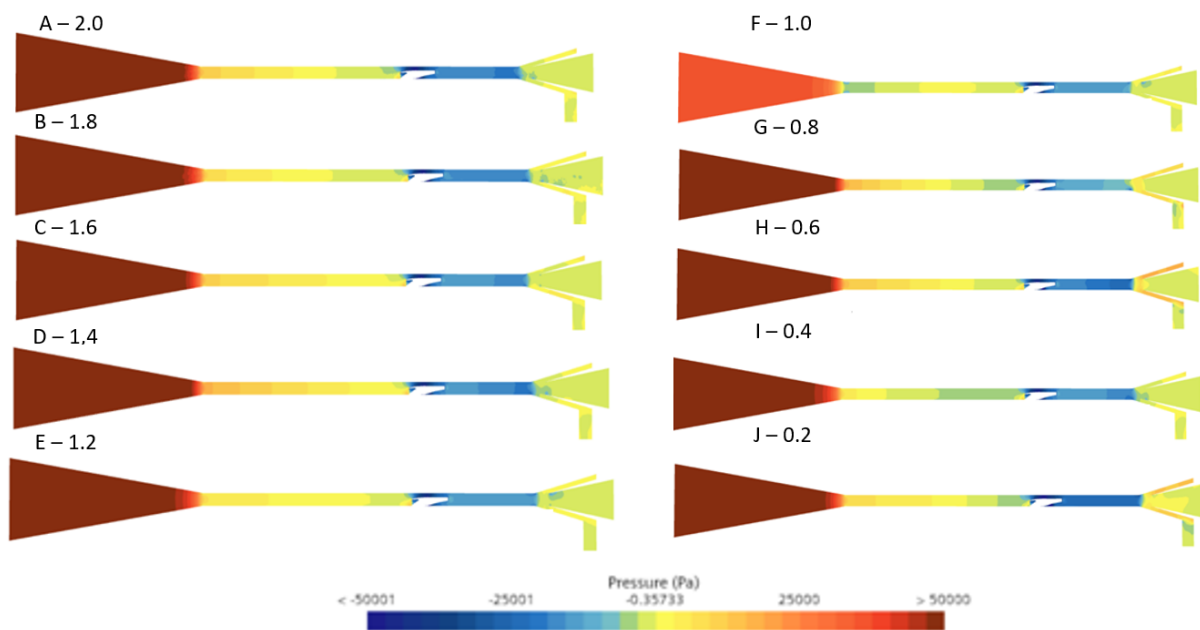
Fonte: Arquivo pessoal

Como é possível averiguar, com a utilização do defletor 1 a formação de vórtices é mais evidente, o que favorece a destinação das partículas ao coletor, e com isso, aumenta-se a eficiência de separação. Dessa forma, é possível concluir o efeito direto da geometria do defletor na eficiência da separação do equipamento.

No que diz respeito a análise dos perfis de pressão para as duas geometrias estudadas, procedeu-se de forma semelhante ao estudo dos perfis de velocidade comentados anteriormente. Através da mesma coordenada de pontos, construiu-se uma linha de sondagem paralela ao eixo

X que possibilitou a construção dos contornos e gráficos de pressão. Na Figura 24 encontra-se o contorno referente ao defletor 1.

Figura 24 – Contornos de pressão para o SS com defletor do tipo 1 para gotículas de diferentes tamanhos



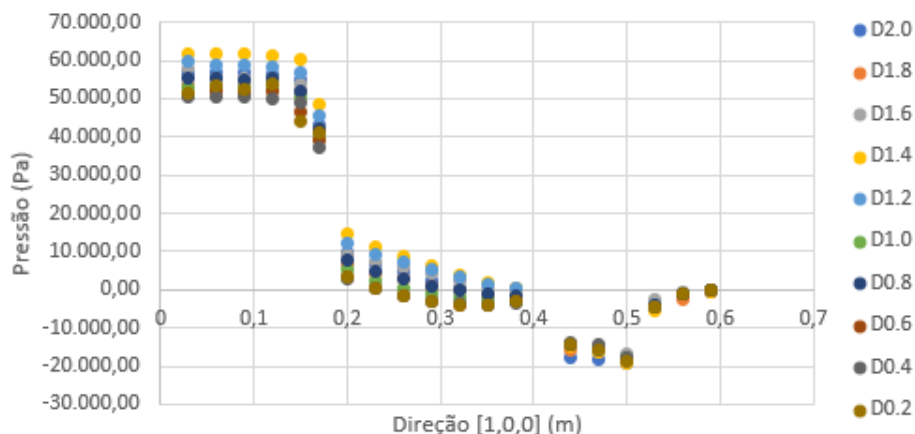
Fonte: Arquivo pessoal

Analisando-se a Figura 24, é possível observar a diferença de pressão entre a entrada e a saída do equipamento devido a recuperação parcial da energia presente ao longo do escoamento representada pelo gradiente de cores. Evidencia-se a redução drástica na seção de estrangulamento precedente ao defletor ilustrada em amarelo. Os dados obtidos comprovam o fenômeno de nucleação na região da garganta como descrito previamente na Subseção 2.2.2. Ressalta-se a utilização da simplificação da modelagem via densidade constante, dessa forma não é possível evidenciar a formação da onda de choque.

Além das observações anteriores, também construiu-se o gráfico do perfil de pressão, ilustrado em Figura 25 para todos os dez diâmetros de partículas estudados, a fim de detalhar o comportamento da variável para todos os casos. Assim como observado nos gráficos de velocidade, a descontinuidade dos pontos se deve à presença do defletor e à mudança brusca entre o bocal convergente e a garganta do equipamento.

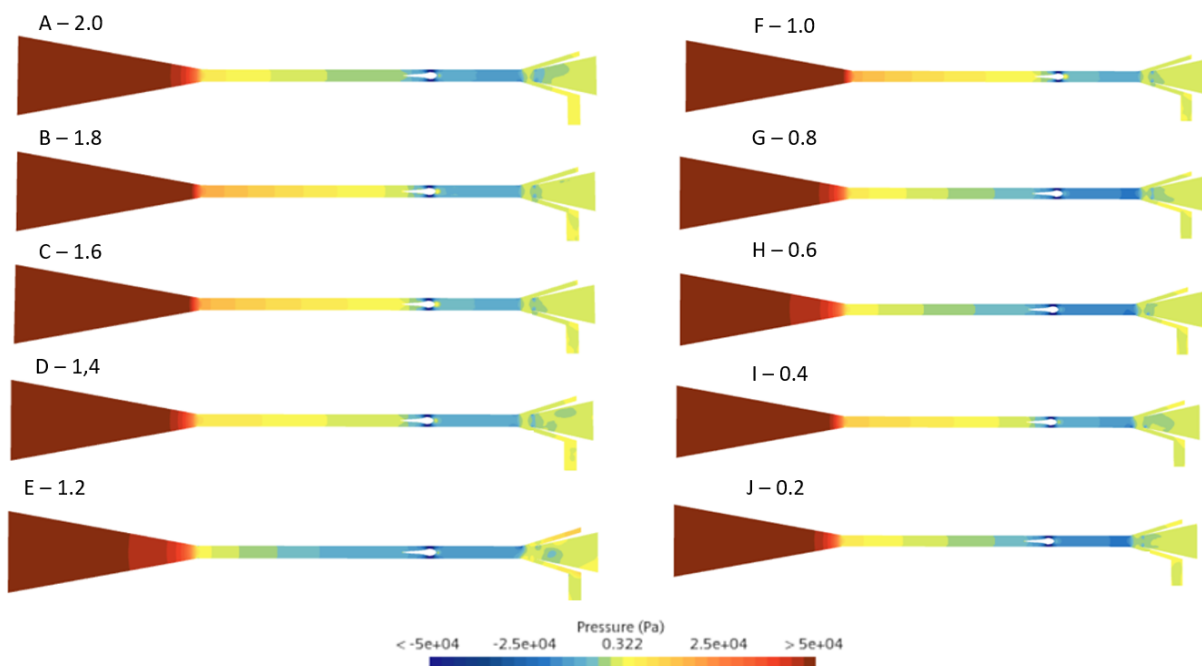
Realizando-se o mesmo estudo para o segundo defletor, pode-se construir também os contornos e o gráfico de perfis de pressão representado pelas Figura 26 e Figura 27, respectivamente. Através da análise das mesmas, é possível averiguar que para essa configuração obteve-se valores menores de queda de pressão ao longo do SS, favorecendo-o frente ao primeiro defletor no quesito de manutenção de equipamento, uma vez que maiores perdas de carga acarretam em um maior custo de compressão do gás para manter a velocidade de escoamento.

Figura 25 – Dados de pressão ao longo de uma linha central na direção axial para a geometria com o defletor 1



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 26 – Contornos de pressão para o SS com defletor do tipo 2 para gotículas de diferentes tamanhos

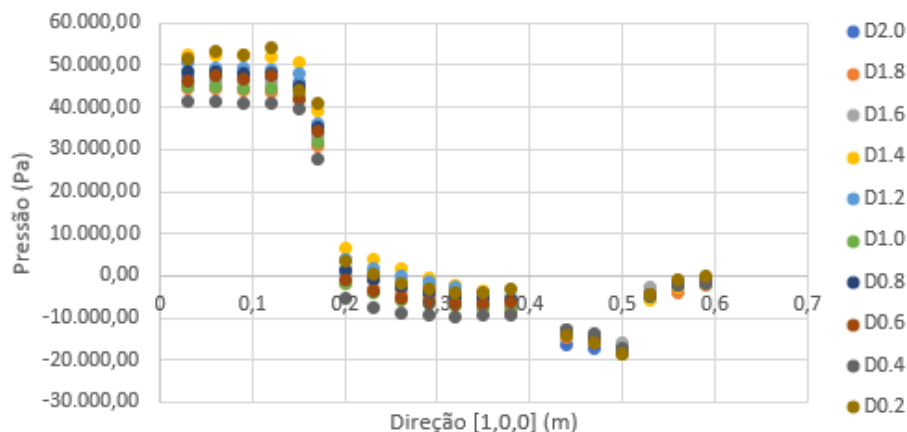


Fonte: Arquivo pessoal

4.2 Eficiência de separação

Visando-se discutir a eficiência de separação do gás natural, calculou-se a porcentagem de partículas coletadas para cada uma das estruturas dos defletores através da utilização de monitores de fluxo mássico adicionados na região de saída do difusor, a fim de analisar a influência do diâmetro da partícula em cada um desses casos. Realizou-se o balanço do fluxo

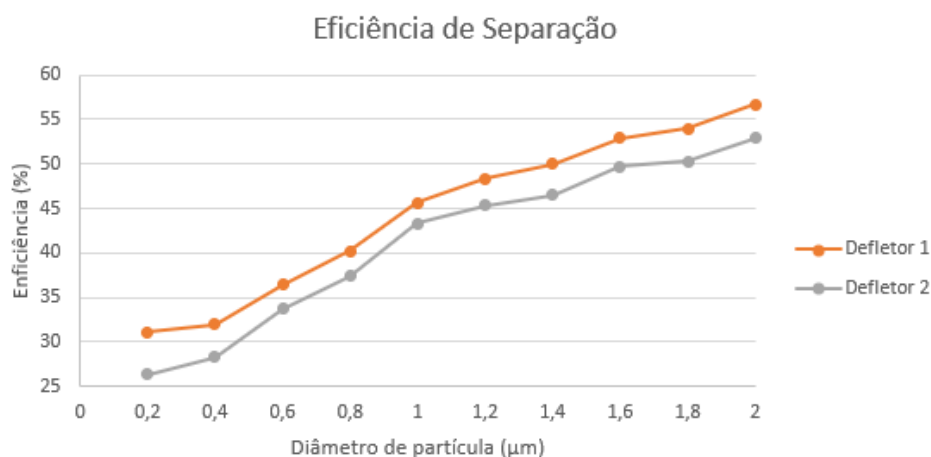
Figura 27 – Dados de pressão ao longo de uma linha central na direção axial para a geometria com o defletor 2



Fonte: Arquivo pessoal

mássico das partículas entre a seção de entrada e as duas saídas (coletor + difusor) a partir da coleta de dados desses artifícios numéricos adicionados em cada uma dessas regiões. Os resultados obtidos estão dispostos na Figura 28.

Figura 28 – Eficiência de coleta nos separadores supersônicos



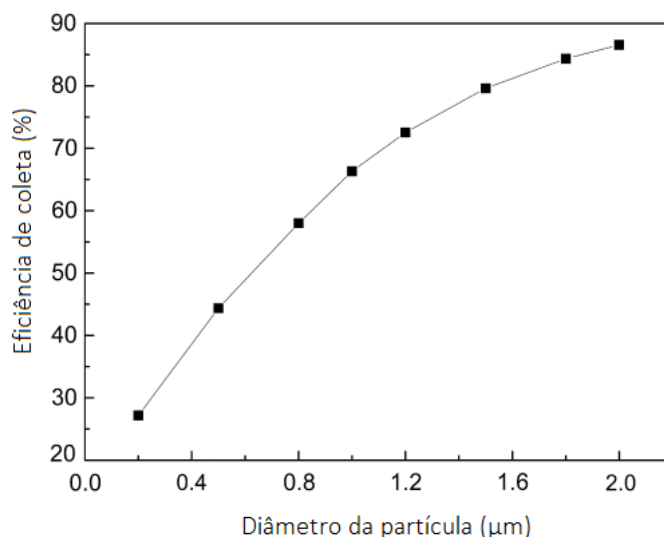
Fonte: Arquivo pessoal

A partir da análise do gráfico, é possível concluir que a eficiência aumenta diretamente com o tamanho da partícula para ambos os casos avaliados. É possível observar também que o defletor 1 possui valores maiores de eficiência para todos os diâmetros avaliados. Para valores abaixo de 0,8 µm, a eficiência é menor que 40% para ambos os casos, indicando que partículas menores são mais fáceis de serem carregadas junto ao escoamento gasoso do que serem, de fato, separadas dele. O valor máximo encontrado para a eficiência de separação foi de 56,67%

para o defletor 1 e 52,93% para o defletor 2, ambas para partículas de 2 μm .

Comparando-se os dados obtidos aos do trabalho de (YANG; WEN, 2017), nota-se que os valores alcançados no presente trabalho possuem uma eficiência menor, mesmo utilizando-se condições físicas semelhantes como ilustrado em Figura 29.

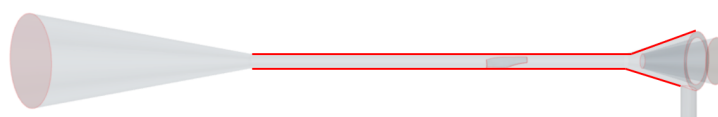
Figura 29 – Eficiência de coleta em (YANG; WEN, 2017)



Fonte: (YANG; WEN, 2017)

Contudo, vale a pena destacar que na simulação executada por eles, não há um artifício físico que colete as partículas condensadas, como o cilindro formulado para essa simulação. Na verdade, é utilizado uma condição de contorno do tipo 'aprisionamento' de partículas nas paredes que antecedem o difusor e eficiência de separação é dada por meio do balanço entre as partículas retidas no interior do equipamento e as que escapam junto à fase contínua. A Figura 30 ilustra o cenário utilizado por (YANG; WEN, 2017) fazendo-se um paralelo com o SS com o defletor 1, as paredes destacadas em vermelho referem-se às localizações da condição de aprisionamento das partículas aplicadas pelos autores.

Figura 30 – Condição de aprisionamento de partículas



Fonte: Arquivo pessoal

Tal condição permite a criação de um filme de líquido fino que favorece a coleta das partículas, e com isso, uma eficiência de separação maior e mais realista, uma vez que as partículas formadas estão no estado líquido, sendo menos suscetíveis ao ricocheteamento. Esse cenário é possível de ser revertido, uma vez mudando a condição de contorno utilizada nas paredes destacada em Figura 30 do modo de 'ricocheteamento' para 'aprisionamento'.

5 CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos, foi possível observar a influência direta do tamanho das partículas na eficiência de separação do gás natural. Partículas maiores tem mais facilidade de serem coletadas quando comparada com as de diâmetros inferiores. Partículas com diâmetros inferiores à $0,8 \mu\text{m}$ foram responsáveis por valores abaixo de 40% de eficiência de separação, enquanto partículas com $2 \mu\text{m}$ chegaram a proporcionar eficiências superiores à 50%.

Um outro fator de grande impacto na eficiência de coleta é a geometria do defletor utilizada no interior do equipamento. Essa é responsável direta pela criação dos vórtices, e com isso, impulsionar as partículas em direção ao tubo coletor. A partir da comparação entre as duas geometrias estudadas, o defletor 1 apresentou uma criação de vórtice mais evidente e com isso também é detentor de eficiências maiores quando comparado ao defletor 2.

Por fim, analisando-se os perfis de pressão entre as duas geometrias, o defletor 2 possui valores de perda de carga menores que os apresentados pelo defletor 1. favorecendo-o frente ao primeiro no quesito de manutenção de equipamento.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos trabalhos, algumas sugestões são: analisar os efeitos da mudança de fase no escoamento por meio da aplicação de modelos de transferência de massa e calor, atrelados a isso a análise dos fenômenos de quebra e coalescência das partículas. Sugere-se também a alteração nas condições de contorno das paredes precedentes ao coletor, além da utilização do modelo de *Fluid Film* possibilitando a criação do filme de gás condensado na parte inferior do SS.

Referências

- ALKIMIM, V. A. O histórico da extração e exploração do petróleo no Brasil e o novo marco regulatório do pré-sal. **FÓRUM BRASILEIRO SOBRE AS AGÊNCIAS REGULADORAS. Série Aperfeiçoamento de Magistrados**, v. 1, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- ALTAM, R. A.; LEMMA, T. A.; JUFAR, S. R. Trends in supersonic separator design development. In: EDP SCIENCES. **MATEC Web of Conferences**. [S.l.], 2017. v. 131, p. 03006. Citado na página 9.
- ANAC. **Número de Mach**. 2013. Url <https://www2.anac.gov.br/anacpedia/>. Citado na página 10.
- ANP. Superintendência de desenvolvimento e produção. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**, v. 137, p. 8, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- ARINELLI, L. de O. et al. Offshore processing of CO₂ rich natural gas with supersonic separator versus conventional routes. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, Elsevier, v. 46, p. 199–221, 2017. Citado na página 2.
- BATCHELOR, C. K.; BATCHELOR, G. **An introduction to fluid dynamics**. [S.l.]: Cambridge university press, 2000. Citado na página 10.
- CBIE. **Quantos Poços De Petróleo e Gás Temos No Brasil?** 2022. Url <https://cbie.com.br/artigos/quantos-pocos-de-petroleo-e-gas-temos-no-brasil/>. Citado na página 7.
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos-3**. [S.l.]: Amgh Editora, 2015. Citado na página 3.
- COMPANY, B. . Agenda de competitividade da cadeia produtiva de óleo e gás offshore no Brasil. Rio de Janeiro: ONIP, 2010. Citado na página 6.
- DUDLEY, B. et al. Bp statistical review of world energy. **BP Statistical Review, London, UK, accessed Aug**, v. 6, n. 2018, p. 00116, 2018. Citado na página 2.
- ENERGÉTICA, E.-E. de P. et al. Plano decenal de expansão de energia 2024. **Brasília: Ministério de Minas e Energia–Empresa de Pesquisa Energética**, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- FOELSCH, K. The analytical design of an axially symmetric laval nozzle for a parallel and uniform jet. **Journal of the Aeronautical Sciences**, v. 16, n. 3, p. 161–166, 1949. Citado na página 14.
- HAGHIGHI, M.; HAWBOLDT, K. A.; ABDI, M. A. Supersonic gas separators: Review of latest developments. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, Elsevier, v. 27, p. 109–121, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 3, 10 e 11.
- MACHADO, T. **Fluidodinâmica computacional na captura de carbono off-shore: separador supersônico**. 2022. Url <https://www.wikki.com.br/post/fluidodinamica-computacional-na-captura-de-carbono-off-shore-separador-supersonico>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

- MANSOUR, A.; LAURIEN, E. Numerical error analysis for three-dimensional cfd simulations in the two-room model containment thai+: Grid convergence index, wall treatment error and scalability tests. **Nuclear Engineering and Design**, Elsevier, v. 326, p. 220–233, 2018. Citado na página 20.
- MELO, D. C. de et al. Supersonic separator for cleaner offshore processing of supercritical fluid with ultra-high carbon dioxide content: Economic and environmental evaluation. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 234, p. 1385–1398, 2019. Citado na página 13.
- MENDES, A. P. d. A. et al. Mercado de gás natural no brasil: desafios para novo ciclo de investimentos. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 8.
- MONDAL, M. K.; BALSORA, H. K.; VARSHNEY, P. Progress and trends in co2 capture/separation technologies: A review. **Energy**, Elsevier, v. 46, n. 1, p. 431–441, 2012. Citado na página 2.
- NASCIMENTO, J. T. do. **AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE ULTRACENTRÍFUGAS A GÁS PARA REMOÇÃO DE CO2 EM POÇOS DO PRÉ-SAL**. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 12.
- ODDONE, D. Finalmente um mercado de gás natural no brasil. FGV Energia, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 1, 5 e 6.
- PETROBRAS. Caderno de mudança do clima. Petrobras, 2022. Citado na página 2.
- PETROBRÁS. **Entenda como foi formado o pré-sal**. 2018. Url <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- PRAST, B.; LAMMERS, B.; BETTING, M. Cfd for supersonic gas processing. In: CITESEER. **Fifth International Conference on CFD in the Process Industries**. [S.l.], 2006. p. 13–15. Citado na página 22.
- SANTOS, R. J. dos; AVELLAR, A. P. M. de. Da criação do conselho nacional do petróleo à política de conteúdo local: a trajetória histórica das políticas para a indústria do petróleo e gás natural no brasil. **História Econômica & História de Empresas**, v. 19, n. 1, 2016. Citado na página 5.
- SCHILLER, L. A drag coefficient correlation. **Zeit. Ver. Deutsch. Ing.**, v. 77, p. 318–320, 1933. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 49.
- SCHINKELSHOEK, P.; EPSOM, H. Supersonic gas conditioning-low pressure drop twister for ngl recovery. In: ONEPETRO. **Offshore Technology Conference**. [S.l.], 2006. Citado na página 2.
- WEN, C. et al. Three-dimensional numerical simulation of the supersonic swirling separator. In: ONEPETRO. **The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference**. [S.l.], 2010. Citado na página 10.
- YANG, Y.; WEN, C. Cfd modeling of particle behavior in supersonic flows with strong swirls for gas separation. **Separation and Purification Technology**, Elsevier, v. 174, p. 22–28, 2017. Citado 7 vezes nas páginas , 15, 20, 21, 22, 29 e 34.

YANG, Y. et al. Effect of inlet and outlet flow conditions on natural gas parameters in supersonic separation process. **PloS one**, Public Library of Science San Francisco, USA, v. 9, n. 10, p. e110313, 2014. Citado na página 14.

Apêndices

APÊNDICE A – Diagnóstico Malha Numérica - Geometria 1

Abaixo se encontra-se os valores da Malha volumétrica da Geometria 1 fornecidos através do diagnóstico completo do Simcenter STAR-CCM+.

- **Boundary Separador.Cilindro:**

37508 faces (4 triangular, 395 quadrilateral, 37109 polygonal)

Extents:

$x : [1.8699999967e - 01, 5.7000000000e - 01] \text{ m}$

$y : [-5.0000000000e - 02, 6.2000000766e - 03] \text{ m}$

$z : [-6.3984665862e - 03, 6.3984826400e - 03] \text{ m}$

Surface area: $1.3610387223e - 02m^2$

Maximum boundary skewness angle = $8.3106452480e + 01deg$

- **Boundary Separador.Subtract.Asa₂ :**

4539 faces (1 triangular, 307 quadrilateral, 4231 polygonal)

Extents:

$x : [3.8999999946e - 01, 4.2500000000e - 01] \text{ m}$

$y : [-6.1999993746e - 03, 3.7654190000e - 03] \text{ m}$

$z : [-2.9737210000e - 03, 3.3932035211e - 03] \text{ m}$

Surface area: $7.1107626274e - 04m^2$

Maximum boundary skewness angle = $8.5857766392e + 01deg$

- **Boundary Separador.Subtract.Corpo Principal:**

7666 faces (150 quadrilateral, 7516 polygonal)

Extents:

$x : [7.6121971220e - 19, 5.7000000000e - 01] \text{ m}$

$y : [-4.0199999985e - 02, 4.0199999974e - 02] \text{ m}$

$z : [-4.0094810131e - 02, 4.0094810161e - 02] \text{ m}$

Surface area: $3.8290171938e - 02m^2$

Maximum boundary skewness angle = $6.5795953793e + 01deg$

- **Boundary Outlet Gas Condensado:**

261 faces (158 quadrilateral, 103 polygonal)

Extents:

$x : [5.5720000001e - 01, 5.7000000000e - 01] \text{ m}$

$y : [-5.0000000000e - 02, -5.0000000000e - 02] \text{ m}$

$z : [-6.3513848199e - 03, 6.3513848295e - 03] \text{ m}$

Surface area: $1.2710884432e - 04m^2$

Maximum boundary skewness angle = $3.6858322345e + 01deg$

- **Boundary Separador.Subtract.Corpo Principal 2:**

2217 faces (14 quadrilateral, 2203 polygonal)

Extents:

$x : [5.2400551400e - 01, 5.8700000000e - 01] \text{ m}$

$y : [-1.9898214434e - 02, 1.9876883401e - 02] \text{ m}$

$z : [-1.9999999977e - 02, 1.9999999971e - 02] \text{ m}$

Surface area: $5.2939388501e - 03 \text{ m}^2$

Maximum boundary skewness angle = $4.1062986511e + 01 \text{ deg}$

- **Boundary Entrada:**

375 faces (179 quadrilateral, 196 polygonal)

Extents:

$x : [0.0000000000e + 00, 5.8818687548e - 11] \text{ m}$

$y : [-4.0199999985e - 02, 4.0199999974e - 02] \text{ m}$

$z : [-4.0094810131e - 02, 4.0094810161e - 02] \text{ m}$

Surface area: $5.0311170694e - 03 \text{ m}^2$

Maximum boundary skewness angle = $3.9337007954e + 01 \text{ deg}$

- **Boundary Saída Gás Seco:**

748 faces (177 quadrilateral, 571 polygonal)

Extents:

$x : [5.8699999991e - 01, 5.8700000000e - 01] \text{ m}$

$y : [-1.9898214434e - 02, 1.9876883401e - 02] \text{ m}$

$z : [-1.9999999977e - 02, 1.9999999971e - 02] \text{ m}$

Surface area: $1.2452081312e - 03 \text{ m}^2$

Maximum boundary skewness angle = $4.1414168735e + 01 \text{ deg}$

- **Region Region:**

5 tetrahedral cells

2292 hexahedral cells

557 wedge cells

290697 polyhedral cells

293551 cells total

1365891 interior faces

(31917 triangular, 768456 quadrilateral, 565518 polygonal)

927458 vertices

Extents:

$x : [0.0000000000e + 00, 5.8700000000e - 01] \text{ m}$

$y : [-5.0000000000e - 02, 4.0199999974e - 02] \text{ m}$

$z : [-4.0094810131e - 02, 4.0094810161e - 02] \text{ m}$

Maximum interior cell index delta: 148276, average: $6.4479296225e + 02$

Maximum cell face index delta: 680140, average: $6.0480614135e + 03$

Volume range: $[6.4364504210e - 14, 4.9098283252e - 07] \text{ m}^3$

Minimum distance between centroids of neighbor cells = 1.9745141803e-05

Maximum skewness angle = 9.7353980907e + 01 deg

Face validity:

Minimum Face Validity: 9.9275180861e - 01

Maximum Face Validity: 1.0000000000e + 00

Face Validity < 0.50 0 0.000%

0.50 <= Face Validity < 0.60 0 0.000%

0.60 <= Face Validity < 0.70 0 0.000%

0.70 <= Face Validity < 0.80 0 0.000%

0.80 <= Face Validity < 0.90 0 0.000%

0.90 <= Face Validity < 0.95 0 0.000%

0.95 <= Face Validity < 1.00 1 0.000%

1.00 <= Face Validity 293550 100.000%

Volume Change:

Minimum Volume Change: 1.100004e - 02

Maximum Volume Change: 1.000000e+00)

Volume Change < 0e+00 0 0.000%

0e+00 <= Volume Change < 1e-06 0 0.000%

1e-06 <= Volume Change < 1e-05 0 0.000%

1e-05 <= Volume Change < 1e-04 0 0.000%

1e-04 <= Volume Change < 1e-03 0 0.000%

1e-03 <= Volume Change < 1e-02 0 0.000%

1e-02 <= Volume Change < 1e-01 8590 2.926%

1e-01 <= Volume Change <= 1e+00 284961 97.074%

Maximum boundary skewness angle in region = 8.585777e+01 deg

Overall Face Validity:

Minimum Face Validity: 9.927518e-01

Maximum Face Validity: 1.000000e+00

Face Validity < 0.50 0 0.000%

0.50 <= Face Validity < 0.60 0 0.000%

0.60 <= Face Validity < 0.70 0 0.000%

0.70 <= Face Validity < 0.80 0 0.000%

0.80 <= Face Validity < 0.90 0 0.000 %

0.90 <= Face Validity < 0.95 0 0.000%

0.95 <= Face Validity < 1.00 1 0.000%

1.00 <= Face Validity 293550 100.000%

Overall Volume Change:

Minimum Volume Change: 1.100004e-02

Maximum Volume Change: 1.000000e+00

Volume Change < 0e+00 0 0.000%

0e+00 <= Volume Change < 1e-06 0 0.000%

1e-06 <= Volume Change < 1e-05 0 0.000%

1e-05 <= Volume Change < 1e-04 0 0.000%

1e-04 <= Volume Change < 1e-03 0 0.000%

1e-03 <= Volume Change < 1e-02 0 0.000%

1e-02 <= Volume Change < 1e-01 8590 2.926%

1e-01 <= Volume Change <= 1e+00 284961 97.074%

APÊNDICE B – Diagnóstico Malha Numérica - Geometria 2

Abaixo se encontra-se os valores da Malha volumétrica da Geometria 2 fornecidos através do diagnóstico completo do Simcenter STAR-CCM+.

- **Boundary Separador.Corpo Cilindro:**

33864 faces (102 quadrilateral, 33762 polygonal)

Extents: $x : [1.8699999958e - 01, 5.8700000000e - 01]$ m

$y : [-5.0000000000e - 02, 1.9876883388e - 02]$ m

$z : [-1.9999999980e - 02, 1.9999999994e - 02]$ m

Surface area: $1.8950505473e - 02$ m²

Maximum boundary skewness angle = $5.2350457544e + 01$ deg

- **Boundary Saída cilindro:**

194 faces (114 quadrilateral, 80 polygonal)

Extents:

$x : [5.5728023069e - 01, 5.6991976931e - 01]$ m

$y : [-5.0000000000e - 02, -4.9999999990e - 02]$ m

$z : [-6.3197693426e - 03, 6.3196225397e - 03]$ m

Surface area: $1.2600274768e - 04$ m²

Maximum boundary skewness angle = $3.1385733533e + 01$ deg

- **Boundary Separador.Default:**

10827 faces (313 quadrilateral, 10514 polygonal)

Extents:

$x : [4.0692855885e - 19, 5.7000000000e - 01]$ m

$y : [-4.0199999985e - 02, 4.0199999974e - 02]$ m

$z : [-4.0094810129e - 02, 4.0094810161e - 02]$ m

Surface area: $3.8678195695e - 02$ m²

Maximum boundary skewness angle = $7.9397031412e + 01$ deg

- **Boundary Separador.Default 2:**

0 faces

Extents:

$x : [1.0000000000e + 20, -1.0000000000e + 20]$ m

$y : [1.0000000000e + 20, -1.0000000000e + 20]$ m

$z : [1.0000000000e + 20, -1.0000000000e + 20]$ m

Maximum boundary skewness angle = $0.0000000000e + 00$ deg

- **Boundary Entrada:**

375 faces (179 quadrilateral, 196 polygonal)

Extents:

$x : [0.0000000000e + 00, 5.8817913592e - 11] \text{ m}$

$y : [-4.0199999985e - 02, 4.0199999974e - 02] \text{ m}$

$z : [-4.0094810129e - 02, 4.0094810161e - 02] \text{ m}$

Surface area: $5.0311170691e - 03 \text{ m}^2$

Maximum boundary skewness angle = $3.9339231392e + 01 \text{ deg}$

- **Boundary Saída gás seco:**

709 faces (165 quadrilateral, 544 polygonal)

Extents:

$x : [5.8699999994e - 01, 5.8700000000e - 01] \text{ m}$

$y : [-1.9931689837e - 02, 1.9876883388e - 02] \text{ m}$

$z : [-1.9999999980e - 02, 1.9999999994e - 02] \text{ m}$

Surface area: $1.2434965867e - 03 \text{ m}^2$

Maximum boundary skewness angle = $4.2848879204e + 01 \text{ deg}$

- **Boundary Separador.Default 3:**

0 faces

Extents:

$x : [1.0000000000e + 20, -1.0000000000e + 20] \text{ m}$

$y : [1.0000000000e + 20, -1.0000000000e + 20] \text{ m}$

$z : [1.0000000000e + 20, -1.0000000000e + 20] \text{ m}$

Maximum boundary skewness angle = $0.0000000000e + 00 \text{ deg}$

- **Region Region:**

1 tetrahedral cells

1583 hexahedral cells

184 wedge cells

268295 polyhedral cells

270063 cells total

1269904 interior faces

(30576 triangular, 705941 quadrilateral, 533387 polygonal)

865140 vertices

Extents:

$x : [0.0000000000e + 00, 5.8700000000e - 01] \text{ m}$

$y : [-5.0000000000e - 02, 4.0199999974e - 02] \text{ m}$

$z : [-4.0094810129e - 02, 4.0094810161e - 02] \text{ m}$

Maximum interior cell index delta: 1865, average: $4.1888967119e + 02$

Maximum cell face index delta: 8276, average: $3.2765444063e + 03$

Volume range: $[7.7331638033e - 14, 4.9164789684e - 07] \text{ m}^3$

Minimum distance between centroids of neighbor cells = $2.3870539336e - 05$

Maximum skewness angle = $8.4879440758e + 01$ deg

Face validity:

Minimum Face Validity: $1.0000000000e + 00$

Maximum Face Validity: $1.0000000000e + 00$

Face Validity < 0.50 0 0.000%

0.50 <= Face Validity < 0.60 0 0.000%

0.60 <= Face Validity < 0.70 0 0.000%

0.70 <= Face Validity < 0.80 0 0.000%

0.80 <= Face Validity < 0.90 0 0.000%

0.90 <= Face Validity < 0.95 0 0.000%

0.95 <= Face Validity < 1.00 0 0.000%

1.00 <= Face Validity 270063 100.000%

Volume Change:

Minimum Volume Change: $1.100294e - 02$

Maximum Volume Change: $1.000000e + 00$

Volume Change < $0e+00$ 0 0.000%

$0e+00$ <= Volume Change < $1e-06$ 0 0.000%

$1e-06$ <= Volume Change < $1e-05$ 0 0.000%

$1e-05$ <= Volume Change < $1e-04$ 0 0.000%

$1e-04$ <= Volume Change < $1e-03$ 0 0.000%

$1e-03$ <= Volume Change < $1e-02$ 0 0.000%

$1e-02$ <= Volume Change < $1e-01$ 3775 1.398%

$1e-01$ <= Volume Change <= $1e+00$ 266288 98.602%

Maximum boundary skewness angle in region = $7.939703e + 01$ deg

Overall Face Validity:

Minimum Face Validity: $1.000000e + 00$

Maximum Face Validity: $1.000000e + 00$

Face Validity < 0.50 0 0.000%

0.50 <= Face Validity < 0.60 0 0.000%

0.60 <= Face Validity < 0.70 0 0.000%

0.70 <= Face Validity < 0.80 0 0.000%

0.80 <= Face Validity < 0.90 0 0.000%

0.90 <= Face Validity < 0.95 0 0.000%

0.95 <= Face Validity < 1.00 0 0.000%

1.00 <= Face Validity 270063 100.000%

Overall Volume Change:

Minimum Volume Change: $1.100294e - 02$

Maximum Volume Change: $1.000000e + 00$

Volume Change < $0e+00$ 0 0.000%

$0e+00$ <= Volume Change < $1e-06$ 0 0.000%

$1e-06$ <= Volume Change < $1e-05$ 0 0.000%

$1e-05$ <= Volume Change < $1e-04$ 0 0.000%

$1e-04$ <= Volume Change < $1e-03$ 0 0.000%

$1e-03$ <= Volume Change < $1e-02$ 0 0.000%

$1e-02$ <= Volume Change < $1e-01$ 3775 1.398%

$1e-01$ <= Volume Change <= $1e+00$ 266288 98.602%

Anexos

ANEXO A – Equacionamento da fase dispersa

De acordo com o guia do usuário do Simcenter STAR-CCM+, a equação de conservação do movimento das partículas é dada de acordo com o *framework* Lagrangeano, em que a variação de momento é balanceada pelas forças de superfície e de contato que atuam sobre a partícula, dada pela Equação (5).

$$m_p = \frac{dv_p}{dt} = F_s + F_b \quad (5)$$

Em que F_s é a resultante das forças que atuam na superfície da partícula e F_b é a resultante das forças de corpo. Dadas respectivamente pelas Equação (6) e Equação (7).

$$F_s = F_d + F_p + F_{vm} \quad (6)$$

Onde F_d é força de arrasto, F_p Força de gradiente de pressão e F_{vm} é a força referente à massa virtual, aqui desprezada.

$$F_b = F_g + F_{MRF} + F_u + F_c + F_{co} \quad (7)$$

Em que F_g é a força referente à gravidade, F_{MRF} são as forças estruturadas baseadas em uma referencia rotacional, F_c é referente às forças de contato (modelada apenas na metodologia de elementos discretos (DEM)), F_u força corporal definida pelo usuário, e por fim, F_{co} é referente à força de Coulomb. Essa parcela da equação de variação de momento é desprezada no presente estudo por simplificação.

A.0.1 Força de gradiente de pressão

A força de gradiente de pressão é definida de acordo com a Equação (8).

$$F_p = -V_p \nabla_{p_{static}} \quad (8)$$

Onde V_p é o volume da partícula e $\nabla_{p_{static}}$ é o gradiente de pressão estática na fase contínua.

A.0.2 Força de Arrasto

Já a força de arrasto é dada pela Equação (9).

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_p |v_s| v_s \quad (9)$$

Em que C_d é coeficiente de arrasto da partícula, nesse caso calculado pela correlação de Schiller-Naumann (SCHILLER, 1933), ρ densidade da fase contínua, V_s é a velocidade de

deslizamento da partícula, que por sua vez é dada pela diferença entre a velocidade instantânea e a velocidade média da fase contínua, e por fim, A_p é área projetada da partícula.