



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JÉSSICA BARBOSA DA SILVA DO NASCIMENTO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM VASO SEPARADOR HORIZONTAL
BIFÁSICO**

CAMPINA GRANDE - PB

2017

JÉSSICA BARBOSA DA SILVA DO NASCIMENTO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM VASO SEPARADOR HORIZONTAL
BIFÁSICO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Fenômenos de Transporte e Energia

Orientadores: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

CAMPINA GRANDE-PB

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

N244m Nascimento, Jéssica Barbosa da Silva do.
Modelagem e simulação de um vaso separador horizontal bifásico / Jéssica Barbosa da Silva do Nascimento. – Campina Grande, 2017.
107 f. : il. color.

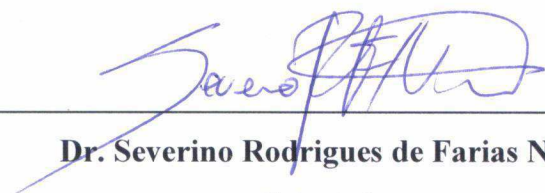
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
Referências.

1. Separação Gás/Óleo. 2. Simulação Numérica. 3. CFD. 4. Ansys CFX. I. Farias Neto, Severino Rodrigues de. II. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. III. Título.

CDU 621(043)

JÉSSICA BARBOSA DA SILVA DO NASCIMENTO

Dissertação Aprovada em 17/08/2017 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:



Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

Orientador

PPGEM/UAEQ/CCT/UFCG



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Co-Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Tony Herbert Freire de Andrade

Examinador Externo

UAEM/CCT/UFCG



Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias

Examinadora Externa

UATEC/CDSA/UFCG

*Enquanto eu tiver perguntas e não houver resposta
continuarei a escrever.
(Clarice Lispector).*

*Sem a curiosidade que me move, que me inquieta,
Que me insere na busca,
Nem aprendo, nem ensino.*

(Paulo Freire)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço em memória a minha avó **Amélia Barbosa**, a responsável por toda a minha educação;

Agradeço em sequência a duas outras mulheres da minha vida, minha mãe **Roberta Barbosa** e minha madrinha **Graça Barbosa**, por se dedicarem a cuidar de mim;

Ao meu noivo **Luiz Henrique Gamboa Marques** por todo amor, carinho e companheirismo em todos os momentos difíceis e decisivos de minha vida pessoal e acadêmica.

Às minhas primas **Fabricia Barbosa**, **Ângela Barbosa** e **Maria Elma Barbosa**, assim como a minha irmã **Dayane Barbosa**, por todo apoio e incentivo;

À minha tia **Antônieta Silva** e ao meu tio **Heraldo Barbosa**, como também a minha sogra **Lúcia Gamboa** e ao meu sogro **Raúl Gamboa** por abrirem as portas das suas casas sempre que eu precisei de um lugar tranquilo para estudar e escrever;

Ao professor **Tony Herbert** e a minha amiga **Danielle Vieira** por toda paciência e ajuda durante o meu aprendizado a respeito de fluidodinâmica computacional.

Ao professor **Enivaldo Barbosa** pelas dicas e conselhos.

Aos meus amigos **Adailton Henriques**, **Jéssica Lacerda**, **Jéssica Ferreira**, **Vanderson Agra**, **Hortência Magalhães**, **Daniel Lira**, **Robson Queiroz**, **Boniek Leite** e **José Ricardo** pelas inúmeras contribuições e parcerias ao longo do mestrado;

À **Wanda** pela amizade, carinho e excelente atendimento durante esse período de pós-graduação;

À CAPES, por proporcionar as condições financeiras para a minha dedicação exclusiva a esse trabalho;

Ao meu orientador professor **Antonio Gilson** e ao LCTF por fornecerem as condições materiais para realização dos experimentos numéricos;

Por fim, agradeço em especial ao meu orientador professor **Severino de Farias** pela orientação, ideias e conselhos que me foram dados e que resultaram nesta dissertação de mestrado e no meu crescimento pessoal e intelectual.

DEDICATÓRIA

“Estar hoje aqui não é questão apenas de merecimento, é questão de oportunidade. Por ser a primeira Engenheira em quatro gerações, dedico essa dissertação às mulheres da Família Barbosa”.

(Em especial à Amélia Gomes Barbosa)

NASCIMENTO, Jéssica Barbosa da Silva do. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM VASO SEPARADOR HORIZONTAL BIFÁSICO**. 107 p. Dissertação de mestrado (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017.

RESUMO

Os separadores são equipamentos utilizados no processamento primário da indústria do petróleo com o objetivo de separar a mistura multifásica proveniente dos poços produtores. O trabalho avaliou o efeito dos dispositivos internos do vaso separador sobre a dinâmica do escoamento no processo de separação gás/óleo. Foi definido uma modelagem matemática com base na dinâmica de fluidos computacional (CFD) do separador horizontal bifásico. Adotou-se a abordagem Euleriana-Euleriana, considerando o modelo de mistura, disponibilizado no *software Ansys CFX 15.0*. O domínio consiste em um separador horizontal cilíndrico constituído de uma placa porosa que o divide em duas regiões: a região de separação primária, contendo três dispositivos internos (um defletor e duas chicanas) e a região de decantação. Foi gerada uma malha numérica empregando elementos tetraédricos, para a discretização das equações de conservação de massa, momento linear e de turbulência $k - \varepsilon$ padrão usando o método dos volumes finitos. Assumiu-se o escoamento em regimes permanente e transiente, isotérmico, com propriedades dos fluidos constantes e das forças interfaciais foram consideradas apenas as forças de arraste. Os resultados dos campos vetoriais de velocidade, assim como a fração volumétrica das fases indicam que a dinâmica do escoamento é fortemente dependente dos dispositivos internos. Na região de separação primária observou-se um alto nível de mistura causada pela turbulência gerada pelo impacto dos fluidos sobre a placa defletora posicionada imediatamente após a seção de entrada. A placa porosa possibilitou uma redução da turbulência dos fluidos, causada pela resistência do meio poroso ao escoamento.

Palavras-chave: Separação gás/óleo, simulação numérica, CFD, Ansys CFX.

NASCIMENTO, Jéssica Barbosa da Silva do. **MODELING AND SIMULATION OF A TWO PHASES SEPARATOR HORIZONTAL** 107 p. Dissertação de mestrado (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017.

ABSTRACT

The separators are equipments used in the primary processing of the petroleum industry to separate the multiphase mixture from the producing wells. The work evaluated the effect of the internal devices of the separator vessel on the flow dynamics in the gas/oil separation process. A mathematical model was defined based on computational fluid dynamics (CFD) of the horizontal two-phase separator. The Eulerian-Eulerian approach was adopted, considering the mixture model, available in Ansys CFX 15.0 software. The domain consists of a horizontal cylindrical separator consisting of a porous plate that divides it into two regions: the primary separation, containing three internal devices (one deflector plate and two baffles) and the settling region. A numerical grid was generated employing tetrahedral elements, for the discretization of the mass conservation, linear momentum and $k - \varepsilon$ standard turbulence equations using the finite volume method. Isothermal flow with constant fluid properties in both steady state and transient regimes were assumed, and, from the interfacial forces, only the drag forces were considered. The velocity vector field results as well as the volumetric fraction of the phases indicate that the flow dynamics are strongly dependent on the internal devices. In the primary separation region, a high-level of mixing was observed due to the turbulence generated by the impact of the fluids on a deflector plate positioned immediately after the inlet section. The porous plate allowed a reduction of the turbulence of the fluids, caused by the resistance of the porous medium to the flow.

Keys-words: Gas/oil Separation, numerical simulation, CFD, Ansys CFX.

LISTA DE SIGLAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EDP's	Equações Diferenciais Parciais
GOR	Razão Gás / Óleo
LCTF	Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos
UPGN's	Unidades de Processamento de Gás Natural

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fluxograma de etapas para o desenvolvimento da simulação numérica	30
Figura 2.2	Tipos de malhas.	30
Figura 3.1	Esquema de um sistema de produção.	46
Figura 3.2	Vaso separador horizontal bifásico.	53
Figura 3.3	Vaso separador vertical bifásico.	54
Figura 3.4	Desviadores de entrada.	56
Figura 3.5	Defletor tipo placa plana.	57
Figura 3.6	Separador horizontal com vista dos dispositivos internos.	58
Figura 4.1	Dimensões geométricas do vaso separador horizontal bifásico.	65
Figura 4.2	Geometria do separador horizontal bifásico	66
Figura 4.3	Malha não-estruturada. A) Região de meio poroso. B) Região de mistura, evidenciando o interior, onde encontram-se o defletor e duas chicanas.	66
Figura 4.4	Ilustração do nível de líquido definido para o separador horizontal.	70
Figura 4.5	Plano longitudinal zx usado para análise dos resultados.	72
Figura 5.1	Fração de volume do óleo (Caso 1).	75
Figura 5.2	Fração de volume do óleo (Caso 2).	75
Figura 5.3	Fração de volume do óleo (Caso 3).	76
Figura 5.4	Fração de volume do óleo (Caso 4).	76
Figura 5.5	Linhas de fluxo das fases gás (a) e óleo (b) na seção de mistura (Caso 1).	78
Figura 5.6	Linhas de fluxo das fases gás (a) e óleo (b) na seção de mistura (Caso 2).	79
Figura 5.7	Linhas de fluxo das fases gás e óleo na seção de mistura (Caso 3).	80
Figura 5.8	Linhas de fluxo das fases gás (a) e óleo (b) na seção de mistura (Caso 4).	81
Figura 5.9	Representação do campo vetorial de velocidade superficial do gás na seção de mistura.	82
Figura 5.10	Campo vetorial de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) na seção de mistura.	83
Figura 5.11	Ilustração das linhas de fluxo para o gás (a) e o óleo (b) no vaso separador (Caso 1),	84
Figura 5.12	Ilustração das linhas de fluxo para o gás (a) e o óleo (b) no vaso separador (Caso 2).	87

Figura 5.13	Ilustração das linhas de fluxo para o gás (a) e o óleo (b) no vaso separador (Caso 3).	88
Figura 5.14	Ilustração das linhas de fluxo para o gás (a) e o óleo (b) no vaso separador (Caso 4).	89
Figura 5.15	Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 1).	90
Figura 5.16	Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 2).	91
Figura 5.17	Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 3).	92
Figura 5.18	Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 4).	93
Figura 5.19	Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 5).	96
Figura 5.20	Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 6).	97
Figura 5.21	Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 7).	98
Figura 5.22	Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 8).	99
Figura 5.23	Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 9).	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Classificação de pressão de operação em vasos separadores.	55
Tabela 4.1	Condições de contorno estabelecidas.	69
Tabela 4.2	Especificações básicas referente as propriedades dos fluidos	70
Tabela 4.3	Considerações básicas.	70
Tabela 4.4	Dados para o controle de solução.	71
Tabela 4.5	Descrição das simulações numéricas realizadas	71

NOMENCLATURA

LETRAS LATINAS

\vec{U}	Vetor velocidade da mistura	[m/s]
$A_{\alpha\beta}$	Densidade de área interfacial	[-]
r	Fração volumétrica	[-]
r_{α}	Fração de volume da fase α	[-]
r_{β}	Fração de volume da fase β	[-]
V_{α}	Volume ocupado pela fase α	[m ³]
V	Volume	[m ³]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H	Altura do tampo elíptico	[m]
N_p	Número total de fases	[-]
P_{tot}	Pressão total	[Pa]
P_{sta}	Pressão estática	[Pa]
\vec{U}_{α}	Vetor velocidade da fase α	[m/s]
\dot{m}	Vazão mássica da mistura	[kg/s]
\dot{m}_{α}	Vazão mássica da fase α	[kg/s]
Re	Número de Reynolds	[-]
G	Produção devido a força de corpo	[-]
G_{buoy}	Produção devido ao empuxo	[-]
G_{rot}	Produção devido a rotação	[-]
G_{res}	Produção devido à resistência	[-]

M_{α}	Força total na fase α	[N]
$M_{\alpha\beta}^D$	Força de arrasto da interface	[N]
$M_{\alpha\beta}^L$	Força de elevação	[N]
$M_{\alpha\beta}^{LUB}$	Força de lubrificação de parede	[N]
$M_{\alpha\beta}^{VM}$	Força de massa virtual	[N]
$M_{\alpha\beta}^{TD}$	Força de dispersão de turbulência	[N]
M_S	Força de pressão de sólidos	[N]
$d_{\alpha\beta}$	Escala de comprimento interfacial	[mm]
$S_{MS_{\alpha}}$	Termo fonte de massa	[N/m ³]
S_M	Termo fonte de momento	[-]
$S_{M\alpha}$	Forças externas que atuam sobre um sistema por unidade de volume	[N]
C_1	Constante do modelo de turbulência	[-]
C_2	Constante do modelo de turbulência	[-]
C_3	Constante do modelo de turbulência	[-]
σ_k	Constante do modelo de turbulência	[-]
σ_{ε}	Constante do modelo de turbulência	[-]
E	Eficiência de separação	[%]
C_D	Quantidade de líquido na saída de gás	[-]
D	Diâmetro do separador	[-]
F_{TE}	Fator de tempo elíptico	[-]

LETRAS GREGAS

α	Fase	[-]
β	Fase	[-]
$\alpha\beta$	Interação entre as fases α e β	[-]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
ρ_α	Densidade da fase	[kg/m ³]
$\tilde{\rho}_\alpha$	Densidade efetiva	[kg/m ³]
$\rho_{\alpha\beta}$	Densidade da mistura	[kg/m ³]
μ_α	Viscosidade da fase α	[Pa.s]
μ_β	Viscosidade da fase β	[Pa.s]
$\Gamma_{\alpha\beta}$	Taxa de fluxo mássico por unidade de volume	[Kg/s/m ³]
τ	Tensão superficial	[mN/m]
τ_α	Tensão viscosa	[-]
τ_α^{turb}	Tensões turbulentas de Reynolds na fase α	[Kg/ms ³]
τ_s	Tensões da fase sólida	[-]
k	Energia cinética turbulenta	[m ² /s ²]
\mathcal{E}	Taxa de dissipação	[m ² /s ³]

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	19
DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	19
1.1 INTRODUÇÃO	20
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo geral	20
1.2.2 Objetivos específicos	21
1.3 JUSTIFICATIVA	21
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	22
CAPÍTULO II	23
MODELAGEM FÍSICA E MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS USANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	23
2.1 ESCOAMENTO DE FLUIDOS	23
2.1.1 Classificação do escoamento dos fluidos	24
2.2 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	25
2.2.1 Aplicações da Fluidodinâmica Computacional	28
2.3 MODELOS FÍSICOS PARA ESCOAMENTO MULTIFÁSICO COMPUTACIONAL	33
2.3.1 Grandezas e notação em escoamentos multifásicos	33
2.3.2 Modelagem para escoamento multifásico	36
2.3.3 Modelo de diferença de densidade	43
2.3.4 Modelo de turbulência	43
CAPÍTULO III	45
PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE FASES EM VASOS SEPARADORES	45
3.1 PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE PETRÓLEO	45
3.2 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO	46
3.3 SEPARADORES	48
3.3.1 Classificação quanto à função	49
3.3.2 Classificação quanto à configuração geométrica	50
3.3.3 Separador horizontal bifásico	52

3.3.4 Separador vertical bifásico	53
3.3.5 Classificação quanto à pressão de operação	54
3.3.6 Partes internas	54
3.3.7 Dimensionamento dos vasos separadores e eficiência de separação	59
3.3.8 O uso de CFD em equipamentos de separação: Estado da Arte	60
CAPÍTULO IV	63
MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA	63
4.1 INTRODUÇÃO	63
4.2. ETAPAS DE ESTUDO	63
4.2.1 Descrição do problema	64
4.2.2 Definição da modelagem matemática	67
CAPÍTULO V	73
ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	73
5.1 INTRODUÇÃO	73
5.2 ESCOAMENTO EM REGIME PERMANENTE	73
5.2.1 Análise da fração de volume das fases	73
5.2.2 Fluidodinâmica no interior do vaso separador	77
5.2.3 Considerações sobre os casos permanentes	86
5.3 ESCOAMENTO EM REGIME TRANSIENTE	94
5.3.1 Separador bifásico com placa porosa	94
5.3.2 Separador bifásico sem placa porosa	95
CAPÍTULO VI	101
CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

CAPÍTULO I

DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

1.1. INTRODUÇÃO

O petróleo e o gás natural possuem significativa importância na matriz energética brasileira e mundial. O volume de petróleo produzido no mundo em 2015 aumentou em 3,2% em relação a 2014. Neste cenário o Brasil se situou na décima segunda posição, após um acréscimo de 7,7% no volume de óleo produzido. O consumo mundial por sua vez obteve um aumento de 2%, no qual o Brasil alcançou o quinto lugar, com consumo de cerca de 3,2 milhões de barris/dia (EPE, 2015).

Os hidrocarbonetos (óleo e gás natural) são os principais interesses energéticos da indústria do petróleo, que tem por objetivo atender a demanda do mercado consumidor. No entanto, os fluidos provenientes dos reservatórios apresentam-se em forma de uma mistura multifásica, pois podem ser formados também por água, areia e/ou contaminantes. Neste sentido, se faz necessário a realização de um processamento primário antes dos hidrocarbonetos serem destinados à distribuição e comercialização.

O processamento primário consiste na separação dos fluidos proveniente dos poços produtores e ocorre próximo a estes, nas chamadas facilidades de produção. Nestas unidades, os fluidos produzidos são separados em vasos de pressão, denominados de separadores. Posteriormente, o gás e o óleo são destinados, através de dutos, às suas respectivas unidades de processamento específico (Unidades de Processamento de Gás Natural-UPGN's e Refinarias), assim como a água produzida, passará por tratamentos específicos para reutilização ou descarte. O processamento realizado nas UPGN's e Refinarias corresponde ao processamento secundário.

Os separadores podem ser classificados de várias maneiras: segundo o número de fases a separar (bifásicos ou trifásicos), em relação a sua orientação (verticais ou horizontais) ou de acordo com a pressão de operação (baixa, média ou alta). A escolha do separador adequado está baseada em muitos fatores, incluindo principalmente o econômico. Os separadores horizontais

por exemplo, permitem uma melhor separação gás/líquido e líquido/gás, por apresentarem uma maior área superficial de interface, além de serem mais econômicos em relação aos verticais.

De acordo com Orellana & Arce (2011), a eficiência de separação e o comportamento dinâmico dos vasos separadores estão diretamente relacionados com o dimensionamento dos mesmos. Porém, as características do escoamento dos fluidos podem afetar o projeto e a operação (STEWART, 2008). A geração de emulsões, presença de altos níveis de turbulência, corrosão, carreamento de gotículas de óleo para saída de gás, ou presença de bolhas de gás na seção de acumulação de óleo, são fatores que influenciam a dinâmica dos fluidos nos separadores e podem reduzir a eficiência da separação. Esses problemas apontados, podem ser minimizados pela presença de equipamentos adicionados ao interior do vaso, muitas vezes descritos como partes internas, na medida em que estes estão diretamente relacionados com a dinâmica dos fluidos no interior do equipamento e buscam aumentar a capacidade e eficiência da separação.

Segundo Bothamley & Campbell (2013), o uso da dinâmica de fluidos computacional (CFD) proporcionou mais conhecimento e uma melhor definição do comportamento do escoamento de fluidos no interior de equipamentos de separação. O CFD forneceu a base para melhorias significativas no *design* externo e também das partes internas dos separadores. Isto permite, por exemplo, prever descontinuidades em perfis de velocidade dos fluidos e instalar componentes internos especificamente concebidos com o intuito de uniformizá-los, o que garantiria uma melhor separação.

Com o intuito de dar uma contribuição na produção energética nacional, a fim de proporcionar conhecimento científico para adaptação e/ou construção de equipamentos mais eficientes usados na etapa de pré-processamento da indústria do petróleo, estudou-se nesta pesquisa o comportamento do fluido durante o processo de separação gás/óleo em um vaso separador horizontal, com auxílio da fluidodinâmica computacional.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o efeito dos dispositivos internos do vaso separador horizontal sobre a dinâmica do escoamento no processo de separação gás/óleo.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Aplicar as equações de conservação de massa e momento linear para descrever a separação gás/óleo usando um vaso separador horizontal;
- b) Avaliar a influência de três dispositivos internos (defletor, duas chicanas e uma placa perfurada, modelada como meio poroso) do vaso separador sobre a dinâmica do escoamento bifásico;
- c) Avaliar a influência da permeabilidade do meio poroso sobre o processo de separação gás/óleo e sobre a fluidodinâmica do escoamento interno;
- d) Comparar os resultados numéricos da separação gás/óleo no separador com os reportados na literatura.

1.3 JUSTIFICATIVA

O papel fundamental do separador é separar as fases presentes no escoamento ou, dependendo das condições operacionais, a separação de alguns componentes. Esta separação é, muitas vezes, primordial para a otimização do processo, tendo em vista a comercialização do petróleo e gás. É reportado na literatura que a eficácia de separação é dependente do dimensionamento das partes externa e interna do separador bifásico ou trifásico (REQUENA et al., 2006; ORELLANA & ARCE, 2011; SILVA, 2013; BOTHAMLEY & CAMPBELL, 2013), bem como do conhecimento e controle da dinâmica do fluido no processo de separação (FREITAS, 2015; LIANG et al., 2013; KHAROUA et al., 2013; ABDULKADIR & PEREZ, 2010). A maioria dessas referências reporta a influência das dimensões das partes externas dos separadores, no entanto tem se observado que nos últimos anos alguns autores como Frankiewicz (2002), Aragão Júnior (2011) e Huusari (2015) se detiveram a estudar também a influência dos acessórios internos ao separador sobre as condições fluidodinâmicas.

Nota-se que o número de informações quantitativas e qualitativas encontrado na literatura referente ao estudo fluidodinâmico em vasos separadores é pequeno, ainda mais quando trata-se de analisar especificamente a influência das diferentes partes internas na dinâmica do fluido e no processo de separação.

Neste sentido, fortalecer o estudo da dinâmica dos fluidos no interior dos equipamentos de separação via CFD permitirá compreender os principais fatores considerados entraves ao

processo, buscando soluções a ponto de otimizar o processo e atingir maior eficiência de separação, com menor custo e maior segurança.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é composta por seis capítulos, estruturados de forma a discutir a problemática apresentada.

No **primeiro capítulo**, foi introduzido o assunto objeto deste trabalho, através da apresentação do problema, objetivos e justificativa.

No segundo capítulo, é realizada a revisão da literatura referente à modelagem física e matemática do escoamento de fluidos usando fluidodinâmica computacional.

No **terceiro capítulo** é feita a revisão da literatura a respeito dos equipamentos de separação utilizados no processamento primário de petróleo.

No **quarto capítulo**, é apresentada a metodologia utilizada para a realização do trabalho.

No **quinto capítulo**, é realizada a discussão dos resultados.

Finalmente, o **sexto capítulo** apresenta as considerações finais do trabalho, seguido das recomendações para atividades futuras. Logo após são apresentadas as **referências bibliográficas**.

CAPÍTULO II

MODELAGEM FÍSICA E MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS USANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

2.1 ESCOAMENTO DE FLUIDOS

A matéria constitui-se basicamente em dois estados, o estado sólido e o estado fluido, são exemplos de fluidos as substâncias no estado líquido e gasoso. Ainda que exista uma significativa distinção entre líquidos e gases ambos obedecem às mesmas leis de movimento. A principal diferença entre o sólido e o líquido está relacionada à distância e magnitude do movimento de suas moléculas, ou seja, ao grau de coesão das mesmas. Os sólidos apresentam uma estrutura molecular coesa, coesão esta que é observada nos líquidos e gases de forma bem menor. Neste sentido, fluido pode ser definido como uma substância que se deforma continuamente quando submetido a uma tensão externa de cisalhamento, e conseqüentemente escoar (FERZIGER & PERIC, 2002; FORTUNA, 2012).

Segundo Ferziger & Peric (2002), o fluxo ou escoamento de um fluido é provocado pela ação de forças aplicadas externamente, as forças motrizes. Como forças motrizes estão incluídas as forças de diferença de pressão, gravidade, cisalhamento, rotação e tensão superficial. Elas podem ser classificadas como forças superficiais (por exemplo, forças de cisalhamento) e forças de corpo (por exemplo, a gravidade e as forças induzidas pela rotação).

De acordo com Fortuna (2012), o estudo do movimento dos fluidos é uma atividade que há séculos vem sendo desenvolvida. A mecânica dos fluidos ao longo da história preocupou-se em estudar o comportamento dos fluidos de forma experimental muito antes do que de forma matemática. Só a partir do século XIX as descrições matemáticas do comportamento dos fluidos, na forma das equações de Navier-Stokes passaram a ganhar força.

Para o estudo de um sistema fluido é importante à compreensão completa dos fenômenos físicos que os envolve. Entende-se por fenômeno físico o processo ao qual um determinado sistema é submetido, no qual uma sequência de transformações no estado do sistema¹ ocorre.

Neste sentido, a análise dos fenômenos físicos de transferência em um escoamento de fluidos, por exemplo, é feita através do estudo dos processos por meio dos quais três propriedades físicas fundamentais são transportadas de um ponto a outro do espaço: massa, quantidade de movimento e energia. Para tanto, se faz necessário à solução das equações de Navier-Stokes, que descreve o movimento dos fluidos.

2.1.1 Classificação do escoamento de fluidos

Uma das maneiras mais importantes de classificação dos escoamentos se refere ao nível de turbulência. Os diferentes níveis de turbulência podem representar variações significativas nos valores de grandeza que costumam ser avaliados em equipamentos industriais. São definidos os seguintes regimes de acordo com o nível de turbulência: escoamento laminar, escoamento em transição e escoamento turbulento. Quando as partículas se movem em camadas paralelas, ou lâminas, sem invadirem o caminho de fluxo das demais, está ocorrendo um escoamento laminar. No momento em que surgem flutuações intermitentes do fluido em um escoamento laminar em um nível intermediário, trata-se de um escoamento em transição. À medida que, as flutuações no escoamento permitem que as partículas invadam o caminho das partículas adjacentes, movendo-se de forma aleatória e misturando-se, esse escoamento é considerado turbulento (KESSLER, 2016).

De acordo com Çengel & Cimbala (2007), linhas de corrente suave e altamente ordenadas caracterizam um escoamento em regime laminar. Para identificar o regime de escoamento utiliza-se o número de Reynolds, que é um número adimensional e relaciona as forças de inércia com as forças viscosas. O número de Reynolds é dado pela Equação 2.1, onde ρ, U, L, μ são, respectivamente, massa específica do fluido, velocidade, dimensão característica e viscosidade dinâmica (KESSLER, 2016). As experiências realizadas por Reynolds (1883) permitiram classificar os escoamentos de fluidos em dutos, da seguinte forma:

- ✓ $Re \leq 2000$, trata-se de escoamento laminar;
- ✓ $2000 \leq Re \leq 2400$, têm-se o escoamento em transição;

¹ Denomina-se estado do sistema o conjunto de suas propriedades físicas, tais como: massa, volume, pressão, temperatura, constituição química, etc.

✓ $Re \geq 2400$, classifica-se como escoamento turbulento.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.1)$$

2.1.1.1 Escoamento turbulento

A turbulência se traduz na flutuação irregular da velocidade que se sobrepõe à do fluxo. A presença de irregularidade e aleatoriedade, altos níveis de vorticidade, rápida taxa de difusão de momento e calor devido à mistura macroscópica das partículas de fluido são características do escoamento turbulento. A turbulência é uma característica do escoamento, não do fluido, é um fenômeno contínuo rotacional e tridimensional (ALLEN, 1982; SIMÕES, 2009).

A presença de vórtice no escoamento é uma característica da turbulência. Considerando-se um fluxo onde todas as linhas de fluxo são círculos concêntricos em torno de um determinado ponto, onde a velocidade ao longo de cada linha de fluxo é inversamente proporcional à distância do centro, esse fluxo é chamado fluxo de vórtice (WENDT, 2009). A circulação também é um conceito matemático aplicado ao escoamento de fluidos, define-se pela integral de linha do vetor velocidade tangente em cada ponto de uma determinada curva fechada, ou seja, pode-se dizer que a circulação mede a rotação do fluido em uma determinada área.

2.2 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Conforme exposto por Fortuna (2012), as soluções analíticas para as equações de Navier-Stokes só foram determinadas para alguns poucos casos, isto decorre de o fato dessas classes de equações serem equações diferenciais parciais (EDP's) não lineares, o que dificulta a obtenção de soluções analíticas em regiões arbitrárias e condições de contorno gerais, já que a teoria matemática existente para as mesmas não se desenvolveu a esse ponto. Por este motivo são realizados estudos experimentais, para a compreensão do movimento dos fluidos e seus efeitos. Existem limitações de equipamentos, tempo e principalmente custos, ou até mesmo a impossibilidade de reprodução de um fenômeno físico em bancadas de laboratório. Neste sentido, levando em consideração as limitações experimentais citadas, conclui-se que tratamentos teóricos e/ou experimentais podem não ser sempre satisfatórios. Uma terceira alternativa surgiu na década de 50. Com o advento do computador digital, o uso de técnicas

computacionais permitiu discretizar e obter a solução numérica das equações de Navier-Stokes e com isso, resultados de campos de velocidades que compõem o escoamento puderam ser alcançados, possibilitando o estudo da dinâmica dos fluidos em um sistema determinado.

O rápido crescimento da capacidade computacional proporcionou cada vez mais o desenvolvimento dos métodos numéricos, resultando no advento da dinâmica de fluidos computacional, do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD) que é uma ferramenta utilizada para simular o comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados. O funcionamento da técnica de CFD se dá pela resolução das equações de Navier-Stokes, sobre uma região de interesse, com condições especificadas sobre o limite dessa região (MALISKA, 2004; ANSYS, 2015). Para Fortuna (2012), o usuário de CFD está interessando em obter distribuições de velocidades, pressões e temperaturas na região do escoamento, e a partir disso poderá otimizar projetos, reduzir custos operacionais e o desempenho do item em estudo. No entanto, existem situações que são extremamente difíceis de ser modeladas e transformadas em equações para tratamento numérico, limitando a técnica para alguns problemas reais que envolvam escoamento de fluidos.

De acordo com Versteeg & Malalasekera (1995), as equações governantes para fluxo de fluido representam declarações matemáticas das leis de conservação da física, onde a massa de fluido é conservada, a taxa de mudança de momento é igual à soma de forças sobre uma partícula fluida (segunda lei de Newton) e a taxa de variação de energia é igual à soma da taxa de adição de calor e da taxa de trabalho realizada em uma partícula fluida (primeira lei da termodinâmica).

A resolução das equações de Navier-Stokes pode ser feita usando diferentes métodos de solução nos códigos CFD. Tais equações podem ser discretizadas e resolvidas numericamente, assim como as equações que descrevem outros processos, como a combustão, também podem ser resolvidas em conjunto com as equações de Navier-Stokes. No caso do método de solução baseado na técnica de elementos finitos, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, que são chamadas de volumes de controle. As equações são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle (ANSYS, 2015).

A seguir será apresentado o conjunto de equações governantes de transporte usadas na modelagem de escoamento de fluidos em CFD (VERSTEEG & MALALASEKERA, 1995; ANSYS, 2015). Estão descritas, respectivamente, a equação da continuidade para fluido compressível e incompressível, equação de momento e a equação da energia:

✓ Equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.2)$$

Para um fluido incompressível, onde a densidade é constante, a Equação (2.2) torna-se:

$$\nabla \cdot (U) = 0 \quad (2.3)$$

✓ Equação da conservação do momento linear:

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla P + \nabla \tau + S_M \quad (2.4)$$

na qual, o tensor de tensão τ está relacionado com a taxa de deformação por:

$$\tau = \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla U \right) \quad (2.5)$$

✓ Equação da conservação da energia:

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (2.6)$$

onde, h_{tot} é a entalpia total, relacionada à entalpia estática por:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (2.7)$$

A Equação (2.2) trata-se da equação da conservação da massa ou equação da continuidade em um espaço tridimensional e para um fluido compressível em regime transiente. O primeiro termo do lado esquerdo é a taxa de variação da densidade ρ (massa por unidade de volume) no decorrer do tempo. O segundo termo, onde U representa o vetor velocidade, é o termo convectivo que descreve o fluxo líquido de massa para fora do elemento através de seus limites.

Na Equação (2.3) tem-se a equação da continuidade para um fluido incompressível, ou seja, quando a densidade ρ não varia com o tempo. A equação da conservação do momento linear é apresentada pela Equação (2.4), nela o primeiro termo do lado esquerdo, é equivalente ao termo de acúmulo de quantidade de movimento por unidade de volume, e o segundo termo ao fluxo líquido do elemento fluido por unidade de volume, que representa o ganho ou perda de quantidade de movimento por convecção devido ao escoamento do fluido. Após a igualdade, o gradiente de pressão $-\nabla P$, representa a força de pressão que atua sobre o elemento por unidade de volume, seguido do termo $\nabla \tau$ que se trata do ganho ou perda de quantidade de movimento por transporte viscoso por unidade de volume. Por fim, o último termo (S_M) da Equação (2.4) descreve as fontes de momento atuantes devido a forças externas, assim como fontes de momento definidas, por exemplo, pelo usuário de Ansys CFX®, versão 2015.

Na equação da conservação da energia (Equação 2.6), λ equivale a condutividade térmica, h é a entalpia estática e T a temperatura. O primeiro termo $\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t}$, corresponde ao acúmulo de entalpia estática, enquanto o termo $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ representa o trabalho devido às tensões viscosas e é chamado de termo de trabalho viscoso, este termo modela o aquecimento interno no fluido, e é insignificante na maioria dos fluxos. Já o termo $U \cdot S_M$, representa o trabalho devido a fontes de impulso externas e é atualmente negligenciado no Ansys CFX®, 2015.

2.2.1 Aplicações da Fluidodinâmica Computacional

A fluidodinâmica computacional possui diferentes áreas de aplicação industrial e não industrial, tais como: indústria de processos químicos de engenharia resolvendo problemas de processos de mistura e separação, indústria automobilística, estudos ambientais e até mesmo estudos na área de medicina (VERSTEEG & MALALASEKERA, 1995; ANSYS, 2015). Segundo Bothamley & Campbell (2013), em anos mais recentes, o uso da dinâmica de fluidos computacional (CFD) forneceu uma melhor definição do comportamento de escoamento de fluidos dentro de equipamentos de separação. A técnica fornece também a base para melhorias significativas no *design* das partes interna e externa dos separadores, pois ao prever que os perfis de velocidade dos fluidos são altamente não uniformes, é possível instalar componentes internos especificamente concebidos para, por exemplo, ajustar o perfil de velocidade da(s) fase(s) contínua(s) dada(s) de acordo com o que se pretende alcançar com o uso do equipamento.

2.2.1.1 Ansys CFX®

Diferentes *softwares* CFD podem ser encontrados atualmente, tais como PHOENICS, FLUENT, FLOW 3D, STAR-CD, OpenFOAM, CFX, entre outros. Neste trabalho foi utilizado o Ansys CFX® 15.0 que atua a partir da combinação de um *solver* (solucionário) avançado com poderosas capacidades de pré e pós-processamento. O Ansys CFX®15.0 é capaz de modelar, por exemplo, escoamentos estacionários e transientes, laminares e turbulentos, escoamentos subsônico, transônico e supersônico, como também aqueles que estabelecem como critério a diferença de densidade e os que possuem mais de uma fase (escoamentos multifásicos), entre outros (ANSYS, 2015).

O pacote Ansys CFX® 15.0 é composto por quatro módulos de *software* (Figura 2.1), que recebem a geometria e a malha e em seguida passam as informações necessárias para que seja realizada uma análise CFD. A geometria e a malha podem ser criadas no aplicativo *meshing* ou em qualquer outra ferramenta de criação de geometria / malha.

De acordo com Padrón (2012), as ferramentas de geração de malha do Ansys ICEM CFD® oferecem a capacidade de criar parametricamente malhas a partir de geometrias em diversos formatos, tais como multibloco estruturado, não-estruturado, hexaédrico, com elementos piramidais e prismáticos e malhas de superfícies triangular e quadrangular.

2.2.1.1.1 Pré-processamento

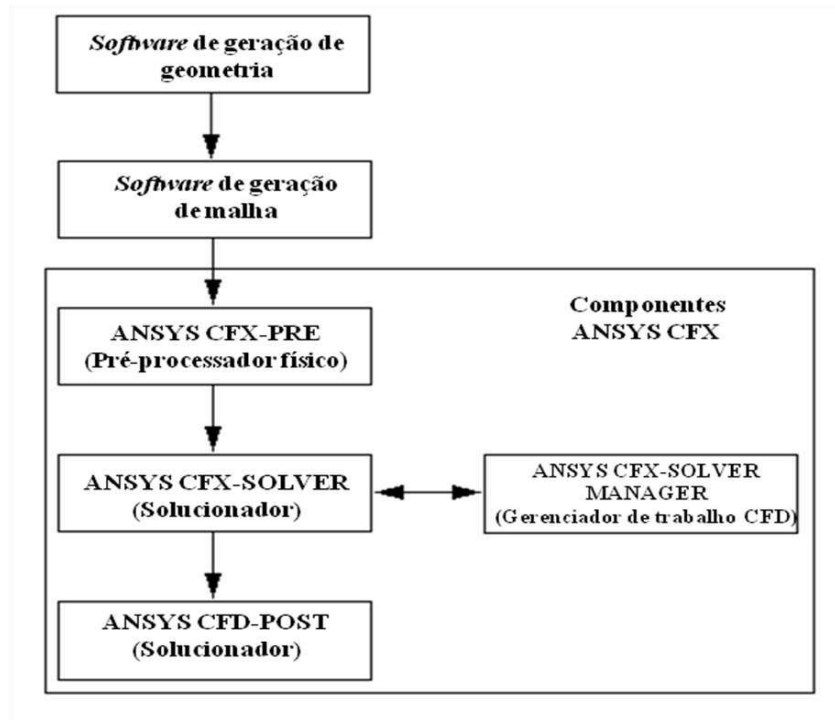
a) Geração de geometria e malha

A construção da geometria e a geração da malha numérica são as primeiras etapas do pré-processamento, em seguida a malha numérica deverá ser enviada ao Ansys CFX®- *pre* para a definição do pré-processamento físico. A geometria, isto é o domínio a ser estudado, pode ser construído em programas que permitam modelar qualquer objeto na forma bidimensional ou tridimensional, assim como a definir regiões de entrada e saída, que posteriormente serão identificadas. Diferentes programas podem ser utilizados para a criação do domínio, como Ansys ICEM CFD®, SolidWorks®, Inventor Professional®, entre outros (SANTOS, 2010). Após a construção do domínio, será realizado a divisão do mesmo em sub-domínios, a este processo chamamos de geração da malha. Os *softwares* comerciais CFD possuem geradores de malha, a exemplo do ICEM CFD®, da Ansys.

O critério estabelecido para a seleção da malha numérica deve está diretamente relacionado com a adequação da mesma ao problema em estudo, pois isso garantirá que os resultados da simulação numérica aproximem-se da realidade. No entanto, algumas geometrias

exigem um maior refinamento e isso acaba por requerer maior capacidade computacional e tempo de simulação. As malhas podem ser definidas como estruturadas, não estruturadas ou híbridas (Figura 2.2).

Figura 2.1- Fluxograma de etapas para o desenvolvimento da simulação numérica.



Fonte- Ansys, 2015 (tradução própria).

Figura 2.2- Tipos de malhas.



Fonte- Santos, 2010.

De acordo com Santos (2014), a malha estruturada tem por característica possuir o mesmo número de elementos vizinhos, sob uma linha de orientação desses elementos.

A criação dessa malha demanda maior tempo em comparação as malhas não-estruturadas, em contrapartida geram menor número de células e conseqüentemente requer uma menor capacidade de armazenamento computacional. Para a construção de malhas estruturadas é utilizado a técnica de multibloco, essa técnica consiste na geração de elementos bidimensionais e tridimensionais que podem ser quadriláteros e hexaédricos, respectivamente (SANTOS, 2010). A grande desvantagem desse tipo de malha é a falta de flexibilidade a ajustar-se diante de geometrias mais complexas.

As malhas não-estruturadas são formadas por elementos triangulares ou quadriláteros, e por elementos tetraedros ou hexágonos. Estas malhas possuem maior capacidade de adaptar-se a geometrias complexas e assim possibilita a discretização dos domínios com uma maior facilidade. Porém, erros de geração de malha podem ser obtidos, já que as malhas não-estruturadas são geradas de forma automática, e também demanda uma maior capacidade de armazenamento de dados (SANTOS, 2010; SANTOS, 2014).

Em situações onde o domínio possui áreas que exigem mais detalhe e complexidade em sua construção há a opção de utilização de uma malha híbrida. A malha híbrida nada mais é do que a utilização simultânea das malhas estruturada e não-estruturada. Em regiões de maior complexibilidade no domínio em estudo, pode optar-se pelo uso da malha não-estruturada, e por conseguinte definir a malha estruturada para regiões onde seja possível discretizar pela técnica de multiblocos. Uma desvantagem no uso da malha híbrida está diante da exigência de prática e experiência para a sua manipulação, pois a união entre as malhas trata-se de um procedimento importante e complexo, muitas vezes gerando interfaces que precisam ser bem manipuladas.

b) Pré-processamento físico

O pré-processamento físico consiste na configuração da simulação, portanto é neste momento que devem ser definidos os modelos físicos, as condições de contorno e condições iniciais, as propriedades do fluido e outros dados que se façam necessário para modelagem física do problema.

Os modelos físicos definirão o tipo de simulação que se deseja executar. Como exposto anteriormente, o Ansys CFX[®] 15.0 possui a capacidade de modelar uma série de modelos físicos, no entanto este capítulo tratará apenas dos modelos físicos que definirão o tipo de simulação proposta nesse trabalho.

2.2.1.1.2 Processo de solução

O processo de solução ocorre no Ansys CFX[®]-*Solver*, ocorre o processo de solução das equações diferenciais parciais. Essas equações são integradas em todos os volumes de controle, ou seja, para cada volume de controle ocorre a aplicação de uma lei da conservação. Posteriormente, as equações integrais são convertidas em um sistema de equações algébricas gerando um conjunto de aproximações para os termos nas equações integrais.

Devido a natureza não-linear das equações algébricas, elas são resolvidas iterativamente, assim é possível dizer que a solução converge à medida que esta se aproxima da solução exata. Logo, para cada iteração, um erro, ou residual, é relatado como uma medida da conservação global das propriedades do escoamento. É importante frisar que, a proximidade da solução final com a solução exata depende de vários fatores, incluindo o tamanho e a forma dos volumes de controle e o tamanho dos resíduos finais (ANSYS, 2015).

O Ansys CFX[®]-*Solver* é executado para produzir um arquivo de resultados que contém a variação de velocidade, pressão e quaisquer outras variáveis em toda a região de interesse. A visualização do arquivo de dados é feita na etapa de pós-processamento, descrita na próxima sessão.

2.2.1.1.3 Pós-processamento

Para a compreensão do comportamento do fluido em toda a região de interesse, se fazem necessários a análise, visualização e apresentação dos resultados de forma iterativa. Isto é possível usando o Ansys CFX[®]-*Post*. Especificamente, o pós-processador permite visualizar a geometria e a malha permite a geração de perfis, utilização de linhas de corrente, gráficos vetoriais que mostram a direção e magnitude do fluxo, gráficos de contorno, gráficos bidimensionais e tridimensionais, realizar cálculos quantitativos numéricos, animações, como também fornece a visualização de variáveis escalares, entre outras opções.

2.3 MODELOS FÍSICOS PARA ESCOAMENTO MULTIFÁSICO COMPUTACIONAL

De acordo com Rosa (2012), “escoamento multifásico aplica-se quando mais de uma fase² está escoando simultaneamente”. O escoamento ou fluxo multifásico pode ser classificado de acordo com as fases envolvidas, em sistemas bifásicos (gás/líquido, gás/sólido, líquido/sólido, líquido/líquido) ou sistemas trifásicos (gás/líquido/líquido, gás/líquido/sólido, líquido/líquido/sólido). O termo fase nem sempre está relacionado ao estado da matéria, por exemplo, o escoamento de água/óleo/gás, possui dois estados (líquido e gasoso), no entanto é classificado como escoamento trifásico.

É importante também, distinguir escoamento multicomponente de escoamento multifásico. De acordo com Ansys (2015), considera-se que um fluido multicomponente consiste em uma mistura de espécies químicas que são misturadas ao nível molecular. Neste caso, são resolvidos cálculos para campos de velocidade e temperatura média do fluido. Ao contrário do escoamento multicomponente, no escoamento multifásico os fluidos não são misturados em escala microscópica. Em vez disso, são misturados numa escala macroscópica, com uma interface discernível entre os fluidos. Assim sendo, para este tipo de escoamento é necessário que diferentes cálculos de campos de temperatura e velocidade sejam feitos para cada fluido, estes podem interagir uns com os outros por meio de forças interfaciais e da transferência de calor e massa através das interfaces de fase.

2.3.1 Grandezas e notação em escoamentos multifásicos

Como o escoamento multifásico envolve diversas fases se torna complicado definir uma notação padronizada, não há um consenso quanto ao emprego dos símbolos. Neste trabalho, a notação utilizada segue aproximadamente uma combinação entre as notações empregadas por Ansys (2015) e Rosa (2012).

Diferentes fases de fluidos são denotadas usando letras gregas minúsculas α, β, γ , etc. Em geral, uma quantidade subscrita com α, β e γ , por exemplo, refere-se ao valor da quantidade para essa fase particular. Foi adotado para este trabalho o subscrito α indicando

² Por fase entende-se uma região do espaço delimitada por uma interface de espessura infinitesimal que encerra em seu interior um material com composição química homogênea, propriedades de transporte e de estado definíveis e que é separável por processos mecânicos, (ROSA, 2012).

fase, quando associado a uma variável, em situações que se tratarem de duas fases, a segunda será indicada pelo subscrito β . De acordo com Ansys (2015), a fração de volume de α é denotada r_α . Assim, o volume V_α ocupado por fase α em um pequeno volume em torno de um ponto de fração de volume é dado por:

$$V_\alpha = r_\alpha V \quad (2.8)$$

É importante distinguir entre a densidade do material e a densidade efetiva de um fluido α . A densidade do material, ρ_α , é a densidade do fluido se α é a única fase presente, ou seja, a massa de α por unidade de volume de α . A densidade efetiva é então definida como:

$$\tilde{\rho}_\alpha = r_\alpha \rho_\alpha \quad (2.9)$$

Esta é a massa real por unidade de volume de fase α , dado que a fase ocupa apenas uma fração do volume, isto é, a massa de α por unidade de volume do fluido a granel. A densidade da mistura é dada por:

$$\rho_m = \sum_\alpha \rho_\alpha r_\alpha \quad (2.10)$$

A pressão total em uma simulação multifásica é definida como:

$$p_{tot} = p_{sta} + \sum_\alpha \frac{1}{2} r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha^2 \quad (2.11)$$

Esta definição é utilizada para fluxos incompressíveis e compressíveis, enquanto que os fluxos monofásicos tratam a pressão total de forma diferente dependendo da simulação (ANSYS, 2015). Os subitens a seguir, apresentarão grandezas e notações multifásicas empregadas por Rosa (2012):

2.3.1.1 Vazão mássica, \dot{m}

A vazão mássica da mistura é representada por \dot{m} , enquanto a vazão mássica da fase α é representada por \dot{m}_α , onde $1 \leq \alpha \leq n$. Na ausência de reações químicas a massa total da mistura é conservada de forma que:

$$\dot{m} = \sum_{\alpha=1}^n \dot{m}_\alpha \quad (2.12)$$

2.3.1.2 Vazão volumétrica, q

As vazões volumétricas da mistura e da fase α são representadas, respectivamente, por q e q_α onde $1 \leq \alpha \leq n$, para um dado ponto no escoamento ou seção transversal de um tubo. Na ausência de reações químicas, o volume total da mistura em uma seção transversal, é conservado de forma que:

$$q = \sum_{\alpha=1}^n q_\alpha \quad (2.13)$$

2.3.1.3 Fluxo de massa específica, Q

O fluxo de massa por unidade de área das fases individuais é representado por, onde $1 \leq \alpha \leq n$, enquanto que Q representa o fluxo total da mistura. Há conservação do fluxo de massa total e da vazão mássica.

$$Q = \sum_{\alpha=1}^n Q_\alpha \quad (2.14)$$

onde,

$$Q_\alpha = \frac{\dot{m}_\alpha}{A} \quad (2.15)$$

e A corresponde a área de seção transversal.

2.3.1.4 Velocidade superficial, U_α

A razão entre a vazão volumétrica da fase α e a área da seção transversal do tubo é chamada de fluxo volumétrico por unidade de área da fase α , onde $1 \leq \alpha \leq n$. Por sua vez, o fluxo da mistura é definido como sendo a soma dos fluxos volumétricos das fases:

$$U_\alpha = \frac{q_\alpha}{A} \quad (2.16)$$

no qual,

$$U = \sum_{\alpha=1}^n U_\alpha \quad (2.17)$$

onde, U_α representa a velocidade média que a fase α exibiria se escoasse sozinha. Pode-se redefinir o fluxo mássico da fase α , por:

$$Q_\alpha = \rho_\alpha U_\alpha \quad (2.18)$$

2.3.2 Modelagem para escoamento multifásico disponível no Ansys CFX®

O código CFD Ansys CFX® 15.0 dispõe de dois modelos distintos de escoamento multifásico, são eles o modelo multifásico Euleriano-Euleriano e o modelo multifásico Euleriano-Lagrangeano.

A abordagem Euleriana-Euleriana caracteriza-se por considerar diferentes fases do sistema como contínuas e interpenetrantes, uma vez que o volume de uma fase não pode ser ocupado pela outra. Na abordagem Euleriana-Lagrangeana a fase líquida é tratada como contínua pela solução das equações de Navier-Stokes nas médias temporais e a fase dispersa resolvida através do acompanhamento da trajetória das partículas, bolhas ou gotas. A abordagem Euleriana-Lagrangeana é indicada quando a fase dispersa (secundária) ocupa uma pequena fração volumétrica no sistema, a ponto de não influenciar no escoamento do fluido. (SANTOS, 2010).

O modelo a ser utilizado em um sistema de fases pode ser definido pelo usuário e vai depender da morfologia de cada sistema de fases, por exemplo é sabido que gotas de água no

ar, bolhas de ar na água e fluxo sólido/gasoso ou gás/líquido são exemplos de escoamento multifásico. As gotas de água no ar constituem dois fluidos diferentes que são misturados ao nível macroscópico e não ao nível microscópico, assim é preciso definir um modelo multifásico levando em consideração que o ar é o fluido contínuo³, e a água, o fluido disperso⁴. Tomando como exemplo um sistema bifásico gás/óleo (gás e líquido), onde as duas fases são consideradas contínuas, o modelo Euleriano-Euleriano, torna-se o melhor modelo multifásico a ser selecionado, dependendo da fração volumétrica das fases.

2.3.2.1 Modelo multifásico Euleriano-Euleriano

O modelo Euleriano-Euleriano é um dos dois principais modelos multifásicos implementados no *Ansys CFX*[®] e divide-se em modelo homogêneo e modelo não homogêneo ou modelo de transferência entre fluidos. Como exposto anteriormente, este modelo considera as fases do sistema como contínuas e interpenetrantes, suas frações volumétricas são consideradas como funções contínuas no espaço e no tempo e sua soma é igual a 1. Um conjunto de equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia é formado para cada uma das fases, estas equações são fechadas através de relações constitutivas que são obtidas a partir de informações empíricas. Quando as frações volumétricas das fases são comparáveis ou, por exemplo, quando há atuação das forças de campo, como a gravidade, atuam na separação das fases (MASSAH, 2000).

Segundo Paladino (2005), a abordagem Euleriana-Euleriana é adequada para escoamentos onde as fases são misturadas e as velocidades relativas entre elas são consideráveis. O modelo Euleriano-Euleriano tem sido muito aplicado para escoamento líquido/líquido, gás/líquido e também escoamento líquido/sólido (ANDRADE, 2013).

2.3.2.1.1 Modelagem de escoamento multifásico não homogêneo

O escoamento multifásico é dito não homogêneo quando cada fase possui seu próprio campo de velocidade e as fases interagem a partir dos termos de transferência de interface, e têm o campo de pressão compartilhado entre as fases. Existe um campo de solução para cada fase separada, por exemplo, duas fases podem ter campos separados de velocidade e

³ Fluido contínuo é um fluido que forma uma região conectada contínua, por exemplo, o ar, na presença de gotas de chuva no ar (ANSYS, 2015).

⁴ Fluido disperso é um fluido que está presente em regiões discretas que não estão conectadas, por exemplo, gotículas de água no ar ou bolhas de gás em um líquido (ANSYS, 2015).

temperatura, mas haverá uma tendência para estes chegarem ao equilíbrio através de arrasto de interface e termos de transferência de calor. O campo de pressão é compartilhado por todos os fluidos.

a) Densidade de área interfacial

A transferência interfacial de momento, calor e massa depende da área de contato entre as duas fases, isto é caracterizado pela área interfacial por unidade de volume entre a fase α e β chamada de densidade de área interfacial $A_{\alpha\beta}$. A transferência interfacial pode ser modelada usando modelos de partículas ou de mistura. (ANSYS, 2015).

b) Modelo de Partículas

O modelo de partículas encontrado é usado quando uma das fases é contínua e a outra é dispersa ou polidispersa, a exemplo da dispersão de bolhas de gás em um líquido, gotas líquidas em um gás ou em um líquido imiscível, como também, partículas sólidas em um gás ou em um líquido.

A densidade de área de superfície por unidade de volume é calculada assumindo que a fase β está presente como partículas esféricas de diâmetro médio, d_β :

$$A_{\alpha\beta} = \frac{6r_\beta}{d_\beta} \tag{2.19}$$

c) Modelo de superfície livre

O modelo de superfície livre é aplicado a escoamentos formados por duas fases contínuas, com uma interface separando as fases. A densidade de área interfacial nessa situação pode ser modelada usando a seguinte relação:

$$A_{\alpha\beta} = |\nabla r_\alpha| \tag{2.20}$$

Quando mais de duas fases estão presentes, a equação será generalizada da seguinte forma:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{2|\nabla r_\alpha||\nabla r_\beta|}{|\nabla r_\alpha| + |\nabla r_\beta|} \tag{2.21}$$

d) Modelo de Mistura

O modelo de mistura é um modelo de transferência interfacial muito simplificado, que trata as duas fases simetricamente, neste sentido requer que ambas as fases sejam contínuas. Este modelo em muitas situações pode ser usado como uma primeira aproximação ou como base de modelos de transferência interfacial fornecidos para escoamentos bifásicos não disperso líquido-líquido ou gás-líquido, ou em problemas de escoamentos multifásicos mais complexos.

A área de superfície por unidade de volume é calculada da seguinte maneira:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{r_{\alpha} r_{\beta}}{d_{\alpha\beta}} \quad (2.22)$$

onde $d_{\alpha\beta}$ é uma escala de comprimento interfacial. Os coeficientes de transferência interfacial não dimensionais podem estar correlacionados em termos número de *Reynolds* e do número de *Prandtl* da mistura e definidos, respectivamente, como se segue:

$$\text{Re}_{\alpha\beta} = \frac{\rho_{\alpha\beta} |U_{\beta} - U_{\alpha}| d_{\alpha\beta}}{\mu_{\alpha\beta}} \quad (2.23)$$

$$\text{Pr}_{\alpha\beta} = \frac{\mu C_{p_{\alpha\beta}}}{\lambda_{\alpha\beta}} \quad (2.24)$$

No qual $\rho_{\alpha\beta}$, $\mu_{\alpha\beta}$, $C_{p_{\alpha\beta}}$ e $\lambda_{\alpha\beta}$ representam respectivamente, densidade, viscosidade, capacidade calorífica específica e condutividade térmica da mistura. A viscosidade e a densidade da mistura são calculadas por:

$$\rho_{\alpha\beta} = r_{\alpha} \rho_{\alpha} + r_{\beta} \rho_{\beta} \quad (2.25)$$

$$\mu_{\alpha\beta} = r_{\alpha}\mu_{\alpha} + r_{\beta}\mu_{\beta} \quad (2.26)$$

e) Modelos de Transferência interfacial de momento

Os modelos de transferência interfacial de momento são aplicados à escoamentos multifásicos não-homogêneos. A transferência de momento interfacial, $M_{\alpha\beta}$ ocorre devido a forças interfaciais agindo em cada fase α , devido à interação com outra fase β . A força total na fase α devido à interação com outras fases é denotada M_{α} , e é dada por:

$$(M_{\alpha\beta} = -M_{\beta\alpha}) \Rightarrow \sum_{\alpha} M_{\alpha} = 0 \quad (2.27)$$

A força interfacial total entre duas fases (Equação 2.28) corresponde a somatória das forças de arraste na interface, força de elevação, força de lubrificação de parede, força de massa virtual, força de dispersão de turbulência e força de pressão de sólidos.

$$M_{\alpha\beta} = M_{\alpha\beta}^D + M_{\alpha\beta}^L + M_{\alpha\beta}^{LUB} + M_{\alpha\beta}^{VM} + M_{\alpha\beta}^{TD} + M_{S...} \quad (2.28)$$

✓ Modelo para força interfacial de arraste

A força de arraste interfacial atuando na fase α devido a presença da fase β em função da velocidade relativa é definida por:

$$M_{\alpha} = c_{\alpha\beta}^{(d)}(U_{\beta} - U_{\alpha}) \quad (2.29)$$

onde, $c_{\alpha\beta}^{(d)}$ é o coeficiente de arraste interfacial, U_{β} e U_{α} são as velocidades da corrente de fluido das fases. Quando $c_{\alpha\alpha} = 0$ e $c_{\alpha\beta} = c_{\beta\alpha}$, compreende-se que a soma sobre todas as fases de todos os termos de transferência interfacial é zero. A força de arraste total pode ser expressa em termos do coeficiente de arraste adimensional:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_\alpha (U_\alpha - U_\beta)^2 A} \quad (2.30)$$

onde, ρ é a densidade do fluido, $(U_\alpha - U_\beta)$ é a velocidade relativa, D é a magnitude da força de arraste e A é a área projetada do corpo na direção do escoamento. A fase contínua neste caso é denotada por α e a fase dispersa por β .

O coeficiente de arraste adimensional no modelo de mistura pode ser definido pela equação a seguir:

$$D_{\alpha\beta} = C_D \rho_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} |U_\beta - U_\alpha| (U_\beta - U_\alpha) \quad (2.31)$$

A força de arraste total exercida pela fase β sobre a fase α por unidade de volume é dada por $D_{\alpha\beta}$ e a densidade da mistura $\rho_{\alpha\beta}$ pela Equação 2.25. A área interfacial $A_{\alpha\beta}$ por unidade de volume é dada pela Equação 2.32, sendo $d_{\alpha\beta}$ uma escala de comprimento de mistura específica.

$$A_{\alpha\beta} = \frac{r_\alpha r_\beta}{d_{\alpha\beta}} \quad (2.32)$$

f) Modelagem matemática para escoamento multifásico

A modelagem matemática multifásica é baseada nas equações de conservação, as mesmas equações de massa e momento linear, definidas por:

✓ Equação da continuidade multifásica:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \overline{U_\alpha}) = S_{MS_\alpha} + \sum_{\beta=1}^{Np} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (2.33)$$

onde o termo de acúmulo de massa $\frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha)$, têm-se r_α igual a fração de volume de cada fase e ρ_α a densidade do fluido para a fase em questão. O segundo termo, $\nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \overline{U_\alpha})$ é

o termo convectivo que descreve o fluxo líquido de massa para fora do elemento, onde \vec{U}_α se trata do vetor velocidade da fase.

A transferência de massa ocorre quando a massa é transportada de uma fase para outra, e é representada por termos fontes na equação da continuidade multifásica. Neste sentido, na Equação 2.33 o termo S_{MS_α} descreve fontes de massa especificadas pelo usuário, caso não sejam consideradas o termo será nulo.

O termo $\Gamma_{\alpha\beta}$ (Equação 2.33) representa o fluxo mássico por unidade de volume da fase β para a fase α . O subscrito α ou β representa a fase contínua ou a fase dispersa, neste caso $\alpha\beta$ ou $\beta\alpha$ representa a interação entre as fases α e β junto à interface. N_p refere-se ao número total de fases no escoamento multifásico.

✓ Equação de momento linear multifásico

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha \vec{U}) + \nabla \cdot [r_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -r_\alpha \nabla P_{p_\alpha} + \nabla \cdot \{r_\alpha (\tau_\alpha + \tau_\alpha^{turb} + \tau_s)\} \\ + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_\alpha) + \vec{S}_{M_\alpha} + \vec{M}_\alpha \end{aligned} \quad (2.34)$$

Os termos $\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha \vec{U})$, $\nabla \cdot [r_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)]$, $-r_\alpha \nabla P_{p_\alpha}$, $\nabla \cdot \{r_\alpha (\tau_\alpha + \tau_\alpha^{turb} + \tau_s)\}$ inerentes à Equação 2.34 são, respectivamente, o termo de acúmulo de quantidade de movimento por unidade de volume, ganho/perda de quantidade de movimento por convecção por unidade de volume, força de pressão que atua sobre as fases por unidade de volume, ganho/perda de quantidade de movimento por transporte viscoso por unidade de volume, onde τ_α , τ_α^{turb} e τ_s referem-se às tensões viscosas, às tensões turbulentas de Reynolds na fase α e as tensões da fase sólida, respectivamente. O termo responsável pela transferência de quantidade de movimento induzida pela transferência de massa interfacial $\sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_\alpha)$, posteriormente o termo das forças externas \vec{S}_{M_α} , e pôr fim a força interfacial total por unidade de volume, representada por \vec{M}_α .

2.3.3 Modelo de diferença de densidade

Segundo Ansys (2015), em escoamentos multifásicos, incluindo a modelagem de transporte de partículas, a diferença de densidade entre as fases resulta em uma força de empuxo. Neste sentido, é importante ajustar corretamente a densidade de referência do empuxo. Para um escoamento contendo uma fase contínua e uma fase diluída dispersa, o ideal é ajustar a densidade de referência de empuxo para a da fase contínua. A escolha da densidade do fluido mais leve (ρ_{ref}), permite uma interpretação intuitiva da pressão. Isso simplifica as condições iniciais de pressão, condições de contorno de pressão e cálculos de força em pós-processamento.

A força de empuxo F_α é modelada considerando a diferença de densidade entre as fases, e F_α é dada por:

$$F_\alpha = (\rho_\alpha - \rho_{ref}) g \quad (2.35)$$

2.3.4 Modelo de turbulência

Segundo Barbosa (2011), os modelos de turbulência classificam-se em: algébricos, a uma equação e de duas equações, e modelos para as tensões de Reynolds. Os modelos algébricos, a uma equação e de duas equações são conhecidos como modelos de viscosidade turbulenta. O modelo de duas equações $k-\varepsilon$ é um dos modelos de turbulência mais utilizados e foi implementado na maioria dos códigos CFD de uso em geral.

2.3.4.1. Modelo $k-\varepsilon$ padrão

O modelo $k-\varepsilon$ padrão usa a hipótese da viscosidade turbulenta, isto é, as tensões de Reynolds podem ser relacionadas linearmente com os gradientes médios de velocidade.

As equações de transporte que determinam as características de turbulência são as de energia cinética turbulenta, k , e a de taxa de dissipação de turbulência, ε . A energia cinética da turbulência é definida como a variância das flutuações na velocidade com dimensões de ($L^2 T^{-2}$). A taxa de dissipação turbulenta consiste na taxa em que as flutuações de velocidade que se dissipam, com dimensões ($L^2 T^{-3}$) (ANSYS, 2015) são dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla_k \right] + P_k + G - \rho\varepsilon \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{\kappa} (P_k + C_3 \max(G; 0)) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.37)$$

No qual, C_1, C_2, C_3, σ_k e σ_ε são as constantes determinadas empiricamente. E, G é a produção devido a força de corpo dada por:

$$G = G_{buoy} + G_{rot} + G_{res} \quad (2.38)$$

onde, G_{buoy} , G_{rot} e G_{res} são os termos referente a produção devido ao empuxo, rotação e resistência, respectivamente.

O termo P_k , nas Equações 2.36 e 2.37, representa a parcela de produção de energia cinética turbulenta, que é definida por:

$$P_k = \mu_{ef} \nabla \vec{U}_\alpha \left[\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] - \frac{2}{3} \nabla \vec{U}_\alpha \left(\mu_{eff} \nabla U_\alpha + \rho k \right) \quad (2.39)$$

CAPÍTULO III

PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE FASES EM VASOS SEPARADORES

3.1 PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE PETRÓLEO

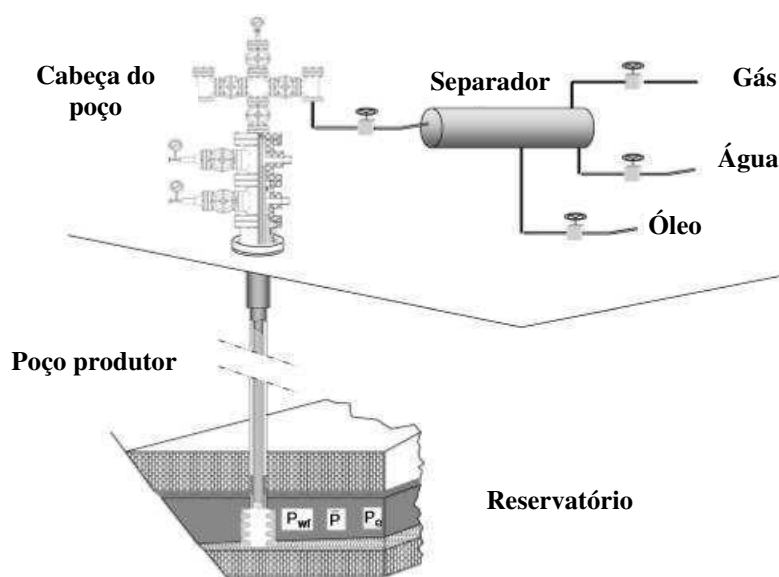
Durante a produção de petróleo, além do óleo podem ser obtidos através do poço, gás, água e sedimentos, provenientes do reservatório. A proporção das frações dessa mistura multifásica dependerá das características de cada reservatório. Tendo em vista a necessidade do transporte e comercialização dos hidrocarbonetos (óleo/gás), se faz necessário a realização de um processamento primário de fluidos, no intuito de separar as fases de modo que os hidrocarbonetos atendam as especificações exigidas para venda, assim como a água atenda as devidas especificações para sua reutilização ou descarte.

A separação primária das fases líquida (óleo e/ou água) e gasosa ocorre em vasos de pressão denominados separadores. O conjunto de equipamentos, dentre eles os vasos separadores que compõem o sistema de separação, se localiza próximo ao poço produtor (Figura 3.1), em uma planta de processamento primário, ou também chamada de facilidade de produção.

“A facilidade de produção petrolífera é uma coleção de equipamentos usada para separar fluidos que saem de um poço de óleo ou de gás, em correntes separadas que podem então ser vendidas e enviadas para uma refinaria ou uma unidade de processamento de gás adicional” (LAKE, 2006).

O processo de separação nos vasos separadores depende do sistema de fases que se deseja separar. Os separadores bifásicos realizam a separação das fases gás/líquido, enquanto os separadores trifásicos realizam além da separação das fases gás/líquido também a separação das fases líquido/líquido (óleo/água). O conjunto de vasos separadores (bifásicos ou trifásicos) em série, podem ter várias configurações que diferem entre si pelo número de estágios utilizados, dependendo da qualidade da separação desejada entre o gás e o óleo, e da densidade do petróleo produzido (BRASIL et al., 2012).

Figura 3.1- Esquema de um sistema de produção.



Fonte- GUO et al., 2007.

De acordo com Thomas (2001), a complexidade de uma planta de processamento primário dependerá do tipo de fluido produzido e da viabilidade técnico-econômica, desta forma podem existir plantas que efetuam apenas a separação gás/óleo/água, que são as mais simples, enquanto as mais complexas incluem condicionamento e compressão do gás, tratamento e estabilização do óleo e tratamento da água para reinjeção ou descarte.

3.2 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO

De acordo com PDVSA (1991), o momento ou quantidade de movimento, a força da gravidade e a coalescência são os princípios fundamentais considerados para realizar a separação física de gases, líquidos ou sólidos. Toda separação pode empregar um ou mais desses princípios, mas sempre as fases dos fluidos devem ser imiscíveis e de diferentes densidades para que ocorra a separação (MOKHATAB et al., 2006).

Como apresentado anteriormente, no processamento primário de petróleo a separação é alcançada utilizando vasos separadores horizontais ou verticais, bifásicos ou trifásicos. Estes equipamentos empregam a força gravitacional como a principal força responsável pela separação, no entanto podem apresentar adicionalmente dispositivos internos que contribuem

para a aplicação dos princípios de momento linear e coalescência, atuando como auxiliares no processo de separação das fases.

Segundo Stewart (2008), as características do escoamento de fluido afetarão muito o projeto e a operação de um separador. Neste sentido, os seguintes fatores devem ser determinados antes do projeto desse equipamento:

- ✓ Taxas de fluxo de gás e líquido (mínimo, média e máxima);
- ✓ Operar e projetar pressões e temperaturas;
- ✓ As tendências de oscilação das correntes de alimentação;
- ✓ Propriedades físicas dos fluidos, tais como densidade e fator de compressibilidade;
- ✓ Presença de impurezas (por exemplo: parafina e areia);
- ✓ Tendências de formação de espuma;
- ✓ Tendências corrosivas dos líquidos ou gases.

No processo de separação gravitacional as fases necessitam de uma região de baixa velocidade, pois são separadas por diferença de densidade devido à ação da força gravitacional. Neste tipo de separação não há ação de força externa. Portanto, os vasos de pressão são utilizados para esse fim, já que possuem maior área de seção transversal, conseqüentemente, possuem uma velocidade de escoamento baixa em relação aos fluxos de fluidos em tubulações. Logo, quando a velocidade é baixa o suficiente a fase mais densa assenta em direção ao fundo do vaso enquanto a mais leve sobe (HUUSARI, 2015).

De acordo com Ariza (2008), os equipamentos mais empregados na separação de líquidos e gases são separadores gravitacionais. O princípio físico de separação gravitacional consiste na separação das gotas de líquido da fase gasosa quando a força gravitacional que atua sobre as gotas de líquido é maior que a força de arraste do fluido gasoso sobre a gota.

As gotas muito pequenas de líquido não podem ser separadas por gravidade. Por meio de coalescência essas gotas se unem e formam gotas maiores passíveis de separação (PDVSA, 1991). É possível encontrar dispositivos como *coalescers* e *demisters* no interior dos vasos separadores. Estes dispositivos são coalescedores, atuando como um estágio de separação adicional, que possuem como princípio de funcionamento diminuir a velocidade ou parar o movimento de gotículas na fase mais densa, através de forças de choque, movimento centrífugo e tensão superficial (HUUSARI, 2015).

Os vasos separadores horizontais e verticais apresentam diferentes geometrias e dispositivos internos com o objetivo de encontrar uma configuração ótima para a separação. Neste sentido, além da separação gravitacional, pode ser observado dentro do separador, momentos em que ocorre separação centrífuga e inercial, assim como coalescência das bolhas de líquido e/ou gás, por meio da ação dos equipamentos internos, contribuindo para uma melhor separação.

Segundo Huusari (2015), as forças centrífugas e inerciais podem ser utilizadas para alcançar a taxa de separação desejada quando a força gravitacional foi insuficiente. Para tanto, dispositivos internos como ciclones e placas planas são inseridos no interior do vaso, posicionados preferencialmente na entrada, correspondendo a primeira fase da separação. A força centrífuga pode contribuir para coalescência das partículas, promovendo um benefício para captura e remoção das mesmas.

A separação por impacto emprega o impacto direto e forças de inércia entre partículas e linhas de fluxo das fases. O dispositivo de impacto pode ser nada mais do que um alvo colocado na frente de um canal de fluxo, tal como um disco ou uma placa vertical inserido na entrada do vaso separador (PERRY, 1997). Os fluidos com densidades diferentes possuem diferentes momentos lineares (quantidade de movimento), logo se devido ao choque com um dispositivo de impacto, uma corrente de duas fases muda bruscamente de direção, o forte momento ou a grande velocidade adquirida pelas fases, não permite que as partículas de fase mais densa se movimentem tão rapidamente como a fase de menor densidade, este fenômeno provoca a separação (PDVSA, 1991).

3.3 SEPARADORES

“O termo separador ‘óleo-gás’ na terminologia da indústria do petróleo designa um vaso de pressão usado para separação de fluidos produzidos, a partir de poços de petróleo (óleo/ gás), em componentes gasosos e líquidos” (LAKE, 2006). Os separadores trabalham com base no princípio da diferença de densidade das fases, logo podem apresentar um padrão de escoamento estratificado, na medida que os fluidos se deslocam lentamente com o gás na parte superior e o líquido na parte inferior. Estes equipamentos podem ser classificados de acordo com a configuração geométrica ou orientação (vertical, horizontal ou esférica), pressão de operação (alta, média ou baixa) e quanto a função de separação das fases (bifásico ou trifásico) (LAKE,

2006; MOKHATAB et al., 2006; BOTHAMLEY & CAMPBELL, 2013). Os separadores ainda podem ser dotados de vários equipamentos internos com o objetivo de aumentar a eficiência e a capacidade de separação.

Segundo Ariza (2008), para estabelecer as condições mais apropriadas de separação, de acordo com as características dos fluidos, deve-se considerar algumas variáveis de controle, tais como: o tipo de equipamento (orientação e função), o tamanho e os dispositivos internos do separador, o tempo de residência do líquido, as etapas de separação, as pressões e temperaturas de operação e o lugar de instalação dos separadores. É importante prever os problemas operacionais existentes, quanto à definição de qual separador será utilizado. Claro que isso também dependerá do espaço disponível para instalação e da relação custo/benefício para a indústria. O ideal é encontrar uma combinação de todas estas variáveis que permita obter a separação requerida a um custo mínimo.

3.3.1 Classificação quanto à função

O fluido proveniente de um poço de petróleo pode ser compreendido como uma mistura multifásica que inclui gás, vapores de líquido condensado, água, vapor de água, óleo, sólidos e/ou contaminantes. A proporção de cada componente varia de acordo com cada reservatório. Os fluidos podem estar em forma de emulsão ou estratificados em camadas. E no que se referem à separação das fases, os fluidos livres são mais fáceis de separar do que os fluidos em emulsão. Três variáveis que auxiliam na separação são: temperatura, pressão e densidade (STEWART, 2008).

Segundo Sant' Ana (2005), os vasos separadores são projetados para a separação de uma mistura (seja ela trifásica ou bifásica) por meio dos seguintes mecanismos:

- ✓ Separação inercial: ocorre na seção de separação primária devido ao choque dos fluidos contra os defletores, ou outros equipamentos internos de impacto, por exemplo. Isto provoca uma rápida redução da velocidade e direção do escoamento, provocando a queda do líquido e a subida do gás;
- ✓ Força centrífuga: a corrente fluida ao entrar no separador tende a fazer um movimento circular pela sua parte interna. O efeito centrífugo age diferencialmente sobre as fases, fazendo com que a de maior densidade se projete com mais intensidade contra as paredes, tendendo a descer;

- ✓ Decantação: a separação ocorre preferencialmente na seção de aglutinação e se dá por ação da gravidade e diferença de densidades entre os fluidos existentes na mistura;
- ✓ Aglutinação das partículas: o contato das gotículas de líquido dispersas sobre uma superfície facilita a coalescência, aglutinação e conseqüentemente, a decantação dos fluidos mais pesados. Este fenômeno pode ser observado na seção de separação secundária.

3.3.2 Classificação quanto à configuração geométrica

Quanto à configuração geométrica os separadores podem ser classificados em verticais, horizontais ou esféricos (STEWART, 2008). A seleção desta orientação, de acordo com Lake (2006), deve levar em consideração alguns critérios, tais como: processo de separação, presença de sólidos, deslocamento/movimentação do equipamento, presença de espuma e surgência do gás (formação de ondas).

Não há regras simples para a seleção do separador, às vezes, ambas as configurações devem ser avaliadas para decidir o que é mais econômico. Os separadores horizontais são usados mais comumente nas seguintes condições: para grandes volumes de gás e /ou líquidos; situações de alta a média razão gás/óleo (GOR); óleos com ocorrência de espumas e separação trifásica. No entanto, para separadores verticais as condições mais comumente usadas são opostas aos horizontais, pois requerem baixos volumes de gás, fluxos com baixa razão gás e/ou líquidos. Os separadores verticais também são usados quando há uma GOR muito alta, espaços limitados para instalação de equipamento, para o controle de nível do líquido, e para a instalação física da instrumentação de controle, alarmes e interruptores (PDVSA, 1995; MOKHATAB et al., 2006).

As desvantagens do separador vertical estão relacionadas principalmente na operação com grandes quantidades de líquido ou em fortes variações na entrada de líquido, como também quando há separação do tipo líquido/líquido, isso obriga que os recipientes tenham tamanhos excessivos, o que lhes atribui maiores custos, e também reduz a praticidade durante a instalação. Em relação às desvantagens do uso de separadores horizontais, destaca-se: o fato de que suas dimensões ocupam muito espaço horizontal, a dificuldade em remover os sólidos e também a limitação em tratar variações de nível da fase mais densa, já que isso pode dificultar a separação da fase mais leve (PDVSA, 1995).

Os separadores esféricos foram originalmente projetados para aproveitar, teoricamente, as melhores características dos separadores horizontais e verticais. Porém, estes separadores

realmente experimentaram as piores características e são muito difíceis de dimensionar e operar. Mesmo sendo muito eficientes do ponto de vista da contenção de pressão, raramente são usados em instalações de campos petrolíferos porque possuem capacidade limitada de aumento de líquidos e apresentam dificuldades de fabricação (STEWART, 2008).

A seguir são apresentadas vantagens na seleção de separadores horizontais comparado aos verticais em relação a outros critérios de avaliação (PDVSA,1995; MOKHATAB et al., 2006):

- ✓ Necessitam de pouco espaço vertical para sua instalação;
- ✓ O largo comprimento permite uma maior área para decantação;
- ✓ Em general, são mais econômicos;
- ✓ Requerem menor diâmetro que um separador vertical, para uma dada capacidade de gás;
- ✓ São eficientes para atuar com grandes quantidades de líquido, fortes variações na entrada de líquido, ou separação líquido/líquido, otimizando o volume de operação requerido;
- ✓ Normalmente empregados quando a relação gás/líquido é baixa;
- ✓ A larga área de superfície líquida para a dispersão da espuma geralmente reduz a turbulência.

Independentemente do tamanho ou forma do separador, cada separador gás/líquido contém quatro seções principais. As partes e seções principais desses separadores incluem o tubo de alimentação e o dispositivo de entrada na seção de separação primária, seguido seção de separação por gravidade do gás ou seção de separação secundária, posteriormente o extrator de névoa que localiza-se na seção de aglutinação, e a seção de separação por gravidade do líquido ou também chamada de seção de acumulação (STEWART, 2008; BOTHAMLEY & CAMPBELL, 2013). Segue a descrição de cada seção de acordo com Sant' Ana (2005):

- ✓ Seção de separação primária: trata-se da seção que está localizada na entrada do separador e é responsável pela separação da maior parte do líquido. O fluido ao entrar no vaso pode chocar-se com defletores, o que provoca uma separação inercial, ou passar por dispositivos centrífugos, caso existam, que lhe impõe um movimento giratório, provocando a precipitação do fluido no interior do vaso;

- ✓ Seção de separação secundária: encontra-se localizada no topo do separador. Nesta seção, as gotículas menores de líquido que foram carregadas pelo gás, após a seção de separação primária. Essa separação é fortemente influenciada pela turbulência;
- ✓ Seção de acumulação: refere-se à seção que se localiza no fundo do separador. As bolhas de gás, que se mantiveram distribuídas no líquido após a seção de separação primária, são separadas nesta seção. Para a efetivação desta separação por decantação se faz necessário um tempo de residência de 3 a 4 minutos;
- ✓ Seção de aglutinação: está localizada próximo a saída de gás no topo do separador. É responsável pela separação das gotículas de líquido arrastadas pelo gás, provenientes das seções anteriores. Estas gotículas são aglutinadas e separadas, principalmente, em equipamentos conhecidos como extratores de névoa.

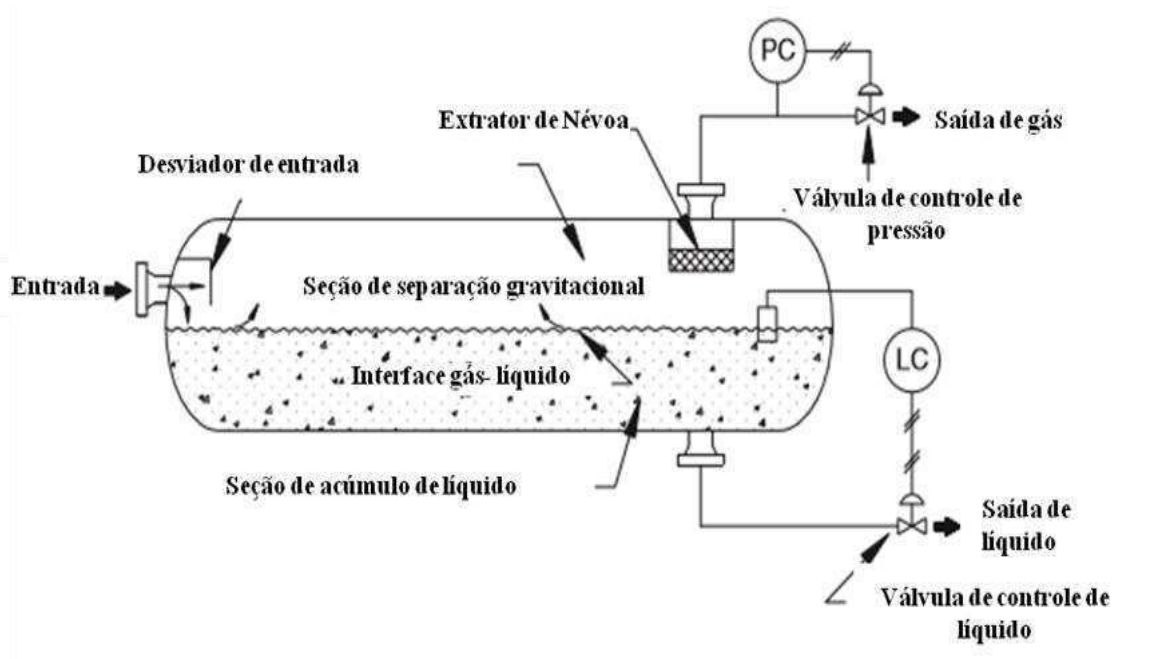
3.3.3 Separador horizontal bifásico

Os separadores horizontais bifásicos (Figura 3.2) geralmente são instalados quando há uma grande quantidade de gás dissolvido no líquido. A concepção adequada do separador é importante para obter uma eficiência de separação satisfatória e, ao mesmo tempo, minimizar o tamanho e o peso. Em geral, os recipientes horizontais são os mais econômicos para a separação de óleo/gás normal, particularmente onde pode haver problemas com emulsões, espuma ou alta GOR.

De acordo com Stewart (2008), semelhante ao que ocorre em um separador vertical bifásico, o fluido adentra no separador horizontal bifásico pela entrada lateral, choca-se com o defletor, causando uma mudança de momento. Devido a ação da gravidade as gotas de líquido decantam para a interface gás/líquido e tendem a se acumular no fundo do recipiente, na seção de acumulação ou também chamada de seção de coleta de líquido. Nesta seção o líquido permanece sob um tempo de retenção necessário para que as bolhas se desprendam e subam até a seção de separação secundária. Algumas gotas muito pequenas de líquido não são facilmente separadas na seção de sedimentação por gravidade, então o gás antes de deixar o recipiente passa por uma seção coalescente ou pelo extrator de névoa (seção de aglutinação) para remoção dessas gotículas.

Os separadores horizontais bifásicos também possuem controladores de nível e válvulas de controle de vazão e pressão.

Figura 3.2- Vaso separador horizontal bifásico.



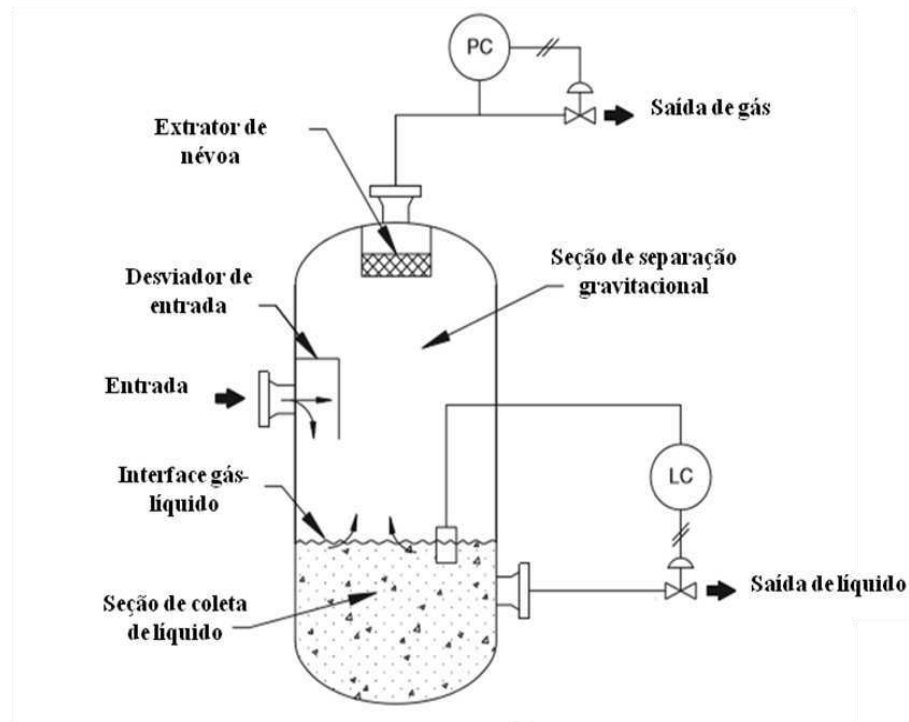
Fonte - Stewart, 2008.

3.3.4 Separador vertical bifásico

Segundo Stewart (2008), a dinâmica do fluido no vaso separador vertical bifásico (Figura 3.3) ocorre de acordo com as seguintes etapas: acesso dos fluidos ao vaso pela entrada lateral choque contra o defletor provocando a separação inercial na seção de separação primária, direcionamento do gás verticalmente para cima em busca da saída de gás, após fluir sobre o desviador de entrada, por sua vez os líquidos fluem para baixo até a seção de acumulação e seguem para a saída de líquido.

As bolhas de gás presas ao líquido começam a se desprender, após o tempo de permanência, o que permite ao líquido entrar em equilíbrio, e seguem em direção a saída de gás. Também, em virtude da diferença de densidade, as gotas de líquido carregadas pelo gás, caem verticalmente em direção a seção de acumulação de líquido. É comum encontrar uma seção de extração de névoa, responsável por capturar gotículas muito pequenas de líquido que não foram separadas do gás, esta seção localiza-se anteriormente a saída de gás. Ao vaso separador geralmente estão acoplados controladores de nível e válvulas de controle de pressão e vazão.

Figura 3.3- Vaso separador vertical bifásico.



Fonte – Stewart, 2008.

3.3.5 Classificação quanto à pressão de operação

Segundo Akpan (2013), os separadores podem ser classificados de acordo com a sua pressão de funcionamento em alta, média e baixa. A classificação dos vasos separadores levando em consideração os critérios de pressão de operação, de acordo com Lake (2006), está apresentada na Tabela 3.1.

3.3.6 Partes internas

A transferência de líquido na separação gás/líquido depende não apenas da configuração do recipiente e das condições de operação, mas também é dependente dos processos de rompimento de gotas e de coalescência devido aos equipamentos existentes no interior dos vasos (AKPAN, 2013). Denominam-se internos ou partes internas, o conjunto de equipamentos que são colocados no interior dos separadores para aumentar a capacidade e a eficiência da separação. Estes equipamentos podem ser encontrados em alguma das seções que compõe os separadores. As partes internas chegam a afetar a distribuição do fluxo, quebra da gota/bolha e coalescência, a criação e/ou eliminação de espuma, mistura e controle de nível (LAKE, 2006).

Tabela 3.1- Classificação de pressão de operação em vasos separadores.

CLASSIFICAÇÃO	DESIGNAÇÃO ⁵	
PRESSÃO	ALTA PRESSÃO (HP)	1500 Psi
	PRESSÃO INTERMEDIÁRIA (IP)	750 Psi
	BAIXA PRESSÃO (LP)	250 Psi

Fonte- Adaptado de Lake, 2006.

3.3.6.1 Desviadores de entrada

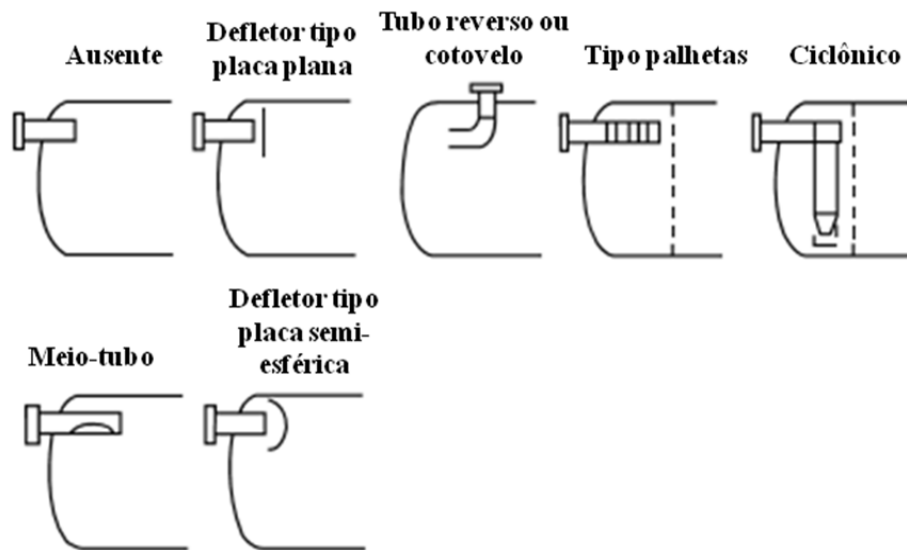
De acordo com kharoua et al. (2013), o choque dos fluidos contra o defletor, posicionado imediatamente após o duto de entrada no vaso separador, permite a redução das velocidades dos fluidos, contribuindo para a diminuição da mistura. Nesse estágio, a fase líquida é separada da fase gasosa formando duas camadas distintas. Na entrada do separador, diferentes regimes de fluxo ocorrem e a distribuição real dos tamanhos das gotículas necessita ser considerada e ter seu comportamento rastreado por todo o separador para ter em conta os efeitos de coalescência e dissolução.

Os desviadores de entrada servem para transmitir a direção de fluxo da corrente de entrada de vapor / líquido e proporcionam uma separação primária entre o líquido e o vapor. O conceito principal envolve o impacto na corrente de entrada numa superfície, causando uma mudança dinâmica, permitindo que as gotículas de líquido caiam e as bolhas de gás subam. Existem muitos tipos de desviadores de entrada (Figura 3.4), os três tipos principais são placas defletoras, desviadores centrífugos e em formato de cotovelos (LAKE, 2006; STEWART, 2008).

De acordo Bothamley & Campbell (2013), os dispositivos de entrada geralmente são selecionados e dimensionados com base no momento de entrada do fluxo de alimentação do separador. Isso é feito com o objetivo de reduzir a energia/velocidade dos fluidos de alimentação para proporcionar condições favoráveis para a separação de fases.

⁵ Em designação de pressões de operação as siglas HP, IP e LP, são originadas do inglês e referem-se aos termos: *high pressure, intermediate pressure e low pressure*.

Figura 3.4- Desviadores de entrada.



Fonte- Bothamley & Campbell, 2013.

3.3.6.1.1 Placa defletora

Consiste em uma placa de diferentes configurações geométricas, por exemplo: placa esférica, placa plana, de ferro angular, cone, cotovelo, ou então qualquer outro dispositivo que realize uma rápida mudança na direção e velocidade dos fluidos e, assim, promover a separação inercial entre gás e líquido.

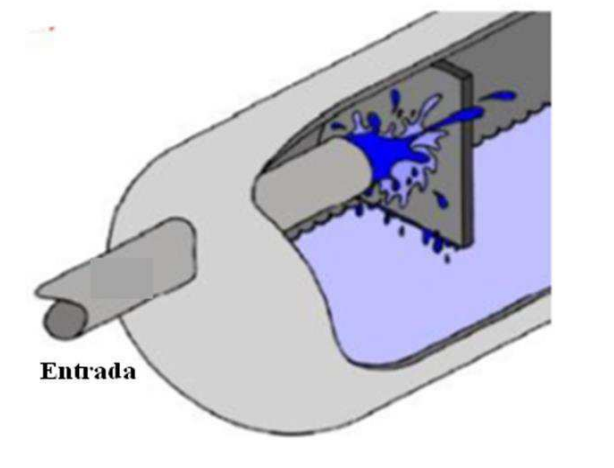
O líquido e o gás possuem velocidades iguais, no entanto, o líquido por ter maior densidade, possui mais energia e, portanto, não muda de direção ou velocidade tão facilmente quanto o gás. Assim, o gás tende a fluir em torno da placa enquanto o líquido atinge a placa e depois se direciona ao fundo do recipiente.

O uso de placas planas e esféricas, por exemplo, é mais adequado para a manipulação de fluidos de baixo momento, no entanto, para fluidos de maior quantidade de movimento, estas entradas podem causar problema ou pode resultar em pequenas gotas e espuma. Por isso, se torna vantajoso o uso de dispositivos como um cotovelo ou cone de meia esfera, quando se tratar de fluidos com maior momento, porque eles criam menos distúrbio do que as placas ou o ferro angular, reduzindo os problemas de reentrada e emulsificação (LAKE, 2006; STEWART, 2008).

3.3.6.1.1 Placa defletora tipo placa plana

Segundo Akpan (2013), os defletores tipo placas planas (Figura 3.5) são historicamente um dos tipos mais comuns de dispositivos de entrada em vasos separadores usados na indústria de petróleo e gás, antes que outros dispositivos de entrada, tipo ciclônicos, por exemplo, se tornassem mais populares. Este dispositivo utiliza simplesmente uma placa defletora na frente do bocal de entrada, com o objetivo de mudar a direção da corrente de entrada e separar a maior parte do líquido do gás.

Figura 3.5- Defletor tipo placa plana.



Fonte- Akpan, 2013.

3.3.6.1.2 Desviador centrífugo

Recentemente, em separadores de grande capacidade, os dispositivos de entrada do tipo ciclônico vem sendo cada dia mais utilizado. O dispositivo ciclônico de entrada é usado em separadores horizontais e alguns verticais, onde há um requisito para a dissipação de grande quantidade de movimento e alta capacidade de redução de espuma.

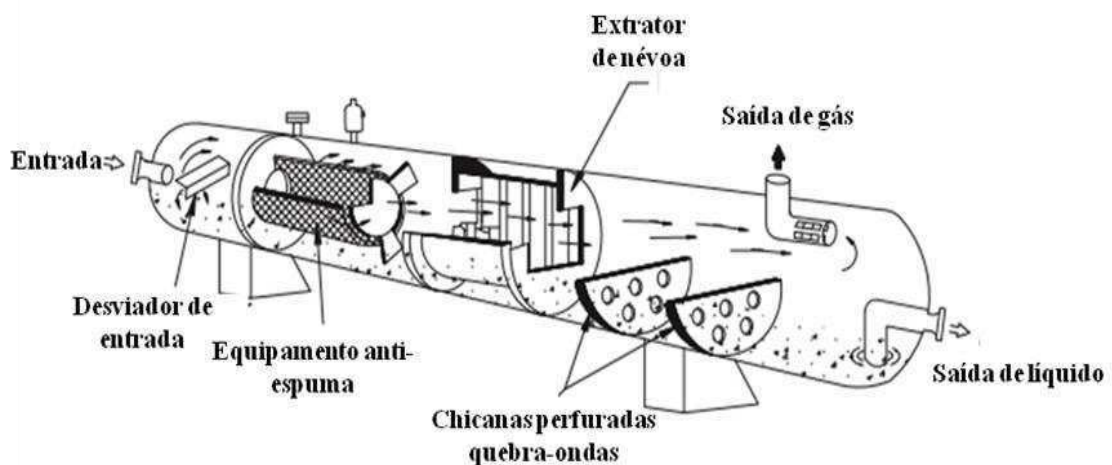
Os desviadores ciclônicos trabalham com base no princípio da separação pela diferença de densidade entre as fases presentes que são acentuadas pelas forças centrífugas e peso. A desvantagem é que seu *design* é sensível à taxa de fluxo, em baixas velocidades eles não funcionarão corretamente. (STEWART, 2008; AKPAN, 2013; BOTHAMLEY & CAMPBELL, 2013).

3.3.6.1.3. Chicanas/ quebra-ondas

Em vasos horizontais de comprimento longo, pode ser necessário instalar dispositivos quebra-ondas. As ondas podem resultar dos escoamentos intermitentes que entram no vaso separador. Os dispositivos chamados de chicanas quebra-ondas ou só mesmo quebra-ondas, nada mais são do que pratos simples ou placas perfuradas que são colocadas perpendicularmente ao fluxo localizado na seção de acumulação no vaso separador. Essas chicanas amortecem qualquer ação de onda que pode ser causada na entrada do fluido.

As ações de onda no recipiente devem ser eliminadas de modo que os controles de nível, os interruptores de nível e demais válvulas possam atuar corretamente (STEWART, 2008). A Figura 3.6 é uma ilustração de um separador horizontal equipado com um desviador de entrada, um elemento antiespumante, um extrator de névoa e placas quebra-ondas.

Figura 3.6- Separador horizontal com vista dos dispositivos internos.



Fonte – Stewart, 2008.

3.3.6.1.4 Placa perfurada

De acordo com Stewart (2008), a placa perfurada consiste de uma superfície constituída de vários orifícios uniformemente distribuídos. Logo, os fluidos espalham-se ao longo da superfície defletora mudando de direção. A placa perfurada provoca a queda de pressão e a dissipação da energia cinética do fluido provocando a redistribuição do fluxo. Esta placa é utilizada para estabelecer uma zona de transição entre a seção de separação primária e a seção de separação secundária, em que o momento é reduzido antes de entrar na região de separação, logo a separação por gravidade pode ser otimizada. Uma das aplicações é promover a

redistribuição do escoamento de líquido em separadores horizontais longos (STEWART, 2008).

De acordo com Frankiewicz et al. (2002), usando CFD podem ser desenvolvidos projetos para dispositivos internos, como placas perfuradas, e suas posições no interior de um vaso separador podem ser otimizadas para controlar a distribuição do escoamento dos fluidos. Segundo os autores uma placa perfurada pode ser modelada em CFD como um meio poroso, onde é possível variar a porosidade e permeabilidade. No entanto, as dimensões dos orifícios na placa não são especificamente modeladas.

3.3.6.1.5 Coalescedores e eliminadores de névoa

Dispositivos coalescentes em separadores obrigam o gás a seguir um caminho tortuoso, à medida que as gotas colidem uma com as outras, coalescem e formam gotas maiores. As gotas maiores podem se separar da fase gasosa por decantação, devido à influência da gravidade (AKPAN, 2013).

Existem muitos tipos extratores ou eliminadores de névoa, que são designados para remover as bolhas do líquido e partículas sólidas da fase gasosa. Antes da seleção ser feita, alguns fatores como tamanho das gotas que o separador deve remover, queda de pressão que pode ser tolerada para atingir o nível de remoção, susceptibilidade do separador à obstrução por sólidos, se os sólidos estiverem presentes, entre outros, devem ser avaliados (STEWART, 2008).

3.3.7 Dimensionamento dos vasos separadores e eficiência de separação

Para o projeto e dimensionamento de vasos separadores deve-se levar em consideração alguns fatores como: formação de espuma, propriedades dos fluidos e a vazão de alimentação, temperatura, pressão, entre outros aspectos. De acordo com Orellana & Arce (2011), a eficiência de separação e o comportamento dinâmico dos vasos separadores estão diretamente relacionados com o dimensionamento do mesmo.

Segundo Bothamley & Campbel (2013), a eficiência de separação é definida pela quantidade de líquido que permanece no gás e a quantidade de gás que permanece no líquido após a separação. A quantidade de líquido na fase gasosa separada é um indicador da eficiência de separação, quanto menor for essa quantidade, melhor será a eficiência de separação. Os autores complementam que os problemas operacionais associados à grande quantidade de

líquido no gás são muito mais agravantes do que aqueles causados por excesso de gás no líquido.

De acordo Liang et al. (2013), a eficiência de separação é representada pela fração de gás na saída de gás e a fração de líquido na saída de líquido. Quanto maior a fração de gás na saída do gás, e quanto menor a quantidade líquidos, maior será a eficiência e, vice-versa.

A eficiência de separação segundo PDVSA (1995) pode ser calculada por:

$$E = 100 \frac{(F - C)}{F} \quad (3.1)$$

onde,

E = Eficiência de separação, em %

F = Fluxo mássico de líquido na entrada do separador, em kg/s

C = Quantidade de líquido que foi arrastado pelo gás e sai na saída de gás, em kg/s.

Informações sobre desenho, dimensionamento e avaliação da eficiência de separação podem ser encontradas em Granja (1987), Requena et al. (2006), Orellana & Arce (2011), Cova & Ramos (2013), Akpan (2013) e Souza (2015).

3.3.8 O uso do CFD em equipamentos de separação: Estado da arte

Huusari (2015) analisou o critério de projeto de um separador de fases usando fluidodinâmica computacional. Para encontrar uma configuração ótima para os vasos separadores, várias geometrias e aspectos de projeto foram avaliados baseados em simulações usando o *software* OPENFOAM. Os aspectos e as características estudadas incluem a distribuição de entradas, dimensões dos vasos, dispositivos de entrada e configurações de saída de gás. Foram utilizadas simulações em regime permanente e transiente, com escoamento monofásico ou bifásico.

Freitas (2015) avaliou a dinâmica do líquido de um vaso de separação gás/óleo com auxílio do *software* Ansys CFX, com o intuito de analisar os campos de fração volumétrica, pressão e velocidade superficial do óleo, sob diferentes condições de entrada. As simulações foram realizadas considerando regime transiente, turbulento, domínio bidimensional, modelo

de transferência interfacial de superfície livre e modelo de turbulência $k-\varepsilon$. Os resultados mostram que a modelagem foi capaz de representar os fenômenos físicos e verificou-se que a dinâmica do óleo é afetada pela variação da vazão de entrada. Os resultados mostram também que a viscosidade afeta o comprimento das ondas formadas no interior do vaso separador, criando assim menos zonas de turbulência. Por fim, sugere que é possível aprofundar os estudos e expandir o conhecimento sobre esse equipamento, tão essencial no processamento primário de petróleo.

Liang et al. (2013) analisaram o escoamento de um separador trifásico de um campo petrolífero, por meio de simulação numérica. Estudou-se o escoamento interno e o efeito da vazão, e da proporção de gás e de água sobre a eficiência de separação. Os autores observaram que a fração volumétrica de gás na saída de gás e de líquido na saída de líquido podem permanecer acima de 97% e 95%, respectivamente, evidenciando a viabilidade deste tipo de sistema de separação.

Kharoua et al. (2013) estudaram o desempenho e o comportamento do escoamento multifásico em vaso separador trifásico. Eles adotaram o modelo Euleriano-Euleriano usando o código Ansys FLUENT[®] assumindo escoamento monofásico e excluindo fenômenos de coalescência e dissolução. Posteriormente foi decidido o uso do Modelo de Balanço Populacional (*Population Balance Model* - PBM) para ter em consideração a distribuição, coalescência e dissolução das fases. Os resultados da simulação são comparados dados experimentais e teóricos. Os autores concluíram que as distribuições de tamanho das partículas (gotículas e/ou bolhas) têm relação com o desempenho do separador, e esse fato é influenciado pelo dispositivo interno de entrada *Schoepentoeter*. Concluíram também que o tempo de residência obtido está de acordo com algumas abordagens encontradas na literatura. Por fim, expõem a vantagem do uso de CFD para os cálculos das variáveis de fluxo no local, produzindo uma imagem mais completa e detalhada do campo de escoamento inteiro. Segundo os autores, esse fato é importante para entender o impacto do comportamento do escoamento multifásico interno sobre o desempenho global do separador.

Aragão Júnior (2011) estudou a influência de dispositivos internos instalados em separadores atmosféricos gravitacionais de petróleo - Tanques de água livre. O estudo avaliou a influência de dispositivos internos verificando como suas dimensões interferem na separação. Uma das principais conclusões das simulações numéricas permitem uma discussão ampla e

mais aprofundada a respeito dos parâmetros geométricos nos separadores gravitacionais, podendo ser inclusive utilizadas na fase de projeto do equipamento.

Abdulkadir et al. (2010) analisaram o efeito da velocidade da mistura e do diâmetro da gota no separador óleo-água usando a dinâmica de fluido computacional (CFD). As simulações foram realizadas para diferentes velocidades e diâmetros de gotículas, e a forma como esses parâmetros podem influenciar a geometria do separador foi estudada. As simulações foram realizadas utilizando o *software* FLUENT 6.2 onde o modelo consistia em um separador horizontal cilíndrico. Uma malha tetraédrica foi empregada no domínio computacional. A condição de fluxo de duas fases foi simulada com o modelo de dois fluidos, levando em consideração os efeitos de turbulência usando o modelo $k-\varepsilon$. Os resultados mostraram que há uma forte dependência da separação de fases na velocidade da mistura e no diâmetro das gotas. Um aumento na velocidade da mistura provocará uma desaceleração na separação de fases e, como consequência, exigirá um reservatório de maior altura.

Frankiewicz et al. (2002) usaram a dinâmica dos fluidos computacional para modelar o movimento dos fluidos em separadores instalados em plataformas fixas e flutuantes. Estudaram a influência de entradas, dispositivos internos (defletores tipo placa perfuradas) e saídas sobre a atenuação da velocidade dos fluidos durante o escoamento no interior do vaso separador. As simulações foram obtidas utilizando o modelo VOF implementado no *software* FLUENT *Incorporated*. Segundo os autores, os resultados das simulações CFD apontam a visualização da influência de todos os componentes do separador, desde a entrada até a saída, na dinâmica dos fluidos, na medida que estão relacionados com a atenuação da velocidade dos fluidos. Neste sentido, concluem que o uso de placas perfuradas e demais partes internas, assim como suas posições dentro de um separador podem ser otimizadas, para permitir o controle da distribuição de fluxo de fluidos em vasos separadores usados para aplicações *offshore*.

CAPÍTULO IV

MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar os procedimentos metodológicos desenvolvidos para a realização da modelagem matemática e simulação numérica de um separador horizontal bifásico utilizando fluidodinâmica computacional (CFD). Todo o desenvolvimento metodológico dessa pesquisa se deu no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos - LCTF, localizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande. Os pacotes CFD *Ansys ICEM*[®] e *Ansys CFX*[®] 15.0 utilizados no desenvolvimento desse trabalho são devidamente instalados e licenciados para o uso dos alunos e pesquisadores membros do LCTF.

4.2 ETAPAS DE ESTUDO

A primeira etapa consiste na definição do fenômeno físico a ser estudado. Para a realização do estudo deste fenômeno físico, com o uso de métodos numéricos, deve ser feita a modelagem física do problema. O modelo físico foi elaborado a partir da aplicação de princípios físicos descritos pelas leis de conservação da massa e de momento linear, o que se denomina de modelagem matemática do problema. Para tratar numericamente o modelo foi necessário definir o domínio (região) em que as equações são válidas, para tanto foi realizada a construção e discretização da geometria, inerente à segunda etapa. A construção e discretização do domínio foram alcançadas em virtude do uso do código *Ansys ICEM CFD*[®] 15.0. Na terceira etapa, a modelagem matemática do problema foi definida, considerando as simplificações necessárias.

Dando continuidade, a quarta etapa, consiste na utilização do código CFD *Ansys CFX*[®], baseado no método de volumes finitos, para o desenvolvimento da simulação numérica. Esta etapa foi subdividida de acordo com a sequência metodológica exigida para a manipulação do *software Ansys Release CFX*[®].

O diretório do *software* Ansys Release CFX[®] subdivide-se em: CFX-*pre* (pré-processamento), CFX-*solver* (solução) e CFX-*post* (pós-processamento), que foi tratado como subetapas da etapa quatro. O pré-processamento consistiu basicamente na importação do domínio discretizado, aplicação da modelagem matemática, definição de condições iniciais e de contorno e especificação das propriedades dos fluidos. Posteriormente, na subetapa de solução ocorreu a resolução das equações algébricas. Por fim, a subetapa de pós-processamento permitiu a visualização dos resultados obtidos pela subetapa de solução mediante o uso de uma série de ferramentas disponíveis nesse diretório, contribuindo assim para a análise dos resultados. A quinta etapa destinou-se a análise e interpretação dos resultados.

4.2.1 Descrição do problema

O problema estudado corresponde ao escoamento bifásico (gás/óleo) no separador bifásico em três dimensões, em duas situações: uma em regime permanente e outra em regime transiente, isotérmico e turbulento. As fases são consideradas contínuas, separadas por uma interface e escoam no interior de um vaso separador horizontal com pressão de operação de 2 atm.

O vaso separador usado é baseado na geometria do separador trifásico horizontal estudado por (Kharoua, 2013). O vaso separador horizontal (Figura 4.1) é constituído de uma entrada, duas saídas e dispositivos internos que influenciam na dinâmica do escoamento no separador. Foram realizadas algumas alterações na geometria original, das quais uma delas foi a adição de uma placa porosa que divide o separador em duas regiões: a primeira a montante da placa porosa (meio poroso), denominada região de mistura, devido aos maiores níveis de turbulência observados, correspondendo a seção de separação primária; a segunda a jusante da placa porosa, denominada região de separação, corresponde a seção de separação por gravidade ou também chamada de seção de sedimentação⁶, nela ocorre o processo de separação por diferença de densidade.

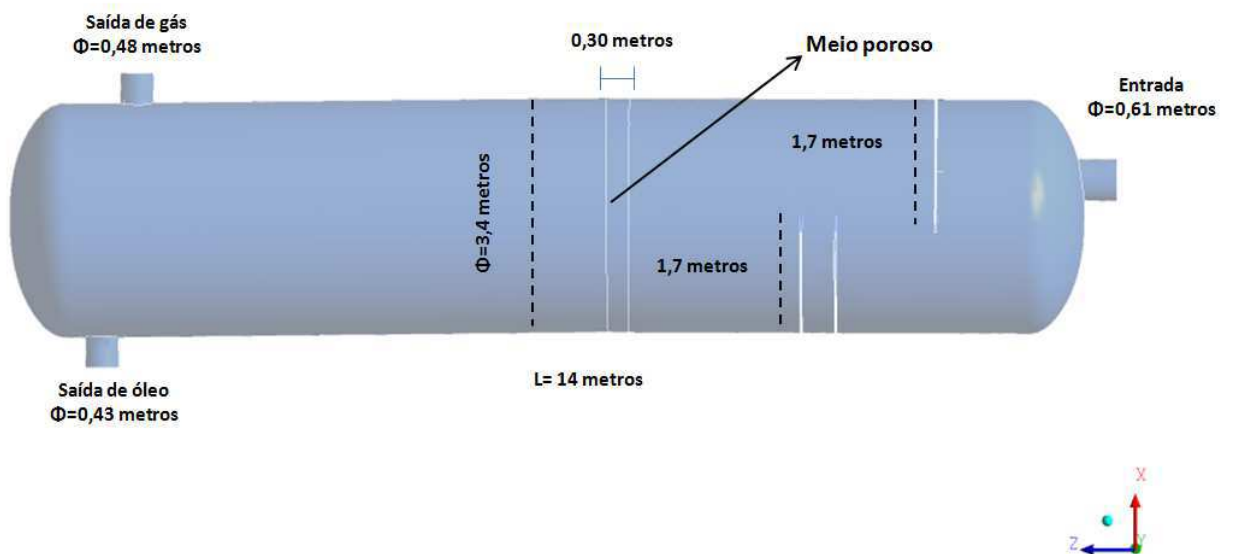
Os valores referentes ao diâmetro e comprimento do vaso, posicionamento e diâmetro da entrada e das saídas de óleo e gás estão ilustrados na Figura 4.1. Os valores de altura dos tampos do vaso separador não foram explicitados por Kharoua (2013). Como se tratam de tampos elípticos foi, portanto, calculado a altura dos mesmos usando a seguinte equação proposta por Souza (2015):

⁶ A seção de sedimentação pode ser também denominada como seção de decantação.

$$H = \frac{D}{2F_{TE}} \quad (4.1)$$

Onde, H refere-se à altura do tampo elíptico de 0,85 m, obtida pela razão entre o diâmetro do vaso D e o fator adimensional de tampo elíptico F_{TE} igual a 2.

Figura 4.1- Dimensões geométricas do vaso separador horizontal bifásico.



Usando as ferramentas do pacote *Ansys ICEM CFD*® 15.0, para a criação de pontos e curvas, as partes do separador horizontal foram criadas. A geometria do separador foi subdividida em três regiões, de acordo com cada função específica (Figura 4.2). Observa-se ainda na Figura 4.2, a placa porosa, localizada na parte central do separador.

Com o auxílio do aplicativo computacional *Ansys ICEM CFD*® a malha não-estruturada com 730.995 elementos (Figura 4.3) foi gerada de forma semiautomática. Além da malha tem-se alguns detalhes das malhas do meio poroso, da região de mistura e da região de separação.

Figura 4.2- Geometria do separador horizontal bifásico.

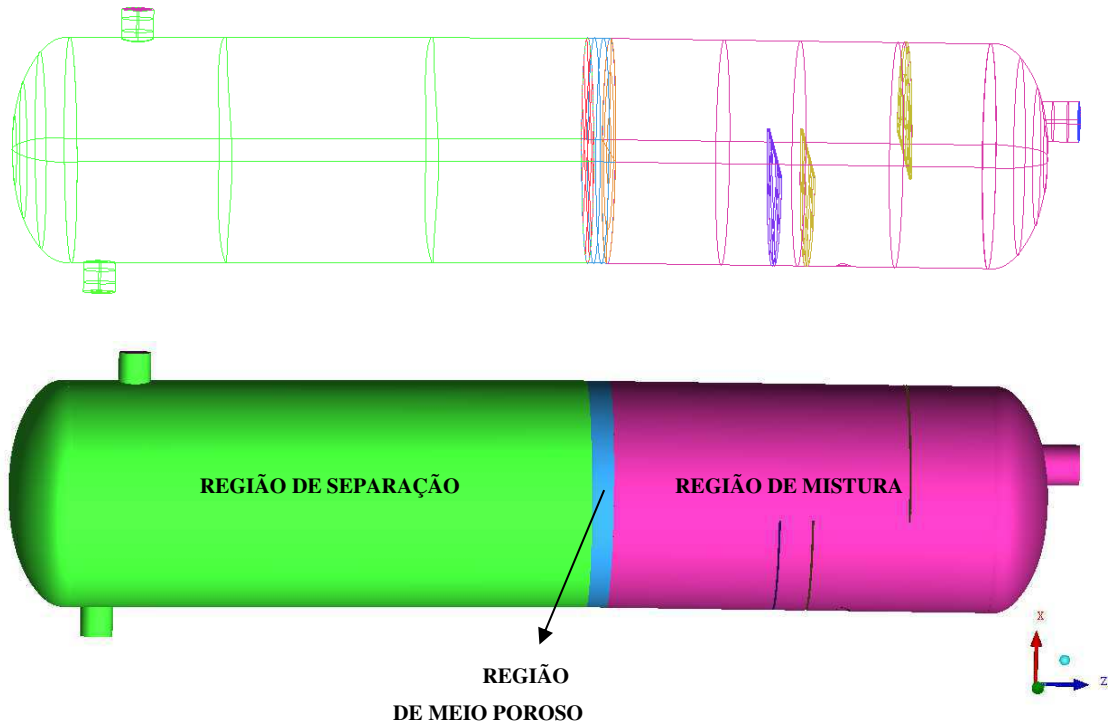
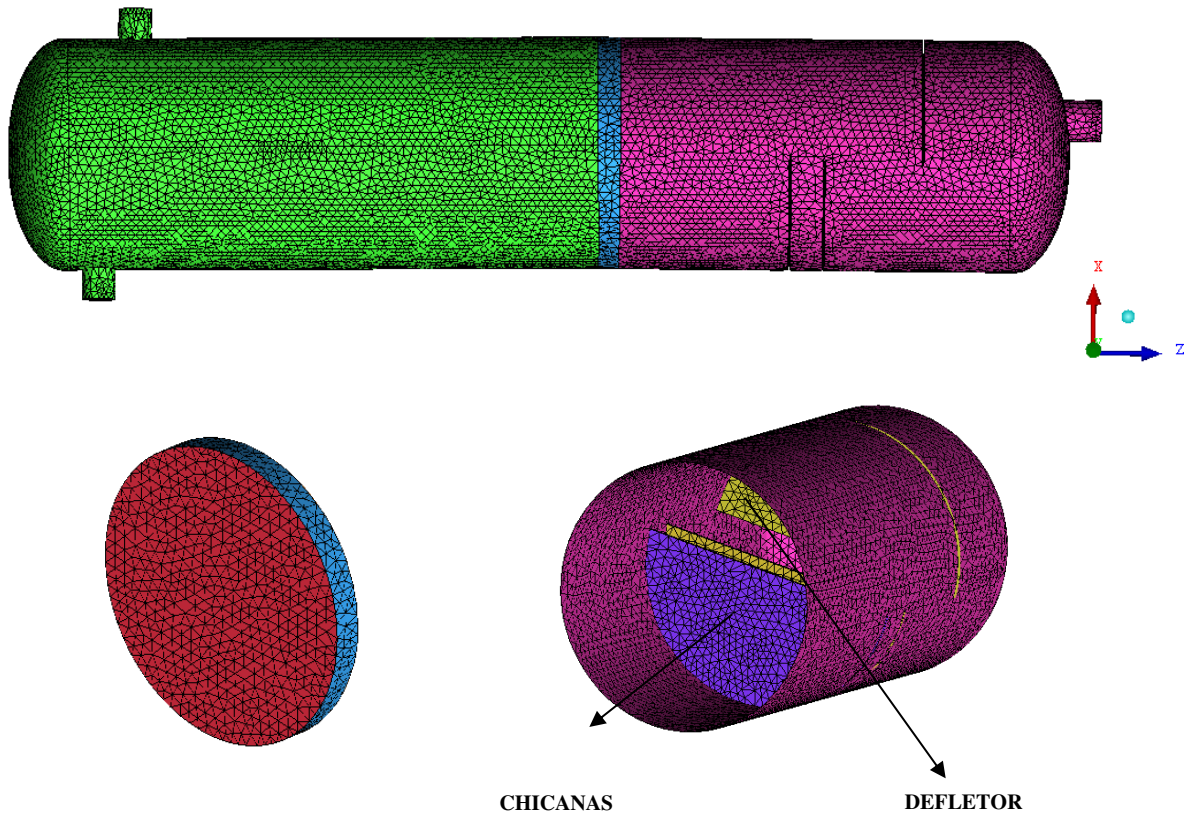


Figura 4.3- Malha não-estruturada. a) Região de meio poroso. b) Região de mistura, evidenciando o interior, onde encontram-se o defletor e duas chicanas.



4.2.2 Definição da modelagem matemática

A modelagem matemática definida para a representação do escoamento bifásico tridimensional é baseada na abordagem Euleriana-Euleriana não homogênea, considerando o modelo de mistura. Devido a complexidade do escoamento multifásico em separadores gravitacionais horizontais, além das considerações realizadas é necessário assumir algumas simplificações adicionais:

- ✓ Fluido incompressível;
- ✓ Escoamento isotérmico,
- ✓ Termos fontes de massa e de quantidade de movimento são desconsiderados;
- ✓ Termo de difusividade mássica por unidade de volume da fase α para a fase β é desconsiderado.
- ✓ Não há reações químicas.

Com estas considerações as equações de conservação e de quantidade de movimento reduzem-se a:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha \vec{U}) + \nabla \cdot [r_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -r_\alpha \nabla P_{p_\alpha} + \nabla \cdot (r_\alpha \tau) + \vec{D}_{\alpha\beta} \quad (4.3)$$

No modelo de mistura é considerado apenas o arraste exercido pela fase β sobre a fase α por unidade de volume, $\vec{D}_{\alpha\beta}$, definido como:

$$\vec{D}_{\alpha\beta} = C_D \rho_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (4.4)$$

onde, C_D é o coeficiente de arraste adimensional constante e igual a 0,44 e $\rho_{\alpha\beta}$ corresponde à densidade da mistura dada por:

$$\rho_{\alpha\beta} = r_{\alpha}\rho_{\alpha} + r_{\beta}\rho_{\beta} \quad (4.5)$$

A densidade de área interfacial por unidade de volume, $A_{\alpha\beta}$ é obtida pela seguinte relação:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{r_{\alpha}r_{\beta}}{d_{\alpha\beta}} \quad (4.6)$$

Para os casos simulados em regime permanente, os primeiros termos das equações 4.2 e 4.3 não foram considerados.

O modelo de turbulência escolhido para todas as simulações é o modelo k - ε padrão, que é classificado como modelo de duas equações: equação da energia cinética turbulenta k , e a da taxa de dissipação turbulenta ε .

As equações de transporte usadas para estimar as variáveis, κ , energia cinética turbulenta (dimensões L^2T^2) e, ε , taxa de dissipação turbulenta (dimensões L^2T^2) são dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \rho \varepsilon + C_1 P_{\varepsilon b}) \quad (4.8)$$

onde, C_1 , C_2 são constantes empíricas, respectivamente igual a 1,44 e 1,92; σ_{ε} , σ_k são constantes iguais a 1,0 e 1,3, respectivamente. P_{kb} e $P_{\varepsilon b}$ representam a influência das forças de empuxo (ALVES, 2016) e P_k que aparece em ambas as equações representa a parcela de produção de energia cinética turbulenta (BARBOSA, 2011).

A parcela de produção de energia cinética é definida por:

$$P_k = \mu_{ef} \nabla \vec{U}_{\alpha} \left[\nabla \vec{U}_{\alpha} + (\nabla \vec{U}_{\alpha})^T \right] - \frac{2}{3} \nabla \vec{U}_{\alpha} \left(\mu_{eff} \nabla \vec{U}_{\alpha} + \rho k \right) \quad (4.9)$$

4.2.2.1 Condições iniciais e de contorno

As condições de contorno estabelecidas para: entrada do separador, saída de gás, saída de óleo e parede são apresentadas na Tabela 4.1 e ilustradas na Figura 4.4.

Tabela 4.1- Condições de contorno estabelecidas.

ENTRADA	
GÁS*	ÓLEO*
Velocidade	Velocidade
Fração de volume	Fração de volume
PAREDE	
VELOCIDADE DO GÁS	VELOCIDADE DO ÓLEO
0 m/s na direção u	0 m/s na direção u
0 m/s na direção v	0 m/s na direção v
0 m/s na direção w	0 m/s na direção w
SAÍDA DE ÓLEO	
Opção: pressão estática	
Pressão relativa: 2 atm	
SAÍDA DE GÁS	
Opção: pressão estática	
Pressão relativa: 2 atm	

* Valores ilustrados na Tabela 4.5.

Foi estabelecido um nível de 50% de óleo dentro do vaso separador (Figura 4.4), para tanto admitiu-se para fração de volume, dentro das condições iniciais de partida no regime permanente, a seguinte expressão:

$$f_o = \begin{cases} 1, & \text{se } x \leq 0 \\ 0, & \text{se } x \geq 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

onde, f_o é a fração de volume de óleo e x é a coordenada cartesiana vertical. A solução da simulação em regime permanente foi assumida como condição inicial para os casos simulados em regime transiente.

As propriedades dos fluidos estão ilustradas na Tabela 4.2 e as informações sobre a definição dos domínios, materiais, regimes de escoamento, entre outras, podem ser encontradas na Tabela 4.3.

Na Tabela 4.4 estão ilustrados os critérios de convergência adotadas nas simulações dos diferentes casos avaliados (Tabela 4.5).

Figura 4.4- Ilustração do nível de líquido definido para o separador horizontal.

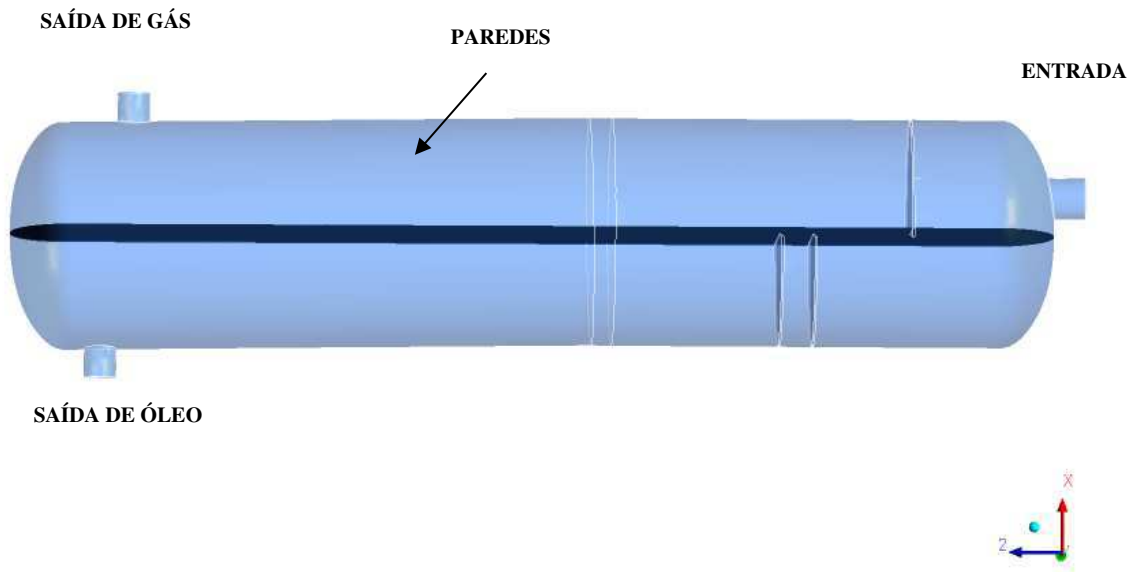


Tabela 4.2- Especificações básicas referente as propriedades dos fluidos.

PROPRIEDADES DOS FLUIDOS		
	GÁS	ÓLEO
DENSIDADE	17,585 kg/m ³	813,464 kg/m
VISCOSIDADE	0,000011 kg/ms	0,00227 kg/ms

Tabela 4.3- Considerações básicas.

DOMÍNIO	MISTURA	POROSO	SEPARAÇÃO
LOCALIZAÇÃO	REGIÃO DE MISTURA	MEIO POROSO	REGIÃO DE SEPARAÇÃO
TIPO DE DOMÍNIO	Fluido	Poroso/Fluido	Fluido
MATERIAIS	Gás e Óleo	Gás e Óleo	Gás e Óleo
MORFOLOGIA	Fluidos contínuos	Fluidos contínuos	Fluidos contínuos
PRESSÃO DE REFERÊNCIA	1 atm	1 atm	1 atm
DIREÇÃO DA GRAVIDADE	Eixo x (g)	Eixo x (g)	Eixo x (g)
DENSIDADE REFERÊNCIA	1,185 kg/m ³	1,185 kg/m ³	1,185 kg/m ³

Tabela 4.4- Dados para o controle de solução.

CONTROLE DE SOLUÇÃO PARA REGIME PERMANENTE	
CONTROLE DE CONVERGÊNCIA	Mínimo de iterações: 1 Máximo de iterações: 8000
CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA	Tipo de residual: RMS Valor do residual: 10^{-8}
CONTROLE DE SOLUÇÃO PARA REGIME TRANSIENTE	
CONTROLE DE CONVERGÊNCIA	Mínimo Loops:1 Máximo Loops:15
CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA	Tipo de residual: RMS Valor do residual: 10^{-4}

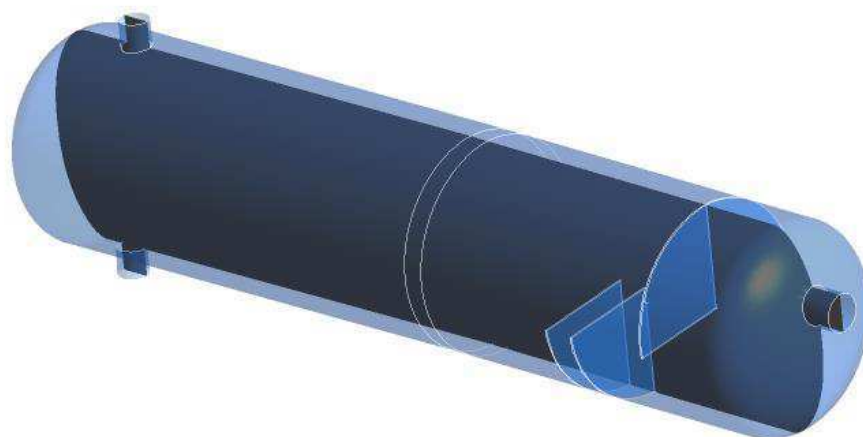
Tabela 4.5- Descrição das simulações numéricas realizadas.

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS REALIZADAS							
CASOS	REGIME	VELOCIDADE DE ENTRADA (m/s)		FRAÇÃO DE VOLUME		POROSIDADE E PERMEABILIDADE DO MEIO POROSO (m ²)	
		Óleo	Gás	Óleo	Gás	Porosidade	Permeabilidade
1	Permanente	7,49	5,0	0,5	0,5	0,3	0,07
2	Permanente	7,49	5,0	0,5	0,5	Ausência de meio poroso	
3	Permanente	7,49	5,0	0,5	0,5	0,3	$2,26 \times 10^{-9}$
4	Permanente	3,74	2,5	0,5	0,5	Ausência de meio poroso	
5	Transiente	7,49	5,0	0,5	0,5	0,3	$2,26 \times 10^{-9}$
6	Transiente	7,49	5,0	0,5	0,5	0,3	$2,26 \times 10^{-7}$
7	Transiente	7,49	5,0	0,5	0,5	0,3	2,26
8	Transiente	7,49	5,0	0,5	0,5	Ausência de meio poroso	
9	Transiente	3,74	2,5	0,5	0,5	Ausência de meio poroso	

Nas simulações realizadas considerando o regime transiente foi atribuído um passo de tempo (*time-step*) de 0,25 segundos.

A seguir, na Figura 4.5 está ilustrado o plano longitudinal zx que foi utilizado para geração dos campos de velocidade, de fração volumétrica e campo vetorial de velocidade durante a análise e discussão dos resultados.

Figura 4.5 - Plano longitudinal zx usado para análise de resultados.



CAPÍTULO V

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem por finalidade analisar e discutir os resultados obtidos a partir das simulações numéricas em regimes permanente e transiente. As discussões feitas foram voltadas ao estudo do comportamento dinâmico dos fluidos no interior do vaso separador horizontal bifásico e o processo de separação das fases sobre influência dos dispositivos internos. Para tanto, será feita a análise da fração de volume das fases e o estudo fluidodinâmico com o auxílio da aplicação de linhas de fluxo, campos de velocidade e campos vetoriais de velocidade.

5.2 ESCOAMENTO EM REGIME PERMANENTE

5.2.1 Análise da fração de volume das fases

Nas Figuras 5.1 e 5.2 estão representados os campos de fração volumétrica de óleo sobre o plano zx para os casos 1 e 2, respectivamente. Observa-se nessas figuras que a fase gasosa está presente em sua totalidade na parte superior do vaso, acima do nível estabelecido de óleo. Observa-se igualmente que o comportamento nestas figuras, depende da presença do meio poroso dividindo as regiões de separação primária e de sedimentação.

A presença da placa porosa no caso 1 com porosidade de 30% e permeabilidade de 0.07m^2 , contribui para atenuar a velocidade dos fluidos devido à resistência ao escoamento resultando em uma seção de sedimentação com menos ondulações na interface óleo/gás.

Em contrapartida, os resultados obtidos da simulação (Figura 5.2) onde o meio poroso é desconsiderado (caso 2), apresentam uma interface com mais ondulações, fator que não é desejado na região de sedimentação, já que os fluidos necessitam de uma interface bem definida

e sem mistura para favorecer a separação por decantação, evitando carreamento de gotículas de líquido pelo gás, assim como bolhas de gás pelo líquido.

É notório que a presença do meio poroso pode ser essencial para proporcionar uma transição dos fluidos da região de mistura para a região de separação, de forma que os níveis de turbulência sejam minimizados, resultando em uma interface horizontalmente mais definida. No entanto, deve ser levado em consideração a permeabilidade da região do meio poroso, assim como a velocidade de entrada dos fluidos no vaso separador, o que determina a vazão de alimentação.

Na Figura 5.3 está representado o campo de fração volumétrica para uma permeabilidade do meio poroso de $2,26 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. O baixo valor da permeabilidade atribuído ao meio poroso proporcionou um aumento significativo da resistência ao escoamento resultando em um aumento do nível de óleo na região de mistura e um aumento da ondulação do nível de óleo na seção de decantação. Este fato pode ser explicado pela queda do óleo ao cruzar o meio poroso, assemelhando-se a uma cachoeira de óleo, que induz a formação de ondas que se propagam até o final da seção de decantação. O gás, por ser menos denso, consegue fluir mais facilmente por esta região de baixa permeabilidade.

Nos casos 1 e 3 verifica-se que a presença do meio poroso age de forma satisfatória, desde que a permeabilidade definida não transforme o meio poroso em uma barreira ao escoamento.

Visando averiguar se as ondulações da fase oleosa podem ser minimizadas na ausência do meio poroso ao reduzir a vazão de alimentação ou velocidade de entrada, evitando assim a necessidade de inserção da placa porosa, os resultados desta simulação (caso 4) estão ilustrados na Figura 5.4.

Os campos de fração volumétrica sobre o plano longitudinal para o caso 4 indicam que o óleo fica retido à montante das chicanas, resultando em um baixíssimo nível de óleo na região de separação. A quantidade de fluido que entra no vaso separador não é suficiente para manter o nível de óleo, já que a saída de óleo é mantida nas mesmas condições. Logo, para manter o nível pré-estabelecido seria necessário considerar durante a simulação a presença de válvulas de controle na saída de óleo

Figura 5.1 - Fração de volume do óleo (Caso 1).

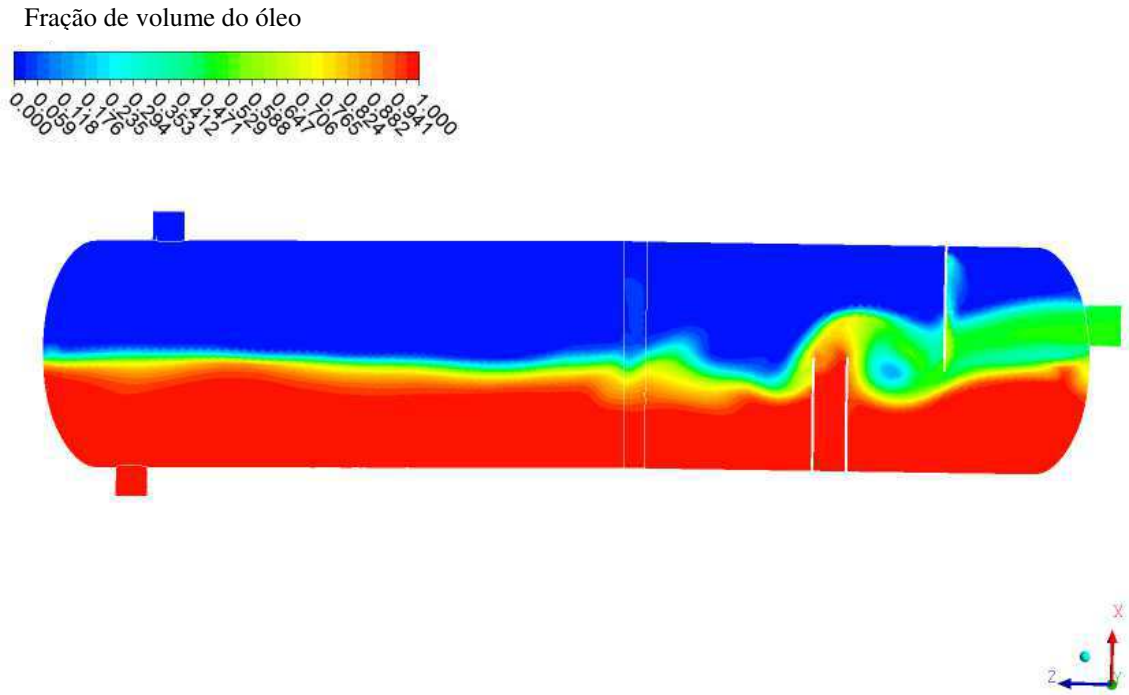


Figura 5.2- Fração de volume do óleo (Caso 2).

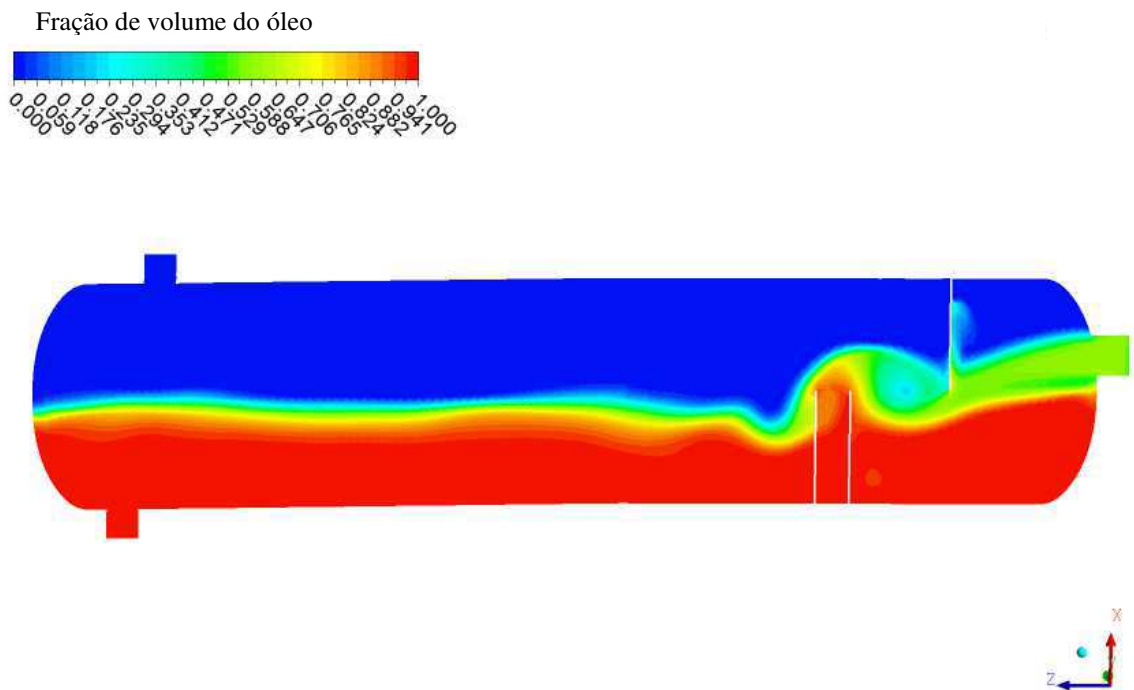


Figura 5.3- Fração de volume do óleo (Caso 3).

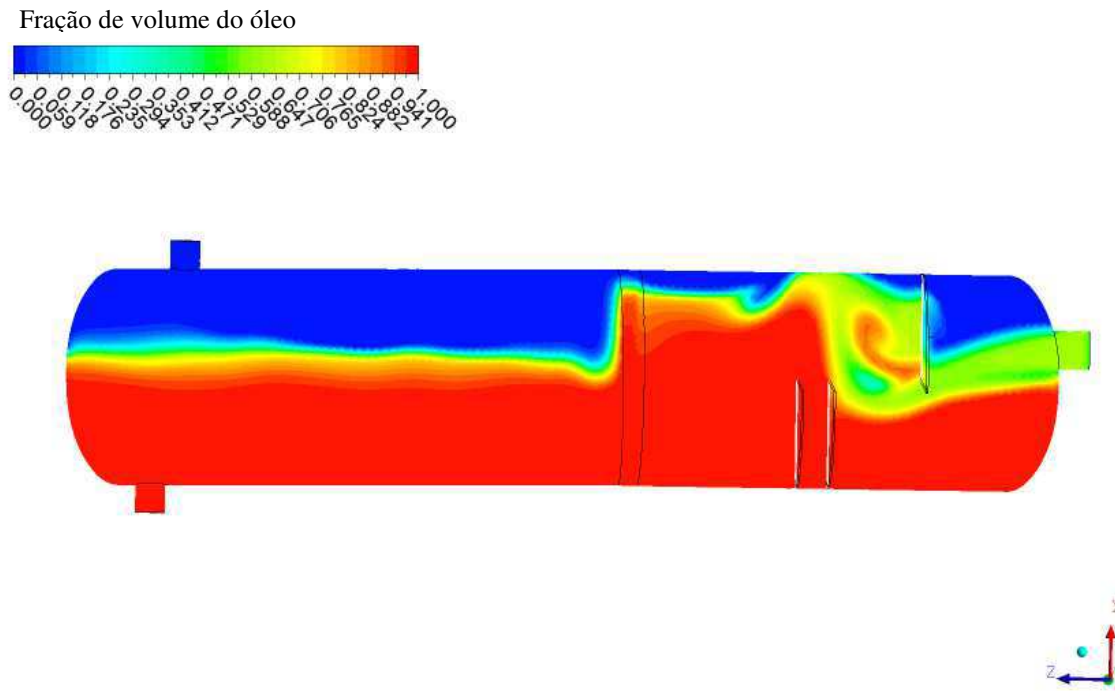
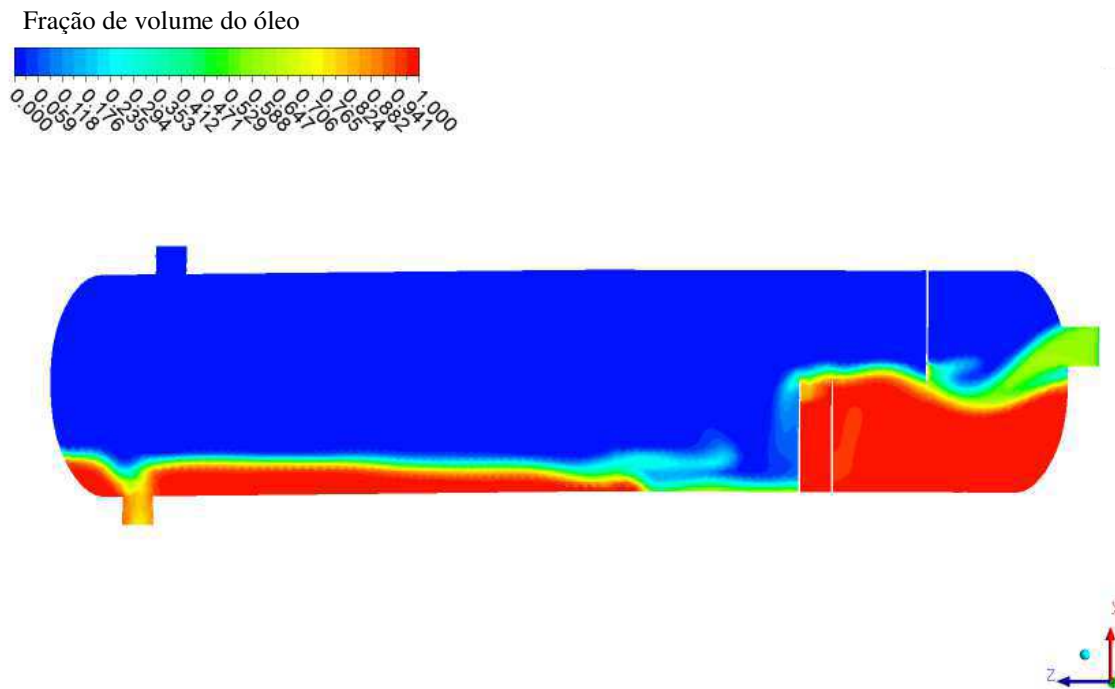


Figura 5.4- Fração de volume do óleo (Caso 4).



5.2.2 Fluidodinâmica no interior do vaso separador

A região de mistura ou seção de separação primária é constituída pelas partes internas: defletor e duas chicanas. O defletor é uma placa disposta perpendicularmente a seção de entrada do vaso separador. A mistura gás/óleo ao entrar no vaso separador choca-se com a placa defletora, o que reduz bruscamente as velocidades dos fluidos e auxilia no processo de separação. Este comportamento pode ser observado nas Figuras 5.5 a 5.8, onde estão representadas as linhas de fluxo para os casos 1 a 4. O comportamento ilustrado nessas figuras ratificam os resultados reportados na literatura (PDVSA, 1991; SANT'ANNA, 2005).

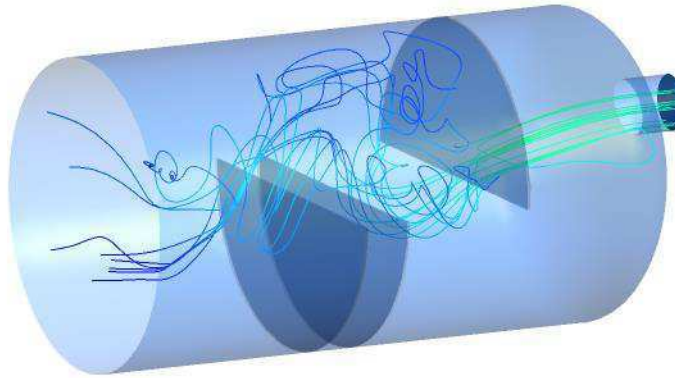
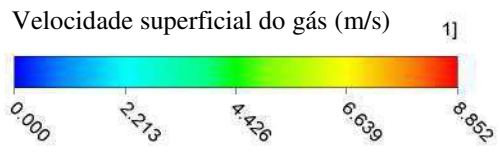
A fase gasosa, após o impacto com o defletor, muda completamente de direção, recirculando a jusante da placa nos casos 1, 2 e 3 (Figuras 5.5a, 5.6a e 5.7a) e a montante do defletor no caso 4 (Figura 5.8a). No entanto, a fase líquida choca-se com o defletor, mas não recircula seguindo a fase gasosa, na verdade o óleo após o choque com o defletor, desce e mantém o escoamento na parte inferior do vaso separador, passando pelas chicanas e seguindo em direção a seção de decantação (Figuras 5.5b a 5.8b).

No caso 3, o líquido se choca contra o defletor, desce, e posteriormente ao chocar-se com a primeira chicana, tende a subir e acumular-se na região de mistura (Figura 5.7b). Em contrapartida, no caso 4, o líquido não se choca contra o defletor, sua baixa velocidade o faz descer imediatamente quando adentra o vaso, e em seguida se acumula a montante da primeira chicana e abaixo do defletor (Figura 5.8b).

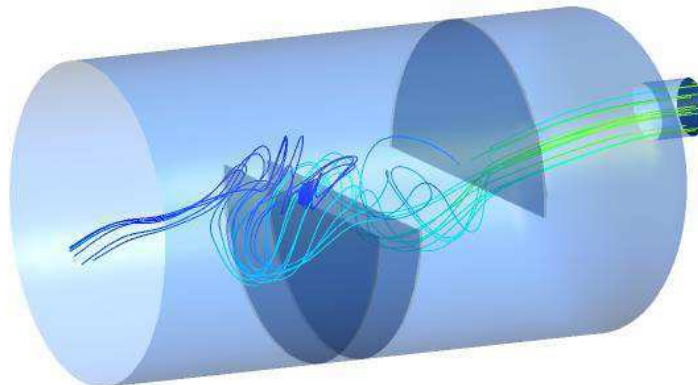
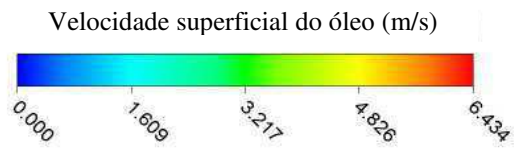
Como os fluidos possuem distintas densidades, conseqüentemente possuem diferentes momentos lineares (quantidade de movimento). Logo, devido ao choque com um dispositivo de impacto, a fase gasosa muda bruscamente de direção e o forte momento linear adquirido pelas fases não permite que as partículas da fase mais densa se movimentem tão rapidamente como a fase de menor densidade, ocorrendo a separação.

Nas Figuras 5.5 a 5.8 observa-se a presença de movimentos circulares ou zonas de recirculação a jusante do defletor (casos 1, 2 e 3) e a montante do defletor (caso 4). A representação do campo vetorial de velocidade superficial do gás sobre o plano longitudinal, para esses casos, ratifica a presença de zonas de recirculação ou vorticidade, característico de escoamento turbulento. Este comportamento pode ser observado na Figura 5.9. A presença de zonas de recirculação na região de mistura já era esperada, pois esta parte do vaso separador é responsável pela separação inercial, devido ao impacto com os dispositivos internos, conseqüentemente os fluidos tomam diferentes direções mediante a influência dessas placas.

Figura 5.5- Linhas de fluxo das fases gás (a) e óleo (b) na seção de mistura (Caso 1)



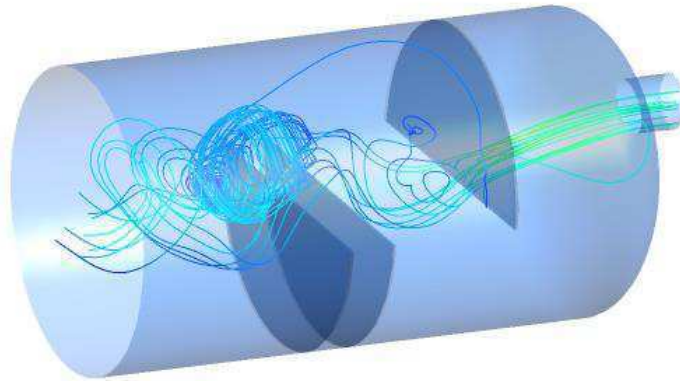
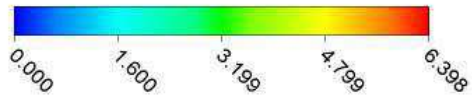
a)



b)

Figura 5.6- Linhas de fluxo das fases gás (a) e óleo (b) na seção de mistura (Caso 2).

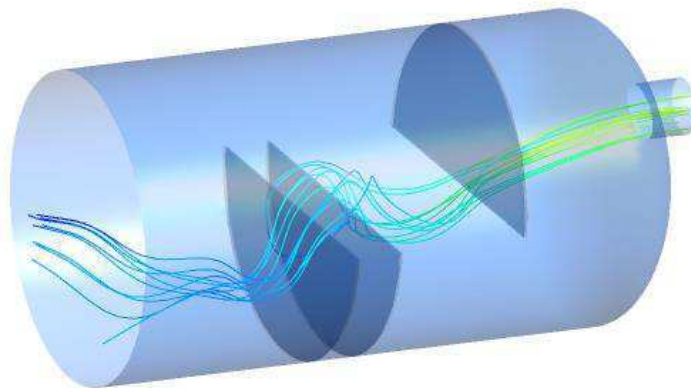
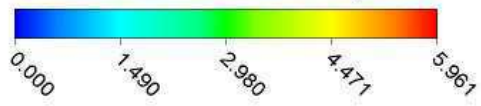
Velocidade superficial do gás (m/s)



a)



Velocidade superficial do óleo (m/s)

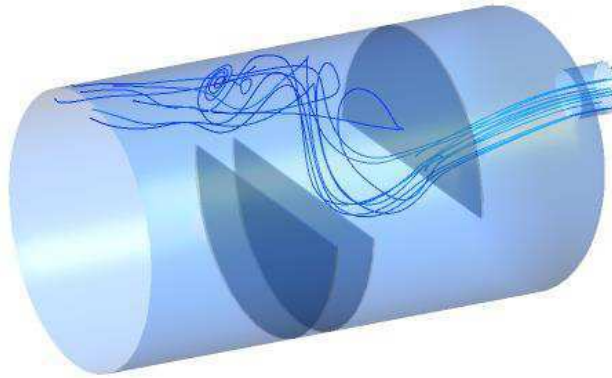
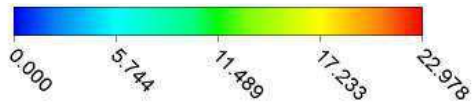


b)



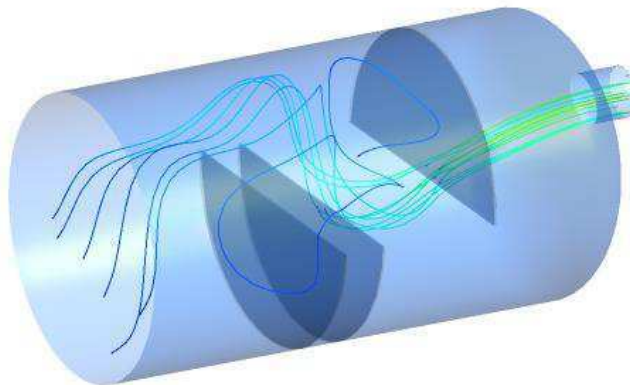
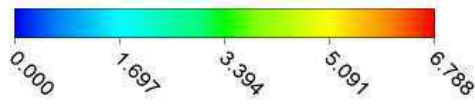
Figura 5.7- Linhas de fluxo das fases gás (a) e óleo (b) na seção de mistura (Caso 3).

Velocidade superficial do gás (m/s)



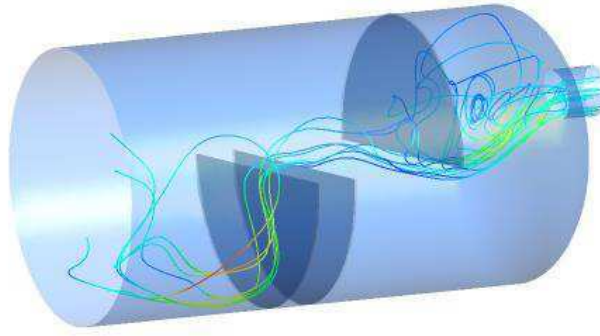
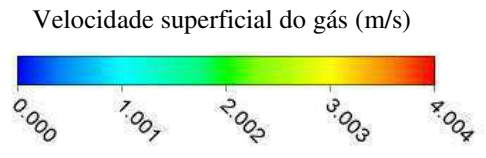
a)

Velocidade superficial do óleo (m/s)

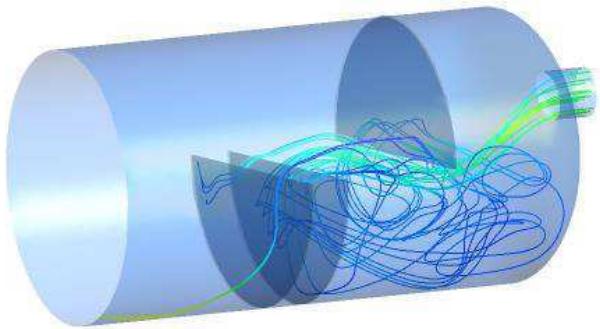
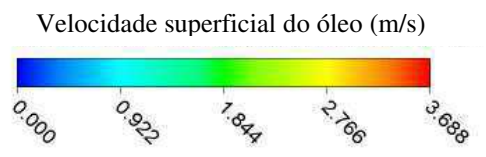


b)

Figura 5.8-Linhas de fluxo das fases gás (a) e óleo (b) na seção de mistura (Caso 4).

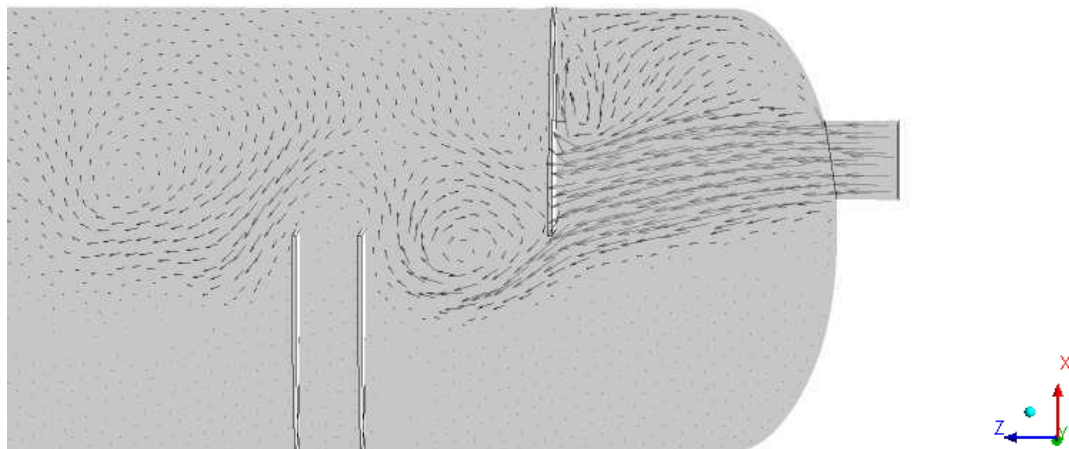


a)



b)

Figura 5.9- Representação do campo vetorial de velocidade superficial do gás na seção de mistura.



No que diz respeito as chicanas, situadas após o defletor, na parte inferior do vaso separador, contribuem para atenuar a velocidade dos fluidos e assim, dissipar os níveis de turbulência por perda de quantidade de movimento para então seguir para a região de decantação. Este comportamento pode ser observado na Figura 5.10, onde é representado o campo vetorial do gás e do óleo.

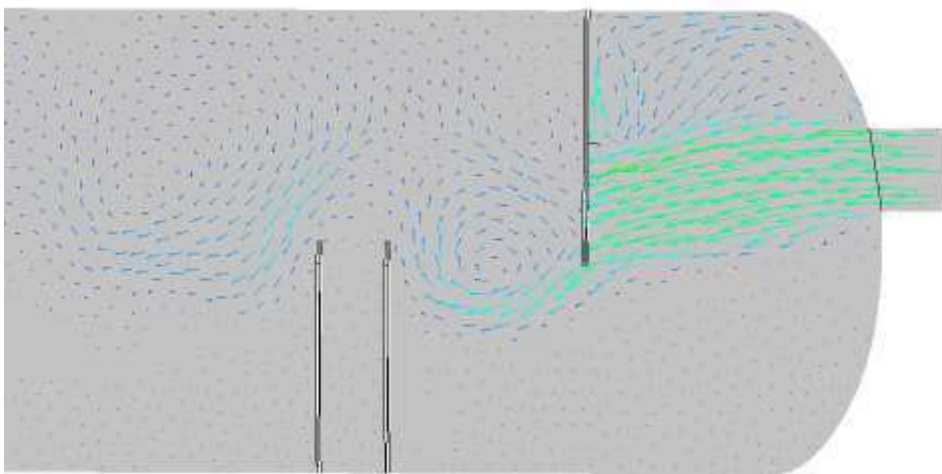
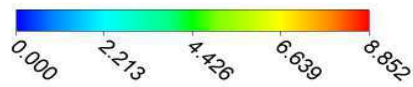
Os benefícios do uso da placa porosa foram avaliados a partir da variação da permeabilidade do meio poroso e da comparação com casos sem a placa porosa. A utilização da placa porosa atuando como uma zona de transição entre as regiões de mistura e separação contribui para atenuar os níveis de turbulência dos fluidos, minimizando ondulações na seção de decantação. A presença de ondulações na região de separação, principalmente, pode dificultar a separação dos fluidos por diferença de densidade. Podem, ainda provocar o carreamento de gotículas de líquido pelo gás ou de bolhas de gás pelo líquido.

Nas Figuras 5.11 a 5.14 estão representados o comportamento das linhas de fluxo no interior do vaso separador nas três regiões (mistura, meio poroso e decantação). É possível observar, de uma maneira geral, a influência da presença do meio poroso (placa porosa) sobre o comportamento das fases gás e óleo (Figuras 5.11 e 5.13). Sendo que é a fase oleosa que mais sofre seu efeito, por conta da sua alta resistência viscosa se comparada a do gás.

No caso 1, os fluidos ultrapassam especificamente a região central do meio poroso (Figura 5.11), tanto o gás como o óleo apresentam um escoamento estável e sem indícios de zonas de recirculação. As linhas de fluxo indicam que o óleo tende a escoar pela parte inferior do vaso separador e segue para saída inferior de óleo.

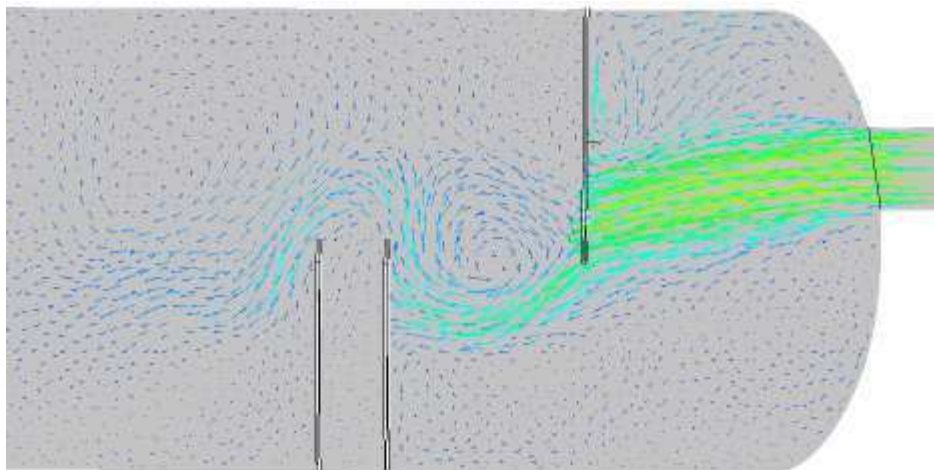
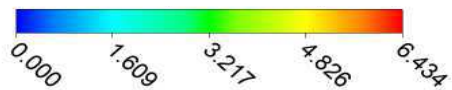
Figura 5.10- Campo vetorial de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) na seção de mistura.

Vetores de velocidade superficial do gás (m/s)



a)

Vetores de velocidade superficial do óleo (m/s)



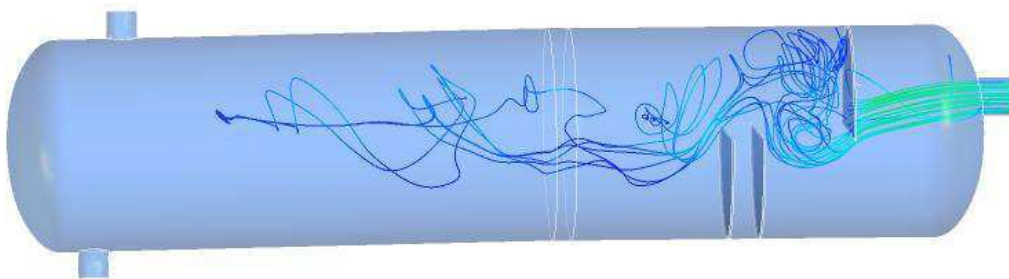
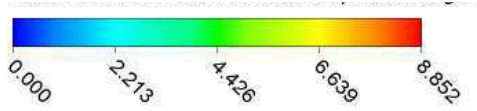
b)

A Figura 5.13 (caso 3) ilustra a influência da permeabilidade da placa porosa sobre o comportamento das linhas de fluxo do gás e do óleo. O gás escoou junto a parte superior do meio poroso, devido ao preenchimento quase total do meio poroso pelo óleo retido na região de mistura. Este fato junto à resistência oferecida ao escoamento, em virtude da baixa

permeabilidade do meio poroso, proporciona um aumento da velocidade superficial do gás que sai do meio poroso realizando movimentos circulares espiralados.

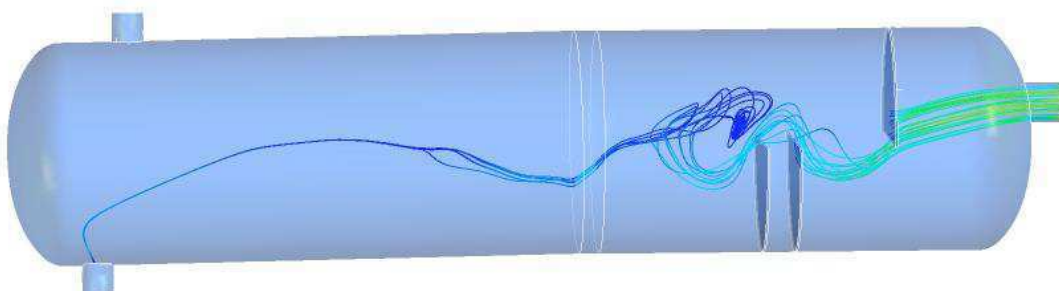
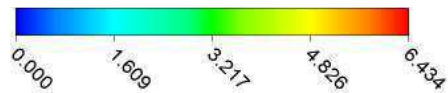
Figura 5.11- Ilustração das linhas de fluxo para o gás (a) e o óleo (b) no vaso separador (Caso 1).

Velocidade superficial do gás (m/s)



a)

Velocidade superficial do óleo (m/s)



b)



Nos casos 2 e 4, onde não é usado a placa porosa, as linhas de fluxo do gás e do óleo, ilustradas nas Figuras 5.12 e 5.14 indicam uma movimentação irregular dos fluidos na região de separação. Percebe-se, ainda, que os movimentos irregulares das linhas de fluxo caracterizam zonas de recirculação, estas que prolongam-se desde a região de mistura até a região de separação.

A distribuição da velocidade dos fluidos é um parâmetro essencial a ser analisado na região de separação, onde requer uma zona de baixa velocidade, e conseqüentemente um tempo de residência suficiente visando a separação por decantação das fases envolvidas (gás e óleo). Na seção de separação gravitacional ou separação secundária, o processo de separação é exclusivamente obtido pela ação da gravidade, isto é, as fases são separadas sem a ação de qualquer outra força externa. Por este motivo, a baixa velocidade é almejada, objetivando a separação das fases por diferença de densidade.

Como foi dito, para se atingir uma separação eficiente usando um separador bifásico é necessário que o escoamento dos fluidos, principalmente na região de separação, possua baixa velocidade. Portanto, são propostas diferentes configurações de dispositivos internos, desde a entrada dos fluidos no vaso, que possam permitir a atenuação dessa velocidade.

Nas Figuras 5.15a e 5.16a são apresentados os contornos de campos de velocidades superficiais do gás sobre o plano longitudinal zx , passando pelo centro do separador bifásico. É observado que, na entrada do separador, há uma velocidade superficial do gás relativamente maior, devido a diferença das seções transversais entre o duto de entrada e o cilindro do separador.

Em seguida, devido as perdas de carga por atrito ocasionado pelo defletor, chicanas e placa porosa nota-se uma diminuição da velocidade superficial do gás. O gás segue em baixa velocidade até a saída de gás, local onde há um aumento da velocidade devido à redução da seção de área do duto de saída.

Os campos de velocidade superficial do gás (Figura 5.17a) indicam um aumento da velocidade na parte superior do vaso separador, em virtude da retenção de óleo na região de mistura, como pode ser observado na Figura 5.3, onde é representado o campo de fração volumétrica de óleo sobre o plano longitudinal, para o caso 3. Na Figura 5.18a nota-se um aumento da velocidade superficial do gás após a segunda chicana, este fato ocorre devido ao escoamento do óleo, a queda do óleo imediatamente após a segunda chicana promove uma

movimentação do gás nesta região, a fase óleo arrasta o gás, aumentando sua velocidade superficial e gerando assim uma zona de recirculação.

Ao observar-se o campo de velocidade superficial do óleo para os casos 1, 2, 3 e 4 (Figuras 5.15b, 5.16b, 5.17b e 5.18b), constata-se que, ao entrar no separador bifásico, devido às perdas de carga causadas pelas partes internas (defletor, chicanas e placa porosa), a velocidade superficial do óleo diminui. Posteriormente, observa-se o aumento da velocidade superficial do óleo na saída de óleo, devido a diferença de seção transversal entre o duto de saída de óleo e o cilindro do separador.

5.2.3 Considerações sobre os casos permanentes

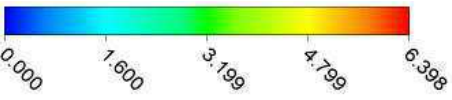
Os resultados gerados a partir de simulações em regime permanente permitiram realizar uma avaliação inicial a respeito da modelagem matemática desenvolvida para a descrição física do problema em estudo. Neste sentido, os dados revelam que o modelo desenvolvido descreve fisicamente o escoamento dos fluidos e o processo de separação dentro de um vaso separador horizontal bifásico. Por outro lado, sabe-se que, segundo o princípio da conservação da massa para regime permanente, o equilíbrio deve ser atingido, na medida em que o balanço de massa é fechado. No entanto, em alguns casos isso não ocorre, os dados informam a presença de acúmulo no vaso separador, destacando assim, o caráter transiente do equipamento.

O movimento ondulatório dos fluidos durante o escoamento associado à falta de controladores de nível provoca acúmulo no interior do separador, não permitindo que a massa de gás e óleo que entra corresponda a massa que sai pelas respectivas saídas. Em casos reais, os controladores de nível são associados aos vasos separadores, por compreender tais problemáticas. Diante do exposto, se faz necessário avaliar a distribuição das fases seja sob influência ou não do meio poroso, demais internos (defletor e chicanas) e variáveis operacionais, levando em consideração a variação com o tempo. Pois, assim sendo, será possível fazer uma melhor avaliação das flutuações/ondulações desenvolvidas ao longo do escoamento, e em que condições estas podem ser suavizadas.

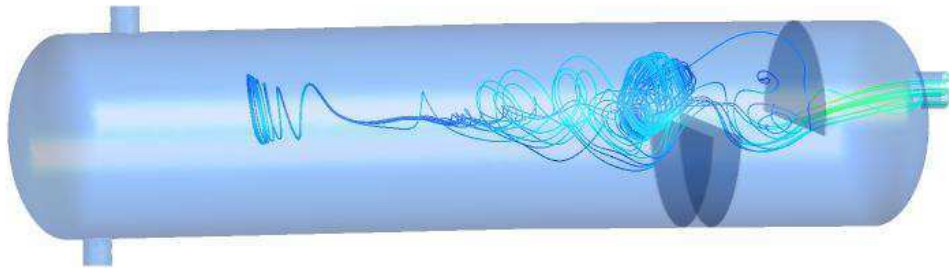
Neste sentido, as simulações em regime permanente passaram a ser usadas como condição inicial de partida para a realização das simulações em regime transiente.

Figura 5.12- Ilustração das linhas de fluxo para o gás (a) e o óleo (b) no vaso separador. (Caso 2).

Velocidade superficial do gás (m/s)



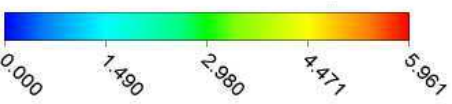
0.000 1.600 3.199 4.799 6.398



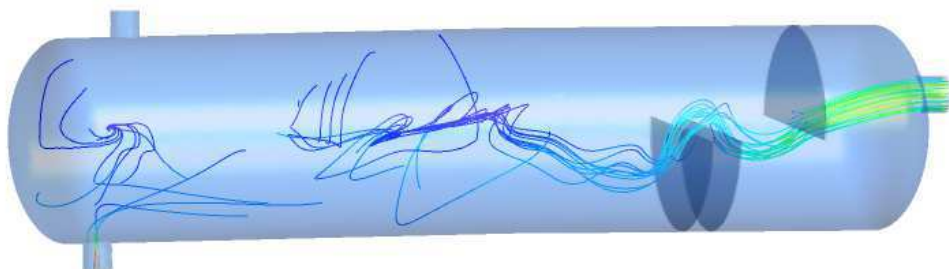
a)



Velocidade superficial do óleo (m/s)



0.000 1.490 2.980 4.471 5.961

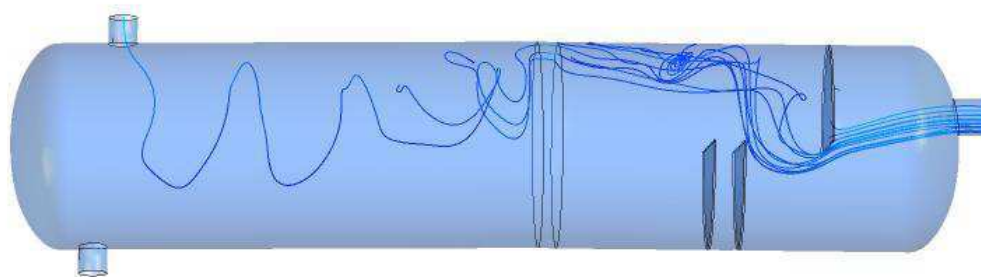
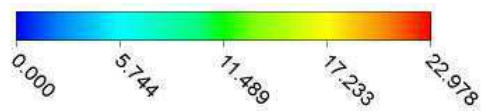


b)

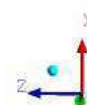


Figura 5.13- Ilustração das linhas de fluxo para o gás (a) e o óleo (b) no vaso separador (Caso 3).

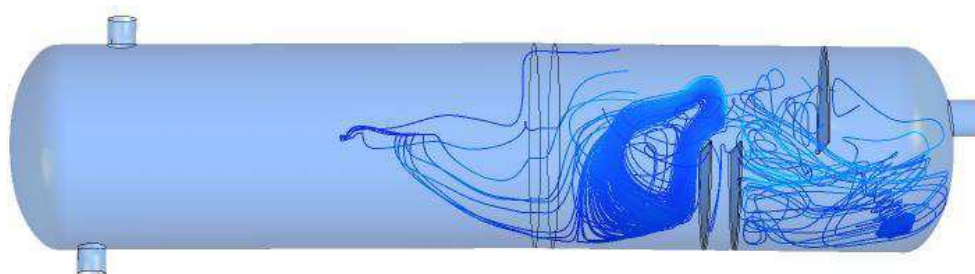
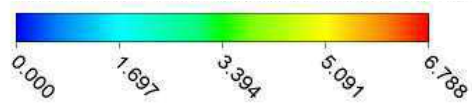
Velocidade superficial do gás (m/s)



a)



Velocidade superficial do óleo (m/s)



b)

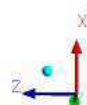


Figura 5.14- Ilustração das linhas de fluxo para o gás (a) e o óleo (b) no vaso separador (Caso 4).

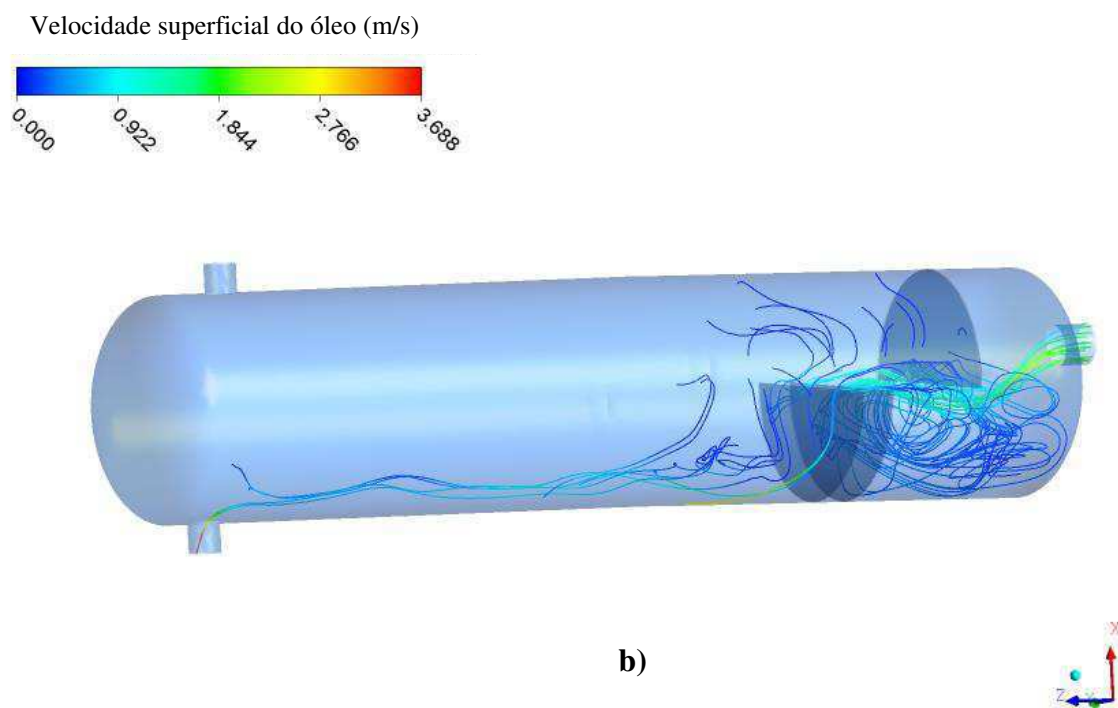
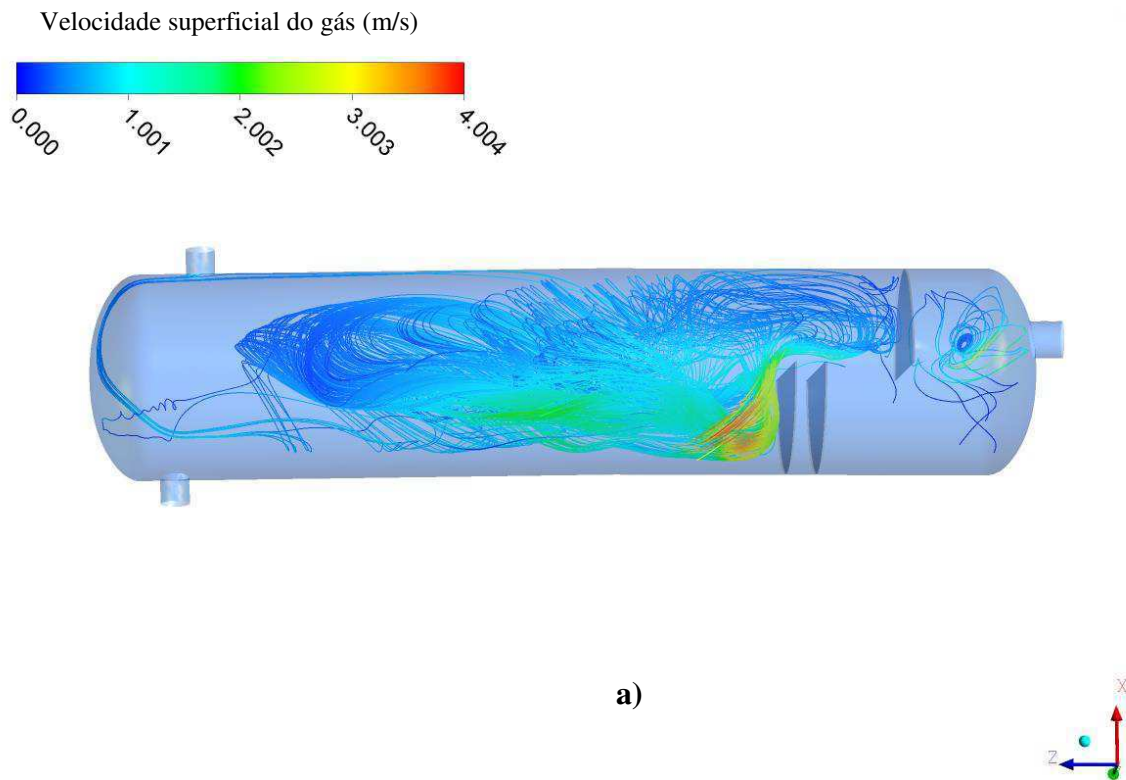
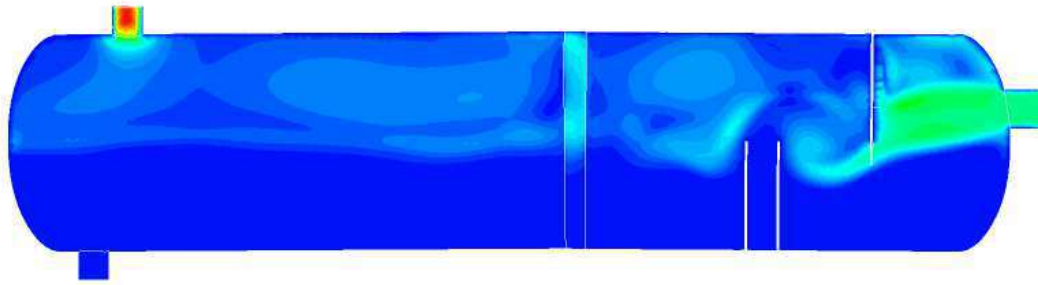
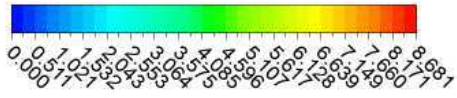


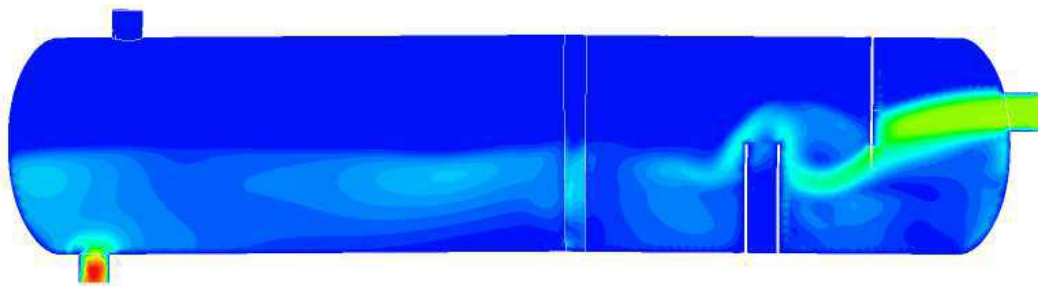
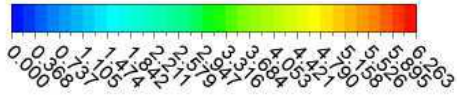
Figura 5.15- Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 1).

Velocidade superficial do gás (m/s)



a)

Velocidade superficial do óleo (m/s)



b)

Figura 5.16- Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 2).

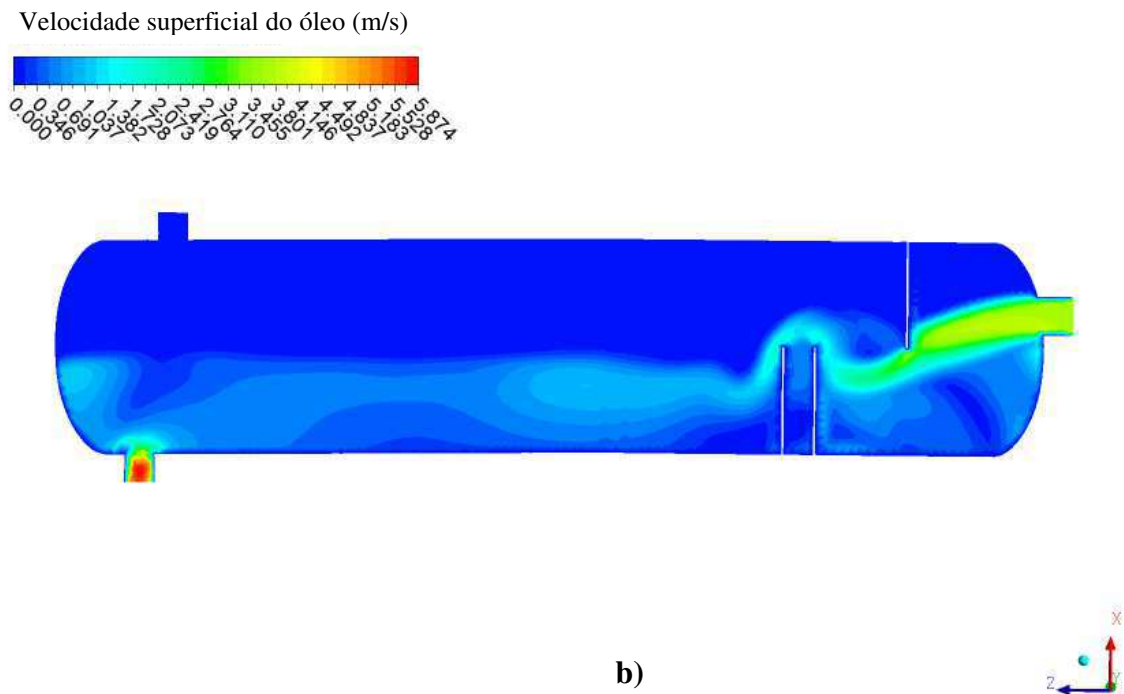
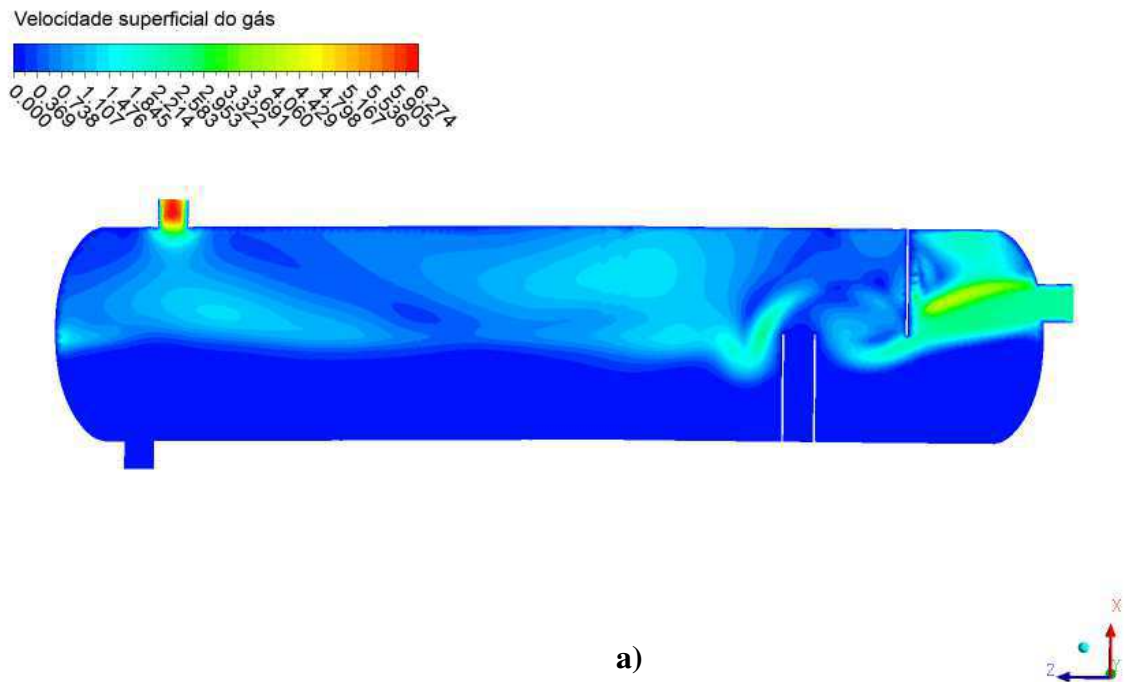
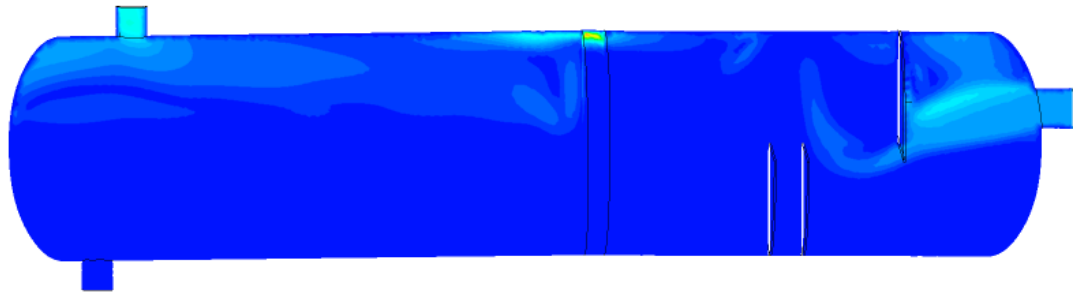
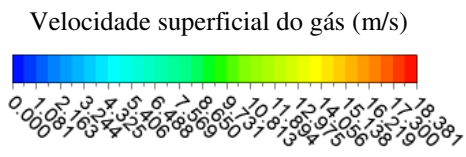


Figura 5.17- Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 3).



a)

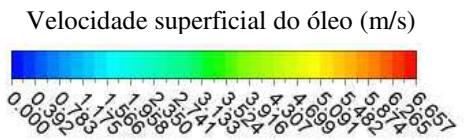
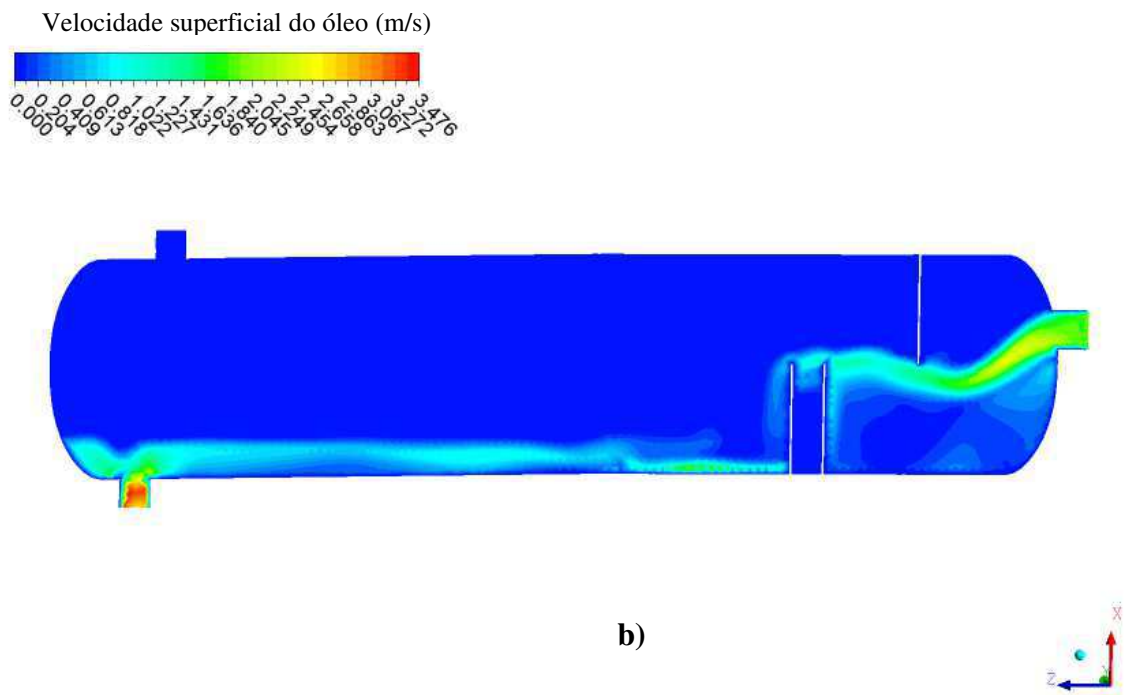
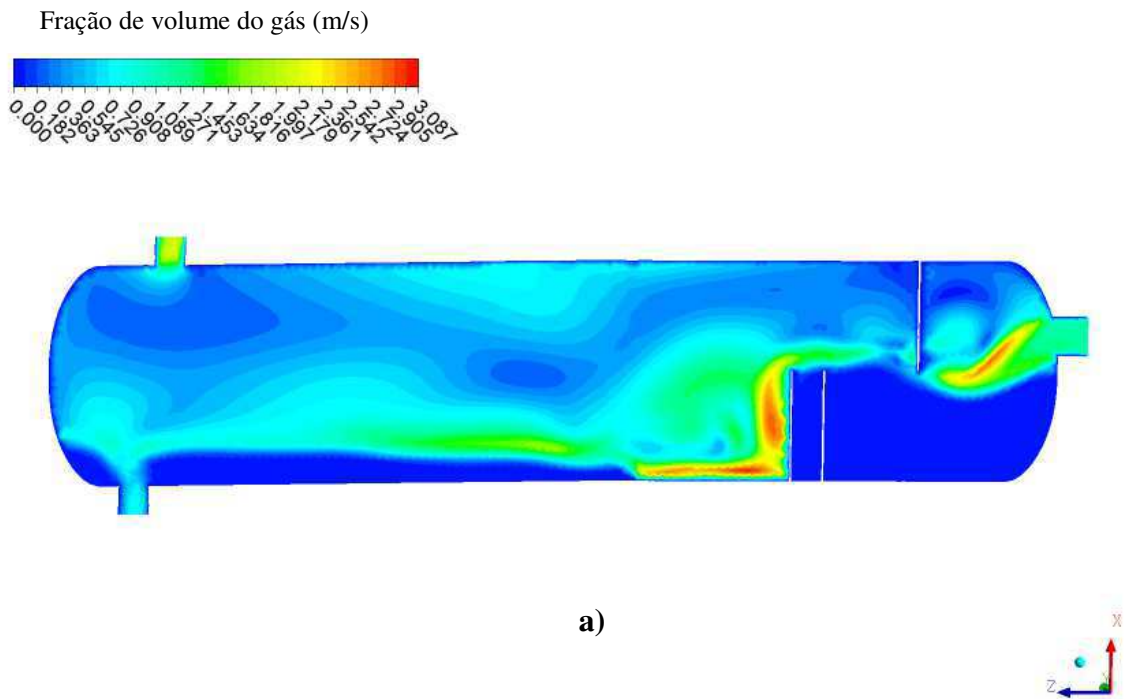


Figura 5.18- Campo de velocidade superficial do gás (a) e do óleo (b) no vaso separador (Caso 4).



5.3 ESCOAMENTO EM REGIME TRANSIENTE

Nesta seção se discute a dinâmica do escoamento dos fluidos no interior do vaso separador considerando o regime transiente. Diferentes valores de permeabilidade foram usados no intuito de obter uma melhor configuração para o meio poroso. Serão assim analisados os campos de fração de volume das fases, em um intervalo de tempo de 0 a 26 segundos.

A discussão dos resultados das simulações levará em consideração dois critérios: a presença e a ausência do meio poroso. Foi avaliado a influência da permeabilidade sobre a eficiência de separação nos casos 5, 6 e 7. Nos casos 8 e 9 avaliou-se a fluidodinâmica no interior do vaso separador na ausência do meio poroso.

5.3.1 Separador bifásico com placa porosa

Na Figura 5.19 está representado a evolução do campo de fração volumétrica sobre o plano longitudinal em função do tempo, para o tempo total de 26 segundos, referente ao Caso 5, onde o meio poroso foi considerado com uma permeabilidade de $2,26 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. Em $t=3 \text{ s}$ observa-se que o nível de líquido na região de mistura começa a subir. À medida que o nível de líquido sobe na região de mistura, o nível de líquido na região de separação diminui. Este fato pode ser bem observado nos seguintes tempos: $t=11 \text{ s}$, $t=14 \text{ s}$, $t=20 \text{ s}$ e $t=23 \text{ s}$. No último passo de tempo, $t=26 \text{ s}$ é notório que o nível de líquido na região de mistura está acima de 90%, restando uma menor área de secção para a distribuição do gás. Em contrapartida, na região de separação o nível de óleo está relativamente baixo, logo o gás se distribui em toda a área livre do cilindro. A diminuição do nível de líquido devido ao acúmulo na região de mistura passa a ser um problema. De acordo com Lake (2006) e Stewart (2008), o vaso separador necessita manter um nível de óleo, e normalmente é utilizado controladores de nível, que neste estudo não foram avaliados.

Na Figura 5.20 está representado a evolução do campo de fração volumétrica sobre o plano longitudinal em função do tempo referente ao caso 6, com uma permeabilidade do meio poroso de $2,26 \times 10^{-7}$. Nota-se que há uma leve ondulação na interface da região de separação, no entanto entre os tempos de $t=2 \text{ s}$ e $t=6 \text{ s}$ este comportamento tende a suavizar, até que em $t=7 \text{ s}$ a interface da região de separação apresenta-se horizontalmente bem definida, desde a saída das fases do meio poroso. Em um intervalo compreendido entre $t=7 \text{ s}$ e $t=6 \text{ s}$ não houve variações, ou seja, a interface não apresenta ondulações e o nível de líquido estabelecido no modelo é mantido. Os fluidos não formam ondas durante a passagem pelo meio poroso, devido

a resistência que este interno oferece ao escoamento, reduzindo assim a velocidade, o que é ideal.

A ausência de ondas, regiões de recirculação e vorticidade, indicam que a turbulência existente na região de mistura foi vencida pela atuação do meio poroso, logo a região de separação apresenta uma interface laminar, que favorecerá a separação gravitacional. Os fluidos necessitam de um tempo de retenção em uma região de baixa velocidade e preferivelmente sem turbulência, o que é adequado para que a separação por decantação seja satisfatória.

Em relação ao caso 7 (Figura 5.21), onde a permeabilidade é de 2.26 m^2 , nota-se que as ondas presentes na região de mistura se preservam no meio poroso. Este fato justifica-se pela alta permeabilidade do meio poroso, logo a resistência oferecida ao escoamento é baixa e assim, o fluido se distribui nesta região de forma similar a seu comportamento na região de mistura.

5.3.2 Separador bifásico sem placa porosa

Os resultados representados na Figura 5.22 ilustram o comportamento dos fluidos no separador na ausência do meio poroso. Em $t=1,0 \text{ s}$ é observado uma zona de recirculação, onde a onda de líquido se choca com a parede superior do vaso, espalhando-se de forma simétrica, gerando duas novas regiões de recirculação. Esse comportamento segue repetindo-se ao ponto destas ondas se propagarem até grande parte da região de separação, provocando uma grande mistura em todo o vaso, como é visto principalmente no intervalo de tempo entre $t=2 \text{ s}$ e $t=7 \text{ s}$. No $t=8 \text{ s}$ a zona turbulenta se mantém principalmente na região de mistura e na primeira metade da região de separação, na segunda metade desta região essa mistura não é vista de forma intensa, é possível notar uma atenuação nas ondas na interface gás/óleo. Este fato justifica-se pela perda de quantidade de movimento dos fluidos, devido ao comprimento de 14 metros do vaso separador. Mesmo assim, este fato não é suficiente para evitar a mistura, que é ocasionada pelas intensas zonas de recirculação formadas ao longo do escoamento com o passar do tempo. Logo, na ausência do meio poroso a eficiência de separação pode ser reduzida.

Na Figura 5.23 estão representados os campos de fração de volume de óleo e indicam que o acúmulo de óleo entre a primeira chicana e a parede do vaso separador se mantém ao longo do tempo. Neste sentido, o nível de óleo na região de separação se mantém baixo ao longo do tempo. Em contrapartida o gás se distribui em toda a seção livre do vaso. Deste caso pode-se concluir que reduzir a vazão de entrada com o intuito de diminuir a turbulência e melhorar a eficiência de separação, evitando a inserção da placa porosa, não é uma opção viável para esse separador.

Figura 5.19- Distribuição da fração de volume do óleo no decorrer do tempo (Caso5).

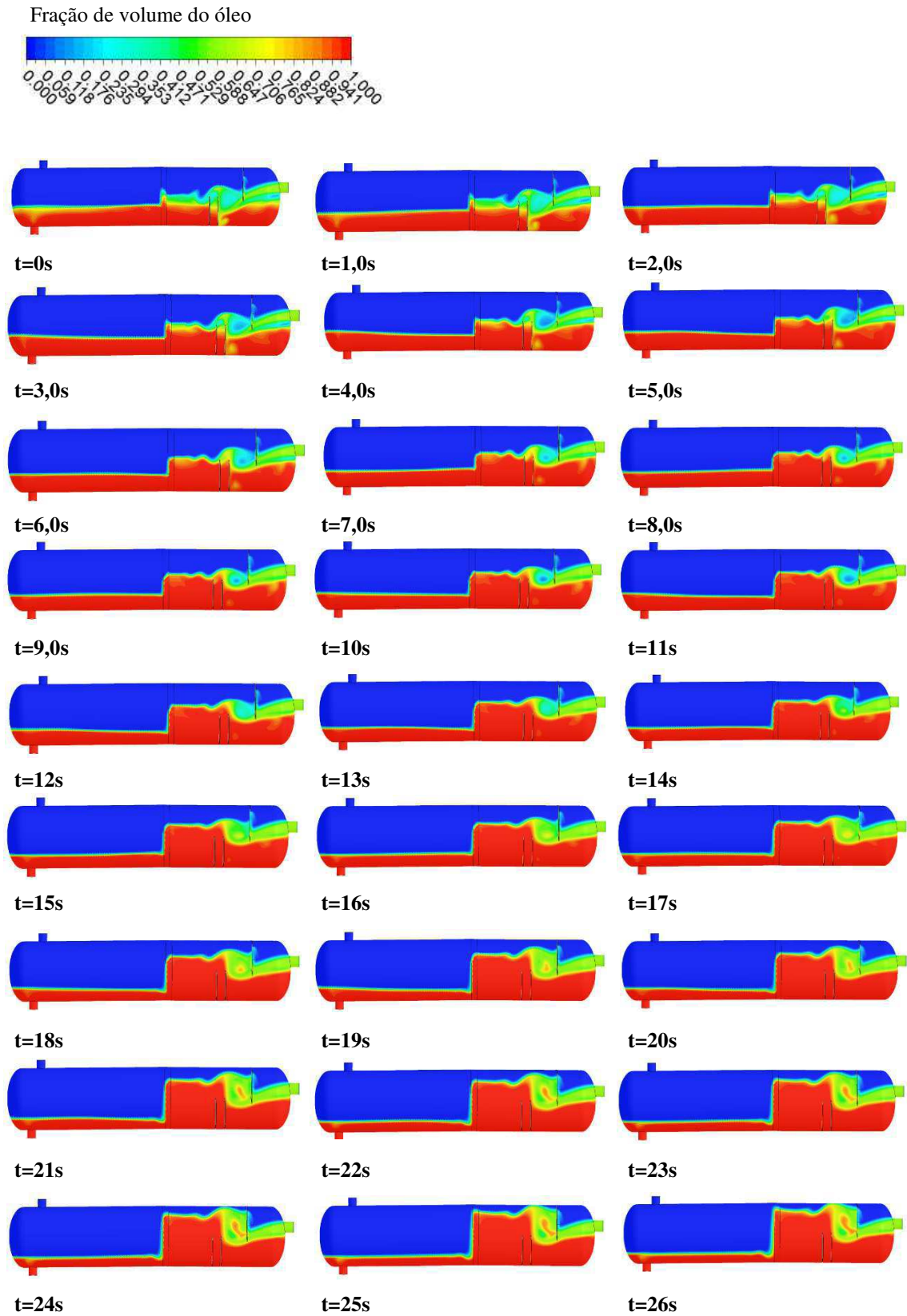


Figura 5.20 - Distribuição da fração de volume do óleo no decorrer do tempo (Caso 6).

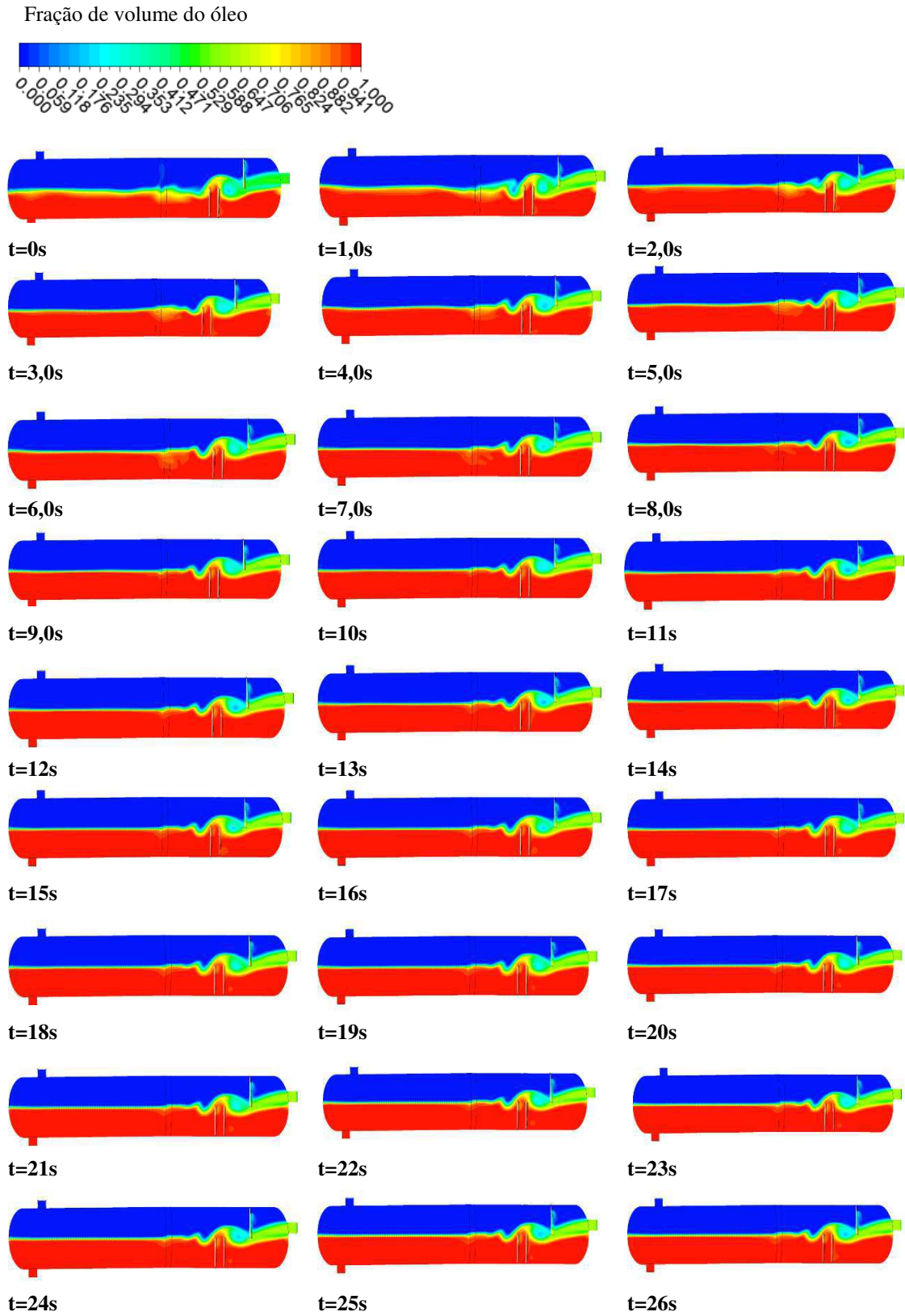


Figura 5.21- Distribuição da fração de volume do óleo no decorrer do tempo (Caso 7).

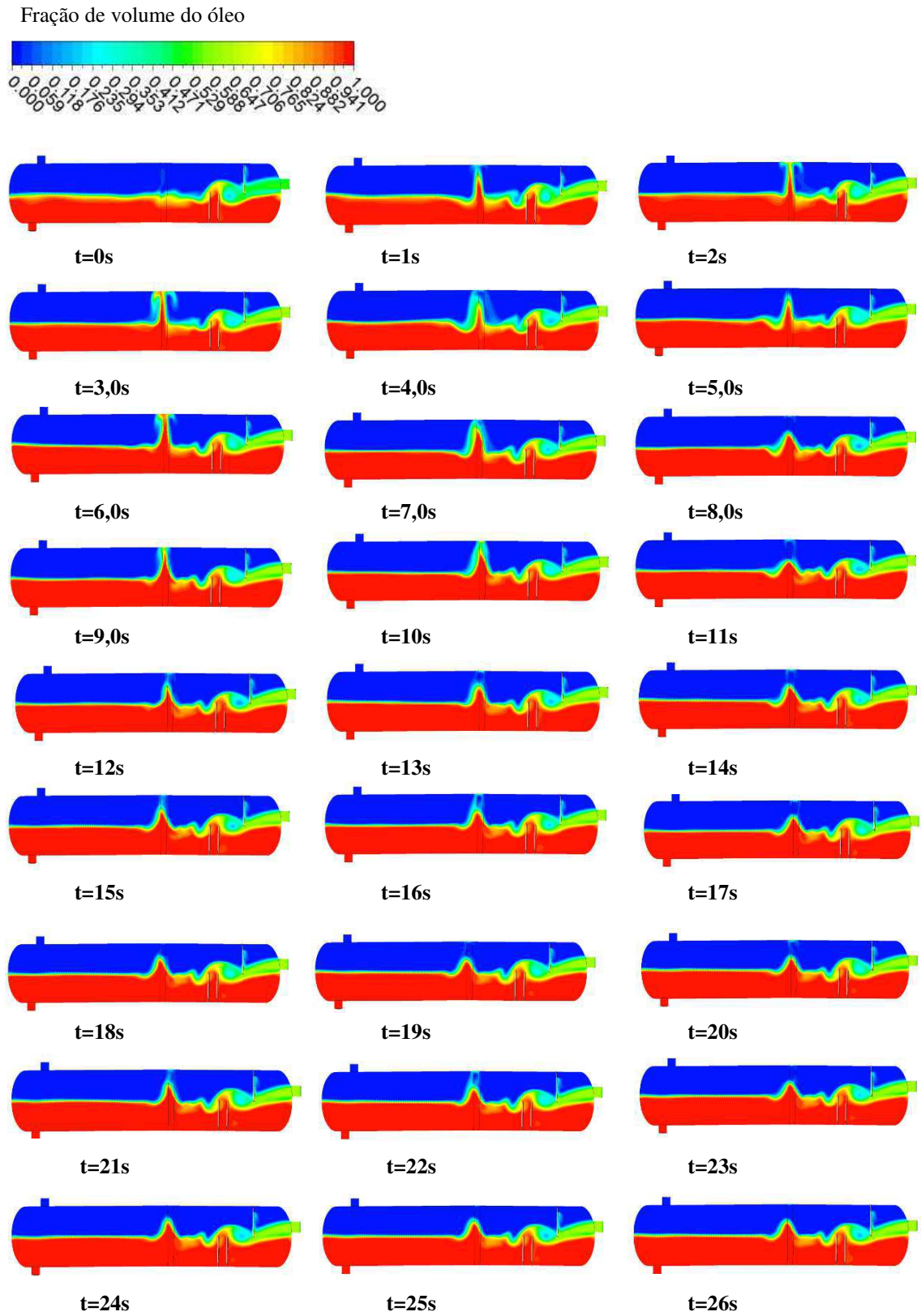


Figura 5.22- Distribuição da fração de volume do óleo no decorrer do tempo (Caso8).

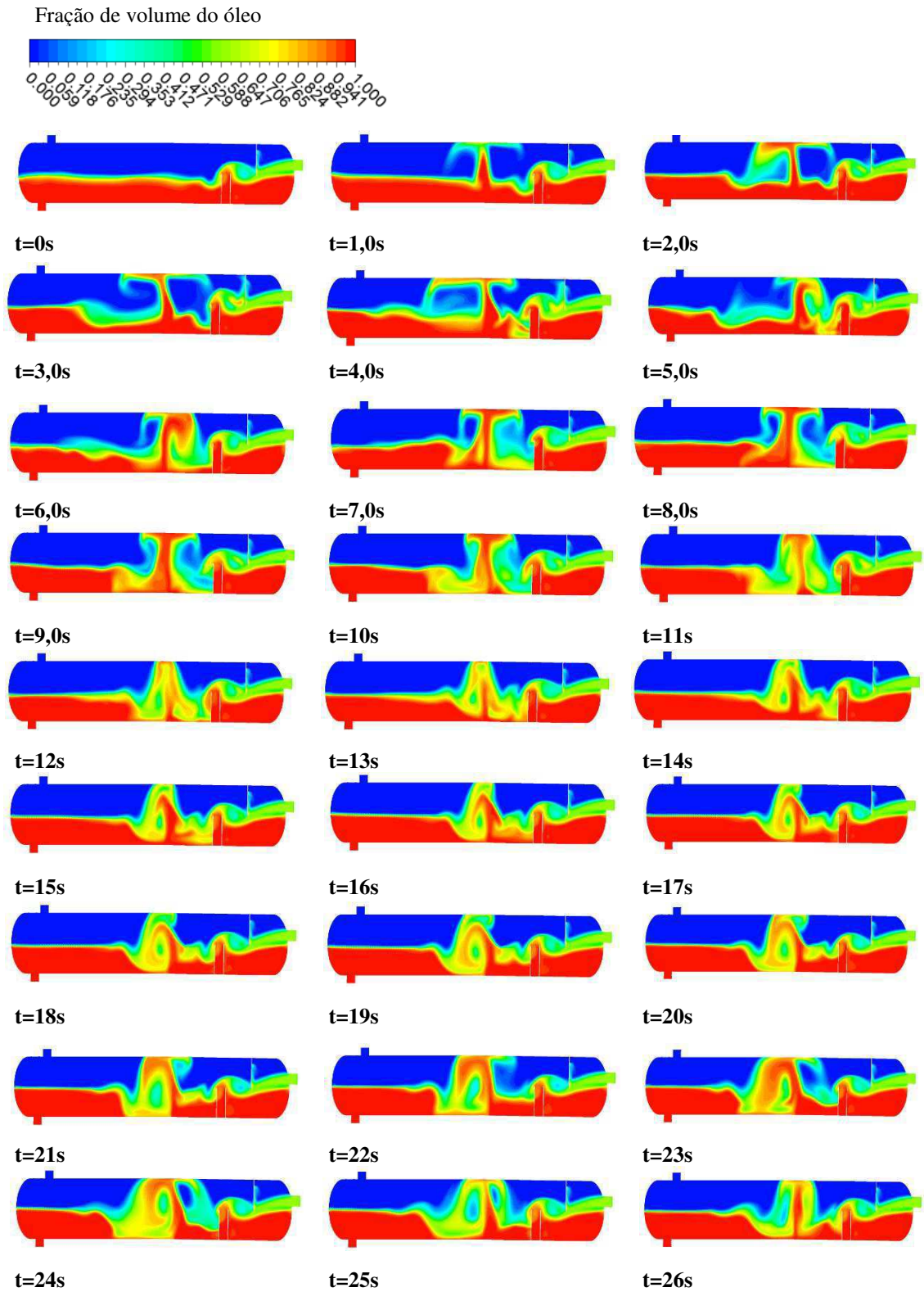
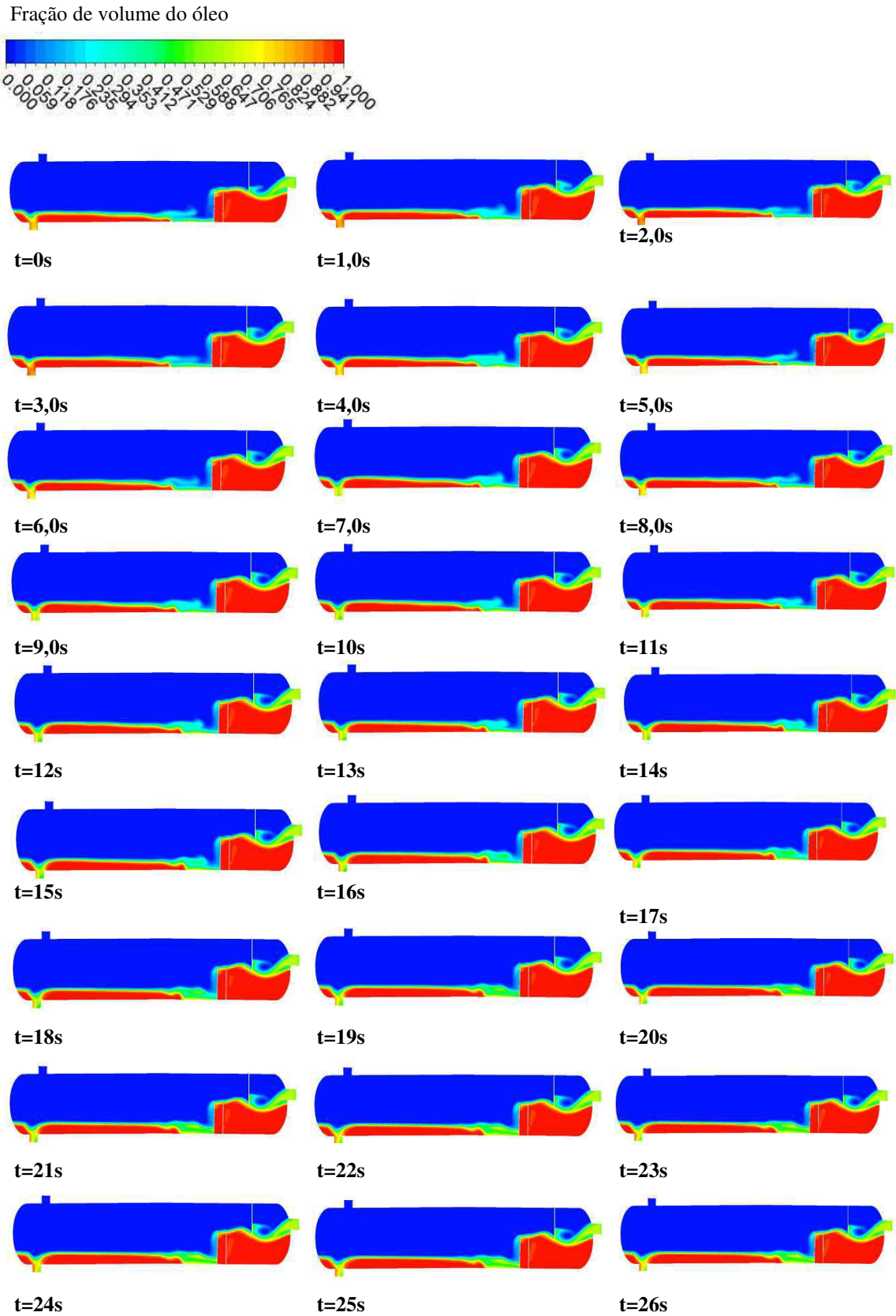


Figura 5.23 - Distribuição da fração de volume do óleo no decorrer do tempo (Caso 9).



CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na discussão dos resultados é possível concluir que:

- ✓ A modelagem matemática proposta foi capaz de descrever o escoamento dos fluidos e o processo de separação do vaso separador horizontal bifásico;
- ✓ Constatou-se que a presença das partes internas possui uma grande influência na dinâmica dos fluidos dentro do separador;
- ✓ O defletor e as chicanas, contribuem para a atenuação da velocidade dos fluidos;
- ✓ A presença da placa porosa influencia positivamente na dinâmica do escoamento bifásico no vaso separador, no entanto é dependente da permeabilidade. Baixos valores de permeabilidade para o meio poroso provocam acúmulo na região de mistura e, conseqüentemente, contribuem para a queda do nível de líquido na região de separação, em contrapartida altos valores de permeabilidade diminuem a resistência do meio poroso ao escoamento, provocando assim zonas de turbulência;
- ✓ A ausência do meio poroso gera um escoamento com altos níveis de turbulência proporcionam a formação de ondulações na interface;
- ✓ Os resultados das simulações destacaram a forte influência das partes internas na dinâmica dos fluidos dentro do separador e, conseqüentemente, sobre a eficiência da separação.

6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Avaliar a influência de diferentes configurações geométricas dos dispositivos internos do vaso separador sobre a dinâmica do escoamento bifásico;
- ✓ Avaliar a influência da porosidade do meio poroso sobre o processo de separação gás/óleo e sobre a fluidodinâmica do escoamento interno no vaso separador bifásico;
- ✓ Avaliar a influência da pressão de operação sobre o processo de separação e a dinâmica do escoamento dos fluidos no vaso separador bifásico;
- ✓ Avaliar a influência da viscosidade e vazão de alimentação sobre a dinâmica do escoamento bifásico no vaso separador;
- ✓ Avaliar o efeito dos padrões de escoamento de alimentação sobre a dinâmica do escoamento bifásico no interior do vaso separador;
- ✓ Avaliar a influência de controladores de nível sobre o processo de separação no vaso separador bifásico;
- ✓ Determinar a eficiência de separação no separador horizontal bifásico;
- ✓ Estudar a dinâmica do escoamento dos fluidos de um vaso de separação trifásico (gás/óleo/água) via modelagem e simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULKADIR, M.; PEREZ, V. H. The Effect of Mixture Velocity and Droplet Diameter on Oil-water Separator using Computational Fluid Dynamics (CFD). **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering**, v. 4, p. 4-9, 2010.
- AKPAN, D. G. **Performance of internal in three- phase tank separators**. 2013.144 f. Dissertação (Mestrado)- Curso de Ciência, Faculty of Engineering science and technology Department of petroleum Engineering and Applied geophysics, Norwegian University of Science and technology, Trondheim, Norway, 2013.
- ALVES, H. G; MAGALHÃES, H. L. F; SANTOS, W. R. G; ARAÚJO, M. V; LIMA, A. G. B; FARIAS NETO, S. R. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE MISTURA NÃO ISOTÉRMICA EM JUNÇÃO “T”. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016, Fortaleza. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Fortaleza: Abeq, 2016. v. 1, p. 1 - 8. Disponível em: <file:///C:/Users/Barbosa/Downloads/galao-proceedings--cobeq-2016-41153-modelagem-e-simu.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2016.
- ALLEN, J. E. **Aerodynamics, the science of air in motion**. 2. ed. New york: Granada Publishing, 1982.
- ANDRADE, T. H. F. **Transporte de óleos pesados ultraviscosos via core-flow: aspectos geométricos e termodinâmicos**. 2013. 158 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.
- ANSYS CFX release. **Theory guide**, 2015.
- ARAÚJO, M. V; LUNA, F. D. T; FARIAS NETO, S. R; LIMA, A. G. B. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DETECÇÃO DE VAZAMENTO EM OLEODUTO CONTENDO CONEXÃO TÊ. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis: Abeq, 2014. p. 1 - 8. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3saeast1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cobeq2014/2035-16250-176441.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2016.
- ARIZA, J.P.G. **Diseño de una herramienta computacional para el dimensionamiento de un separador bifásico con internos tipo vanes**. 2008. 129 p. Monografia (Especialização)- Curso de Ingeniería de Gas Natural, Decanato de Estudios de Postgrado, Universidad Simón Bolívar, Caracas. 2008.
- BARBOSA, E. S. **Aspectos Geométricos e Hidrodinâmica de um Hidrociclone no Processo de Separação de Sistemas Multifásicos: Aplicação na Indústria de Petróleo**. 2011. 192

- f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2011.
- BOTHAMLEY, M.; CAMPBELL, J. M. Gas/Liquid Separators. Quantifying separation- Parte 1. **Oil Gas Facilities**, v. 2, 2013.
- BRASIL, M. N. I. D.; ARAÚJO, A. S.; SOUSA, E. C. M. D. **Processamento de Petróleo e gás**. LTC, 2012.
- COVA, I. E. M.; RAMOS, K. Y. M., **Descripción de las ecuaciones matemáticas utilizadas en el diseño de separadores bifásicos de tipo horizontal y vertical en Pariaguán, división junín, Campo San Cristóbal, Macolla II**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Ingeniería de Petróleo, Universidad de Oriente Escuela de Ingeniería de Petróleo, Maturín. 2013.
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M.; **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 1.ed. São Paulo: McGraw - Hill, 2007.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**, Brasília, 2015.
- FERZIGER, J.H; PERIC, M. **Computational methods for fluid dynamics**. 3. ed. New York: Springer, 2002.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para a dinâmica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.
- FRANKIEWICZ, T.; LEE, C; NATCO. Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation to Model Fluid Motion in Process Vessels on Fixed and Floating Platforms. In: IBC 9TH ANNUAL PRODUCTION SEPARATION SYSTEMS CONFERENCE, 9., 2002, Londres. Londres: Ibc, 2002. p. 1 - 10. Disponível em: <<http://amwel.com/downloads/IBC-CFD-Paper.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2016.
- FREITAS, S. E. T. **Dinâmica do líquido de um vaso de separação gás/óleo: modelagem e simulação**. 46 f- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2015.
- GRANJA, B. H. **Estudio y diseño de separadores horizontales y verticales de dos y tres fases**. 1987. 159 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Ingeniería Geológica, Minas y Petroleos, Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Petroleos, Guayaquil-Ecuador, 1987.
- GUO, B; LYONS, W. C; GHALAMBOR, A. **Petroleum production Engineering: a computer- assistant approach**. 1. ed. Elsevier Science & Technology Books, 2007.

- HUUSARI, L. **Analysis of phase separator design criteria using computational fluid dynamics**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Lappeenranta University of Technology, Lut School of Engineering Science, 2015.
- ARAGÃO JÚNIOR, M. A. **Estudo fluidodinâmico e influência de dispositivos internos instalados em separadores atmosféricos gravitacionais de petróleo- Tanques de água livre**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. 2011.
- KESSLER, M **Escoamento turbulento**. Disponível em: <www.esss.com.br/blog/2016/10/escoamento-turbulento/>. Acesso em: 03 nov. 2016.
- KHAROUA, N; KHEZZAR, L; SAADAWI, H. CFD Modelling of a Horizontal Three-Phase Separator: A Population Balance Approach. **American Journal Of Fluid Dynamics**, [s.l.], v. 1, n. 2168-4707, p.101-118, 2013.
- LIANG, Y.; ZHAO, S.; JIANG, X.; JIA, X.; LI, W. Numerical Simulation on Flow Field of Oilfield Three-Phase Separator. **Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics**, p. 1-6, 2013.
- LAKE, L. W. **Petroleum Engineering Handbook-Facilities and construction Engineering**. vol. 3. Society of Petroleum Engineers, 2006.
- MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.
- MASSAH, H.; OSHINOWO, L. Advanced Gas-Solid Multiphase Flow Models Offer Significant Process Improvements. **journal articles by fluent software users**, p. 1-6, 2000.
- MOKHATAB, S.; SPEIGHT, J. G.; POE, W. A. **Handbook of Natural Gas Transmission and Processing**. 2 ed. Elsevier, 2006.
- OLIVEIRA, J. L. **Hidrodinâmica do escoamento bifásico de óleo e água em dutos cilíndricos de seção transversal elíptica**. 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2016.
- ORELLANA, V. G. B.; ARCE, P. V. O. **Diseño de un separador de producción trifásico horizontal para el campo secoya del distrito Amazónico**. 2011. 151 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito. 2011.
- PALADINO, E. E. **Estudo do escoamento multifásico em medidores de vazão do tipo pressão diferencial**. 2005. 263 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. 2005.

- PADRÓN, A. S. **Study and review of the current understanding of models for the simulation of vertical turbulent bubbly flow with CFD.**2012. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -Curso de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica dos Fluidos, Escuela técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Sevilla. 2012.
- PERRY, R. H. **Perry's chemical engineers' handbook.** 7. ed. Copyright, 1997.
- PDVSA - Manual de diseño de Proceso. **Separación física de tambores separadores principios basicos,** 1995.
- REQUENA, G.; JOSÉ, L.; RODRÍGUEZ, M.; MAURICIO F. **Diseño y evaluación de separadores bifásicos y trifásicos.** 2006. 256 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Ingeniería de Petróleo, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 2006.
- ROSA, E. S. **Escoamento Multifásico Isotérmico: modelos de multifluidos e de mistura.** 1. ed. Porto Alegre: bookman, 2012.
- SANTOS, M. M. **Simulação numérica do escoamento bifásico óleo-água em tubos.** 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- SANTOS, W. R. G. **Escoamento multifásico em duto vertical com vazamento: avaliação físico/geométrica do duto na hidrodinâmica do escoamento.** 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- SANT'ANNA, A. A. **Simulação de processamento de gás natural em plataforma offshore.** 2005. 126 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural, Programa EQ ANP Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- SILVA, A. L. M. **Análise do equilíbrio líquido-vapor e dimensionamento de vasos separadores de Petróleo em Campos maduros.** 2013. 35 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- SIMÕES, M. R. **Simulação computacional de escoamento turbulento em compressor axial utilizando ferramenta de CFD.**2009. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- SOUZA, A. L.L. **Projeto básico de um vaso separador trifásico de gás, água e óleo de acordo com o código asme viii divisão II.** 2015. 246 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

STEWART, M. **Gas-liquid and liquid-liquid separators**. 1. ed. Elsevier, 2008.

THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. **1. ed. Rio de Janeiro: editora interciências, 2001.**

VERSTEEG, H. K; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method**. 1. ed. Inglaterra: longman scientific & technical, 1995.

WENDT, J. F. **Computational Fluid Dynamics: an Introduction**. 3. ed. Bélgica: Springer, 2009.