



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

Padrões de Escoamento do Fenômeno *Holdup* - Um Estudo Computacional

Autor: Karla N. G. Ribeiro
Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noleto

Brasília, DF
2020



Karla N. G. Ribeiro

Padrões de Escoamento do Fenômeno *Holdup* - Um Estudo Computacional

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia de Energia) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia de Energia).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto

Brasília, DF

2020

Karla N. G. Ribeiro
Padrões de Escoamento do Fenômeno *Holdup* - Um Estudo Computacional/
Karla N. G. Ribeiro. – Brasília, DF, 2020-
52 p.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2020.

1. Escoamentos Multifasicos. 2. Holdup. I. Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Padrões de Escoamento do Fenômeno *Holdup* - Um Estudo Computacional

CDU 02:141:005.6

Karla N. G. Ribeiro

Padrões de Escoamento do Fenômeno *Holdup* - Um Estudo Computacional

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia de Energia) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia de Energia).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 18 de dezembro de 2020:

Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto
Orientador

Prof. Dr. Fábio Alfaia da Cunha
Convidado 1

Prof. Dr. Felipe Chagas Storti
Convidado 2

Brasília, DF
2020

Aos queridos José Carlos, Lúcia, Priscila e Vinicius.

Agradecimentos

A Deus, por ter sido sempre meu porto seguro.

Ao meu pai José Carlos, por ter se empenhado tanto em minha educação, e à minha mãe Lúcia por ter sempre me encorajado a alcançar os meus objetivos.

À minha irmã Priscila, por ter sonhado este sonho comigo. Nada disso seria possível sem ela.

Ao meu esposo Vinicius, por toda paciência e dedicação.

Ao prof. Luciano Gonçalves Noletto, um dos melhores professores que pude conhecer na Universidade de Brasília, pela excelente orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de curso que compartilharam esta jornada comigo.

Aos amigos e familiares que me apoiaram neste caminho, especialmente à Fernanda Cosme que sempre me lembrou do meu potencial.

À Julie e à Maggie, que transbordam meu coração de amor, pela companhia em muitos dias e noites de estudo.

Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira, você chega lá.

Ayrton Senna da Silva

Resumo

Escoamentos multifásicos ocorrem quando duas ou mais fases escoam simultaneamente. Os estudos nesta área são importantes devido à ocorrência de sistemas de escoamento multifásicos em diversos processos da indústria petrolífera, de sistemas hidráulicos e do setor de refrigeração, por exemplo. O objetivo deste trabalho é a análise numérica de padrões de escoamento relacionados ao fenômeno de *holdup* em escoamentos multifásicos pelo uso de técnicas da Dinâmica dos Fluidos Computacional. Para este estudo, utilizou-se o código comercial ANSYS no ambiente CFX-Pre para a modelagem dos padrões de escoamento estratificado vertical e intermitente horizontal de um sistema líquido-gás contido numa coluna, na qual a fase contínua é água e a fase dispersa é o ar atmosférico. A simulação para o perfil estratificado apresentou um sistema de escoamento com fases bem definidas e a constância do *holdup* por toda a extensão analisada. O perfil intermitente, por sua vez, apresentou o *holdup* bem definido na região próxima ao local de injeção de gás com grande dispersão gasosa ao longo da extensão da coluna. Por fim, concluiu-se que a metodologia empregada neste estudo permite análises mais aprofundadas de perfis de concentração de ar em escoamentos multifásicos. Os resultados simulados mostraram concordância com os resultados de perfis na literatura.

Palavras-chaves: escoamentos multifásicos, perfis de escoamento, *holdup*, CFD.

Abstract

Multiphase flows occur when two or more phases flow simultaneously. Studies in this area are important due to the occurrence of multiphase flow systems in various processes in the oil industry, hydraulic systems and the refrigeration sector, for example. The purpose of this work is the numerical analysis of flow patterns related to the *holdup* phenomenon in multiphase flows by using Computational Fluid Dynamics techniques. For this study, the commercial code ANSYS in the CFX-Pre environment was used to model the stratified vertical and intermittent horizontal flow patterns of a liquid-gas system contained in a column, in which the continuous phase is water and the dispersed phase is atmospheric air. The simulation for the stratified profile presented a flow system with well-defined phases and the constancy of *holdup* throughout the analyzed range. The intermittent profile, on the other hand, presented the well-defined *holdup* in the region close to the gas injection site with large gas dispersion along the column extension. Finally, it was concluded that the methodology used in this study allows more in-depth analyzes of air concentration profiles in multiphase flows. The simulated results showed agreement with the results of profiles in the literature.

Key-words: multiphase flow, flow pattern, holdup, CFD.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Padrões de escoamento de um sistema líquido-gasoso em tubos horizontais (SHOHAM, 2005)(LIMA, 2011)	28
Figura 2 – Padrões de escoamento de um sistema líquido-gasoso em tubos verticias (SHOHAM, 2005)(LIMA, 2011)	29
Figura 3 – Ângulo de contato entre gota e superfície (SAMPAIO, 2013) e (NASCIMENTO, 2015)	37
Figura 4 – Visão geral da malha utilizada.	41
Figura 5 – Perfil estratificado do escoamento de um sistema líquido-gás.	45
Figura 6 – Perfil estratificado do escoamento de um sistema líquido-gás observado por (LIMA, 2016).	45
Figura 7 – Perfil estratificado do escoamento de um sistema líquido-gás observado por (PARVAREH et al., 2010).	46
Figura 8 – Perfil de concentração de ar para o padrão estratificado.	46
Figura 9 – Perfil intermitente do escoamento de um sistema líquido-gás.	47
Figura 10 – Perfil intermitente do escoamento de um sistema líquido-gás observado por (ALAITA; HOSSAIN; ISLAM, 2016).	47
Figura 11 – Perfil intermitente do escoamento de um sistema líquido-gás observado por (PARVAREH et al., 2010).	48
Figura 12 – Perfil de concentração de ar para o padrão intermitente.	48

Lista de tabelas

Tabela 1 – Constantes da modelagem SST	34
--	----

Lista de símbolos

α_l	<i>Holdup</i> de líquido
α_1	Constante do modelo SST
α_2	Constante do modelo SST
β	Constante do modelo SST
β'	Constante do modelo SST
β_1	Constante do modelo SST
β_2	Constante do modelo SST
σ_{k1}	Constante do modelo SST
$\sigma_{\omega 1}$	Constante do modelo SST
$\sigma_{\omega 2}$	Constante do modelo SST
ϵ	Dissipação turbulenta
ω	Frequência turbulenta
γ_l	<i>Holdup</i> de líquido sem escorregamento
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ρ	Massa específica
F_1	Função de mistura
F_2	Função de mistura
k	Energia cinética da turbulência
q_l	Vazão de gás
q_g	Vazão de líquido
v_{sg}	Velocidade superficial do gás
v_{sl}	Velocidade superficial do líquido
v_t	Viscosidade turbulenta

V_s	Velocidade de escorregamento
V_g	Velocidade real da fase gasosa
V_l	Velocidade real da fase líquida
P_k	Limitador de produção
Re	Reynolds
L	Comprimento característico do tubo

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação	23
1.2	Objetivos Gerais e Específicos	24
1.3	Revisão Bibliográfica	25
1.4	Estrutura do Trabalho	26
2	MODELAGEM TEÓRICA	27
2.1	Fundamentos de Escoamentos Multifásicos	27
2.1.1	Padrões de Escoamento em Tubulações para Sistemas Líquido-Gás	28
2.2	Fundamentos de Turbulência	30
2.2.1	Cascata de Energia	31
2.2.2	Modelagem de Turbulência	32
2.2.2.1	Modelo de Turbulência SST	33
2.3	Escoamentos Multifásicos - Conceitos Fundamentais	35
2.3.1	<i>Holdup</i>	35
2.3.1.1	<i>Holdup</i> e Escorregamento	36
2.3.2	Grau de Molhabilidade	37
2.3.3	Superfícies Hidrofílicas e Hidrofóbicas	38
2.4	Fundamentos de Dinâmica dos Fluidos Computacional	38
3	MODELAGEM DO PROBLEMA E RESULTADOS	41
3.1	Modelagem Numérica	41
3.2	Resultados para o Perfil Estratificado	42
3.3	Resultados para o Perfil Intermitente	43
3.4	Comparação entre os Perfis Estratificado e Intermitente	44
4	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS	51

1 Introdução

Este capítulo apresenta a motivação da realização deste trabalho, os seus objetivos gerais e específicos pretendidos, sua revisão bibliográfica e a definição da sua estrutura de construção.

1.1 Motivação

Os escoamentos multifásicos são aqueles em que duas ou mais fases ocorrem simultaneamente. Esta variação de escoamento está presente em diversos setores, como na indústria química, petrolífera e nuclear, por exemplo (BRATLAND, 2010) (ROSA, 2012).

Os escoamentos multifásicos representam um desafio à compreensão e à modelagem dos fenômenos físicos envolvidos e são frequentemente encontrados na natureza tais como na nucleação de gotas de chuva, no escoamento arterial de sangue e em diversos segmentos industriais como o setor petrolífero, químico, mecânico, entre outros (LIMA, 2011) (ROSA, 2012).

Na indústria petrolífera os escoamentos multifásicos são frequentemente observados nas colunas de produção e nas tubulações de escoamento, ocorrendo em trechos horizontais, inclinados ou verticais. Diante da complexidade deste tipo de escoamento, metodologias tem sido desenvolvidas com a finalidade de identificar padrões de fluxo e avaliar o comportamento dos fluidos ao longo do escoamento nos dutos para determinar os gradientes de pressão. O conhecimento dessas propriedades é primordial para um adequado dimensionamento de dutos e equipamentos de produção (PIMENTEL, 2013). Os escoamentos multifásicos também ocorrem em diversos processos do setor petrolífero, como no bombeamento multifásico e na separação submarina. As plataformas *offshore* de produção de petróleo possuem plantas de separação de óleo, gás e água produzidos, e a qualidade desta separação no local de extração é primordial para a lucratividade do empreendimento (STORTI, 2013).

Em sistemas hidráulicos, o estudo do escoamento multifásico é relevante para a análise da formação de cavitação em diversos sistemas hidrodinâmicos como hélices de navios, bombas, turbinas e tubulações, por exemplo. Isso porque a cavitação é o processo de formação, e subsequente colapso, de bolhas de vapor ou gás em um fluido e decorre das baixas pressões locais geradas pela alta velocidade do escoamento local. O conhecimento da dinâmica do escoamento é necessária uma vez que a cavitação pode ocasionar efeitos indesejáveis nas turbomáquinas como vibrações, erosões, danos estruturais e consequente redução de eficiência (VICTORINO, 2014). Na área de engenharia naval, por exemplo, o

fenômeno da cavitação pode prejudicar consideravelmente a ocultação dos submarinos de guerra, devido às ondas sonoras produzidas pela implosão das bolhas de vapor (LIMA, 2016).

No setor de refrigeração, o estudo sobre escoamentos multifásicos tem se tornado cada vez mais relevante, principalmente a partir do Protocolo de Montreal (1987) que estabeleceu um processo de redução gradativa do gás refrigerante HCFC-22. Desde então, a comunidade industrial demandou pesquisas sobre o desenvolvimento de substâncias refrigerantes substitutas ao HCFC-22, e umas das soluções propostas foi o sistema multifásico composto por misturas de fluidos refrigerantes. O estudo dos fenômenos multifásicos nesta área é relevante para a investigação de como as misturas de fluidos refrigerantes afeta os ciclos de refrigeração. Além disso, este estudo permite a previsão da queda de pressão na região de escoamento, a vazão mássica, o fluxo mássico crítico, a predição da formação das bolhas de vapor e a coalescência ocasionada ao longo do escoamento (SEIXLACK, 1996).

Os exemplos das aplicações supracitadas revelam a diversidade dos processos, em diversos setores industriais, que envolvem sistemas multifásicos. Desta forma, é evidenciada a necessidade de aprofundamento na modelagem destes sistemas que podem influenciar expressivamente a eficiência e o êxito dos respectivos projetos em que se inserem.

1.2 Objetivos Gerais e Específicos

O presente trabalho tem por objetivo geral a investigação de padrões de escoamento multifásico relacionados ao fenômeno de *holdup*. Serão usadas técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional para modelar estes padrões em um sistema líquido-gás contido em tubulação horizontal e vertical de seção transversal constante.

Os objetivos específicos deste estudo compreendem a análise dos padrões estratificado e intermitente de escoamento multifásico, bem como a convergência destes perfis com as previsões físicas a eles atribuídas pela literatura, assim como:

- a definição das formas de abordagem de problemas multifásicos, quais sejam: experimental, teórica e computacional;
- a definição dos perfis de escoamentos multifásicos teóricos;
- o uso de CFD para a modelagem dos perfis de escoamento estratificado e intermitente para um sistema líquido-gás que escoar por uma coluna pelo uso do código comercial ANSYS;
- a comparação dos resultados dos perfis obtidos por simulação com os resultados teóricos na literatura para padrões de escoamentos multifásicos.

- o uso das características de molhabilidade e hidrofiliidade/hidrofobicidade para reforçar a convergência ou divergência das visualizações dos perfis estratificado e intermitente obtidos com as previsões teóricas de perfis de escoamentos multifásicos;

1.3 Revisão Bibliográfica

De acordo com (ROSA, 2012) os estudos científicos na área de escoamentos multifásicos têm sido realizados desde o começo do século XX. Àquela época medidas experimentais e modelos correlacionais representavam a principal fonte de conhecimento (BRATLAND, 2010) sobre estes fenômenos.

Atualmente, as análises em escoamentos multifásicos podem ser feitas pela abordagem experimental, teórica ou computacional. A abordagem experimental prescinde modelos, e consiste na observação, na tomada de medidas e na quantificação de eventos obtidos na reprodução do fenômeno multifásico em condições controladas de laboratório. As técnicas experimentais, entretanto, podem ser limitadas, muitas vezes, pela dificuldade da reprodução das escalas do fenômeno real em laboratório (ROSA, 2012).

A abordagem teórica faz uso de hipóteses simplificadoras para se obter uma solução analítica do problema ou para simplificar as equações resultantes para serem tratadas como métodos numéricos. A limitação desta abordagem é a generalidade das informações obtidas, que não fornece detalhes sobre as estruturas e escalas do escoamento, mas grandezas médias oriundas de aproximações unidimensionais (ROSA, 2012).

A abordagem computacional tem permitido grandes avanços na área de escoamentos multifásicos. De acordo com (ROSA, 2012), a compreensão dos escoamentos multifásicos vem sendo alcançada não somente pela reprodução destes fenômenos em laboratório, mas também pelos métodos computacionais que equivalem a um laboratório multifásico virtual. Os métodos de análise computacional possibilitam a investigação de fenômenos multifásicos nos contextos em que as técnicas experimentais e teóricas não são capazes de extrair informações. Estes métodos são divididos em dois grupos: simulação direta das equações locais e instantâneas e simulação das equações médias.

Segundo (ROSA, 2012), o primeiro grupo resolve as equações a partir dos princípios de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, prescindindo a aplicação de modelos específicos para os termos interfaciais. Os balanços de massa, energia e quantidade de movimento são satisfeitos no domínio em que apenas uma fase está presente, como os métodos numéricos para escoamentos monofásicos. Nas regiões do domínio em que ocorrem as interfaces, os métodos deste grupo consideram as condições de salto na interface. As forças interfaciais são definidas pelos balanços de massa, energia e quantidade de movimento através da interface. A aplicação dos métodos deste grupo, entretanto, está comprometida pelo refinamento requerido pelos recursos computacionais.

O grupo das simulações médias, conforme (ROSA, 2012) utiliza as equações médias de transporte pelos referenciais Lagrangeano-Euleriano e Euleriano-Euleriano. Os métodos que se baseiam no primeiro referencial são denominados métodos de partículas pontuais e empregados somente para escoamentos dispersos. A fase contínua, nestes métodos, é tratada a partir de um referencial Euleriano, assim como um escoamento monofásico. As partículas transportadas pela fase contínua são tratadas por um referencial Lagrangeano. Nestes métodos, as partículas são identificadas e suas posições relativas são postas, a cada instante, na grade computacional.

Os métodos que utilizam o referencial Euleriano-Euleriano realizam um processo de média nas equações de transporte, de forma análoga às tomadas de média nas equações de transporte para regime turbulento, o que implica numa redução de capacidade de processamento computacional. A ocorrência das fases, nesses métodos, é ponderada por um processo de média no tempo, no volume ou no conjunto, que possibilita a coexistência de mais de uma fase num mesmo ponto (ROSA, 2012).

Enquanto os métodos da simulação direta das equações locais e instantâneas fornecem uma grande quantidade de informação local sobre os escoamentos, os métodos das equações médias permitem a abordagem de problemas encontrados na maioria das aplicações de interesse prático. Os modelos mais representativos deste grupo são o modelo de dois fluidos e o modelo de mistura, que possuem capacidade de solução transiente unidimensional ou tridimensional (ROSA, 2012).

1.4 Estrutura do Trabalho

A partir deste capítulo introdutório, este trabalho divide-se em mais três capítulos. O capítulo 2 discorre sobre a modelagem matemática deste estudo, e compreende os fundamentos de escoamento multifásico, os fundamentos de turbulência, a definição de conceitos fundamentais para o entendimento deste estudo, bem como os fundamentos de fluidodinâmica computacional. O capítulo 3 apresenta a modelagem do problema e seus resultados, e por fim, o capítulo 4 encerra este trabalho com as conclusões observadas.

2 Modelagem Teórica

Este capítulo apresenta os fundamentos de escoamentos multifásicos, os fundamentos de turbulência, a definição dos conceitos de *holdup*, grau de molhabilidade, superfícies hidrofílicas e hidrofóbicas, e os fundamentos de Dinâmica dos Fluidos Computacional.

2.1 Fundamentos de Escoamentos Multifásicos

Os escoamentos multifásicos ocorrem quando duas ou mais fases escoam juntas e com grande interação (CHAVES, 2020). De acordo com (ROSA, 2012), há uma ambiguidade gerada pelo uso do termo multifásico, uma vez que o termo fase é frequentemente associado ao estado da matéria - gás, líquido ou sólido.

A termodinâmica clássica define a fase de uma substância pura como um estado macroscópico da matéria, em que sua estrutura física e sua composição química são homogêneas. (CENGEL, 2007). Para (ROSA, 2012), a fase é uma região delimitada por uma interface de espessura infinitesimal que limita, em seu interior, uma substância homogênea.

Em sistemas multifásicos o número de fases de uma mistura pode não corresponder ao número de estados da matéria. O escoamento de ar atmosférico, que é uma mistura de gases, por exemplo, possui apenas uma fase - a gasosa (ROSA, 2012). Por isso, muitas vezes, utiliza-se o termo multicomponente para se referir aos sistemas nos quais as fases não consistem da mesma substância química. Alguns escoamentos bicomponentes, por exemplo, são frequentemente denominados bifásicos devido à imiscibilidade dos componentes presentes (LIMA, 2011). Para (WALLIS, 1969), desde que as formulações matemáticas que descrevem escoamentos bifásicos ou bicomponentes sejam iguais, qualquer um dos termos pode ser utilizado sem prejuízo.

É relevante estudar a dinâmica de escoamentos multifásicos em tubos, porquanto ocorrem formações de padrões de escoamento que permitem investigar suas tendências com aplicabilidade direta em muitas aplicações de engenharia. Em sistemas líquido-gás, por exemplo, estes padrões dependem de condições de operação - vazão, temperatura, pressão - da geometria da tubulação e das propriedades dos fluidos (STORTI, 2013).

Ocorre, também, entre as fases dos sistemas, as denominadas interfaces, que introduzem as condições de salto para a descrição das transferências de massa, energia e quantidade de movimento entre as fases (LIMA, 2011). Um dos objetos de interesse em escoamentos multifásicos é o comportamento médio do sistema de interação entre as fases envolvidas.

2.1.1 Padrões de Escoamento em Tubulações para Sistemas Líquido-Gás

Um dos aspectos mais desafiadores no estudo de escoamentos multifásicos é que estes podem tomar diferentes formas (BRATLAND, 2010). A representação de modelos de escoamentos líquido-gás requer o conhecimento da distribuição espacial das fases. A forma com que as forças interfaciais atuam no escoamento está relacionada a esta distribuição que é dada, de forma qualitativa, pelos padrões ou perfis de escoamento (LIMA, 2011).

Segundo (ROSA, 2012), os padrões de escoamento podem ser agrupados em três grupos principais: estratificado, disperso e intermitente. Para escoamentos horizontais, estes perfis são ainda subdivididos nos padrões estratificado liso, estratificado ondulado, anular, bolhas, bolha alongada e golfadas (BRATLAND, 2010). A Figura 1 apresenta a representação dos escoamentos horizontais.

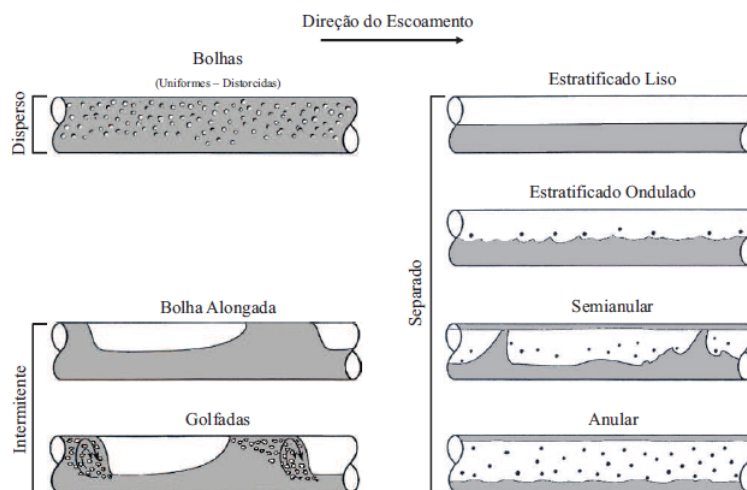


Figura 1 – Padrões de escoamento de um sistema líquido-gasoso em tubos horizontais (SHOHAM, 2005)(LIMA, 2011)

Os três padrões gerais de escoamento multifásico para um sistema líquido-gás podem, ainda, ser subdivididos para os casos de escoamento vertical. Os perfis descritos por (BRATLAND, 2010) são: perfil anular, perfil gotas, perfil bolhas uniformes, perfil bolhas distorcidas, perfil golfadas e perfil agitado. A Figura 2 ilustra a representação dos escoamentos verticais.

Os perfis de escoamento multifásico são caracterizados a seguir:

- Perfil Estratificado ou Separado

O perfil estratificado apresenta camadas heterogêneas bem delineadas e possui uma forte tendência a aparecer em escoamentos inclinados e horizontais com baixas vazões de gás e líquido (BRATLAND, 2010). Este perfil subdivide-se em perfil estratificado liso e perfil estratificado ondulado.

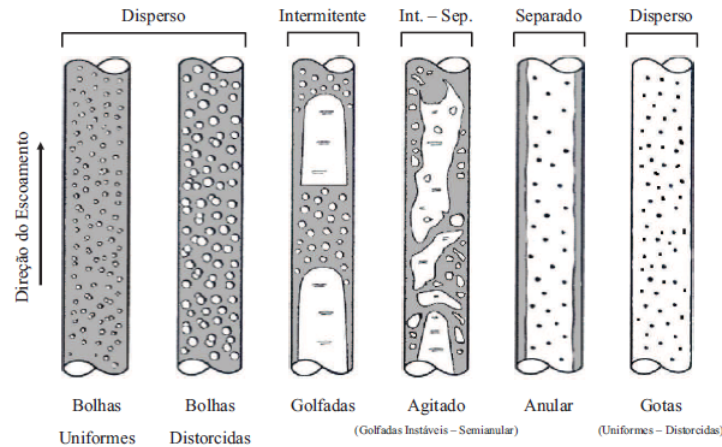


Figura 2 – Padrões de escoamento de um sistema líquido-gasoso em tubos verticais (SHOHAM, 2005)(LIMA, 2011)

O perfil estratificado liso é caracterizado por uma fase líquida contínua que escoar na porção inferior da tubulação, enquanto a fase gasosa, mais leve, escoar na porção superior devido aos efeitos da gravidade. Devido às baixas vazões de líquido e gás, a interface é considerada aproximadamente plana (BRATLAND, 2010).

O perfil estratificado ondulado, por sua vez, apresenta ondulações marcantes na interface. Em decorrência destas ondas, o filme líquido que escoar na porção inferior pode avançar e subir pelas paredes da tubulação (LIMA, 2011).

Outra variação do perfil estratificado é observada: o padrão anular. Neste perfil, a fase líquida escoar como um filme pelas paredes internas do tubo, enquanto a fase gasosa ocupa a região central da tubulação. Ocorre para altas velocidades superficiais do gás, e também é comum a dispersão de gotículas de líquido na fase gasosa (BRATLAND, 2010).

- Perfil Disperso

O perfil disperso apresenta a distribuição de inúmeras gotas ou bolhas não conectadas na fase contínua do escoamento (LIMA, 2011). Neste perfil estão enquadrados o padrão das bolhas uniformes, o padrão das bolhas distorcidas e o padrão gotas.

O perfil das bolhas uniformes representa a distribuição de bolhas dispersas de tamanho uniforme, que descrevem trajetórias retilíneas e que não interagem entre si (LIMA, 2011).

O perfil das bolhas distorcidas representa uma aglomeração de bolhas de diversos tamanhos, com contornos esféricos ou distorcidos, que descrevem trajetórias em zigue-zague e interagem entre si (LIMA, 2011).

O perfil gotas, em escoamentos verticais, possui características similares ao perfil bolhas, com a diferença de que as gotas levam mais tempo para se adaptarem ao movi-

mento do gás na tubulação (LIMA, 2011).

- Perfil Intermitente

O perfil intermitente é caracterizado por uma sucessão de pistões de líquido seguidos por bolhas alongadas de gás (BRATLAND, 2010). Além deste padrão, ocorrem ainda as classificações do perfil golfadas e do perfil golfadas instáveis.

O perfil golfadas é caracterizado por pistões de líquido seguidos por bolhas de gás alongadas (do inglês *slugs*) que escoam na porção superior da tubulação (BRATLAND, 2010).

O perfil golfadas instáveis é um sucessor do perfil golfadas, e ocorre quando a vazão de gás na tubulação é aumentada. As bolhas de gás possuem um comprimento muito grande, enquanto os pistões de líquido possuem comprimento reduzido, são aerados e sua integridade é frequentemente comprometida pelo fluxo de gás (ROSA, 2012).

De acordo com (ROSA, 2012), o conhecimento dos padrões de escoamento é fundamental na análise de escoamentos multifásicos, porquanto, na região de ocorrência de cada padrão, os processos de transporte são parecidos, dentro de determinados limites. O autor também cita que o conhecimento destes padrões permite o entendimento das propriedades geométricas da interface para a modelagem dos termos interfaciais que regem o transporte de massa, energia e quantidade de movimento.

2.2 Fundamentos de Turbulência

O regime de escoamento é influenciado por diversos fatores como geometria e rugosidade da superfície de escoamento, tipos de fluidos, velocidade do escoamento, entre outros fatores (CHAVES, 2020).

Regimes de escoamento laminar são bem comportados e caracterizam-se pela ordenação da movimentação dos fluidos e ocorrem para fluidos viscosos que escoam por tubulações mais estreitas. De outra forma, os escoamentos que apresentam oscilações de velocidade e movimentação desordenada são denominados turbulentos. De acordo com (CENGEL, 2007), a transição entre estes dois regimes de escoamento ocorre numa região na qual o escoamento fluta entre o regime laminar e turbulento.

Osborne Reynolds percebeu, na década de 1880, de acordo com seus experimentos que analisavam fluidos escoando por tubulações, que os regimes de escoamento dependem da relação entre as forças inerciais e viscosas do fluido (CENGEL, 2007). Esta relação é expressa pelo número de Reynolds, grandeza adimensional apresentada na Eq. (2.1).

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

O número de Reynolds é a relação entre o produto da massa específica ρ , da velocidade do fluido v e do comprimento característico do tubo L pela viscosidade dinâmica do fluido μ .

Para tubos de seção circular, valores de Reynolds menores ou iguais a 2300 indicam escoamento laminar, e maiores ou iguais a 4000 correspondem a escoamentos turbulentos. Valores de Reynolds entre 2300 e 4000 estão associados a escoamentos de transição.

Para altos números de Reynolds, as forças inerciais são grandes em relação às forças viscosas. Desta forma, as forças viscosas não são capazes de evitar as flutuações aleatórias e rápidas do fluido (CENGEL, 2007). Esta irregularidade, característica dos escoamentos turbulentos, dificulta a dedução de modelos matemáticos que prevejam as propriedades turbulentas (NOLETO, 2017). Neste sentido, a Dinâmica dos Fluidos Computacional é um recurso importante para o estudo da turbulência.

Segundo (CENGEL, 2007), nos regimes turbulentos ocorre o transporte de massa, momento e energia para outras regiões de escoamento muito mais rapidamente do que a difusão molecular, o que aumenta substancialmente a transferência de massa, momento e calor.

As tensões cisalhantes são intensificadas, na turbulência, e geram a transformação da energia cinética do escoamento em aquecimento por meio de dissipação viscosa. Esta dissipação está associada às flutuações de velocidade, e será tão grande quanto forem as próprias flutuações (NOLETO, 2017).

De acordo com (SOUZA et al., 2010) a vorticidade é altamente relevante para a análise da turbulência, visto que escoamentos turbulentos são rotacionais. Além disso a turbulência é mantida por mecanismos tridimensionais presentes no escoamento.

Escoamentos turbulentos são não lineares e definidos por um sistema dinâmico altamente dependente de condições iniciais. Isto implica a não garantia de fiel reprodução de experimentos turbulentos. Este fato evidencia que a turbulência é um comportamento do escoamento, e não do fluido (NOLETO, 2017).

2.2.1 Cascata de Energia

A cascata de energia é uma forma de resolver problemas de escoamentos turbulentos. Segundo (CENGEL, 2007), escoamentos turbulentos são caracterizado por flutuações aleatórias e rápidas de regiões em redemoinho de fluido, denominadas turbilhões ou escalas. Dentro deste conceito, está estabelecido que grandes escalas produzem energia e pequenas escalas dissipam energia (NOLETO, 2017).

Define-se a cascata de energia como a transferência de energia das grandes escalas para as pequenas escalas. A criação de escalas infinitesimais será limitada pela viscosi-

dade do fluido. A cascata de energia é o mecanismo de desenvolvimento da turbulência (NOLETO, 2017), presente no terceiro termo da equação 2.2, a equação da vorticidade.

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + u \cdot \nabla \Omega = \Omega \cdot \nabla u + \nu \nabla^2 \Omega \quad (2.2)$$

O primeiro termo da equação 2.2 representa a variação local da vorticidade. O segundo termo da equação 2.2 é a variação convectiva da vorticidade. O terceiro termo da equação 2.2 é o responsável pela sua variação por meio de torção ou extensão de uma linha de vórtices. A cascata de energia utiliza a extensão de uma linha de vórtices para se desenvolver, e por isso sua existência está vinculada a não nulidade deste termo (NETO, 2003). Por fim, o quarto termo da equação 2.2 é o termo de difusão de vorticidade devido à ação molecular.

2.2.2 Modelagem de Turbulência

A abordagem dos problemas de turbulência pode ser realizada por três metodologias de abordagem que são as metodologias analítica, numérica e experimental (SOUZA et al., 2010). A escolha entre estas metodologias está associada à complexidade matemática que descreve o problema em análise.

O tensor de Reynolds representa a transferência da quantidade de movimento devido a flutuações de velocidade. Este tensor surge devido aos efeitos do escoamento instantâneo que não ocorrem no escoamento médio. Isso implica em um sistema de equações aberto, pois o sistema é formado por mais incógnitas que equações (NOLETO, 2017). Este é o "problema de fechamento" que requer equações que completem o sistema linear.

O problema de fechamento pode ser solucionado por formulações constitutivas ou evolutivas (NOLETO, 2017), e os métodos de modelagem numérica são ferramentas relevantes para se obter estas soluções.

Dentro do enfoque da modelagem numérica destacam-se os modelos baseados nas equações médias de Reynolds, de simulação numérica direta e de simulação das grandes escalas da turbulência. Estes métodos são brevemente conceituados a seguir, de acordo com (SOUZA et al., 2010).

- Modelo de Equações Médias de Reynolds (*RANS*): as equações deste modelo são obtidas por um conjunto de médias das equações de Navier-Stokes e da continuidade. Esta modelagem busca representar as tensões de Reynolds que descrevem os efeitos das flutuações turbulentas de velocidade.
- Simulação Numérica Direta (*DNS*): esta técnica consiste na resolução das equações completas de Navier-Stokes para todas as escalas temporais e espaciais do movimento.

- Simulação das Grandes Escalas (*LES*): neste modelo, são utilizados filtros para a separação das grandes escalas, ou turbilhões, das pequenas escalas, representadas pelos pequenos vórtices.

2.2.2.1 Modelo de Turbulência SST

No enfoque do modelo de Equações Médias de Reynolds, o modelo de transporte de tensão cisalhante, SST, faz uso do modelo k - ϵ na região distante da parede e o modelo k - ω nas proximidades da parede.

De acordo com (MENTER, 1994) o modelo k - ω é interessante para a descrição do interior da camada limite, porquanto este modelo dispensa leis de parede ou funções de amortecimento. Ademais, o modelo também é reconhecido por sua estabilidade numérica. O modelo k - ω , entretanto, não é adequado para predições do comportamento turbulento nas proximidades da parede. Nestas regiões, utiliza-se o modelo k - ϵ , pois o modelo k - ω requer condição de contorno não nula para ω na corrente livre, e a solução do escoamento possui grande sensibilidade ao valor especificado (MENTER, 1994).

Para que a referida troca de modelos seja satisfatória, o modelo k - ϵ é multiplicado por uma função de mistura e adicionado ao modelo k - ω , que também é multiplicado por esta função de mistura (MENTER, 1994) (NOLETO, 2017).

A modelagem matemática do modelo SST, abaixo detalhada, é de apresentação de (MENTER, 1994).

As equações de transporte do modelo são:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = P_k - \beta' k \omega \rho + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (2.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) = \alpha \rho S^2 + \beta \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} + \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2.4)$$

em que ϵ é a dissipação turbulenta e ω é a frequência turbulenta. A viscosidade turbulenta contabiliza o transporte das principais tensões cisalhantes turbulentas:

$$v_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, (S_{ij} S_{ij})^{\frac{1}{2}} F_2)} \quad (2.5)$$

O termo $(S_{ij} S_{ij})^{\frac{1}{2}}$ é uma medida não variante do tensor taxa de deformação e F_2 é uma das duas funções de mistura do modelo. As funções de mistura, F_1 e F_2 , são definidas de acordo com a distância até a parede e as variáveis do escoamento.

As funções de mistura F_1 e F_2 delimitam as zonas de atuação de cada modelo. A função F_1 é responsável pela troca de modelos na segunda equação de dissipação do

modelo (Eq. 2.4) e pela determinação das constantes. Por sua vez, a função F_2 realiza a troca entre os modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$ na formulação da viscosidade turbulenta. Desta forma, as funções de mistura são:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (2.6)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \quad (2.7)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{w} \nabla k \nabla \omega, 1, 0.10^{-10} \right) \quad (2.8)$$

A função F_1 é zero na região distante da parede (modelo $k - \epsilon$) e assume o valor 1 no interior da camada limite, região próxima à parede (modelo $k - \omega$).

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (2.9)$$

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \quad (2.10)$$

Para evitar o crescimento da turbulência em regiões de estagnação, é utilizado um limitador de produção.

$$P_k = \mu_t \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) \quad (2.11)$$

$$P_k = \max(P_k, 10 \cdot \rho \beta^* k \omega) \quad (2.12)$$

Se α_1 representa qualquer constante do modelo $k - \omega$ e α_2 representa qualquer constante do modelo $k - \epsilon$, então α , a constante correspondente no modelo SST, é definida como uma síntese dos dois referidos modelos através da seguinte função:

$$\alpha = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 (1 - F_1) + \dots \quad (2.13)$$

As constantes apresentadas nesta modelagem são apresentadas na Tabela 1:

$\beta' = 0.09$	$\alpha_1 = 5/9$	$\beta_1 = 3/40$
$\sigma_{k1} = 0.5$	$\sigma_{\omega 1} = 0.5$	$\alpha_2 = 0.44$
$\beta_2 = 0.0828$	$\sigma_{k2} = 1$	$\sigma_{\omega 2} = 0.856$

Tabela 1 – Constantes da modelagem SST

A vantagem deste modelo é a formulação zonal empregada, porquanto o modelo SST combina os modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$ nas regiões de operacionalidade de cada um - distante e próximo à parede, respectivamente. Isso garante que as exceções de aplicabilidade dos modelos sejam evitadas (NOLETO, 2017).

2.3 Escoamentos Multifásicos - Conceitos Fundamentais

Nesta seção são apresentados os conceitos de *holdup* e as definições de grau de molhabilidade, superfícies hidrofóbicas e hidrofílica.

2.3.1 Holdup

Ao se analisar uma seção transversal de uma tubulação que contém o escoamento de um sistema multifásico, tem-se que cada fase ocupa uma fração da área da seção. As fases interagem entre si, criando topologias de escoamento que caracterizam o escoamento multifásico. Uma destas topologias é o *Holdup*.

O fenômeno de *holdup* pode ocorrer em sistemas líquido-gás que escoam em tubulações e ocorre com a injeção de frações de ar no escoamento.

O *holdup* líquido é a fração de um elemento de volume na região do escoamento ocupado por líquido. O *holdup* de líquido varia de zero, situação em que há apenas a presença de gás na tubulação, a um, situação em que só há o escoamento de líquido. A Eq. (2.14) apresenta a expressão para cálculo deste *holdup*.

$$\alpha_l = \frac{V_l}{V_t} \quad (2.14)$$

De forma análoga a esta definição, o *holdup* gasoso é a fração de um elemento de volume ocupada pela fase gasosa (SHOHAM, 2005). Pela equação Eq. (2.15) pode-se calcular o *holdup* de gás que varia de zero, quando ocorre somente líquido escoando pelo tubo, a um, quando há apenas o escoamento gasoso.

$$\alpha_g = \frac{V_g}{V_t} \quad (2.15)$$

O *holdup* total é dado pela Eq. (2.16).

$$\alpha_l + \alpha_g = 1 \quad (2.16)$$

Em que α_l é o *holdup* de líquido, α_g é o *holdup* de gás, V_l é o volume de líquido, V_g é o volume de gás e V_t é o volume total da tubulação.

2.3.1.1 Holdup e Escorregamento

Para condições de não escorregamento, (SHOHAM, 2005) explica que a fase gasosa costuma aparecer dispersa como pequenas bolhas na fase líquida contínua. Em decorrência da elevada taxa do escoamento da fase líquida, as pequenas bolhas de gás são carregadas pela fase líquida com mesma velocidade.

Nos sistemas em que são percebidas velocidades de gás e de líquido iguais no escoamento, não ocorrendo assim escorregamento entre as fases, o *holdup* de líquido é determinado pela ponderação das vazões volumétricas, apresentado na Eq.(2.17) (PIMENTEL, 2013).

$$\gamma_l = \frac{q_l}{q_l + q_g} \quad (2.17)$$

Em que γ_l é o *holdup* de líquido, q_l é a vazão de líquido e q_g é a vazão de gás.

As velocidades superficiais do líquido e do gás são dadas, respectivamente, pelas Eq. (2.18) e (2.19). Estes termos representam as velocidades que as fases teriam, caso estivessem escoando sozinhas na tubulação (PIMENTEL, 2013).

$$v_{sl} = \frac{q_l}{A_t} \quad (2.18)$$

$$v_{sg} = \frac{q_g}{A_t} \quad (2.19)$$

Frequentemente as fases gasosa e líquida não se movem a mesma velocidade, o que ocasiona escorregamento entre as fases. A fase gasosa se move a uma velocidade mais elevada que a fase líquida devido a flutuabilidade e às baixas forças de atrito (SHOHAM, 2005). A velocidade de escorregamento entre as fases, portanto, pode ser calculada como a diferença entre as velocidades reais das fases gasosa e líquida.

$$V_s = V_g - V_l \quad (2.20)$$

Da definição de vazão:

$$q_l = A_l V_l \quad (2.21)$$

$$q_g = A_g V_g \quad (2.22)$$

Assim, de acordo com (PIMENTEL, 2013), a velocidade de escorregamento pode ser apresentada de acordo com a Eq.

$$V_s = \frac{q_g}{A_g} - \frac{q_l}{A_l} \quad (2.23)$$

$$V_s = \frac{q_g}{\alpha_g A_t} - \frac{q_l}{\alpha_l A_t} \quad (2.24)$$

$$V_s = \frac{v_{sg}}{(1 - \alpha_l)} - \frac{v_{sl}}{\alpha_l} \quad (2.25)$$

Em que v_{sl} é a velocidade superficial do líquido, v_{sg} é a velocidade superficial do gás, q_l é a vazão de líquido, q_g é a vazão de gás e A_t é a área da tubulação.

2.3.2 Grau de Molhabilidade

A molhabilidade é a capacidade que um líquido possui de se aderir, sob a forma de gotícula, a uma superfície sólida, na presença de outro fluido imiscível (NASCIMENTO, 2015).

A molhabilidade é uma propriedade importante para descrever a hidrofiliidade ou hidrofobicidade de uma superfície, o que contribui para o entendimento da interação líquido-sólida entre a gotícula e a superfície. Esta propriedade é influenciada pela natureza e heterogeneidade química da superfície (AQUINO, 2006).

Para a determinação do grau de molhabilidade, avalia-se o ângulo de contato entre a gota e a superfície. Geralmente, utiliza-se a água como o fluido para determinar este parâmetro (SAMPAIO, 2013). A molhabilidade é maior - o líquido molha mais a superfície - quanto menor for o ângulo de contato entre a gotícula e a superfície. A Figura 3 ilustra a relação da molhabilidade para diferentes ângulos de contato.

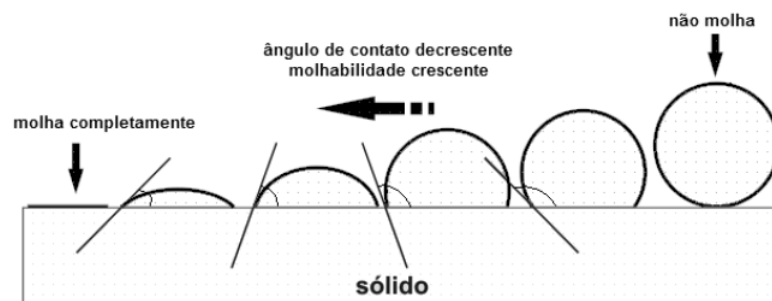


Figura 3 – Ângulo de contato entre gota e superfície (SAMPAIO, 2013) e (NASCIMENTO, 2015)

O ângulo de contato é o ângulo formado entre a gota de líquido e a superfície sobre a qual está depositada. O ângulo pode assumir valores de 0° a 180° . Quando o ângulo está entre 0° e 90° , seu valor indica que o líquido molha a superfície do sólido, e

quando está entre 90° e 180° , considera-se que o líquido não molha a superfície do sólido (NASCIMENTO, 2015) (SAMPAIO, 2013).

O valor do ângulo de contato (θ) pode ser calculado pela equação de Young (eq. 2.26), na qual os termos γ_{sg} , γ_{sl} e γ_{lv} representam as tensões interfaciais nas fronteiras entre líquido, sólido e gás.

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (2.26)$$

2.3.3 Superfícies Hidrofílicas e Hidrofóbicas

Hidroflicidade e hidrofobicidade são características da superfície que indicam sua atração ou aversão por moléculas de água, respectivamente. Superfícies hidrofílicas tendem a ser molhadas por água, enquanto superfícies hidrofóbicas não apresentam essa tendência.

De acordo com (NASCIMENTO, 2015), para a caracterização das superfícies como hidrofílicas ou hidrofóbicas pode-se observar o espalhamento da água pela superfície, e determinar os ângulos de contato. Para os ângulos de contato menores que 90° , a superfície é denominada hidrofílica. Segundo (CHAVES, 2020), as superfícies hidrofóbicas são aquelas em que a gotícula de água forma com a superfície ângulos maiores que 90° e inferiores a 180° .

2.4 Fundamentos de Dinâmica dos Fluidos Computacional

A simulação numérica é um recurso de notória importância para a análise de escoamentos multifásicos. Neste enfoque, está a fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) que é um conjunto de técnicas de simulação computacional utilizadas para a predição de fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em sistemas que envolvem escoamentos, transferência de calor e fenômenos relacionados (MALISKA, 2004).

As técnicas de CFD buscam obter as soluções matemáticas de seus problemas de interesse. A solução numérica das equações de Navier-Stokes permite obter distribuições de velocidade, pressão e temperatura na região do escoamento (COSTA; RIBEIRO, 2010).

De acordo com (PATANKAR, 1980), as vantagens das técnicas de CFD são: baixo custo de aplicação, menor tempo de execução de projeto (em comparação à construção de protótipos e experimentos em laboratório), maior detalhamento dos fenômenos envolvidos e possibilidade de trabalhar com condições ideais ou realísticas nas simulações.

Apesar de as técnicas de CFD ampliarem as possibilidades de estudo e exploração dos escoamentos multifásicos, há limitações como o alto custo computacional envolvido. A aplicação de condições de contorno, por exemplo, depende do desenvolvimento de fer-

ramentas cada vez mais refinadas para melhor detalhamento da geometria do domínio de cálculo (MALISKA, 2004).

As análises de CFD necessitam de certas definições sobre a situação em estudo para serem, de fato, satisfatórias. Uma análise de CFD é constituída por quatro processos: modelagem, pré-processamento, processamento e pós-processamento. Abaixo é apresentada a definição de (NOLETO, 2017) para cada um destes processos.

- Modelagem: nesta etapa são definidos os objetivos e finalidade do projeto, os requisitos de solução do problema, as hipóteses de simplificação e a precisão requerida nos resultados obtivos.
- Pré-Processamento: nesta fase são definidos o nível de detalhamento do domínio de cálculo do problema, a adequação da geometria ao caso, o tipo de malha e de método para a análise, os dados de entrada do problema, bem como os prazos e a disponibilidade computacional para o caso em estudo.
- Processamento: durante o processamento da simulação devem ser observados a adequação do histórico de convergência do cálculo, o tempo de processamento da simulação, se os resíduos estão assumindo valores aceitáveis e o respeito ao princípio da conservação de grandezas no cálculo.
- Pós-Processamento: neste estágio deve-se analisar se a simulação fornece resultados qualitativos do caso em análise, se estes resultados são consonantes à realidade física do escoamento, se os resultados são dependentes das malhas utilizadas e se há a necessidade de avaliar o resultado para diferentes malhas.

3 Modelagem do Problema e Resultados

Este capítulo apresenta a modelagem do escoamento de um sistema líquido-gás pelo uso de técnicas de CFD para a obtenção dos perfis estratificado e intermitente e os resultados obtidos.

3.1 Modelagem Numérica

No presente trabalho foram utilizadas técnicas de CFD para a modelagem do escoamento de um sistema líquido-gás. O ambiente CFX-Pre do *software* ANSYS, versão 2020, foi utilizado como instrumento de modelagem e simulação para avaliar os padrões estratificado e intermitente de escoamento multifásico. A Figura 4 apresenta a visão geral da malha utilizada nesta modelagem para melhor entendimento das etapas descritas nesta seção.

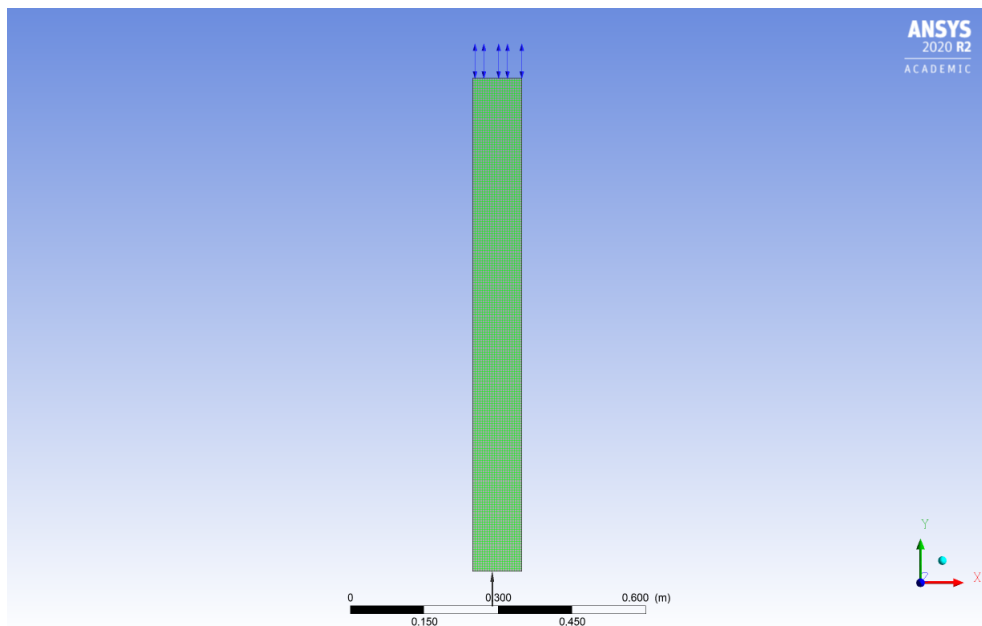


Figura 4 – Visão geral da malha utilizada.

A malha utilizada (Figura 4) está estabelecida para as coordenadas x (0; 0,1 m), y (0; 1 m) e z (0; 0,2 m). Inicialmente foram estabelecidas nesta malha a entrada e a saída do tubo, bem como suas condições. Na entrada ocorre a injeção de frações de ar no tubo e sua saída é aberta para a atmosfera. No menu *Default Domain* foram estabelecidas as fases dispersa e contínua do sistema que são o ar ($T = 25^\circ \text{C}$, $P = 1 \text{ atm}$) e a água ($T = 25^\circ \text{C}$, $P = 1 \text{ atm}$), respectivamente. Ainda em *Default Domain* o método SST foi definido para modelar a turbulência do escoamento. A direção da atuação da força

gravitacional foi estabelecida no sentido negativo do eixo x para melhor observação do padrão estratificado, e no sentido negativo da direção y para o padrão de escoamento intermitente.

Para o perfil estratificado do escoamento, ajusta-se, em *Analysis Type*, sua análise para regime estacionário, com o controle de convergência, em *Solver Control*, definido para o máximo de 400 iterações em uma escala de tempo de 1 segundo.

A análise do perfil intermitente, por sua vez, é realizada em regime transiente, definida em *Analysis Type*, com controle de convergência, em *Solver Control*, ajustado para o máximo de 1 *loop* de 10 iterações em uma escala de tempo de 1 segundo.

A escolha de análise entre os regime permanente ou transiente deve-se às condições observadas de padrão de escoamento. Para padrões estratificados, a homogeneidade do padrão prescinde, para o caso deste trabalho, de análises variáveis no tempo. Por outro lado, os padrões de escoamento intermitente podem ser voláteis, requerendo assim, análises transitórias.

3.2 Resultados para o Perfil Estratificado

A obtenção do perfil estratificado, disposto na Figura 5, apresenta as fases discreta e contínua bem definidas com ondulações comportadas entre as fases. A concentração da fase gasosa aparece no sentido positivo do eixo x , consonante ao que (BRATLAND, 2010) cita sobre a previsão de comportamento da sobreposição da fase mais leve sobre a mais pesada. Este é um caso de *holdup* líquido e a Figura 5 ilustra a contenção da fase gasosa pela fase líquida.

Houve similaridade entre o padrão apresentado na Figura 5 e o resultado obtido por (LIMA, 2016), apresentado na Figura 6, em seu estudo de caracterização de padrões de escoamentos multifásicos em tubulação horizontal e inclinada. O resultado do autor apresenta a zona interfacial com ondulações bem comportadas e o fenômeno de *holdup* bem definido.

Ocorreu também boa correspondência entre o resultado obtido por CFD neste estudo (Figura 5) e o resultado analisado por (PARVAREH et al., 2010) em sua investigação de escoamentos multifásicos horizontais. Os autores descrevem, conforme apresentado na Figura 7, que no padrão estratificado ondulado a fase líquida escoar na zona inferior da tubulação, enquanto a fase gasosa escoar na zona superior devido à diferença de densidade entre os fluidos, bem como a ocorrência de ondas suaves oriundas das tensões interfaciais existentes. O fenômeno de *holdup* ocorreu de forma definida e uniforme.

As curvas da Figura 8 mostram o perfil da concentração de ar na coluna crescendo a medida que se avança para a parede limitada no eixo x , cuja hidrofobicidade evidencia-

se porquanto a água não consegue molhar esta região. O fenômeno de *holdup* está bem definido para quase a totalidade do escoamento. As curvas de concentração de ar ao longo do escoamento são uniformes até o ponto 0,08 metros da coluna, em que a concentração de ar cresce expressivamente para diferentes trechos da coluna (posições a 25%, 50%, 75% e 80% da coluna). No local de abertura para a atmosfera, a concentração de ar é mais expressiva. Esta concentração também é marcada no local de injeção do ar. A curva de concentração de ar, na entrada da tubulação, evidencia um crescimento da dispersão gasosa que ocorre na direção da fase dispersa com a contenção, entretanto, da fase líquida à medida que se retrocede no eixo x.

A molhabilidade é evidenciada na parede hidrofílica à esquerda da coluna ilustrada na Figura 5, porquanto a concentração de ar do escoamento nesta região, para toda sua extensão, é de 0%. O gráfico da Figura 8 evidencia, por sua vez, que a parede à direita da coluna que contém o escoamento possui caráter hidrofóbico, uma vez que a concentração de ar do escoamento nesta região atinge 100%, com exceção da região localizada na entrada da coluna que apresenta concentração de ar em 82% no escoamento.

Desta forma, as referidas curvas de concentração de ar para o perfil estratificado, bem como as características de molhabilidade, hidrofilicidade e hidrofobicidade observadas ratificam a convergência da visualização do perfil de escoamento estratificado obtida com as previsões teóricas e com as visualizações de (LIMA, 2011) e (PARVAREH et al., 2010).

3.3 Resultados para o Perfil Intermitente

O perfil intermitente gerado, apresentado na Figura 9, mostra o *holdup* bem delineado na base da coluna, onde ocorre a injeção de gás. À medida que se avança na coluna, no sentido positivo do eixo y, percebe-se uma elevação significativa de gás disperso na fase contínua, e conforme o que (BRATLAND, 2010) definiu para os sistemas líquido-gás, a fase gasosa passou a ocupar parte significativa da tubulação.

Percebeu-se certa similaridade entre o resultado gerado para o perfil intermitente neste trabalho e o perfil obtido no trabalho de (ALAITA; HOSSAIN; ISLAM, 2016), apresentado na Figura 10, marcado por um fenômeno de *holdup* bem definido no trecho inferior da coluna, com significativa dispersão de gás ao longo de seu comprimento. As paredes da coluna, entretanto, apresentam uma concentração gasosa maior do que a observada no padrão da Figura 9. É percebida, no padrão (ALAITA; HOSSAIN; ISLAM, 2016), a presença de bolhas de gás alongadas e bem definidas no escoamento.

Observando o padrão intermitente obtido no estudo de (PARVAREH et al., 2010), apresentado na Figura 11, percebe-se a intermitência entre frações de ar e pistões de líquido, bem como a presença de bolhas de gás dispersas na fase líquida. A concentração de ar nas paredes da coluna apresentada por (PARVAREH et al., 2010) mostra um com-

portamento hidrofóbico da superfície que contém o escoamento. O autor também cita em seus resultados que os pistões de água observados no escoamento bloqueiam a passagem de gás.

Para o relaxamento do *holdup* ao longo da coluna, e a consequente dispersão de gás observada na Figura 9, levantam-se algumas hipóteses. Para a primeira hipótese, a fase contínua, representada pela água, perde força para a contenção da fase gasosa à medida que se avança em direção ao topo da coluna. Para a segunda hipótese, a abertura da coluna para a atmosfera favorece a concentração de ar na região que se aproxima do seu topo. Outro fator a ser considerado para a obtenção de um resultado mais refinado é o incremento da malha utilizada e das condições de contorno estabelecidas. Uma análise experimental deste caso pode investigar a ocorrência deste fenômeno, complementando a análise numérica.

As curvas de concentração de ar no perfil intermitente, observadas na Figura 12, apresentam um pico de concentração de ar, na entrada da coluna, que logo se estabiliza nas proximidades da região de parede e um perfil parabólico que indica concentração de ar de aproximadamente 0,95% no escoamento, no trecho da coluna a 1/4 de sua base. A partir do trecho mediano da coluna, as curvas passam a indicar maior uniformidade na concentração de ar, com valores próximos a 0,5%. Na região das paredes da coluna, pode-se inferir um declínio acentuado na concentração gasosa a partir das curvas do gráfico disposto na Figura 12, que apresenta valores de concentração de ar no escoamento em 0,05% na parede à esquerda da coluna e 0,1% à direita da coluna, demonstrando que a água molha bem estas paredes de caráter hidrofílico.

As referidas curvas de concentração de ar para o perfil intermitente, bem como as características de molhabilidade e hidrofiliabilidade observadas reforçam que a visualização do perfil de escoamento intermitente obtida pode ser melhorada com refinamentos de malha ou condições de contorno, por exemplo, uma vez que o perfil obtido apresentou diferenças em relação à previsão teórica e às visualizações de (PARVAREH et al., 2010) e (ALAITA; HOSSAIN; ISLAM, 2016) à medida que se avança na direção positiva do eixo y .

3.4 Comparação entre os Perfis Estratificado e Intermitente

Os resultados apresentados possibilitam uma comparação entre os padrões de escoamento analisados neste trabalho. O perfil estratificado, assim como descrito por (BRATLAND, 2010), apresentou um padrão bem comportado e com fases bem definidas, separadas pela gravidade. As curvas convergiram para uma concentração de ar contida numa determinada região do tubo. Para este padrão, o fenômeno de *holdup* foi percebido de forma mais homogênea para toda a região da tubulação, quando comparado ao resul-

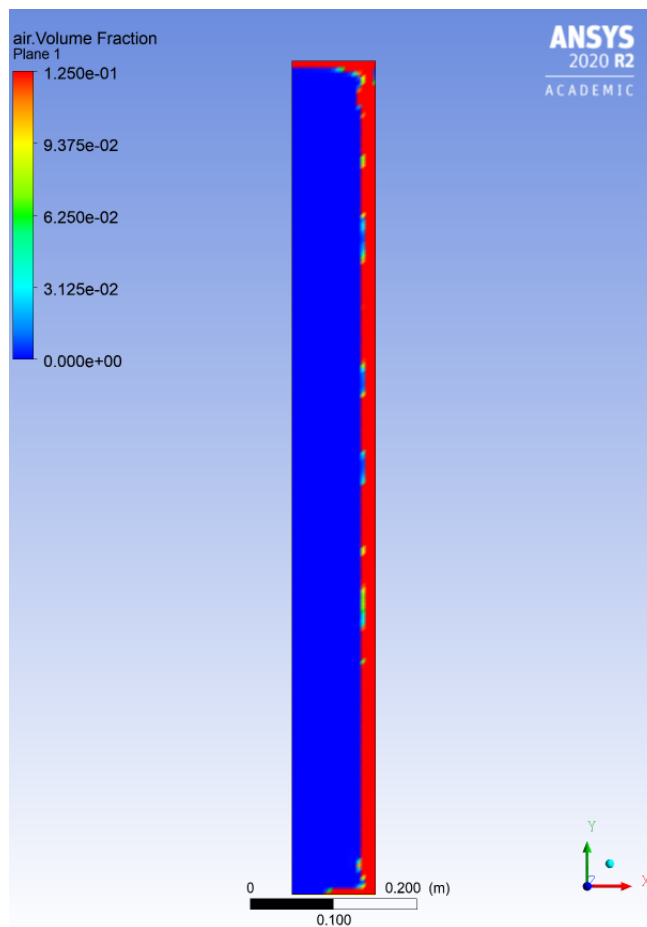


Figura 5 – Perfil estratificado do escoamento de um sistema líquido-gás.

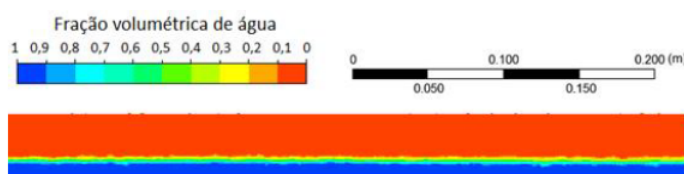


Figura 6 – Perfil estratificado do escoamento de um sistema líquido-gás observado por (LIMA, 2016).

tado obtido para o perfil intermitente, em que o *holdup* aparece bem definido na região de injeção do ar, com ocorrência da dispersão da fase gasosa numa região significativa da coluna. Esta dispersão requer uma análise experimental do caso para a compreensão do relaxamento do *holdup* na coluna. Diante destes resultados, percebe-se que a análise do fenômeno *holdup* foi melhor observado para o perfil estratificado. As análises da molhabilidade e hidrofobicidade, por sua vez, foram facilmente observadas para ambos perfis investigados, uma vez que são propriedades das superfícies que contêm os sistemas, e não do escoamento.

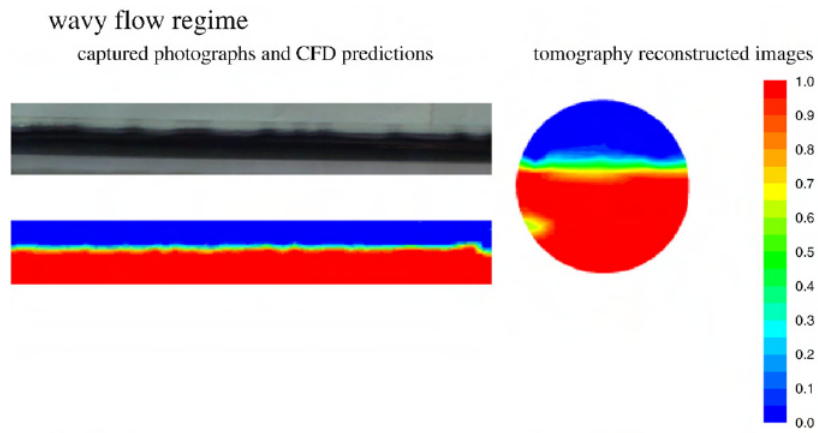


Figura 7 – Perfil estratificado do escoamento de um sistema líquido-gás observado por (PARVAREH et al., 2010).

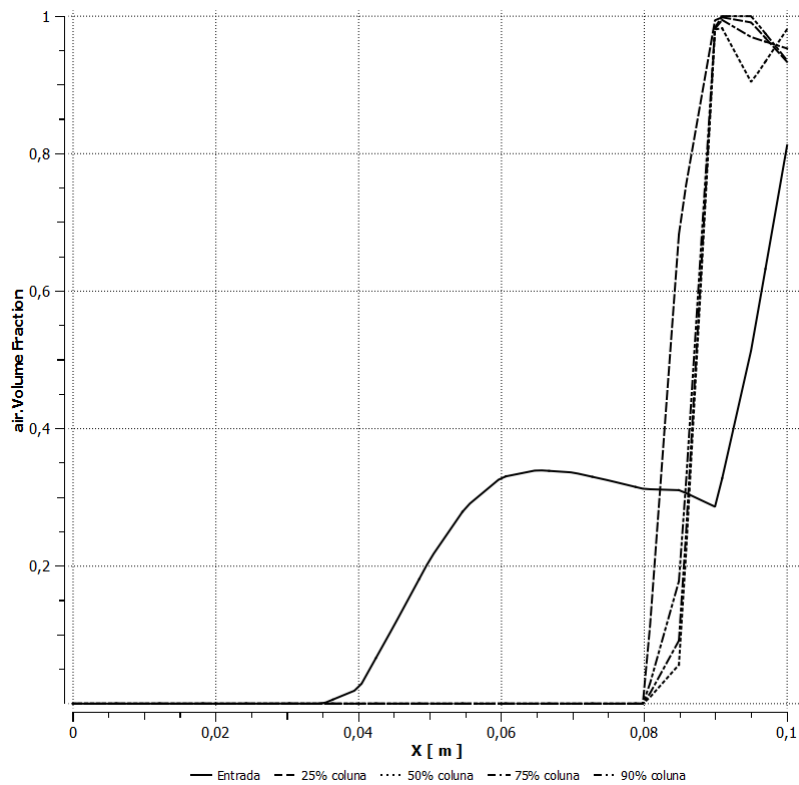


Figura 8 – Perfil de concentração de ar para o padrão estratificado.

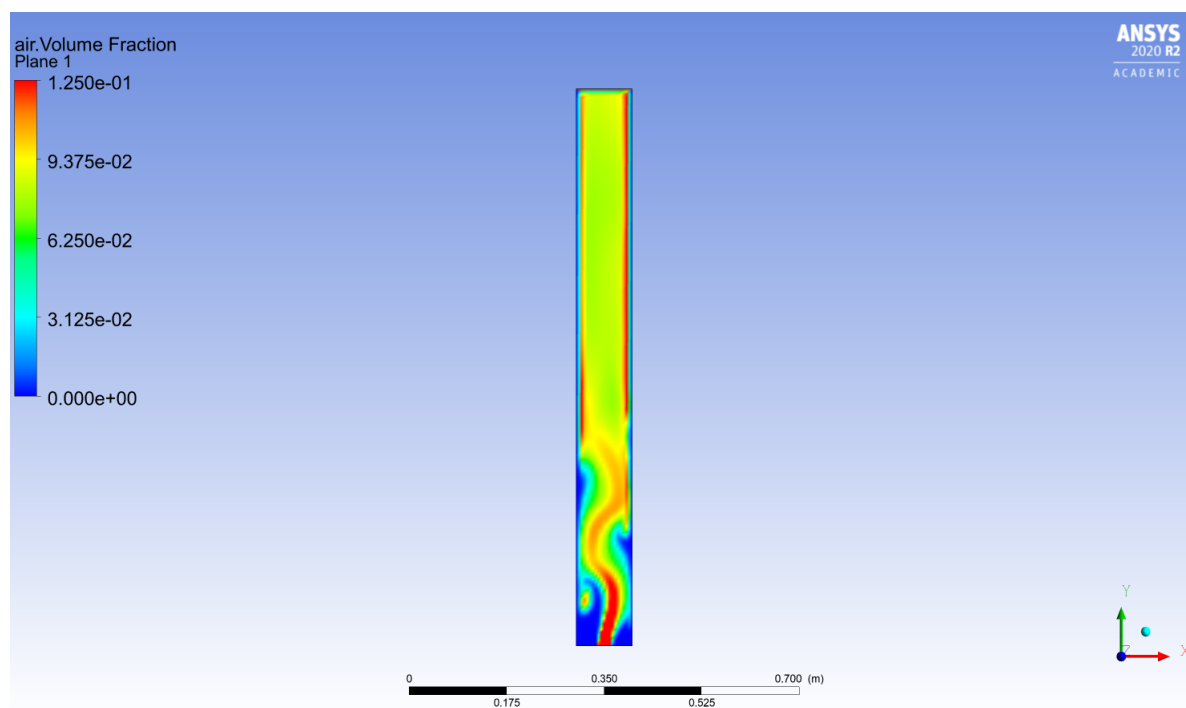


Figura 9 – Perfil intermitente do escoamento de um sistema líquido-gás.

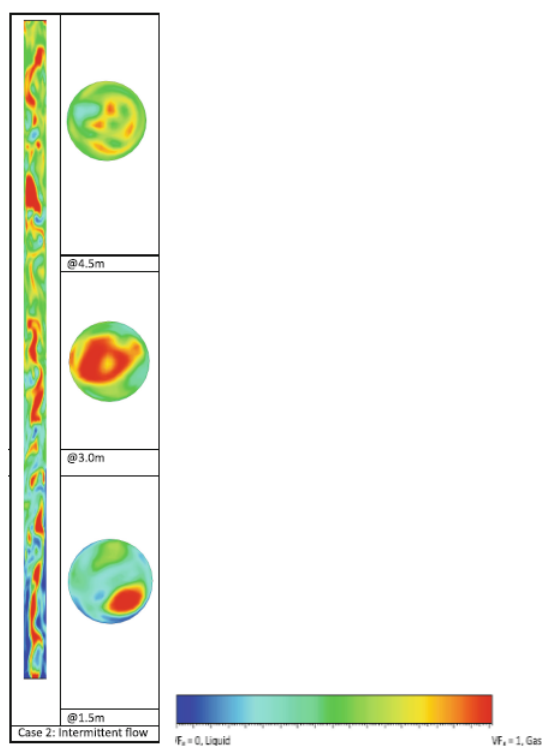


Figura 10 – Perfil intermitente do escoamento de um sistema líquido-gás observado por (ALAITA; HOSSAIN; ISLAM, 2016).

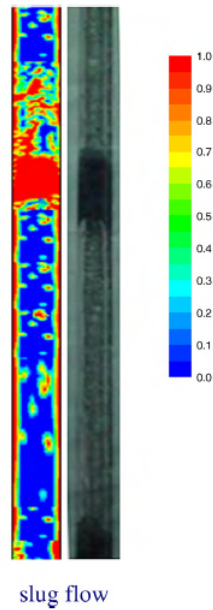


Figura 11 – Perfil intermitente do escoamento de um sistema líquido-gás observado por (PARVAREH et al., 2010).

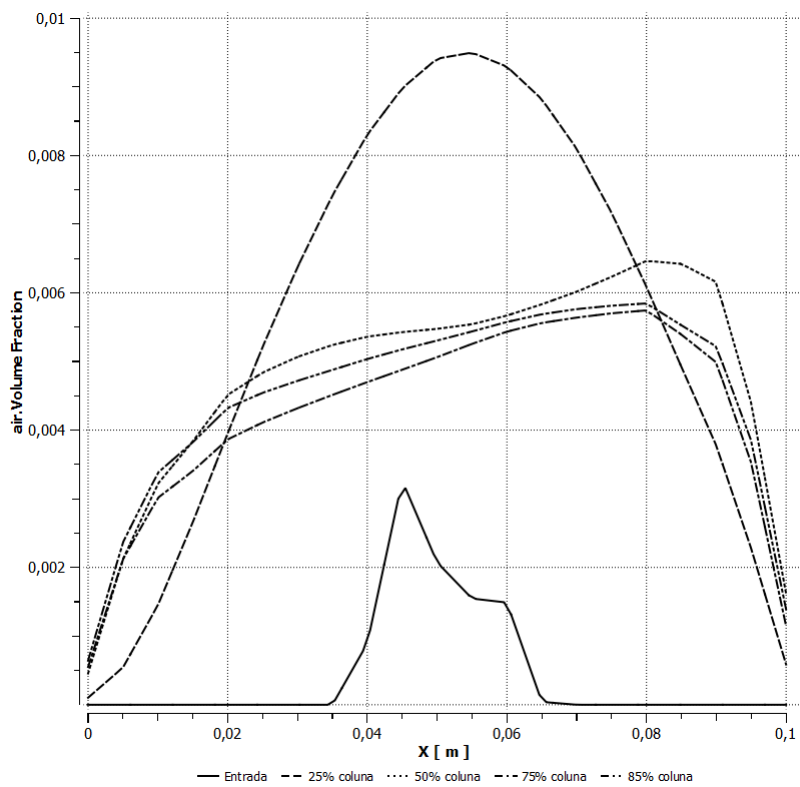


Figura 12 – Perfil de concentração de ar para o padrão intermitente.

4 Conclusões

Diante da complexidade do estudo de escoamentos multifásicos, o presente trabalho buscou utilizar técnicas da Dinâmica dos Fluidos Computacional para investigar a ocorrência do fenômeno *holdup* em um sistema de escoamento líquido-gás, bem como analisar a convergência dos padrões de escoamento estratificado e intermitente analisados com os perfis estabelecidos na literatura.

As simulações realizadas no código ANSYS descreveram que o padrão de escoamento estratificado apresenta uma concentração de ar distribuída de forma homogênea por toda a coluna como consequência da constância do desenvolvimento do fenômeno *holdup*. O padrão de escoamento intermitente, por sua vez, apresentou o *holdup* bem definido nas proximidades da região de injeção de gás, entretanto com a ocorrência de significativa dispersão de ar percebida em direção ao topo da coluna.

O presente estudo cumpriu o objetivo de explanar as formas de aborgadem dos problemas de escoamentos multifásicos, bem como definir os padrões de escoamento, através de uma pesquisa bibliográfica, como referência para a comparação dos resultados obtidos por simulações realizadas no ANSYS. A metodologia deste trabalho retornou resultados satisfatórios, uma vez que obteve padrões coerentes com a realidade física dos fenômenos descritos na literatura, efetivando, desta maneira, o objetivo do uso da Dinâmica dos Fluidos Computacional como recurso para a modelagem dos perfis de escoamento estratificado e intermitente. Outra realização deste trabalho foi o cumprimento dos objetivos de uso das características de molhabilidade e hidroflicidade/hidrofobicidade para reforçar a convergência e/ou divergência dos perfis simulados no ANSYS e a comparação destes perfis com os resultados teóricos previstos para padrões de escoamento multifásico.

A fluidodinâmica computacional é um importante recurso no estudo de escoamentos multifásicos, em que pese ter apresentado limitação quanto à predição dos fenômenos físicos descritivos do enfraquecimento do *holdup* no padrão intermitente. Diante da complementaridade entre os recursos experimentais, analíticos e numéricos na área de mecânica dos fluidos, sugere-se para trabalhos futuros a realização do estudo de malha para que sejam investigadas as causas da dispersabilidade de gás observada na fase contínua para o perfil intermitente, bem como a investigação do controle do *holdup* em escoamentos multifásicos. Outra sugestão de estudo futuro é a avaliação do fenômeno de *holdup* em sistemas de fluidos relevantes para as diversas áreas do conhecimento, como para a indústria petrolífera, bem como as implicações do *holdup* para a separação das fases em escoamentos multifásicos que ocorrem em diversos processos dos setores químico e petrolífero.

Referências

- ALAITA, D.; HOSSAIN, M.; ISLAM, S. Z. Modelling multiphase flow in vertical pipe using cfd method. School of Engineering, Robert Gordon University, Aberdeen, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 15, 43, 44 e 47.
- AQUINO, I. P. *Caracterização da Superfície do Aço-Carbono ABNT 1008 Revestida com Organo-Silanos por meio de Técnicas Eletroquímicas e Físico-Químicas* 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Citado na página 37.
- BRATLAND, O. *Pipe Flow*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 2. Citado 8 vezes nas páginas 23, 25, 28, 29, 30, 42, 43 e 44.
- CENGEL, Y. A. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. [S.l.]: Bookman, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 27, 30 e 31.
- CHAVES, I. L. *Investigação da Dinâmica de Formação de Gotas no Interior de Microcanaís via Técnicas de CFD* 2020. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Instituto de Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 27, 30 e 38.
- COSTA, L. T.; RIBEIRO, M. C. C. Propriedades dinâmicas de fluidos por simulação computacional: métodos híbridos atomístico-contínuo. Departamento de Ciências Exatas, Universidade Federal de Alfenas, 2010. Citado na página 38.
- LIMA, L. E. M. *Análise do Modelo de Mistura Aplicado em escoamentos Isotérmicos Gás-Líquido* 2011. 171 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011. Citado 7 vezes nas páginas 15, 23, 27, 28, 29, 30 e 43.
- LIMA, M. P. *Aferição do Modelo VOF na Caracterização de Padrões de escoamento Multifásico em Tubulação Horizontal e Inclínada* 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 15, 24, 42 e 45.
- MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. NASA Ames Research Center, 1994. Citado na página 33.
- NASCIMENTO, A. E. G. do. *Estudo da Molhabilidade de Superfícies de Parafina e Aço Inoxidável por Soluções de Tensoativos Não Iônicos* 2015. 116 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) — Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 15, 37 e 38.

- NETO, A. da S. *Fundamentos da Turbulência nos Fluidos*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 32.
- NOLETO, L. G. *Noções de Turbulência em Fluidos*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 5 vezes nas páginas 31, 32, 33, 35 e 39.
- PARVAREH, A. et al. Cfd and ert investigations on two-phase flow regimes in vertical and horizontal tubes. CFD Research Centre, Chemical Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran, 2010. Citado 6 vezes nas páginas 15, 42, 43, 44, 46 e 48.
- PATANKAR, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corp., 1980. Citado na página 38.
- PIMENTEL, L. M. *Avaliação do Comportamento do Escoamento Multifásico de Petróleo do Poço 1-FMO-01-BA do Campo Fazenda Momoeiro* 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 36.
- ROSA, E. S. *Escoamento Multifásico Isotérmico*. [S.l.]: Bookman, 2012. v. 1. Citado 6 vezes nas páginas 23, 25, 26, 27, 28 e 30.
- SAMPAIO, J. A. de. *Caracterização de Fibras de Celulose Tratadas por Plasma* 2013. 50 f. Dissertação (Graduação em Engenharia de Materiais) — Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 15, 37 e 38.
- SEIXLACK, A. L. *Modelagem do Escoamento Bifásico em Tubos Capilares* 1996. 175 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996. Citado na página 24.
- SHOHAM, O. *Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado 5 vezes nas páginas 15, 28, 29, 35 e 36.
- SOUZA, J. F. A. de et al. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. In: . Universidade Federal do Rio Grande: [s.n.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- STORTI, F. C. *Estudo Experimental da Eficiência de Separação da Câmara de Expansão do Separador VASPS* 2013. 218 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo) — Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.
- VICTORINO, S. L. *Simulação Numérica da Cavitação em Turbomáquinas Usando uma Formulação Euler-Lagrange* 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Citado na página 23.
- WALLIS, G. B. *One-dimensional two-phase flow*. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1969. Citado na página 27.