

1

Introdução

Escoamento multifásico consiste no escoamento de um mesmo fluido na presença de mais de uma fase ou diferentes fluidos imiscíveis. O estudo de escoamento multifásico é uma importante área da mecânica dos fluidos, pois apresenta uma larga faixa de aplicações em inúmeros aspectos do cotidiano como: chuva, ciclones, tufões, poluição atmosférica, poluição de rios e mares, sendo igualmente parte importante de processos industriais e biológicos, como plantas de geração de energia convencional e nuclear, motores de combustão interna, torres de destilação, sistemas de propulsão, transporte e produção de óleo e gás, entre outros. Nas últimas décadas ocorreu na área, tanto com relação às técnicas experimentais como com às computacionais. Apesar dos avanços, o conhecimento do escoamento multifásico é ainda limitado. Isto constitui um vasto campo para pesquisas teóricas e experimentais em quase todos os aspectos do escoamento das respectivas fases e da interação entre elas.

Particularmente na indústria do petróleo, o escoamento multifásico ocorre na produção e durante o transporte de fluidos (hidrocarbonetos, água e sólidos) provenientes dos reservatórios conforme ilustrado na Figura 1.1.

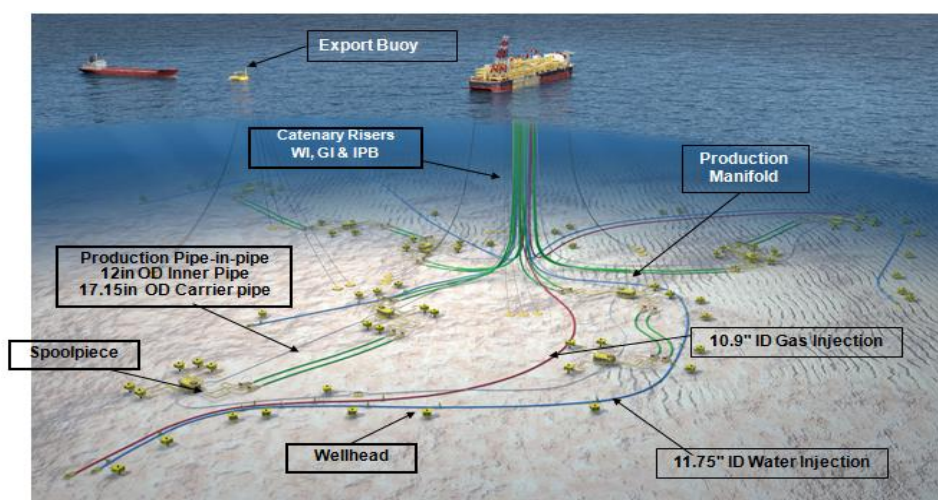


Figura 1.1 Campo de Dália, Angola.

A previsão do escoamento multifásico em tubulações de petróleo é importante pois pode permitir um melhor dimensionamento dos equipamentos de

processamento, assim como tornar situações operacionais (início, operação normal, desligamento, depressurização, etc.) mais eficientes. O alto risco envolvido nas operações de exploração em águas cada vez mais profundas tem contribuído ainda mais para o desenvolvimento de modelos mais confiáveis para prever este tipo de escoamento.

As fases de um escoamento multifásico podem se arranjar de diversas formas, dando origem a diferentes configurações de escoamentos com características diversas. A Figura 1.2 ilustra possíveis arranjos das fases e diferentes padrões de escoamentos. Para o caso do fluxo horizontal os padrões são: estratificado, estratificado ondulado, bolhas alongadas, golfadas, anular, anular ondulado e bolhas de gás dispersas no líquido. Para o escoamento vertical, são encontrados os regimes no padrão bolhas dispersas, os padrões intermitentes como golfada e o padrão caótico, assim como o padrão anular.

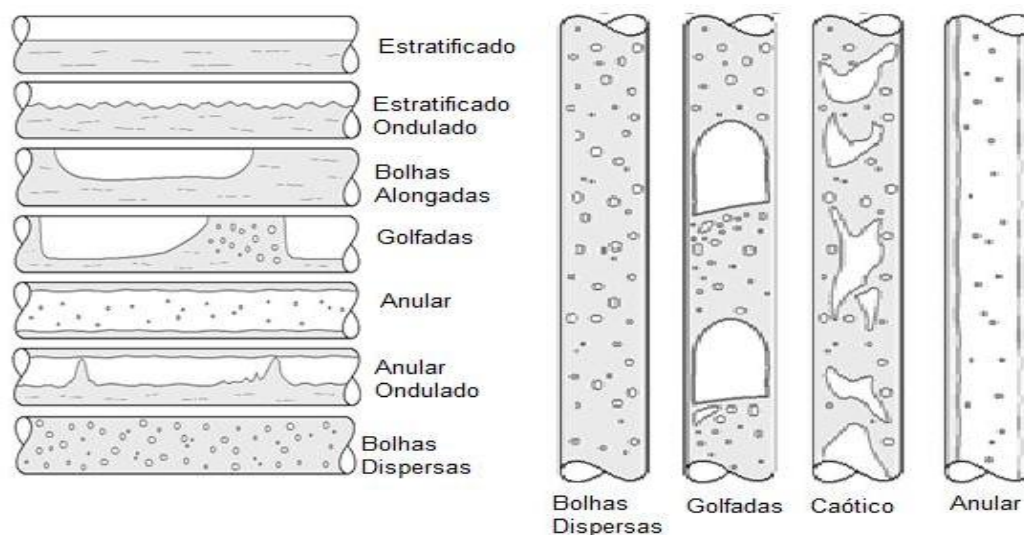


Figura 1.2 – Padrões de escoamento para fluxos horizontal e vertical

Devido à complexa interação entre as diversas fases escoando simultaneamente, o desenvolvimento de um modelo para prever o escoamento multifásico é uma tarefa extremamente complicada. A descrição rigorosa do fenômeno demanda grandes esforços para a solução dos modelos matemáticos. Dessa forma, modelos com diferentes graus de complexidade têm sido desenvolvidos.

Para prever escoamentos multifásicos, duas grandes classes de modelos são encontradas na literatura (Prosperetti e Tryggvason, 2009). Pode-se utilizar um único conjunto de equações para determinar o escoamento, juntamente com uma função indicadora para determinar a região ocupada por cada fluido

(modelos de “um fluido”), como por exemplo, os modelos *Volume of Fluid (VOF)*, *Level-Set*, *Embedded Mesh*, etc. Na outra classe busca-se resolver equações médias de conservação para cada fase, como por exemplo, Modelo de Deslizamento (*Drift Flux*) e Modelo de Dois (ou mais) Fluidos (*Two-Fluid* ou *Multi-Fluid*).

Entre os diversos regimes de escoamento bifásico, o padrão de golfadas se destaca por ser encontrado em um grande número de aplicações industriais, especialmente na área de petróleo. Adicionalmente, este padrão é um dos que requer maior esforço em sua caracterização e modelagem, devido às características marcantes da distribuição espacial e temporal entre fases, que dá origem à intermitência ao escoamento, com variação periódica de grandezas como a fração de vazio e pressão na seção transversal da tubulação. O grande desafio na previsão deste importante tipo de escoamento é uma das motivações para o seu estudo no presente trabalho.

Dentre os diversos modelos disponíveis para prever escoamentos bifásicos, em especial o padrão de golfadas, o Modelo de Dois Fluidos (Ishii e Hibiki, 2011) tem se mostrado bem atraente. De acordo com Issa e Kempf (2003) e Carneiro *et al.* (2011), este modelo é capaz de prever a formação e evolução do padrão de golfadas, sem a necessidade de introdução de critérios de transição entre regimes ou de correlações empíricas para as características das golfadas (ex. comprimento, velocidade, etc).

1.1 Regime Intermitente

No escoamento bifásico em um duto, a distribuição das fases é uma consequência da evolução dos campos de escoamentos. No padrão intermitente, têm-se como principal característica a variação, no espaço e no tempo, de bolsas de gás de tamanho expressivo, denominadas “bolhas de Taylor”, e pistões de líquido que podem apresentar pequenas bolhas de gás dispersas em seu interior. No escoamento vertical, o filme de líquido geralmente envolve a bolha de gás, gerando um escoamento com geometria semelhante à do escoamento anular. Já no escoamento horizontal, a bolha de gás é deslocada para cima devido ao efeito da gravidade, e encosta-se à parede do tubo, com o filme de líquido escoando de forma estratificada. No escoamento inclinado, as características são semelhantes às do escoamento horizontal até determinado ângulo de inclinação crítico em que a bolha de gás deixa de tocar a parede do

tubo. A determinação do ângulo crítico é complicada, pois depende de diversos parâmetros do escoamento (vazões, geometria, propriedades dos fluidos e condições de operação).

Como mencionado, o escoamento em golfadas é altamente intermitente e tem como principal característica uma sucessão de golfadas de líquido separadas por bolhas de dimensões da ordem do diâmetro do duto, conforme ilustrado na Figura 1.3, escoando com frequência variável. As golfadas viajam a diferentes velocidades podendo crescer, coalescer ou colapsar. A natureza intermitente deste padrão de escoamento dificulta muito a elaboração de modelos para determinar as suas características.

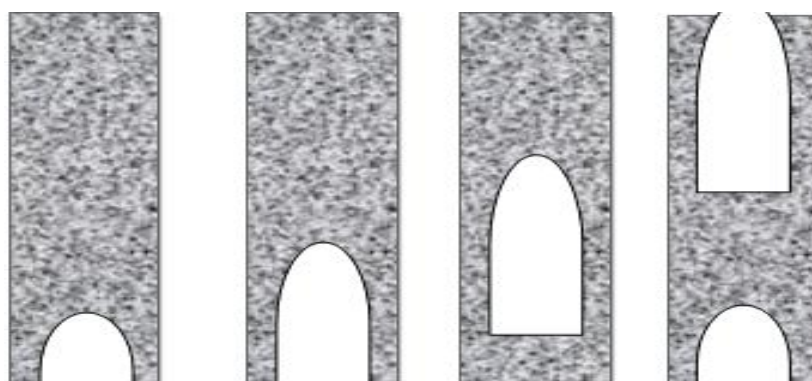


Figura – 1.3. Padrão Intermitente

O escoamento em golfadas é intrinsecamente tridimensional, no que diz respeito à turbulência, ao arranjo das fases e a escoamentos secundários. No entanto, o esforço computacional envolvido na resolução detalhada do escoamento torna possível apenas a simulação de dutos curtos ou pequenos trechos de tubulações industriais.

Em linhas de petróleo, por exemplo, as quais podem se estender por quilômetros, assume-se geralmente que as maiores variações se dão na direção axial, tornando-se conveniente fazer uma aproximação considerando o escoamento como uni-dimensional. A forma 1D do modelo de dois fluidos é obtida a partir da aplicação de um processo de média na seção transversal do duto. Esta aproximação leva naturalmente à perda de informações relativas à variações transversais à direção principal do escoamento, além da transferência de massa, quantidade de movimento e energia entre as fases. A maneira através da qual se modela os termos de fechamento terá efeito determinante no caráter matemático das equações constituintes do modelo. Assim, sob determinadas condições poderá haver um mal-condicionamento do sistema caracterizado pelo Modelo de Dois Fluidos.

Como será discutido no presente trabalho, os casos que envolvem tubulações verticais são particularmente problemáticos e soluções bem estabelecidas ainda não se encontram disponíveis na literatura. Porém, existem algumas propostas preliminares para estabilizar o sistema de equações (Issa e Montini, 2010; Montini, 2011), as quais foram investigadas principalmente para tubulações horizontais. O uso de modelos de fechamento similares em dutos verticais será avaliado neste estudo.

1.2 Grandezas Características da Golfada

A unidade de golfada consiste de uma região de pistão de líquido de comprimento L_s e de uma bolha de gás (bolha de Taylor) ao redor da qual escoa um filme líquido de comprimento L_b , conforme ilustrado na Fig. 1.4. O comprimento da golfada unitária é $L_u = L_s + L_b$. A velocidade de translação da golfada líquida é U_s , enquanto que a velocidade de translação do filme ou velocidade com a qual o nariz da bolha viaja na tubulação é U_b .

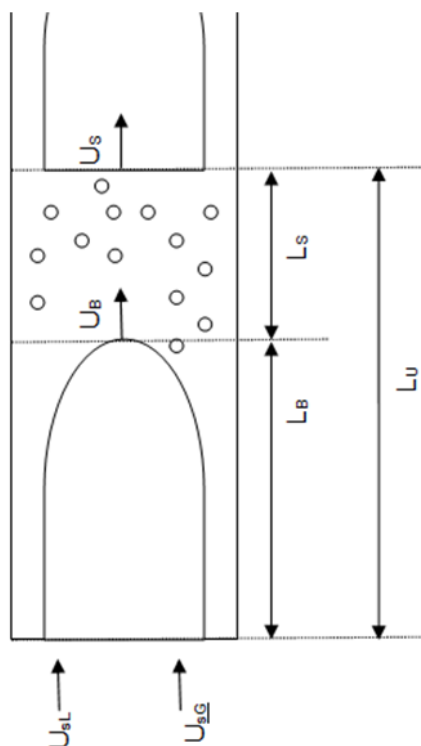


Figura 1.4 – Unidade básica de uma golfada.

As frequências ν_s de passagem das golfadas são dadas como o número de golfadas que passam por um determinado ponto fixo da tubulação, por um

intervalo de tempo.

Define-se como velocidade superficial, a velocidade da fase, se somente esta escoasse na tubulação. Dessa forma, a velocidade superficial do gás é $U_{SG} = \dot{V}_G / A$ e a do líquido é $U_{SL} = \dot{V}_L / A$, onde $\dot{V}$ é a vazão volumétrica, A é a área da seção transversal e os subscritos G e L correspondem ao gás e líquido, respectivamente. A velocidade de mistura U_M , é igual à soma das velocidades superficiais, $U_M = U_{SL} + U_{SG}$.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a modelagem e simulação do escoamento bifásico, vertical ascendente, unidimensional, no padrão de golfada, utilizando o Modelo de Dois Fluidos.

Para prever o escoamento ao longo de tubulações verticais, adaptou-se um código inicialmente desenvolvido por Ortega (2004) e posteriormente aprimorado por Carneiro (2006) para prever a formação de golfadas a partir do regime estratificado em tubulações horizontais e levemente inclinadas. Uma vez que o padrão de escoamento estratificado é inexistente em tubulações verticais, adaptou-se a metodologia, considerando-se a formação do regime intermitente a partir de um escoamento anular.

Uma análise das características e estabilidade do Modelo de Dois Fluidos unidimensional foi realizada. Analisou-se a influência de diferentes parâmetros visando ampliar a região em que o sistema de equações é bem posto.

Visando validar a metodologia e avaliar a qualidade dos resultados obtidos, estes são comparados com dados experimentais existentes na literatura para escoamentos água e ar.

1.4 Organização do Trabalho

Uma revisão bibliográfica é apresentada no Capítulo 2, permitindo identificar as contribuições do presente trabalho. No Capítulo 3 é apresentada a modelagem matemática para o Modelo de Dois Fluidos unidimensional, bem como as relações de fechamento utilizadas. Ainda neste capítulo é apresentada uma análise de hiperbolicidade do Modelo de Dois Fluidos e os critérios que devem ser satisfeitos para se obter o bom condicionamento do sistema de equações.

No Capítulo 4 é apresentado o método de solução numérica detalhando as técnicas para discretizar as equações através do método de volumes finitos, assim como o procedimento de solução utilizado.

No Capítulo 5, realiza-se uma comparação dos resultados numéricos obtidos com dados experimentais existentes na literatura para escoamentos ascendentes de água e ar em tubulações de diferentes diâmetros e comprimentos.

A conclusão e algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 6.