

1 Introdução

Escoamentos multifásicos podem ser encontrados em diversos sistemas utilizados pelo homem como na geração de energia nuclear, destilação, processamento de alimentos, produção e transporte de óleo e gás e muitos outros.

O entendimento do comportamento físico destes sistemas é de vital importância na otimização dos processos, na segurança e no projeto dos equipamentos envolvidos. Como exemplo, o resfriamento à água dos reatores nucleares, onde a passagem da água ao estado vapor e o seu escoamento em conjunto com a água tem grande influência no desempenho do sistema, podendo causar superaquecimento do mesmo.

Escoamento multifásico também é comumente encontrado na indústria do petróleo, como por exemplo, no transporte da produção dos poços para as plataformas. A Figura 1.1 ilustra um esquema simplificado de produção *offshore*. Os poços são instalados nos reservatórios e cada reservatório possui características próprias a respeito das quantidades de gás, óleo e água que são produzidos. A produção de gás e água pode ser considerada inerente à produção do óleo, deste modo, os poços sempre produzem óleo, gás e água em proporções diversas que variam para cada poço e cada reservatório.

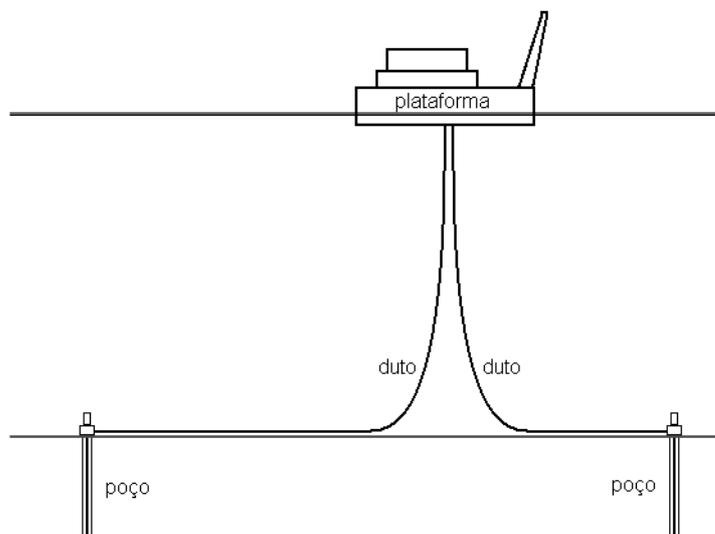


Figura 1.1 – Esquemático de produção *offshore*

A produção de óleo e gás envolve o transporte simultâneo dos mesmos até uma unidade de processamento onde é realizada a separação das fases líquida e gasosa. Geralmente as fases são separadas em uma plataforma e são posteriormente conduzidas para uma base terrestre.

No Brasil, os campos de petróleo *offshore* são responsáveis por cerca de 85% da produção de óleo bruto, e estão situados em sua maioria na Bacia de Campos. Deste modo, o escoamento multifásico do poço à plataforma, ou diretamente à terra consiste em uma variável importante na produção dos poços nacionais; sendo assim, seu estudo é de extrema importância para o planejamento estratégico da produção e para o projeto dos equipamentos envolvidos na mesma.

Escoamentos multifásicos em tubulações podem assumir diferentes configurações geométricas que foram divididas em alguns padrões básicos de acordo com o arranjo de cada fase (Wallis, 1969). De um modo geral os padrões podem ser agrupados em duas categorias: os padrões de escoamento disperso e de escoamento separado. Os padrões de escoamento disperso possuem partículas discretas, gotas ou bolhas com fronteira de difícil delimitação imersas em um volume contínuo da outra fase. Os padrões de escoamento separado possuem duas ou mais correntes contínuas de diferentes fluidos separados por interfaces de fácil delimitação.

Ao longo do caminho entre o poço e a plataforma, as configurações do escoamento podem ser alteradas, passando de um padrão para outro, ou seja, poderá haver uma sucessão de padrões. O tipo de padrão em cada trecho do duto será dependente do diâmetro e inclinação do duto, das frações volumétricas entre as fases no trecho de interesse e das propriedades das fases. Cada padrão tem influência direta sobre parâmetros importantes na previsão de um escoamento tais como a perda de carga e a troca de calor com o ambiente.

Dentre os diversos padrões para o caso do escoamento em duto horizontal podem ser encontrados os seguintes tipos de padrões: estratificado plano ou ondulado (*Stratified Flow*), bolhas alongadas (*Elongated Bubble Flow*), golfadas (*Slug Flow*), bolhas dispersas (*Dispersed Bubble Flow*) e anular (*Annular Flow*). A Figura 1.2 ilustra os padrões básicos para escoamento em duto horizontal.

Já para tubulações verticais, podem ser encontrados os regimes no padrão de bolhas, bolhas dispersas e os padrões intermitentes como Golfada e *Churn* (caótico), assim como o padrão anular, como ilustrado na Fig. 1.3. Toumi (1999)

cita um terceiro grupo chamado de *Mixed Flow*, onde seriam encontrados padrões intermediários entre os classificados como disperso e separado.

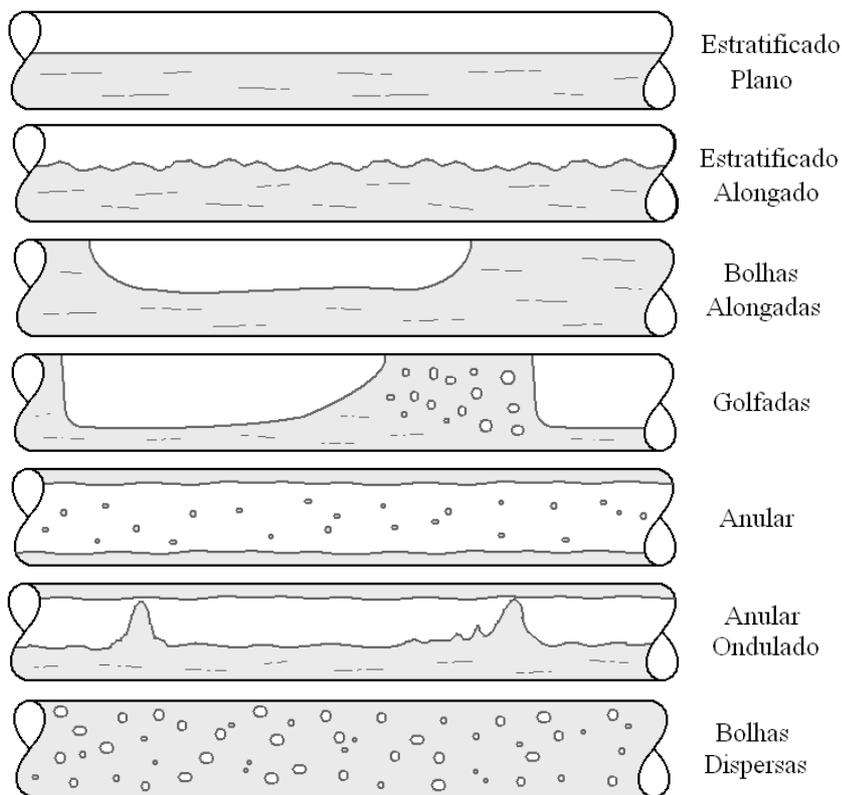


Figura 1.2 - Padrões de escoamento em tubulações horizontais

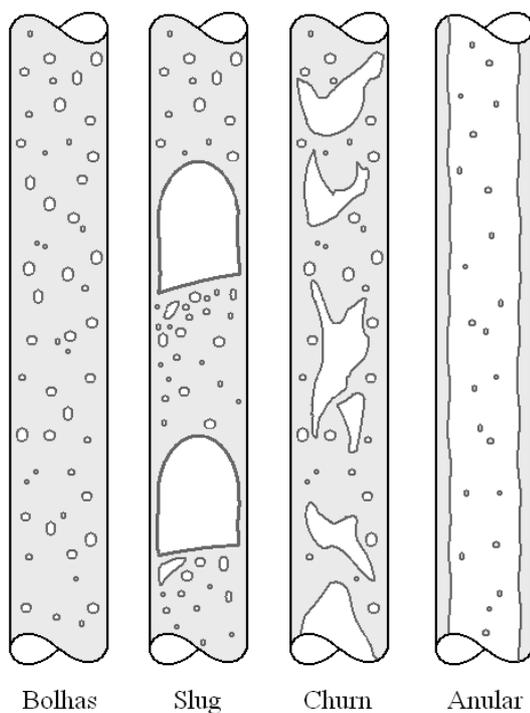


Figura 1.3 - Padrões de escoamento em tubulações verticais

O escoamento de bolhas dispensas geralmente ocorre em sistemas com altas vazões de líquido para uma larga faixa de vazões de gás. Neste padrão de escoamento, pequenas bolhas estão dispersas em uma fase líquida contínua e as bolhas tendem a se acumular na parte superior do tubo (no caso do escoamento horizontal) devido ao efeito de flutuação das mesmas.

Em sistemas horizontais com baixas vazões de ambas as fases (líquida e gasosa), o efeito gravitacional causa a separação total entre as mesmas. Desta forma, a fase líquida escoar pela parte de baixo do duto enquanto a fase gasosa escoar pela parte superior. Caso a velocidade do gás aumente, a instabilidade entre a interface das fases cresce até que surjam ondulações na mesma.

O aumento na velocidade do gás pode gerar ondulações que ocupem a totalidade da seção do duto. Quando isto ocorre há uma mudança do padrão de escoamento para o padrão de golfadas. O volume de líquido que bloqueia a seção do duto é acelerado pelo escoamento do gás carregando consigo parte do filme de líquido presente à frente do mesmo e atrás da golfada se desenvolve uma bolha (*Elongated Bubble*) que segue o mesmo. A sucessão de pistões de líquido e bolhas tende a um regime estatisticamente permanente onde o escoamento passa a possuir variáveis aproximadamente constantes com o tempo, como por exemplo a frequência de passagem das bolhas em um determinado ponto.

Quando ocorrem vazões muito altas de gás, o mesmo tende a ocupar a parte central do duto deixando um anel líquido (*annulus*) em torno do mesmo. No caso de uma configuração horizontal, a camada de líquido tende a ser maior na parte de baixo do duto.

Existem duas maneiras de se estudar o comportamento de escoamentos multifásicos: experimentalmente (correlações empíricas) ou de forma teórica. A abordagem experimental é muito utilizada, porém possui a limitação de ser válida somente se as condições do experimento forem mantidas, conseqüentemente, a análise de escoamentos multifásicos é dependente de modelos teóricos, que em geral para serem viabilizados precisam ser resolvidos computacionalmente.

Escoamentos bifásicos estão relacionados a um movimento relativo entre as fases, o que implica que para analisar detalhadamente o escoamento, é necessário considerar a interação entre elas. Em geral, os modelos são desenvolvidos visando a previsão de um padrão particular de escoamento.

Os modelos utilizados para escoamento multifásico podem ser divididos em

modelos de fases separadas (*Multi-Fluid Models*) e modelos de mistura (*Mixture Models*). Os modelos de fases separadas envolvem a descrição dos campos de velocidade de cada fase e são mais adequados para escoamento separado como no escoamento Estratificado e Anular. Já os modelos de mistura são mais adequados aos padrões de escoamento disperso onde a interação entre as fases é grande como acontece no padrão de Bolhas Dispersas. Neste modelo não há diferenciação entre as fases e o escoamento é tratado como uma mistura (pseudofluido). A equação da quantidade de movimento é formulada para a mistura e não para cada fase.

Dentre os modelos de mistura, o modelo mais simples é o *Modelo Homôgeneo*, o qual considera que as duas fases escoam com a mesma velocidade. Já o *Modelo de Deslizamento* ou *Drift-Flux Model* se baseia no movimento relativo entre as fases, chamado de deslizamento, ou escorregamento (*Drift*). Neste caso há a necessidade de se incorporar uma equação constitutiva para descrever o escorregamento entre as fases.

A previsão de escoamentos multifásicos em tubulações de petróleo é muito importante, porém muito complicada, especialmente devido à complexa interação entre as diversas fases escoando. Desta forma, a solução deste tipo de escoamento demanda um esforço computacional muito elevado e normalmente soluções simplificadas são desejáveis, desde que seja respeitado um compromisso entre acurácia e rapidez. Visando compreender os mecanismos fundamentais governantes, muitas vezes é suficiente considerar apenas duas fases escoando; i.e., líquido e gás.

Para o caso do escoamento em dutos longos, onde a dimensão do comprimento é predominante em relação às demais, é possível economizar esforço computacional utilizando-se uma abordagem unidimensional do problema.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho consiste na modelagem e simulação de escoamentos bifásicos em dutos utilizando-se o *Modelo de Deslizamento*, ou simplesmente *Modelo Drift*.

O *Modelo de Deslizamento* é validado utilizando-se casos teste presentes na literatura. O objetivo destes testes é analisar o comportamento do modelo frente a

diversas situações consideradas críticas para o escoamento bifásico, como por exemplo, a transição de um escoamento bifásico para um escoamento monofásico e a capacidade do modelo se manter estável utilizando correlações complexas para o escorregamento entre as fases.

Após a validação com os casos teste analisa-se um escoamento no regime de *Golfada Severa* (*Severe Slug*). Comparações são realizadas com dados disponíveis na literatura, ilustrando o bom desempenho da metodologia implementada.

1.2 Organização do Manuscrito

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, na qual este primeiro capítulo corresponde a Introdução. Na Introdução ressaltou-se a importância e complexidade do escoamento multifásico na indústria petrolífera, e definiu-se o objetivo do presente trabalho. A revisão bibliográfica é apresentada no Capítulo 2.

O terceiro capítulo corresponde à modelagem matemática, onde são apresentadas as equações de conservação para o *Modelo de Drift* e demais considerações utilizadas para a modelagem do escoamento bifásico.

O método numérico é apresentado no capítulo quatro, o qual descreve a obtenção das equações discretizadas, assim como o método de solução das mesmas. Informações adicionais sobre o Método Numérico são apresentadas no Apêndice.

O Capítulo 5 se divide em duas partes: validação e testes com golfada severa (*severe slug*). Na validação da metodologia são avaliados cinco casos de teste e comparados com soluções disponíveis na literatura. A avaliação do escoamento em regime de golfada severa é efetuada comparando-se os resultados obtidos com dados de simulações numéricas de dois artigos diferentes.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões referentes aos casos analisados, assim como sugestões e propostas para futuros testes visando ampliar a aplicação do modelo validado.