

1 Introdução

Sistemas de produção de petróleo podem ser caracterizados pelo escoamento de um ou mais fluidos, apresentando diversas fases, desde os poços de petróleo até a planta onde será processado, através de tubulações horizontais (ou *flowlines*) e verticais (ou *risers*), como ilustrado na Fig. 1.1. De forma simplificada, podemos dizer que o escoamento multifásico encontrado nos sistemas de produção de petróleo é constituído de gás, óleo e água, além de eventuais partículas de sólidos, como areais por exemplo. É comum que na indústria do petróleo pelo menos duas fases coexistam. De forma geral essas fases são formadas pelo óleo e gás que sai de solução do óleo, no caso de um campo de petróleo, ou pelo gás e condensado, no caso de um campo de gás.

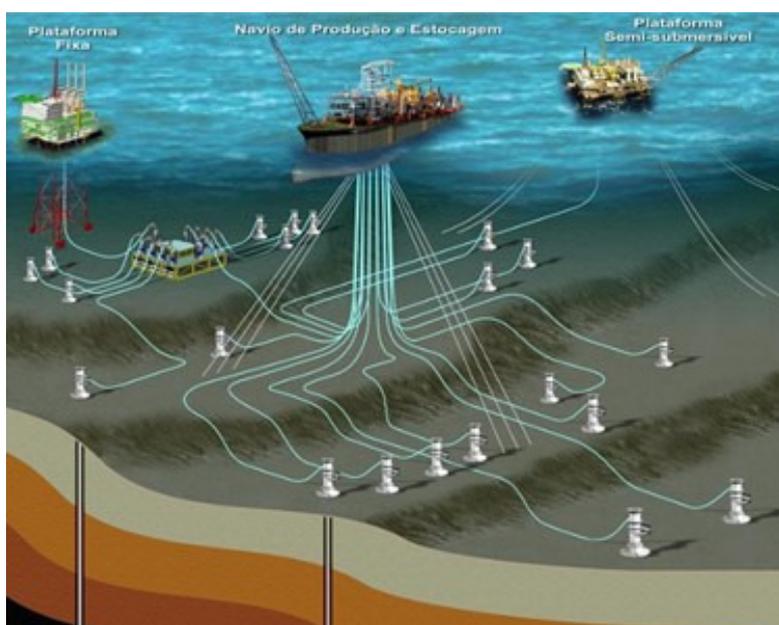


Figura 1.1 - Esquema *offshore* de produção de petróleo.

No cenário brasileiro, mais de 90% do petróleo produzido provém de sistemas *offshore* (ANP, 2014). Ao longo dos últimos anos o País tem se direcionado para uma realidade de exploração e produção ainda mais desafiadora, que é trabalhar em águas profundas (400-1.000 m) e ultra profundas (> 1.000 m). Até a década de 80, a profundidade da água na produção de petróleo submarino

havia atingindo 200m. Atualmente, a profundidade atingida chega a 3.000m e, em particular devido à descoberta dos campos de pré-sal (Fig. 1.2), este horizonte tende a ser ainda mais desafiador. A camada pré-sal é uma região rochosa com potencial de gerar e acumular óleo, que existe sob uma extensa camada de sal de até 2.000m de espessura. A descoberta da camada pré-sal perto do litoral brasileiro lançou um grande desafio para a comunidade para desenvolver novas tecnologias, uma vez que a distância total da superfície do mar até os reservatórios de petróleo sob a camada de sal pode chegar a 7.000 metros. Operações complexas e dispendiosas são necessárias para a produção em lâmina d'água elevada.

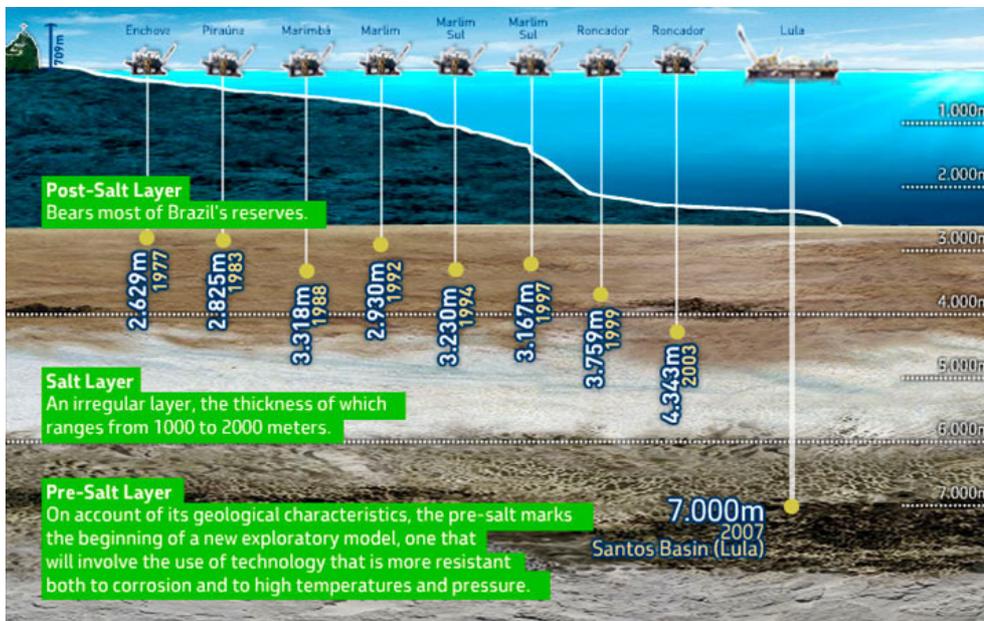


Figura 1.2 – Aumento da produção brasileira em águas profundas (Petrobras, 2014).

Com o aumento da profundidade, as pressões se tornam cada vez maiores. Adicionalmente, a temperatura no leito marinho é baixa, aproximadamente igual a 4°C, aumentando de forma considerável a troca térmica. Nestes cenários, problemas como formação de hidratos (Fig. 1.3a) e deposição de parafinas (Fig. 1.3b) nos dutos se tornam mais significativos em função das condições de pressão e temperatura mais extremas encontradas, podendo mesmo levar a paradas de produção por bloqueio dos dutos ou a manobras de limpeza específicas, toda vez que ocorrer uma parada. O conhecimento das condições de escoamento se torna essencial, não só para projetar linhas adequadas, como para auxiliar na operação das linhas, minimizando as operações de passagens de *pigs* (dispositivos

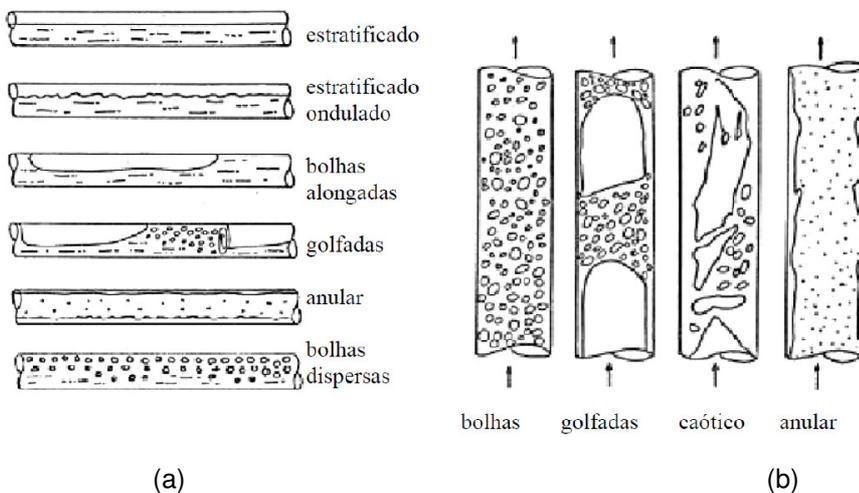
utilizados para desobstruir a tubulação) e paradas de produção.



(a) Bloqueio por formação de hidrato (b) Bloqueio por deposição de parafina

Figura 1.3 – Bloqueio de duto (Petrobras).

A grande dificuldade no tratamento de um regime de escoamento multifásico está no fato de que os balanços de massa, quantidade de movimento e energia são sensíveis à distribuição das fases no escoamento (Stuckenbruck, 2011), os quais dependem fortemente da geometria, vazões, condições de operação (pressão e temperatura) e propriedades dos fluidos. A Fig. 1.4 ilustra alguns tipos de arranjos encontrados em tubulações horizontais e verticais. No escoamento horizontal podem ser encontrados diferentes tipos de regime, são eles: estratificado e estratificado ondulado, bolhas alongadas, golfadas, anular e bolhas dispersas. Quando comparamos com o escoamento vertical, duas grandes diferenças são observadas, existe a presença de um novo tipo de regime, o caótico, e a ausência do regime estratificado (fisicamente inviável nesta geometria).



(a)

(b)

Figura 1.4 -Regimes de escoamento multifásico: (a) horizontal (b) vertical.
Fonte: Carneiro (2006).

A identificação dos padrões de escoamento que ocorrem em uma tubulação pode ser realizada através da visualização do escoamento, obtida através do emprego de instrumentos especiais para captar o comportamento das fases.

A complexidade do acoplamento entre o escoamento das fases e a geometria da tubulação é ainda um desafio na área de escoamento multifásico.

Para facilitar identificar os padrões de escoamento, mapas de padrão em função das variáveis do escoamento podem ser utilizados. Dois dos mais tradicionais mapas de arranjo, desenvolvido nos estudos de Mandhane et al. (1974) e Taitel e Dukler (1976), são apresentados Fig. 1.5.

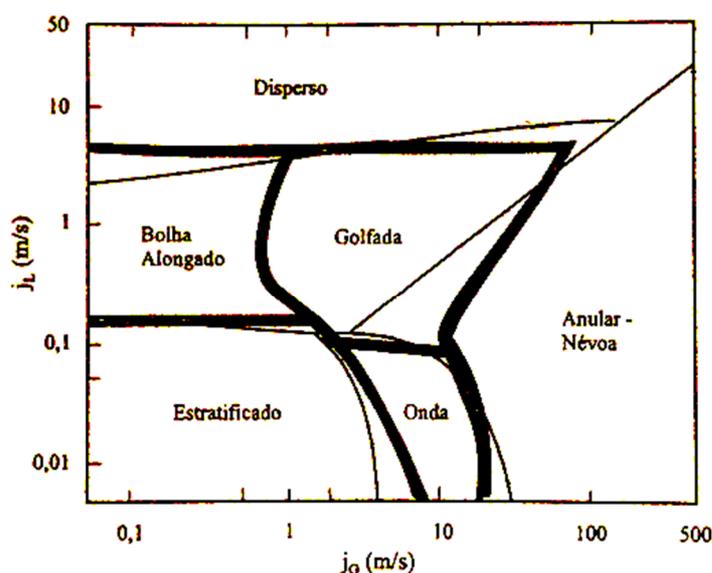


Figura 1.5 - Mapa de arranjo de fases. Fonte: Stuckenbruck (2011).

No mapa de padrão apresentado na Fig. 1.5, as linhas finas correspondem aos dados experimentais obtidos por Mandhane et al. (1974) e as linhas grossas correspondem aos dados teóricos estipulados por Taitel e Dukler (1976). As velocidades superficiais da fase gasosa e da fase líquida são representadas, respectivamente, por j_G e j_L . Velocidades superficiais são definidas como a razão da vazão da fase k , pela área transversal da tubulação.

Os regimes de escoamento são definidos de acordo com as velocidades superficiais da fase gasosa e da fase líquida. É interessante observar que os limites teóricos coincidem quase que exatamente com os dados experimentais.

O foco deste estudo será no escoamento em regime anular em dutos horizontais devido ao seu grande interesse para a indústria, uma vez que este regime de escoamento é encontrado com muita frequência. O escoamento anular

ocorre quando as vazões de gás são elevadas, situação típica, por exemplo, de campos de produção de gás e condensado. Este regime é caracterizado pela formação de um filme de líquido em torno da parede do duto, com a fase gasosa escoando pela área central do duto e, portanto, não tocando a parede. Em dutos horizontais, devido à efeitos gravitacionais, a distribuição da espessura de líquido ao redor da circunferência do duto não é uniforme, sendo mais espessa na parte inferior do duto. Como pode ser observado, na ilustração da Fig. 1.4, o filme de líquido apresenta ondulações e a fase gasosa gotículas de líquido. Apesar de sua grande importância para o escoamento anular, o fenômeno de entranhamento de líquido do filme de líquido para a fase gasosa não será abordado no presente trabalho.

Analisando o mapa de padrão na Fig. 1.5, nota-se que o regime de escoamento anular encontra-se na parte direita do mapa de arranjo, podendo ser proveniente da transição de três diferentes padrões de escoamento (ondas, golfadas e disperso) de acordo com a variação das velocidades superficiais das fases. Este padrão de escoamento ocorre para elevadas velocidades de gás e, a depender da velocidade do líquido, diferentes tipos de ondulações podem ser observados no filme de líquido (Emamzadeh, 2012).

Do ponto de visto operacional, é de extrema importância uma previsão realista do tipo (ou tipos, no caso de transição de regimes) de escoamento que podem ocorrer ao longo da tubulação para não ocorrer impacto na planta de processo. O regime de golfada, caracterizado pela alternância (regular ou irregular) de líquido e gás ao longo do escoamento, é particularmente indesejado no *topside*. Entre os principais problemas ocasionados por este regime de escoamento intermitente podemos citar: intermitência na produção, desgaste nos equipamentos e equipamentos extra dimensionados. Quando o regime no padrão de golfadas ocorre, surgem variações na pressão e na vazão dos fluidos, tanto nas tubulações quanto nos equipamentos da planta de processamento, o que compromete a produção. Em casos extremos, a variação brusca de alguns parâmetros pode levar à parada de produção, o que é altamente indesejável. O regime anular, por sua vez, também deve ser tratado com muita atenção pois a diminuição da velocidade da fase gasosa pode acarretar na transição para o regime de golfada. Além disso, as oscilações ao longo do filme de líquido devem ser tratadas com cuidado.

Portanto, para uma previsão assertiva dos regimes de escoamento é importante modelar ambas as fases da forma mais realista possível. No caso da fase gasosa, isto corresponde a modelar o gás como real através da implementação de equações de estado para prever seu comportamento em função da composição química da fase para diferentes pares de pressão e temperatura.

A maior parte dos trabalhos encontrados na literatura utilizam o par ar-água para fazer estudos/previsões de escoamento. Este trabalho se propõe a dar uma ênfase mais realista e prática a simulações de escoamento multifásico na indústria do petróleo uma vez que o código desenvolvido tem por finalidade ser utilizado para simular gás natural, cujas propriedades são determinadas a partir de sua composição e óleo (com propriedades termodinâmicas constantes).

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a modelagem e simulação de escoamento bifásico em regime anular em tubulações horizontais utilizando o Modelo e Dois Fluidos, com e sem transferência de calor e com propriedades ideais ou reais para a fase gasosa.

Para alcançar este objetivo, utilizou-se como ponto de partida um código computacional cujas rotinas foram desenvolvidas pelo grupo de CFD da PUC-Rio. Tratava-se de um modelo térmico baseado nas equações de estado de gás ideal, capaz de prever regimes estratificado e intermitente.

Neste trabalho, o código computacional foi aprimorado com a introdução de equações de estado para representar o comportamento real do gás, juntamente com a dependência da entalpia na pressão. Além disso, a equação da energia foi alterada para a obtenção direta da temperatura através de sua solução e não mais em termos de entalpia, como no código original. Além disso, foram introduzidas Equações de fechamento adequadas ao escoamento no padrão anular.

Visando avaliar a robustez da metodologia, escoamentos ar-água tanto no regime de golfadas como anular foram investigados e comparados com soluções disponíveis na literatura.

Testes de validação da modelagem das equações de estado foram realizados, através de comparações com os resultados obtidos através de um programa de cálculo de propriedades termodinâmicas. Avaliou-se ainda o desempenho de

diferentes relações de fechamento, para a previsão de escoamento no padrão anular.

Uma vez que nas situações típicas da indústria de petróleo, encontra-se hidrocarbonetos altamente pressurizados escoando ao longo de tubulações de grande diâmetro e comprimento, especial atenção foi dada a este tipo de escoamento.

1.2 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica de modo a situar o trabalho no estado da arte existente. Foi realizada uma vasta pesquisa na literatura disponível relativa à simulação do escoamento bifásico em dutos no regime de escoamento anular, com ênfase na parte térmica do escoamento e na introdução do conceito de gás real.

No Capítulo 3 é apresentada a descrição matemática do Modelo de Dois Fluidos bem como as relações de fechamento necessárias para a solução de suas equações governantes. São introduzidas a Equação de Estado e relações utilizadas para o cálculo das propriedades termodinâmicas do gás natural. Nesta seção é introduzido o conceito de gás real.

O detalhamento na discretização de tais equações de acordo com o método numérico de volumes finitos e o procedimento de solução aplicado é mostrado no Capítulo 4.

O Capítulo 5 é focado no estudo do escoamento de ar-água com e sem troca de calor, no padrão em golfadas e anular. Comparações com dados experimentais e numéricos encontrados na literatura são apresentadas em ambos os casos. O estudo do escoamento de um hidrocarboneto na fase líquida e gasosa escoando ao longo da tubulação é apresentado no Capítulo 6.

A conclusão é apresentada no Capítulo 7, onde também são feitas sugestões e recomendações para dar continuidade do trabalho desenvolvido.