

1 Introdução

Em algumas situações durante a vida de um duto é necessário remover o produto de seu interior. A primeira é logo após a sua construção, na fase de condicionamento, quando é mandatório para gasodutos e prática usual para oleodutos, o seu esvaziamento e secagem após a execução do teste hidrostático. Em outros momentos, como durante períodos de manutenção, pode ser necessário o esvaziamento do duto para permitir a execução de reparos e troca de trechos. Ou ainda em sua desativação, quando o produto é removido e o duto deve ser deixado com gás inerte (nitrogênio).

Com a malha dutoviária de muitos países envelhecida, muitas vezes tendo sofrido pouca manutenção e considerando a crescente preocupação com o meio ambiente, as operadoras de dutos têm investido em programas de reabilitação e de gerenciamento da integridade com o objetivo de estender a vida útil de seus dutos. A melhoria na qualidade das ferramentas de inspeção interna, tais como *pigs* instrumentados de alta resolução, tem colaborado para se obter um retrato mais fiel da existência de corrosão, trincas, defeitos de fabricação, amassamentos, etc. Se por um lado, a informação mais precisa vinda da inspeção, permite uma avaliação mais precisa dos defeitos, evitando reparos desnecessários, por outro lado, pode mostrar um retrato crítico das condições de integridade do duto, levando à necessidade de executar um grande número de reparos.

Nos oleodutos, o deslocamento do produto pode ser feito com água, ar comprimido ou nitrogênio, podendo ser inserida entre o produto a ser deslocado e o produto usado no deslocamento, uma batelada de produto químico para melhorar a limpeza. Na interface entre os produtos é colocado um *pig* separador. Os reparos são então executados, e em seguida, é feito o teste hidrostático. Por fim, inicia-se o bombeamento do óleo para remoção da água usada no teste de pressão e retorno do duto à sua operação normal.

O mais usual é a utilização de água para a operação de retirada do óleo contido em um duto, principalmente devido ao seu baixo custo relativo ao do

nitrogênio. Porém, dependendo das características do duto, tais como diâmetro, perfil e dos trechos a serem trocados - quantidade, extensão e localização - o descarte de água se torna logisticamente inviável ou mais oneroso do que a injeção de nitrogênio para esvaziamento do oleoduto.

Os procedimentos envolvidos em uma operação de remoção da água utilizada no teste hidrostático, na fase de construção de um duto, já estão bastante consolidados. Além disso, o teste hidrostático é executado por trechos e antes da instalação de válvulas e acessórios, o que flexibiliza o planejamento de tal operação. Já, uma operação para deslocamento do óleo por injeção de nitrogênio, visando troca de trechos da tubulação, é executada em geral em toda a extensão do duto de uma só vez ou em trechos entre estações de bombeamento, estando as válvulas e acessórios instalados. Isto faz com que o seu planejamento nem sempre seja trivial. Um dos pontos que demanda atenção diz respeito às pressões operacionais, as quais podem chegar a valores acima do esperado em um duto que esteja transportando apenas líquido. Como exemplo, pode-se imaginar um trecho de oleoduto com o perfil planialtimétrico representado na Figura 1.1.

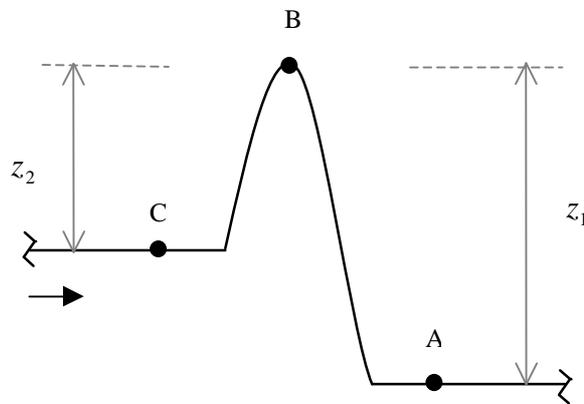


Figura 1.1 – Perfil típico de um trecho de oleoduto

Se for considerado que o trecho da tubulação está cheio de óleo e que a perda de carga entre os pontos A e C é desprezível, as pressões internas em A e B podem ser expressas como,

$$P_B = P_C - \mathbf{r} g z_2 \quad \text{e} \quad P_A = P_C + \mathbf{r} g (z_1 - z_2) \quad (1.1)$$

onde, P é a pressão, \mathbf{r} a massa específica, g a aceleração gravidade e z a diferença entre cotas como ilustrado na Figura 1.1.

Considere agora, uma segunda situação em que o trecho contém gás à montante do ponto alto B e óleo à jusante. Como a massa específica do gás é muito pequena, as pressões em A e B podem ser expressas como,

$$P_B \approx P_C \quad \text{e} \quad P_A = P_C + \mathbf{r} g z_1 \quad (1.2)$$

Pode-se notar que as pressões tanto no ponto A como no ponto B ficam acrescidas de $\mathbf{r} g z_2$.

Apesar da análise simplificada, observa-se a importância da determinação criteriosa das condições operacionais a que um oleoduto pode ser submetido durante uma operação que envolva produtos nas fases líquida e gasosa, de forma a mantê-las dentro dos limites de projeto e das condições atuais de integridade estrutural do duto.

É sempre desejável que o tempo de parada de um duto para manutenção seja o menor possível, minimizando a perda de receita pela não entrega do produto. Uma operação de esvaziamento de um oleoduto é dita eficiente quando além de se remover o produto do duto, este é deixado inertizado. A vantagem deste procedimento está na possibilidade de se executar o corte do tubo a quente, reduzindo o tempo de reparo quando comparado com o corte a frio. Para tal, o *pig* separador deve ser o mais estanque possível, em geral é usado um *pig* de corpo integral de poliuretano (*solid cast*) conhecido como *flexipig*. As Figuras 1.2 e 1.3 mostram respectivamente as vistas lateral e posterior de um *flexipig* de 30". Observa-se na Figura 1.3 que o corpo do *pig* é vazado, o que faz com que o corpo seja expandido contra a parede do tubo devido à pressão do fluido impulsor, aumentando assim a eficiência da vedação do *pig*. A estanqueidade do *pig* está relacionada não só ao seu projeto construtivo, como também à velocidade com que se movimenta ao longo do duto. A maior velocidade, reduz a eficiência e aumenta a possibilidade de ocorrer danos ao *pig* (Pipeline Research Limited, 2004b; O'Donoghue, 2002). Assim, a velocidade do *pig* é o segundo parâmetro operacional que demanda atenção durante o projeto e execução da operação.

Em dutos que transportam líquido, a velocidade do escoamento do fluido, e por conseqüência a do *pig*, são influenciadas e tendem a aumentar pela ocorrência de um fenômeno conhecido como escoamento em meia cana (*slack line flow*) (Nicholas, 1995).



Figura 1.2 - Vista lateral de um *flexipig* de 30"

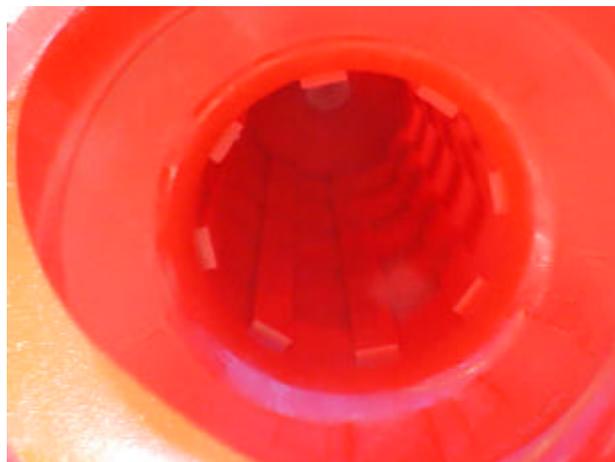


Figura 1.3 - Vista posterior de um *flexipig* de 30"

O escoamento em meia cana é um fenômeno no qual bolhas de vapor são desenvolvidas em pontos nos quais a pressão do duto cai abaixo da pressão de vapor do líquido. O líquido escoar ao longo da geratriz inferior do tubo enquanto uma cavidade na parte superior é mantida com vapor. Caso a pressão do duto aumente acima da pressão de vapor do fluido, o vapor volta ao estado líquido. A Figura 1.4 ilustra o escoamento em um ponto alto de um duto com a coluna aberta.

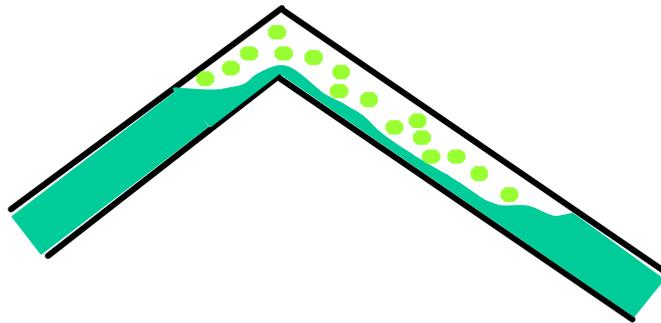


Figura 1.4- Escoamento em um ponto alto de um duto com coluna aberta

O fenômeno ocorre normalmente em regiões montanhosas quando há uma interseção entre o gradiente hidráulico e o perfil planialtimétrico do oleoduto. A Figura 1.5 apresenta uma comparação entre o gradiente hidráulico com escoamento em meia cana e com o duto cheio, onde os segmentos A-B, C-D e E-F estão escoando com a coluna fechada e os segmentos B-C e D-E em meia cana.

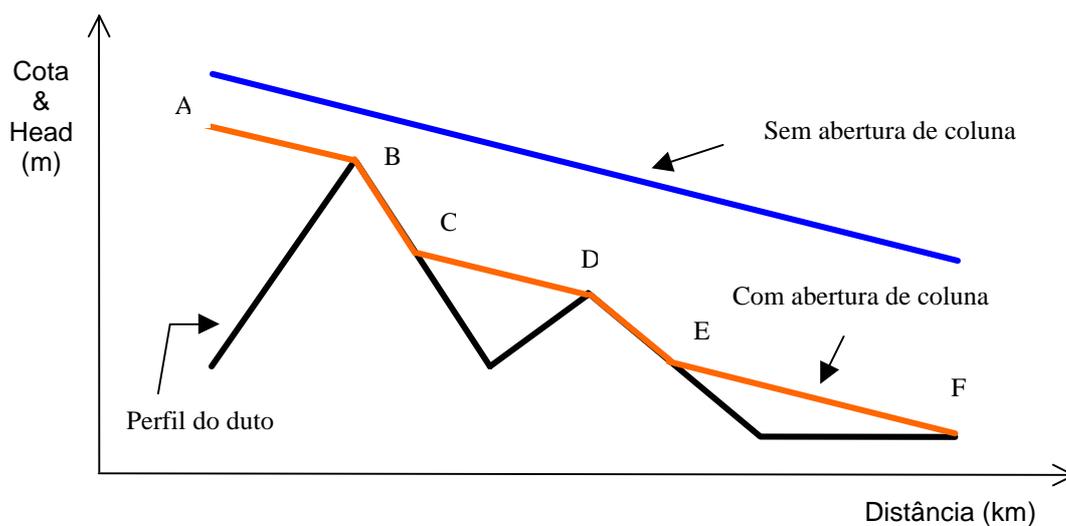


Figura 1.5- Gradiente hidráulico com e sem abertura de coluna

O escoamento em meia cana é indesejável em uma operação de passagem de *pig* e para evitar a sua ocorrência, a pressão em qualquer ponto do duto deve ser mantida acima da pressão de vapor do líquido. Conforme visto, a pressão mínima em determinados pontos de um duto é um terceiro parâmetro operacional a ser observado.

Todos os fatores citados nesta seção fazem com que simuladores de escoamento transiente sejam ferramentas extremamente úteis nas análises necessárias ao planejamento e acompanhamento de uma operação de remoção de líquido com N_2 .

1.1. Motivação

A operação de remoção de produto com N_2 faz parte de um momento em que as operadoras estão voltadas para a integridade estrutural do duto, sendo esta uma operação que está sendo bastante demandada atualmente, porém com tendência a reduzir a sua aplicação conforme a malha de dutos da empresa seja recuperada. Possivelmente, esta é a razão pela qual, apesar da atenção demandada por uma operação deste tipo, encontra-se facilmente simuladores consagrados no mercado, para escoamento transiente multifásico ou monofásico para líquido ou para gás, porém não permitindo simultaneamente líquido e gás na simulação.

A equipe formada pelos Professores Luis Fernando Alzuguir Azevedo, Angela Ourivio Nieckele e Arthur Martins B. Braga do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio desenvolveu um simulador de passagem de *pig* em dutos, para escoamento transiente – PIGSIM (Azevedo et al., 1999). O software por sua vez, foi concebido para escoar tanto líquido como gás, podendo os dois estar no duto ao mesmo tempo, desde que separados por um *pig*. Foi verificado então que algumas melhorias poderiam ser feitas no PIGSIM, no sentido de tornar o *software* mais abrangente e mais amigável, visando auxiliar no planejamento de tais operações.

Uma operação especial de campo sempre conta com situações imprevistas, tais como equipamentos que não funcionam como esperado, premissas que são alteradas na última hora e uma série de outras situações que demandam que sejam feitas simulações adicionais durante a operação, com o intuito de atualizar os parâmetros operacionais a serem monitorados ou controlados, assim como obter

informações complementares que se mostrem necessárias. Estas simulações precisam ser rápidas e dentro de uma exatidão compatível com a instrumentação disponível. Assim, foi verificado que algumas otimizações também podiam ser feitas no sentido de tornar o modelo mais eficiente, vislumbrando análises a serem realizadas no campo durante o acompanhamento da operação.

1.2.

Revisão bibliográfica

A pesquisa bibliográfica foi subdividida em três partes. A primeira engloba uma pesquisa sobre *softwares* comerciais. A segunda abrange o comportamento da movimentação de *pigs* em dutos e modelos computacionais relacionados. Por último, são apresentadas alternativas com o intuito de simplificar a análise hidráulica.

1.2.1.

Softwares Comerciais

Nesta primeira parte da revisão bibliográfica é apresentado um resumo de alguns simuladores disponíveis no mercado.

O “Stoner Pipeline Simulator” (SPS, 2003) é baseado em um modelo hidráulico transiente para a simulação do escoamento dinâmico em fase única de apenas um fluido, uma batelada de fluidos ou uma mistura de fluidos através de um duto. Podem ser simulados dutos de gás ou de líquido, incluindo separação de coluna e escoamento em meia cana (*slack line flow*). Sistemas de escoamento em duas fases não são suportados. Na modelagem podem ser considerados os diversos equipamentos e acessórios que caracterizam o duto, como tubos, bombas, compressores, válvulas, controladores e etc. A simulação pode ser efetuada tanto de forma direta, sem interrupção, como interativamente, respondendo a comandos durante a sua execução. A inicialização pode ser feita a partir da condição estática, do regime permanente ou de um estado armazenado em uma simulação anterior. O *software* permite que seja acompanhado o deslocamento de um *pig* através da tubulação. Entretanto, o *pig* é tratado como dispositivo virtual, em que a sua massa e o atrito entre ele e a tubulação não são considerados, sendo a velocidade do *pig* função da velocidade do fluido e do fator de deslizamento prescrito pelo usuário.

Outro *software* também disponível no mercado destinado à simulação de escoamento transiente monofásico é o “Pipeline Studio” (2004), que pode ser usado tanto para líquido quanto para gás desde que separadamente. O simulador permite o controle de algumas variáveis do processo durante a análise. *Pigs* não são considerados no modelo.

OLGA (Scandpower, 2004) é um simulador para escoamento transiente multifásico de óleo, água e gás em poços e tubulações contendo equipamentos de processo. Diversos sistemas de fluidos podem ser modelados no OLGA: óleo e gás natural, gás úmido, GLP, GNL, fluidos não newtonianos, gás ou líquido monofásicos.

O *software* ProFES (Aspentech, 2004) é uma ferramenta de simulação para a modelagem de escoamento transiente multifásico de hidrocarbonetos em poços, tubulações e seus componentes. O ProFES pode lidar com escoamentos em 2 ou 3 fases, erosão, transporte de areia, inibidor de corrosão, H₂S, condensado e deposição de parafina.

TACITE (IFP, 2004) é usado para simular o escoamento transiente multifásico composicional em instalações de produção de óleo. Permite considerar equipamentos tais como bombas multifásicas, separadores, válvulas, sistemas de alívio e controladores PID, assim como realizar cálculos térmicos, operação com *pig* e etc.

TraFlow_{PACK} (TNO, 2004) é um pacote desenvolvido em MATLAB para a simulação do fluxo macroscópico de tráfego em rodovias, ou de uma forma mais geral, soluciona sistemas lineares de equações diferenciais parciais hiperbólicas. O modelo computacional utiliza uma abordagem por volumes finitos, combinada com técnicas de malha móvel, que consiste em concentrar pontos em um domínio discretizado nas regiões de maior importância e espaçá-los nas regiões de menor detalhe.

F.A.S.T. Piper (Fekete, 2004) simula sistemas de coleta de gás, englobando reservatório, poço e tubulação. Utiliza correlações de perda de carga para escoamento monofásico e multifásico para otimizar e prever a produção dos reservatórios em regimes transiente e pseudo-permanente.

Destes *softwares* os mais populares na indústria de petróleo são os três primeiros: STONER, Pipeline Studio e Olga.

1.2.2. Movimentação de *Pig* e Modelos Computacionais

A segunda parte da pesquisa bibliográfica engloba artigos publicados e trabalhos apresentados em congressos relativos a modelos computacionais desenvolvidos para diferentes condições de escoamento, com o intuito de prever o comportamento da passagem de *pig* em dutos. Nos parágrafos a seguir estão reportados alguns trabalhos grupados por assunto.

A análise desenvolvida para a modelagem de um processo de esvaziamento de um oleoduto longo, usando gás inerte para deslocar um óleo com alto ponto de fluidez é descrita por Webb et al. (1987). Em seu modelo computacional foram consideradas diversas formas de controle usadas na prática em uma operação de deslocamento de óleo. Como exemplo, citam a vazão de óleo que pode ser mantida por um ajuste contínuo de uma válvula localizada na saída do duto, como também pela variação da vazão de injeção do gás. Uma operação para remoção de água de um *riser* por injeção de nitrogênio, considerando um *pig* na interface entre os dois produtos, é investigada por Nieckele et al. (1998). O modelo desenvolvido resolve por um esquema de diferenças finitas a equação que representa o balanço de forças no *pig* juntamente com as equações diferenciais que governam a conservação de massa e da quantidade de movimento linear, para um escoamento compressível e isotérmico. A influência da temperatura nesta operação também é estudada por Nieckele et al. (2000a), tendo como conclusão que apesar da temperatura afetar diretamente as propriedades do fluido e como consequência a dinâmica do *pig*, um efeito significativo só é sentido para variações extremas de pressão e temperatura. Vianes Campo & Rachid (1997) investigam a movimentação de um *pig* conduzido por escoamento transiente de um fluido incompressível.

A passagem de *pig* em linhas de gás é um assunto que demanda atenção. Isso se deve à ocorrência de perfis instáveis de velocidade conhecidos como excursões de velocidade (*velocity excursions*), ou seja, são ciclos de rápida aceleração do *pig*, seguida por altas velocidades, resultando por fim na parada repentina do *pig*. Este comportamento é indesejável por tornar a operação com *pig* irregular, ineficiente e potencialmente insegura. Mathews et al. (1997) abordam as causas e os efeitos da ocorrência de excursões de velocidade, bem como

apresentam um resumo de possíveis métodos para mitigar este problema. Modelos com diferentes abordagens foram desenvolvidos para estudar o comportamento de *pigs* em linhas de gás. Nieckele et al. (2000b) apresentam uma análise do movimento de um *pig* contendo furo de *by-pass* em um gasoduto com grandes variações de área, considerando transferência de calor. Em seu modelo computacional são consideradas as forças de pressão desenvolvidas devido ao fluxo através dos furos de *by-pass* do *pig*, a aceleração do *pig* e as forças de contato entre o *pig* e o tubo, assim como permite regimes distintos de atrito em função do *pig* estar parado ou em movimento.

O *Software* “Piglab-Compressible” (Pipeline Research Limited, 2004a) simula operações de passagem de *pig* em gasodutos ou em situações de enchimento e esvaziamento de água durante a fase de pré-comissionamento do duto. Uma análise dinâmica, baseada no método das características, para a movimentação de *pig* em gasodutos é descrita por Kim et al. (2003) e Nguyen et al. (2001). Weingarten et al. (1984) propõem um modelo de escoamento unidimensional *quasi-permanente* para um gasoduto, com o intuito de comparar o desempenho de uma operação para os casos de utilização de um *pig* sólido, sem *by-pass*, e um contendo um furo concêntrico através do corpo do *pig*.

Modelos computacionais foram desenvolvidos por Lima & Yeung (1999, 2002) para a análise da passagem de *pig* em um escoamento transiente bifásico de sistemas *duto-riser* e de poços horizontais de óleo e por Santos et al. (1997) para a análise da dinâmica do *pig* em operações de *pig-lift*.

Tipicamente, as simulações de escoamento transiente se baseiam na solução de equações unidimensionais que governam a conservação de massa e da quantidade de movimento linear. Os dados de entrada destas equações incluem valores mensuráveis diretamente, tais como, comprimento da tubulação, diferenças de elevação, diâmetro interno e condições de contorno do modelo, como também valores que não podem ser medidos diretamente e que precisam ser estimados, por exemplo, o fator de atrito, (Price, 1999). Price (1999) aplica a técnica de estimativa de parâmetros para determinar o fator de atrito efetivo em um gasoduto de alta pressão, durante condições de escoamento transiente. Nesta técnica, os valores das variáveis medidas no tempo, na entrada e saída do duto, através de um sistema supervisor são introduzidos como condição de contorno para um modelo de escoamento transiente. O fator de atrito é então ajustado até

que os dados de saída do modelo estejam em conformidade com os valores medidos no sistema. Mokhatab (2002) avalia este parâmetro por meio de correlações empíricas e apresenta uma equação para aproximação do fator de atrito ajustada para escoamento de gás e válida para números de Reynolds entre 5×10^4 e 5×10^7 .

1.2.3. Simplificação da Análise Hidráulica

Alguns autores se preocupam em reduzir o tempo de uma análise hidráulica feita com o uso de metodologias extremamente detalhadas (Asante et al., 1997). Nesta terceira parte da revisão bibliográfica estão ilustradas algumas alternativas para a simplificação da análise. Bachman & Goodreau (2000) defendem que os modelos de dutos a serem analisados com o uso de simuladores devem ser o mais simples quanto possível, e fazem uma distinção entre o conceito de precisão de um modelo, definido como o seu grau de detalhamento, e exatidão de um modelo, o qual é relacionado ao grau de conformidade de suas medidas com os valores verdadeiros ou padrão. Colocam ainda, que os aplicativos de software para dutos são por sua natureza extremamente precisos, sendo a exatidão do modelo determinada mais pela exatidão dos dados de entrada do que pela precisão numérica do simulador. A abordagem feita por Modisette & Modisette (2001) se refere às diferenças e aplicações de dois tipos de modelagem de escoamento em dutos: transiente e por sucessão de regimes permanentes (*Succession-of-Steady-States* – SSS). Colocam que os modelos baseados em aproximação SSS são, em geral, muito mais fáceis de serem implementados do que os transientes, tendo em contrapartida pior exatidão, e que a conveniência de utilização de um determinado modelo de escoamento depende do uso a ser feito com os resultados obtidos na simulação.

1.3. Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta que possibilite, de forma eficiente, o projeto e o controle operação de passagem de *pig* em dutos. Para alcançar este objetivo é necessário se ter um *software* rápido, eficiente, preciso e capaz de controlar as principais variáveis da operação.

Como visto no início deste capítulo, dependendo da operação a ser realizada, dos produtos, perfil planialtimétrico do duto, limites operacionais e equipamentos envolvidos, se faz necessário diferentes possibilidades de controle para operações com *pig*. Assim, o primeiro objetivo deste trabalho, é a introdução no simulador PIGSIM módulos de controle automático que permitam manter variáveis de interesse dentro de uma faixa desejada, no caso, velocidade do *pig* e pressões máxima e mínima de operação.

Como segundo objetivo, se pretende atuar no *software* de simulação, avaliando e implementando otimizações que o torne mais rápido, mantendo a precisão dos resultados dentro do requerido pelas aplicações. Através da revisão das diferentes rotinas do *software* existente, serão introduzidas melhorias na taxa de convergência, eficiência de cálculos, etc, resultando em uma versão aprimorada do *software* existente.

Uma outra funcionalidade bastante útil que está sendo agregada é o módulo interativo, o qual possibilita que alguns parâmetros sejam alterados durante a rodada, sem que haja interrupção da simulação.

Por fim, os resultados obtidos com o simulador são comparados com um caso real de esvaziamento de um trecho do oleoduto de 30" OSPAR, pertencente à Petrobras, com extensão de 60 km, que liga São Francisco do Sul (Santa Catarina) à Curitiba.

Cabe ressaltar que apesar da motivação do trabalho ser no sentido de dar suporte à operação de deslocamento de óleo de um duto, todas as implementações feitas no *software* são aplicáveis e úteis a qualquer operação de passagem de *pig* que sejam analisadas com o uso do simulador.

1.4. Organização do Trabalho

A seguir, é feito um breve resumo do conteúdo dos capítulos seguintes.

No segundo capítulo são apresentados os modelos desenvolvidos para simulação das características do escoamento transiente de fluidos compressíveis e da dinâmica do *pig*, bem como a metodologia aplicada para controle do processo.

O terceiro capítulo aborda as técnicas numéricas aplicadas na resolução do conjunto de equações que governam o problema. Ao final do capítulo é apresentado um fluxograma com as principais etapas do modelo computacional.

No quarto capítulo são analisados dois exemplos da simulação de passagem de *pig* em um duto contendo líquido à frente do *pig* e gás como fluido impulsor. Em seguida, os resultados obtidos com o simulador são comparados com um caso real de esvaziamento de um duto de petróleo.

Por último, o quinto capítulo apresenta um resumo do que foi apresentado e as conclusões da Dissertação.