

## 1. INTRODUÇÃO

No transporte de produtos derivados do petróleo e gás natural, um modal seguro, eficiente e de baixo impacto ambiental utilizado pela indústria é o transporte dutoviário. Este permite o transporte de grandes volumes em tempo relativamente curto, evitando por exemplo o tráfego de dezenas de caminhões a cada hora para suprir a mesma demanda de produto. Além disso, o modal dutoviário possui confiabilidade já que não é influenciado por condições meteorológicas nem por instabilidades de tráfego nas rodovias, que são questões as quais não é possível mitigar o risco.

Para que o transporte dutoviário seja efetivamente seguro e confiável, é necessário que se mantenha uma manutenção adequada e equipamentos reservas, uma vez que um vazamento pode provocar impactos indesejáveis ao meio ambiente e as respectivas instalações. Com o objetivo de manter a eficiência do sistema de transporte, a passagem de PIG (*pipeline inspection gauge*) em dutos pode ser utilizada de diversas maneiras. A Figura 1.1(a) apresentam PIGs espuma, utilizados para limpeza retirando incrustações na tubulação que pode provocar inclusive bloqueios de linha. O PIG instrumentado, mostrado na Figura 1.1(b), é utilizado para inspeção do duto identificando amassamentos e pontos de corrosão. A Figura 1.1(c) é utilizado para garantir a separação de interface entre dois fluidos que não podem se misturar ou até mesmo para garantir vedação em trecho a ser reparado.



(a) PIG de limpeza

(b) PIG instrumentado

(c) flex PIG

**Figura 1.1** – Exemplos de PIGs

Em todos os exemplos de utilização de PIG citados, existe uma velocidade de deslocamento máxima recomendável a qual o PIG não deve ultrapassar evitando possíveis amassamentos no duto, e uma velocidade mínima recomendável a qual o PIG deve respeitar para não ficar preso em linha em função do baixo diferencial de pressão.

Em PIGs de inspeção instrumentados, que aquisitam e armazenam dados, a velocidade de deslocamento do PIG é crítica, já que caso a velocidade seja muito alta para inspeção em linha. Para PIGs de fluxo magnético, o valor da velocidade deve se manter abaixo de 5m/s, já que não é possível gravar os dados na velocidade em que é medido segundo Steinvoorte *et al.* (2016).

A passagem de PIG instrumentados em oleodutos e gasodutos deve ser feita periodicamente, com velocidade controlada, para aferição da integridade estrutural dos dutos. Este controle em líquidos normalmente é feito indiretamente através do controle da velocidade do fluido, utilizando as válvulas de controle existentes nas extremidades do duto. No caso de gasodutos é possível controlar o fluxo num trecho abrindo saída de escoamento paralela a tubulação principal (*bypass*), quando existente. Porém não é possível atingir a velocidade recomendada para a passagem do PIG em todos os casos em função das condições operacionais do sistema e da demanda de movimentação de produto, o que impacta negativamente na aquisição de dados, podendo causar, inclusive, a perda da corrida.

Simuladores de passagem de PIG que possam prever o comportamento das variáveis de processo ao longo do duto e que prevejam o comportamento do PIG em linha são ferramentas úteis para tomada de decisão e planejamento operacional, uma corrida de PIG instrumentado possui custo elevado e nem sempre é possível obter uma janela operacional que viabilize a operação.

## 1.1. Revisão Bibliográfica

Uma pesquisa bibliográfica foi realizada englobando artigos publicados e trabalhos apresentados em congressos relativos a simulações computacionais de escoamentos para diferentes estratégias de controle para deslocamento de PIG.

Nieckele *et al.* (2000) apresentaram uma análise do comportamento de um PIG, contendo furo de *bypass* em seu interior, em gasoduto com variações de área em modelo térmico.

Nguyen *et al.* (2001) propuseram um método de controle não-linear para deslocamento de PIG em gasodutos, baseado no controle da perda de carga na válvula de *bypass* no interior do PIG. Na resolução da dinâmica do escoamento utiliza-se o método das características e o método Runge-Kutta. O controle proposto é feito através da variação da perda de carga no *bypass* do PIG e são investigados três casos para aplicação deste controle: lançamento do PIG, recebimento do PIG e reinício após parada do gasoduto. As variáveis investigadas são: posição do PIG, velocidade do PIG e a vazão de *bypass*.

Em função da dinâmica de movimentação dos gasodutos operados pela Transpetro, em uma malha interligada com vários pontos de entrega e altas vazões, o trabalho de Silva *et al.* (2007) propõe uma estratégia para ter maior controle sobre a velocidade de deslocamento do PIG em gasodutos através de um *bypass* no eixo central do PIG. Quando a velocidade do PIG for maior que a recomendada o *bypass* abre e quando a velocidade do PIG for menor que a recomendada, ele fecha.

Tolmasquim & Nieckele (2008) desenvolveram uma ferramenta de simulação para operações de secagem da tubulação, i.e., operações para limpar a tubulação onde um determinado óleo escoa, nitrogênio é injetado, sendo os fluidos separados por um PIG. O código numérico desenvolvido foi baseado no método das diferenças finitas e o controle da velocidade de deslocamento do PIG assim como o controle de pressão para evitar vaporização de produto em linha é feito através das válvulas localizadas nas extremidades do duto. Como validação do código, foi feita uma simulação de passagem de PIG com gás deslocando líquido e os resultados foram comparados com um caso real.

Freeman *et al.* (2009) desenvolveram uma patente de controle de PIGs que usa alta velocidade de escoamento no *bypass* do PIG para reduzir a velocidade de deslocamento do PIG.

A modelagem matemática e a simulação de operações de PIG são abordados no trabalho de Esmaeilzadeh *et al.* (2009), cujo método utilizado para a resolução das equações não lineares é o método das características (MOC). São feitas modelagens para o escoamento de gás ou líquido e para a dinâmica do PIG. Para a resolução da dinâmica do PIG é utilizado o método de Runge-Kutta. São realizados dois exemplos de simulação no trabalho, um para escoamento de gás e outro para líquido, neste caso o PIG não possui controle de velocidade.

Beuker *et al.* (2010) mostraram um controle ativo da abertura do PIG para controle de velocidade e pressão no PIG em gasodutos. Ele compara as medidas de sensores de velocidade e pressão diferencial com valores de interesse ajustando o nível de abertura, de forma que quanto maior a abertura menor a velocidade e vice-versa.

O trabalho de Money *et al.* (2012) descreve um PIG com *bypass* que pode ser ajustado entre 0 e 50% com a abertura da secção transversal do PIG e descreve o mecanismo de controle de abertura do *bypass*. O PIG possui odômetros utilizados para calcular a velocidade do próprio PIG, além disso sinais de pressões, temperatura e aceleração (em seis eixos) são aquisitados. Para o controle foi utilizado um sistema de malha fechada e como estratégia de controle foi utilizada uma lógica quase-fuzzy e, por fim, uma passagem real de PIG em gasoduto é analisada.

Para escoamento de líquidos, o trabalho de Lesani *et al.* (2012) resolve a dinâmica do deslocamento de PIG com *bypass* em seu interior para geometrias mais complexas, descrevendo uma modelagem matemática e definindo uma função na linha de centro do PIG.

Mirshamsi & Rafeeyan (2012) apresentam uma modelagem matemática para a resolução da dinâmica do PIG considerando a variação da abertura do *bypass* no interior do PIG. Eles consideram a variação da abertura do *bypass* no interior do PIG e propõem um método baseado na Quantitative Feedback Theory (QFT) para a resolução da dinâmica não linear do movimento do PIG em conjunto com o método Sobhani-Rafeeyan (método SR). Neste trabalho são apresentados dois casos de escoamento de líquidos nos quais as velocidades de deslocamento do PIG são controladas num patamar 50% menor do que a velocidade de escoamento de fluido na tubulação.

Zhu *et al.* (2014) utilizam um PIG com *bypass* rotativo para o controle da velocidade. O objetivo desta modelagem é obter, em função do torque e da geometria do PIG, a abertura do *bypass* que controla a velocidade do PIG no valor desejado. Foi realizado um experimento de laboratório para medição do torque e diferencial de pressão no PIG em função da abertura do *bypass*, obtendo-se curvas ajustadas para torque e delta de pressão em função do ângulo de abertura do *bypass*, obtendo a velocidade do PIG.

Mirshamsi e Rafeeyan (2015a) apresentam uma modelagem matemática para a resolução da dinâmica do PIG considerando uma abertura fixa do *bypass* no interior do PIG em gasoduto 1D com variações topográficas em duas e três dimensões. No mesmo ano, Mirshamsi e Rafeeyan (2015b) inseriram na modelagem a consideração do comprimento do PIG e compararam com resultados cuja modelagem representa o PIG como partícula. Neste caso o *bypass* também é fixo.

Groote *et al.* (2015) propõem uma modelagem matemática para resolver o problema de escoamento bifásico considerando um PIG inteligente que mantém a velocidade dele controlada através da abertura do *bypass*.

Steinvoorte *et al.* (2016) propuseram soluções para inspeção de gasodutos em linhas não pigáveis e em condições extremas de baixa pressão, condições de baixa velocidade e condições de alta velocidade. Para cada problema o trabalho obtém diferentes soluções, utilizando tecnologia de PIG instrumentado, para o caso de baixa pressão em linha é proposto como solução PIGs de baixa fricção nas paredes do duto, para linhas com velocidades extremamente baixa foi proposto um PIG com selagem maior para evitar escorregamentos e com baterias adicionais que sejam capazes de ter uma maior vida útil, e para duto com alta velocidade de escoamento o controle foi feito através de *bypass* no interior do PIG sendo possível reduzir em até 2m/s a velocidade do PIG. O trabalho descreve as dificuldades encontradas durante a passagem de PIG detalhando benefícios e apresentando resultados reais para cada caso abordado, em termos de pressão e velocidade de deslocamento de PIG.

## 1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um controle eficiente da velocidade de deslocamento do PIG baseado no controle da abertura de furo de *bypass* em seu interior.

Para controlar a velocidade do PIG em função do percentual de abertura do *bypass*, optou-se pela estratégia de controle PID, que é amplamente citada na literatura para controle de processo e comumente utilizada na prática para controlar variáveis tais como temperatura, pressão e vazão.

Em função da necessidade de prever a velocidade do deslocamento de PIGs,

foi desenvolvido um simulador termo hidráulico de passagem de PIG em dutos, para escoamento transiente – PIGSIM (Azevedo *et al.*, 1999) pela equipe formada pelos Professores Luis Fernando Alzugar Azevedo, Angela Ourivio Nieckele e Arthur Martins B. Braga do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. O software foi concebido para escoar tanto líquido como gás e até mesmo ambos os fluidos desde que separados por um PIG. Além disso, é possível realizar o controle da passagem do PIG através de válvulas de controle nas extremidades do duto (Tolmasquim, 2004).

O primeiro objetivo deste trabalho é a introdução no simulador PIGSIM de ajustes necessários nas equações da dinâmica do movimento, pela consideração física de um furo de abertura variável no seu interior. Deste modo, a influência da abertura do furo de *bypass* na velocidade do PIG é investigada e a estratégia de controle adotada é comparada com outras soluções na literatura.

Como segundo objetivo deste trabalho é a inserção da lógica de controle, através de um controle PID, para manter a velocidade de deslocamento do PIG dentro de valores pré-determinados. Os resultados são comparados com outros trabalhos que utilizam outras estratégias de controle e também consideram abertura variável no *bypass* do PIG.

Para análise mais refinada do escoamento de PIG em gases, o controle do *bypass* é inserido no módulo térmico em conjunto com o efeito sônico referente ao escoamento no interior do *bypass*. Serão analisados casos nos quais o efeito sônico é significativo no processo.

Por fim, simulações de casos reais são apresentadas para análise da eficiência do método de controle PID.

### 1.3. Organização do Manuscrito

O primeiro capítulo aborda a introdução do tema proposto, a relevância do assunto, faz uma revisão bibliográfica apresentando o que existe de mais recente sobre o tema e define quais são os objetivos da tese.

O capítulo seguinte traz a modelagem matemática do problema proposto. Na primeira parte ele aborda as leis de conservação de massa e quantidade de movimento linear, depois é introduzida a modelagem da perda de carga devido ao furo de *bypass* no interior do PIG e sua relação com o coeficiente de vazão em

válvula. Por fim descreve-se a metodologia de controle de velocidade em função do percentual de abertura do *bypass* do PIG.

O capítulo 3 descreve o método numérico para a resolução do problema de forma acoplada a cada instante de tempo para o deslocamento do PIG e o escoamento do fluido.

No capítulo 4 são apresentadas uma série de simulações com objetivos de validação da ferramenta comparando com outros trabalhos, simulações teóricas com o objetivo de observar o comportamento do *software* e o desempenho do controle em situações físicas diferentes. Além disso, será apresentado um problema real no qual a passagem de PIG ocorre com velocidade acima da recomendável pelo fornecedor e somente através do controle da abertura do furo no interior do PIG é possível obter o comportamento desejável para a velocidade.

No capítulo final são feitos os comentários finais da tese, incluindo a conclusão e recomendação de trabalhos futuros.