



Fábio Machado Limeira

**Modelagem e Simulação de Deslocamento de PIGs em
Tubulações com Válvula de Controle “Bypass” no PIG**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro

Maio de 2017



Fábio Machado Limeira

Modelagem e Simulação de Deslocamento de PIGs em Tubulações com Válvula de Controle “*Bypass*” no PIG

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profa. Angela Ourivio Nieckele

Orientadora

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Dr. Luis Fernando Gonçalves Pires

CT-Ex

Dr. Sidney Stuckenbruk

Olympus

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 3 de maio de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Fábio Machado Limeira

Graduou-se em Engenharia Mecânica na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) no ano de 2009. Ingressou na Petrobras Transportes S/A em 2009, e desde então tem atuado na área de transporte dutoviário, com ênfase em estudos hidráulicos. Possui trabalhos apresentados em congressos internacionais na área de dutos. Atualmente é Engenheiro de Dutos e Terminais da Engenharia de Operações da Transpetro.

Ficha Catalográfica

Limeira, Fábio Machado

Modelagem e simulação de deslocamento de PIGs em tubulações com válvula de controle "Bypass" no PIG / Fábio Machado Limeira ; orientadora: Angela Ourivio Nieckele. – 2017.

82 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Simulação hidráulica. 3. PIG. 4. Controle. 5. Dutos. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

À minha orientadora, Professora Angela Ourivio Nieckele, pela orientação, dedicação, atenção e parceria, durante a elaboração da dissertação e em diversos momentos durante todo o período que fui estudante da PUC, este apoio foi fundamental para meu desenvolvimento e para ter forças e atingir o objetivo final. À PETROBRAS Transportes S.A. - TRANSPETRO – por ter aprovado e apoiado a realização deste mestrado.

A minha companheira Jessica por todo o carinho, paciência e incentivo.

Aos meus familiares e amigos pela compreensão durante este período, à minha mãe Tania e ao meu pai Jandilson pela educação, carinho e dedicação em todas as horas. Aos meus colegas de trabalho Márcio Manhães Gomes de Almeida, Luciano Macedo Josino da Costa, João Luiz Lavoura Correia, Felipe Giglio de Paes Barreto e Eduardo Guimarães Merçon, que como gerentes da Transpetro, me incentivaram e deram o suporte necessário.

Aos colegas de trabalho Fausto Metzger Peçanha Henriques, Antônio Filipe Falcão de Montalvão, Denis Figueiredo dos Santos, Thiago Lessa Aramaki e Cláudio Velozo pela troca de ideias durante o desenvolvimento da dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

À todos que não foram citados acima, porém que tiveram participação na elaboração da minha dissertação.

Resumo

Limeira, Fábio Machado; Nieckele, Angela Ourivio. **Modelagem e Simulação de Deslocamento de PIGs em Tubulações com Válvula de Controle “Bypass” no PIG**. Rio de Janeiro, 2017. 82p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A utilização de PIG em oleodutos e gasodutos tem uma grande importância para a manutenção da integridade estrutural de tubulações, e pode ser utilizado para inspeção, limpeza e separação de interface. Neste contexto é importante que a passagem de PIG ocorra de modo controlado causando o menor impacto possível à operação, respeitando os limites operacionais da tubulação e dentro dos limites de velocidade de deslocamento do PIG. Caso o PIG possua uma velocidade baixa, ele pode ficar preso à tubulação, podendo ser difícil soltá-lo. Por outro lado, caso a velocidade seja elevada o PIG pode danificar a tubulação em função dos impactos gerados. Com o objetivo de atender os requisitos referente a velocidade recomendável de deslocamento do PIG referente aos limites operacionais existentes e não danificá-lo, foi desenvolvido um simulador termo hidráulico de deslocamento de PIGs. O simulador prevê escoamentos transientes isotérmico ou térmico acoplado ao deslocamento do PIG. Para controlar a velocidade do PIG, uma válvula de controle foi instalada no corpo do próprio PIG. Sua velocidade de deslocamento é função da abertura do furo de *bypass*, ou seja, quanto maior a velocidade de escoamento na tubulação, maior a abertura e maior o fluxo através do PIG para manter a velocidade controlada. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, acopladas com um balanço de forças no PIG, foram discretizadas pelo método das diferenças finitas e resolvidas de forma acoplada. Para o controle da velocidade optou-se pelo método de controle PID. Investiga-se o deslocamento do PIG tanto para escoamento de líquido quanto de gás, considerando ou não a perda de calor para o ambiente. Diversos casos são apresentados demonstrando a eficácia do método de controle modelado.

Palavras-chave

Simulação Hidráulica; PIG; Controle; Dutos.

Abstract

Limeira, Fábio Machado; Nieckele, Angela Ourivio (Advisor). **Modeling and Simulation of PIG Displacement in Pipelines with Bypass Control Valve.** Rio de Janeiro, 2017. 82p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of PIG in oil and gas pipelines has great importance to maintain the structural integrity of pipelines, and it can be used for inspection, cleaning and interface separation. In this context, it is important that the PIG displacement happen in a controlled way causing the lowest possible impact to the operation, respecting the operating limits of the pipe and within the limits of the PIG's speed of displacement. If the PIG has a low speed, it can be trapped in the tubing and it can be difficult to release it. On the other hand, if the speed is high the PIG can damage the tubing in function of the generated impacts. In order to respect the requirements for the recommended PIG velocity displacement, and operational pipelines limits requirements, a thermo hydraulic PIG simulator was developed. The simulator predicts isothermal or thermal transient flow coupled with the PIG displacement. To control the PIG velocity, a control valve is installed in the body of the PIG. The PIG speed is as a function of the bypass aperture inside the PIG's body, ie, the greater the flow velocity in the pipe, the greater is the opening and the greater the flow through the PIG. The conservation equations of mass, momentum and energy coupled with force balance at the PIG were discretized by the finite difference method, and solved in coupled manner. A PID control method was employed to control the PIG velocity. It is investigated the displacement of PIG in both liquid and gas flow, considering or not the loss of heat for the environment. Several cases are presented demonstrating the effectiveness of the control method modeled.

Key-words

Hydraulic Simulation; PIG; Control; Pipelines.

Sumário

1.	Introdução	14
1.1.	Revisão Bibliográfica	15
1.2.	Objetivo	18
1.3.	Organização do Manuscrito	19
2.	Modelamento Matemático	21
2.1.	Conservação de Massa	22
2.2.	Conservação de Quantidade de Movimento Linear	23
2.2.1.	Fator de Atrito	24
2.3.	Conservação da Energia	24
2.3.1.	Coeficiente Global de Transferência de Calor	25
2.4.	Propriedades do Fluido	26
2.4.1.	Massa Específica	26
2.4.2.	Viscosidade Absoluta	27
2.4.3.	Temperatura	27
2.4.4.	Condutividade Térmica e Calor Específico a Pressão Constante	28
2.5.	Balanço de Forças no PIG	28
2.6.	Modelagem da Válvula no PIG	28
2.7.	Condições de Contorno e Iniciais	32
2.8.	Controle da Velocidade do PIG	33
3.	Método Numérico	35
3.1.	Sistema de Coordenadas Móvel	35
3.2.	Discretização das Equações de Balanço	36
3.3.	Discretização da Equação Diferencial de um Controlador PID	39
3.4.	Solução do Sistema Algébrico	40
3.5.	Critério de Convergência	40
3.6.	Fluxograma do Modelo	41
4.	Controle de PIG	43
4.1.	Caso1: Escoamento de Líquido	44
4.1.1.	Caso 1.1: Deslocamento Ascendente a 45°	46

4.1.2.	Caso 1.2: Descida Senoidal	47
4.2.	Caso 2: Escoamento de Gás	49
4.2.1.	Caso 2.1 Lançamento do PIG	50
4.2.2.	Caso 2.2: Desbloqueio de Tubulação	52
4.3.	Caso 3: Caso Real – Aplicação do Modelo Numérico em Gasoduto	60
4.4.	Caso 4: Escoamento Afogado	64
4.5.	Caso 5: Teste de Sensibilidade	66
4.5.1.	Caso 5.1: Influência da Massa do PIG	68
4.5.2.	Caso 5.2: Influência da Força de Contato no PIG	69
4.5.3.	Caso 5.3: Influência dos Parâmetros da Válvula	71
4.5.4.	Caso 5.4: Teste dos Parâmetros do Controle PID	71
5.	Comentários Finais	76
5.1	Conclusão	77
5.2	Recomendação de Trabalhos Futuros	78
	Bibliografia	79

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Exemplos de PIGs. (a) PIG instrumentado (b) flex PIG (c) limpeza	14
Figura 2.1 – Topografia	22
Figura 2.2 – Esquema da válvula no PIG	29
Figura 2.3 – Sistema de controle da velocidade do PIG em malha fechada	33
Figura 3.1 – Distribuição deslocada da Malha	37
Figura 3.2 – Fluxograma do Programa	42
Figura 4.1 – Topografia Caso 1.1	46
Figura 4.2 – Controle de velocidade do PIG no lançamento. Líquido, caso 1.1	47
Figura 4.3 – Topografia Caso 1.2	48
Figura 4.4 – Controle de velocidade do PIG no lançamento. Líquido, Caso 1.2	49
Figura 4.5 – Controle de velocidade do PIG no lançamento. Gás. Caso 2.1	51
Figura 4.6 – Controle de velocidade do PIG no lançamento. Gás. Caso 2.1 com zoom	52
Figura 4.7 – Velocidade e Diferencial de Pressão no PIG. Após transiente o PIG para	53
Figura 4.8 – Velocidade do PIG no desbloqueio. Gás. Caso 2.2	54
Figura 4.9 – Diferencial de pressão do PIG no desbloqueio. Gás. Caso 2.2	55
Figura 4.10 – Percentual de abertura do PIG no desbloqueio. Gás. Caso 2.2	56
Figura 4.11 – Temperatura do PIG no desbloqueio. Gás. Caso 2.2	56
Figura 4.12 – Pressão imposta na entrada com pulso (Pin_1) e sem pulso inicial (Pin_2) no desbloqueio. Gás. Caso 2.2	57
Figura 4.13 – Velocidade e Diferencial de Pressão no PIG. Oscilação da pressão diferencial no PIG	58
Figura 4.14 – Velocidade e Diferencial de Pressão no PIG. Oscilação da pressão diferencial no PIG ao longo do duto	59
Figura 4.15 – Diferencial de pressão do PIG no desbloqueio. Nova rampa de pressão.	59
Figura 4.16 – Velocidade do PIG no desbloqueio. Nova rampa de pressão	60
Figura 4.17 – Velocidade do PIG com <i>bypass</i> fixo. Caso 3	62

Figura 4.18 – Velocidade do PIG e percentual de abertura com controle PID.	
Caso 3	63
Figura 4.19 – Perfil de pressão. Caso 3	63
Figura 4.20 – Perfil altimétrico da tubulação. Caso 4	64
Figura 4.21 – Velocidade do PIG e abertura do bypass do PIG. Caso 4	65
Figura 4.22 – Diferencial de pressão no PIG e fator de expansão. Caso 4	66
Figura 4.23 – Perfil altimétrico e de temperatura ao longo da tubulação. Caso 5	67
Figura 4.24 – Velocidade do PIG e percentual de abertura no bypass, caso base. Caso 5	68
Figura 4.25 – Influência da massa na velocidade do PIG. Caso 5	69
Figura 4.26 – Influência da força de atrito dinâmica na velocidade do PIG. Caso 5	70
Figura 4.27 – Influência do amortecimento na velocidade do PIG. Caso 5	71
Figura 4.28 – Influência do Cv na velocidade do PIG. Caso 5	72
Figura 4.29 – Influência do Cv no percentual de abertura da válvula. Caso 5	72
Figura 4.30 – Influência do tempo integral na velocidade do PIG. Caso 5	73
Figura 4.31 – Influência do ganho proporcional na velocidade do PIG. Caso 5	74
Figura 4.32 – Influência do tempo derivativo na velocidade do PIG. Caso 5	74

Lista de símbolos

a	Velocidade sônica do fluido (m/s)
A	Área da seção transversal da tubulação (m ²)
AC	Ação do controlador
c_p	Calor específico a pressão constante (J / kg.K)
c_v	Calor específico a volume constante (J / kg.K)
c_μ	Coeficiente de variação da viscosidade
C	Coeficiente de amortecimento (N.s/m)
C_D	Coeficiente de descarga
C_V	Coeficiente de vazão (gpm/psi ^{0,5})
d_v	Diâmetro da válvula de <i>bypass</i> no interior do PIG (m)
D	Diâmetro da tubulação (m)
e	Espessura de parede do tubo (m)
e	Erro do controlador
E	Módulo de Young (Pa)
f	Fator de atrito hidrodinâmico entre o fluido e a parede do duto
F	Força (N)
F_{at}	Força de contato entre o PIG e a parede do tubo (N)
g	Aceleração local da gravidade (m/s ²)
H	Elevação (m)
h	Entalpia (J/kg)
h_η	Fator de escala associado à coordenada móvel
k	Razão de calores específicos
K	Perda de carga
K	Condutividade térmica (W/mK)
K	Ganho do controlador
L	Comprimento do duto (km)
m	Massa do PIG (kg)
\dot{m}	Vazão mássica (kg/s)

\overline{M}	Massa molecular da mistura gasosa (kg/k mol)
N	Constante de conversão de unidades
NC	Constante de normalização
N_u	Número de Nusselt
p	Pressão (Pa)
Pr	Número de Prandtl
R	Constante do gás (N.m/kg.K)
\mathfrak{R}	Constante universal dos gases (J/kgmol.K)
Re	Número de <i>Reynolds</i>
s	Coordenada axial
SP	Set point do controle da variável de processo
t	Tempo (s)
T	Temperatura de referência (K)
U_G	Coeficiente global de transferência de calor (W/m ² K)
V	Velocidade (m/s)
\overline{V}	Velocidade relativa (m/s)
VP	Variável de processo
x	Coordenada horizontal
Y	Fator de expansão do gás
Z	Fator de compressibilidade do gás

Símbolos gregos

α	Percentual de abertura da válvula
β	Coeficiente de expansão térmica
Δ	Variação de uma grandeza
ε	Rugosidade (m)
ϕ	Ângulo formado entre a coordenada axial e a horizontal
γ	Razão de massa molecular
η	Coordenada computacional axial
μ	Viscosidade dinâmica (cP)
ν	Viscosidade cinemática (cSt)

ρ	Massa específica (kg/m³)
τ_i	Tempo integral (s)
τ_d	Tempo derivativo(s)

Subscritos

1	À montante
2	À jusante
atm	Atmosférica
c	Crítico
din	Dinâmica
e	Externo
g	Malha
f	Referente ao fluido
h	Referente ao furo do PIG
i	Interno
in	Entrada da tubulação
max	Máximo valor
pig	PIG
ref	Referência
std	Condição Padrão
out	Saída da tubulação
T	Temperatura constante
V	Válvula