

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO**



Sueli Tiomno Tolmasquim

**PROJETO E CONTROLE DA OPERAÇÃO
DE PASSAGEM DE *PIGS* EM DUTOS**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadora: Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro, agosto de 2004

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO**



Sueli Tiomno Tolmasquim

**Projeto e Controle da Operação
de Passagem de *Pigs* em Dutos**

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

Prof^a. Angela Ourivio Nieckele

Orientadora
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Sidney Stuckenbruck

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 06 de agosto de 2004

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

Sueli Tiomno Tolmasquim

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) em 1986. Ingressou na Petrobras em 1989, e desde então tem atuado na área de transporte dutoviário, com ênfase em estudos hidráulicos. Possui trabalhos apresentados em congressos no Brasil e no exterior, em tecnologia de dutos. Atualmente, é responsável pela Coordenadoria de Dutos da Gerência de Tecnologia da PETROBRAS Transportes - Transpetro.

Ficha Catalográfica

Tolmasquim, Sueli Tiomno

Projeto e controle da operação de passagem de *pigs* em dutos / Sueli Tiomno Tolmasquim ; orientadora: Angela Ourivio Nieckele. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

109 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Simulação transiente. 3. *Pig*. 4. Deslocamento de óleo. 5. Gás-líquido. 6. Controle de Processo I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Aos meus pais Silvia e Ernesto que sempre foram uma
referência na minha formação profissional.

Agradecimentos

À minha orientadora, Professora Angela Ourivio Nieckele, pela orientação, aprendizado, atenção e parceria, durante a realização das cadeiras de mestrado e na elaboração da dissertação.

À PETROBRAS Transportes S.A. - TRANSPETRO – por ter aprovado e apoiado a realização deste mestrado.

Ao meu namorado Leo Melo por todo o carinho, paciência e incentivo.

Aos meus familiares e amigos pela compreensão durante este período e à minha mãe Silvia pela educação, carinho e dedicação em todas as horas.

Aos meus colegas de trabalho Richard Ward, Marcelino Gomes e Lino Moreira, que como gerentes da Transpetro, me incentivaram e deram o suporte necessário.

Aos colegas de trabalho Luciano Macedo Josino da Costa, Antônio Geraldo de Souza, Ricardo Dias e Helmut Kossatz pela troca de idéias durante o desenvolvimento da dissertação e revisão do texto.

Ao Prof. Luis Fernando A. Azevedo pela orientação na escolha do tema da dissertação e ao longo do curso de mestrado.

Aos colegas Cláudio Veloso Barreto pela ajuda na interface gráfica e Luiz Fernando Pires no módulo interativo.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Aos meus amigos Marcos Jangelavicin, Henriete Seixas, Luiz Antônio, Marcius Ferrari e Ricardo Dias que compartilharam comigo esta jornada.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

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

Resumo

Tolmasquim, Sueli Tiomno. **Projeto e Controle da Operação de Passagem de Pigs em Dutos**. Rio de Janeiro, 2004, 109 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Na indústria do petróleo, a passagem de *pigs* em dutos tem sido largamente aplicada com diferentes propósitos: limpeza do tubo, inspeção, remoção de líquido e separação de produtos, entre outros. A eficiência e segurança de uma operação com *pig* demandam que diversos parâmetros operacionais, tais como pressões máximas e mínimas no duto e velocidade de movimentação do *pig*, sejam bem avaliados durante a etapa de planejamento e mantidos dentro de determinados limites durante o acompanhamento da operação. Tendo como objetivo a obtenção de uma ferramenta eficiente para ajudar no controle e projeto das operações de passagem de *pigs*, desenvolveu-se um código numérico baseado no método de diferenças finitas para a simulação de escoamentos transientes de dois fluidos, podendo estes ser líquido-líquido, gás-gás ou líquido-gás. Módulos para controle automático das variáveis do processo foram incluídos, visando à previsão do escoamento mediante diferentes estratégias para alcançar uma operação eficiente. Problemas teste foram realizados, validando a metodologia. Por fim, os resultados obtidos com o simulador são comparados com um caso real de esvaziamento de um trecho do oleoduto OSPAR, pertencente à Petrobras, com 30” de diâmetro e extensão de 60 km.

Palavras-chave

simulação transiente; *pig*; deslocamento de óleo; gás-líquido; controle de processo.

Abstract

Tolmasquim, Sueli Tiomno. **Design and Control of Pig Operations Through Pipelines**. Rio de Janeiro, 2004, 109 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the oil industry, pigging operations in pipelines have been largely applied for different purposes: pipe cleaning, inspection, liquid removal and product separation, among others. Pigging operations to be efficient and safe require a number of operational parameters, such as maximum and minimum pressures in the pipeline and pig velocity, to be well evaluated during planning stage and maintained within stipulated limits while the operation accomplishment. With the objective of providing an efficient tool to assist in the controlling and designing of pig operations through pipelines, a numerical code based on a finite difference scheme for a two-fluid transient flow simulation was developed. The model accounts for liquid-liquid, gas-gas and liquid-gas products in the pipeline. Automatic control modules for some process variables were included to permit the flow prediction by means of different strategies to reach an efficient operation. Test problems were performed to validate the methodology. At last, simulation results were compared with an actual liquid displacement operation at a 60 km segment of the 30” diameter OSPAR pipeline, owned by Petrobras.

Keywords:

transient simulation; pig; oil displacement; gas-liquid; process control.

Sumário

1. Introdução	18
1.1. Motivação	23
1.2. Revisão bibliográfica	24
1.2.1. Softwares Comerciais	24
1.2.2. Movimentação de <i>Pig</i> e Modelos Computacionais	26
1.2.3. Simplificação da Análise Hidráulica	28
1.3. Objetivo	28
1.4. Organização do Trabalho	29
2. Modelamento Matemático	31
2.1. Conservação de Massa	32
2.1.1. Variações da Área da Tubulação	32
2.1.2. Compressibilidade do Fluido	33
2.1.3. Equação da Pressão	34
2.2. Conservação da Quantidade de Movimento Linear	34
2.2.1. Fator de Atrito	35
2.3. Propriedades do Fluido	36
2.3.1. Massa Específica	36
2.3.2. Viscosidade Absoluta	37
2.4. Condições de Contorno	38
2.5. Inicialização	39
2.5.1. Fluido em Repouso	39
2.5.2. Inicialização em Regime Permanente	40
2.6. Modelagem da Dinâmica do <i>Pig</i>	40
2.7. Pressão Máxima de Operação Admissível (PMOA)	41
2.8. Controle de Processos	44
2.8.1. Controlador PID	46
2.8.2. Ação do Controlador	47
2.8.3. Controle de Duas Variáveis do Processo	47

3. Método Numérico	49
3.1. Sistema de Coordenadas Móvel	49
3.2. Discretização das Equações	51
3.2.1. Equação da Continuidade	52
3.2.2. Equação da Quantidade do Movimento Linear	53
3.3. Discretização da Equação Diferencial de um Controlador PID	55
3.4. Solução do Sistema Algébrico	56
3.5. Critério de Convergência	58
3.5.1. Critérios Avaliados	59
3.6. Controle da Operação	60
3.6.1. Malha Aberta	60
3.6.2. Controle Automático	60
3.6.3. Simulação Interativa	61
3.7. Fluxograma do Modelo	61
4. Estudo de Casos	65
4.1. Exemplo 1 – Controle da Velocidade do <i>Pig</i> e Pressão Mínima	65
4.1.1. Situação sem Controle Automático da Válvula na Saída	66
4.1.2. Situação com Controle Automático da Válvula na Saída	70
4.2. Exemplo - Controle da Velocidade do <i>Pig</i> e Pressão Mínima	74
4.2.1. Situação sem Controle Automático da Válvula na Saída	76
4.2.2. Situação com Controle Automático da Válvula na Saída	79
4.2.3. Situação com Controle Automático da Válvula na Entrada	83
4.3. Aplicação do Modelo Numérico a um Caso Real de Esvaziamento de Oleoduto	86

4.3.1. Descrição da Operação	86
4.3.2. Validação do Modelo Numérico	90
4.3.3. Otimização da Operação de Esvaziamento do Óleo	96
5. Comentários Finais	103
5.1. Recomendações para Futuros Estudos	104
6. Referências Bibliográficas	105

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Perfil típico de um trecho de oleoduto	19
Figura 1.2 - Vista lateral de um <i>flexipig</i> de 30"	21
Figura 1.3 - Vista posterior de um <i>flexipig</i> de 30"	21
Figura 1.4 - Escoamento em um ponto alto de um duto com coluna abertura	22
Figura 1.5 - Gradiente hidráulico com e sem abertura de coluna	22
Figura 2.1 - Volume de controle para análise de escoamento unidimensional transiente	31
Figura 2.2 - Representação esquemática das pressões em oleodutos, ou trecho de oleoduto, de mesma espessura e material	43
Figura 2.3 - Sistema de controle em malha aberta	45
Figura 2.4 - Sistema de controle em malha fechada	45
Figura 2.5 - Controle de duas variáveis do processo por "passa baixo"	48
Figura 3.1 - Distribuição deslocada da malha	51
Figura 3.2 - Sistema algébrico pentadiagonal	57
Figura 3.3 - Fluxograma do programa	63
Figura 3.4 - Fluxograma da subrotina MARCHA	64
Figura 4.1 - Variação da pressão com o tempo - sem controle. Exemplo 1	68
Figura 4.2 - Variação da velocidade do <i>pig</i> em função da sua posição - sem controle. Exemplo 1	69
Figura 4.3 - Posição do <i>pig</i> com o tempo - sem controle. Exemplo 1	69
Figura 4.4 - Percentual de abertura da válvula de controle com o tempo. Exemplo 1.	71

Figura 4.5 - Variação da pressão com o tempo - com controle automático. Exemplo 1.	72
Figura 4.6- Variação da velocidade do pig com o tempo - com controle automático. Exemplo 1.	73
Figura 4.7 - Posição do pig com o tempo - com controle automático. Exemplo 1.	73
Figura 4.8 - Perfil do duto. Exemplo 2	74
Figura 4.9 - Variação da pressão com o tempo - sem controle. Exemplo 2.	77
Figura 4.10 - Variação da velocidade do pig com o tempo - sem controle. Exemplo 2.	78
Figura 4.11 - Posição do pig com o tempo - sem controle. Exemplo 2	79
Figura 4.12 - Percentual de abertura da válvula de controle de saída com o tempo. Exemplo 2.	80
Figura 4.13 - Variação da velocidade do pig com o tempo - com controle automático da válvula de saída. Exemplo 2.	81
Figura 4.14 - Variação da pressão com o tempo - com controle automático da válvula de saída. Exemplo 2.	82
Figura 4.15 - Variação da pressão com o tempo - com controle automático da válvula de entrada. Exemplo 2.	84
Figura 4.16 - Variação da velocidade do pig com o tempo - com controle automático da válvula de entrada. Exemplo 2	85
Figura 4.17 - Percentual de abertura da válvula de controle da entrada com o tempo. Exemplo 2.	85
Figura 4.18 - Perfil Planialtimétrico do OSPAR.	87
Figura 4.19 – Lançador de <i>pig</i> do OSPAR na REPAR	88
Figura 4.20 - Armazenamento e sistema de aquecimento de N ₂ .	88
Figura 4.21 - Módulo emissor de sinal para localização do <i>pig</i> .	89
Figura 4.22 - Módulo receptor de sinal para localização do <i>pig</i> .	89
Figura 4.23 - Perfil e PMOA do trecho REPAR-Itararé	91
Figura 4.24 - Variação da pressão medida na REPAR com o tempo	93

Figura 4.25 - Variação do nível do tanque de recebimento de petróleo em SFS com o tempo	93
Figura 4.26 - Variação da vazão mássica do tanque de recebimento de petróleo em SFS com o tempo	94
Figura 4.27 - Comparação entre pressões medidas e simuladas em Itararé	95
Figura 4.28 - Comparação entre vazão mássica medida e simulada na REPAR	95
Figura 4.29 - Comparação entre a posição do <i>pig</i> medida e simulada	96
Figura 4.30 - Variação da pressão na entrada com o tempo - com válvula de controle. OSPAR.	98
Figura 4.31 - Variação da pressão na saída com o tempo - com válvula de controle - OSPAR	98
Figura 4.32 - Variação da pressão na entrada, saída e ponto de cota máxima com o tempo - com válvula de controle - OSPAR	99
Figura 4.33 - Variação da pressão ao longo da tubulação em $t = 390$ s, quando a pressão mínima foi atingida. OSPAR	99
Figura 4.34 - Variação da velocidade do <i>pig</i> em função da sua posição – com válvula de controle. OSPAR.	100
Figura 4.35 - Velocidade do <i>pig</i> com o tempo. – com válvula de controle. OSPAR.	101
Figura 4.36 - Posição do <i>pig</i> com o tempo. – com válvula de controle. OSPAR.	101
Figura 4.37 - Variação da vazão na saída com o tempo.- com válvula de controle OSPAR.	102
Figura 4.38 - Variação do percentual de abertura da válvula de controle na saída com o tempo. OSPAR.	102

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Aplicações típicas dos algoritmos PID na indústria	47
Tabela 4.1 - Parâmetros dos controladores. Exemplo 1	71
Tabela 4.2 - Coordenadas do duto. Exemplo 2	74
Tabela 4.3 - Parâmetros dos Controladores da Velocidade do <i>Pig</i> . Exemplo 2	79
Tabela 4.4 - Parâmetros dos Controladores da Pressão Máxima. Exemplo 2	83
Tabela 4.5 - Força de contato entre o <i>pig</i> e a parede do tubo	91
Tabela 4.6 - Parâmetros dos Controladores. OSPAR.	97

Nomenclatura

a	Velocidade do som em um meio infinito isotérmico (m/s)
A	Área da seção transversal
AC	Ação do controlador
c	Velocidade de propagação da onda acústica na tubulação (m/s)
$c_{m,p}$	Coefficiente de pressão da viscosidade
D	Diâmetro do tubo (m)
D_e	Diâmetro externo do tubo (m)
e	Espessura da parede do tubo (m)
e	Erro do controlador
E	Módulo de Young
E	Fator devido ao tipo de solda longitudinal
f	Coefficiente de atrito
F	Força
F	Fator de projeto
F_{th}	Fator de teste de pressão
$F_{at}(V_p)$	Força de contato entre o pig e a parede do tubo (Kg·m/s ²)
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
h	Fator de escala associado à coordenada móvel
hu	Fator de escala associado ao volume deslocado
K	Ganho do controlador
m	Massa do pig (kg)
\dot{m}	Vazão mássica (kg/s)
\bar{M}	Massa molecular da mistura gasosa
n	Tempo discreto
P	Pressão
P_{moph}	Pressão máxima de operação devido ao teste de hidrostático
P_{proj}	Pressão de projeto

P_{th}	Pressão exercida no teste hidrostático
P_1	Pressão na face à montante do pig (Pa)
P_2	Pressão na face à jusante do pig (Pa)
R	Constante do gás (N·m /Kg·K)
\mathfrak{R}	Constante universal dos gases (J/kgmol·K)
s	Coordenada axial
S	Tensão mínima de escoamento do material (Pa)
SP	<i>Set point</i> do controle da variável de processo
t	Tempo (s)
T	Fator devido à temperatura
T_D	Tempo derivativo (s)
T_I	Tempo integral (s)
T_o	Tempo de amostragem (s)
u	Saída do controlador
V	Velocidade (m/s)
\tilde{V}	Velocidade relativa (m/s)
VP	Variável de processo
z	Elevação (m)
z	Fator de compressibilidade

Letras Gregas:

c	Porcentagem de abertura da válvula
e	Rugosidade do tubo (m)
h	Coordenada computacional axial
m	Coefficiente de Poisson
m_f	Viscosidade absoluta (kg/m·s)
q	Ângulo do eixo do tubo com a horizontal
r	Massa específica (kg/m ³)
t_0	Tensão viscosa

Subscritos:

<i>atm</i>	Atmosférica
<i>din</i>	Dinâmica
<i>i</i>	Ponto nodal
<i>in</i>	Entrada do duto
<i>g</i>	Malha
<i>m</i>	Média
<i>out</i>	Saída do duto
<i>p</i>	<i>Pig</i>
<i>ref</i>	Variáveis de referência
<i>stat</i>	Estática

Sobrescritos:

<i>neg</i>	Sentido negativo
<i>pos</i>	Sentido positivo