



Carlos Eugenio Carceroni Provenzano

**Previsão Numérica de Escoamento Bifásico em
Tubulações Utilizando o Modelo de Deslizamento**

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: Professora Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro
Março de 2007



Carlos Eugenio Carceroni Provenzano

Previsão Numérica de Escoamento Bifásico em Tubulações Utilizando o Modelo de Deslizamento

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

Prof. Sidney Stuckenbruck

Olympus Software Científico e Engenharia Ltda

Dr. José Roberto Fagundes Netto

CENPES/PETROBRAS

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de março de 2007

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

Carlos Eugenio Carceroni Provenzano

Graduou-se em Engenharia Mecânica na UFRJ no ano de 2001, tendo cursado o programa de pós-graduação em Engenharia de Dutos na PUC-RJ em 2004.

Ficha Catalográfica

Provenzano, Carlos Eugenio Carceroni

Previsão numérica de escoamento bifásico em tubulações utilizando o modelo de deslizamento / Carlos Eugenio Carceroni Provenzano ; orientadora: Angela Ourivio Nieckele. – 2007.

99 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Escoamento em golfadas. 3. Modelo de Drift. 4. Golfada Severa. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CCD: 621

Agradecimentos

À Petrobrás pela oportunidade e suporte de todos os tipos que foram de vital importância para este trabalho.

À Profa. Angela Ourivio Nieckele pela infinita paciência e disponibilidade, que juntamente com seu conhecimento passado a mim durante nossas longas discussões, mantiveram minha confiança no sucesso deste trabalho. Do tratamento atencioso aos conselhos práticos, encontrei nesta ótima pessoa e profissional o equilíbrio necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu amigo e colega de profissão Breno Silva pelo auxílio com o método de solução simultâneo de equações, que se mostrou uma peça essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais e familiares, pela compreensão dos meus períodos de ausência e por sempre acreditarem na minha pessoa. Sei que todos me apóiam e desejam que minha vida seja repleta de felicidade.

À minha esposa Rosane, que com amor e companheirismo torna os obstáculos mais fáceis de serem superados. Nosso encontro foi uma benção e nunca me canso de expressar o quanto nosso relacionamento é importante para mim.

Resumo

Provenzano, Carlos E. C., Nieckele, Angela O. **Previsão Numérica de Escoamento Bifásico em Tubulações Utilizando o Modelo de Deslizamento**. Rio de Janeiro, 2007. 99 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Na produção de gás e petróleo em campos de águas profundas são comumente encontrados trechos verticais de dutos (*risers*) na aproximação final à plataforma. Nesta configuração, podem ocorrer escoamentos bifásicos no regime de golfadas severas (*severe slug*) que gera alternância na produção da fase gasosa e líquida. Esta alternância é caracterizada por períodos de produção de gás sem líquido seguido de altas taxas de produção de ambas as fases. O regime severo de golfadas é geralmente descrito em quatro fases: formação da golfada, produção da golfada, rompimento da golfada pela fase gás e fluxo reverso do que restou da fase líquida. Este regime induz o escoamento a condições mais extremas do que um outro regime, visto que resultam em um aumento de pressão no duto durante a formação da golfada e em um aumento na taxa de produção durante a expulsão da mesma. O presente trabalho consiste da simulação numérica do regime de golfadas severas para um trecho de tubulação horizontal seguido de outro vertical, assim como apresentar uma análise de um regime estatisticamente permanente. A previsão do escoamento é obtida utilizando-se uma formulação unidimensional baseada no modelo de Drift. A frequência das golfadas é comparada com outros estudos numéricos da literatura, obtendo-se uma concordância bastante satisfatória.

Palavras-chave

Escoamento bifásico; golfada; modelo de *Drift*; golfada severa; unidimensional.

Abstract

Provenzano, Carlos E. C., Nieckele, Angela O. **Numerical Prediction of Two-Phase Flow in Pipeline with the Drift-Flux Model**. Rio de Janeiro, 2007. 99 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the gas and oil offshore deep water production is usual to find risers in Production Unit final approach. Regarding to this configuration, two-phase flows can evolve to a severe slug regime that create gas and liquid alternate production. This cyclic behavior is characterized by periods of gas production followed by very high liquid and gas flow rates. The severe slug flow regime is normally described as occurring in four phases: slug formation, slug production, blowout, and liquid fallback. This flow regime introduces new conditions that can be found in other regimes because of the pressure increase during the slug formation and the large flow rates during the slug production. The present work consists of the numerical simulation of the severe slug flow regime into a horizontal pipeline section followed by a vertical section, as well as to present an statistically steady state analysis. The flow prediction is obtained through a one-dimensional formulation based on the Drift Flux Model. The slug frequency is compared with other numerical studies available in the literature, and a very satisfactory agreement is obtained.

Keywords

Two-phase flow; slug; Drift-Flux model; severe slug; one-dimensional.

Sumário

1. Introdução	17
1.1. Objetivo	21
1.2. Organização do Manuscrito	22
2. Revisão Bibliográfica	23
2.1. Golfadas	31
3. Modelagem Matemática	33
3.1. Fração do Gás e do Líquido	33
3.2. Equações de Conservação	34
3.3. Equações de Fechamento	38
3.3.1 Velocidade de Escorregamento entre as Fases	38
3.3.2 Perda de Carga e Atrito	40
3.4. Propriedades	40
3.5. Variáveis Dependentes	41
3.5.1 $\overline{u_m}$, P e α_g	41
3.5.2 $\rho_l \alpha_l$, $\rho_g \alpha_g$ e $\rho_l \alpha_l u_l + \rho_g \alpha_g u_g$	42
3.6. Condições de Contorno e Iniciais	43
4. Método Numérico	44
4.1. Cálculo da Pressão	45
4.2. Cálculo da Velocidade do Líquido	46
4.3. Cálculo da Velocidade do Gás	46

4.4. Discretização das Equações de Conservação de Massa	47
4.4.1. Equação de w_1 e w_2 para a Entrada	48
4.4.2. Equação de w_1 e w_2 para a Saída	50
4.5. Discretização da Equação de Conservação da Quantidade de Movimento da Mistura	51
4.5.1 Equação de w_3 para a Entrada	52
4.5.2 Equação de w_3 para a Saída	53
4.6. Solução do Sistema Algébrico	53
4.7. Procedimento de Execução para a Solução Simultânea	55
4.8. Malha Computacional e Passo de Tempo	56
4.9. Critério de Convergência	57
5. Resultados	59
5.1. Validação	59
5.1.1. Caso 1	61
5.1.2. Caso 2	63
5.1.3. Caso 3	65
5.1.4. Caso 4	68
5.1.5. Caso 5	70
5.1.6. Testes de Malha e Passo de Tempo	72
5.1.7. Análise da Ordem da Discretização	73
5.2. Golfada Severa	76
6. Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros	82
Referências Bibliográficas	85
Apêndice A	89
Apêndice B	96

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Parâmetros da Velocidade de Escorregamento (Zuber e Findlay, 1965)	26
Tabela 2.2 - Parâmetro C de perda de carga	30

Lista de figuras

Figura 1.1 -	Esquemático de produção <i>offshore</i>	17
Figura 1.2 -	Padrões de escoamento em tubulações horizontais	19
Figura 1.3 -	Padrões de escoamento em tubulações verticais	19
Figura 2.1 -	Mapa de padrões típico para escoamento horizontal	23
Figura 2.2 -	Exemplos de distribuição das fases na seção transversal de um duto	25
Figura 2.1 -	Ciclo de eventos de uma Golfada Severa	32
Figura 3.1 -	Fração das fases por área ocupada por cada fluido	34
Figura 3.2 -	Fração das fases por medição de volume	34
Figura 3.3 -	Ângulo de inclinação com a horizontal	35
Figura 3.4 -	Condições de contorno	43
Figura 4.1 -	Volumes de controle de grandeza escalar	44
Figura 4.2 -	Volumes de controle de grandeza vetorial	44
Figura 4.3 -	Primeiro volume de controle escalar	49
Figura 4.4 -	Último volume de controle escalar	50
Figura 4.5 -	Fluxograma esquemático - MTDMA	56
Figura 5.1 -	Caso 1: Vazões mássicas na entrada em função do tempo	61
Figura 5.2 -	Caso 1: Perfil de fração de gás ao longo do duto, $t = 250$ s	62
Figura 5.3 -	Caso 1: Perfil de pressão ao longo do duto, $t = 250$ s	62
Figura 5.4 -	Caso 1: Perfil de velocidade ao longo do duto, $t = 250$ s	63
Figura 5.5 -	Caso 2: Vazões mássicas na entrada em função do tempo	63
Figura 5.6 -	Caso 2: Perfil de fração de gás ao longo do duto, $t = 175$ s	64
Figura 5.7 -	Caso 2: Perfil de pressão ao longo do duto, $t = 175$ s	64

Figura 5.8 -	Caso 2: Perfil de velocidade ao longo do duto, $t = 175$ s	65
Figura 5.9 -	Caso 3: Vazões mássicas na entrada em função do tempo	66
Figura 5.10 -	Caso 3: Perfil de fração de gás ao longo do duto, $t = 250$ s	66
Figura 5.11 -	Caso 3: Perfil de pressão ao longo do duto, $t = 250$ s	67
Figura 5.12 -	Caso 3: Perfil de velocidade ao longo do duto, $t = 250$ s	67
Figura 5.13 -	Caso 4: Vazões mássicas na entrada em função do tempo	68
Figura 5.14 -	Caso 4: Perfil de fração de gás ao longo do duto, $t = 250$ s	69
Figura 5.15 -	Caso 4: Perfil de pressão ao longo do duto, $t = 250$ s	69
Figura 5.16 -	Caso 4: Perfil de velocidade ao longo do duto, $t = 250$ s	69
Figura 5.17 -	Caso 5: Vazões mássicas na entrada em função do tempo	70
Figura 5.18 -	Caso 5: Perfil de fração de gás ao longo do duto, $t = 175$ s	71
Figura 5.19 -	Caso 5: Perfil de pressão ao longo do duto, $t = 175$ s	71
Figura 5.20 -	Caso 5: Perfil de velocidade ao longo do duto, $t = 250$ s	72
Figura 5.21 -	Influência na malha no perfil de fração de gás, $t = 250$ s	72
Figura 5.22 -	Influência do passo de tempo no perfil de fração de gás, $t = 250$ s. 200 volumes de controle	73
Figura 5.23 -	Caso 1: Influência da ordem do esquema no perfil de fração de gás, $t = 250$ s. 200 volumes de controle	74
Figura 5.24 -	Caso 1: Influência da ordem do esquema no perfil de pressão, $t = 250$ s. 200 volumes de controle	74
Figura 5.25 -	Caso 1: Influência da ordem do esquema no perfil de velocidade ao longo do duto, $t = 250$ s	75

Figura 5.26 - Caso 1: Influência da ordem do esquema, $t = 250$ s.	75
Presente: 200 volumes; AUSM II: 50 volumes	
Figura 5.27 - Caso 1: Influência da ordem do esquema no perfil de velocidade, $t = 250$ s. Presente: 200 volumes; AUSM II: 50 volumes	76
Figura 5.28 - Configuração do duto para golfada severa	77
Figura 5.29 - Variação da pressão com o tempo em $x = 60$ m	78
Figura 5.30 - Comparação da variação da pressão com o tempo após atingir regime estatisticamente permanente em $x = 60$ m	79
Figura 5.31 - Comparação com Masella (1998) da vazão de líquido com o tempo após atingir regime estatisticamente permanente em $x = 60$ m	80
Figura 5.32 - Variação da vazão de líquido com o tempo em $x = 60$ m. Teste de malha de Andrianov (2006)	80
Figura 5.33 - Variação da fração de líquido com o tempo após atingir regime estatisticamente permanente em $x = 0$ m	81
Figura 5.34 - Variação da pressão com o tempo, $x = 0$ m, 60 m e 74 m	81
Figura A.1 - Fluxograma esquemático – PRIMER sequencial	95
Figura B.1 - Variação da Fração de Líquido com o tempo em $x = 60$ m para $Dx = 1$ m e $Dt = 0,001$ s	96
Figura B.2 - Variação da Fração de Líquido com o tempo em $x = 60$ m para $Dx = 1$ m e $Dt = 0,0005$ s	96
Figura B.3 - Variação da Fração de Líquido com o tempo em $x = 60$ m para $Dx = 1$ m e $Dt = 0,0001$ s	97
Figura B.4 - Variação da Fração de Líquido com o tempo em $x = 60$ m para $Dx = 0,5$ m e $Dt = 0,0001$ s	97
Figura B.5 - Variação da Fração de Líquido com o tempo em $x = 60$ m para $Dx = 0,25$ m e $Dt = 0,0001$ s	97
Figura B.6 - Variação da Pressão com o tempo em $x = 60$ m para $Dx = 1$ m e $Dt = 0,001$ s	98

Figura B.7 -	Variação da Pressão com o tempo em $x = 60$ m para $Dx = 1$ m e $Dt = 0,0005$ s	98
Figura B.8 -	Variação da Pressão com o tempo em $x = 60$ m para $Dx = 1$ m e $Dt = 0,0001$ s	98
Figura B.9 -	Variação da Pressão com o tempo em $x = 60$ m para $Dx = 0,5$ m e $Dt = 0,0001$ s	98
Figura B.10 -	Variação da Pressão com o tempo em $x = 60$ m para $Dx = 0,25$ m e $Dt = 0,0001$ s	99

Lista de símbolos

a	Velocidade do som da fase
A	Área da seção transversal da tubulação
D	Diâmetro da tubulação
C	Constante de Chisholm
C_o	Parâmetro de distribuição
f	Fator de fricção
F	Fluxo convectivo / Força
\tilde{F}	Pseudo fluxo convectivo
g	Aceleração da gravidade
j	Fluxo volumétrico total
L	Comprimento do duto
\dot{m}	Vazão mássica
P	Pressão
Q	Vazão volumétrica
R	Constante do gás
Re	Número de <i>Reynolds</i>
t	Tempo
T_{ref}	Temperatura de referência
u	Velocidade da fase
\bar{u}	Velocidade média
U_{sk}	Velocidade superficial da fase k
V_{gj}	Velocidade de <i>Drift</i>
$\overline{V_{gj}}$	Velocidade de <i>Drift</i> média
X^2	Parâmetro de Lockhart e Martinelli
x	Coordenada axial

Símbolos gregos

α	Fração volumétrica da fase
θ	Ângulo de inclinação da tubulação com respeito à horizontal
Γ	Troca de massa entre as fases
Δ	Variação de uma grandeza
ϕ^2	Multiplicador de perda de carga da fase
Φ	Vetor solução do sistema de autovalores
μ	Viscosidade dinâmica
ε	Rugosidade absoluta
π	Constante Pi
ρ	Massa específica
σ	Tensão superficial

Subscritos

e,w	Faces leste e oeste do volume de controle principal
E	Referente ao centro do volume principal de controle a leste
g	Fase gasosa
i	Interface / Iésimo elemento
in	Referente à entrada do duto
k	fase
l	Fase líquida
m	Mistura
max	Máximo valor
N	Número total de nós no domínio
P	Referente ao centro do volume de controle principal
ref	Referência
w	Parede da tubulação
W	Referente ao centro do volume principal de controle a leste

Sobrescritos

- o Referente ao passo de tempo anterior
- \sim Referente a uma grandeza aproximada
- $*$ Referente à iteração anterior