

# SUMÁRIO

Autores .....	X
Prefácio.....	xi

## PRINCÍPIOS BÁSICOS

<b>CAPÍTULO 1 - Fundamentos do Escoamento Multifásico.....</b>	<b>1-1</b>
--	------------

*Antonio C. Bannwart*

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1-3</b>
<b>2. Padrões de Escoamento.....</b>	<b>1-6</b>
<b>3. Ferramentas Matemáticas .....</b>	<b>1-8</b>
3.1. Velocidade de deslocamento de uma superfície .....	1-8
3.2. Regra de Leibniz.....	1-11
3.3. Teoremas de Gauss-Green .....	1-12
3.4. Taxas de Transporte.....	1-13
3.4.1. Vazão.....	1-13
3.4.2. Teoremas de Transporte .....	1-13
<b>4. Escoamento Monofásico.....</b>	<b>1-14</b>
4.1. Equações de Balanço Integral Instantâneo.....	1-14
4.1.1. Balanço Global de Massa .....	1-15
4.1.2. Balanço de Quantidade de Movimento Linear .....	1-15
4.1.3. Balanço de Quantidade de Movimento Angular .....	1-16
4.1.4. Balanço de Energia Total .....	1-17
4.1.5. Balanço de Entropia .....	1-18
4.2. Equações Locais Instantâneas e Relações Constitutivas.....	1-18
4.2.1. Massa.....	1-19
4.2.2. Quantidade de Movimento Linear.....	1-19
4.2.3. Quantidade de Movimento Angular .....	1-19
4.2.4. Energia Total .....	1-19
4.2.5. Entropia .....	1-20
4.2.6. Relações Constitutivas: Comportamento dos Fluidos .....	1-20
<b>5. Escoamento Bifásico e Multifásico .....</b>	<b>1-22</b>

5.1. Equações de Balanço Integral Instantâneo .....	1-23
5.1.1. Balanço de Massa.....	1-23
5.1.2. Balanço de Quantidade de Movimento Linear.....	1-24
5.1.3. Balanço de Quantidade de Movimento Angular .....	1-24
5.1.4. Balanço de Energia Total .....	1-24
5.1.5. Balanço de Entropia .....	1-24
5.2. Equações Instantâneas Locais e Condições de Salto .....	1-25
5.2.1. Massa .....	1-25
5.2.2. Quantidade de Movimento Linear.....	1-26
5.2.3. Quantidade de Movimento Angular .....	1-26
5.2.4. Energia Total.....	1-26
5.2.5. Entropia.....	1-27
5.2.6. Relações Constitutivas para o Comportamento da Interface.....	1-27
5.2.7. Geração de Entropia:.....	1-28
<b>6. Observações Finais.....</b>	<b>1-29</b>
<b>7. Referências.....</b>	<b>1-30</b>
<b>CAPÍTULO 2 - Equações Unidimensionais para Escoamento Multifásico em Canais.....</b>	<b>2-1</b>
<i>Antonio C. Bannwart</i>	
<b>1. Introdução.....</b>	<b>2-4</b>
<b>2. Exemplo Ilustrativo:Escoamento em Canal Aberto com Superfície Livre</b>	<b>2-5</b>
<b>3. Equações do Escoamento Monofásico Unidimensional em Canais.....</b>	<b>2-8</b>
3.1. Propriedades Médias e Volume de Controle Diferencial.....	2-8
3.2. Balanço de Massa .....	2-9
3.3. Balanço de Quantidade de Movimento Linear .....	2-10
3.4. Balanço de Quantidade de Movimento Angular.....	2-11
3.5. Energia Total .....	2-12
3.6. Balanço de Entropia e seu Termo de Geração .....	2-14
3.7. Relações Constitutivas para Escoamento Monofásico Unidimensional	2-15
3.7.1. Equações de Estado.....	2-15
3.7.2. Tensões de Cisalhamento .....	2-16
3.7.3. Fluxo de Calor.....	2-17
3.7.4. Fluxo de Massa .....	2-17
<b>4. Equações de Escoamento Multifásico Unidimensional em Canais.....</b>	<b>2-18</b>
4.1. Variáveis Básicas do Escoamento Multifásico Unidimensional em	

Canais .....	2-18
4.1.1. Frações de Volume, Área e Tempo de uma Fase .....	2-18
4.1.2. Fluxos Volumétricos e Velocidades .....	2-19
4.1.3. Títulos .....	2-20
4.2. Equações de Fase .....	2-21
4.2.1. Balanço de Massa em uma Fase .....	2-21
4.2.2. Balanço de Quantidade de Movimento Linear em uma Fase .....	2-21
4.2.3. Balanço de Quantidade de Movimento Angular em uma Fase.....	2-21
4.2.4. Balanço de Energia Total em uma Fase .....	2-22
4.2.5. Balanço de Entropia em uma Fase .....	2-22
4.3. Equações de Mistura .....	2-22
4.3.1. Balanço de Massa para a Mistura .....	2-23
4.3.2. Balanço de Quantidade de Movimento Linear para a Mistura .....	2-23
4.3.3. Balanço de Quantidade de Movimento Angular para a Mistura.....	2-24
4.3.4. Balanço de Energia Total para a Mistura .....	2-24
4.3.5. Balanço de Entropia para a Mistura .....	2-25
<b>5. Introdução à Modelagem do Escoamento Multifásico Unidimensional...</b>	<b>2-26</b>
<b>6. Observações Finais .....</b>	<b>2-29</b>
<b>7. Referencias .....</b>	<b>2-29</b>

### **CAPÍTULO 3 - Modelos Mecanicistas em Escoamento Bifásico Líquido-Gás em Tubulações .....**

*Cristiane Cozin, Rigoberto E. M. Morales, Fernando A. França*

<b>1. Introdução.....</b>	<b>3-4</b>
<b>2. O Modelo Homogêneo.....</b>	<b>3-8</b>
<b>3. O Modelo de Fases Separadas .....</b>	<b>3-15</b>
<b>4. O Modelo de Lockhart e Martinelli .....</b>	<b>3-18</b>
<b>5. Referências .....</b>	<b>3-27</b>

### **CAPÍTULO 4 - Aspectos fenomenológicos e modelagem de escoamentos bifásicos gás-líquido .....**

*Jader R. Barbosa Jr.*

<b>1. Introdução.....</b>	<b>4-3</b>
<b>2. Classificação dos padrões de escoamento.....</b>	<b>4-3</b>
2.1. Definições.....	4-3
2.2. Transições entre padrões de fluxo .....	4-7
2.2.1. Transição entre os regimes em bolhas e <i>slug</i> .....	4-8
2.2.2. Transição entre os regimes <i>slug</i> e <i>churn</i> .....	4-8
2.2.3. Transição entre os regimes <i>churn</i> e anular.....	4-14
2.2.4. Transição entre os regimes anular e <i>wispy-annular</i> .....	4-15
<b>3. Escoamento no padrão anular.....</b>	<b>4-15</b>
3.1. O filme líquido no escoamento anular.....	4-16
3.2. Gotículas no escoamento anular .....	4-17
3.3. Modelagem do escoamento no padrão anular.....	4-26
3.4. Transferência de calor.....	4-32
<b>4. Escoamento no padrão agitado (<i>churn flow</i>).....</b>	<b>4-43</b>
4.1. Características do padrão de escoamento .....	4-43
4.2. Modelagem do escoamento no padrão churn.....	4-54
<b>5. Escoamento no padrão <i>slug</i> (aspectos da modelagem).....</b>	<b>4-57</b>
5.1. Transferência de calor.....	4-63
<b>6. Referências.....</b>	<b>4-64</b>

## INSTRUMENTAÇÃO

<b>CAPÍTULO 5 - Instrumentação e Análise de Sinais: Uma Visão sobre os Padrões de Escoamento Multifásico .....</b>	<b>5-1</b>
--	------------

*Paulo Selegim Júnior*

<b>1. Introdução.....</b>	<b>5-2</b>
<b>2. Análise tempo-frequência .....</b>	<b>5-5</b>
2.1. Transformada de Gabor .....	5-6
2.2. Transformada wavelet.....	5-10
<b>3. Redes neurais (mapas) auto-organizativas.....</b>	<b>5-15</b>
<b>4. Conclusões – uma análise unificada.....</b>	<b>5-21</b>

5. Referências .....	5-22
----------------------	------

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA

CAPÍTULO 6 - Métodos Computacionais para Escoamento Multifásico .....	6-1
---	-----

*Angela O. Nieckele*

<b>1. Introdução .....</b>	<b>6-3</b>
<b>2. Equações de Conservação e Condições de Contorno .....</b>	<b>6-3</b>
2.1. Condições de Contorno .....	6-5
<b>3. Métodos Baseados na Solução Direta das Equações de Navier-Stokes .....</b>	<b>6-7</b>
3.1. Modelo de “Um Fluido” .....	6-8
3.2. Tratamento das Propriedades .....	6-9
3.3. Topologia das Interfaces .....	6-10
3.4. Métodos de Captura de Interface .....	6-11
3.5. Método VOF (Volume of Fluid) .....	6-14
3.5.1. Reconstrução .....	6-18
3.5.2. Propagação .....	6-20
3.5.3. Discretização da Tensão Superficial .....	6-21
3.6. Método “Level-Set” .....	6-22
3.6.1. Acoplamento do Método “Level-Set” com o Modelo de “Um Fluido” .....	6-24
3.7. Resolução das Equações de Navier-Stokes .....	6-25
3.8. Aplicações .....	6-26
3.8.1. Movimento Inicial de uma Grande Bolha Esférica .....	6-26
3.8.2. Junção de bolhas .....	6-28
3.8.3. Formação de Golfada .....	6-29
<b>4. Métodos Baseados nas Equações Médias de Navier-Stokes .....</b>	<b>6-31</b>
4.1. Equações Médias de Navier-Stokes .....	6-32
4.1.1. Modelo de Dois Fluidos Unidimensional .....	6-36
4.2. Modelo de Deslizamento .....	6-38
4.2.1. Modelo de Deslizamento Unidimensional .....	6-39
4.3. Homogêneo .....	6-41
4.3.1. Modelo Homogêneo Unidimensional .....	6-42
4.4. Métodos Numéricos de Solução das Equações de Conservação .....	6-43
4.4.1. Método das Características .....	6-43
4.4.2. Solução Numérica do Modelo de Deslizamento .....	6-45
4.4.2.1. Variáveis $u_m$ , $p_m$ , $\alpha$ .....	6-45

4.4.2.2. Variáveis $\alpha_g \rho_g, \alpha_l \rho_l, \rho_m, u_m$ .....	6-51
4.4.3. Solução Numérica do Modelo de Dois Fluidos.....	6-54
4.4.3. Solução do Sistema Algébrico .....	6-58
4.5. Aplicações .....	6-59
4.5.1. Transição de Escoamento Bifásico para Monofásico Líquido .....	6-59
4.5.2. Golfada Severa .....	6-60
4.5.3. Formação de Golfada em Duto Horizontal e Quase-horizontal .....	6-62
4.5.4. Obtenção de Estatísticas do Padrão de Golfada .....	6-65
<b>5. Agradecimentos .....</b>	<b>6-69</b>
<b>6. Referências.....</b>	<b>6-69</b>

## **CAPÍTULO 7 - Modelagem de Dois Fluidos do Escoamento Gás-Sólido em Reatores de Leito Fluidizado Circulante..... 7-1**

*Fernando E. Milioli, Christian C. Milioli*

<b>1. Introdução.....</b>	<b>7-3</b>
1.1. Contexto .....	7-3
1.2. Linhas de modelagem matemática.....	7-5
1.3. Descrição hidrodinâmica de reatores de leito fluidizado .....	7-9
1.4. Breve descrição de estado da arte em modelagem de dois fluidos de escoamentos gás-sólido em leitos fluidizados circulantes .....	7-13
<b>2. Formulação básica do modelo de dois fluidos para escoamentos gás-sólido.....</b>	<b>7-20</b>
<b>3. Simulações de grandes escalas (SGE) e sub-malha (SSM).....</b>	<b>7-29</b>
3.1. Formulação para simulação de grandes escalas (SGE).....	7-30
3.1.1. Relações de fechamento convencionais .....	7-32
3.1.2. Condições de contorno .....	7-36
3.2. Formulação para simulação sub-malha (SSM).....	7-36
3.2.1. Relações de fechamento .....	7-38
3.2.2. Condições de contorno .....	7-42
3.3. Fechamento para fase sólida em SGE obtido via SSM.....	7-43
<b>4. Referências.....</b>	<b>7-47</b>

## **INSTABILIDADE HIDRODINÂMICA**

**CAPÍTULO 8 - Ondas e Estabilidade Hidrodinâmica em Escoamento Bifásico Líquido-Líquido Paralelo .....8-1**

*Oscar M. H. Rodriguez*

<b>1. Introdução.....</b>	<b>8-3</b>
<b>2. Escoamento bifásico líquido-líquido .....</b>	<b>8-6</b>
2.1. Considerações iniciais.....	8-6
2.2. Escoamento bifásico líquido-líquido em tubulação .....	8-9
2.2.1. Escoamento bifásico líquido-líquido em tubulação vertical ascendente .....	8-10
2.2.2. Escoamento bifásico líquido-líquido em tubulação horizontal.....	8-11
<b>3. Aspectos fundamentais da modelagem de escoamento bifásico: modelo de dois fluidos unidimensional .....</b>	<b>8-15</b>
3.1. Equações locais instantâneas do escoamento bifásico e condições de salto .....	8-16
3.1.1. Relações Matemáticas Importantes .....	8-16
3.1.2. Balanços Globais Instantâneos para Escoamento Bifásico.....	8-17
3.1.3. Equações Locais Instantâneas para Escoamento Bifásico.....	8-19
3.2. Equações de escoamento bifásico médias na seção transversal; modelagem unidimensional .....	8-21
3.2.1. Conservação da massa - equação instantânea média numa seção ..	8-22
3.2.2. Quantidade de movimento - equação instantânea média numa seção .....	8-23
3.3. Exemplo: dedução da equação da quantidade de movimento unidimensional média na seção para escoamento estratificado líquido-líquido em regime permanente.....	8-25
<b>4. Ondas unidimensionais e ocorrência em escoamento bifásico paralelo...8-29</b>	
4.1. Considerações iniciais.....	8-29
4.2. Fração volumétrica e teoria da onda cinemática .....	8-30
<b>5. Conceitos fundamentais da estabilidade hidrodinâmica em escoamento bifásico paralelo.....8-36</b>	
5.1. Considerações iniciais.....	8-36
5.2. Conceitos básicos da estabilidade hidrodinâmica em escoamento bifásico paralelo .....	8-38
5.3. Classificação das instabilidades em escoamento bifásico paralelo .....	8-40
5.3.1. Formulação do problema de estabilidade .....	8-40
5.3.2. Balanço de energia .....	8-42
5.3.3. Classificação das instabilidades em escoamento bifásico .....	8-43

<b>6. Aplicações</b> .....	<b>8-45</b>
6.1. Análise da estabilidade do escoamento líquido-líquido anular.....	8-45
6.1.1. Formulação do problema de estabilidade para escoamento anular.....	8-45
6.1.2. Critério Invíscido de Kelvin-Helmholtz (Eq. 6.21).....	8-52
6.1.3. Critério Geral (Eq. 6.22).....	8-54
6.2. Análise da estabilidade do escoamento líquido-líquido estratificado.....	8-56
6.2.1. Formulação do problema de estabilidade para escoamento estratificado.....	8-57
6.2.2. Aplicação do critério geral de estabilidade.....	8-62
<b>7. Conclusões</b> .....	<b>8-64</b>
<b>8. Agradecimentos</b> .....	<b>8-65</b>
<b>9. Referências</b> .....	<b>8-65</b>

## APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

<b>CAPÍTULO 9 - Alguns Aspectos de Produção de Petróleo</b> .....	<b>9-1</b>
---	------------

*Arlindo de Matos, Carlos Magno Bezerra de Medeiros Nascimento*

<b>1. Introdução</b> .....	<b>9-2</b>
<b>2. Etapas do Escoamento do Petróleo</b> .....	<b>9-2</b>
<b>3. Mecanismos de Produção</b> .....	<b>9-5</b>
3.1. Gás em Solução.....	9-5
3.2. Capa de Gás.....	9-6
3.3. Influxo de Água.....	9-7
<b>4. Modelos de Fluido Utilizados</b> .....	<b>9-8</b>
4.1. Black-oil.....	9-8
4.2. Modelo composicional.....	9-9
<b>5. Modelagem para Perda de carga em Escoamento Multifásico</b> .....	<b>9-9</b>
5.1. Correlações do Tipo I.....	9-10
5.2. Correlações do Tipo II.....	9-10
5.3. Correlações do Tipo III.....	9-10
5.4. Limitações das correlações Black-oil.....	9-11
<b>6. Escoamento Multifásico nos Métodos de Elevação de Petróleo</b> .....	<b>9-11</b>



6.1. Elevação Natural.....	9-11
6.1.1. Fatores que Influenciam na Produção por Surgência .....	9-12
6.2. Necessidade da Elevação Artificial.....	9-12
6.3. Gás Lift.....	9-14
6.3.1. CONCEITO.....	9-14
6.3.2. Tipos de “Gas-Lift” .....	9-15
6.3.3. Válvulas e mandris de Gas Lift .....	9-16
6.4. Gás Lift Intermitente.....	9-17
6.4.1. Ciclo de Intermitência .....	9-17
6.4.2. Escorregamento de Líquido e penetração do gás na golfada.....	9-18
6.5. BCS - Bombeio Centrifugo Submerso.....	9-19
6.5.1. Bomba Centrífuga .....	9-19
6.5.2. Histórico de BCS.....	9-19
6.5.3. Características do método.....	9-20
<b>7. Transferência de Calor em Linhas.....</b>	<b>9-21</b>
7.1. Transferência de Calor em Tubulação de Seção Circular .....	9-21
7.1.1. Transferência de Calor Unidimensional por condução, em Regime Permanente .....	9-21
7.1.2. Condução e Convecção em Tubos Cilíndricos Concêntricos (fluxo de calor radial e permanente) .....	9-22
7.1.3. Procedimento De Acoplamento para Cálculo Simultâneo dos Gradientes de Pressão e Temperatura em Regime Permanente.....	9-24
7.1.4. Gradiente de Temperatura em poços de Produção .....	9-25
7.1.5. Equação de Balanço de Energia – SIMPLIFICADA.....	9-25
7.1.6. Efeito Joule-Thompson .....	9-26
7.2. Cálculo de Perfis de Pressão e Temperatura .....	9-27
7.2.1. Gradiente de Pressão .....	9-27
<b>8. Anexo.....</b>	<b>9-28</b>
8.1. Calor Específico.....	9-28
8.2. Condutividade Térmica.....	9-29
<b>9. Referência Bibliográfica .....</b>	<b>9-29</b>