

MODELAGEM E CONTROLE NA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

APLICAÇÕES EM MATLAB

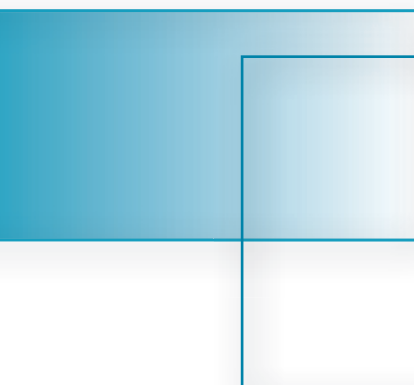


GIOVANI CAVALCANTI NUNES
JOSÉ LUIZ DE MEDEIROS
OFÉLIA DE QUEIROZ FERNANDES ARAÚJO

Blucher

BR **PETROBRAS**

OPENCADD
Advanced Technology
CONSULTING GROUP



MODELAGEM E CONTROLE NA
PRODUÇÃO DE PETRÓLEO
Aplicações em MATLAB

Blucher

GIOVANI CAVALCANTI NUNES
Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras

JOSÉ LUIZ DE MEDEIROS
Escola de Química – Universidade Federal do Rio de Janeiro

OFÉLIA DE QUEIROZ FERNANDES ARAÚJO
Escola de Química – Universidade Federal do Rio de Janeiro

MODELAGEM E CONTROLE NA
PRODUÇÃO DE PETRÓLEO
Aplicações em MATLAB

Modelagem e controle na produção de petróleo – aplicações em MATLAB

© 2010 Giovani Cavalcanti Nunes

José Luiz de Medeiros

Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo

1ª reimpressão – 2011

Editora Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-012 – São Paulo – SP – Brasil

Tel 55 11 3078-5366

editora@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA

Nunes, Giovani Cavalcanti

Modelagem e controle na produção de petróleo – aplicações em MATLAB/Giovani Cavalcanti Nunes, José Luiz de Medeiros, Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo – São Paulo: Blucher, 2010.

ISBN 978-85-212-0567-8

1. Análise numérica – Processamento de dados.
2. MATLAB.
3. Petróleo – Modelagem e controle.
4. Petróleo – Produção I. Medeiros, José Luiz de. II. Araújo, Ofélia de Queiroz Fernandes. III. Título.

10-11267

CDD-622.338

Índices para catálogo sistemático:

1. Petróleo: Produção: Modelagem e controle: Aplicações em MATLAB: Tecnologia 622.338

*Às minhas filhas Giovanna, Julia e Isabela e a
minha esposa Denise pelo incentivo e paciência
ao longo do tempo que dediquei a este livro.*

*Ao meu grande amigo
Maurício Michael Folly Yamamoto.*

Giovani Cavalcanti Nunes

*Aos alunos da Universidade Federal do
Rio de Janeiro (UFRJ) que contribuíram
para o desenvolvimento desta obra.*

José Luiz de Medeiros

*Em memória dos meus pais e ao caráter
não estacionário da vida, que desafia a
nossa capacidade de controle.*

Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo



Agradecimentos

É necessário registrar o débito que temos com respeito aos trabalhos realizados, direta e indiretamente, por profissionais de Engenharia que contribuíram para a consolidação, extensão, aprimoramento, editoração, ilustração e finalização deste texto. Referimo-nos aos revisores técnicos André L. Hemerly Costa (IQ-UERJ) e Vicente Delgado Moreira (E&P-UN-RNCE-Petrobras) pelo exaustivo trabalho de leitura e varredura do texto, que resultou em diversas propostas de correção e aperfeiçoamento; à Rosana Kunert (RH-UP-ECTEP-Petrobras) e Lúcia Emilia de Azevedo (Universidade Petrobras) pelo inestimável empenho administrativo para a finalização desta obra; aos alunos M.Sc. Diego D. Pinto e Cristina Santos de Almeida (TPQBq-UFRJ) e D.Sc. Jaime N. M. de Souza (TPQBq-UFRJ) por suas participações na implementação e testes de parte dos algoritmos e aplicações discutidos no texto; à aluna Lúcia Mitiko Ohashi (Petrobras) pelas diversas sugestões resultantes de suas horas gastas com leitura e estudo do texto como discente da disciplina Modelagem e Controle no Processamento *Offshore* de Petróleo – Aplicações em MATLAB, ministrado em maio de 2008. Por último, agradecemos a cuidadosa revisão do texto final realizada pelos alunos M.Sc Raquel Massad Cavalcanti e D.Sc Carlos André Vaz Junior; e a todos os demais alunos que participaram de cursos que ministramos, em Controle e Dinâmica de Processos, pelo *feedback* por meio de suas críticas e sugestões.

Os autores

Apresentação

Nereu Carlos Milani De Rossi

Coordenador da Área de Produção
Recursos Humanos/Universidade Petrobras
Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras

Empresa reconhecida internacionalmente pelas realizações e contínuas inovações na exploração de reservatórios de petróleo localizados tanto em bacias sedimentares marítimas do Brasil como em outras províncias petrolíferas, a exemplo do Mar do Norte e Golfo do México, a Petrobras credita à alta qualificação técnica dos seus profissionais o diferencial para suas conquistas.

Mesmo antes de sua criação em 1953, na época do Conselho Nacional do Petróleo, a Petrobras investia fortemente através das Universidades Brasileiras, na formação e aperfeiçoamento de seus técnicos na área de exploração, produção e refino de petróleo. Posteriormente, cursos específicos para formação de engenheiros de processamento, geólogos, geofísicos e engenheiros de petróleo foram sendo criados em seus Centros de Treinamento, de forma a preparar sua força de trabalho com foco nos desafios que estavam sendo impostos, alinhados com os mais recentes estudos desenvolvidos em seu Centro de Pesquisas. Um crescente número de cursos de atualização, de revisão e cursos avançados foram criados para manter os profissionais da Companhia a par do estado da arte da tecnologia e ciência.

Professores e pesquisadores de universidades brasileiras e estrangeiras e de centros de pesquisas de alto nível têm participado deste processo de aprimoramento da força de trabalho e constituem parte integrante da rede que suporta o desenvolvimento tecnológico da Companhia.

Neste contexto de alta tecnologia desenvolvido pela sinergia entre profissionais da Petrobras e pesquisadores de universidades, surge esta obra sobre Sistemas de Controle em Plataformas Marítimas de Produção, com ênfase no Processamento Primário de Petróleo. Trata-se de uma abordagem multidisciplinar inédita onde se discute, de forma integrada, desde a modelagem da elevação e escoamento de fluidos em tubulações até o seu processamento na plataforma.

Neste novo título, a superação da segmentação disciplinar clássica permite uma visão abrangente dos fenômenos inerentes às metodologias e tecnologias empregadas, possibilitando análises integradas que permitem uma compreensão global do processo de produção de petróleo.

Conhecimentos de engenharia de processamento de petróleo e escoamento de fluidos em meios contínuos são integrados com técnicas de modelagem, simulação e controle dos processos visando operações otimizadas e seguras. A utilização dos *softwares* adequados resulta em maior rapidez, confiabilidade de resultados e iteratividade com a força de trabalho. Obtém-se assim uma ferramenta importante no dimensionamento e operação das plataformas de produção, equipadas com plantas de processamento cada vez mais sofisticadas e complexas, projetadas para separar e tratar fluidos com percentuais crescentes de contaminantes, como os oriundos das descobertas do pré-sal.

Este livro tornar-se-á referência para os profissionais que atuam na área de Engenharia de Processamento de Petróleo, em especial nas atividades relacionadas à produção no mar. Livro-texto na formação de novos profissionais para a área, material de consulta para profissionais de toda a cadeia produtiva de E&P, registra, preserva e dissemina o conhecimento construído pelos autores durante muitos anos. São eles: Eng^o. Giovanni Cavalcanti Nunes, com vasta experiência na Petrobras atuando como pesquisador, gerente e docente na área de instalações de superfície, separação, tratamento e medição fluidos; Eng^o. José Luiz de Medeiros, da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, com docência e pesquisa nas áreas de termodinâmica aplicada, processos de separação de fluidos e modelagem, simulação e otimização de processos químicos; e Eng^a. Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo, na mesma Escola de Química da UFRJ, coordenadora do programa de pós-graduação em tecnologia de processos químicos e bioquímicos, docente e pesquisadora na área de modelagem e controle na produção, transporte e refino de petróleo. Com doutorado em Engenharia Química, os três profissionais têm atuado conjuntamente em inúmeros projetos de pesquisa conveniados entre a Petrobras e a UFRJ para o desenvolvimento de novas tecnologias para o E&P, e na docência de cursos avançados de Controle de Processos.

Com a publicação deste livro através do Programa de Editoração de Livros Didáticos da Universidade Petrobras, além de preservar sua memória técnica, a Petrobras continua investindo na capacitação de seus profissionais, ao mesmo tempo em que disponibiliza para a comunidade científica e acadêmica envolvida com a formação de novos quadros para a indústria de petróleo, a experiência acumulada nos desafios que vem superando a cada dia, na produção de petróleo em condições cada vez mais adversas.

Nereu Carlos Milani De Rossi



Apresentação

Jorge Frederico M. Landmann

Diretor Presidente
OpenCadd Advanced Technology

Para nós da OpenCadd Advanced Technology, é um imenso prazer poder participar com a Petrobras da publicação deste importante livro desenvolvido por três renomados profissionais: Dr. Giovani Cavalcanti Nunes, gerente corporativo de processamento e medição de fluidos do E&P da Petrobras, Prof^ª Dr^ª Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo e Prof. Dr. José Luiz de Medeiros, ambos professores da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro; todos reconhecidos entre as principais lideranças de pesquisa aplicada nas áreas de monitoramento, controle, simulação e otimização de processos químicos e bioquímicos.

A publicação trata da modelagem e controle de processos e mecânica dos fluidos, com enfoque na monitoração dos principais sistemas de produção e processamento primário de petróleo em plataformas *offshore*. Sua importância é ainda maior por ter sido desenvolvida a partir do avançado domínio do setor, possibilitado, em grande parte, pela Petrobras, cuja liderança nessa área é reconhecida mundialmente. Portanto, o livro não reflete uma possibilidade teórica e acadêmica distante da realidade, pois está lastreado em experiências reais e em resultados positivos. Este criterioso trabalho apresenta informações recentes e atualizadas, e não tecnologias de processos distantes e superados, sendo fruto de um longo aprendizado dos autores, bem como de um criterioso estudo de publicações das mais renomadas autoridades do setor, cujos conhecimentos muito têm contribuído para o avanço da exploração e produção tanto de petróleo como de gás.

Há mais de uma década, a OpenCadd trabalha como parceira tecnológica da Petrobras em busca de soluções inovadoras quanto à qualidade e ao ganho de produtividade, por meio do fornecimento de suporte ao desenvolvimento de sistemas de análises de dados, processamento numérico e gráfico, controle e simulação de processos, nas diversas áreas de atuação da Petrobras. Com o intuito de fortalecer ainda mais essa parceria, oferecemos ao corpo técnico da Petrobras a nossa colaboração participando da publicação deste livro.

Jorge Frederico M. Landmann



Conteúdo

INTRODUÇÃO	21
1. INTRODUÇÃO AO CONTROLE DE PROCESSOS DE PLANTAS OFFSHORE	
1.1 Descrição da Planta de Processamento Primário <i>Offshore</i>	26
2. MODELAGEM DE PROCESSOS	
Nomenclatura	32
2.1 Classificação dos Modelos de Processos.....	33
2.2 Modelagem Simplificada do Separador Bifásico	35
2.3 Linearização de Sistemas Não Lineares	38
2.4 Modelagem Simplificada do Tratador Eletrostático	43
2.5 Modelagem Simplificada do Separador Trifásico	45
Exercícios Propostos	47
3. PONTOS ESTACIONÁRIOS DE OPERAÇÃO	
Nomenclatura	49
3.1 Pontos de Equilíbrio	49
3.2 Pontos de Equilíbrio de Sistemas Lineares e Plano de Fase.....	53
3.3 Sistemas Não Lineares na Vizinhança de Pontos de Equilíbrio	57
3.4 Análise de Ponto de Equilíbrio por Técnica de Linearização.....	60
Exercícios Propostos	61
4. RESOLUÇÃO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS LINEARES POR TRANSFORMADA DE LAPLACE	
Nomenclatura	63
4.1 Transformada de Laplace de Funções Básicas	71
4.2 Propriedades e Teoremas da Transformada de Laplace.....	72
4.3 Inversão de Transformadas de Laplace	74
Exercícios Propostos	76

5. REPRESENTAÇÃO ENTRADA-SAÍDA – FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

Nomenclatura	79
5.1 Funções de Transferência	80
5.2 Resolução de Sistemas Lineares	80
5.2.1 Diagrama de blocos	82
Exercícios Propostos.....	90

6. RESPOSTAS DINÂMICAS

Nomenclatura	93
6.1 Resposta Dinâmica de Processos Lineares de 1ª Ordem.....	94
6.1.1 Resposta de um sistema de 1ª ordem a uma perturbação degrau	94
6.1.2 Resposta de um sistema de 1ª ordem a uma perturbação rampa	98
6.1.3 Resposta de um sistema de 1ª ordem a uma perturbação senoidal.....	99
6.2 Resposta Dinâmica de Processos de 2ª Ordem.....	101
6.2.1 Resposta de um sistema de 2ª ordem a uma perturbação degrau	102
6.2.2 Resposta de um sistema de 2ª ordem a uma perturbação senoidal.....	105
6.3 Resposta Dinâmica de Processos de Ordem Superior.....	108
6.3.1 Sistemas multicapacitivos	109
6.3.2 Tempo morto.....	109
6.4 Aproximação de Sistemas de Ordem Superior	116
6.5 Sistemas com Resposta Inversa	118
Exercícios Propostos.....	120

7. ESTABILIDADE DE SISTEMAS DINÂMICOS

Nomenclatura	123
7.1 Critério de Estabilidade de Routh-Hurwitz.....	127
7.2 Método da Substituição Direta.....	131
Exercícios Propostos.....	132

8. PROJETO DE MALHAS DE CONTROLE

Nomenclatura	135
8.1 Malha de Controle <i>Feedback</i>	136
8.2 Ações do Controlador PID.....	137
8.3 Sintonia de Controlador PID.....	143
8.3.1 Método da sensibilidade limite (método do ganho limite).....	143
8.3.2 Método da curva de reação	144
8.3.3 Método Cohen-Coon.....	146
8.3.4 Método de sintonia Aström-Hagglund.....	146
8.3.5 Sintonia pela “regra simples” de Skogestad.....	147

8.3.6	Parametrizações de algoritmos PIDs.....	151
8.3.7	Sumário das correlações de sintonia.....	153
8.4	Sintonia de Controlador Baseada em Resposta Transiente.....	153
8.4.1	Correlações de sintonia para mínimo ITAE.....	155
8.5	Síntese Direta de Controladores.....	156
8.5.1	Controlador PI	156
8.5.2	Processo com tempo morto	157
8.5.3	Correlações de sintonia por síntese direta, para controle regulatório.....	158
8.6	Controle por Modelo Interno	159
8.6.1	Correlações de sintonia IMC.....	162
8.7	Comparação Síntese Direta – IMC.....	162
8.8	Versão Discreta <i>vs</i> Versão Contínua.....	163
8.9	Controladores Comerciais.....	163
	Exercícios Propostos.....	165
9.	RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	
	Nomenclatura	169
9.1	Resposta em Frequência de um Sistema de 1ª Ordem.....	172
9.2	Resposta em Frequência de um Sistema de 2ª Ordem.....	175
9.3	Resposta em Frequência de Processo com Tempo Morto.....	177
9.4	Resposta em Frequência de um Processo Puramente Capacitivo	177
9.5	Sintonia de Controladores PID Baseada na Resposta em Frequência	178
9.5.1	Controlador proporcional.....	179
9.5.2	Controlador PI.....	179
9.5.3	Controlador PD	183
9.5.4	Controlador PID ideal.....	183
9.6	Critério de Estabilidade de Bodé.....	183
9.7	Critério de Estabilidade de Nyquist.....	184
9.8	Margem de Ganho e Margem de Fase	184
9.9	Projeto de Controladores no Domínio da Frequência	186
9.9.1	Margem de ganho e margem de fase de malhas de controle....	188
	Exercícios Propostos.....	188
10.	DINÂMICA DE RESPOSTA – PID	
	Nomenclatura	193
10.1	Efeito do Controlador Proporcional, sob Perturbação de Carga	194
10.2	Efeito do Controlador PI, sob Perturbação de Carga	195
10.3	Análise do Sinal de Erro.....	196
	Exercícios Propostos	201
11.	ESTRUTURAS DE CONTROLE AVANÇADO	
	Nomenclatura	203
11.1	Controle em Cascata.....	204

11.1.1	Resposta dinâmica de controle cascata.....	209
11.2	Controle <i>Feedforward</i>	212
11.2.1	Comparação: <i>feedback</i> e <i>feedforward</i>	215
11.2.2	Projeto de controladores <i>feedforward</i>	216
11.2.2.1	<i>Feedforward</i> estático	216
11.2.2.2	<i>Feedforward</i> dinâmico	219
11.2.3	Unidades <i>lead-lag</i> (LL)	220
11.2.4	<i>Lead-lag</i> com tempo morto como controlador <i>feedforward</i> ..	221
11.2.5	Estabilidade do arranjo <i>feedback/feedforward</i>	224
11.3	Controle Seletivo e Controle <i>Override</i>	225
11.3.1	Controle seletivo.....	225
11.3.2	Controle <i>override</i>	226
11.4	Controle <i>Split Range</i>	228
11.5	Controle Multivariável	230
11.5.1	Método de análise de interação: matriz RGA	230
11.5.2	Efeito retaliatório em sistemas multivariáveis	233
11.5.3	Desacopladores.....	237
11.5.3.1	Projeto dos desacopladores	238
	Exercícios Propostos.....	239

12. CONTROLE DE NÍVEL DE SEPARADORES

	Nomenclatura	246
12.1	Controle de Inventário	246
12.2	Controle por Bandas.....	247
12.3	Controladores: P, P-Lag e PI	251
12.4	Sintonia com Transição Suave	260
	Exercícios Propostos.....	267

13. MODELAGEM DE EQUIPAMENTOS DE TRATAMENTO DE ÓLEO E ÁGUA

	Nomenclatura	269
13.1	Separadores Bifásicos.....	270
13.1.1	Balanços de massa do separador bifásico	271
13.1.2	Equações de válvulas.....	272
13.1.3	Relações geométricas	272
13.1.4	Modelo linearizado de separador bifásico	272
13.2	Tratadores Eletrostáticos.....	275
13.2.1	Eficiência de separação	275
13.2.2	Balanço de massa do tratador eletrostático	276
13.2.3	Relações geométricas.....	277
13.2.4	Equações de vazão	277
13.3	Separadores Trifásicos	278
13.3.1	Modelagem do escoamento em separadores trifásicos.....	279

13.3.2	Separação das dispersões.....	281
13.3.3	Estabilidade de emulsões	285
13.3.4	Balancos de massa para separador trifásico	288
13.3.5	Relações geométricas de separador trifásico.....	289
13.3.6	Equações de vazão	289
13.3.7	Correlação para TOG de água descartada pelo separador trifásico.....	289
13.4	Hidrociclones <i>De-oilers</i>	291
13.4.1	Modelagem do escoamento em hidrociclone	293
13.4.2	Separação da emulsão em hidrociclone	295
13.4.3	Correlações para eficiência de hidrociclone	298
13.4.4	Controle de hidrociclones	301
13.5	Flotadores	309
	Exercícios Propostos.....	310
14. ASPECTOS DINÂMICOS DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO OFFSHORE		
	Nomenclatura de Modelagem Dinâmica Simplificada SGL para Sistemas <i>Gas-Lift</i>	313
14.1	Introdução aos Sistemas de Produção <i>Offshore</i>	314
14.1.1	Regimes clássicos de escoamento bifásico.....	315
14.1.2	Escoamento multifásico com golfadas severas	317
14.2	Elevação de Óleo via Processo <i>Gas-Lift</i>	319
14.2.1	Modelo SGL para sistemas <i>Gas-Lift</i>	323
14.2.2	Modelo SGL modificado	325
14.2.2.1	Modificações nas distribuições de pressão e densidade no espaço anular.....	325
14.2.2.2	Modificações nas distribuições de pressão e densidade na coluna de produção	326
14.2.2.3	Resumo sobre utilização das duas versões do modelo SGL	328
14.2.3	Resolução numérica: código executável SGL	328
14.2.4	Simulação dinâmica <i>Gas-Lift</i> com modelo SGL modificado: caso base	328
14.2.5	Estudo de sensibilidade da resposta dinâmica <i>Gas-Lift</i>	337
	Exercício Proposto	343
15. ESCOAMENTO EM RISERS E LINHAS DE PRODUÇÃO OFFSHORE		
	Nomenclatura para Escoamento Bifásico Estratificado em Duto Inclinado	347
	Nomenclatura em Análise de Estabilidade de Escoamento em <i>Risers</i> (Figura 15.6)	348
15.1	Escoamento Bifásico Estratificado	348

15.1.1	Relações geométricas para escoamento estratificado em duto cilíndrico inclinado.....	349
15.1.2	Velocidades superficiais de escoamento de gás e de líquido...	353
15.1.3	Balances de momentum em cada fase	354
15.1.4	Equação Taitel-Dukler para escoamento estratificado em regime estacionário	356
15.1.5	Simplificação da Equação Taitel-Dukler para baixa velocidade superficial de gás.....	359
15.1.6	Resolução da Equação Taitel-Dukler para velocidades superficiais conhecidas.....	361
15.2	Transição de Escoamento Bifásico Estratificado para Escoamento Bifásico Intermitente.....	361
15.3	Curva de Boe para Limite de Intermitência Severa em <i>Risers</i>	363
15.4	Caso Base para Estudo em Intermitência Severa	367
15.5	Resultados TEI e BOE para o Caso Base 15.4	368
15.6	Limite de Estabilidade para Não Ocorrência de Golfadas Severas em <i>Risers</i>	369
15.7	Limite de Estabilidade de Fluxo em <i>Risers</i>	371
15.8	Conclusões	378
	Exercício Proposto	379
	Respostas	380
REFERÊNCIAS.....		381
APÊNDICE 1 – RELAÇÕES GEOMÉTRICAS DE VASOS HORIZONTAIS		
A1.1	Altura × Volume.....	385
A1.2	Determinação da Derivada do Volume com o Tempo.....	386
APÊNDICE 2 – VÁLVULAS DE CONTROLE		
A2.1	Tipos de Válvulas de Controle.....	390
A2.2	Vazão de Escoamento.....	390
A2.2.1	Característica inerente.....	391
A2.2.2	Característica instalada.....	392
A2.3	Seleção e Dimensionamento de Válvulas de Controle.....	394
A2.4	Dinâmica de Válvulas de Controle.....	395
APÊNDICE 3 – SELEÇÃO DE CÓDIGOS MATLAB		
A3.1	Códigos do Capítulo 2.....	397
A3.1.1	Figura 2.6	397
A3.1.2	Exemplo 2.2: Linearização da equação do volume – Figura 2.8.....	397
A3.3	Códigos do Capítulo 3.....	398

A3.3.1	Figura 3.1	398
A3.3.2	Figura 3.2	398
A3.3.3	Figuras 3.3 e 3.4.....	398
A3.3.4	Figura 3.5	399
A3.3.5	Exemplo 3.4 – Figura 3.6	399
A3.3.6	Exemplo 3.5 – Figura 3.7	400
A3.4	Códigos do Capítulo 5.....	400
A3.4.1	Exemplo 5.2.....	400
A3.5	Códigos do Capítulo 6.....	401
A3.5.1	Figura 6.3	401
A3.5.2	Figura 6.4	401
A3.5.3	Figura 6.5	401
A3.5.4	Figura 6.6	402
A3.5.5	Figura 6.7	402
A3.5.6	Exemplo 6.2.....	403
A3.5.7	Figura 6.13.....	403
A3.5.8	Exemplo 6.7	404
A3.5.9	Exemplo 6.8.....	405
A3.6	Códigos do Capítulo 7	405
A3.6.1	Exemplo 7.1 – Figura 7.3	405
A3.6.2	Exemplo 7.2 – Figura 7.4	405
A3.6.3	Exemplo 7.3 – Figura 7.5	406
A3.7	Códigos do Capítulo 8.....	406
A3.7.1	Figura 8.8.....	406
A3.7.2	Exemplo 8.2 – Figura 8.11	407
A3.7.3	Exemplo 8.3 – Figura 8.12	407
A3.7.4	Exemplo 8.4.....	408
A3.8	Códigos do Capítulo 9.....	410
A3.8.1	Exemplo 9.2.....	410
A3.8.2	Exemplo 9.3 – Figura 9.10	411
A3.8.3	Exemplo 9.4 – Figura 9.13	411
A3.8.4	Exemplo 9.5 – Figura 9.14	411
A3.8.5	Exemplo 9.6.....	411
A3.9	Códigos do Capítulo 11.....	412
A3.9.1	Exemplo 11.1	412
A3.9.2	Figura 11.20	412
A3.9.3	Figura 11.21	412
A3.9.4	Figura 11.22	413
A3.9.5	Exemplo 11.11	413
A3.10	Códigos do Capítulo 12.....	414
A3.10.1	Figuras 12.5 e 12.6.....	414
A3.10.2	Código do controle adaptativo de sintonia.....	415

A3.10.3	Código do separador bifásico	415
A3.10.4	Código de otimização dos parâmetros de sintonia	419
A3.11	Códigos do Capítulo 13.....	420
A3.11.1	Código desenvolvido por Corrêa Junior (2008).....	420
A3.11.2	Correlação de eficiência (Pinto, 2009).....	426
A3.11.3	Simulação de hidrociclone (Pinto, 2009).....	428

APÊNDICE 4 – INTRODUÇÃO AO MATLAB

A4.1	Variáveis	431
A4.2	Arquivos de Comando e Funções	436
A4.3	Gráficos	440
A4.4	Polinômios.....	444
A4.5	Algumas Operações com Matrizes	445
A4.6	Operadores Relacionais.....	449
A4.7	Operadores Lógicos.....	451
A4.8	Controle de Fluxo.....	451
A4.9	Alguns Comandos Úteis.....	456

APÊNDICE 5 – INTRODUÇÃO AO SIMULINK

A5.1	Características do SIMULINK	459
A5.2	Biblioteca <i>Sources</i>	460
A5.3	Biblioteca <i>Sinks</i>	461
A5.4	Biblioteca <i>Continuous</i>	461
A5.5	Criando uma Janela de Simulação	462

APÊNDICE 6 – TOOLBOX DE CONTROLE

A6.1	Modelos LTI.....	469
A6.2	Álgebra de Modelos LTI.....	475
A6.3	Respostas de Sistemas Lineares	477
A6.4	Diagramas de Bodé e Nyquist	479
A6.5	Margens de Ganho e de Fase	480
A6.6	Lugar das Raízes	481
A6.7	Simulação com LTI de Controle Cascata.....	482
A6.8	Polos, Zeros e Autovalores.....	483
A6.9	Aproximação de Padé.....	484
A6.10	O Visualizador de Modelos LTI.....	485

APÊNDICE 7 – LINEARIZAÇÃO DO MODELO DO SEPARADOR BIFÁSICO

A7.1	Altura (H_L).....	487
A7.2	Pressão (P)	489

Introdução

A atividade de Engenharia de Controle de Processos associa conceitos característicos de múltiplas distintas disciplinas: uma estratégia típica de controle envolve sensores, atuadores, transmissores, computadores e *software*. Adicionalmente, os controladores são normalmente implementados em *hardware* digital, requerendo conhecimentos de computação em tempo real. Dessa forma, a análise de sistemas dinâmicos de processo e a síntese dos respectivos sistemas de controle, requerem o conhecimento da física do processo a ser controlado, de técnicas e tecnologias em sensores e atuadores, e de *software*. Em suma, envolve três subáreas de conhecimento e especialização:

- Engenharia de processos:** entender um processo é a base para modelá-lo e controlá-lo. Um modelo do processo a controlar deve ser desenvolvido para compreender os fundamentos da sua operação e permitir testar estratégias de controle.
- Engenharia de controle:** oferece métodos e técnicas para operar em condições ótimas (ou subótimas) em todos os níveis hierárquicos. Estratégias de controle são propostas para atingir metas de operação e de segurança.
- Engenharia de *software*:** a abordagem de simulação ou solução de controle deve ser implementada de forma apropriada em plataforma e *software* adequados.

Estas três áreas de especialização e conhecimento – processo, controle e tecnologia da informação – respondem perguntas como: “o quê”, “o porquê”, “o como” e “de que forma”, e têm por objetivos:

- aumentar produtividade;
- aumentar rendimento;
- diminuir consumo de energia;
- diminuir emissão de poluentes;
- reduzir produtos fora de especificação;
- garantir e/ou promover a segurança do processo;

- prolongar a vida útil dos equipamentos;
- assegurar operabilidade.

A motivação para que os engenheiros conheçam controle, e a principal razão para isso, é que praticamente todos serão usuários de sistemas de controle, seja nas equipes de projetos, seja na operação de unidades industriais. Pretende-se aqui apresentar aos interessados as ferramentas matemáticas necessárias para avaliar como as condições operacionais e de projeto de uma planta *offshore* de produção de petróleo influenciam o comportamento dinâmico desta, bem como possíveis maneiras de solução ou mitigação de problemas quando for impossível ou antieconômico evitá-los.

Este texto destina-se ao público de Engenharia, mas reconhece que os sistemas de controle permeiam além das fronteiras de Engenharia, como ocorre em sistemas biológicos e econômicos. Karl Astrom¹ cita Mahlon Hoagland²: “*Feedback* é um mecanismo central na vida: todos os organismos têm a capacidade de sentir como estão se saindo, e fazer mudanças no meio do voo, se necessário. (...) Opera em todos os níveis, da interação de proteínas nas células à interação de organismos em ecologias complexas”.

Uma estratégia de controle de processos é tão bem-sucedida quanto a sua abrangência na solução do problema. Todavia isto requer uma visão do processamento muito ampla e que, por isso mesmo, é rara nos profissionais da indústria e ainda pouco explorada nos livros textos de controle. Tendo isto em mente, o presente texto aborda, de forma geral, conceitos e aplicações em Dinâmica e Controle de Processos. Todavia, não se trata de um texto especificamente de dinâmica e/ou de controle de processos. Um pouco além disto, a palavra “processo” aqui diz respeito, em essência, a componentes dos *Sistemas de Produção e de Processamento Primário de Petróleo em Plataformas Offshore*, no qual o Brasil hoje, por meio da Petrobras, destaca-se em nível mundial. As unidades marítimas de produção de petróleo e gás foram escolhidas como foco por configurarem cenários multidisciplinares de Engenharia de alto impacto na conjuntura econômica mundial, exibindo particularidades estruturais e operacionais, complexidade dinâmica, e, sobretudo, por carecerem de textos especializados na dinâmica e controle de seus processos.

O Processamento Primário de Petróleo em Plataformas *Offshore* é, por sua vez, um item de importância na cadeia de operações da área de Exploração e Produção (E&P) de Petróleo. Em consequência, o texto inevitavelmente parte da dinâmica e controle de processos em geral, mas tende a centrar esforços especificamente em Dinâmica e Controle de Processos E&P. No texto são desenvolvidos ou explorados modelos de parâmetros concentrados tratados pela Teoria de Sistemas Lineares para

¹ Karl J. Astrom, *Control System Design*, 2002.

² Mahlon Hoagland, Bert Dodson. *Way Life Works: The Science Lover's Illustrated Guide to How Life Grows, Develops, Reproduces and Gets Along*. Three Rivers Press, 1998.

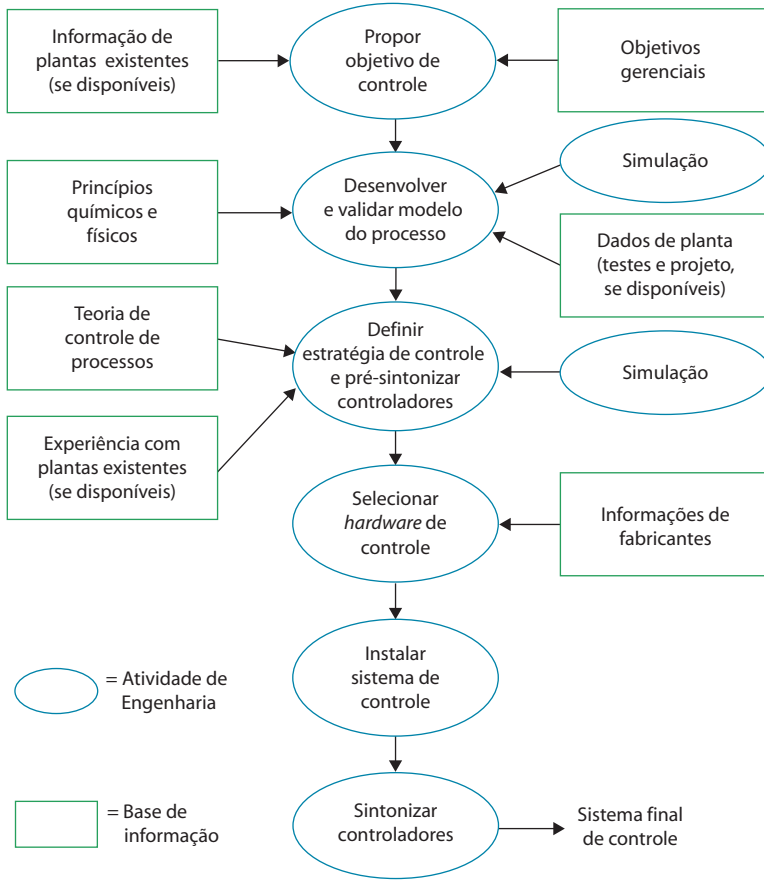
equacionamento e resolução de problemas de controle. Ênfase é dada à modelagem dos processos de produção de petróleo – elevação e escoamento – e o posterior processamento em plataforma (ou separação primária) numa abordagem integrada destes. Com respeito aos aspectos de resolução numérica, o texto é voltado ao ambiente MATLAB®/SIMULINK® (The Mathworks, Inc) apropriado ao processamento numérico e gráfico em Controle e Simulação de Processos. Por outro lado, em virtude das necessárias limitações de extensão, não são analisados de forma completa os tópicos relacionados a Instrumentação e Processamento de Sinais (ou seja, Sensores, Transdutores, Controladores Lógicos Programáveis).

Neste sentido, o público alvo do texto consiste provavelmente de alunos de graduação em Engenharia cursando disciplinas de Dinâmica e Controle de Processos, de engenheiros recém-graduados com interesses em Especialização em Engenharia *Offshore*, bem como de graduados de base matemática com interesses profissionais em E&P.

O estilo de apresentação adotado baseia-se na construção de modelos e na aplicação de métodos numéricos e matemáticos gerais, classicamente empregados em controle de processos químicos. Todavia, há um viés importante: as aplicações dizem respeito aos principais sistemas do cenário de produção e processamento *offshore* de petróleo. Um aspecto associado a este viés – e que talvez já possa ser percebido pelo leitor – é que fizemos concessões no texto ao emprego do jargão E&P nos casos em que, por uma questão de bom senso, isto se mostra extremamente necessário. É notória, até mesmo entre usuários da língua inglesa, a ultraconcisão de certos termos do jargão E&P. Um bem simples, como *riser*, demandaria um período quase completo para ser explicado em inglês, e algo mais do que isto para ser traduzido em Português. Sendo assim, é com todo o respeito ao leitor da língua portuguesa que invocamos a mentalidade prática, inerente à Engenharia, para conceder a presença no texto de certos termos em inglês, de resto termos ou conceitos extremamente autossuficientes e completos em si mesmos, todos característicos das principais operações e equipamentos da Engenharia *Offshore*. Neste texto os inevitáveis termos do jargão E&P serão sempre grafados em *italico*.

Em resumo, o texto frequenta o cenário E&P invocando uma postura de abordagem calcada nas três primeiras etapas do procedimento de *Síntese de Sistemas de Controle* descritas na Figura 1:

- descrever e modelar matematicamente operações do Processamento Primário de Petróleo em Plataformas *Offshore*;
- investigar a relação entre as variáveis de entrada e as respostas do processo ou operação em questão;
- desenvolver e testar possíveis estratégias de controle para o processo, aferindo o desempenho de cada uma.



Fonte: Adaptada de Dale, Seborg e Mellichamp (2004)

Figura 1 Etapas típicas na síntese de sistemas de controle

No primeiro terço do texto, apresentam-se aspectos de modelagem dos principais equipamentos encontrados numa plataforma *offshore*. Em seguida, são introduzidas as bases para controle destes processos sob inspiração da Figura 1. No terço final do texto, apresentamos modelos e conceitos de sistemas chaves que, embora não estejam propriamente no contexto do Processamento Primário de Petróleo em Plataformas *Offshore*, atuam como condicionantes do contorno destes, tais como o Processo *Gas-Lift* de Produção de Poços e o escoamento em *risers* e suas linhas de produção associadas.

As disciplinas de Modelagem de Processos, Controle de Processos e Mecânica dos Fluidos constituem a base de material aqui apresentado. Procurou-se uma abordagem integrada dos tópicos destas disciplinas visando a abranger, no contexto de controle, os principais componentes e processos de plantas *offshore*. Dessa forma, o texto resulta da Experiência Prática, da Pesquisa e das Atividades de Ensino dos Autores ao longo dos últimos anos, juntamente com contribuições baseadas em material publicado por outros autores em Controle de Processos e Engenharia E&P. Em muitos casos aqui discutidos, foram efetuadas alterações e melhorias em métodos e critérios desenvolvidos alhures visando a adaptá-los à realidade atual de produção e processamento *offshore* de óleo e gás.

Introdução ao Controle de Processos de Plantas *Offshore*

As plantas de *Processamento Primário de Petróleo Offshore* são projetadas para receber e separar com segurança as diferentes fases da mistura proveniente dos poços; ou seja, óleo, gás natural e água. O óleo é tratado e processado para envio a refinarias. A água poderá ser reciclada para injeção em poços ou, após o devido tratamento, ser descartada no mar. O gás natural terá destinos diversos como geração de potência em turbinas a gás, alimentação de sistemas de injeção em poços, e envio a plantas de processamento em terra para posterior comercialização. Separadores gravitacionais, hidrociclones e tratadores eletrostáticos são alguns dos principais equipamentos usados para o tratamento dessas correntes.

Nas unidades *offshore*, a carga que alimenta os separadores, proveniente dos diversos *risers* que atravessam a inevitável lâmina de água acima do campo, pode apresentar-se com comportamento oscilatório, caracterizado por escoamento de gás e líquido em golfadas. Essas oscilações são comuns e, muitas vezes, severas, gerando perturbações na cadeia de processamento da plataforma *offshore*. Controladores PID (ação Proporcional, Integral e Derivativa) são normalmente usados para o controle de nível e de pressão das várias unidades envolvidas nessa cadeia.

O controle rigoroso das variáveis do processamento *offshore* garante a continuidade operacional, mas não otimiza economicamente o processamento. Tome-se o exemplo do nível (interface gás-líquido) dos separadores gravitacionais: seu controle rigoroso em torno de um valor de referência (o *setpoint*) é prática comum que evita o arraste de líquido pelo gás ou o arraste de gás pela saída de líquido. Entretanto, esse procedimento repassa as oscilações de carga para os equipamentos a jusante do separador, o que seria evitado se oscilações de nível fossem permitidas, explorando-se a capacidade pulmão dessas unidades. Tem-se, então, um problema de controle que é central para os sistemas *offshore*: como otimizar as malhas de controle da planta para uma carga oscilante. Fica claro que, além de se conhecer os fenômenos de separação, é necessária a caracterização da dinâmica do escoamento multifásico.

Destaque deve ser dado à tendência mundial de maior complexidade das plantas de processamento em virtude das buscas de petróleo em regiões antes tidas como economicamente inviáveis ou pouco atrativas. Com as reservas de óleo de baixo custo

de produção se exaurindo, ocorre hoje uma grande corrida para a exploração em águas ultraprofundas, por petróleo extra pesado, parafínico e até mesmo petróleos com grandes concentrações de contaminantes. No caso brasileiro, as descobertas de petróleo leve na região conhecida como pré-sal indicam a necessidade de processamento de grandes quantidades de gás, rico em CO_2 . Nesses casos, os desafios para o processamento são ainda maiores e as questões relativas ao controle dos processos de separação e tratamento passam a ter maior peso.

No contexto da Exploração e Produção (E&P), a falta de cultura na área de controle de processos sempre foi um limitador, mesmo nas aplicações mais simples. No final da década de 1990, surgiu a primeira implementação *offshore* de algoritmo para controle de golfadas, escoamento intermitente característico destas aplicações, que apresentou um caráter de inovação. Os bons resultados desta iniciativa mostraram ser possível resolver-se grandes problemas operacionais com a teoria de controle de processos. Recentemente, a Petrobras criou o “Controle por Bandas” para aplicação em separadores cujos benefícios na estabilização de vazões se mostram maiores a cada implementação.¹

Por este motivo, o presente texto centra esforços na Teoria de Controle de Processos voltados para o E&P. O conteúdo clássico de controle é apresentado associado a operações *offshore*, uma abordagem inédita entre livros texto disponíveis, ilustrado com aplicações em MATLAB. O objetivo é possibilitar a um iniciante na área de controle adquirir os conhecimentos básicos que lhe permitam analisar e determinar a melhor configuração de controle para as plantas normalmente encontradas em unidades *offshore*.

Na referência a “controle de processos”, assume-se, aqui, a Teoria de Controle Linear como o carro-chefe, aquela a que primeiro se recorre na tentativa de solucionar um problema dinâmico. Felizmente, verifica-se que, na grande maioria dos casos, esta atende plenamente aos propósitos do sistema de controle. Para os aficionados por técnicas mais complexas, isto talvez seja motivo de desânimo, mas, no âmbito da indústria, o foco está no resultado e, para tal, *o melhor controle geralmente é o mais simples*. Não obstante, verifica-se no decorrer do texto que isto não empobrece o debate, muito pelo contrário. Na verdade, torna-se um desafio resolver problemas operacionais complexos da forma mais simples possível. Nesta tarefa, é necessário um bom entendimento do que se passa nas plantas de processamento *offshore*. Esta é a razão deste texto dedicar uma seção sobre modelagem dinâmica desses sistemas.

1.1 DESCRIÇÃO DA PLANTA DE PROCESSAMENTO PRIMÁRIO OFFSHORE

As plantas de processamento podem ser classificadas em dois tipos. Aquelas que efetuam apenas a separação bifásica (gás-líquido) e aquelas que efetuam separação trifásica (água, óleo e gás). A Figura 1.1 apresenta um fluxograma típico do sistema de separação de uma planta bifásica. A produção dos poços de petróleo passa por um *manifold*, onde a pressão é equalizada, seguindo através de uma válvula de *choke*

¹ NUNES, Giovani C. Controle por bandas para processamento primário: conceitos básicos no amortecimento de oscilações de carga de unidades de produção de petróleo. *Boletim Técnico Petrobras*, 41 (2/4), abr./dez. 2004.

onde as intermitências de escoamento são reduzidas por estrangulamento antes de alimentar o primeiro estágio de separação.

Neste separador, a fase gás é retirada pelo topo e a fase líquida (que alimenta o segundo estágio de separação) pelo fundo, com vazões definidas pelas aberturas de válvulas pneumáticas de controle de gás (PCV-1) e de líquido (LCV-1) comandadas, respectivamente, pelos controladores de pressão (PIC-1) e de nível (LIC-1). Esquema similar é instalado no segundo estágio. Em ambos os casos, as variáveis controladas são medidas (LT-1 e LT-2 para os níveis, e PT-1 e PT-2 para as pressões). Os valores medidos são comparados aos valores de referência, e o desvio registrado é processado pelos controladores, para definir a abertura das respectivas válvulas. O valor de referência para o controlador de pressão do segundo estágio é definido em patamar inferior ao do primeiro estágio visando à separação de gás dissolvido no líquido proveniente do primeiro estágio: no primeiro, a pressão de operação é aproximadamente 10 kgf/cm^2 enquanto, no segundo, a pressão é de 1.5 kgf/cm^2 . Este tipo de planta é adotada em campos onde há a presença de outras unidades próximas para as quais se pode enviar a água e o óleo para tratamento.

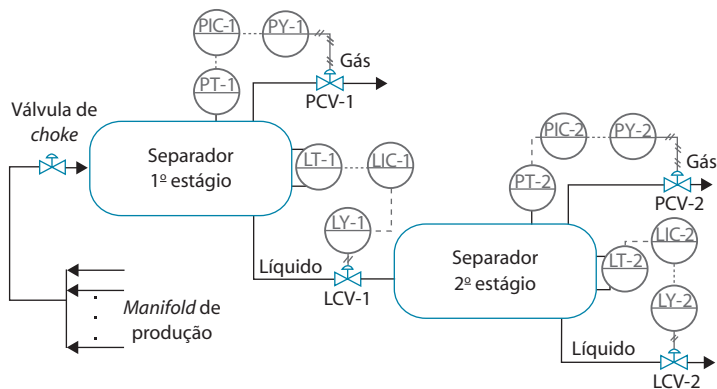


Figura 1.1 Planta bifásica de processamento primário de petróleo

As plantas com separação trifásica são completas e enquadram o óleo e o gás para exportação e a água para descarte no mar. A Figura 1.2 apresenta o sistema de separação e tratamento do óleo das plantas trifásicas.

No separador trifásico, as correntes líquida e gasosa são separadas na câmara de separação. A corrente líquida se acumula na câmara de separação, onde o óleo emerge, por apresentar menor massa específica, transbordando para a câmara de óleo. A água oleosa é retirada da câmara de separação por controle de nível atuando sobre a vazão de líquido na saída de hidrociclone *de-oiler*. Esse equipamento, pela ação de força centrífuga sobre as fases de massas específicas diferentes (água e óleo), separa gotículas de óleo dispersas na fase aquosa efluente do câmara de água do separador. O óleo, contendo água, é retirado da câmara de óleo, por controle do nível atuando sobre válvula de óleo que alimenta o primeiro estágio de separação bifásica, onde a separação do gás dissolvido no óleo é realizada em pressão inferior à estabelecida no separador trifásico. A corrente líquida efluente do separador bifásico, esco para um

tratador eletrostático. Neste, um campo elétrico é aplicado na fase oleosa para promover a coalescência das gotas de água, que se acumula na fase inferior do equipamento, e o nível desta fase líquida é controlado (LIC) por atuação sobre válvula de retirada de água (LCV). A água retirada do tratador eletrostático contém óleo, que é separado em hidrociclone antes da água de produção ser descartada. O óleo do primeiro separador bifásico segue para um segundo estágio de separação para remoção do gás nele dissolvido. O controle e operação dos separadores bifásicos é semelhante à descrição anterior (ver Figura 1.1).

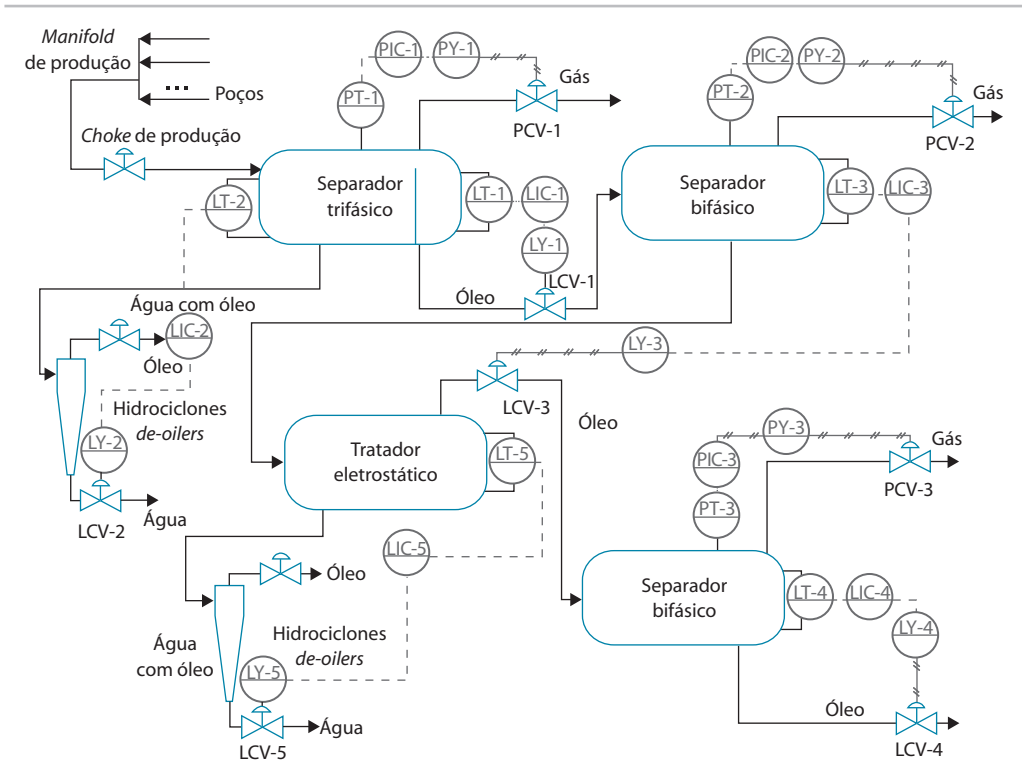


Figura 1.2 Planta trifásica de processamento primário de petróleo

Os poços produtores alimentam as plantas em escoamento multifásico de água, óleo e gás. Frequentemente, esse escoamento se caracteriza por oscilações de pressões e vazões de carga em regime de escoamento conhecido como golfadas. O escoamento em golfadas é tecnicamente referido como escoamento com intermitência (*slug flow*) ou, quando o quadro de golfadas é severo, como escoamento com intermitência severa (*severe slugging*). Golfadas de grandes amplitudes provocam a queda na eficiência operacional dessas plantas. Portanto, para a operação estável e eficiente desses processos, é relevante que as malhas de controle dos separadores estejam bem sintonizadas, minimizando o impacto das golfadas. Entretanto, frequentemente, sintonias deficientes chegam a provocar a amplificação das oscilações, reduzindo a eficiência e a segurança operacional da planta. Inicialmente, observe-se o separador bifásico, apresentado na Figura 1.3, como exemplo para análise da malha de controle.

O diagrama de blocos da malha de controle de nível é apresentado na Figura 1.4. Nesta, $r(t)$ é o valor de referência (ou *setpoint*) para a variável de resposta controlada, o nível $h_L(t)$. A ação de controle $u(t)$ é enviada à válvula de controle, ou “elemento final de controle”, produzindo a entrada manipulada $L_{out}(t)$. O processo controlado, isto é, o separador, recebe também a influência da perturbação $L_{in}(t)$. A resposta do processo, $h_L(t)$, é medida por um sensor, o “elemento primário de controle” e o seu sinal é comparado ao valor de referência, produzindo o “erro de controle”, $e(t)$.

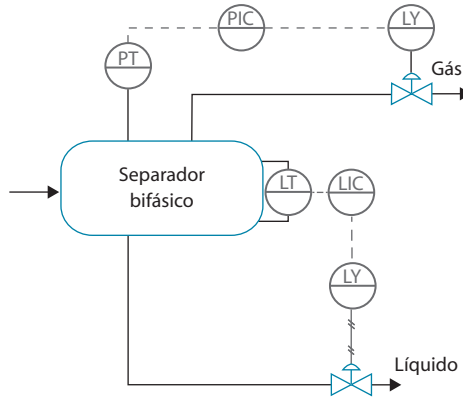


Figura 1.3 Controle PID de separador bifásico

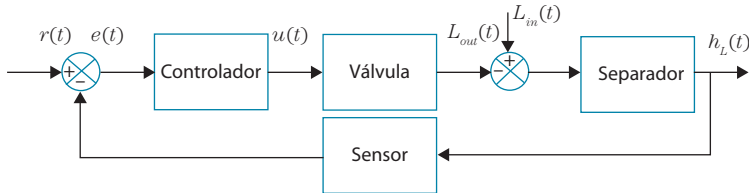


Figura 1.4 Diagrama de blocos do separador com controle PID

A função do controlador é corrigir esse erro em dois modos principais:

- Controle Regulatório:** no qual a malha de controle atua rejeitando perturbações em $L_{in}(t)$ para um valor fixo de *setpoint*. Este é o modo mais utilizado em plantas *offshore*.
- Controle Servo:** no qual a malha de controle atua rastreando valores de referência $r(t)$, sendo muito útil para operações em batelada, na robótica etc.

Na presente discussão de Teoria de Controle de Processos, são consideradas em primeiro plano:

- Estratégias de controle monovariáveis, ou SISO (*single input – single output*);

- Operação sob estrutura de realimentação (*feedback*) da Figura 1.4;
- Ênfase na sintonia de controladores PID (Ações Proporcional, Integral e Derivativa).

Outras estratégias como Controle Cascata, Controle Antecipatório (*feedforward*), Controle *Override* e Controle Multivariável serão também abordadas posteriormente ao enfoque PID. Por fim, na seleção das estratégias e sintonia das malhas de controle, modelos de sistemas chave envolvidos com a produção *offshore* de petróleo – *Gas-Lift*, linhas de produção e *risers* – fazem-se necessários e são abordados ao final do texto.