

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MÉTODOS PARA A ANÁLISE DO DESEMPENHO E
DA ROBUSTEZ DE PROCESSOS INDUSTRIAIS
ORIENTADOS A DADOS: ABORDAGEM
DETERMINÍSTICA E ESTOCÁSTICA**

Tese de doutorado submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

RODRIGO IVÁN GOYTIA MEJÍA

Florianópolis, dezembro de 2008

RODRIGO IVÁN GOYTIA MEJÍA

**Métodos para a Análise do Desempenho e
da Robustez de Processos Industriais
Orientados a Dados: Abordagem
Determinística e Estocástica**

Copyright © Rodrigo Iván Goytia Mejía, 2008.

Departamento de Automação e Sistemas
Universidade Federal de Santa Catarina
CEP. 88040-900, Caixa Postal, 476
Fone/Fax: 55-(48)-331-9934
Florianópolis – SC – Brasil

**MÉTODOS PARA A ANÁLISE DO DESEMPENHO E
DA ROBUSTEZ DE PROCESSOS INDUSTRIAIS
ORIENTADOS A DADOS: ABORDAGEM
DETERMINÍSTICA E ESTOCÁSTICA**

Rodrigo Iván Goytia Mejía

‘Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do **Título de Doutor em Engenharia Elétrica**, Área de Concentração em **Sistemas de Controle, Automação e Informática Industrial**, e aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina’

Prof. Antonio Augusto Rodrigues Coelho, Dr. Sc.
Orientador

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Jorge Roberto Brito de Souza, Ph. D.
UFPA – PA

Giovani Cavalcanti Nunes, Ph. D.
CENPES – PETROBRAS – RJ

Prof. Otacílio da Motta Almeida, Dr. Sc.
UFC – DEE – CE

Bismark Claire Torrico, Dr. Sc.
UFSC – DEE – CE

A minha querida família

Agradecimentos

O presente trabalho não poderia ter sido completado sem a ajuda e contínuo apoio da minha família, especialmente meus pais **Zaida Mejia de Goytia** e **Rolando Goytia Sanchez**, os quais me apoiaram, motivaram e insentivaram meus ideais em todo aspecto, mesmo nos momentos mais difíceis ainda longe desde a minha Bolívia eles sempre estiveram presentes. A **Fabiana Helena Belli** pela amizade, compreensão, apoio, motivação e solidariedade frente a todas as atitudes de indiferença e injustiça que se apresentaram nesta caminhada.

O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso, existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis. Meu agradecimento ao professor **Dr. Sc. Antonio Augusto Rodrigues Coelho**, pela sua presença e orientação. Ao **Dr. Jorge Otávio Trierweiler**, ao **Dr. Ph. Giovani Cavalcanti Nunes**, e ao **Eng. M. Sc. Cesar Vidal Vargas** pela sua amizade, e incentivo, apoio, força de bondade e exemplo de profissionalismo. Obrigado por ter acreditado no meu potencial, e me ensinado que uma viagem de milhares de milhas começa com um simples passo, possibilitando a continuidade do meu trabalho.

A meu colega e amigo **Bismark Claire Torrico** com o qual compartilhei anos de estudo desde o mestrado. Aos meus colegas e amigos do Grupo de Pesquisa em Técnicas de Controle Aplicado (GPTCA), **Jaime Rodriguez Navarrete** e **Rodrigo Rodrigues Sumar** e do Grupo de Integração, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP), **Marcelo Escobar** e **Rafael Cardoso Dias Costa** que, de um ou outro modo contribuíram com o desenvolvimento e ampliaram minha visão de engenharia de controle.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)** e a empresa **Petróleo Brasileiro S. A. (PETROBRAS)**, que patrocinaram parte desta pesquisa. Junto com Antonio Augusto Rodrigues Coelho desejo agradecer aos membros da banca examinadora em especial ao **Prof. Dr. Jorge Roberto Brito de Souza** pelos comentários e sugestões feitas. Às pessoas que não estiveram oficialmente relacionadas com o desenvolvimento desta tese, embora não foram indiferentes e influenciaram no resultado.

Finalmente, desejo expressar minha infinita gratidão ao **Departamento de Automação e Sistemas**, ao **Programa de Pós-graduação em Engenharia**, à **Universidade Federal de Santa Catarina Elétrica** e a todos os professores que contribuíram no meu aprendizado.

Rodrigo Iván Goytia Mejía

Resumo da Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

MÉTODOS PARA A ANÁLISE DO DESEMPENHO E DA ROBUSTEZ DE PROCESSOS INDUSTRIAIS ORIENTADOS A DADOS: ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E ESTOCÁSTICA

Rodrigo Iván Goytia Mejía

Dezembro / 2008

Orientador: Prof. Dr. Sc. Antonio Augusto Rodrigues Coelho.

Área de Concentração: Sistemas de Controle, Automação e Informática Industrial.

Palavras-chave: Avaliação do desempenho de malhas, auditoria de malhas, índices de desempenho determinísticos e estocásticos, desempenho robusto e detecção de oscilações.

Número de Páginas: 320.

Este trabalho apresenta um abrangente estudo direcionado ao monitoramento automático do desempenho de malhas de controle industriais. O estudo é estruturado em seis capítulos: Inicialmente é apresentada uma introdução, motivação e as contribuições. No segundo capítulo é apresentada a revisão do estado da arte, que inclui a evolução das linhas de pesquisa e as soluções comerciais. No terceiro capítulo é apresentado o sistema de suporte à decisão baseado na informação para o monitoramento, análise de dados, eventos e suporte de operação de processos industriais. É apresentado em detalhe o processamento da informação baseada em dados. No quarto capítulo são apresentados vários métodos usados na etapa de operação como na etapa de projeto para avaliar a condição de desempenho dos processos auto-regulatórios. Estes métodos, que são explorados numa abordagem determinística e estocástica, incluem métodos para a detecção do comportamento estacionário, oscilatório, e métodos para avaliação do comportamento servo e regulatório e para avaliar o desempenho robusto em nível de projeto. No quinto capítulo é apresentado um estudo sistemático de vários métodos para a avaliação da condição de processos não auto-regulatórios. O estudo inclui a análise das estruturas de controle, desempenho robusto em nível de projeto, sintonia dos controladores e avaliação do desempenho do sistema em operação baseada em padrões referenciais usando dados de campo. São tratadas as questões pertinentes à aplicação prática, apontadas as principais vantagens e desvantagens das técnicas e verificados os aspectos teórico/práticos através da simulação dos algoritmos. Finalmente, no sexto capítulo são apresentados os temas em aberto, atuais desafios e perspectivas futuras para continuidade do trabalho.

Abstract of Thesis presented to UFSC as partial fulfillment to the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering

DATA-DRIVE METHODS FOR THE PERFORMANCE AND ROBUSTNESS ANALYSIS OF INDUSTRIAL PROCESS: DETERMINISTIC AND STOCHASTICAL APPROACH

Rodrigo Iván Goytia Mejía

December / 2008

Advisor: Prof. Antonio Augusto Rodrigues Coelho, Dr. Sc.

Area: Automation and Systems.

Keywords: Assessment performance control loops, control loop audit, deterministic and stochastic performance index, robust performance and oscillation detection.

Number of pages: 320.

This work presents a comprehensive study directed to the automatic performance monitoring of the industrial control loops organized in six chapters: The study begin by an introduction, then is presented the motivation and the contributions of the work. In the second chapter is presented a depth reviewing literature showing the state of the art of the knowledge in the area that includes the evolution research lines and the commercial solutions. In the third chapter is presented the information-based decision support system for the process monitoring, data analysis, events and operation support for industrial processes. Also it is presented in detail the data-based process information. In the fourth chapter is presented several approaches for condition monitoring of self-regulatory control loops. These methods explored in a deterministic and stochastic approach include methods for steady-state identification, detection of oscillatory loops and methods for assess servo and regulatory behavior of industrial loops. Also it is presented one method for assessing the robust performance of control loops in level of project. In the fifth chapter is presented a systematic study for condition monitoring of non self-regulatory (integrating) control loops. The study included the analysis of traditional and advanced control structures, the analysis of robust performance in level of project, methods for assessing the performance of these kind of controllers and ways for improving the performance thought the correct tuning of the parameters and thought the implementation of a new control structure. Are discussed the issues concerning to the practical implementation, pointed the principal advantages and disadvantages of the techniques and verified the theoretical/practical aspects through the simulation of the algorithms. Finally in the sixth chapter are presented the present challenges in the area, the future works that will be developed giving continuity to the work presented, the conclusions and the bibliographical references.

Sumário

AGRADECIMENTOS	III
SUMÁRIO	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE ABREVIACÕES	XX
1 CAPÍTULO 1	1
1.1 MOTIVAÇÃO	2
1.2 OBJETIVOS	5
1.3 CONTRIBUIÇÕES.....	7
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	12
2 CAPÍTULO 2	13
2.1 PRODUÇÃO LITERÁRIA EM NÍVEL MUNDIAL.....	14
2.2 CENÁRIO DA PROBLEMÁTICA INDUSTRIAL	15
2.3 DETECÇÃO DE PERTURBAÇÕES EM MALHAS DE CONTROLE	17
2.3.1 <i>Detecção de Perturbações Oscilatórias</i>	17
2.3.2 <i>Detecção de Perturbações Não-Oscilatórias</i>	20
2.3.3 <i>Detecção de Perturbações Não-Estacionárias</i>	20
2.4 DIAGNÓSTICO DA CAUSA RAIZ DAS PERTURBAÇÕES	21
2.5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MALHAS DE CONTROLE.....	26
2.5.1 <i>CLPA para Sistemas SISO</i>	26
2.5.2 <i>CLPA para Sistemas MIMO</i>	29
2.5.3 <i>CLPA para Sistemas MPC</i>	31
2.6 SOLUÇÕES COMERCIAIS.....	34
2.7 CONCLUSÕES	35
3 CAPÍTULO 3	36
3.1 DESEMPENHO E A HIERARQUIA DE CONTROLE DE PLANTA.....	37
3.2 SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO BASEADO NA INFORMAÇÃO.....	40
3.3 PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO BASEADA EM DADOS.....	41
3.3.1 <i>Aquisição e Manutenção de Dados</i>	41
3.3.2 <i>Extração da Informação dos Dados</i>	43
3.4 FILTRAGEM DIGITAL DOS DADOS	60
3.4.1 <i>Filtragem Digital no Domínio Temporal</i>	62
3.4.2 <i>Filtragem Digital no Domínio da Freqüência</i>	70
3.4.3 <i>Filtros que Preservam Mudanças Repentinhas</i>	74
3.4.4 <i>Avaliação da Qualidade do Sinal Filtrado</i>	76

3.4.5	<i>Estudo de Caso</i>	77
3.5	CLPA-TOOL PARA O IBDS DE PROCESSOS INDUSTRIAIS.....	79
3.6	CONCLUSÕES.....	80
4	CAPÍTULO 4	81
4.1	IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DO ESTADO ESTACIONÁRIO.....	83
4.1.1	<i>Método Proposto por Cao e Rhinehart (1995)</i>	84
4.1.2	<i>Teste da Hipótese de Independência</i>	88
4.1.3	<i>Teste da Soma dos Postos com Sinais de Wilcoxon</i>	91
4.2	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO OSCILATÓRIO.....	95
4.2.1	<i>Método Proposto por Hägglund (1995)</i>	95
4.2.2	<i>Método Proposto por Miao e Seborg (1998)</i>	98
4.2.3	<i>Método Proposto por Forsman e Stattin (1999)</i>	102
4.2.4	<i>Método Proposto por Thornhill, Huang et al. (2003)</i>	105
4.2.5	<i>Estudo de Caso</i>	109
4.2.6	<i>Comparação dos Métodos</i>	138
4.3	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO SERVO.....	139
4.3.1	<i>Indicadores Baseados na Integral dos Sinais</i>	142
4.3.2	<i>Método proposto por Braga e Jota (1994)</i>	145
4.3.3	<i>Método proposto por Swanda e Seborg (1999)</i>	148
4.4	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REGULATÓRIO.....	152
4.4.1	<i>Método Proposto por Hägglund (1999)</i>	154
4.5	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ROBUSTO.....	158
4.5.1	<i>Técnicas de Sintonia de Controladores PID</i>	158
4.5.2	<i>Avaliação do Desempenho Robusto</i>	160
4.5.3	<i>Resultados e Discussões</i>	162
4.5.4	<i>Análise do Desempenho</i>	164
4.6	AVALIAÇÃO BASEADA EM PADRÕES REFERENCIAIS.....	167
4.6.1	<i>Procedimento Básico para Avaliação</i>	169
4.6.2	<i>Avaliação Baseada no Controle Perfeito</i>	171
4.6.3	<i>Avaliação Baseada no Melhor Controlador Não-linear</i>	171
4.6.4	<i>Avaliação Baseada no Controle de Variância Mínima</i>	172
4.6.5	<i>Avaliação baseada no MVC Horizonte Estendido</i>	190
4.6.6	<i>Avaliação baseada no Controle de Variância Mínima Generalizada</i>	198
4.6.7	<i>Avaliação baseada no Controle Linear Quadrático Gaussiano</i>	199
4.6.8	<i>Avaliação baseada no Melhor MBPC</i>	200
4.6.9	<i>Avaliação baseada no Melhor Controle PID</i>	201
4.6.10	<i>Avaliação baseada na Malha Aberta</i>	201
4.6.11	<i>Comparação de Alguns dos Métodos Apresentados</i>	202
4.7	CONCLUSÕES.....	203
5	CAPÍTULO 5	207
5.1	MODELAGEM DO PROCESSO INTEGRADOR.....	209
5.2	IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS INTEGRADORES.....	211
5.3	FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA FUNDAMENTAIS.....	214
5.4	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE TRADICIONAIS.....	217
5.4.1	<i>Controle Somente-Proporcional</i>	217
5.4.2	<i>Controle Proporcional-Integral</i>	220
5.4.3	<i>Controle Realimentado Feedforward</i>	225
5.4.4	<i>Controle Condicional</i>	228
5.4.5	<i>Expressões analíticas</i>	231
5.5	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE NÃO-LINEARES.....	234
5.5.1	<i>Controle Proporcional-Integral Não-Linear</i>	234
5.5.2	<i>Controle Proporcional-Integral de Ampla Escala</i>	235
5.5.3	<i>Controle Proporcional-Integral Proporcional</i>	237
5.5.4	<i>Controle Proporcional-Integral de Escala Dual</i>	238
5.6	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE AVANÇADAS.....	239
5.6.1	<i>Controle por Bandas</i>	239

5.6.2	<i>Controle por Preditor de Smith Filtrado</i>	243
5.7	CLPA DE PROCESSOS NÃO AUTO-REGULATÓRIOS.....	254
5.7.1	<i>Avaliação Baseada no Controle de Nível Médio Ótimo</i>	256
5.7.2	<i>Avaliação Baseada no Controle Linear Quadrático (LQG)</i>	259
5.7.3	<i>Avaliação Baseado no Controle PI Ótimo</i>	262
5.8	ESTUDO DE CASO.....	264
5.9	PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO.....	265
5.10	CONCLUSÕES.....	268
6	CAPÍTULO 6	269
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	272

Lista de Figuras

Figura 1.1: Desempenho demográfico industrial de controladores PID no mundo.....	3
Figura 2.1: Principais grupos de pesquisa e da produção literária ao redor do mundo.....	14
Figura 2.2: Custo de eventos anormais na indústria de processos.....	15
Figura 2.3: Exemplo de eventos anormais na indústria de processos.....	16
Figura 2.4: Grau de incidência dos eventos versus escala de tempo.....	16
Figura 2.5: Panorama da manutenção das malhas de controle numa planta industrial.....	16
Figura 2.6: Principais métodos para a detecção de perturbações (Thornhill e Horch, 2006).....	17
Figura 2.7: Métodos para o diagnóstico da causa raiz de perturbações (Thornhill e Horch, 2006)..	21
Figura 2.8: Classificação dos métodos de diagnóstico sob a base do conhecimento a priori.....	22
Figura 2.9: Evolução da pesquisa na área de avaliação do desempenho de controladores <i>SISO</i>	26
Figura 2.10: Evolução da pesquisa na área de avaliação do desempenho de controladores <i>MIMO</i> . 29	
Figura 2.11: Evolução da pesquisa na área de avaliação do desempenho de controladores <i>MPC</i>	31
Figura 3.1: Arquitetura de automatização com capacidades e produtos para o acesso a toda a informação relacionada com os ativos de uma planta típica.....	37
Figura 3.2: Pirâmide hierárquica funcional de controle.....	38
Figura 3.3: Visão holística da otimização do desempenho na estrutura hierárquica de sistemas de controle de processos (Zhou, 2001).	39
Figura 3.4: Componentes do IBDS para o monitoramento do processo.....	40
Figura 3.5: Ciclo do processamento da informação baseada em dados (DBPI).....	41
Figura 3.6: Análise da qualidade dos dados através dos fatores de compressão e quantização, gráficos gerados usando o DBPI – CLPATool desenvolvido nesta tese.....	44
Figura 3.7: Análise da qualidade dos dados através do gráfico de simultaneidade gerado usando o DBPI - DataProctor (Tangirala e Shah, 2003).	45
Figura 3.8: Representação do algoritmo de decomposição <i>wavelet</i> em árvore com os coeficientes modificados.....	47
Figura 3.9: Coeficientes da decomposição <i>wavelet</i> para o terceiro nível de resolução.....	48

Figura 3.10: Árvore de reconstrução <i>wavelet</i> com três níveis.	48
Figura 3.11: Classificação de dados pelas probabilidades associadas a uma distribuição normal.	49
Figura 3.12: Exemplo de um sinal com lacunas sem dados, perda de dados randômica e problemas no sensor.	49
Figura 3.13: Resultado da DWT para o intervalo [1 500] e estimação dos valores perdidos usando o método dos mínimos quadrados não-lineares robusto.	50
Figura 3.14: Reconstrução do sinal a partir dos novos coeficientes usando <i>IDWT</i> para o intervalo [1 500] e análise da qualidade dos dados antes e depois da implementação da técnica.	50
Figura 3.15: Resultado da <i>DWT</i> para o intervalo [650 850] e estimação dos valores perdidos usando o método dos mínimos quadrados não-lineares robusto.	51
Figura 3.16: Reconstrução do sinal a partir dos novos coeficientes usando <i>IDWT</i> para o intervalo [650 850] e Análise da qualidade dos dados antes e depois da implementação da técnica.	51
Figura 3.17: Resultado da DWT para o intervalo [900 1050] e estimação dos valores perdidos usando o método dos mínimos quadrados não-lineares robusto.	52
Figura 3.18: Reconstrução do sinal a partir dos novos coeficientes usando <i>IDWT</i> para o intervalo [900 1050] e Análise da qualidade dos dados antes e depois da implementação da técnica.	52
Figura 3.19: Comparação de diferentes técnicas para reconstrução de sinais com lacunas de amostras perdidas.	53
Figura 3.20: Comparação de diferentes técnicas para reconstrução de sinais com perda aleatória de amostras.	54
Figura 3.21: Análise de dados através de estatística elementar gerado usando o analisador desenvolvido nesta tese.	54
Figura 3.22: Análise de dados através de indicadores das tendências temporal e espectral gerados usando o analisador desenvolvido nesta tese.	55
Figura 3.23: Representação dos dados através de gráficos de alta densidade, gerados usando o DBPI – CLPATool desenvolvido nesta tese.	56
Figura 3.24: Representação dos dados através gráficos SCMAP apresentado por Tangirala e Shah (2003).	57
Figura 3.25: Representação dos dados através gráficos <i>SPCA</i> apresentado por Tangirala e Shah (2003).	57
Figura 3.26: Representação dos dados através gráficos <i>PSCMAP</i> gerado usando o <i>DBPI - DataProctor</i> (Tangirala e Shah, 2003).	58
Figura 3.27: Intervalos típicos de frequências para sinais de dados, ruído e filtragem (Omega, 1998).	60
Figura 3.28: Diagramas de Magnitude e Fase dos Filtros de média Móvel de ordem 2, 4 e 10.	62
Figura 3.29: Implementação do método de filtragem por suavização polinomial,	63
Figura 3.30: Resposta em frequência e resposta ao impulso do filtro EWMA para diferentes α	65
Figura 3.31: Implementação do método de filtragem por mediana.	67
Figura 3.32: Implementação do método de filtragem por mediana.	67

Figura 3.33: Implementação do método de filtragem de ruído espinhoso.	68
Figura 3.34: Seqüência de operações utilizada na aplicação do filtro por transformada de Fourier....	70
Figura 3.35: Implementação do método de filtragem por transformada de Fourier.	72
Figura 3.36: Filtragem 2EWMA com parâmetros ótimos sob um sinal com $A=2$, $w_1=0.002$, $w_2=0.49$, $\sigma_{\text{ruído}}=1$	78
Figura 3.37: Filtragem 2EWMA com parâmetros ótimos sob um sinal com $A=4$, $w_1=0.02$, $w_2=0.1$, $\sigma_{\text{ruído}}=2$	78
Figura 3.38: Ferramenta <i>CLPA-Tool</i> para o <i>IBDS</i> de Processos Industriais proposta nesta tese.....	79
Figura 4.1: Característica da resposta em malha aberta de processos auto-regulatórios (Boudreau e Mcmillan, 2006).....	82
Figura 4.2: Princípio do método para a <i>SSID</i> de Cao e Rhinehart (1995).....	84
Figura 4.3: Avaliação do algoritmo de identificação de estado estacionário de Rhinehart (2001), sob um sinal com vários estados estacionários ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2=0.05$, $\lambda_3=0.001$).....	87
Figura 4.4: Avaliação do algoritmo de identificação de estado estacionário de Rhinehart (2001), sob um sinal com problemas no seu sinal de referência ($\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=0.1$).....	88
Figura 4.5: Avaliação do algoritmo de identificação de estado estacionário usando os índices baseados nos testes de Wald-Wolfowitz e Wilcoxon sob um sinal com vários estados estacionários ($L=100$).....	94
Figura 4.6: Avaliação do algoritmo de identificação de estado estacionário usando os índices baseados nos testes de Wald-Wolfowitz e Wilcoxon sob um sinal com vários estados estacionários ($L=30$).....	94
Figura 4.7: Princípio do método de detecção de oscilações de Hägglund (1995).....	95
Figura 4.8: Exemplos da implementação do método de Hägglund (1995), (a) Ruído branco gaussiano, (b) Sinal oscilatório (Em ambos os casos os parâmetros foram $a=2$, $T_u=10$, $T_s=1$, $\varphi=10$).....	97
Figura 4.9: Princípio do método de detecção de oscilações de Miao e Seborg (1998).....	98
Figura 4.10: Exemplos da implementação do método de Miao e Seborg (1998).....	101
Figura 4.11: Princípio do método de detecção de oscilações de Forsman e Stattin (1999).....	102
Figura 4.12: Exemplo da implementação do método de Forsman e Stattin (1999), (Em ambos os casos os parâmetros foram $\alpha_{LAE}=0.5$, $\gamma_{TBCZ}=0.9$, $T_s=1$).....	104
Figura 4.13: Princípio do método de detecção de oscilações de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).....	105
Figura 4.14: Exemplo da implementação do método apresentada em Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	108
Figura 4.15: Intervalos de filtragem para o método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).....	110
Figura 4.16: Características do banco sinais sem ruído para cada teste realizado.....	119
Figura 4.17: Características do banco sinais com ruído para cada teste realizado.....	119
Figura 4.18: Espectro de potência do banco de sinais sem ruído.	120
Figura 4.19: Espectro de potência do banco de sinais com ruído.....	120

Figura 4.20: IAE entre TBCZ do banco de sinais sem ruído, para o método de Hågglund (1995).	121
Figura 4.21: IAE entre TBCZ do banco de sinais com ruído, para o método de Hågglund (1995).	121
Figura 4.22: Perturbações acumuladas do banco de sinais sem ruído, para o método de Hågglund (1995).	122
Figura 4.23: Perturbações acumuladas do banco de sinais com ruído, para o método de Hågglund (1995).	122
Figura 4.24: ACFs e índices de oscilação do bando de sinais sem ruído, para o método de Miao e Seborg (1998).	123
Figura 4.25: ACFs e índices de oscilação do bando de sinais com ruído, para o método de Miao e Seborg (1998).	123
Figura 4.26: TBCZs do banco de sinais sem ruído, para o método de Forsman e Stattin (1999).	124
Figura 4.27: TBCZs do banco de sinais com ruído, para o método de Forsman e Stattin (1999).	124
Figura 4.28: Indicadores de oscilação do banco de sinais sem ruído, para o método de Forsman e Stattin (1999).	125
Figura 4.29: Indicadores de oscilação do banco de sinais com ruído, para o método de Forsman e Stattin (1999).	125
Figura 4.30: ACFs não filtradas no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	126
Figura 4.31: ACFs filtradas no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	126
Figura 4.32: TBCZ no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	127
Figura 4.33: Espectro de potência no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	127
Figura 4.34: ACFs não filtradas no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	128
Figura 4.35: ACFs filtradas no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	128
Figura 4.36: TBCZ no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	129
Figura 4.37: Espectro de potência no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	129
Figura 4.38: ACFs não filtradas no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	130
Figura 4.39: ACFs filtradas no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	130
Figura 4.40: TBCZ no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	131
Figura 4.41: Espectro de potência no banco de sinais sem ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	131
Figura 4.42: ACFs não filtradas no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	132

Figura 4.43: ACFs filtradas no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	132
Figura 4.44: TBCZ no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003). .	133
Figura 4.45: Espectro de potência no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	133
Figura 4.46: ACFs não filtradas no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	134
Figura 4.47: ACFs filtradas no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	134
Figura 4.48: TBCZ no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003). .	135
Figura 4.49: Espectro de potência no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	135
Figura 4.50: ACFs não filtradas no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	136
Figura 4.51: ACFs filtradas no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	136
Figura 4.52: TBCZ no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003). .	137
Figura 4.53: Espectro de potência no banco de sinais com ruído, para o método Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003).	137
Figura 4.54: Resposta do processo frente a uma mudança no sinal de referência.....	139
Figura 4.55: Exemplo da avaliação do desempenho usando critérios tradicionais.....	141
Figura 4.56: Exemplo da avaliação do desempenho usando critérios tradicionais.....	142
Figura 4.57: Princípio do método para avaliação do desempenho de Braga e Jota (1994).....	145
Figura 4.58: Exemplo da implementação do método de Braga e Jota (1994).....	147
Figura 4.59: Princípio do método para avaliação do desempenho de Swanda e Seborg (1999).	148
Figura 4.60: Exemplo da implementação do método de Swanda e Seborg (1999).	151
Figura 4.61: Resposta temporal típica de um sistema frente a uma perturbação de carga.	153
Figura 4.62: Princípio do método para avaliação da sintonia do controlador de Hägglund (1999)..	154
Figura 4.63: Exemplo da implementação do método para avaliação da sintonia do controlador de (Hägglund, 1999). Malha com o controlador PID sintonizado adequadamente.....	157
Figura 4.64: Resposta em malha aberta dos modelos nominal, extremo e estimado.....	162
Figura 4.65: Resultados de avaliação do desempenho utilizando indicadores tradicionais.	163
Figura 4.66: Resultados de avaliação do desempenho utilizando indicadores tradicionais.	165
Figura 4.67: Passos para o incremento do desempenho do sistema de controle e seus benefícios. .	167
Figura 4.68: Esquema comparativo para a avaliação baseada em padrões referenciais.	168
Figura 4.69: Procedimento CPA e CPM para malhas de controle (Jelali, 2006).	169
Figura 4.70: Principais causas do baixo desempenho das malhas de controle.	170

Figura 4.71: Sugestões para a melhora do desempenho em malhas de controle.	170
Figura 4.72: Princípio do método para avaliação do desempenho de Harris (1989).	172
Figura 4.73: Comparação dos valores eficazes para diferentes técnicas de estimação de atraso de transporte (Bjorklund e Ljung, 2003).....	177
Figura 4.74: Exemplo da implementação do método de Harris (1989).	182
Figura 4.75: Exemplo da implementação do método de Harris (1989).	182
Figura 4.76: Princípio do método para avaliação do desempenho de Huang (1997b).....	183
Figura 4.77: Exemplo da implementação do método de Huang (1997b).....	186
Figura 4.78: Exemplo da implementação do método de Huang (1997b).....	186
Figura 4.79: Princípio do método para avaliação do desempenho de Shunta (1995).....	187
Figura 4.80: Princípio do método para avaliação do desempenho de Desborough e Harris (1992).190	
Figura 4.81: Respostas temporais dos erros de controle.....	195
Figura 4.82: Resposta do índice de desempenho estendido versus horizonte de previsão.....	195
Figura 4.83: Estimativas das respostas ao impulso.	196
Figura 4.84: Exemplo da implementação do método de Desborough e Harris (1992).	197
Figura 4.85: Exemplo da implementação do método de Desborough e Harris (1992).	197
Figura 4.86: Princípio do método para avaliação do desempenho de Grimble (2002a).....	198
Figura 4.87: Curva de mérito ou de desempenho LQG.....	199
Figura 4.88: Resposta comparativa da compensação de uma perturbação de primeira ordem.....	200
Figura 5.1: Característica da resposta em malha aberta de processos integradores (Boudreau e Mcmillan, 2006).....	208
Figura 5.2: P&ID típica de um tanque de separação onde os controladores de nível e vazão estão em cascata.	209
Figura 5.3: Seqüência de operações para a identificação empírica do processo FOPDT integrador, Wade (2004)	211
Figura 5.4: Curvas típicas de válvulas.....	212
Figura 5.5: Seqüência de operações para a identificação empírica do processo FOPDT integrador, Arbogast e Cooper (2007).	213
Figura 5.6: Diagrama de blocos de uma malha de controle realimentada básica.	214
Figura 5.7: Diagrama de blocos do sistema Controle Somente-Proporcional.....	217
Figura 5.8: Resposta ao degrau das funções de transferências fundamentais – Controle Somente-Proporcional.....	218
Figura 5.9: Magnitude do Bode das funções de transferência fundamentais – Controle Somente-Proporcional.....	218
Figura 5.10: Sintonia do Controlador P baseada nos objetivos desejados.....	219
Figura 5.11: Diagrama de blocos do sistema Controle Proporcional-Integral.....	220

Figura 5.12: Resposta ao degrau das funções de transferências fundamentais – Controle PI.....	221
Figura 5.13: Magnitude do Bode das funções de transferência fundamentais – Controle PI.	221
Figura 5.14: Sintonia do Controlador PI baseada nos objetivos desejados.	222
Figura 5.15: Diagrama de blocos do sistema Controle Proporcional-Atraso (PL).....	225
Figura 5.16: Resposta ao degrau das funções de transferências fundamentais - Controle PL.....	226
Figura 5.17: Magnitude do Bode das funções de transferência fundamentais – Controle PL.	226
Figura 5.18: Sintonia do Controlador PL baseada nos objetivos desejados.....	227
Figura 5.19: Diagrama de blocos do sistema Controle Condicional (CCD).	228
Figura 5.20: Resposta ao degrau das funções de transferências fundamentais – Controle Condicional (a) processo sem atraso de transporte; (b) processo com atraso de transporte.	229
Figura 5.21: Magnitude do Bode das funções de transferência fundamentais – Controle Condicional (a) processo sem atraso de transporte; (b) processo com atraso de transporte.	229
Figura 5.22: Sintonia do Controlador Condicional baseada nos objetivos desejados (a) processo sem atraso de transporte; (b) processo com atraso de transporte.	230
Figura 5.23: Sintonia do Controlador Condicional baseada nos objetivos desejados.	230
Figura 5.24: Diagrama de blocos do sistema Controle Proporcional-Integral Não-Linear (NLPI).	234
Figura 5.25: Sintonia do Controlador PI Não Linear baseada nos objetivos desejados (a) MPH=2- 4%, $K_{CMax}=1$, $K_{CMin}=0.5$, $h_B=0.5$, $T_I=18$; (b) MPH=35-45%, $K_{CMax}=18$, $K_{CMin}=9$, $h_B=0.5$, $T_I=2$	235
Figura 5.26: Diagrama de blocos do sistema Controle de ampla escala (WRC).....	236
Figura 5.27: Sintonia do Controlador PI Não Linear baseada nos objetivos desejados (a) MPH=2%, $K_{CO}=18$, $K=0.0001$, $T_{L0}=1$; (b) MPH=45%, $K_{CO}=1$, $K=0.0001$, $T_{L0}=18$	236
Figura 5.28: Diagrama de blocos do sistema Controle Proporcional-Integral – Proporcional (PIP).	237
Figura 5.29: Sintonia do Controlador PI-P Não Linear baseada nos objetivos desejados (a) MPH=2%, $K_L=80$, $T_I=0.1$, $h_B=0.8$; (b) MPH=45%, $K_L=4$, $T_I=400$, $h_B=0.01$	238
Figura 5.30: Diagrama de blocos do sistema Controle Proporcional Integral de Escala Dual (DRIP).	238
Figura 5.31: Sintonia do Controlador PI de Escala Dual Não Linear baseada nos objetivos desejados (a) MPH=2%, $K_L=80$, $T_I=0.1$, $h_B=0.8$; (b) MPH=45%, $K_L=4$, $T_I=400$, $h_B=0.01$	239
Figura 5.32: Diagrama de blocos do Controle por Bandas.....	239
Figura 5.33: Diagrama de blocos equivalente do Controle por Bandas.	240
Figura 5.34: Controle por Bandas na estrutura PI.....	240
Figura 5.35: Resposta ao degrau das funções de transferências fundamentais – Controle por Bandas: (a) Sem aproximação de Padé; (b) Com aproximação de Padé de 1ra ordem.....	241
Figura 5.36: Magnitude do Bode das funções de transferência fundamentais – Controle Condicional (a) Sem aproximação de Padé; (b) Com aproximação de Padé de 1ra ordem.....	241

Figura 5.37: Sintonia do Controlador por Bandas baseada nos objetivos desejados (a) Sem aproximação de Padé; (b) Com aproximação de Padé de 1ra ordem.....	241
Figura 5.38: Controle por Bandas na forma do Controlador IMC.....	242
Figura 5.39: Controle por Bandas na forma do Controlador IMC.....	243
Figura 5.40: Controle por Preditor de Smith Filtrado.....	243
Figura 5.41: Estrutura equivalente do Controlador por Preditor de Smith.....	244
Figura 5.42: Sintonia do Controlador Preditor de Smith Filtrado baseada nos objetivos desejados considerando $G_c=100$	247
Figura 5.43: Sintonia do Controlador Preditor de Smith Filtrado baseada nos objetivos desejados considerando $G_c=100$	248
Figura 5.44: Ferramenta para a sintonia de controladores usados em processos integradores.....	249
Figura 5.45: Ferramenta para a sintonia de controladores usados em processos integradores.....	250
Figura 5.46: Ferramenta para a sintonia de controladores usados em processos integradores.....	251
Figura 5.47: Ferramenta para a sintonia de controladores usados em processos integradores.....	252
Figura 5.48: Ferramenta para a sintonia de controladores usados em processos integradores.....	253
Figura 5.49: Princípio do método de avaliação de desempenho de Hugo (1999).....	254
Figura 5.50: Fluxograma do algoritmo de controle realimentado ótimo modificado.....	257
Figura 5.51: Curvas de desempenho para o sistema de controle de nível.....	264
Figura 5.52: Diagrama esquemático da plataforma de simulação de Mejia, R. G. (2006).....	265

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Instalações, Gastos Energéticos e Manutenção de Processos de Produção Contínua no Brasil.....	2
Tabela 2.1: Empresas representativas do mercado, ferramentas comerciais e parcerias acadêmicas.....	34
Tabela 3.1: Variabilidade e coeficientes de correlação para diferentes intervalos de dados reconstruídos	53
Tabela 3.2: Técnicas de filtragem digital no domínio temporal para processos estacionários.....	69
Tabela 3.3: Indicadores da qualidade dos sinais filtrados.....	76
Tabela 4.1: Interpretação dos valores do indicador de Forsman e Stattin (1999).....	103
Tabela 4.2: Coeficientes usados na geração do banco de sinais.	109
Tabela 4.3: Freqüências de detecção usadas no método de Hågglund (1995).....	110
Tabela 4.4: Número de oscilações detectadas e a porcentagem de acerto na detecção. Resultados obtidos pelo método de Hågglund (1995) – Banco de sinais sem ruído.	112
Tabela 4.5: Número de oscilações detectadas e a porcentagem de acerto na detecção. Resultados obtidos pelo método de Hågglund (1995) – Banco de sinais com ruído.....	112
Tabela 4.6: Indicadores de oscilação e a porcentagem de acerto na detecção.	113
Tabela 4.7: Indicadores de oscilação e a porcentagem de acerto na detecção. Resultados obtidos pelo método de Miao e Seborg (1999) – Banco de sinais com ruído.	113
Tabela 4.8: Detecção de cruzamentos por zero – Banco de sinais sem ruído. Resultados obtidos pelo método de Forsman e Stattin (1999).....	113
Tabela 4.9: Cruzamentos por zero, detectados – Banco de sinais com ruído. Resultados obtidos pelo método de Forsman e Stattin (1999).....	114
Tabela 4.10: Indicadores de oscilação e a porcentagem de acerto na detecção. Resultados obtidos pelo método de Forsman e Stattin (1999) – Banco de sinais sem ruído.....	114
Tabela 4.11: Indicadores de oscilação e a porcentagem de acerto na detecção. Resultados obtidos pelo método de Forsman e Stattin (1999) – Banco de sinais com ruído.	114
Tabela 4.12: Médias e desvios padrão dos períodos. Intervalo de filtragem [1 40]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais sem ruído.....	115

Tabela 4.13: Potências e indicadores de oscilação. Intervalo de filtragem [1 40]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais sem ruído.....	115
Tabela 4.14: Médias e desvios padrão dos períodos. Intervalo de filtragem [40 200]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais sem ruído.....	115
Tabela 4.15: Potências e indicadores de oscilação. Intervalo de filtragem [40 200]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais sem ruído.....	115
Tabela 4.16: Médias e desvios padrão dos períodos. Intervalo de filtragem [200 1000]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais sem ruído.....	116
Tabela 4.17: Potências e indicadores de oscilação. Intervalo de filtragem [200 1000]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais sem ruído.....	116
Tabela 4.18: Médias e desvios padrão dos períodos. Intervalo de filtragem [1 40]. Resultados obtidos o método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais com ruído.	117
Tabela 4.19: Potências e indicadores de oscilação. Intervalo de filtragem [1 40]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais com ruído.....	117
Tabela 4.20: Médias e desvios padrão dos períodos. Intervalo de filtragem [40 200]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais com ruído.....	117
Tabela 4.21: Potências e indicadores de oscilação. Intervalo de filtragem [40 200]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais com ruído.....	118
Tabela 4.22: Médias e desvios padrão dos períodos. Intervalo de filtragem [200 1000]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais sem ruído.....	118
Tabela 4.23: Potências e indicadores de oscilação. Intervalo de filtragem [200 1000]. Resultados obtidos pelo método de Thornhill, Huang <i>et al.</i> (2003) – Banco de sinais com ruído.....	118
Tabela 4.24: Resumo dos requerimentos e benefícios de diferentes métodos usados para a detecção de oscilações.	138
Tabela 4.25: Critérios para a avaliação do desempenho frente a mudanças de referência.	140
Tabela 4.26: Indicadores de desempenho baseados na integral do erro.	142
Tabela 4.27: Indicadores de desempenho baseados na integral do erro (continuação).	143
Tabela 4.28: Indicadores de desempenho normalizados baseados na integral dos sinais.	143
Tabela 4.29: Indicadores de desempenho normalizados baseados na integral dos sinais.	144
Tabela 4.30: Classificação do desempenho para controladores PI^1 (P^2), Swanda e Seborg (1999).	151
Tabela 4.31: Classificação do desempenho para controladores PID^1 (PD^2), Swanda e Seborg (1999).	151
Tabela 4.32: Critérios para a avaliação da rejeição de perturbações de carga.	152
Tabela 4.33: Valores do coeficiente de correlação de Pearson e o grau de correlação.....	155
Tabela 4.34: Avaliação da sintonia do controlador em função do valor do índice de inatividade... ..	156
Tabela 4.35: Técnicas avançadas de sintonia de controladores <i>PID</i>	159
Tabela 4.36: Ordens recomendadas para modelagem de séries temporais (Horch, 2000).....	180
Tabela 4.37: Parâmetros recomendados para malhas de refinaria genéricas.	196

Tabela 4.38: Resumo dos diferentes métodos CLCA baseada em padrões referências (Jelali, 2006)	202
Tabela 5.1: Funções de transferência fundamentais para o sistema de Controle Proporcional.....	217
Tabela 5.2: Sintonia do Controlador Somente Proporcional.....	219
Tabela 5.3: Funções de transferência fundamentais para o sistema de Controle Proporcional-Integral (<i>PI</i>).....	220
Tabela 5.4: Expressões rigorosas para a sintonia do Controle PI.....	222
Tabela 5.5: Expressões simplificadas para a sintonia do Controle PI.....	223
Tabela 5.6: Expressões simplificadas para a sintonia do Controle PI – assumindo atraso de transporte	223
Tabela 5.7: Expressões para a sintonia do Controle PI reportadas por (Shinskey, 2005a; b).....	223
Tabela 5.8: Expressões para a sintonia do Controle PI reportadas por King (2005).	224
Tabela 5.9: Expressões para a sintonia do Controle PI reportadas por Top Control (2005).	224
Tabela 5.10: Expressões para a sintonia do Controle PI reportadas por Kinney e Gerry (2004)....	224
Tabela 5.11: Expressões para a sintonia do Controle PI reportadas por Skogestad (2003).....	224
Tabela 5.12: Funções de transferência fundamentais para o sistema de Controle Proporcional-Atraso (<i>PL</i>).	225
Tabela 5.13: Expressões para a sintonia do Controle PL reportadas por Cheung e Luyben (1979).	227
Tabela 5.14: Funções de transferência fundamentais para o sistema de Controle Condicional.	228
Tabela 5.15: Funções de transferência fundamentais para o sistema de Controle Condicional.	229
Tabela 5.16: Expressões analíticas das relações MPH , $MRCO$, e H_{OFFSET} dos controladores de nível sub-ótimos	231
Tabela 5.17: Relações da predição do comportamento do nível, assumindo um modelo ideal.....	232
Tabela 5.18: Relações da predição do comportamento da vazão, assumindo um modelo ideal.	232
Tabela 5.19: Relações da predição do comportamento da vazão e do nível, assumindo um modelo ideal.....	233
Tabela 5.20: Relações da predição do comportamento da vazão e do nível, assumindo um modelo ideal.....	233
Tabela 5.21: Relações da predição do comportamento da vazão e do nível, assumindo um modelo ideal.....	234
Tabela 5.22: Funções de transferência fundamentais para o sistema de Controle por Bandas.....	240

Lista de Abreviações

ACF	<i>Autocorrelation Function</i> Função de Autocorrelação	CLP / PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> Controlador Lógico Programável
AEGIS	<i>Abnormal Event Guidance and Information System</i> Guia de Eventos Anormais e Informação de Sistemas	co	<i>Control Output</i> Saída do Controle
AEM	<i>Abnormal Event Management</i> Gerenciamento de Eventos Anormais	COV	<i>Coefficient of Variation</i> Coeficiente de Variação
APC	<i>Advanced Process Control</i> Controle Avançado de Processos	CPA	<i>Control Performance Assessment</i> Avaliação do Desempenho do Controlador
AR	<i>Autoregressive Model</i> Modelo Auto-Regressivo	CPM	<i>Control Performance Monitoring</i> Monitoramento do Desempenho do Controlador
ARMA	<i>Autoregressive Moving Average Model</i> Modelo AR e Média Móvel	CUSUM	<i>Cumulative Sum</i> Soma Cumulativa
ARMarkov	<i>Auto-Regressive Markov Model</i> Modelo Auto-Regressivo de Markov	cv	<i>Controlled Variable</i> Variável Controlada
ARX	<i>Autoregressive Exogenous Model</i> Modelo AR com entrada Exógena	CVA	<i>Canonical Variate Analysis</i> Análise de Variável Canônica
ASM	<i>Abnormal Situation Management</i> Gerenciamento de Situações Anormais (consorcio)	DBPI	<i>Data-Based Process Information</i> Processamento da Informação Baseada em Dados
BAND	<i>Band Control(ler)</i> Controle por Bandas	DCS	<i>Distributed Control Systems</i> Sistemas de Controle Distribuído
CARIMA	<i>Controlled Auto-Regressive with Integrated Moving Average</i> Modelo AR com Média Móvel, Integrador e Entrada Controlada	DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> Transformada Discreta de Fourier
CCD	<i>Conditional Control(ler)</i> Controle Condicional	DISPO	<i>Digital Smoothing Polynomial Filter</i> Filtro de Suavização Polinomial Digital
CCF	<i>Cross-Correlation Function</i> Função de Correlação Cruzada	DMC	<i>Dynamic Matrix Control(ler)</i> Controle por Matriz Dinâmica
CF	<i>Compression Factor</i> Fator de Compressão	DR	<i>Decay Rate of the Controlled Variable</i> Taxa de Decaimento da Variável Controlada
CLPA	<i>Control Loop Performance Assessment</i> Avaliação do Desempenho de Malha de Controle	DRe	<i>Decay Rate of the Control Error</i> Taxa de Decaimento do Erro de Controle

RIP	<i>Dual Range PI Control(ler)</i> Controle PI de Escala Dual	HIS	<i>Historical Data Benchmark</i> Padrão Referencial baseado em Dados Históricos
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i> Transformada Discreta Wavelet	HOS	<i>Higher-Order Statistics</i> Estatística de Alta Ordem
EHPI	<i>Extended Horizont Performance Index</i> Índice de Desempenho de Horizonte Estendido	IAE / JIAE	<i>Integral Absolute Error</i> Integral do Valor Absoluto do Erro
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i> Filtragem Estendida de Kalman	IAU	<i>Control Signal Activity</i> Atividade da Variável Manipulada
En	<i>Normalized Error</i> Erro Normalizado	IAY	<i>Process Output Variation</i> Atividade da Variável Controlada
EPI	<i>Engineer Performance Index</i> Índice de Desempenho do Engenheiro	IDWT	<i>Inverse Discrete Wavelet Transform</i> Transformada Wavelet Discreta Inversa
EQMA	<i>Equally Weighted Moving Average</i> Média Móvel Iguamente Ponderada	IBDS	<i>Information-Based Decision Support System</i> Sistema de Suporte à Decisão Baseado na Informação
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> Sistema Integrado de Gestão Empresarial	IBGE	<i>Brazilian Institute of Geography and Statistics</i> Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
EUA	<i>United States of America</i> Estados Unidos da América	ICA	<i>Independent Component Analysis</i> Análise de Componentes Independentes
EWMA	<i>Exponentially Weighted Moving Average</i> Média Móvel Exponencialmente Ponderada	IDG	<i>Global Performance Index</i> Índice de Desempenho Global
FCOR	<i>Filtering and Correlation Analysis</i> Algoritmo para Filtragem e Análise de Correlação	IE / JIE	<i>Integral Error</i> Integral do Erro
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> Transformada Rápida de Fourier	IE _n	<i>Normalized Integral Error</i> Integral do Erro Normalizada
FIR	<i>Finite Impulse Response</i> Resposta ao Impulso Finita	IFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i> Inversa da Transformada Rápida de Fourier
FMVRE	<i>Fixed Model Variable Regressor Estimator</i> Estimador por Regressão Variável de Modelo Fixo	IIR	<i>Infinite Impulse Response</i> Resposta ao Impulso Infinita
FOPDT	<i>First Order Plus Dead Time</i> Primeira Ordem mais Atraso de Transporte	IMC	<i>Internal Model Control(ler)</i> Controle por Modelo Interno
FT	<i>Fourier Transform</i> Transformada de Fourier	IMC-PI	<i>PI Controller based on IMC</i> Controlador PI baseado no IMC
GB	<i>Giga Bytes</i> 1x10 ⁹ Bytes (Unidades de Informação básica composta por 8 bits ou dígitos binários).	ISE / JISE	<i>Integrated Square Error</i> Integral do valor Quadrático do Erro
GMV	<i>Generalized Minimum Variance</i> Variância Mínima Generalizada	ISE _n	<i>Normalized Integrated Square Error</i> ISE Normalizado
GPC	<i>Generalized Predictive Control(ler)</i> Controle Preditivo Generalizado	ITAE / JITAE	<i>Integral of Time and Absolute Error</i> Integral do Valor Absoluto do Erro ponderado pelo Tempo
HDP	<i>High Density Plots</i> Gráficos de Alta Densidade	ITAEn	<i>Normalized Integral of Time and Absolute Error</i> IAE Normalizado
		ITSE / JITSE	<i>Integral of Time and Square Error</i> Integral do Valor Quadrático do Erro ponderado pelo Tempo

ITSEn	<i>Normalized Integral of Time and Square Error</i> ITSE Normalizado	NSSC	<i>Non-Steady State Condition</i> Condições de Estado Não-Estacionário
JTA / ASL	<i>Asymptotic Sample Length</i> Janela Temporal Assintótica	OE / OES	<i>Output Error Model</i> Modelo do Erro de Saída
KBS	<i>Supervisory Knowledge-Based</i> Sistema Supervisor Baseado no Conhecimento	OLE	<i>Object Linking & Embedding</i> Vinculação e Incorporação de Objetos
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> Indicador Chave do Desempenho	OPC	<i>Optimal Ramp Control(ler)</i> Controle Ótimo Rampa
LOC	<i>Limited Output Change</i> Mudança de Saída Limitada	OPC-DA	<i>Data Access OPC</i> Especificação de Acesso a Dados OPC
LQG	<i>Linear Quadratic Gaussian</i> Regulação Linear Quadrática Gaussiana (Estocástica)	OPC-HDA	<i>Historical Data Access OPC</i> Especificação de Acesso a Dados Históricos OPC
LTI	<i>Linear Time Invariant</i> Sistema Linear Invariante no Tempo	OPI	<i>Operator Performance Index</i> Índice de Desempenho do Operador
MIMO	<i>Multiple Input, Multiple Output</i> Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas	OPID	<i>Optimal Proportional Integral Derivative Control(ler)</i> Controle Ótimo Proporcional Integral e Derivativo
MPC	<i>Model Predictive Control</i> Controle Preditivo baseado em Modelo	OPT	<i>Optimal Value</i> Valor Ótimo
MPC-PI	<i>PI Control(ler) based on MPC</i> Controle PI baseado no MPC	OSC	<i>Manipulated Variable Overshoot</i> Ultrapassagem da Variável Controlada
MPH	<i>Maximum Peak Height</i> Máximo Desvio de Nível	OSM	<i>Manipulated Variable Overshoot</i> Ultrapassagem da Variável Manipulada
MPI	<i>Management Performance Index</i> Índice de Desempenho do Gerente	PACF	<i>Partial Autocorrelation Function</i> Função de Autocorrelação Parcial
MRCO	<i>Maximum Rate of Change in Outflow</i> Máxima Taxa de Fluxo de Saída	PCA	<i>Principal Component Analysis</i> Análise das Componentes Principais
MSE	<i>Mean Square Error</i> Erro Médio Quadrático	PDF	<i>Probability Density Function</i> Função Densidade de Probabilidade
mv	<i>Manipulated Variable</i> Variável Manipulável	PI	<i>Proportional-Integral Control(ler)</i> Controle Proporcional-Integral
MV	<i>Minimum Variance</i> Variância Mínima	PID	<i>Proportional Integral Derivative Control(ler)</i> Controle Proporcional Integral Derivativo
MVC	<i>Minimum Variance Control(ler)</i> Controle de Variância Mínima	PIP	<i>Proportional Integral – Proportional Control(ler)</i> Controle Proporcional Integral – Proporcional
MVS	<i>Estimated Harris Index</i> Índice Estimado de Harris	PL	<i>Proportional-Lag Control(ler)</i> Controle Proporcional-Defasagem
NLPCA	<i>Non-linear Principal Component Analysis</i> PCA Não-lineares	PLS	<i>Projection to Latent Structures (Partial Least Squares)</i> Projeção de Estruturas Latentes (Mínimos Quadrados Parciais)
NLPI	<i>Non-linear Proportional Integral Control(ler)</i> Controlador PI Não-Linear		
NMF	<i>Nonnegative Matrix Factorization</i> Fatoração de Matriz Não-Negativa		
NP	<i>Nominal Performance</i> Desempenho Nominal		
NRR	<i>Noise Reduction Ratio</i> Taxa de Redução de Ruído		

PSCI	<i>Power Spectral Correlation Index</i> Índice de Correlação Espectral de Potência	SSID	<i>Steady-State Identification</i> Identificação do Estado Estacionário
PSCMAP	<i>Power Spectral Correlation Map</i> Mapa de Correlação Espectral de Potência	SSM	<i>Steady State Model</i> Modelo de Estado Estacionário
PSD	<i>Power Spectral Density</i> Densidade Espectral de Potência	SP	<i>Smith Predictor Control</i> Controle por Preditor de Smith
pv	<i>Process Variable</i> Variável do Processo	ST	<i>Subject to</i> Sujeito a
QDMC	<i>Quadratic Dynamic Matrix Control(ler)</i> Controle Quadrático por Matriz Dinâmica	STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i> Transformada de Fourier de Curta Duração
QF	<i>Quantization Factor</i> Fator de Quantização	SU	<i>Excess of Energy</i> Integral da Variável Manipulada ao Quadrado Ponderada
QSA	<i>Qualitative Shape Analysis</i> Análise de Modelos Qualitativos	SVD	<i>Singular Value Decomposition</i> Decomposição de Valores Singulares
RC	<i>Resistor-Capacitor Filter</i> Filtro baseado num Circuito Resistor e Capacitor	TBCZ	<i>Time Between Zero-Crossings</i> Tempo entre Cruzamentos por Zero
RMS	<i>Root-Mean-Square</i> Valor Eficaz ou Raiz da média dos quadrados	TDE	<i>Time Delay Estimator</i> Estimador de Atraso de Transporte
RP	<i>Robust Performance</i> Desempenho Robusto	TDECC	<i>Time Delay Estimation based Cross Correlation</i> Estimação do Atraso de Transporte baseada na Correlação Cruzada
RS	<i>Robust Stability</i> Estabilidade Robusta	TDEOE	<i>Time Delay Estimation based Output Error Model</i> Estimação do Atraso de Transporte baseada no Modelo do Erro de Saída
RS-LQG	<i>Restricted Structure - Linear Quadratic Gaussian</i> Estrutura Restrita - Regulação LQG	Tipo-F	<i>Statistical Function Type F</i> Função Estatística do Tipo F
RtPM	<i>Real-time Performance Management</i> Supervisão de Desempenho em Tempo Real	Tipo-I	<i>Statistical Error of the First Kind</i> Erro Estatístico da Primeira Espécie
SCMAP	<i>Spectral Color Map</i> Mapa Espectral Colorido	Tipo-II	<i>Statistical Error of the Second Kind</i> Erro Estatístico da Segunda Espécie
SISO	<i>Single Input, Single Output</i> Entrada Simples Saída Simples	Tipo-T	<i>Statistical Function Type T</i> Função Estatística do Tipo T
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> Relação Sinal Ruído	VAR	<i>Variation or Variability</i> Variação ou Variabilidade
SOM	<i>Self Organizing Map</i> Mapas Auto-organizados	WRC	<i>Wide-Range Control(ler)</i> Controle de Ampla Escala
SOPDT	<i>Second Order Plus Dead Time</i> 2 Ordem, mais Atraso de Transporte	WRT	<i>With Regard To</i> Em relação a
sp	<i>Setpoint</i> Referência	WT	<i>Wavelet Transform</i> Transformada Wavelet
SPC	<i>Statistical Process Control</i> Controle Estatístico de Processos		
SPCA	<i>Spectral Principal Component Analysis</i> Análise de Componentes Principais Espectrais		

Capítulo 1

Introdução

*Por que o sistema de monitoramento descansa naquela árvore?
Quem se preocupa quando o desempenho daquela malha de controle é pobre?
Eu quero saber quais as malhas de controle que tem o pior desempenho e o mais alto
impacto econômico, para priorizar a meia hora que tenho
para realizar a manutenção das minhas malhas de controle.*

*Operário anônimo
apresentado em Desborough, Nordh et al. (2001)*

O objetivo do *monitoramento do desempenho do controlador (CPM)* é assegurar que o sistema de controle se comporte de acordo com especificações estabelecidas. Os requisitos de uma abordagem abrangente para a avaliação da efetividade do sistema incluem: a determinação da capacidade, o desenvolvimento de uma estatística adequada para o monitoramento, os métodos sistemáticos para a avaliação do estado das malhas de controle, a detecção e o diagnóstico das causas do decréscimo do desempenho, como também a incorporação dos métodos no ambiente industrial (Harris, Seppala *et al.*, 1999). O número significativo de desenvolvimentos que foram apresentados na última década permitiu melhorar o entendimento na área de processos industriais como também identificar novos desafiantes problemas.

Este capítulo apresenta um panorama geral da pesquisa desenvolvida estruturada em quatro seções: Na seção (1.1) é apresentada a motivação e a relevância do estudo. Na seção (1.2) são apresentados os principais objetivos. Na seção (1.3) são apresentadas as contribuições do trabalho, e, finalmente, na seção (1.4) é apresentada a estrutura da tese de doutorado.

1.1 Motivação

A última década teve um aumento considerável da automatização na indústria de processos, sendo que o incentivo foi o benefício econômico associado com um aumento na produtividade e na qualidade dos produtos (Freng, 2004). Em plantas de refinaria de óleo, plantas químicas, fábricas de papel, e outras indústrias de processos contínuos, são utilizadas tipicamente centenas e até milhares de malhas de controle. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2005), no Brasil, existem mais de sessenta mil destas instalações, (vide Tabela 1.1).

Tabela 1.1: Instalações, Gastos Energéticos e Manutenção de Processos de Produção Contínua no Brasil.

Empresas industriais	Número de empresas	Compra de energia e combustíveis	Serviços industriais prestados por terceiros e de manutenção
		x 1 000 R\$	
Extração de petróleo, refino e serviços relacionados.	277	1 055 441	7 630 658
Fabricação de produtos alimentícios e bebidas.	20 947	5 131 273	3 834 887
Fabricação de celulose, papel e produtos de papel.	2 400	1 944 095	1 260 257
Fabricação de produtos químicos.	5 459	3 832 539	3 693 133
Fabricação de produtos de metal.	15 026	950 400	1 632 031
Fabricação de máquinas e equipamentos.	8 401	737 773	2 157 464
Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos.	2 665	407 481	1 312 950
Fabricação de material eletrônico.	887	179 731	1 289 537
Fabricação de equipamentos de instrumentação em geral.	1 428	81 371	259 708
Fabricação e montagem de veículos automotores.	2 937	1 506 242	2 690 439
Usinas e centrais geradoras de energia elétrica.	1 420	-	-
Total parcial.	61 847	15 826 346	25 761 064
Total no país.	144 358	33 094 497	41 859 250

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Indústria, Pesquisa Industrial Anual - Empresa 2005.

A Petrobras, por exemplo, possui na sua estrutura, entre refinarias, plataformas e unidades de distribuição, aproximadamente 15 mil controladores monovariáveis, 200 mil instrumentos e 30 controladores preditivos (Teixeira, Farenzena *et al.*, 2006). Em aplicações a nível mundial existem lugares nos quais estão instalados entre dois mil ou três mil *controladores preditivos baseados em modelos (MPC)* multivariáveis. Embora o uso de *MPC* esteja agora expandido especialmente em indústrias químicas e petroquímicas, o *controlador proporcional, integral e derivativo (PID)*, é de longe o dominante dos algoritmos de controle realimentado. Num estudo conduzido pela Honeywell que compreendeu dezoito tipos de indústrias (onde se encontram plantas de refinarias, químicas, de polpa e papel) e onze mil reguladores, os controladores regulatórios que utilizam algoritmos de controle *PID* foram usados quase exclusivamente em 97% (Desborough, Miller *et al.*, 2000).

Estudos demográficos do desempenho de controladores tradicionais PID na indústria de processos contínuos (Desborough e Miller, 2001; Paulonis e Cox, 2003) revelam que somente um terço do desempenho dos controladores é aceitável e dois terços têm a possibilidade de aumentar seu desempenho (veja a Figura 1.1).

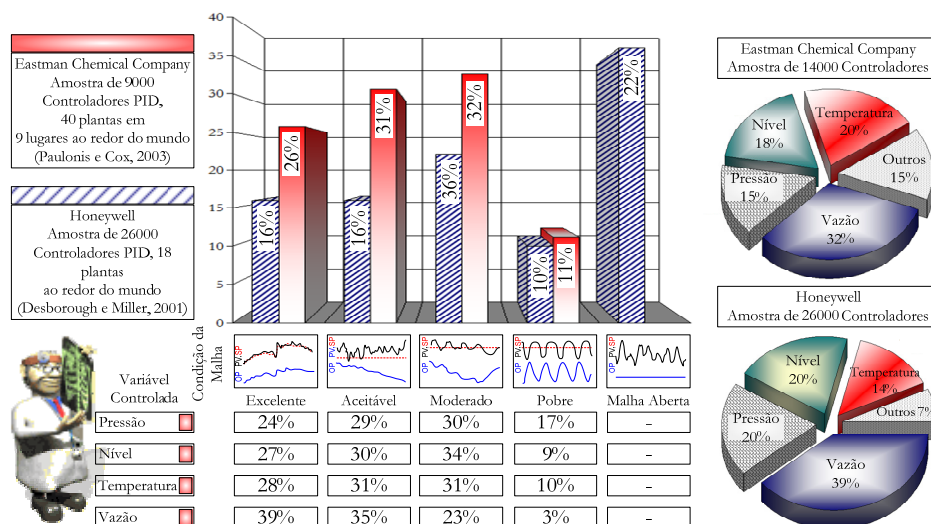


Figura 1.1: Desempenho demográfico industrial de controladores PID no mundo.

No Brasil, as maiores indústrias de processos contínuos gastam mais de 15 bilhões de reais anualmente em energia, e mais de 20 bilhões de reais em serviços industriais prestados por terceiros e na manutenção das instalações, segundo fontes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (veja a Tabela 1.1). Conseqüentemente, uma melhoria de 1% em uma ou outra eficiência de energia ou na melhoria da manutenção do controlador representará centenas de milhões de reais anuais na economia dos processos industriais.

Os negócios são medidos por meio de indicadores macroscópicos tais como preço por ações e ordem dos clientes. Estes por sua vez são afetados pelos *indicadores de desempenho chave*, (KPI): qualidade, consistência do produto, ou pela capacidade de produção, eficiência energética e as perdas de tempo por danos (Ruel, P. E. Michel, 2003). A maioria de todas as decisões de negócios em uma indústria de processos contínuos é executada mudando, por exemplo, o sinal de uma válvula de controle, quase sempre através da ação de um controlador regulatório. Assim, o controle regulatório tem um impacto profundo nos indicadores de desempenho e no valor do negócio.

Compreender o contexto operacional de um controlador particular é fundamental para o sucesso da prática do monitoramento do desempenho. Os efeitos externos influem no controlador e têm importância no direcionamento interno do seu próprio desempenho. Por exemplo: alguns subconjuntos particulares de controladores influenciam mais no desempenho global de uma planta do que outros; seu modo de execução e as mudanças dos seus

parâmetros de sintonia, como as diferenças significativas na ativação de conjuntos de restrições, funções objetivo e a qualidade dos modelos de processo influenciam significativamente. O cumprimento dos objetivos de controle servo, regulatório, de restrições e de atenuação de oscilações, também tem um impacto profundo no desempenho.

O desempenho do controlador é freqüentemente definido como a habilidade que tem o controlador para transferir uma apropriada variabilidade (capacidade de submeter-se a variações ou mudanças) entre as *variáveis controlada (cv) e manipulada (mv)*. Assim como a transferência da variabilidade é um fator importante que contribui no desempenho do controlador, existem outros fatores que devem ser considerados, tais como: a configuração adequada dos limites de alarmes, incidentes anormais e as ativações desmedidas de alarmes que resultam em perdas milionárias para a indústria petroquímica (Brown, 1999; P.A.S. Inc., 2000; Hollifield, B. e Habibi, E., 2007), as intervenções apropriadas dos operadores de planta no sistema de controle (Takada, 1998; Blevins, Mcmillan *et al.*, 2003) e as modificações na sintonia do algoritmo de controle realimentado também tem que ser consideradas.

Observando o atual cenário pode se compreender o contexto prático da problemática de monitoramento do desempenho. Neste sentido, na seqüência são apresentadas algumas restrições e considerações: **a)** O tempo real, o levantamento de dados de séries temporais de alta freqüência e a análise automática é uma tarefa difícil que consome tempo; **b)** O legado dos sistemas de controle que não foram projetados para o monitoramento do desempenho limita o acesso aos dados e ao cálculo dos mesmos; **c)** Levar os dados destes sistemas antigos, a uma plataforma de hardware mais poderosa encontra-se limitado pela largura de banda disponível; **d)** Os modelos dos processos dinâmicos não estão disponíveis para a vasta maioria dos controladores e seria extremadamente caro sua obtenção; **e)** Cada processo na indústria de processos contínuos é único em algum sentido, e algoritmos de controle *PID* são escolhidos no lugar de técnicas de controle avançadas pela sua simplicidade e suporte; **f)** Os controladores *MPC* são usualmente implementados, mais com o objetivo de otimizar as restrições ativas (otimizadores dinâmicos), do que como controladores regulatórios (Sorensen e Cuttler, 1998); **g)** Os problemas de desempenho dos *MPC* são usualmente causados pela forma que são operados, e finalmente; **h)** Os problemas de manutenção típicos nos *MPC*, são complexos, têm diversas origens e requerem uma abordagem integral de diagnóstico que freqüentemente depende do exame no processo e de outros conhecimentos implícitos.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é estudar e explorar por meio de equacionamentos matemáticos e simulações numéricas, diferentes métodos para a análise do desempenho e da robustez de processos industriais orientados a dados, na abordagem determinística e estocástica.

Os objetivos específicos da presente tese são os seguintes:

1. Realizar um abrangente estudo direcionado ao monitoramento automático de malhas de controle industriais, que contenha: i) uma revisão do estado de conhecimento e evolução das áreas de detecção, diagnóstico e avaliação do desempenho de malhas de controle; ii) um estudo do processamento da informação para o monitoramento de processos baseado em dados de operação, que inclua a aquisição, a manutenção, a avaliação da qualidade, a representação e o pré-processamento dos dados; iii) um estudo de alguns métodos usados na etapa de operação da planta (baseados em dados) como na etapa de projeto do sistema de controle (baseada em modelos) para avaliar a condição dos processos auto-regulatórios, que inclua técnicas para a identificação automática do estado estacionário, para a detecção automática de malhas oscilatórias, para a avaliação do comportamento servo e regulatório e para a avaliação do desempenho robusto, finalmente; iv) um estudo de alguns métodos para avaliar a condição dos processos não auto-regulatórios (integradores). Estes métodos deverão ser explorados nas abordagens determinísticas e estocásticas.

Condensar de forma didática e científica a informação gerada para finalmente apresentar à comunidade científica uma publicação que informe e oriente a estudantes, técnicos, engenheiros, pesquisadores e demais interessados na área.

Implementar no ambiente de cálculo numérico e linguagem de programação MatLab os algoritmos relacionados com cada um dos tópicos a serem estudados para futuramente integrá-los num sistema de suporte à decisão para o monitoramento de processos industriais.

2. Desenvolver uma ferramenta para a análise da qualidade dos dados que permita a reconstrução de dados perdidos, a identificação e a remoção de dados atípicos e a quantificação dos diferentes estados de qualidade para poder detectar facilmente problemas em sensores e atuadores.

3. Realizar um estudo direcionado à exploração das vantagens e limitações das técnicas de identificação automática de comportamentos em regime estacionário apresentadas por Cao e Rhinehart (1995) e Bebar e Reinig (2005a; b). De forma similar, realizar um estudo sob as técnicas de detecção automática de comportamentos oscilatórios baseadas no espectro de frequência e as apresentadas por Hågglund (1995), Miao e Seborg (1998), Forsman e Stattin (1999), e Thornhill (2001). Avaliar as técnicas sob um banco de sinais, oscilatórias e não-oscilatórias, com e sem a presença de ruído.
4. Realizar um estudo direcionado à análise do desempenho do controlador *PID* quando sintonizado através de técnicas de sintonia avançadas baseadas nas abordagens *IMC*, *GMV* e *GPC* e compará-lo com o desempenho obtido usando as estratégias das quais foram derivados. O estudo deve contemplar a análise baseada em indicadores tradicionais e funções custo, no comportamento servo e regulatório, como também a análise de desempenho nominal, estabilidade robusta e desempenho robusto, visando revelar as vantagens e desvantagens dos projetos e o grau de superioridade em relação aos estabelecidos métodos de sintonia de controladores *PID* tradicionais.
5. Realizar um estudo direcionado à análise do desempenho das diferentes estruturas de controle utilizadas em processos integradores industriais. Este estudo deve contemplar:
 - i) a análise comparativa entre as estratégias de controle, ressaltando as vantagens e desvantagens de cada estratégia e verificando os aspectos teórico/práticos através da simulação dos algoritmos; ii) um estudo das técnicas de sintonia apropriadas para cada um dos objetivos de controle que inclua, o cálculo das expressões analíticas tanto dos parâmetros de sintonia das leis de controle quanto das principais características relacionadas com o desempenho do processo e o desenvolvimento de uma ferramenta prática que permita o cálculo automático dos parâmetros de sintonia baseado nas características do processo e nos objetivos de controle; iii) a exploração de novas estratégias de controle avançadas que permitam em função das suas características de projeto melhorar o desempenho do sistema de controle e finalmente; iv) um estudo do desempenho das estruturas de controle baseado em padrões referências estocásticos e determinísticos, que revele as vantagens e desvantagens das técnicas e onde sejam verificados os aspectos teórico/práticos através da simulação dos algoritmos.
6. Desenvolver um novo padrão referencial prático para a avaliação do desempenho de processos integradores. Permitindo a avaliação do desempenho frente aos objetivos de controle de nível preciso e mínima variação na vazão de saída.

1.3 Contribuições

Os resultados que podem ser considerados como as principais contribuições deste trabalho são:

1. A documentação didático-científica gerada a partir do abrangente estudo realizado em relação aos diferentes métodos para o monitoramento (detecção, diagnóstico e avaliação) automático da condição do desempenho de malhas de controle, tanto para processos industriais auto-regulatórios quanto para processos não auto-regulatórios, na abordagem determinística e estocástica. Esta documentação apresenta de forma clara os *princípios básicos*, os *procedimentos para a implementação prática dos algoritmos*, as principais *vantagens e desvantagens das técnicas* e verifica os *aspectos teóricos/práticos através da simulação*. Contribuindo para informar, orientar e capacitar alunos de graduação, pós-graduação, assim como técnicos e engenheiros que necessitem destas ferramentas no exercício de suas atividades profissionais.
2. A implementação no ambiente de cálculo numérico e linguagem de programação *MatLab* de vários dos algoritmos apresentados nesta tese. A relação destes algoritmos é apresentada na seqüência por tópico e capítulo:
 - **Capítulo 3:** i) Para a análise da qualidade dos dados, foram implementadas funções que permitem calcular os fatores de compressão, quantização e um novo indicador denominado *semáforo da qualidade de dados*, contribuição que diferentemente dos gráficos de simultaneidade permite descobrir de forma clara problemas em sensores e atuadores. ii) Para a representação de dados, foi desenvolvida uma ferramenta que permite explorar as séries temporais através de gráficos de alta densidade, tendência temporal, espectro de frequência e gráficos *ACF*. iii) Para o pré-processamento digital, foram implementadas varias técnicas para a filtragem de sinais, que incluem técnicas de filtragem no domínio temporal e no domínio da frequência, além de um método que permite obter os parâmetros ótimos de ajuste dos filtros.
 - **Capítulo 4:** i) Para a identificação de estado estacionário, foram implementados o método de Cão e Rhinehart (1995) e os métodos baseados em testes estatísticos não-paramétricos de Mirko Bebar (2005); ii) Para a detecção de sinais oscilatórios, foram implementados os métodos de Hågglund (1995), Miao e Seborg (1998), Forsman e Stattin (1999), Thornhill, Huang *et al.* (2003) e o método por análise de periodogramas. iii) Para a avaliação do comportamento servo, foram

implementadas funções para o cálculo automático dos critérios tradicionais, e para o cálculo dos indicadores normalizados e não-normalizados baseados na integral dos sinais, implementaram-se também os métodos de Braga e Jota (1994) e de Swanda e Seborg (1999). iv) Para a avaliação do comportamento regulatório, foram implementados indicadores tradicionais. v) Para a avaliação do desempenho baseada em padrões referencias, foram implementados os métodos baseados no controle de variância mínima de Harris (1989), Huang (1997b), Shunta (1995) e o método baseado no *MVC* horizonte estendido de Desborough e Harris (1992). Foram implementados também alguns métodos para a estimação da variância de ruído e do atraso de transporte. vi) Para a avaliação do desempenho robusto, em nível de projeto, foram implementadas funções que permitem gerar as gráficas da condição de estabilidade robusta, desempenho nominal e robusto.

- **Capítulo 5:** Uma nova ferramenta de apoio para o estudo, simulação, projeto e avaliação de processos não auto-regulatórios foi desenvolvida. O modelo do processo consiste num separador bifásico onde podem se considerar ruído, perturbações e incertezas. Este processo pode ser controlado através de alguma das várias leis de controle (lineares, não-lineares e avançadas) disponíveis no simulador. O programa permite a análise do desempenho do sistema no domínio temporal ou espectral através de gráficos e de uma série de indicadores estatísticos. Também é possível realizar a análises de desempenho robusto em nível de projeto através da geração das gráficas do comportamento das funções de sensibilidade, diagramas de Nyquist e Bode, gráficos da condição de estabilidade robusta, da condição de desempenho nominal e de desempenho robusto.
3. O desenvolvimento de uma nova ferramenta para a reconstrução de dados perdidos, identificação e remoção de dados atípicos, contribuição que quantifica o valor dos diferentes estados das amostras das séries temporais e revela sua qualidade numa barra denominada *semáforo de qualidade de dados*.
 4. A realização de um estudo direcionado à análise do desempenho do controlador *PID* quando sintonizado através de técnicas de sintonia avançadas quando comparando com o desempenho obtido usando estratégias avançadas. No estudo foram utilizados indicadores tradicionais e análise do desempenho robusto em nível de projeto.

5. O desenvolvimento em Excel de uma ferramenta prática para a sintonia de controladores industriais usados em processos integradores. Os parâmetros de sintonia são calculados automaticamente através da informação relacionada com os objetivos de controle e com as características do processo, estes dados são inicialmente fornecidos pelo usuário num ambiente intuitivo. No cálculo dos parâmetros é considerada a presença de perturbações tipo degrau/senoidal e o atraso de transporte. A ferramenta também proporciona uma guia para determinar experimentalmente os ganhos do processo e da válvula, atraso de transporte e tempo de residência do processo integrador.
6. Extensão da análise sobre a estrutura de controle por Bandas para o controle de vasos de acúmulo, quando comparada nas estruturas de *controle por modelo interno (IMC)* e *preditor de Smith (SP)*. Foram exploradas propriedades e reveladas vantagens e desvantagens, como também foram propostas novas estruturas que tem um melhor desempenho tanto no controle de nível preciso quanto no amortecimento da vazão de saída quando o processo está submetido a perturbações.
7. Um novo padrão referencial baseado no modelo do processo foi proposto para a avaliação do desempenho de processos de vasos de acúmulo (processos integradores). A obtenção dos parâmetros necessários para o cálculo do padrão é realizada experimentalmente.

A relação de trabalhos publicados e submetidos, cursos ministrados e eventos nos quais se participou ao longo do trabalho de doutorado são os seguintes:

1. Relação de trabalhos publicados

Artigos em congressos nacionais

- Salamanca, L. L.; **Mejía, Rodrigo I. G.** e Coelho, Antonio, A. R. “Projeto e Avaliação do Desempenho Robusto de Técnicas de Sintonia de Controladores PID Usando Abordagens Avançadas”. Congresso Brasileiro de Automática - CBA, Salvador, Bahia, Brasil, 2006.
- Coelho, Antonio A. R. ; Sumar, Rodrigo R. ; **Mejía, Rodrigo I. G.** ; Rodriguez, Jaime E. N. Connecting Best Practices for the Identification Education: Teaching with the MTG Process. In: XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006, Salvador, Bahia, 2006.

Artigo em congresso internacional

- Nunes, Giovani C.; Coelho, Antonio, A. R.; **Mejía, Rodrigo I. G.** and Sumar, Rodrigo R. “Band Control: Concepts and Applications in Dampening Oscillations of Feed of Petroleum Production Units”, 16th IFAC World Congress, Prague, July 4-8, 2005.

Artigos em revista internacional

- Nunes, Giovani C.; Coelho, Antonio A. R.; Sumar, Rodrigo R.; **Mejía, Rodrigo I. G.** “A Practical Strategy for Controlling Flow Oscillations in Surge Tanks”. Latin American Applied Research, p. 195 – 200, 2007.

Capítulo de livro

- **Mejía, Rodrigo I. G.**, Coelho, Antonio A. R., Farenzena, Marcelo, Trierweiler, Jorge O. e Nunes, Giovani C., Auditoria de Malhas de Controle em Processos Industriais. Augusto Santiago Cerqueira, *et al.* (Ed.). In: Tutoriais do XVII Congresso Brasileiro de Automática CBA. Juiz de Fora, MG, Brasil: Book Editora, ISBN: 978-85-61953-00-3, Cap.7, p.160 – 217, 2008.

2. Relação de cursos ministrados e apresentações

- Mejía, Rodrigo I. G. “Palestra sobre Métodos para Análise do Desempenho e da Robustez de Processos Industriais Orientados a Dados: Abordagem Determinística e Estocástica”, Grupo Industrial Larcos, La Paz, Bolívia, 10 de janeiro de 2009.
- Mejía, Rodrigo I. G. “Curso – Evaluación del Desempeño y Auditoria de Lazos de Control de Procesos Industriales: de la teoría a la implementación práctica”, Universidad Mayor de San Andrés, do 28 ao 31 de janeiro de 2009.
- Mejía, Rodrigo I. G. e Kempf, Ariel de Oliveira, “Curso – Auditoria de Malhas de Controle Industriais: da Teoria à Implementação Prática”, IV Congresso Latinoamericano de Controle Automático e VI Congresso Venezuelano de Automação e Controle, Mérida, Venezuela, 25 a 28 de novembro de 2008.
Website: <http://eventos.saber.ula.ve/eventos/conferenceDisplay.py?confId=47>

- Mejía, Rodrigo I. G., “Mini-curso – Auditoria de Malhas de Controle em Processos Industriais”, XVII Congresso Brasileiro de Automática – CBA, Juiz de Fora, MG, Brasil, do 14 ao 17 de setembro de 2008.
Website: <http://www.cba2008jf.com.br/MiniCursos.aspx>
- Mejía, Rodrigo I. G., “Palestra sobre Métodos para Análise do Desempenho e da Robustez de Processos Industriais Orientados a Dados: Abordagem Determinística e Estocástica”, Departamento de Engenharia Química, Grupo de Intensificação, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos, Porto Alegre, RG, Brasil, 6 de novembro de 2007.

1.4 Organização do Trabalho

Este documento é organizado em cinco capítulos, seguindo uma estrutura que permite desdobrar seqüencial e sucessivamente os problemas em estudo.

No Capítulo 1 apresenta-se a motivação e relevância do estudo, aponta-se os principais objetivos, e indica-se as contribuições do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se uma abrangente revisão do estado do conhecimento na área, que inclui a evolução das linhas de pesquisa e as soluções comerciais atualmente existentes.

No Capítulo 3 apresenta-se a descrição do sistema de suporte à decisão baseado em dados para o monitoramento de processos, análise de dados, eventos e suporte de operação em processos industriais. Logo o processamento da informação baseada em dados é apresentado com certo detalhe incluindo considerações práticas e exemplos. Finalmente é apresentado um estudo de várias técnicas de filtragem no domínio temporal e da frequência, junto com indicadores para avaliar a qualidade do sinal filtrado, e um método para obter os parâmetros ótimos dos filtros.

No Capítulo 4 apresenta-se um estudo sistemático, de várias metodologias para a avaliação da condição de processos auto-regulatórios. São apresentadas técnicas para a identificação dos comportamentos estacionários e oscilatórios, avaliação do desempenho nos comportamentos servo e regulatório, na abordagem determinística e estocástica. Em cada técnica são formalizadas as bases teóricas matemáticas, tratadas as questões pertinentes para a aplicação prática, apontadas às principais concepções, vantagens e desvantagens e verificados os aspectos teórico/práticos através das simulações dos algoritmos.

No Capítulo 5 apresenta-se um estudo sistemático, direcionado à avaliação e melhora da condição dos processos não auto-regulatórios dividido em dez partes: Nas duas primeiras partes é modelado e identificado o processo. Na terceira parte são analisadas as funções de transferência fundamentais. Na quarta, quinta e sexta partes são exploradas as estratégias de controle linear tradicional, não-linear e avançadas. Na sétima parte é apresentado um estudo de algumas técnicas para avaliação do desempenho usadas em nível de projeto e na etapa de operação da planta. Na oitava é apresentado um caso de estudo. Na nona parte é apresentada uma plataforma de simulação e finalmente as conclusões são apresentadas na décima parte.

Finalmente, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido, os temas em aberto, atuais desafios e as perspectivas da continuidade de trabalhos futuros.