

# Avaliação de desempenho de malha de controle baseada em alocação de pólos utilizando variância mínima generalizada

Thiago Alberto Barbosa

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Instrumentação Eletrônica e Controle

Péricles Rezende Barros, PhD.

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Thiago Alberto Barbosa, Maio de 2011

Avaliação de desempenho de malha de controle  
baseada em alocação de pólos utilizando variância  
mínima generalizada

Thiago Alberto Barbosa

*Dissertação de Mestrado apresentada em Maio de 2011*

Péricles Rezende Barros, PhD.

Orientador

José Sérgio da Rocha Neto, DSc.

Componente da Banca

Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa, DSc.

Componente da Banca

Campina Grande, Paraíba, Brasil, Maio de 2011



B238a

Barbosa, Thiago Alberto

Avaliacao de desempenho de malha de controle baseada em alocao de polos utilizando variancia minima generalizada / Thiago Alberto Barbosa. - Campina Grande, 2011.  
65 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) -  
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de  
Engenharia Eletrica e Informatica.

1. Instrumentacao 2. Avaliacao de Desempenho 3.  
Variancia Minima - 4. Dissertacao I. Barros, Pericles  
Rezende, Dr. II. Universidade Federal de Campina Grande -  
Campina Grande (PB) III. Título

CDU 621.317.7(043)

## **Dedicatória**

A Josiane, pelo apoio incondicional mesmo quando este sonho parecia insensato!

## Agradecimentos

No momento em que se finaliza um projeto pessoal tão árduo como é a conclusão de um mestrado, os agradecimentos devidos são inúmeros.

A base familiar tem fundamental importância. É por isto pessoas como a minha esposa Josiane, minha mãe Cacilda, minha irmã Hedva e minha tia Cleida merecem destaque aqui.

A base acadêmica tem valor inestimável. O maior agradecimento aqui é para o professor Péricles Barros. Não somente pela orientação, mas principalmente por acreditar neste projeto. Os companheiros do meio acadêmico, sejam alunos ou já professores, também representam pilares importantes nesta estrutura. Henrique Barroso, Thiago Antonio, João Batista, George Acioli, Jaidilson Jó, Alfranque Amaral, Júlio Cesar de Oliveira e Fabricio Braga são alguns destes personagens.

A base financeira é sempre um ponto crítico. E é por isto que a CAPES, instituição que exerce um papel importante no fomento ao desenvolvimento científico do país, merece ser citada nesta seção. O suporte financeiro desta instituição faz o caminho da pesquisa ser mais fácil.

A COPELE, e todos que dela fazem parte, também não poderia deixar de ter espaço aqui nesta seção.

Mas o espaço aqui é pequeno e é sempre difícil citar todos aqueles que contribuíram para um projeto como este. Ficam as desculpas àqueles que não foram nominalmente citados!

## **Resumo**

Esta dissertação de mestrado é voltada para a área de avaliação de desempenho de malha de controle e busca contribuir com o desenvolvimento da mesma.

A contribuição inicial deste trabalho esta relacionada ao entendimento do comportamento de diferentes técnicas de sintonia de controladores PID. O objetivo proposto é entender melhor o comportamento destas sintonias de PID com relação ao desempenho da variância do sinal de saída (índice de Harris).

Posteriormente o trabalho se volta para a proposição de uma nova abordagem de avaliação de desempenho usando o já conhecido índice de avaliação GMV em associação com a estratégia de alocação de pólos.

## **Abstract**

This master thesis is related to the performance assessment of control loop. The main proposal is to contribute to above cited area's development.

The first contribution is focused on the behavior of PID controller tuning. The main objective is to better understand the performance of different PID's tuning in relation to output signal variance (Harris' Index).

In a second moment, this research was dedicated to develop a new approach to performance assessment of control loop. This new approach is based on the already known GMV Index, however the differential of this proposal is the use of the association between GMC control and pole placement strategy.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Definição Geral do Problema . . . . .	2
1.3	Revisão Bibliográfica . . . . .	3
1.3.1	Teoria de controle: do básico ao avançado . . . . .	3
1.3.2	Avaliação de desempenho: do caso geral ao especificado . . . . .	5
1.4	Contribuições . . . . .	8
1.5	Estrutura da Dissertação . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Teoria Básica de Sistemas de Controle</b>	<b>11</b>
2.1	Controle com Realimentação Negativa . . . . .	11
2.2	Alocação de Pólos . . . . .	13
2.3	Controladores PID . . . . .	16
2.4	Metodologias de Avaliação de Malha . . . . .	19
2.5	Controle de Variância Mínima . . . . .	20
2.6	Controle de Variância Mínima Generalizado . . . . .	24
2.7	Conclusões . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Métodos de Avaliação de Malha</b>	<b>28</b>
3.1	Índice de Avaliação de Desempenho Baseado em Variância Mínima . . . . .	28
3.2	Índice de Avaliação de Desempenho Baseado em GMV . . . . .	31
3.3	Aspectos Práticos da Implementação . . . . .	32
3.3.1	Tamanho do Conjunto de Dados . . . . .	32

3.3.2	Tamanho do Modelo de Autoregressão . . . . .	33
3.3.3	Atraso do Processo . . . . .	33
3.3.4	Escolha das Funções de Custo (Caso GMV) . . . . .	33
3.4	Descrição da Implementação Utilizada . . . . .	34
3.4.1	Detalhamento da Implementação . . . . .	34
3.4.2	Processo de Validação . . . . .	35
3.5	Conclusões . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Comparativo de Controladores PID</b>	<b>38</b>
4.1	Descrição do Comparativo . . . . .	38
4.2	Simulação . . . . .	39
4.3	Resultados Obtidos . . . . .	42
4.4	Conclusões . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Avaliação de malha usando GMVC e alocação de pólos</b>	<b>44</b>
5.1	Controle de Variância Mínima Generalizado com Alocação de Pólos . . . . .	44
5.2	Descrição da Nova Abordagem de Avaliação de Malha . . . . .	46
5.3	Simulação . . . . .	48
5.4	Resultados Obtidos . . . . .	51
5.5	Conclusões . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>60</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>62</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Método de sintonia de Ziegler e Nichols . . . . .	18
2.2	Método de sintonia CHR (regulatório sem sobrevalor) . . . . .	19
2.3	Método de sintonia IMC . . . . .	19
4.1	Função de transferência dos sistemas utilizados e aproximação de primeira ordem utilizando a regra de <i>half rule</i> . . . . .	40
4.2	Parâmetros de sintonia utilizados . . . . .	40

# Lista de Figuras

2.1	Representação em diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação negativa . . . . .	12
2.2	Representação em diagrama de blocos do teste de identificação do sistema (Resposta ao Degrau) . . . . .	13
2.3	Curva de resposta ao degrau . . . . .	14
2.4	Curva de resposta ao degrau comparando dinâmicas diferentes . . . . .	14
2.5	Critério de desempenho com decaimento igual a 1/4 . . . . .	18
2.6	Representação em diagrama de blocos da estrutura de um sistema de controle genérico discretizado . . . . .	21
2.7	Estrutura de um sistema de controle genérico usando GMV . . . . .	25
3.1	Simulação de processo em malha fechada sob controle de variância mínima . . . . .	36
4.1	Representação em diagrama de blocos da simulação em malha fechada de processos com diferentes PID's . . . . .	41
4.2	Gráfico comparativo de desempenho de técnicas de sintonia - PI . . . . .	43
5.1	Representação em diagrama de blocos da simulação em malha fechada de processos com diferentes PID - Índice GMV . . . . .	50
5.2	Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P1 . . . . .	52
5.3	Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P2 . . . . .	53
5.4	Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P3 . . . . .	54
5.5	Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P4 . . . . .	55
5.6	Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P5 . . . . .	56
5.7	Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P6 . . . . .	57

5.8	Gráfico comparativo de desempenho de técnicas de sintonia . . . . .	58
-----	---	----

# Capítulo 1

## Introdução

A proposta do capítulo introdutório desta dissertação é familiarizar o leitor com conceitos e objetivos básicos deste trabalho. Alguns itens importantes são apresentados neste capítulo, como a motivação para este estudo, uma breve revisão bibliográfica sobre o tema, a definição do problema que se pretende abordar e uma breve descrição da estrutura do texto da dissertação.

### 1.1 Motivação

O processo de mudança pelo qual a estrutura econômica mundial vêm passando exige cada dia mais das empresas do setor industrial. A abertura existente hoje no comércio internacional gerou um cenário extremamente competitivo na indústria. Estes novos níveis de exigência afetam até mesmo pequenas empresas localizadas no interior do país que atualmente sofrem com a concorrência de companhias instaladas do outro lado do globo.

Diante deste cenário competitivo é preciso produzir com qualidade e a baixo custo. Por uma questão de sobrevivência, a busca por oportunidades de melhorar o processo produtivo de uma planta industrial se tornou uma constante.

Na indústria, o processo de criar oportunidades de melhoria passa pela questão de conhecer bem a planta industrial e seus diversos processos. Os gestores necessitam de informação. É preciso saber quais processos têm problemas e se há potencial para ajus-

tar estes processos. É fundamental poder direcionar melhor os recursos, quase sempre escassos, de tempo e pessoal das plantas produtivas.

O setor industrial tem passado por um processo contínuo de modernização. Cada vez mais os processos são controlados automaticamente. Com isto, vários setores produtivos importantes, como o Petroquímico, apresentam atualmente uma quantidade significativa de malhas de controle automático.

Não é difícil perceber que o desempenho destas malhas de controle tem impacto direto em questões fundamentais como a qualidade e custo dos produtos. Levantamentos realizados em diversos setores industriais (1) mostram que existem grandes oportunidades de otimização de malhas de controle.

Há alguns anos uma questão importante começou a ser pensada: como obter informações a respeito do desempenho das malhas de controle de maneira simples e sistemática. É daí que surge a área de avaliação de desempenho de malhas de controle. Esta área teve origem através de um trabalho escrito por Thomas Harris (2). Depois deste artigo de Harris, vários outros trabalhos têm sido publicados nesta área. Além da produção de trabalhos científicos que abordam avaliação de malha, no final da década de 90 começaram a surgir ferramentas (*softwares*) dedicadas a realizar avaliação de malhas (3). Apesar disto, apenas recentemente a Indústria tem despertado para a utilidade prática de se utilizar uma ferramenta estruturada para realizar a avaliação das malhas de controles de uma planta (4).

A área de avaliação de malha tem estado cada vez mais em evidência e diversos autores enxergam grande potencial neste segmento. Conhecer melhor a teoria de avaliação de malha de controle, bem como sugerir novas abordagens de utilização desta teoria, são questões importantes para a teoria geral de controle. Estes são justamente os fatores que motivam a produção deste trabalho.

## 1.2 Definição Geral do Problema

Ciente da importância de se manter um processo sistemático de avaliação de desempenho de malhas de controle, resta saber qual a melhor maneira de fazê-lo.

Os principais métodos de avaliação de malhas se baseiam em um processo compara-

tivo. Em geral, o objeto de comparação é o nível de variância do sinal de saída. A idéia é comparar como está a variância atual do processo em relação ao melhor nível possível de variância que se poderia obter com uma estratégia de controle ótimo. O resultado desta comparação é expresso em termos de um índice que facilita a tomada de decisão.

A proposição inicial desta dissertação é contribuir com o desenvolvimento da área de avaliação de malha. A pretensão do estudo realizado é estudar as técnicas de avaliação existentes e a partir daí sugerir novas maneiras de se enxergar e de se utilizar o potencial que a área de avaliação de desempenho possui.

## **1.3 Revisão Bibliográfica**

As principais técnicas de avaliação de desempenho de malha de controle estão fundamentadas na teoria de controle moderno, mais especificamente, nas teorias de controle ótimo e controle adaptativo. O propósito desta seção é apresentar uma breve revisão dos vários conceitos desenvolvidos ao longo dos anos que tornaram possível o estabelecimento da área de avaliação de malha. Vários conceitos citados de maneira sucinta nesta seção serão devidamente detalhados em capítulos posteriores desta dissertação.

### **1.3.1 Teoria de controle: do básico ao avançado**

O primeiro desenvolvimento significativo na área de controle dinâmico é datado do século XVIII. O regulador automático de velocidade inventado por James Watt foi construído na época para aplicação no controle de velocidade de máquinas a vapor. O regulador de Watt representa um importante marco no desenvolvimento do ramo de controle automático (5).

Após o trabalho de Watt surgiram outros trabalhos que também são considerados relevantes no primeiro estágio de desenvolvimento da teoria de controle. Nomes como o de J. C. Maxwell, H. Nyquist e H. W. Bode figuram como personagens importantes neste primeiro momento do desenvolvimento (5).

A teoria clássica de controle tem sua essência ligada a trabalhos estabelecidos nesta fase inicial do desenvolvimento. É neste ponto, ainda na primeira metade do século XX, que se propõe os métodos de projeto de controle baseados em análise da resposta em

frequência e do lugar das raízes (6). É também nesta época que a estrutura mais popular de um controlador, que é o controlador PID (proporcional/integral/derivativo), surge na forma que se conhece atualmente (7).

A partir daí os sistemas a serem controlados se tornam cada vez mais complexos. Os métodos da teoria clássica já não são mais suficientes para lidar com esta crescente complexidade. A teoria de controle moderno aparece para suprir esta necessidade de ferramentas de projeto mais poderosas. Uma alternativa para isto foi o emprego da teoria de variáveis de estado com análise e síntese no domínio do tempo (6).

A partir deste ponto do desenvolvimento, os estudos de novas estratégias de controle passam a buscar objetivos mais avançados. Neste período que compreende as décadas de 60 a 80 os estudos se voltam para o desenvolvimento de técnicas de controle avançado como controle ótimo, controle adaptativo e de aprendizagem (6).

É nesta época que aparece o primeiro desenvolvimento relevante que está diretamente ligado à área de avaliação desempenho. Em 1970 Karl Åström estabelece uma estratégia de controle cujo propósito é minimizar a variância da saída do processo. Esta nova estratégia de controle denominada controle de variância mínima (*minimum variance control*, ou MVC) é uma estratégia de controle ótimo já que o seu objetivo de controle é baseado na minimização de uma variável (8).

O conceito de controlador auto-sintonizado é apresentado por K. Åström e B. Wittenmark em 1973. A lei de controle proposta neste caso utiliza uma malha de controle externa para modificar o controlador de acordo com a situação atual do processo. Para tanto, uma etapa de identificação do sistema é necessária a cada ciclo do controle. Após a identificação, o controlador é recalculado de acordo com o novo cenário. O controlador base utilizado é o de variância mínima. O conceito de auto-sintonia é considerado na verdade a principal técnica de controle adaptativo (9).

Uma evolução do conceito inicial de controle auto-sintonizado é proposta em 1975 por D.W. Clarke e P. J. Gawthrop. Desta vez a proposição se baseia em uma estratégia sub-ótima. Ao invés de buscar a minimização absoluta da variância do sinal de saída, esta estratégia de controle sugere a minimização de uma função auxiliar que possibilita, entre outras coisas, ponderar o esforço demandado pela ação de controle. Esta lei de controle ficou conhecida como controle de variância mínima generalizada (*generalized*

*minimum variance control*, ou GMVC) (10).

Em 1979, P. Wellstead, D. Prager e P. Zanker apresentam uma variante do controle auto-sintonizado. Nesta nova abordagem um regulador auto-sintonizado utiliza o método clássico de alocação de pólos para a definição dos requisitos de desempenho do sistema. Esta estratégia também é considerada sub-ótima, porém apresenta algumas vantagens em relação à proposição inicial de auto-sintonia. A utilização do método de alocação de pólos deixa o controle mais robusto, e possibilita inclusive sua aplicação para sistema de fase não-mínima, situação que deve ser evitada no caso original (11).

O trabalho realizado por A. Y. Allidina e F. M. Hughes pode ser considerado uma extensão do regulador auto-sintonizado com alocação de pólos proposto no ano anterior. Desta vez, a estratégia de controle apresentada não se aplica somente ao problema regulatório, esta estratégia aborda também o problema servo (12).

Neste estágio do desenvolvimento, boa parte da teoria base necessária para o surgimento da área de avaliação de malha já havia sido estabelecida. De toda forma, alguns trabalhos relevantes continuam a aparecer, realizando releituras e adaptações das teorias já desenvolvidas. Este é o caso, por exemplo, da publicação de M. Grimble com uma releitura do controle GMV (13), ou mesmo da publicação de J. Y. Fan e T. H. Ortmeier sobre projeto ótimo de controladores GMV (14).

### **1.3.2 Avaliação de desempenho: do caso geral ao especificado**

Por volta do final da década de 1980, a teoria de controle já estava bastante desenvolvida o que possibilitou o aparecimento da importante publicação de Tomas Harris sobre avaliação de desempenho de malhas de controle. O trabalho de Harris chama a atenção para a importância de se avaliar o desempenho de um sistema de controle (2). A idéia apresentada por Harris consiste em comparar o desempenho atual do sistema com uma referência (*benchmark*). O artigo demonstra que é possível estimar o desempenho do sistema como se o mesmo estivesse utilizando o controle de variância mínima. É justamente este desempenho de referência que se utiliza como base de comparação do desempenho atual do sistema. O conceito estabelecido por Harris neste artigo tornou-se referência na área e passou a ser amplamente utilizado para os desenvolvimentos posteriores na área de avaliação de malha (2).

Alguns anos depois da sua publicação inicial, T. Harris trabalha junto com L. Desborough para introduzir outro conceito importante. Desta vez a idéia proposta é de caracterizar o desempenho de uma malha através de um índice. Este índice que provê uma medida de quão próximo o desempenho da malha se aproxima do controle de variância mínima, ficou conhecido com índice de Harris (15).

A partir deste momento, as áreas de interesse que esta dissertação aborda passam a se desenvolver de forma paralela. Porém, de maneira natural, os conceitos desenvolvidos em paralelos muitas vezes são utilizados de forma conjunta para produzir novas estratégias de avaliação.

A área de avaliação de malha segue se desenvolvendo e outros trabalhos surgem para abordar situações não cobertas pela teoria inicial. É o caso da publicação de P. Eriksson e A. Isaksson em 1994 que propõe algumas modificações no critério de avaliação para à aplicação no problema servo (16). Outro exemplo da evolução do índice de Harris é o trabalho de B. Huang, S. Shah e E. Kwok de 1997. Neste trabalho, o conceito de avaliação de malha é estendido para os sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (*multiple input multiple output*, ou MIMO). Ainda neste trabalho uma importante abordagem computacional para aplicação na estimação do índice também foi apresentada. Este abordagem foi chamada de filtragem e correlação (*filtering and correlation*, ou FCOR) (17).

No ano de 1998, Thornhill resume em um artigo um conjunto de sugestões para a definição dos parâmetros utilizados no algoritmo de estimação do índice de avaliação de malhas em uma refinaria. Artigos como este de Thornhill passam a se preocupar com os aspectos práticos da implementação das técnicas de avaliação (18).

Em 1999 uma publicação de T. Yamamoto, A. Inoue e S. Shah revisita o controle de variância mínima generalizada com alocação de pólos para propor uma versão bastante interessante deste controle com uma estrutura de um controlador PID (19).

Ainda em 1999, B. Huang e S. Shah publicam um livro totalmente dedicado a teoria de avaliação de malha de controle. Esta publicação reúne tanto as técnicas mais básicas já existentes, como casos diferenciados com os sistemas multivariáveis ou de fase não mínima. Além de reunir conceitos já conhecidos, novos conceitos importantes também são introduzidos. Este é o caso da avaliação de desempenho em que se demanda mais

conhecimento prévio da planta durante o processo de avaliação (*user-specified benchmark*). Avaliação de desempenho baseada no controle linear gaussiano quadrático (*linear quadratic gaussian*, ou LQG) é um exemplo deste tipo de técnica (20).

Mais recentemente, já em 2002, M. Grimble desenvolve um trabalho que evoluiu a avaliação de malha para utilizar o controle de variância mínima generalizada. Esta proposição de Grimble é bastante relevante porque usa a estratégia de flexibilizar a referência de comparação. Nas estratégias anteriores, a referência de desempenho era sempre o controle de variância mínima. A proposição de Grimble torna a tarefa de avaliar uma tarefa mais flexível já que o sistema que serve de comparativo depende da definição das funções de custo presentes no controle GMV (13).

Outras linhas de estudo também tomam forma neste período. Um exemplo disto é o conceito de avaliação de desempenho utilizando uma ferramenta gráfica, mais especificamente uma curva de custo x benefício (*tradeoff*), proposto por B. Huang em 2003. Neste tipo de avaliação o desempenho do controlador é relacionado a um ponto da curva e a localização deste ponto na curva indica como está o desempenho da malha (21).

Uma extensão do trabalho de M. Grimble a respeito da avaliação de desempenho utilizando controle GMV foi publicada em 2004 pelo próprio Grimble em parceria com P. Majecki. Desta vez o desenvolvimento em questão se aplica ao caso multivariável (22).

Apesar da teoria de avaliação de malha ter surgido há vários anos, somente na última década o setor industrial despertou para os benefícios que uma atividade de auditoria de desempenho de malha pode trazer na produtividade de uma planta. Como reflexo deste interesse que surgiu, algumas ferramentas práticas de avaliação começaram aparecer no Brasil. Alguns trabalhos técnicos em congressos no país são publicados com o intuito de apresentar as funcionalidades destas ferramentas, como por exemplo (3) e (23). Além dos trabalhos que apresentam as funcionalidades das ferramentas, outros trabalhos surgem apresentando estudos de caso da aplicação destas ferramentas, como em (1).

Na segunda metade da década passada a teoria de avaliação de malha já vinha amadurecendo há algum tempo e diferentes utilizações interessantes continuam a surgir. Este é o caso do trabalho de Y. Ohnishi, K. Takao, T. Yamamoto e S. Shah em 2007 que

reporta uma utilização diferente da filosofia de avaliação. A idéia presente neste estudo foi de utilizar o conceito de índice de avaliação para guiar a sintonia de um controlador do tipo auto-sintonizado (24).

Ainda em 2007, A. Ordys, D. Uduedi e M. Johnson reúnem em um novo livro sobre avaliação de desempenho um grande volume de informação importante para a área. Mais uma vez as técnicas básicas são lembradas, porém esta publicação se preocupa também em descrever uma contextualização das aplicações, mostrando inclusive a relação do conceito de avaliação de malha com características econômicas de uma planta. Além disto, um estudo de caso detalhado também é apresentado (25).

As diferentes utilizações do conceito de avaliação seguiram aparecendo. T. Yamamoto propõe em 2009 a utilização de uma métrica de desempenho de malha para melhorar a eficiência de um controlador auto-sintonizado. Desta vez a publicação foi feita em parceria com K. Kawada, H. Kugemoto e Y. Kutsuwa. A idéia atende a filosofia de adaptação por demanda (*adapt on demand*). O controlador passa a ser resintonizado apenas nas situações onde o desempenho da malha é identificado com abaixo do esperado. O referido trabalho utiliza o índice de Harris para avaliar o desempenho do sistema e utiliza um tipo de controlador GMV para controlar o sistema (26).

Um dos trabalhos mais recente na área de avaliação é o desenvolvimento de Z. Yu, S. Hongye, C. Jian e G. Yong em 2010. A teoria de avaliação de desempenho baseado no conceito GMV para sistemas multivariáveis é mais uma vez abordada. Desta vez, o algoritmo utilizado não foi mais o FCOR como no caso anterior. O algoritmo proposto se baseia em uma extensão direta do conceito de avaliação GVM para sistema com uma variável para o caso de sistemas com múltiplas variáveis (27).

## 1.4 Contribuições

Os estudos desenvolvidos neste trabalho de Mestrado resultam em duas contribuições relevantes para a área de avaliação de desempenho de malhas de controle.

A primeira destas contribuições é um estudo comparativo do comportamento de algumas técnicas de sintonia de controladores PID com relação ao desempenho da malha. Este comparativo ajuda a entender como determinadas técnicas de sintonia influenciam

a variância do sinal de saída de um processo.

O segundo resultado deste trabalho é bastante relevante já que trata da proposição de uma nova abordagem para a realização de avaliação de malha. Um novo algoritmo é proposto para avaliação de malhas com base no controle GMV e na técnica de alocação de pólos. Esta nova estratégia de avaliação possibilita ao usuário especificar a referência para o comparativo de desempenho de maneira mais intuitiva já que utiliza o conceito de alocação de pólos.

## 1.5 Estrutura da Dissertação

O conteúdo desta dissertação está distribuído em seis capítulos.

O primeiro dos seis capítulos deste texto é destinado a introduzir a presente dissertação. Além de uma seção destinada a expor a motivação para estudar o tema deste trabalho, existem mais três seções. Outras duas seções apresentam uma revisão bibliográfica sobre os temas estudados e a problemática em discussão. Por fim, a presente seção se destina a detalhar da estrutura deste texto.

A fundamentação teórica básica desta dissertação é apresentada no capítulo 2. Este capítulo aborda temas importantes da teoria de controle que servem de base para o desenvolvimento dos capítulos subseqüentes.

O capítulo 3 é uma complementação da fundamentação teórica básica vista no capítulo anterior. Desta vez, temas mais específicos ligados a este trabalho são abordados. Neste capítulo as técnicas de avaliação de desempenho de malha consideradas nesta dissertação são revistas em detalhes. Além desta complementação, este capítulo também tem a função de descrever a forma como os algoritmos estudados foram implementados e validados.

A parte experimental e os resultados obtidos neste trabalho começam a ser apresentados no capítulo 4. Neste capítulo o processo de comparação do desempenho dos controladores PID é detalhado. Ao final do capítulo os resultados são apresentados.

Ao capítulo 5 fica reservada a função de apresentar a nova abordagem de avaliação de desempenho desenvolvida durante este trabalho de Mestrado. Neste capítulo o novo algoritmo é proposto e as simulações que demonstram sua utilidade são apresentadas.

Por fim, a conclusão deste trabalho fica reservada ao sexto e último capítulo.

# Capítulo 2

## Teoria Básica de Sistemas de Controle

Este capítulo de fundamentação teórica é proposto com o objetivo de apresentar ao leitor conceitos básicos da teoria de sistemas de controle que são utilizados ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Este capítulo não tem a pretensão de cobrir por completo a teoria dos temas abordados. O verdadeiro objetivo é ressaltar conceitos já bem difundidos na literatura com o intuito de contextualizar o trabalho que está sendo desenvolvido aqui.

### 2.1 Controle com Realimentação Negativa

A importância dos sistemas de controle automático no ambiente industrial já foi ressaltada no capítulo introdutório deste trabalho. Esta seção se destina a apresentar uma breve revisão dos conceitos básicos da teoria de controle. Para este fim, algumas referências importantes foram utilizadas, como Ogata (6), Campos et al (28) e Wellstead et al (29). Os conceitos descritos a seguir servirão como base para compreender os desenvolvimentos posteriores.

A principal função de um sistema de controle é manter certas variáveis de uma planta industrial dentro de seus limites operacionais desejáveis. A maneira convencional de alcançar este objetivo é utilizar controle com realimentação negativa, que pode ser representado pelo diagrama de blocos mostrado na Figura 2.1.

O projeto de um sistema de controle passa por duas etapas fundamentais. Conhecer

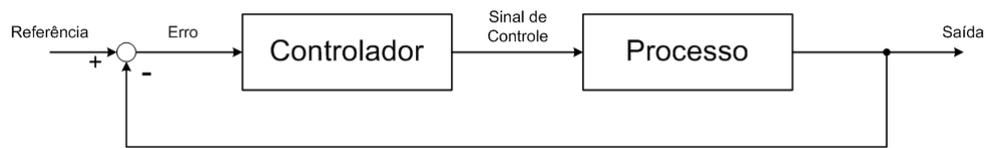


Figura 2.1: Representação em diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação negativa

o processo é a primeira delas. Já a segunda, consiste no ajuste do controlador de acordo com o desempenho desejado.

Conhecer o processo significa entender como o processo se comporta dinamicamente, estabelecendo um modelo para o mesmo. Este modelo, que servirá para guiar o ajuste do controlador, pode ser obtido de duas maneiras distintas. É possível modelar o sistema partindo das equações básicas das leis físico-químicas, ou é possível identificar o sistema através do levantamento de dados experimentais, seguido de um procedimento de ajuste. A obtenção do modelo através das equações básicas fornece informações detalhadas sobre o processo, mas não é uma tarefa simples e em geral não justifica o esforço demandado. Desta maneira, é mais comum utilizar um processo de identificação para obter o modelo do processo, apesar deste resultado ter validade limitada pela faixa de operação em que foi estimado.

Boa parte dos processos industriais pode ser representada através de um modelo que é chamado de modelo de primeira ordem com atraso de transporte (FOPTD - *First Order Plus Time Delay*). Esta representação dinâmica de uma planta, apesar de simplificada, é satisfatória quando o objetivo é definir os ajustes do controle de um processo. Neste caso, os três parâmetros responsáveis por caracterizar o sistema são o ganho ( $K$ ), a constante de tempo ( $\tau$ ) e atraso ( $\theta$ ) do processo. A função de transferência que representa este tipo de modelo, no domínio de Laplace, é dada pela Equação 2.1

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \cdot e^{-\theta s}. \quad (2.1)$$

A determinação desta função de transferência do modelo pode ser feita a partir de um procedimento de identificação chamado de teste da Resposta ao Degrau. A primeira etapa deste procedimento consiste em excitar o processo através da aplicação de um

degrau no sinal de entrada, conforme representação da Figura 2.2. A resposta obtida na saída é utilizada para a determinação dos parâmetros do modelo FOPTD. O ganho é estabelecido pela relação entre a variação da magnitude do sinal de saída pelo sinal de entrada. A constante de tempo é encontrada observando o instante de tempo em que o sinal de saída atinge 63,2% do seu valor em regime permanente, descontando o valor do atraso. O atraso, por sua vez, é definido pelo instante em que o sinal de saída começa a responder a excitação a que foi submetido.

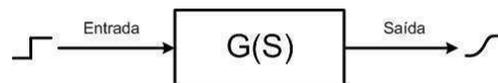


Figura 2.2: Representação em diagrama de blocos do teste de identificação do sistema (Resposta ao Degrau)

No momento em que se conhece um modelo que representa a dinâmica do processo, o projeto do sistema de controle passa a ser voltado para a questão de como sintonizar o controlador com o objetivo de levar o sistema a operar dentro dos limites de desempenho desejáveis. O controlador desempenha papel fundamental nesta sistemática, já que é o responsável por manipular a sua saída buscando levar o sinal de saída em direção a referência.

O projeto de um sistema de controle pode ser feito baseando-se em requisitos de desempenho da resposta ao degrau deste sistema (resposta transitória). Características como o tempo de subida ( $T_r$ ), tempo de acomodação ( $T_s$ ) e máxima ultrapassagem ou *overshoot* ( $M_p$ ), que são mostrados na Figura 2.3, são utilizados para atrelar o desempenho do sistema ao desempenho desejado.

## 2.2 Alocação de Pólos

A posição dos pólos de um sistema é um fator importante para o projeto de um sistema de controle. Os pólos do sistema tem forte influencia tanto na estabilidade como também na natureza da resposta transitória do sistema. A relação entre a posição dos pólos e a resposta transitória é frequentemente utilizada na síntese de um sistema de controle.

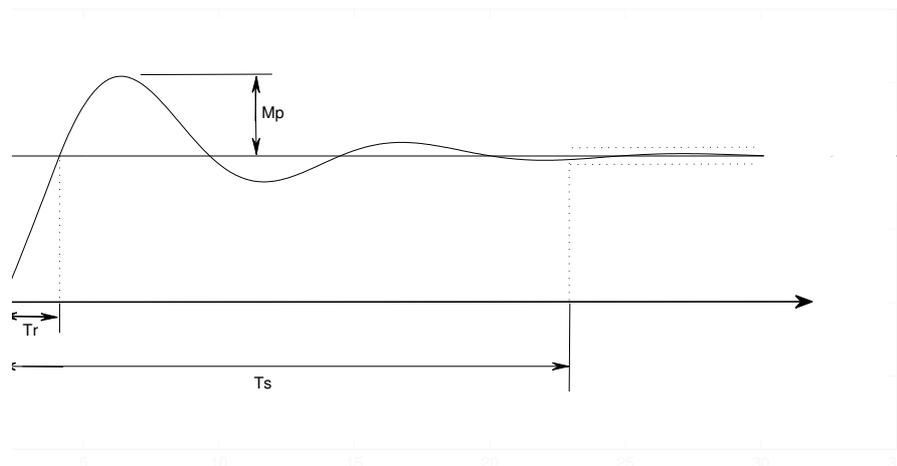


Figura 2.3: Curva de resposta ao degrau

A dinâmica de um sistema pode ser alterada manipulando a constante de tempo deste sistema, conforme mostrado no exemplo da Figura 2.4. Neste exemplo, a dinâmica original do sistema, definida pela constante  $\tau_{MA}$ , se torna mais rápida quando a dinâmica é modificada pelo controlador em malha fechada (constante  $\tau_{MF}$ ).

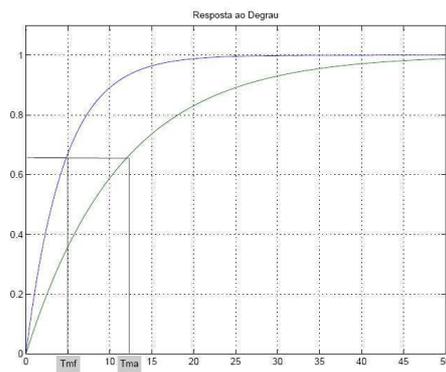


Figura 2.4: Curva de resposta ao degrau comparando dinâmicas diferentes

No processo de especificação de um sistema é comum que o requisito de desempenho seja estabelecido através da constante de tempo de malha fechada. Desta forma é importante saber qual é a relação entre posição dos pólos e resposta transitória.

Para demonstrar a relação existente entre estas duas situações, é necessário primeiro

definir o modelo discretizado deste sistema. Um sistema de primeira ordem (FOPTD), representado pela Equação 2.1, é tomado como base e o seu modelo discretizado pode ser representado conforme a Equação 2.2

$$y(t) = z^{-k} \cdot \frac{b}{1 - az^{-1}} \cdot u(t) \quad (2.2)$$

onde a relação dos modelos contínuo e discreto é dada por:  $a = e^{-\frac{\tau_s}{T}}$  e  $b = (1 - a) \cdot K$ , e  $\tau_s$  representa a taxa de amostragem.

Esta relação se aplica para os casos em que o atraso do sistema é um múltiplo inteiro da taxa de amostragem, mas este caso em particular já é suficiente para demonstrar a relação contínuo x discreto que se deseja obter.

Considerando um sistema de realimentação negativa como o que aparece na Figura 2.1, o sinal de controle  $u(t)$  é expressado conforme a Equação 2.3

$$u(t) = c \cdot [r(t) - y(t)] \quad (2.3)$$

onde  $r(t)$  representa o sinal de referência,  $y(t)$  o sinal de saída do processo e  $c$  o controlador.

Combinado o controlador da Equação 2.3 com o modelo da Equação 2.2 obtém-se resposta em malha fechada do sistema que é expressada através da Equação 2.4

$$y(t) = z^{-k} \cdot \frac{cb}{1 - (a - cb)z^{-1}} \cdot r(t). \quad (2.4)$$

Observe que a resposta em malha fechada é determinada pelo termo  $(a - cb)$  ao invés de  $a$ . Em outras palavras, o pólo que reside em  $z = a$ , passa a se posicionar em  $z = a - cb$  na malha fechada. Supondo que o requisito de desempenho do sistema seja ter um pólo em  $z = t_1$ , o ganho do controlador é determinado por  $t_1 = a - cb$ .

Neste ponto já é possível observar a relação entre o ganho do controlador com o pólo do sistema em malha fechada. Por fim, pode-se estabelecer a relação entre esta constante de tempo de malha fechada que se deseja com o pólo do modelo discretizado através da Equação 2.5

$$t_1 = e^{-\frac{\tau_s}{\beta}} \quad (2.5)$$

em que  $\beta$  representa a constante de tempo em malha fechada e  $t_1$  representa o pólo do modelo discreto que leva o sistema a resposta especificada.

Desta forma, no caso de um sistema de primeira ordem, o zero do polinômio  $T(z^{-1})$  mostrado na Equação 2.6 a seguir representa a alocação de pólo desejada

$$T(z^{-1}) = 1 - t_1 z^{-1}. \quad (2.6)$$

Para o caso de um sistema de segunda ordem pode-se mostrar que os zeros do polinômio de segunda ordem apresentado na Equação 2.7 definem os pólos desejados para este tipo de sistema

$$T(z^{-1}) = 1 + t_1 z^{-1} + t_2 z^{-2} \quad (2.7)$$

onde  $t_1$  e  $t_2$  são dados pela Equações 2.8 e 2.9 a seguir

$$t_1 = -2e^{-\xi w_n \tau_s} \cos(\tau_s w_n (1 - \xi)^{1/2}) \quad (2.8)$$

$$t_2 = e^{-2\xi w_n \tau_s} \quad (2.9)$$

em que  $\xi$  e  $w_n$  são respectivamente o coeficiente de amortecimento e a frequência natural da resposta transitória do sistema de segunda ordem desejado. É importante ressaltar que  $\xi$  e  $w_n$  tem relação direta com a curva de resposta ao degrau e seus parâmetros (Tr, Ts e Mp) citados na seção anterior.

## 2.3 Controladores PID

Dentre as diversas estratégias de controle existentes, a que usa o controlador PID (Proporcional/Integral/Derivativo) é certamente a mais popular. Esta popularidade do controlador PID é proveniente de certas vantagens que o mesmo apresenta. Estas vantagens vão desde apresentar um bom desempenho em uma gama variada de processos, passando pela facilidade de possuir uma estrutura versátil com poucos parâmetros a serem ajustados (sintonizados), até a questão da fácil associação entre os parâmetros de sinto-

nia e o seu desempenho.

A estrutura do controlador PID que será utilizada como referência neste texto é chamada de PID Clássico Paralelo, que é apresentado na Equação 2.10

$$C(S) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \quad (2.10)$$

onde os termos proporcional, integral e derivativo estão associados respectivamente às constantes  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ .

O controlador PID possui apenas três parâmetros, mas a tarefa de sintonizar estes parâmetros não é uma tarefa tão elementar, especialmente se não existe um procedimento sistemático para tanto (30). Esta seção aborda justamente a questão de sintonia de controladores PID. Ao longo das últimas décadas, vários trabalhos foram publicados propondo ou analisando uma grande variedade de técnicas de sintonia para controladores PID. Algumas publicações importantes são usadas como referência para o presente texto ((28), (30), (7) e (31)).

As diferentes técnicas de sintonia para controladores PID diferem primariamente na questão do critério de desempenho que cada uma delas utiliza como referência. Neste trabalho serão abordadas três técnicas de sintonia distintas. Estas técnicas são conhecidas como: método de Ziegler e Nichols, método CHR (Chien, Hrones e Reswick) e método IMC (*Internal Model Control*).

**Método de Ziegler e Nichols:** os primeiros autores que propuseram uma metodologia simples e objetiva para o processo de sintonia foram Ziegler e Nichols em seus artigos de 1942 e 1943 (28). O critério de desempenho utilizado por estes autores foi o da razão de declínio igual a 1/4 (relação entre as amplitudes de primeiro e segundo pico de ultrapassagem da resposta ao degrau igual a 1/4), conforme mostrado na Figura 2.5. Este método foi um dos grandes responsáveis pela disseminação do algoritmo PID na indústria.

Os resultados apresentados na Tabela 2.1 são provenientes do desenvolvimento de Ziegler e Nichols. A partir desta tabela é possível calcular os parâmetros de três possíveis configurações de controlador PID (P, PI e PID) (28).

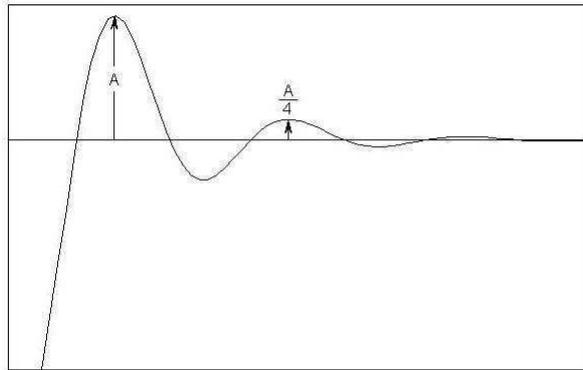


Figura 2.5: Critério de desempenho com decaimento igual a 1/4

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{(K \times \theta)}$	-	-
PI	$\frac{(0,9 \times \tau)}{(K \times \theta)}$	$0,33 \times \theta$	-
PID	$\frac{(1,2 \times \tau)}{(K \times \theta)}$	$2 \times \theta$	$0,5 \times \theta$

Tabela 2.1: Método de sintonia de Ziegler e Nichols

**Método CHR (Chien, Hrones e Reswick):** Já em 1952, outros três autores, Chien, Hrones e Reswick, apresentaram uma nova estratégia de sintonia. Desta vez, o critério de desempenho selecionado tinha duas versões. Os objetivos eram obter a resposta mais rápida possível sem sobrevalor e obter a resposta mais rápida possível com sobrevalor de 20%. Segundo Campos e Teixeira (28), para a maioria dos processos industriais práticos não é necessário uma resposta muito rápida e oscilatória, portanto o método CHR sem sobrevalor representa o melhor critério de desempenho para grande parte das malhas de controle. Nesta caso, a Tabela 2.2 desempenha o papel de referência para o cálculo dos parâmetros do controlador PID.

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{(0,3 \times \tau)}{(K \times \theta)}$	-	-
PI	$\frac{(0,6 \times \tau)}{(K \times \theta)}$	$4 \times \theta$	-
PID	$\frac{(0,95 \times \tau)}{(K \times \theta)}$	$2,375 \times \theta$	$0,421 \times \theta$

Tabela 2.2: Método de sintonia CHR (regulatório sem sobrevalor)

**Método IMC (Internal Model Control):** Rivera, Morari e Skogestad propuseram o método IMC em 1986. A idéia desta vez foi que um parâmetro denominado  $\lambda$ , que representa o comportamento em malha fechada segundo a Equação 2.11, servisse de critério de desempenho. Desta forma, o critério passou a ser variável e definido pelo usuário.

$$G(s) = \frac{1}{\lambda s + 1} \tag{2.11}$$

Sendo assim, a Tabela 2.3 que referencia os parâmetros do controlador PID, depende não somente das características  $K$ ,  $\tau$  e  $\theta$  da planta, mas também do critério de desempenho  $\lambda$ .

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$	Sugestão para o Desempenho
PI	$\frac{(2 \times \tau + \theta)}{(K \times (2 \times \lambda))}$	$\tau + (\frac{\theta}{2})$	-	$\frac{\lambda}{\theta} > 1,7$
PID	$\frac{(2 \times \tau + \theta)}{(K \times (2 \times \lambda + \theta))}$	$\tau + (\frac{\theta}{2})$	$\frac{\tau \times \theta}{2 \times \tau + \theta}$	$\frac{\lambda}{\theta} > 0,8$

Tabela 2.3: Método de sintonia IMC

## 2.4 Metodologias de Avaliação de Malha

Ao longo do tempo, diferentes maneiras de se avaliar o desempenho de uma malha de controle foram surgindo, mas em linhas gerais os métodos de avaliação podem ser agrupados em dois blocos. O primeiro deles se refere às técnicas de avaliação determinísticas, e o segundo se refere às técnicas não determinísticas.

De uma maneira natural, estes mesmo parâmetros utilizados para projetar, podem ser utilizados para avaliar como determinada malha está se comportando ao longo do tempo. Desta forma, medir itens como o tempo de subida, tempo de acomodação e máxima ultrapassagem de uma malha e comparar com os valores que se desejaria ter neste processo é uma forma direta de avaliar o seu desempenho. Estes são os índices que podem ser classificados como determinísticos.

Infelizmente, para realizar este tipo de procedimento de avaliação, é necessário intervir no processo (teste da Resposta ao Degrau). E esta intervenção, em geral, não é desejada em plantas que já estão em operação.

Além das características de resposta transitória do processo, outra característica importante de um sistema de controle é usada para avaliar o seu desempenho, que é a sua variância. Neste caso, quanto maior a variância do sinal de saída do processo pior é o desempenho do meu sistema.

Para se realizar o procedimento de avaliação de desempenho através da análise da variância, é necessário somente dados de operação normal do processo e uma estimativa de atraso do processo.

## 2.5 Controle de Variância Mínima

Avaliar o desempenho de malha através da análise da variância é um conceito que vêm se firmando ao longo dos últimos anos. Esta seção trata da teoria de controle com variância mínima, que conforme pode ser visto na publicação de Ordys et al (25), é a base para a mais difundida técnica de avaliação de malha existente hoje. Nesta publicação é possível encontrar uma revisão simplificada sobre esta teoria de controle, que será descrita nesta seção.

Åström (8) foi o primeiro autor a estudar a estratégia de controle denominada Controle com Variância Mínima (*Minimum Variance Control*). Esta estratégia se baseia na tentativa de minimizar a variância da variável que se desejava controlar.

O desenvolvimento do controle com variância mínima leva em consideração que o sistema em questão seja um sistema linear, invariante no tempo e do tipo entrada simples, saída simples (SISO).

O sistema de controle genérico discretizado apresentado a seguir na Figura 2.6 obedece as restrições necessárias para desenvolver este tipo de controle.

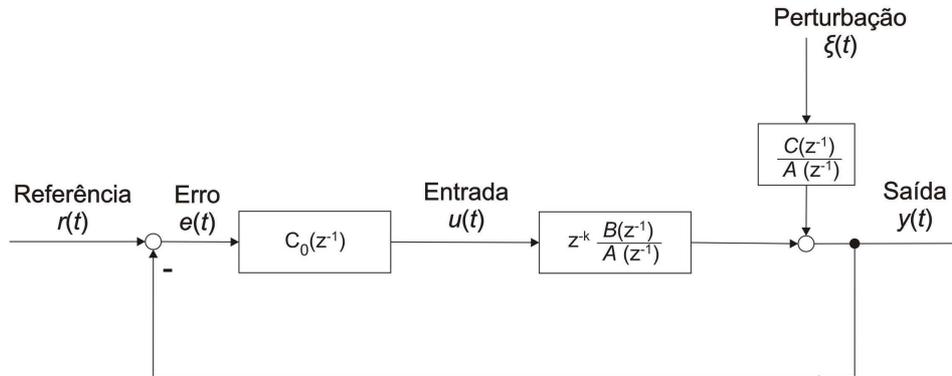


Figura 2.6: Representação em diagrama de blocos da estrutura de um sistema de controle genérico discretizado

É possível ainda representar este sistema através da Equação 2.12

$$A(z^{-1}) \cdot y(t) = z^{-k} \cdot B(z^{-1}) \cdot u(t) + C(z^{-1}) \cdot \xi(t). \quad (2.12)$$

O sinal  $y(t)$  representa a variação da saída do sistema em torno do sua referência (*setpoint*),  $u(t)$  representa o sinal de controle e  $\xi(t)$  a perturbação que existe sobre este sistema. Por sua vez, os termos  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$  e  $C(z^{-1})$  são polinômios no operador atraso  $z^{-1}$ . Em algumas passagens do texto desta dissertação a indicação  $z^{-1}$  será omitida por conveniência.

Assumindo que, por simplicidade, que o sinal de referência  $r(t)$  seja nulo, o sinal de controle  $u(t)$  é dado pela Equação 2.13

$$u(t) = -C_0 \cdot y(t). \quad (2.13)$$

O termo  $z^{-k}$  na Equação 2.12 representa um atraso de  $k$  passos no sinal de controle. Isto significa que o sinal de controle começa a atuar somente depois de  $k$  incrementos de tempo.

Deste modo, é possível escrever o modelo do sistema considerando agora a saída no instante  $t+k$  conforme a Equação 2.14

$$y(t+k) = \frac{B}{A} \cdot u(t) + \frac{C}{A} \cdot \xi(t+k). \quad (2.14)$$

Através da equação de Diophantine apresentada a seguir em (2.15), o polinômio  $C$  pode ser separado em duas partes. Uma parte relacionada aos valores passados de  $\xi$ , e outra relacionada aos valores futuros de  $\xi$ .

$$C = A \cdot F + z^{-k} \cdot G \quad (2.15)$$

A substituição da Equação 2.15 na Equação 2.14 resulta na Equação 2.16

$$y(t+k) = \frac{B \cdot F}{C} \cdot u(t) + \frac{G}{C} \cdot y(t) + F \cdot \xi(t+k) \quad (2.16)$$

onde os dois primeiros termos do lado direito da Equação 2.16 não são correlacionados com o terceiro termo, pois se referem a instantes de tempo mutuamente exclusivos.

Desta forma, a variância da saída pode ser obtida através da Equação 2.17

$$\sigma_y^2 = E[y^2(t+k)] = E\left[\left(\frac{B \cdot F}{C} \cdot u(t) + \frac{G}{C} \cdot y(t)\right)^2\right] + E[(F \cdot \xi(t+k))^2]. \quad (2.17)$$

Definindo  $J_{min}$  como a variância independente da ação de controle e  $J_0$  como a variância dependente da lei de controle do processo, obtêm-se os termos (2.18), (2.19) e (2.20), descritos a seguir

$$J_{min} = E[(F \cdot \xi(t+k))^2] \quad (2.18)$$

$$J_0 = E\left[\left(\frac{B \cdot F}{C} \cdot u(t) + \frac{G}{C} \cdot y(t)\right)^2\right] \quad (2.19)$$

$$J = \sigma_y^2 = J_{min} + J_0. \quad (2.20)$$

Para alcançar a variância mínima no sinal de saída, é necessário que a igualdade

expressa em 2.21 e 2.22 seja verdadeira.

$$\frac{B \cdot F}{C} \cdot u(t) + \frac{G}{C} \cdot y(t) = 0 \quad (2.21)$$

$$u(t) = -\frac{G}{B \cdot F} \cdot y(t) \quad (2.22)$$

Aplicando esta lei de controle, a Equação 2.16, que descreve a saída do processo no instante  $t+k$ , se resume a Equação 2.23

$$y(t+k) = F \cdot \xi(t+k). \quad (2.23)$$

A partir da Equação 2.23 é fácil perceber que a estratégia de variância mínima leva a variância do sinal de saída a depender somente do sinal de perturbação do sistema. Como não se pode controlar este sinal de perturbação, a variância produzida por ele é inerente ao sistema. Esta variância resultante da perturbação é considerada a variância mínima do processo.

Este tipo de controle cancela a dinâmica do sistema colocando os pólos de malha fechada na origem. Por isto uma estratégia agressiva e sensível a precisão do modelo do processo.

Outro fator complicador é a necessidade do modelo do processo incluir também a modelagem do ruído (perturbação). Além disto, ele necessita de um sistema de fase mínima para ser estável.

Todos estes fatores dificultam a aplicabilidade deste tipo de controlador em situações práticas.

Apesar destas restrições de implementação, a teoria de controle por variância mínima é a base para uma das métricas mais utilizadas na avaliação de desempenho de malha.

Em um artigo bastante repercutido, Harris estabeleceu um dos conceitos fundamentais para a teoria de avaliação de desempenho de malha (2). A idéia apresentada por Harris consiste em comparar a variância produzida por um sistema que utiliza um controlador comum com a mínima variância teórica possível para este sistema.

Posteriormente, em complemento a idéia anterior, surge a proposição de um índice

que relaciona a variância mínima com a variância real do processo (15). Este índice ficou conhecido como índice de Harris e representa a base das aplicações práticas das técnicas de avaliação de malha.

## 2.6 Controle de Variância Mínima Generalizado

Conforme foi visto na seção anterior, o índice de Harris é uma ferramenta bastante valorosa quando o assunto é avaliação de desempenho de malhas de controle. Porém, o fato deste índice se basear em um controle que dificilmente pode ser aplicado na prática, abre espaço para se questionar seu real valor como índice de avaliação (13).

Desta forma, alguns critérios alternativos de avaliação acabaram surgindo, e entre eles está o que se baseia na estratégia de controle GMV (*Generalised Minimum Variance*), ou melhor, índice de variância mínima generalizado. O índice GMV tem muito em comum com o índice de Harris, mas tem a vantagem de permitir que o controle ótimo requerido seja especificado pelo usuário. A comparação do desempenho torna-se mais realista já que o sistema usado como referência pode levar em conta por exemplo a limitação prática da ação de controle. Este tipo de restrição não é considerada no índice de variância mínima.

O índice GMV se baseia na teoria de controle com variância mínima generalizado que será descrita nesta seção, utilizando como principais referências (13) e (25).

O desenvolvimento da base teórica do controle com variância mínima generalizado é semelhante ao desenvolvimento do controle com variância mínima. Desta forma, o sistema utilizado nesta formulação também é considerado como sendo linear, invariante no tempo e do tipo entrada simples, saída simples (SISO). Tal sistema pode ser representado pela Figura 2.7.

Este sistema também pode ser representado pela Equação 2.24

$$A(z^{-1}) \cdot y(t) = z^{-k} \cdot B(z^{-1}) \cdot u(t) + C(z^{-1}) \cdot \xi(t). \quad (2.24)$$

Por simplicidade, o sinal de referência  $r(t)$  é assumido como sendo nulo. Desta maneira, o sinal de controle  $u(t)$  é dado pela Equação 2.25

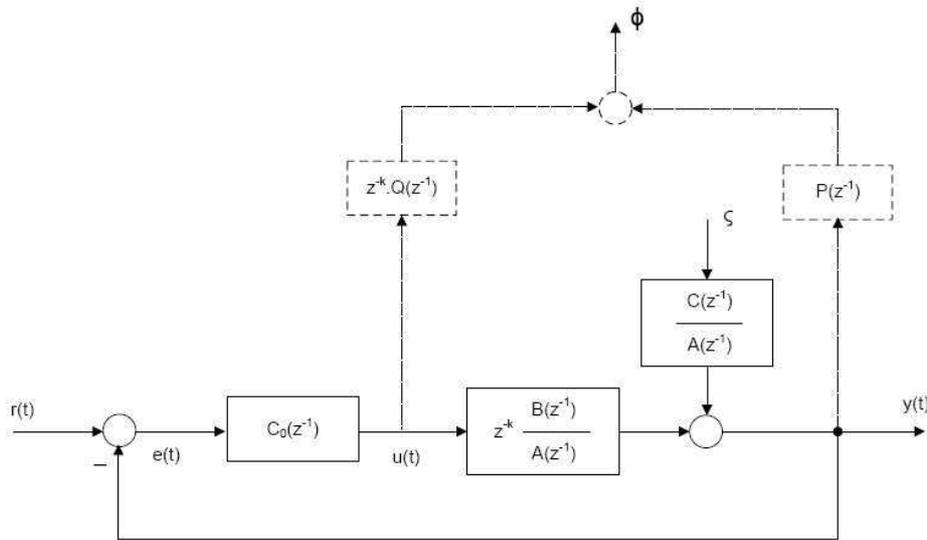


Figura 2.7: Estrutura de um sistema de controle genérico usando GMV

$$u(t) = -C_0 \cdot y(t). \quad (2.25)$$

A grande diferença do controlador GMV é que ao invés de buscar minimizar a variância do sinal de saída, como no caso anterior, o GMV procura minimizar o sinal auxiliar  $\phi(t)$ . Este sinal auxiliar é dado pela Equação 2.26

$$\phi(t) = P(z^{-1}) \cdot y(t) + z^{-k} \cdot Q(z^{-1}) \cdot u(t) \quad (2.26)$$

onde  $P(z^{-1})$  e  $Q(z^{-1})$  são funções peso dinamicamente estáveis.

O termo  $P$  é normalmente escolhido como sendo um termo integral, o que leva a uma ação integral no controlador. Já  $Q$  pode ser escolhido como uma constante ou como um termo que assegure o controlador funcione apropriadamente.

Uma maneira simples de interpretar o controle GMV é reformular o problema de mínima variância (MV). Fazendo este paralelo, a última equação (2.26) pode ser escrita conforme as Equações 2.27 e 2.28

$$\phi(t+k) = P \cdot \left( \frac{B}{A} \cdot u(t) + \frac{C}{A} \cdot \xi(t+k) \right) + Q \cdot u(t) \quad (2.27)$$

$$\phi(t+k) = \left( \frac{PB}{A} + Q \right) u(t) + \frac{PC}{A} \xi(t+k). \quad (2.28)$$

A exemplo do caso de MV, o termo relacionado a perturbação pode ser separado em dois componentes (preditivo e não preditivo) usando a equação de Diophantine mostrada na Equação 2.29

$$PC = AF + q^{-k}G. \quad (2.29)$$

Se Equação 2.28 for rearranjada levando em consideração as Equações 2.24 e 2.29, obtêm-se a função auxiliar  $\phi(t)$  descrita de acordo com a Equação 2.30

$$\phi(t+k) = \frac{G}{C}y(t) + \frac{H}{C}u(t) + F\xi(t+k) \quad (2.30)$$

onde o termo  $H$  é dado pela Equação 2.31

$$H = BF + QC. \quad (2.31)$$

Observando esta última representação de  $\phi(t)$ , é fácil concluir que a lei de controle que minimiza a saída generalizada  $\phi(t)$  é dada pela Equações 2.32 e 2.33

$$Hu(t) + Gy(t) = 0 \quad (2.32)$$

$$u(t) = -\frac{G}{H}y(t). \quad (2.33)$$

Considerando a aplicação desta ação de controle, a saída generalizada equivale à Equação 2.34

$$\phi_{gmv}(t) = F \cdot \xi(t). \quad (2.34)$$

Depois de verificar este desenvolvimento é possível fazer uma comparação entre o projeto de um controlador de mínima variância e o projeto de um controlador GMV. A

conclusão é que o projeto de um GMVC conta com uma etapa adicional. Esta etapa consiste da escolha das funções de custo  $P$  e  $Q$ .

Uma referência (*guideline*) para este trabalho de definição das funções de ponderação é apresentada no trabalho de Grimble (13). Este problema será abordado mais adiante nesta dissertação já que o índice de avaliação de malha GMV, que também será estudado, demanda que seja feita uma escolha apropriada de  $P$  e  $Q$ .

## 2.7 Conclusões

A fundamentação teórica apresentada aqui serve de base para os desenvolvimentos na área de avaliação de malha de controle que são descritos em maiores detalhes no capítulo seguinte.

# Capítulo 3

## Métodos de Avaliação de Malha

### 3.1 Índice de Avaliação de Desempenho Baseado em Variância Mínima

A idéia de realizar avaliação de malha utilizando um índice foi proposição inicial de Harris e Desborough (15). O índice proposto relaciona a estimativa da variância que um controlador de variância mínima produziria e a variância real da saída do processo (Equação 3.1)

$$\eta(k) = \frac{\sigma_{mvc}^2}{\sigma_y^2} \quad (3.1)$$

onde  $\sigma_{mvc}^2$  é a estimativa da variância mínima teórica e  $\sigma_y^2$  é a variância do sistema.

A presente seção é destinada a realizar o detalhamento teórico deste índice, utilizando como principais referências (2), (15), (25) e (32).

De acordo com sua concepção, o índice de Harris varia de 0 a 1. Malhas avaliadas com índice próximo da unidade estão operando em condições ótimas do ponto de vista da variância. Já em avaliações onde se obtém índice próximo de zero, o controle implementado apresenta desempenho distante do ótimo (32).

Para se obter uma estimativa de  $\eta(k)$ , é necessário estimar  $\sigma_{mvc}^2$ . O artigo inicial de Harris em 1989 apresenta a maneira de se obter esta estimativa de  $\sigma_{mvc}^2$  a partir de dados de rotina do processo (15).

A base do procedimento de estimação é a realização de uma regressão linear utilizando um modelo ARMA (*Autoregressive Moving Average*). Conhecendo os parâmetros do modelo autoregressivo é possível calcular a variância residual que equivale a variância mínima, conforme será exposto na seqüência. A maior vantagem deste método é que ele elimina a necessidade de resolver uma equação de Diophantine (ou de realizar uma longa divisão polinomial) (25).

O desenvolvimento da estimativa de  $\eta(k)$  parte da Equação 2.16. Quando se considera o processo operando sob realimentação negativa (usando a lei de controle apresentada em 2.13), o sinal de saída é representado pela Equação 3.2

$$y(t) = F \cdot \xi(t) + z^{-k} \cdot \left( \frac{G - B \cdot F \cdot C_0}{C} \right) \cdot y(t). \quad (3.2)$$

Já que a malha fechada é considerada estável, o segundo componente da Equação 3.2 pode ser aproximado por um modelo autoregressivo de tamanho finito, de acordo com as Equações 3.3 e 3.4

$$y(t) = F \cdot \xi(t) + \alpha_1 \cdot y(t - k) + \alpha_2 \cdot y(t - k - 1) + \dots + \alpha_m \cdot y(t - k - m + 1) \quad (3.3)$$

$$y(t) = F \cdot \xi(t) + \sum_{i=1}^m (\alpha_i \cdot y(t - k - i + 1)) \quad (3.4)$$

onde  $m$  é o tamanho do modelo de autoregressão.

Considerando um determinado horizonte de valores de  $y(t)$  e agrupando os termos similares em forma de vetores e matrizes, obtêm-se a Equação 3.5

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \cdot \alpha + \mathbf{F} \cdot \xi. \quad (3.5)$$

O conjunto de Expressões 3.6 descreve os termos  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{X}$  e  $\alpha$  citados na Equação acima.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{y} &= [ y_n \ y_{n-1} \ \dots \ y_{k+m} ]^T, \\
 \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} y_{n-k} & y_{n-k-1} & \dots & y_{n-k-m+1} \\ y_{n-k-1} & y_{n-k-2} & \dots & y_{n-k-m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_m & y_{m-1} & \dots & y_1 \end{bmatrix}, \\
 \alpha &= [ \alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_m ]^T
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

onde  $n$  é o tamanho do conjunto de dados.

Aplicando uma regressão linear para estimar os parâmetros  $\{\alpha_i\}$  através do ajuste dos dados de rotina do processo  $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  ao modelo 3.4, a solução de mínimos quadrados é dada pela Equação 3.7

$$\hat{\alpha} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{y}. \tag{3.7}$$

Partindo da Equação 3.5, a estimativa da variância mínima pode ser calculada a partir da variância residual dada em 3.8

$$\hat{\sigma}_{mvc}^2 = \frac{1}{n - k - 2m + 1} \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{X} \cdot \alpha)^T \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{X} \cdot \alpha). \tag{3.8}$$

Já a variância real do processo é calculada por 3.9

$$\hat{\sigma}_y^2 = \frac{1}{n - k - m + 1} \cdot \mathbf{y}^T \cdot \mathbf{y}. \tag{3.9}$$

Finalmente a estimativa do índice de Harris ( $\hat{\eta}(k)$ ) pode ser escrita de acordo com 3.10

$$\hat{\eta}_{mvc}(k) = \frac{n - k - m + 1}{n - k - 2m + 1} \cdot \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{X} \cdot \alpha)^T \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{X} \cdot \alpha)}{\mathbf{y}^T \cdot \mathbf{y} + \bar{y}^2} \tag{3.10}$$

onde o erro médio quadrado é usado no lugar da variância do sinal de saída, com isto o termo  $\bar{y}^2$  é incluído no denominador. Este artifício é utilizado para penalizar erros de regime permanente não nulos, alinhado com a idéia do índice de penalizar variações no

regime permanente, inclusive mudanças de *setpoint*.

## 3.2 Índice de Avaliação de Desempenho Baseado em GMV

A estimação do índice GMV é feita de uma maneira bastante similar ao caso do índice de Harris. A diferença básica é que a variável que se deseja minimizar não é mais a saída do processo, mas sim a variância da saída generalizada  $\phi(t)$ , definida de acordo com a Equação 2.26 do capítulo anterior. O processo é identificado a partir dos dados de  $\phi(t)$ . O modelo autoregressivo é construído a partir destes dados e é representado pela Equação 3.11

$$y(t) = \sum_{j=1}^m (\alpha_j \cdot \phi(t - k - j + 1)) + \varepsilon(t). \quad (3.11)$$

Considerando um determinado horizonte de valores de  $\phi(t)$  e fazendo o agrupamento dos termos similares em forma de vetores e matrizes, obtêm-se a Equação 3.12

$$\phi = \mathbf{X} \cdot \alpha + \varepsilon. \quad (3.12)$$

Os termos  $\phi$ ,  $\mathbf{X}$  e  $\alpha$  são representados pelo conjunto de Expressões 3.13

$$\begin{aligned} \phi &= [\phi_n \quad \phi_{n-1} \quad \dots \quad \phi_{k+m}]^T, \\ \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} \phi_{n-k} & \phi_{n-k-1} & \dots & \phi_{n-k-m+1} \\ \phi_{n-k-1} & \phi_{n-k-2} & \dots & \phi_{n-k-m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_m & \phi_{m-1} & \dots & \phi_1 \end{bmatrix}, \\ \alpha &= [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_m]^T \end{aligned} \quad (3.13)$$

onde  $n$  é o tamanho do conjunto de dados,  $k$  é o atraso do processo (em número de amostras) e  $m$  é o tamanho do modelo autoregressivo.

A solução da regressão linear leva a um valor de  $\alpha$  expresso pela Equação 3.14

$$\hat{\alpha} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \phi. \quad (3.14)$$

A estimativa da variância mínima deste sinal pode ser calculada a partir da variância mínima residual mostrada em 3.15

$$\hat{\sigma}_{gmv}^2 = \frac{1}{n - k - 2m + 1} \cdot (\phi - \mathbf{X} \cdot \alpha)^T \cdot (\phi - \mathbf{X} \cdot \alpha). \quad (3.15)$$

O índice GMV é proveniente da comparação de  $\hat{\sigma}_{gmv}^2$  com a variância atual de  $\phi(t)$ , resultando na Equação 3.16

$$\hat{\eta}_{gmv}(k) = \frac{\hat{\sigma}_{gmv}^2}{\hat{\sigma}_{\phi}^2} \quad (3.16)$$

onde  $\hat{\sigma}_{\phi}^2$  é dado pela Equação 3.17

$$\hat{\sigma}_{\phi}^2 = \frac{1}{n - k - m + 1} \cdot \phi^T \cdot \phi. \quad (3.17)$$

### 3.3 Aspectos Práticos da Implementação

A implementação dos algoritmos de estimação dos índices de avaliação requerem que alguns pontos de caráter práticos sejam definidos. Entre estas definições estão o tamanho do conjunto de dados a ser utilizado e o tamanho do modelo autoregressivo que se pretende considerar para a estimação. Além disto, é importante ressaltar mais uma vez que estes algoritmos necessitam de uma estimativa do atraso do processo. No caso do índice GMV, as funções de custo também são consideradas como sendo um dado de entrada necessário no processo de avaliação.

#### 3.3.1 Tamanho do Conjunto de Dados

O tamanho da amostra pode influir na representatividade da estimação do índice de avaliação. Amostras com poucos dados podem comprometer as propriedades estatísticas do índice, aumentando sua variabilidade e diminuindo a confiabilidade do resultado. Por outro lado, amostras com número excessivo de dados podem sofrer com a influência de

mudanças no processo, como por exemplo uma mudança no *setpoint*. Desta forma, o índice também deixa de ser representativo. Ordys et al (25) apontam que o conjunto de dados nunca devem ser inferior a 500 amostras, e que deve ser preferencialmente superior a 1000 pontos.

### 3.3.2 Tamanho do Modelo de Autoregressão

O tamanho do modelo de autoregressão deve permitir que a resposta ao impulso do sistema seja completamente capturada na representação. Tipicamente, valores entre 5 e 30 atendem a esta necessidade (25). Além disto, um procedimento experimental pode ser realizado para melhor definir este valor. A ordem do modelo pode ser gradativamente aumentada até que o índice não apresente mudanças consideráveis (15). Desta maneira está se escolhendo uma ordem de modelo que deixa de influenciar na estimativa do índice.

### 3.3.3 Atraso do Processo

A teoria apresentada para estimativa do índice de desempenho considera que o horizonte de predição deve ser escolhido como sendo equivalente ao atraso do processo (ou tempo morto). Para que o algoritmo funcione a contento, é necessário que esta informação seja conhecida *a-priori*. Diversas metodologias são propostas para se obter uma estimativa deste atraso para sistemas em malha fechada (32).

### 3.3.4 Escolha das Funções de Custo (Caso GMV)

Para o caso da avaliação de desempenho usando o índice GMV, é necessário especificar o controle ótimo que se deseja utilizar como referência na comparação da avaliação de malha. Esta etapa de especificação do nível de controle desejado ocorre através da definição das funções de custo  $P$  e  $Q$ .

A definição destas funções de custo para o processo de avaliação de malha é uma atividade geralmente complexa. Esta é uma atividade que pode demandar um esforço razoável de simulações ou interação com o processo até se chegar a um resultado aceitável (33).

Apesar da dificuldade existente para realizar a escolha das funções custo no caso geral, o caso particular onde o sistema tem um controle do tipo PID implementado é tratado à parte de maneira mais simples. Para esta situação específica, um conjunto de regras genéricas é proposto para auxiliar nesta seleção (33).

- A função custo do erro ( $P$ ) deve normalmente incluir um termo integral (Equação 3.18), o que corresponde à uma ação no controlador;

$$P = \frac{P_{cn}}{1 - z^{-1}}. \quad (3.18)$$

onde  $P_{cn}$  pode ser constante ou pode ter a forma  $(1 - \alpha \cdot z^{-1})$  com  $0 < \alpha < 1$  sendo um parâmetro de ajuste (quanto maior  $\alpha$ , mais cedo a ação integral é "desligada");

- A função custo do sinal de controle ( $Q$ ) pode ser escolhida como um termo (Equação 3.19 ou 3.20) que assegure que o controlador tenha pouca atuação nas altas frequências de maneira a não amplificar a ação do ruído;

$$z^{-k} \cdot Q = \rho \quad (3.19)$$

$$z^{-k} \cdot Q = \rho \cdot (1 - \gamma \cdot z^{-1}) \quad (3.20)$$

onde  $\rho$  e  $\gamma$  pode ser considerados parâmetros de ajuste, sendo que  $\rho$  em geral é negativo;

- A relação entre a função custo do erro e a função custo do sinal de controle (divisão de uma função pela outra) deve ser igual ao controlador PID utilizado no sistema.

## 3.4 Descrição da Implementação Utilizada

### 3.4.1 Detalhamento da Implementação

O tema central deste trabalho está associado à utilização de índices de avaliação de malha (Harris e GMV) para verificar o desempenho de sistemas de controle. Servindo

como base para os diferentes conjuntos de simulações realizadas ao longo deste trabalho, uma etapa inicial é considerada com o intuito de implementar e validar os algoritmos básicos de estimação dos índices.

Os algoritmos de estimação dos índices foram desenvolvidos em um programa do Matlab® (extensão M-File). A rotina desenvolvida neste programa foi organizada em 4 etapas descritas a seguir.

- Carregamento de dados (carrega os dados de simulação ou dados reais de processo, além das informações adicionais requeridas como número total de dados de entrada, tamanho do modelo autoregressivo, e atraso do processo);
- Formação dos vetores e matrizes de acordo com o conjunto de Equações 3.6;
- Obtenção dos parâmetros do modelo de autoregressão  $\{\alpha_i\}$  de acordo com a Expressão 3.7;
- Cálculo do índice de Harris a partir da Equação 3.10.

### 3.4.2 Processo de Validação

O processo complementar da etapa de implementação é a validação. Esta é uma etapa de extrema importância já que visa garantir a corretude dos resultados obtidos na etapa anterior. O objetivo desta seção é descrever como este processo de validação foi realizado.

A estratégia de validação consiste na simulação de processos operando em malha fechada utilizando um controlador de variância mínima. Nesta situação, a estimativa do índice de Harris deve retornar um valor próximo da unidade. Desde que este resultado se confirme para uma gama variada de processos, é possível afirmar que a etapa de implementação foi realizada a contento.

A validação foi dividida em duas partes. A primeira delas se destina ao projeto de um controlador de variância mínima. E a segunda se relaciona a simulação do processo operando em malha fechada sob controle de variância mínima.

Neste ponto do desenvolvimento, outra funcionalidade do Matlab® é utilizada, que é o ambiente de simulação Simulink®. Através deste ambiente é possível simular um

sistema de controle discreto semelhante ao que foi apresentado na Figura 2.6 no capítulo anterior.

O projeto de um controlador de variância mínima consiste do cálculo do controlador  $C_0(z^{-1})$  (ver Equações 2.13 e 2.22), que é dado pela Equação 3.21

$$C_0(z^{-1}) = \frac{G}{B \cdot F} \quad (3.21)$$

Para realizar o cálculo de  $C_0$  é necessário conhecer os polinômios  $B(z^{-1})$ ,  $F(z^{-1})$  e  $G(z^{-1})$ . O polinômio  $B$  é conhecido por fazer parte do modelo que se deseja simular. Já para a obtenção de  $F$  e  $G$  é preciso resolver uma equação de Diophantine.  $A$  e  $C$  são igualmente conhecidos por fazerem parte do modelo simulado. Desta forma, é preciso resolver a Equação 3.22 para se obter  $F$  e  $G$  e finalmente calcular  $C_0$ .

$$C = A \cdot F + z^{-k} \cdot G. \quad (3.22)$$

Uma rotina foi desenvolvida para realizar o cálculo automático do controlador de variância mínima. O problema da resolução da equação de Diophantine foi solucionado através da implementação de uma matriz de Sylvester, de acordo com o sugerido por Åström (34). A simulação da malha fechada de processos sob controle de variância mínima foi realizada em uma montagem similar ao apresentado no exemplo da Figura 3.1.

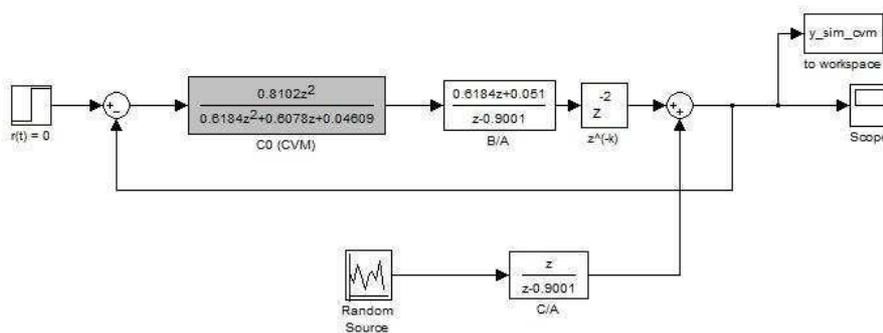


Figura 3.1: Simulação de processo em malha fechada sob controle de variância mínima

Diversos processos distintos foram utilizados para a validação. Em todos os casos, o controlador de variância mínima foi calculado e uma simulação de operação em malha

fechada foi realizada. Conforme esperado, as estimativas do índice de Harris encontradas ficaram próximas de 1 (erro percentual inferior a 0,1%). Estes resultados servem como validação do algoritmo de estimação que foi implementado.

A implementação de algoritmos que utilizam a forma generalizada do índice de Harris é na verdade uma extensão do algoritmo básico. Desta forma a validação relatada neste capítulo serve também ao propósito de garantir confiabilidade nas simulações realizadas com avaliação GMV.

### **3.5 Conclusões**

Os índices de avaliação de desempenho são ferramentas importantes no desenvolvimento deste trabalho. A fundamentação teórica por trás destes índices que foi apresentada aqui de forma que o desenvolvimento prático possa ter seguimento a exemplo do comparativo que será apresentado no capítulo seguinte.

# Capítulo 4

## Comparativo de Controladores PID

A estratégia de controle que usa controladores PID é simples e bastante utilizada nos dias atuais. O interesse pelas técnicas de avaliação de desempenho de malhas de controle, bem como sua utilização, é relativamente recente dentro da história dos sistemas de controle. Conforme já foi comentado, um dos objetivos deste trabalho é estudar a relação existente entre diferentes técnicas de sintonia de controle PID e o seu desempenho do ponto de vista da variância do sinal controlado. Um estudo comparativo é desenvolvido com esta finalidade. Neste capítulo, a sistemática utilizada para realizar este comparativo de técnicas de sintonia é apresentada. Além disto, os resultados obtidos também são apresentados e analisados aqui.

### 4.1 Descrição do Comparativo

Para o desenvolvimento desta pesquisa, uma estrutura de simulação de sistemas em malha fechada e estimação de índice de avaliação de desempenho é montada com base nos algoritmos já descritos no capítulo anterior. A primeira aplicação desta estrutura de simulação é justamente a investigação do comportamento de diferentes técnicas de sintonia sob o ponto de vista da variância mínima. Esta investigação se dá através de um conjunto de simulações realizadas em um ambiente computacional adequado para tanto.

Conforme foi antecipado no capítulo 2 deste texto, três técnicas distintas estão sendo

consideradas neste comparativo (métodos de Ziegler e Nichols, CHR e IMC).

Para este comparativo um conjunto de 6 diferentes processos é utilizado. Este grupo de processos é proveniente de um importante artigo de Skogestad (30) sobre a técnica de sintonia de PID chamada SIMC. Neste artigo, diferentes processos são utilizados como base de validação para uma nova proposta de técnica de sintonia (técnica SIMC). O grupo de processos utilizados por Skogestad foi constituído levando em consideração situações reais encontradas no ambiente industrial e por isto este grupo é considerado um conjunto representativo de processos para este tipo de estudo. Por se tratar de um comparativo, é conveniente que cada um dos processos utilizados possa ser avaliado em cada uma das três diferentes situações de sintonia do controlador PID. Este é o critério utilizado para a seleção dos seis processos considerados aqui. Os processos utilizados foram aqueles que puderam ser avaliados nas três diferentes situações. Em alguns casos determinadas técnicas de sintonia de PID leva a situações de instabilidade o que impossibilita uma comparação.

## 4.2 Simulação

Conforme dito na seção anterior, um conjunto de 6 processos é considerado neste estudo comparativo. Tais processos foram selecionados dentro de um conjunto maior presente no artigo citado anteriormente.

As técnicas de sintonia de PID mais conhecidas utilizam como referência de modelo de processo um modelo de primeira ordem com atraso (FOPTD - *First Order Plus Time Delay*). Desta forma, é natural a escolha de processos representados por um modelo FOPTD para a realização de um comparativo de técnicas.

Os processos considerados aparecem originalmente na forma de uma função de transferência qualquer, porém este mesmo artigo de Skogestad (30) apresenta uma técnica de aproximação para transformar o modelo original em um modelo FOPTD. Esta técnica de aproximação é chamada de *half rule*. Esta representação em FOPTD é que será utilizada para os cálculos dos controladores PID. Os modelos (funções de transferência) dos processos e suas respectivas aproximações são apresentados na Tabela 4.1.

Caso	Modelo do Processo	Representação FOPTD Aproximação <i>half rule</i>
P1	$\frac{1}{(s+1)(0.2s+1)}$	$\frac{1}{(1+1,1s)}e^{-0,1s}$
P2	$\frac{2(15s+1)}{(20s+1)(s+1)(0.1s+1)^2}$	$\frac{1,5}{(1+1,05s)}e^{-0,15s}$
P3	$\frac{1}{(s+1)(0.2s+1)(0.04s+1)(0.008s+1)}$	$\frac{1}{(1+1,1s)}e^{-0,148s}$
P4	$\frac{1}{(20s+1)(2s+1)}e^{-s}$	$\frac{1}{(1+21s)}e^{-2s}$
P5	$\frac{(6s+1)(3s+1)}{(10s+1)(8s+1)(s+1)}e^{-0.3s}$	$\frac{0,225}{(1+s)}e^{-0,3s}$
P6	$\frac{2s+1}{(10s+1)(0.5s+1)}e^{-s}$	$\frac{0,625}{(1+4,5s)}e^{-1,25s}$

Tabela 4.1: Função de transferência dos sistemas utilizados e aproximação de primeira ordem utilizando a regra de *half rule*

As três técnicas de sintonia de controlador PID consideradas para este comparativo já foram introduzidas neste texto na seção 2.3. Para cada um dos 6 modelos considerados, foi feito o cálculo do controlador correspondente. Uma rotina foi desenvolvida para realizar o cálculo automático dos parâmetros ( $K_p$  e  $T_i$ ) de cada um dos três tipos de controladores baseando-se nos dados de modelo do processo. Os resultados podem ser visto na Tabela 4.2.

Caso	ZN		CHR		IMC	
	$Kp_{zn}$	$Ti_{zn}$	$Kp_{chr}$	$Ti_{chr}$	$Kp_{imc}$	$Ti_{imc}$
P1	9,90	0,33	6,60	0,40	1,44	1,12
P2	4,20	0,50	2,80	0,60	0,94	1,13
P3	6,69	0,49	4,46	0,59	1,41	1,17
P4	9,45	6,66	6,30	8,00	1,43	22,00
P5	13,33	1,00	8,89	1,20	5,90	1,15
P6	5,18	4,16	3,46	5,00	2,14	5,13

Tabela 4.2: Parâmetros de sintonia utilizados

De maneira geral é possível dizer que quando maior for o ganho proporcional ( $K_p$ ) e

quanto menor for o tempo integral ( $T_i$ ) mais agressivo e mais oscilatório será o controle. Para os casos em questão, o controlador Ziegler e Nichols apresenta o comportamento mais oscilatório. O controlador CHR apresenta dinâmica menos agressivo do que o anterior, porém o IMC é que resulta no controlador mais suave para as situações avaliadas. Esta relação tem uma consequência direta na questão da variância do sinal controlado que é discutida posteriormente.

Do ponto de vista prático, as simulações em malha fechada utilizaram uma montagem similar a do exemplo mostrado na Figura 4.1.

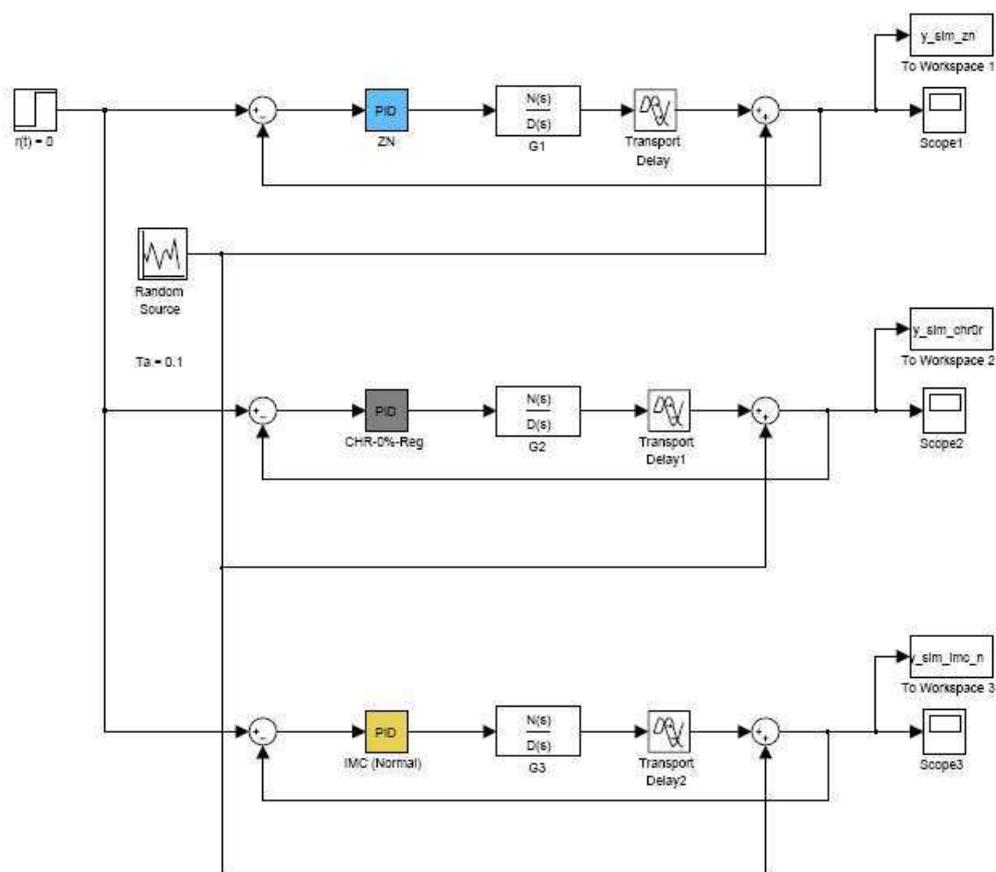


Figura 4.1: Representação em diagrama de blocos da simulação em malha fechada de processos com diferentes PID's

Os blocos PID são carregados com a parametrização correspondente a cada método

e a simulação é então realizada. Os dados de saída do processo são utilizados pelo algoritmo de estimação e como resultado obtêm-se um valor de índice de avaliação para cada uma das técnicas de sintonia selecionadas. Os diferentes valores de índice obtidos possibilitam a comparação do desempenho das diferentes malhas.

### 4.3 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nesta etapa do desenvolvimento são apresentados nesta seção. Os valores médios de índice de desempenho obtidos são mostrados primeiramente de forma individual para cada um dos processos e posteriormente de forma agrupada.

Os termos  $\eta_{imc}$ ,  $\eta_{chr}$  e  $\eta_{zn}$  equivalem respectivamente aos índices de desempenho (índice de Harris) dos processos que usam controladores IMC, CHR e Ziegler e Nichols.

Vale lembrar aqui que, conforme citado nos capítulos anteriores deste trabalho, o índice de desempenho que está sendo utilizado é o índice de Harris. Este índice varia de 0 a 1, e quando mais próximo do valor unitário, mais próximo da situação de mínima variância está o processo.

**Processo P1:**  $\eta_{imc} = 0,99$ ,  $\eta_{chr} = 0,90$  e  $\eta_{zn} = 0,79$ .

**Processo P2:**  $\eta_{imc} = 0,96$ ,  $\eta_{chr} = 0,83$  e  $\eta_{zn} = 0,67$ .

**Processo P3:**  $\eta_{imc} = 0,97$ ,  $\eta_{chr} = 0,80$  e  $\eta_{zn} = 0,68$ .

**Processo P4:**  $\eta_{imc} = 0,99$ ,  $\eta_{chr} = 0,87$  e  $\eta_{zn} = 0,67$ .

**Processo P5:**  $\eta_{imc} = 0,95$ ,  $\eta_{chr} = 0,91$  e  $\eta_{zn} = 0,77$ .

**Processo P6:**  $\eta_{imc} = 0,85$ ,  $\eta_{chr} = 0,68$  e  $\eta_{zn} = 0,52$ .

Para as situações em análise aqui, é possível verificar que o controlador Ziegler e Nichols resulta nas respostas mais oscilatórias. Isto reflete diretamente na situação de regime permanente na presença de ruído. Nesta situação a variância da saída é maior utilizando Ziegler e Nichols do que utilizando CHR ou IMC. O valor estimado para o índice de avaliação de malha é condizente com este resultado. A tendência é que quanto mais suave seja a ação do controle PID em questão, menor será a variância do sinal de saída.

Os resultados apresentados acima também podem ser visualizados através do gráfico da Figura 4.2. Neste gráfico, todos os valores de índice de Harris encontrado para cada

uma das três diferentes sintonias nos 6 processos simulados são apresentados. A análise comparativa destes resultados ajuda a visualizar a tendência no comportamento dos controladores citada acima que segue a seguinte sequência de desempenho: IMC, CHR e por fim Ziegler e Nichols.

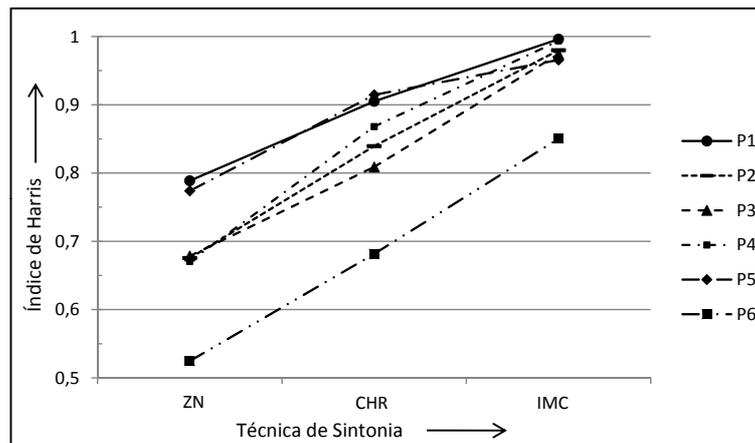


Figura 4.2: Gráfico comparativo de desempenho de técnicas de sintonia - PI

## 4.4 Conclusões

O presente capítulo apresentou um estudo comparativo de diferentes técnicas de sintonia de controlador PID sob a ótica da variância mínima do sinal controlado. Foi possível observar a relação existente entre a característica oscilatória que um controlador PID provoca no processo e a variância do sinal de saída. Esta informação tem relevância no processo de sintonia de uma planta real e pode ser utilizada pelos usuários responsáveis pelo ajuste de sintonia das plantas industriais. Sistemas que buscam níveis de variância menor devem levar em consideração que controlador menos agressivos tendem a melhores resultados de variância em regime permanente.

# Capítulo 5

## Avaliação de malha usando GMVC e alocação de pólos

A associação entre a estratégia de controle GMV e a técnica de alocação de pólos pode ser utilizada para compor uma nova abordagem para avaliar desempenho de malha. O objetivo deste capítulo é desenvolver e validar esta idéia.

### 5.1 Controle de Variância Mínima Generalizado com Alocação de Pólos

O controle de variância mínima generalizado pode ser associado com a técnica de alocação de pólos. É possível relacionar a definição das funções de ponderação,  $P(z^{-1})$  e  $Q(z^{-1})$ , do controle GMV com o polinômio característico,  $T(z^{-1})$ , que especifica a alocação dos pólos em malha fechada. Pelo menos dois artigos importantes fundamentam esta idéia ((11) e (12)).

Para demonstrar esta relação é necessário dar continuidade ao desenvolvimento realizado no capítulo 2 que aborda o controle GMV.

Mais uma vez o sistema utilizado é considerado como sendo linear, invariante no tempo e do tipo entrada simples, saída simples (SISO) e pode ser representado pela Equação 5.1

$$A(z^{-1}) \cdot y(t) = z^{-k} \cdot B(z^{-1}) \cdot u(t) + C(z^{-1}) \cdot \xi(t). \quad (5.1)$$

A lei de controle que minimiza a variância da saída auxiliar no controle GMV é expressa pela Equação 5.2

$$u(t) = -\frac{G}{H}y(t). \quad (5.2)$$

Se esta lei de controle for incorporada na Equação 5.1 que descreve o sistema, a Equação 5.3 é obtida

$$y(t) = \frac{HC}{HA + q^{-k}BG}\xi(t). \quad (5.3)$$

É possível definir o termo  $T$  por meio da Equação 5.4 abaixo

$$TC = HA + q^{-k}BG. \quad (5.4)$$

Substituindo a Equação 5.4 na Equação 5.3 a malha fechada do sistema será descrita pela Equação 5.5

$$y(t) = \frac{H}{T}\xi(t). \quad (5.5)$$

O polinômio  $T$  define a alocação do pólos de malha fechada e é predefinido de acordo com a necessidade do usuário.

Por fim, a Equação 5.4 pode ser reescrita para chegar a uma expressão que relaciona diretamente as funções  $P$ ,  $Q$  e  $T$ , conforme Equação 5.6

$$T = QA + PB. \quad (5.6)$$

A ordem dos polinômios  $P$ ,  $Q$  e  $T$  deve obedecer a relação apresentada no conjunto Equações 5.7, 5.8 e 5.9.

$$n_P = n_a - 1 \quad (5.7)$$

$$n_Q = n_b - 1 \quad (5.8)$$

$$n_T \leq n_a + n_b - 1 \quad (5.9)$$

onde  $n_P$  representa a ordem de  $P$ ,  $n_Q$  representa a ordem de  $Q$ , e assim sucessivamente.

Desta forma, a malha fechada pode ser reescrita para ser representada conforme a Equação 5.10

$$y(t) = \frac{H}{QA + PB} \xi(t). \quad (5.10)$$

Esta última Equação deixa explícita a maneira como as funções  $P$  e  $Q$  influenciam na malha fechada do sistema com um controlador GMV.

## 5.2 Descrição da Nova Abordagem de Avaliação de Malha

A idéia de modificar o conceito original de avaliar desempenho proposto por Harris surgiu motivada pelas limitações do mesmo. Comparar o desempenho de um sistema qualquer utilizando o controle de variância mínima como referência muitas vezes resulta em uma comparação injusta.

Da mesma forma que no caso anterior, a avaliação utilizando controle GMV também apresenta limitações. A principal restrição neste caso é a definição das funções de ponderação utilizada neste tipo de avaliação. Segundo os trabalhos desenvolvidos por M. Grimble (13) o processo de estabelecer estas funções de custo não pode ser descrito por regras bem definidas. Em geral um processo de interação é necessário, muitas vezes demandando inclusive um modelo para simulações. Além disto, o formato das funções de ponderação tem difícil associação com o sistema de referência que se pretende utilizar. A idéia que se propõe neste capítulo apresenta uma alternativa que facilita a definição destas funções de custo.

A associação entre controle GMV e a técnica de alocação de pólos é uma idéia que surgiu já há bastante tempo. O objetivo até então foi utilizar o método clássico de alocação de pólos para estabelecer os requisitos de desempenho do sistema e ao mesmo

tempo gerar as funções de ponderação do controlador GMV. A abordagem alternativa que se propõe aqui é fazer uso desta associação entre controle GMV e alocação de pólos para compor uma nova forma de avaliação de desempenho de malha.

A técnica de avaliação de desempenho usando GMV é baseada em uma ponderação que é feita através de duas funções de custo. A abordagem proposta aqui consiste em utilizar a associação existente entre alocação de pólos e controle GMV para definir estas funções.

O uso desta abordagem trás para a técnica de avaliação GMV as diversas vantagens de se utilizar uma técnica de alocação de pólos. O usuário responsável pela avaliação poderá associar de maneira mais intuitiva a definição das funções custo com o sistema que se deseja utilizar como referência. Além disto, a técnica de alocação de pólo produz em geral uma ação de controle mais suave, o que torna o comparativo mais realístico.

Baseado na idéia descrita acima, um procedimento composto de 4 etapas é proposto a seguir.

**Etapa 1 - Definição da alocação dos pólos:** A primeira etapa consiste em definir a dinâmica do sistema que se deseja utilizar como referência. Este é um dado de entrada que o usuário informa através da função  $T(z^{-1})$ . A Equação 5.11 apresenta a forma padrão de  $T(z^{-1})$  definida para sistemas de 1ª ordem e a Equação 5.12 para sistemas de 2ª ordem.

$$T(z^{-1}) = 1 - t_1 z^{-1} \quad (5.11)$$

$$T(z^{-1}) = 1 + t_1 z^{-1} + t_2 z^{-2}. \quad (5.12)$$

O polinômio  $T(z^{-1})$  é uma função no domínio discreto, mas sua relação com o domínio contínuo pode ser vista na seção 2.2 desta dissertação.

**Etapa 2 - Identificação do sistema:** A segunda etapa consiste em utilizar uma técnica de identificação de sistema de forma a obter os polinômios  $A(z^{-1})$  e  $B(z^{-1})$  que caracterizam o sistema conforme a Equação 5.13

$$A(z^{-1}) \cdot y(t) = z^{-k} \cdot B(z^{-1}) \cdot u(t) + C(z^{-1}) \cdot \xi(t). \quad (5.13)$$

**Etapa 3 - Cálculo das funções de ponderação  $P(z^{-1})$  e  $Q(z^{-1})$ :** A terceira etapa consiste em definir as funções de custo  $P(z^{-1})$  e  $Q(z^{-1})$  que são necessárias para a aplicação do índice de avaliação GMV. Depois de concluir as duas primeiras etapas deste procedimento é possível utilizar uma técnica de resolução de equação Diophantina para calcular  $P$  e  $Q$  através da Equação 5.14 abaixo (relação esta que é definida na seção anterior).

$$T = QA + PB. \quad (5.14)$$

**Etapa 4 - Cálculo do índice de desempenho GMV:** A quarta e última etapa do procedimento proposto consiste em utilizar a já conhecida técnica de estimação de índice de avaliação de desempenho baseado em GMVC, conforme apresentado na seção 3.2 deste trabalho. As funções  $P$  e  $Q$  que são requisitos de entrada no algoritmo de estimação baseado em GMVC são encontradas na etapa anterior deste procedimento.

### 5.3 Simulação

O procedimento de avaliação de desempenho proposto na seção anterior foi validado através de um conjunto de simulações que é descrito nesta seção. A exemplo do capítulo anterior um grupo de processos variados sob a ação de diferentes controladores é utilizado. Desta vez porém, o objetivo do comparativo realizado é demonstrar a nova abordagem de avaliação de desempenho proposta aqui.

Os mesmos 6 processos do capítulo 4 serão utilizados nesta etapa do desenvolvimento. A aplicação da nova abordagem em um conjunto de processos já investigados utilizando a abordagem convencional do índice de Harris facilita a interpretação dos resultados.

A estratégia de avaliação de desempenho utilizando GMV com alocação de pólos demanda que a dinâmica do sistema de referência seja definida pelo usuário. Para o processo de validação realizado neste capítulo é interessante que este sistema de referência seja um sistema com dinâmica conhecida. Seguindo esta linha de raciocínio, as simulações realizadas com a nova abordagem utilizam como referência a dinâmica definida pela malha fechada do controlador IMC para cada um dos seis casos.

Para detalhar melhor o processo de simulação realizado, a presente seção apresenta o estudo realizado para cada um dos seis processos individualmente.

**Etapa 1 - Definição da alocação de pólos:** Os resultados obtidos no capítulo 4 permitem que a dinâmica do sistema de referência já seja conhecida neste ponto já que o controlador IMC para cada um dos seis processos já é calculado durante este desenvolvimento. A seguir se apresenta a dinâmica de referência de cada um dos casos estudados, e além disto, se apresenta também o polinômio  $T(z^{-1})$  que representa a alocação de pólos no domínio discreto para cada uma das dinâmicas de referência estudadas.

**Etapa 2 - Identificação do sistema:** Conforme já citado anteriormente, na literatura existem diversas técnicas que tem como finalidade a identificação de sistemas, mas o estudo destas técnicas não faz parte dos objetivos deste trabalho. Para as simulações realizadas os modelos dos processo já são conhecidos o que dispensa a realização de um processo de identificação. Os modelos conhecidos se apresentam no domínio contínuo, mas a obtenção das representações discretas destes modelos é feita de maneira simples através de um processo de discretização. Para o caso em questão utiliza-se um segurador de ordem zero (ZOH ou *Zero Order Hold*). A seguir é apresentada a representação discreta de cada um dos sistemas ( $A(z^{-1})$  e  $B(z^{-1})$ ).

**Etapa 3 - Cálculo das funções de ponderação  $P(z^{-1})$  e  $Q(z^{-1})$ :** Depois de executar as etapas 1 e 2 do procedimento a realização da terceira etapa acontece de maneira simples através da relação  $T = QA + PB$ . O resultado da resolução das Equações de Diophantine para cada um dos casos estudados pode também são mostrados individualmente a seguir.

**Etapa 4 - Cálculo do índice de desempenho GMV:** A última etapa das simulações tem como finalidade calcular o índice de desempenho GMV para o sistema em questão. Para a simulação dos sistemas se utiliza uma montagem similar ao que se tem no capítulo anterior. Porém desta vez, a aplicação das funções de custo também são implementadas conforme esquema apresentado na Figura 5.1. Com relação a modelagem do ruído vale ressaltar que o caso considerado para estas simulações é o caso mais geral onde o ruído aplicado não passa por filtragem e que se aproxima de um ruído branco. Os resultados obtidos através destas simulações são apresentados na próxima seção.

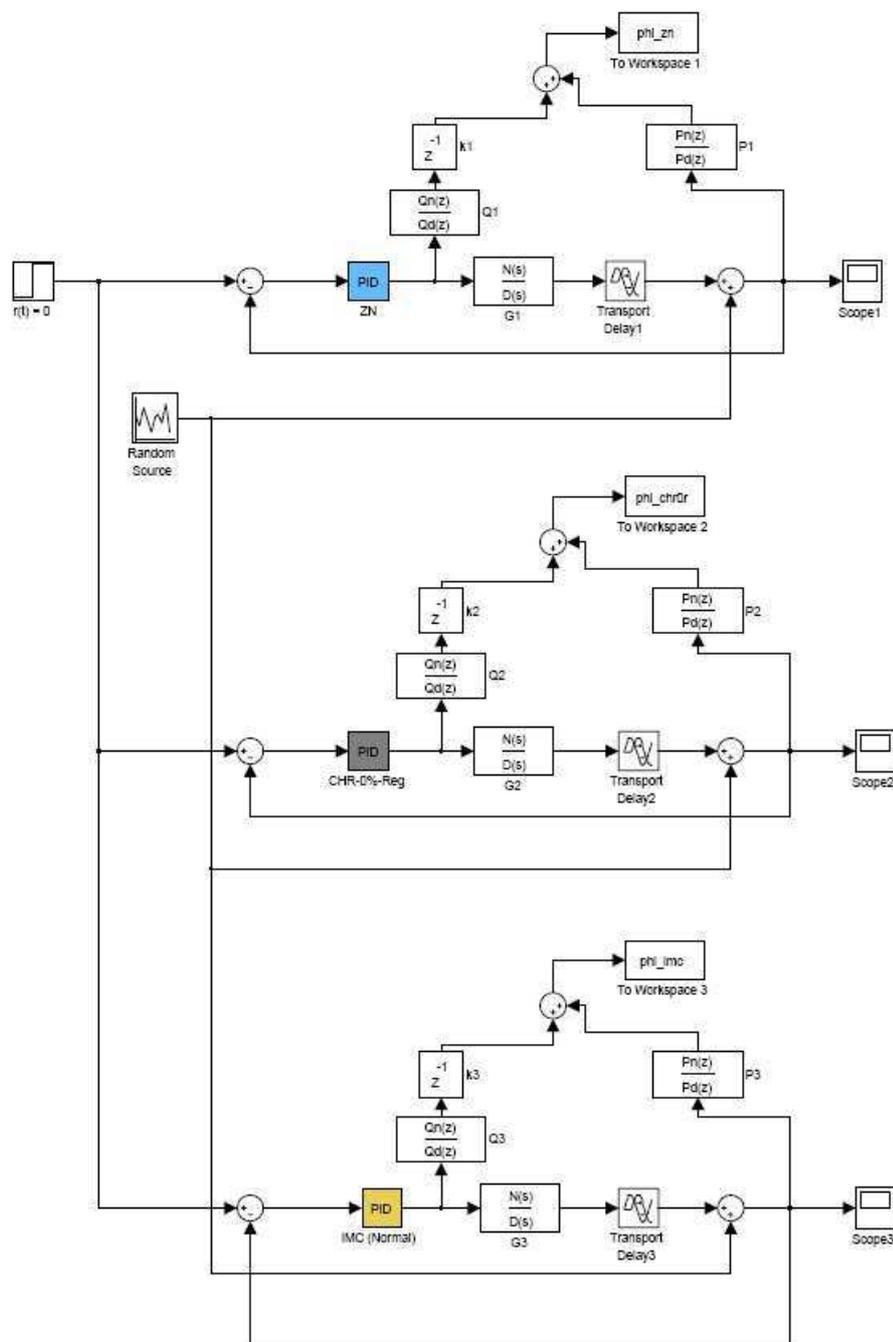


Figura 5.1: Representação em diagrama de blocos da simulação em malha fechada de processos com diferentes PID - Índice GMV

## 5.4 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nesta etapa do desenvolvimento são apresentados nesta seção. Uma demonstração detalhada do comportamento da variância em relação à mudança de dinâmica do sistema é feita através dos gráficos comparativos apresentados a seguir.

**Processo P1:** A dinâmica do sistema de referência para este processo é dada por  $0,8s + 1$  (malha fechada do controlador IMC calculado para este processo). O equivalente discreto para esta dinâmica é dado por  $T(z^{-1}) = 1 - 0,8825z^{-1}$ . O modelo discretizado do sistema é dado por  $A(z^{-1}) = 1 - 0,9131z^{-1}$  e  $B(z^{-1}) = 0,0869$ . As funções de custo encontradas e utilizadas na estimação do índice são dadas por  $P(z^{-1}) = 0,3856$  e  $Q(z^{-1}) = 0,9665$ . Os valores médios de índice de desempenho encontrados nas simulações são  $\eta_{imc} = 0,92$ ,  $\eta_{chr} = 0,64$  e  $\eta_{zn} = 0,41$ .

É possível observar o comportamento dos índices de desempenho em relação aos três diferentes sistemas de controle através dos gráficos da Figura 5.2. Na coluna da esquerda a resposta ao degrau de cada um dos controladores no domínio do tempo. Na coluna da direita são apresentados os dados da simulação da saída auxiliar em regime permanente na presença de ruído. Desta forma é possível observar a relação entre a amplitude da variância e o índice de desempenho que foi encontrado. Para cada uma das simulações em regime permanente foi utilizada um número de 1000 amostras.

**Processo P2:** A dinâmica do sistema de referência para este processo é dada por  $0,8s + 1$  (malha fechada do controlador IMC). O equivalente discreto para esta dinâmica é dado por  $T(z^{-1}) = 1 - 0,8825z^{-1}$ . O modelo discretizado do sistema é dado por  $A(z^{-1}) = 1 - 0,9092z^{-1}$  e  $B(z^{-1}) = 0,0698 + 0,0665z^{-1}$ . As funções de custo encontradas e utilizadas na estimação do índice são dadas por  $P(z^{-1}) = 0,2054$  e  $Q(z^{-1}) = 0,9857$ . Os valores médios de índice de desempenho encontrados nas simulações são  $\eta_{imc} = 0,94$ ,  $\eta_{chr} = 0,78$  e  $\eta_{zn} = 0,55$ .

É possível observar o comportamento dos índices de desempenho em relação aos três diferentes sistemas de controle através dos gráficos da Figura 5.3.

**Processo P3:** A dinâmica do sistema de referência para este processo é dada por  $0,83s + 1$  (malha fechada do controlador IMC). O equivalente discreto para esta dinâmica é dado por  $T(z^{-1}) = 1 - 0,8867z^{-1}$ . O modelo discretizado do sistema é dado por  $A(z^{-1}) = 1 - 0,9131z^{-1}$  e  $B(z^{-1}) = 0,0462 - 0,0407z^{-1}$ . As funções de custo encontradas

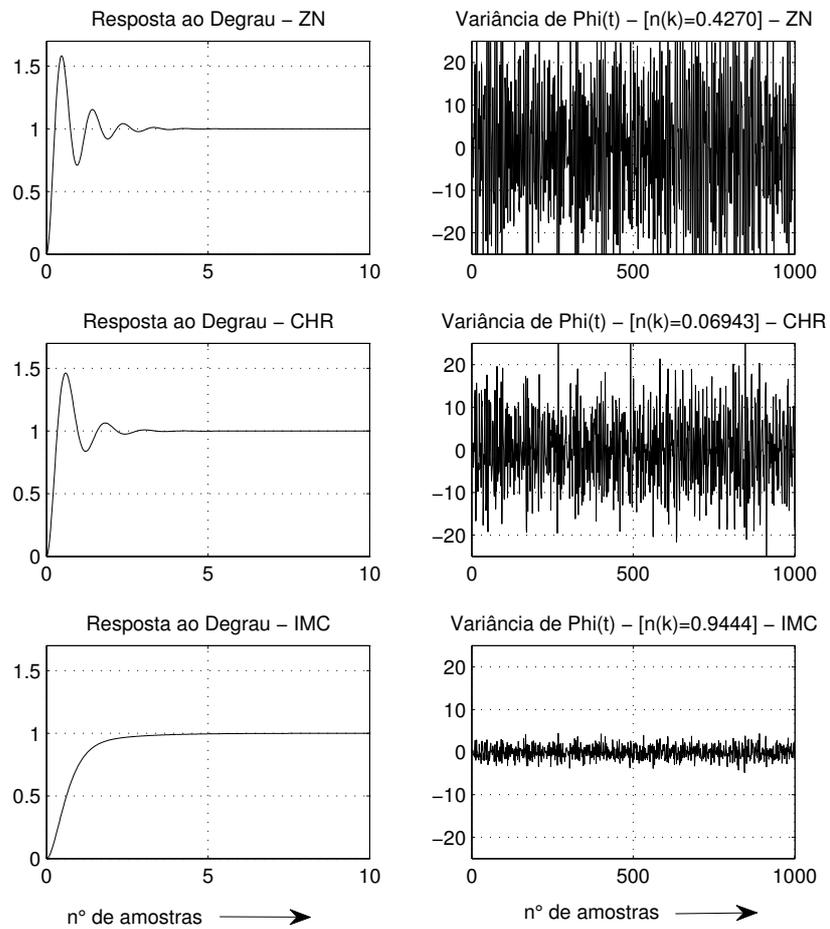


Figura 5.2: Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P1

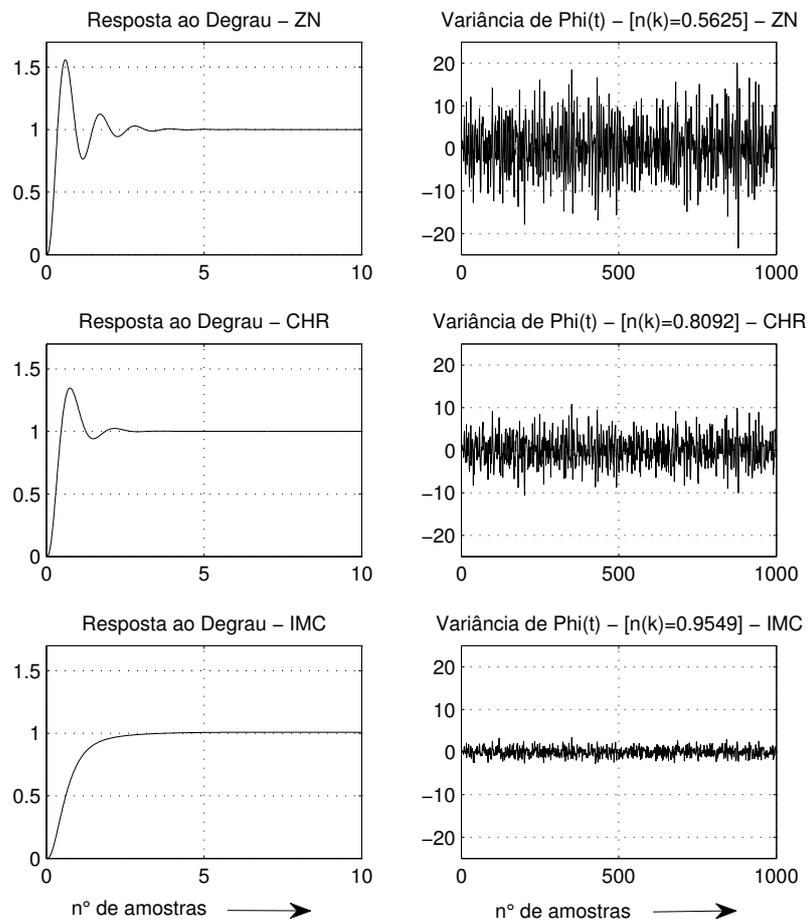


Figura 5.3: Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P2

e utilizadas na estimação do índice são dadas por  $P(z^{-1}) = 0,3185$  e  $Q(z^{-1}) = 0,9853$ . Os valores médios de índice de desempenho encontrados são  $\eta_{imc} = 0,94$ ,  $\eta_{chr} = 0,77$  e  $\eta_{zn} = 0,56$ .

É possível observar o comportamento dos índices de desempenho em relação aos três diferentes sistemas de controle através dos gráficos da Figura 5.4.

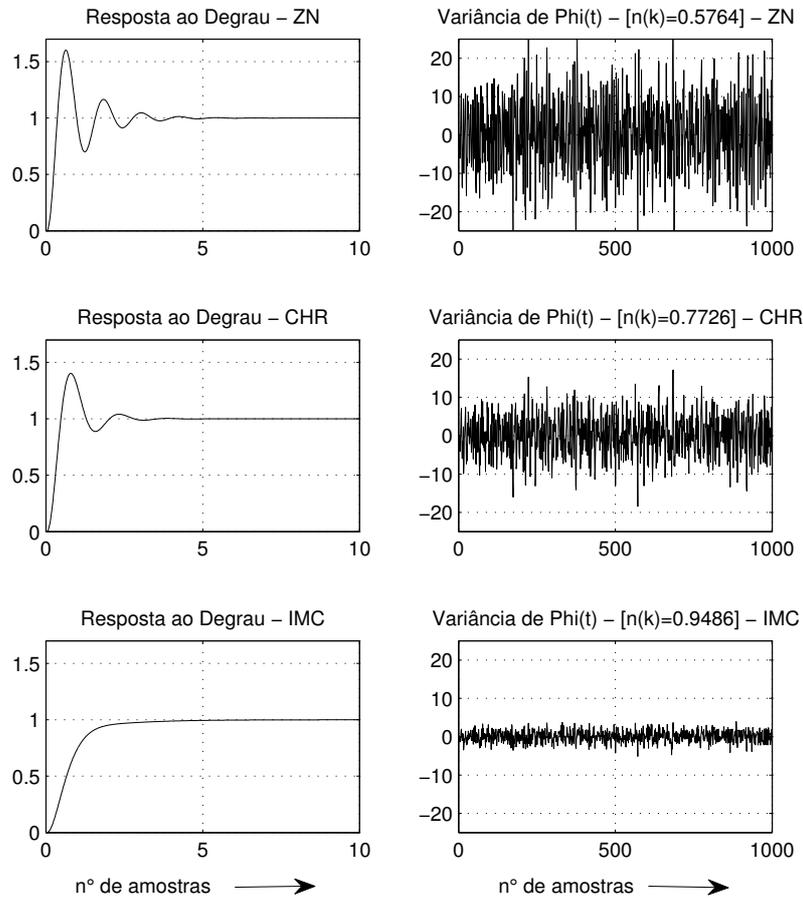


Figura 5.4: Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P3

**Processo P4:** A dinâmica do sistema de referência para este processo é dada por  $15,33s+1$  (malha fechada do controlador IMC). O equivalente discreto para esta dinâmica é dado por  $T(z^{-1}) = 1 - 0,9369z^{-1}$ . O modelo discretizado do sistema é dado por  $A(z^{-1}) = 1 - 0,9535z^{-1}$  e  $B(z^{-1}) = 0,0465$ . As funções de custo encontradas e utilizadas

na estimação do índice são dadas por  $P(z^{-1}) = 0,3744$  e  $Q(z^{-1}) = 0,9866$ . Os valores médios de índice de desempenho encontrados são  $\eta_{imc} = 0,92$ ,  $\eta_{chr} = 0,81$  e  $\eta_{zn} = 0,59$ .

É possível observar o comportamento dos índices de desempenho em relação aos três diferentes sistemas de controle através dos gráficos da Figura 5.5.

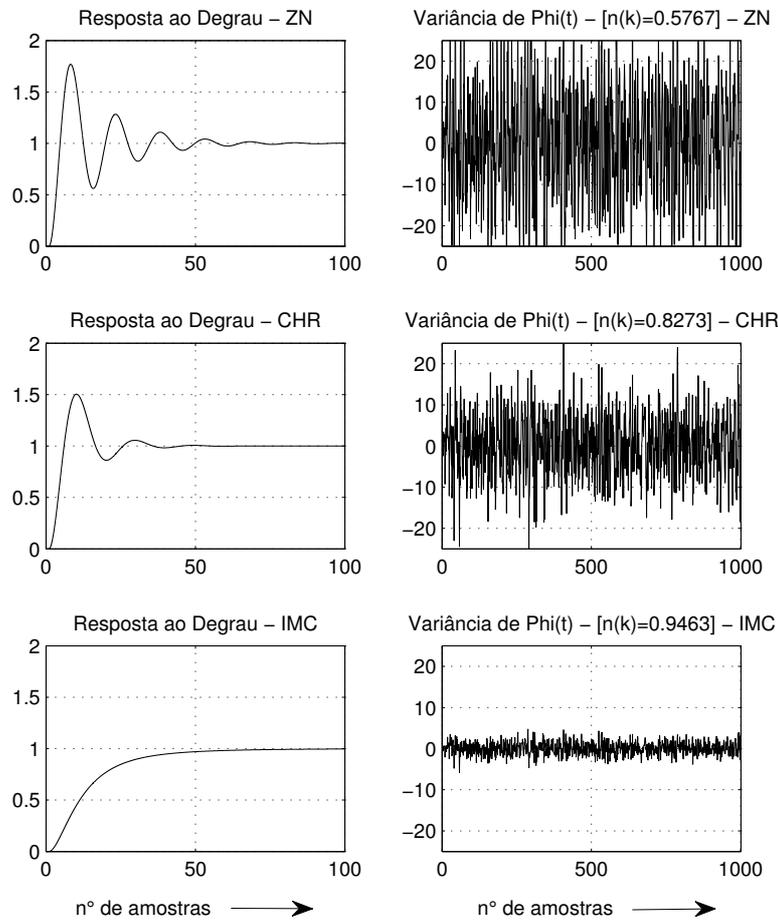


Figura 5.5: Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P4

**Processo P5:** A dinâmica do sistema de referência para este processo é dada por  $0,8667s + 1$  (malha fechada do controlador IMC). O equivalente discreto para esta dinâmica é dado por  $T(z^{-1}) = 1 - 0,8910z^{-1}$ . O modelo discretizado do sistema é dado por  $A(z^{-1}) = 1 - 0,9048z^{-1}$  e  $B(z^{-1}) = 0,0214$ . As funções de custo encontradas e

utilizadas na estimação do índice são dadas por  $P(z^{-1}) = 0,7127$  e  $Q(z^{-1}) = 0,9847$ . Os valores médios de índice de desempenho encontrados são  $\eta_{imc} = 0,94$ ,  $\eta_{chr} = 0,89$  e  $\eta_{zn} = 0,74$ .

É possível observar o comportamento dos índices de desempenho em relação aos três diferentes sistemas de controle através dos gráficos da Figura 5.6.

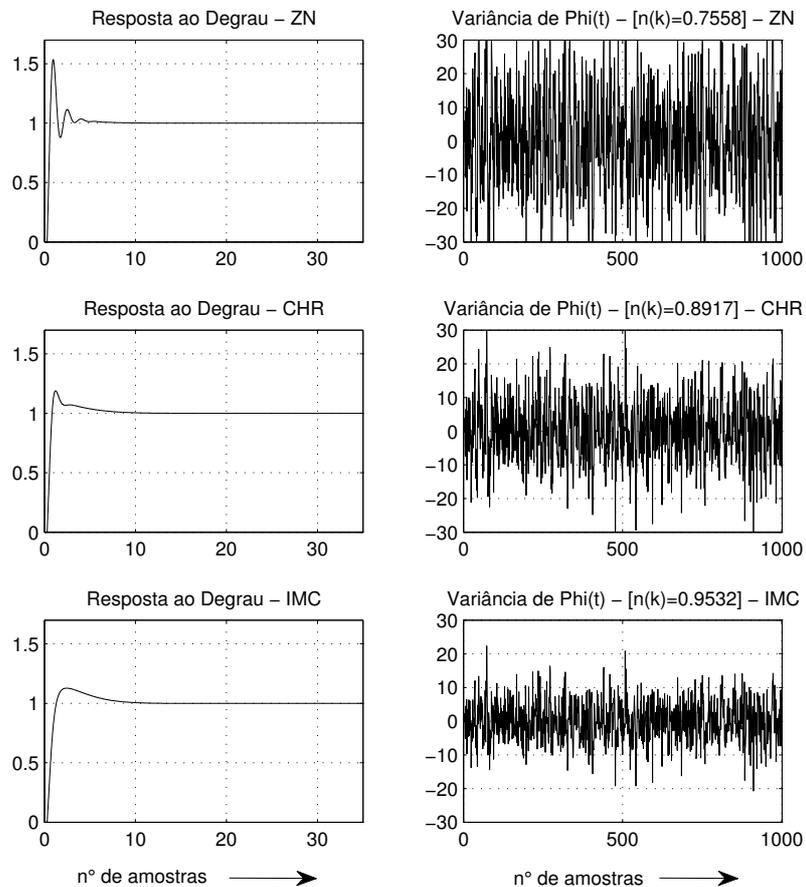


Figura 5.6: Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P5

**Processo P6:** A dinâmica do sistema de referência para este processo é dada por  $3,83s+1$  (malha fechada do controlador IMC). O equivalente discreto para esta dinâmica é dado por  $T(z^{-1}) = 1 - 0,7704z^{-1}$ . O modelo discretizado do sistema é dado por  $A(z^{-1}) = 1 - 0,8007z^{-1}$  e  $B(z^{-1}) = 0,0959 + 0,0286z^{-1}$ . As funções de custo encontradas

e utilizadas na estimação do índice são dadas por  $P(z^{-1}) = 0,2874$  e  $Q(z^{-1}) = 0,9724$ . Os valores médios de índice de desempenho encontrados são  $\eta_{imc} = 0,91$ ,  $\eta_{chr} = 0,82$  e  $\eta_{zn} = 0,67$ .

É possível observar o comportamento dos índices de desempenho em relação aos três diferentes sistemas de controle através dos gráficos da Figura 5.7.

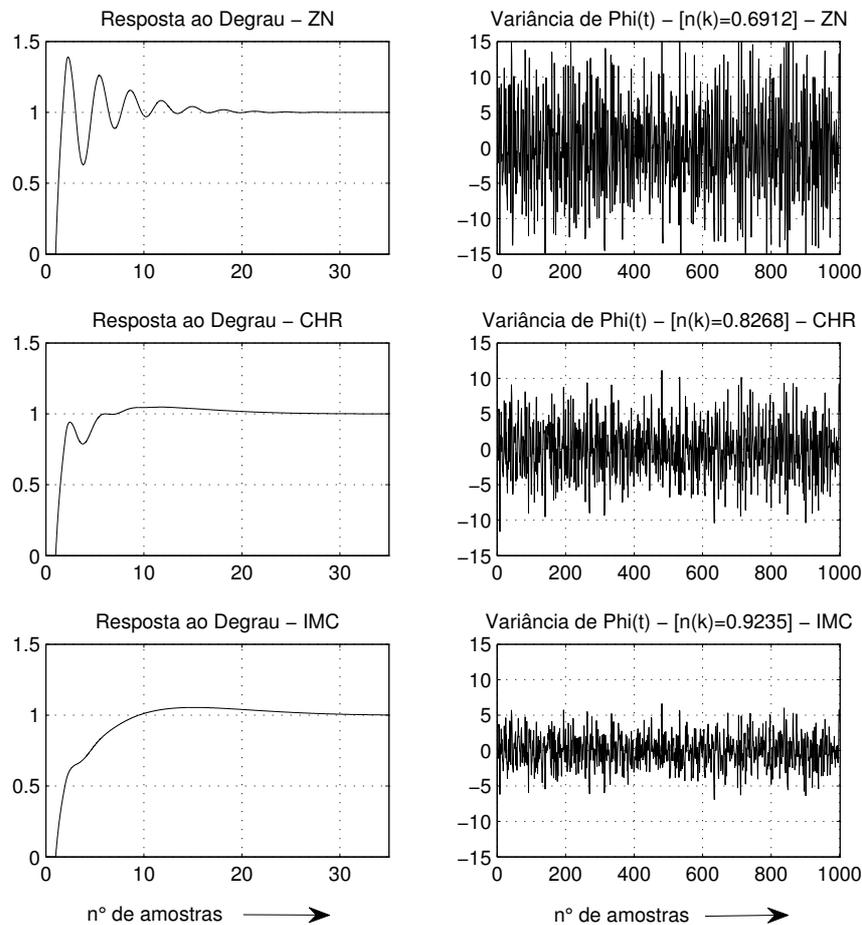


Figura 5.7: Comparação da resposta ao degrau e variância do sinal auxiliar do processo P6

O gráfico apresentado na Figura 5.8 tem a função de reunir os valores de índice GMV obtidos para cada um dos seis processos simulados com cada um dos três diferentes controladores.

Conforme esperado, para todos os processos os valores de índice na situação onde

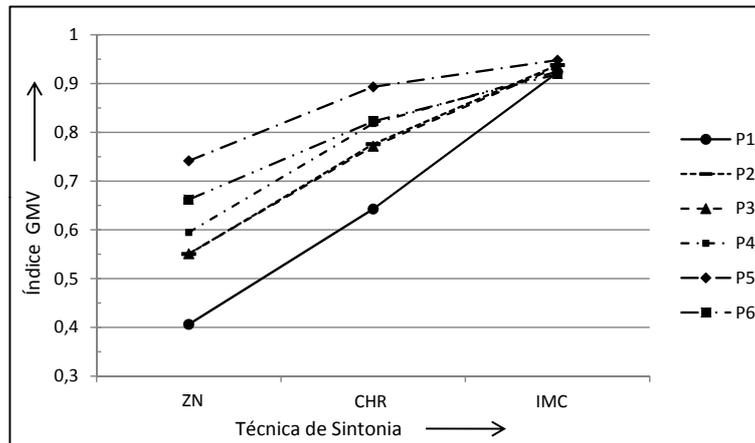


Figura 5.8: Gráfico comparativo de desempenho de técnicas de sintonia

se utiliza o controlador IMC ficam próximos do valor unitário. Este resultado era esperado já que a dinâmica de controle utilizada como referência é justamente a dinâmica do projeto do IMC. Os valores dos índices GMV obtidos não atingem exatamente o valor unitário já que existe uma perda por aproximação no momento da discretização do denominador da função de transferência contínua (que contém o termo  $\lambda$ ) para o denominador da função de transferência discreta (termo  $T(z^{-1})$ ).

Os valores dos índices GMV obtidos para os outros sistemas que utilizam controladores CHR e Ziegler e Nichols são menores que um. Além disso, quando mais distante da dinâmica do controlador usado como referência (o IMC neste caso) menor será o valor obtido para o índice GMV. Comparando a resposta ao degrau dos três controladores é possível concluir qual relação existe entre as dinâmicas dos controladores e seu desempenho.

## 5.5 Conclusões

Uma nova forma de abordar a questão de avaliação de desempenho de malhas foi apresentada em detalhes. Um estudo comparativo de diferentes técnicas de sintonia de controlador foi utilizado como base para o processo de validação do procedimento de avaliação apresentado. Os resultados obtidos na etapa de simulação corresponderam exatamente ao que se esperava na teoria, o que portanto valida a teoria proposta.

Conforme foi citado durante o texto, esta técnica de avaliação apresenta vantagens em relação ao que se encontra hoje na área de avaliação de malha. O principal destaque é a facilidade existente para se definir o sistema de referência com quem se deseja comparar. Esta nova abordagem que agora já está validada apresenta um potencial significativo de aplicação prática. Um próximo passo neste desenvolvimento é aplicar este novo procedimento em sistemas reais com o intuito de investigar seus aspectos práticos e também de consolidar sua utilização.

# Capítulo 6

## Conclusões

A motivação para desenvolver este trabalho foi resumida no capítulo inicial deste texto em duas principais ações: conhecer melhor a teoria de avaliação de malha de controle e sugerir novas abordagens de utilização desta teoria. Este trabalho chega ao final tendo cumprido estes objetivos.

A primeira etapa estudou o comportamento de diversos sistemas e controladores PID sob a perspectiva do controle de variância mínima (índice de Harris). O desempenho dos sistemas de controle estudados demonstrou uma relação direta entre variância do sinal de saída e parametrização do controlador PID. Foi possível concluir que quanto mais agressivo for o controlador, pior será a variância do sinal de saída do sistema e consequentemente pior será o índice de Harris correspondente.

Esta informação tem relevância no processo de sintonia de uma planta real e os responsáveis por ajustar as plantas industriais podem se valer desta análise no momento da sintonia. Sistemas que buscam níveis de variância menor devem levar em consideração que controlador menos agressivos tendem a melhores resultados de variância no regime permanente.

A segunda etapa complementou a investigação comparativa realizada na etapa anterior com os controladores PID. Porém, desta vez uma ótica diferente foi utilizada: teoria de avaliação de desempenho baseada em controle de variância mínima generalizado (índice GMV). O desenvolvimento deste segundo comparativo propiciou também a proposição de um importante resultado: uma nova abordagem para avaliação de de-

sempenho baseada em GMV usando a técnica de alocação de pólos. Esta nova abordagem foi traduzida em um procedimento que foi apresentado e validado neste trabalho de mestrado.

Para concluir, vale reiterar que esta nova abordagem de avaliação GMV usando alocação de pólos possui um grande potencial de aplicação prática. É importante que este novo procedimento seja aplicado em sistemas reais para que seus aspectos práticos sejam melhor investigados e para que sua utilização seja consolidada. Estas são as sugestões de trabalhos futuros.

# Referências Bibliográficas

- 1 TORRES, B. et al. Performance assessment of control loops - case studies. *IFAC - INTERNATIONAL FEDERATION OF AUTOMATIC CONTROL*, 2006.
- 2 HARRIS, T. J. Assessment of control loop performance. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 67, p. 856–861, out. 1989.
- 3 KEMPF, A. et al. Industrial application of a new control loop performance assessment tool. In: *2<sup>nd</sup> MERCOSUR CONGRESS ON CHEMICAL ENGINEERING / 4<sup>o</sup> MERCOSUR CONGRESS ON PROCESS SYSTEM ENGINEERING*. Costa Verde (Brasil), 2005.
- 4 JELALI, M. An overview of control performance assessment technology and industrial applications. *Control Engineering Practice*, v. 14, p. 441–466, 2006.
- 5 AGUIRRE, L. *Enciclopédia de automática: controle e automação*. São Paulo, Brasil: Editora Blucher, 2007.
- 6 OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. São Paulo, Brasil: Pearson Prentice Hall, 2003.
- 7 ÅSTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. *PID controllers: theory, design and tuning*. United States of America: Instrument Society of America, 1995.
- 8 ÅSTRÖM, K. *Introduction to stochastic control theory*. New York, New York: Academic Press, INC, 1970.
- 9 ÅSTRÖM, K.; WITTENMARK, B. On self tuning regulators. *Automatica*, v. 9, p. 185–199, 1973.

- 10 CLARKE, D.; GAWTHROP, P. Self-tuning controller. *Proceedings IEE*, v. 122, n. 9, p. 929–934, set. 1975.
- 11 WELLSTEAD, P.; PRAGER, D.; ZANKER, P. Pole assignment self-tuning regulator. *Proceedings IEE*, v. 126, n. 8, p. 781–787, ago. 1979.
- 12 ALLIDINA, A.; HUGHES, F. Generalised self-tuning controller with pole assignment. *Proceedings IEE*, v. 127, n. 1, p. 13–18, jan. 1980.
- 13 GRIMBLE, M. Controller performance benchmarking and tuning using generalised minimum variance control. *Automatica*, v. 38, p. 2111–2119, 2002.
- 14 FAN, J.; ORTMAYER, T. Optimal design of gmv self-tuning controllers. *IEEE*, p. 331’–335, 1989.
- 15 DESBOROUGH, L.; HARRIS, T. J. Performance assessment measures for univariate feedback control. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 70, p. 1186–1197, dez. 1992.
- 16 ERIKSSON, P.; ISAKSSON, A. Some aspects of control loop performance monitoring. *IEEE*, p. 1029–1034, 1994.
- 17 HUANG, B.; SHAH, S.; KWOK, E. Good, bad or optimal? performance assessment of multivariable process. *Automatica*, v. 33, n. 6, p. 1175–1183, 1997.
- 18 THORNHILL, N. F. Performance assessment and diagnosis of refinery control loops. *AIChE Symposium Series*, n. 320, p. 373–379, jul. 1998.
- 19 YAMAMOTO, T.; INOUE, A.; SHAH, S. Generalised minimum variance self-tuning pole-assignment controller with a pid structure. *Proceeding IEEE*, p. 125–130, ago. 1999.
- 20 HUANG, B.; SHAH, S. *Performance assessment of control loops*. London, United Kingdom: Springer, 1999.

- 21 HUANG, B. A pragmatic approach towards assessment of control loop performance. *International journal of adaptive control and signal processing*, p. 589–608, 2003.
- 22 MAJECKI, P.; GRIMBLE, M. Gmv and restricted-structure gmv controller performance assessment - multivariable case. *Proceedings American Control Conference*, p. 697–702, jul. 2004.
- 23 TORRES, B. et al. Aplicação de software dedicado para diagnóstico de malhas de controle, sintonia e redução de variabilidade de processos. In: 4° CONGRESSO INTERNACIONAL DE AUTOMAÇÃO, SISTEMAS E INSTRUMENTAÇÃO - ISA SHOW 2004. São Paulo (Brasil), 2004.
- 24 OHNISHI, Y. et al. Design of a pid controller with a performance-driven adaptive mechanism. *Proceedings American Control Conference*, p. 1359–1364, jul. 2007.
- 25 ORDYS, A.; UDUEHI, D.; JOHNSON, M. *Process control performance assessment: from theory to implementation*. London, United Kingdom: Springer, 2007.
- 26 YAMAMOTO, T. et al. Design and industrial applications of a control performance assessment based pid controller. *IFAC*, p. 729–734, jul. 2009.
- 27 YU, Z. et al. Multivariable control performance assessment based on generalized minimum variance benchmark. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, p. 86–94, 2010.
- 28 CAMPOS, M. C.; TEIXEIRA, H. *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. São Paulo, Brasil: Edgard Blucher, 2006.
- 29 WELLSTEAD, P.; ZARROP, M. *Self-tuning systems: control and signal processing*. West Sussex, England: John Wiley and Sons Ltd, 1991.
- 30 SKOGESTAD, S. Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning. *Journal of Process Control*, v. 13, p. 291–309, 2003.

- 31 CORRIPIO, A. *Tuning of industrial control systems*. United States of America: Instrument Society of America, 2001.
- 32 KEMPF, A. de O. *Avaliação de Desempenho de Malhas de Controle*. Dissertação — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- 33 GRIMBLE, M. J.; MAJECKI, P. Weighting selection for controller benchmarking and tuning. *Industrial Control Center Report*, 2004.
- 34 ÅSTRÖM, K.; WITTENMARK, B. *Computer-Controlled Systems*. United States of America: Prentice Hall, 1997.