



Universidade Federal da Bahia
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SINTONIA ÓTIMA: UMA ABORDAGEM SISTEMÁTICA BASEADA EM REQUISITOS DE DESEMPENHO

RAFAEL REBOUÇAS DE ARAUJO

2018



Universidade Federal da Bahia
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica



SINTONIA ÓTIMA: UMA ABORDAGEM SISTEMÁTICA BASEADA EM REQUISITOS DE DESEMPENHO

RAFAEL REBOUÇAS DE ARAUJO

Orientador: Prof. Dr. Tito Luís Maia Santos
Co-orientador: Prof. Dr. José Mário Araújo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFBA (área de concentração: Controle e Automação) como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Tito Luís Maia Santos - UFBA
Prof. Dr. José Mário Araújo - IFBA
Prof. Dr. Bernardo Ordoñez - UFBA
Prof. Dr. Carlos Eduardo Trabuco Dorea - UFRN
Prof. Dra. Márcia Lissandra Machado Prado - UEFS

Salvador
2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Araújo, Rafael Rebouças de
SINTONIA ÓTIMA: UMA ABORDAGEM SISTEMÁTICA BASEADA EM REQUISITOS
DE DESEMPENHO / Rafael Rebouças de Araújo -- Salvador, 2018.
90 f.: il

Orientador: Prof. Dr. Tito Luís Maia Santos.
Coorientador: Prof. Dr. José Mário Araújo.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia Elétrica) --
Universidade Federal da Bahia, Politécnica, 2018.

1. sintonia ótima. 2. requisitos de desempenho. 3. multi-malha.
4.algoritmo genético. I. Santos, Tito Luís Maia. II. Araújo,
José Mário III. Título.

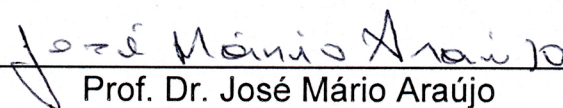
Sintonia ótima: uma abordagem sistemática baseada em requisitos de desempenho

Rafael Rebouças de Araujo

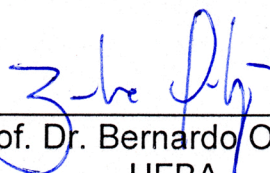
Dissertação de Mestrado aprovada em 21 de setembro de 2018 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:



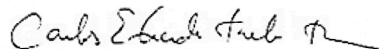
Prof. Dr. Tito Luís Maia Santos
Orientador – UFBA



Prof. Dr. José Mário Araújo
Coorientador - IFBA



Prof. Dr. Bernardo Ordoñez
UFBA



Prof. Dr. Carlos Eduardo Trabuco Dórea
UFRN



Prof. Dr. Marcia Lissandra Machado Prado
UEFS

Para Iara, Herbert, Lu e Nani.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Tito Luís Maia Santos e ao professor Dr. José Mário Araújo, pela orientação, valiosas discussões e todo o apoio dado para a realização deste trabalho.

A minha esposa, Ana Luisa, pelo companheirismo, apoio incondicional, incentivos, risadas e compreensão nas intermináveis horas de simulações e de composição desta dissertação.

Aos 13, amigos sempre presentes, não importa a distância.

A Braskem, especialmente aos líderes e colegas da Automação, pelo encorajamento e estímulo, promovendo sempre um ambiente propício a novas ideias, desafios e problemas a serem solucionados.

A todos que torceram, criticaram, ajudaram ou de alguma forma fizeram parte desta conquista.

Salvador, setembro de 2018.
Rafael Rebouças de Araujo.

*“A mind needs books as a sword needs a whetstone, if it
is to keep its edge.”*
(George R.R. Martin)

RESUMO

Neste trabalho propõe-se um procedimento sistemático de sintonia ótima de controladores PID que seja voltado ao atendimento das especificidades dos variados processos existentes. Para tanto, requisitos de desempenho podem ser combinados com o intuito de definir um critério que efetivamente esteja associado às demandas de um processo. A utilização de regras universais de sintonia pode ser muitas vezes inadequada, visto que cada problema de controle possui determinadas particularidades e requisitos de desempenho. Por outro lado, métodos direcionados a problemas muito específicos potencialmente reduzem a capacidade de adaptação. O conhecimento do processo é fundamental para garantir a escolha de um bom critério ou conjunto de critérios a serem otimizados no que diz respeito à definição da sintonia. Desta forma, propõe-se uma formulação sistemática de sintonia ótima para diversos tipos de problemas, com um ou mais controladores (e.g., controle cascata), através da definição de um índice de desempenho flexível, simples e que possa traduzir de forma satisfatória requisitos de cada processo em estudo. Tendo em vista a generalidade do critério a ser adotado, optou-se por utilizar uma técnica heurística de otimização (algoritmo genético) que não requer a derivada da função custo. Sem perda de generalidade, o algoritmo genético foi escolhido dada a flexibilidade e adaptabilidade para a aplicação em diversos tipos de problemas: com múltiplos objetivos, não-convexos, com restrições, lineares ou não-lineares, complexos ou simples. A aplicação do método é ilustrada por meio de estudo de casos de simulação motivados por alguns problemas típicos encontrados em plantas industriais.

Palavras-chave: sintonia ótima, requisitos de desempenho, multi-malha, algoritmo genético.

ABSTRACT

This work proposes a systematic procedure for optimal tuning of PID controllers that is oriented towards meeting the specific issues of the various existing processes. For this purpose, performance requirements can be combined in order to define a criterion that is effectively associated with the demands of a process. The use of universal tuning rules can often be inadequate, since each control problem has certain peculiarities and performance requirements. On the other hand, methods targeting very specific problems potentially reduce adaptability. Knowledge of the process is fundamental to guarantee the choice of a good criterion or set of rules to be optimized with respect of the tuning process. Therefore, a systematic formulation of optimum tuning for several types of problems is proposed, with one or more controllers (e.g., cascade control), by defining a simple, flexible performance index that can satisfactorily translate the requirements of each process under study. By considering the generality of the criterion to be adopted, it was decided to use a heuristic optimization technique (genetic algorithm), which does not require the derivative of the cost function. Without loss of generality, the genetic algorithm was chosen given the flexibility and adaptability to the application in several types of problems: with multiple objectives, nonconvex, with constraints, linear or nonlinear, complex or straightforward. The use of the method is illustrated by means of simulation case studies motivated by some typical issues which are found in industrial plants.

Keywords: optimum tuning, performance requirements, multi-loop, genetic algorithm.

Lista de Figuras

2.1	Razão de declínio (B/A).	7
2.2	Processos típicos com respostas ao degrau essencialmente monotônicas.	12
2.3	Resposta ao degrau unitário e procedimento utilizado para determinar os parâmetros K_p , θ , τ e K_v	13
2.4	Curva de reação do processo.	16
2.5	Comparação entre o modelo original $G(s)$ e o identificado $G_0(s)$	18
2.6	Comparação entre $G_2(s)$ e os modelos aproximados $G_{2a}(s)$ e $G_{2b}(s)$	20
4.1	Fluxograma simplificado para execução do GA.	31
4.2	Formato de representação real definido para cada indivíduo.	32
4.3	Exemplos de tipos de <i>crossover</i> entre dois indivíduos representados por cadeias de bits.	34
4.4	Distribuição da mutação Gaussiana para cada gene.	35
5.1	Controle de nível em cascata com vazão.	43
5.2	Teste degrau realizado para identificação dos modelos.	44
5.3	Documentação de projeto do vaso.	48
5.4	Respostas obtidas para as sintonias conforme a Tabela 5.3.	49
5.5	Respostas obtidas para as sintonias conforme a Tabela 5.6.	51
5.6	Respostas obtidas para as sintonias conforme a Tabela 5.8.	52
5.7	Respostas obtidas para as sintonias variando τ_c	53
5.8	Respostas obtidas utilizando-se os três métodos apresentados.	54
5.9	Respostas obtidas para a sintonia conforme a Tabela 5.12.	56
5.10	Evolução dos parâmetros do algoritmo genético.	57
5.11	Comparação entre as sintonias das Tabelas 5.12 e 5.13.	58
5.12	Comparação entre as 3 sintonias apresentadas.	59
5.13	Análise de sensibilidade para a sintonia SOID (sint.2).	60
5.14	Análise de sensibilidade para a sintonia A-MIGO.	61
5.15	Análise de sensibilidade para a sintonia ZN.	61
5.16	Análise de sensibilidade para a sintonia SIMC.	61
5.17	Respostas obtidas para os quatro métodos apresentados.	62
5.18	Malha de controle de pressão do coletor de vapor.	64
5.19	Identificação dos parâmetros K_v e L	66

5.20	Respostas obtida para a sintonia PI, conforme a Tabela 5.17.	67
5.21	Respostas obtida para as sintonias da Tabela 5.19.	69
5.22	Respostas obtidas para as sintonias conforme a Tabela 5.21.	70
5.23	Respostas obtidas para as sintonias conforme a Tabela 5.23.	71
5.24	Respostas obtidas para as sintonias variando τ_c	72
5.25	Respostas obtidas utilizando-se os três métodos apresentados.	73
5.26	Respostas obtidas para a sintonia conforme a Tabela 5.27.	75
5.27	Evolução dos parâmetros do algoritmo genético.	76
5.28	Respostas obtidas para a sintonia conforme a Tabela 5.29.	77
5.29	Respostas obtidas para a sintonia conforme a Tabela 5.31.	77
5.30	Análise de sensibilidade para a sintonia SOID (sint.3).	78
5.31	Análise de sensibilidade para a sintonia MIGO.	79
5.32	Análise de sensibilidade para a sintonia ZN.	79
5.33	Análise de sensibilidade para a sintonia SIMC.	80
5.34	Respostas obtidas para os quatro métodos apresentados.	80

Lista de Tabelas

2.1	Definição do parâmetro P para controladores PI e processos IFOPDT.	14
2.2	Definição do parâmetro T_I para controladores PI e processos IFOPDT.	14
2.3	Definição dos parâmetros P e T_I para controladores PI e processos FOPDT.	14
2.4	Definição dos parâmetros P e T_I para controladores PI e processos integradores.	14
2.5	Método A-MIGO para controladores PID.	14
2.6	Método A-MIGO para controladores PID e processos integradores.	15
2.7	Método Ziegler-Nichols para processos FOPDT.	17
2.8	Método Ziegler-Nichols para processos IFOPDT.	17
2.9	Método SIMC para processos FOPDT, IFOPDT e integradores.	21
4.1	Parâmetros de ajuste do GA utilizado.	40
5.1	Informações do processo.	45
5.3	Parâmetros de sintonia obtidos pelo método A-MIGO.	48
5.4	Cálculo de índices de desempenho para o nível (A-MIGO).	49
5.5	Cálculo de índices do esforço de controle (A-MIGO).	49
5.6	Parâmetros de sintonia obtidos pelo método ZN.	50
5.7	Cálculo de índices de desempenho para o nível e esforço de controle (ZN).	51
5.8	Parâmetros de sintonia obtidos pelo método SIMC.	52
5.9	Cálculo de índices para o nível e esforço de controle (SIMC).	53
5.10	Cálculo de índices para o nível e esforço de controle variando τ_c (SIMC).	53
5.11	Comparação entre os três métodos apresentados.	54
5.12	Parâmetros obtidos pelo método da sintonia ótima com ID normalizado.	56
5.13	Parâmetros de sintonia acrescentando pico da PV no ID.	58
5.14	Parâmetros de sintonia acrescentando ISE no ID.	59
5.15	Métricas de desempenho das três sintonias avaliadas.	59
5.16	Comparação entre os quatro métodos apresentados.	62
5.17	Parâmetros de sintonia obtidos pelo método A-MIGO.	67
5.18	Cálculo das métricas para a pressão e esforço de controle (A-MIGO).	67
5.19	Parâmetros de sintonia obtidos pelo método MIGO.	69

5.20	Cálculo das métricas para a pressão e esforço de controle (MIGO).	69
5.21	Parâmetros de sintonia obtidos pelo método ZN.	70
5.22	Cálculo das métricas para a pressão e esforço de controle (ZN).	70
5.23	Parâmetros de sintonia obtidos pelo método SIMC.	71
5.24	Cálculo de métricas de desempenho (SIMC).	71
5.25	Cálculo de métricas de desempenho variando-se τ_c (SIMC).	72
5.26	Comparação entre os três métodos apresentados.	73
5.27	Parâmetros de sintonia (SOID - sintonia 1).	74
5.28	Cálculo de índices para a pressão e esforço de controle (SIMC).	75
5.29	Parâmetros de sintonia obtidos (SOID - sintonias 1 e 2).	75
5.30	Cálculo de índices de desempenho (SOID - sintonias 1 e 2).	76
5.31	Parâmetros de sintonia obtidos (SOID - sintonias 1 e 2).	78
5.32	Cálculo de índices de desempenho (SOID - sintonias 1, 2 e 3).	78
5.33	Comparação entre os quatro métodos apresentados.	81

Nomenclatura

SIGLA	SIGNIFICADO
APC	Do inglês, <i>Advanced Process Control</i>
FOPDT	Do inglês, <i>First Order Plus Dead Time</i>
GA	Do inglês, <i>Genetic Algorithm</i>
IACE	Do inglês, <i>Integrated Absolute Control Effort</i>
IAE	Do inglês, <i>Integral Absolute Error</i>
IE	Do inglês, <i>Integral Error</i>
IFOPDT	Do inglês, <i>Integral plus First Order Plus Dead Time</i>
IMC	Do inglês, <i>Internal Model Control</i>
ISE	Do inglês, <i>Integral Squared Error</i>
ITAE	Do inglês, <i>Integral Time-weighted Absolute Error</i>
ITSE	Do inglês, <i>Integral Time-weighted Squared Error</i>
MIMO	Do inglês, <i>Multiple Input Multiple Output</i>
PID	Controlador com ações Proporcional, Integral e Derivativa
SISO	Do inglês, <i>Single Input Single Output</i>
SOPDT	Do inglês, <i>Second Order Plus Dead Time</i>
VHS	Do inglês, <i>Very High Pressure</i>

Índice

Resumo	x
Abstract	xi
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiv
Nomenclatura	xvi
Índice	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Motivação	2
1.3 Organização do trabalho	3
2 TRABALHOS RELACIONADOS	5
2.1 Approximate M-constrained Integral Gain Optimization (A-MIGO) .	11
2.2 Ziegler-Nichols	15
2.3 Skogestad Internal Model Control (SIMC)	17
3 SINTONIA ÓTIMA BASEADA EM REQUISITOS DE DESEMPENHO	23
3.1 Definição do problema	23
3.2 Índice de desempenho	25
3.3 Otimização	27
4 ALGORITMO GENÉTICO	29
4.1 Indivíduos e genes	30
4.2 Função objetivo	32
4.3 Cruzamento ou <i>Crossover</i>	33
4.4 Mutação	34
4.5 Seleção	37

4.6	Restrições	38
4.7	Parâmetros	39
4.8	Observações finais	40
5	ESTUDO DE CASOS	42
5.1	Controle de nível em cascata com vazão	42
5.1.1	Modelo do processo	44
5.1.2	Modelo do controlador	46
5.1.3	Sintonia utilizando o método A-MIGO	47
5.1.4	Sintonia utilizando o método ZN	50
5.1.5	Sintonia utilizando o método SIMC	51
5.1.6	Sintonia ótima baseada no ID normalizado	54
5.1.7	Análise de sensibilidade	59
5.1.8	Observações finais	62
5.2	Controle de pressão de um coletor de vapor através da geração de vapor em caldeira	64
5.2.1	Modelo do processo e controlador	65
5.2.2	Sintonia utilizando o método A-MIGO	65
5.2.3	Sintonia utilizando o método ZN	69
5.2.4	Sintonia utilizando o método SIMC	70
5.2.5	Sintonia ótima baseada no ID normalizado	72
5.2.6	Análise de sensibilidade	78
5.2.7	Observações finais	80
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
6.1	Perspectivas de trabalhos futuros	83
A	Cálculo das parcelas do ID	85

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O problema de sintonia ótima, sem um procedimento sistemático, não é simples mesmo quando se considera um algoritmo de controle PID com apenas três ou quatro parâmetros (Skogestad 2003), sendo esta a estrutura mais adotada em plantas industriais (Desborough & Miller (2002), Visioli (2001), Åström & Hägglund (1995)). Além disto, problemas de controle regulatório são largamente encontrados na indústria e configuram um dos mais importantes desafios da área (Alfaro et al. (2010), Åström & Hägglund (2004), Morari & Zafiriou (1989)). A noção de otimalidade, por sua vez, está relacionada diretamente com o desempenho da sintonia quando avaliada sob determinado critério escolhido, ou seja, uma vez encontrados os parâmetros ótimos, estes trazem o melhor desempenho possível para aquele determinado índice. Por outro lado, definir um critério inadequado pode induzir a uma sintonia ótima porém insatisfatória, de forma que o critério utilizado cumpre um papel essencial no que se refere ao controle ótimo.

Em muitos casos, o problema de otimização possui múltiplos objetivos, visto que se deseja obter uma solução que apresente um bom compromisso entre diversos requisitos. Neste contexto, a utilização de técnicas heurísticas de otimização tem se mostrado como uma alternativa com bom potencial visto que estas podem ser aplicadas com sucesso na solução de uma grande variedade de problemas (caso servo e regulatório; diferentes tipos de processos; requisitos de desempenho distintos; dentre outros). Desta forma, sem perda de generalidade, neste trabalho utilizou-se algoritmos genéticos (ou do inglês GA, *genetic algorithms*) para a solução do problema de otimização. GA não requerem informações sobre o gradiente da função

custo, podem ser eficientes independentemente da natureza da função objetivo e das restrições envolvidas e são consideradas técnicas de otimização global (Marler & Arora (2004)). Ademais, algoritmos genéticos podem lidar naturalmente com problemas multi-objetivo, não-lineares, não-convexos, com restrições, dentre outras características, bem como tendem a encontrar soluções Pareto-ótimas (considerando os múltiplos critérios combinados de forma aditiva, adotando-se fatores de ponderação).

1.1 Objetivos

O presente trabalho propõe um método sistemático de sintonia ótima através da definição de um índice de desempenho orientado aos requisitos qualitativos característicos de cada processo, bem como facilmente adaptável. Nesta abordagem, as sintonias propostas são direcionadas aos requisitos qualitativos de desempenho da planta, tais como picos na variável de processo, agressividade do sinal de controle, tempo de resposta, amortecimento, dentre outros, relacionando-os com parcelas pré-determinadas deste índice. Desta forma, as especificidades dos processos são tratadas de forma implícita em decorrência da escolha da combinação destes índices, que por sua vez irão compor a função objetivo do problema. O método proposto tem grande flexibilidade dada a diversidade de combinações possíveis. Ademais, a sistemática permite a sintonia de estratégias multi-malhas simultaneamente, o que possibilita uma aplicação em uma quantidade ainda maior de problemas, sem a necessidade de tratar separadamente as sintonias das diversas malhas envolvidas.

O método permite ainda a inclusão de restrições relacionadas à robustez, a exemplo da margem de fase e margem de ganho mínimas, máximo valor da função de sensibilidade e máximo valor da função complementar de sensibilidade. Tais restrições são importantes no sentido de garantir uma operação segura e aceitável do controle, por exemplo, frente a incertezas de modelos, não-linearidades e estabilidade.

1.2 Motivação

Até os dias atuais, estruturas PID são largamente utilizadas e relevantes para o controle de processos, representando a maioria dos controladores existentes na

indústria. Ainda assim, diversos trabalhos demonstram que um percentual relevante destes ainda apresentam desempenhos aquém do esperado ou até mesmo considerados ruins (Ender (1993), Bialkowski (1993), Desborough & Miller (2002)). Em Bauer et al. (2016), por exemplo, foi constatado ainda que um dos principais problemas de malhas de controle na indústria está relacionado a parâmetros de sintonia inadequados.

Desta forma, a sistematização de um método de sintonia que traga bons resultados, seja flexível e que relacione de forma simples requisitos qualitativos do processo pode ser vantajosa. A possibilidade de lidar com problemas multi-malhas pode ser outro facilitador no processo de sintonia, eliminando algumas etapas até a obtenção do resultado final. Além disto, a tentativa de estabelecimento de um paralelo qualitativo entre os objetivos e limitações do controle e um índice de desempenho facilmente ajustável possivelmente trará uma maior clareza ao procedimento de sintonia e aos resultados obtidos. Neste cenário, a experiência dos engenheiros responsáveis pela produção ou dos operadores do processo em questão podem ser correlacionadas com os índices utilizados de maneira objetiva, mesmo que estes não conheçam os procedimentos de projeto de forma aprofundada.

Neste contexto, a utilização de técnicas heurísticas de otimização - tais como algoritmos genéticos - se mostram adequadas e com atributos apropriados para atender às necessidades do problema em questão. Deve-se notar ainda que, com o avanço da tecnologia trazendo um maior desempenho dos sistemas computacionais, métodos anteriormente impraticáveis de serem conduzidos (por exemplo, por conta de tempos de execução muitas vezes inviáveis) hoje são possíveis de serem implementados até mesmo em computadores pessoais, viabilizando a utilização de técnicas heurísticas de otimização para resolução deste tipo de problema.

1.3 Organização do trabalho

A presente dissertação está ordenada da seguinte forma:

- **Capítulo 1: Introdução**

A introdução traz uma visão geral do tema da dissertação bem como estabelece um paralelo entre problemas atuais e a relevância do trabalho proposto.

Por fim, apresentam-se as motivações para o desenvolvimento do trabalho e a organização dos capítulos.

- **Capítulo 2: Trabalhos relacionados**

O segundo capítulo tem como objetivo contextualizar o tema abordado assim como elucidar possíveis contribuições deste trabalho no seu campo de estudo. O capítulo apresenta os avanços na área através da análise de diversos trabalhos relevantes, trazendo discussões sobre as características de cada um, pontos fortes e desvantagens. Escolheu-se ainda três abordagens especialmente relevantes neste campo para um maior aprofundamento e posterior comparação entre os resultados destes com o método proposto nesta dissertação.

- **Capítulo 3: Sintonia ótima baseada em requisitos de desempenho**

A sistemática e aspectos do método proposto são descritos neste capítulo, desde a definição do problema, levantamento de dados necessários sobre o processo e requisitos de desempenho, composição e ajustes dos índices e a especificação do problema de otimização.

- **Capítulo 4: Algoritmo genético**

No quarto capítulo é apresentada uma técnica de algoritmo genético, descrevendo os principais conceitos envolvidos e evidenciando como a utilização de técnicas heurísticas de otimização pode ser uma boa escolha para a aplicação da sistemática proposta neste trabalho.

- **Capítulo 5: Ilustração do método**

O quinto capítulo ilustra a aplicação detalhada da sistemática desenvolvida em exemplos de problemas de controle, estabelecendo ainda uma comparação com outros trabalhos relevantes e trazendo discussões acerca das vantagens de desvantagens de cada um.

- **Capítulo 6: Considerações finais**

Por fim, traz-se uma análise crítica dos resultados obtidos e contribuições deste trabalho, assim como são indicadas possíveis perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

TRABALHOS RELACIONADOS

Controladores PID representam uma parcela significativa das estratégias de controle regulatório nas indústrias. Ainda que estratégias mais elaboradas sejam utilizadas como, por exemplo, controle preditivo, MPC econômico (*Model-based Predictive Control*) ou algoritmos envolvendo técnicas de *deep learning*, normalmente estas são associadas a camadas superiores, enviando referências para a camada de controle regulatório baseada em PID. Contudo, mesmo sendo o algoritmo de controle mais utilizado até hoje, os métodos disponíveis tipicamente são pouco flexíveis uma vez que há uma tendência de se considerar critérios universais para a otimização da sintonia de controladores PID.

Neste sentido, diversos métodos se propõem a trazer regras ou sistemáticas de sintonias de malhas que sejam de simples aplicação e atendam uma grande variedade de processos. Para o desenvolvimento destes métodos, normalmente busca-se obter sintonias que atendam um ou mais critérios de desempenho bem definidos para uma vasta quantidade de modelos genéricos típicos - como por exemplo FOPDT (*First Order Plus Dead Time*), IFOPDT (*Integral plus First Order Plus Dead Time*), integradores, segunda ordem com tempo morto, etc. Os critérios podem estar relacionados a requisitos de resposta em malha fechada (tempo de resposta, tempo de subida, sobressinal, constante de tempo, taxa de declínio), resposta em frequência (margem de fase, margem de ganho), funções da integral do erro (IAE, ISE, ITAE, ITSE) ou do esforço de controle, dentre outros. Tem-se ainda a possibilidade de incluir critérios ou restrições que possam prover certa robustez à sintonia, com objetivo de evitar desempenhos inaceitáveis ou até mesmo instáveis na presença de não line-

ridades ou erros de modelagem. O desenvolvimento e evolução destas estratégias é constante, com novas contribuições surgindo continuamente na literatura.

Contudo, há casos em que a aplicação direta de tabelas ou regras de sintonia “universais” traz um desempenho aquém do desejado, pelo simples motivo de não considerarem possíveis especificidades ou requisitos característicos dos processos em questão. Nestes casos, mostra-se que para a obtenção de uma boa sintonia é vital o conhecimento sobre os processos envolvidos e suas limitações. Um exemplo típico pode ser dado comparando-se dois modelos idênticos, ambos integradores com atraso, porém sendo um deles relacionado ao controle de nível de um vaso pulmão e outro referente ao controle de nível do tubulão de uma caldeira industrial. No primeiro caso, exigir da malha de controle uma baixa taxa de variação da saída seria ir de encontro às necessidades do processo, enquanto que para o segundo caso este critério é geralmente importante para a estabilidade e segurança operacional da caldeira. Contudo, grande parte das técnicas existentes não consideram o contexto no qual o modelo sob análise encontra-se e possivelmente não trarão sintonias adequadas para alguns casos.

Por outro lado, métodos que se propõem a solucionar problemas de sintonias muito específicos podem ser difíceis ou até impossíveis de se adaptar para outros tipos de problemas. Alguns exemplos são técnicas de sintonia para vasos pulmão, visto que normalmente as técnicas universais não são adequadas, e também técnicas específicas para processos com atraso elevado. Posto isto, tais métodos acabam sendo úteis apenas para um único caso estudado ou para uma pequena variedade de casos. Nota-se então um compromisso em ter-se uma sistemática genérica, que não considera especificidades dos processos avaliados, ou uma sistemática específica e precisa, porém pouco flexível.

O método desenvolvido há quase 80 anos por Ziegler & Nichols (1942) teve um grande impacto na área de controle e permanece popular até hoje (Hagglund & Åstrom (2002)). A ideia central por trás do método (aqui referenciado como ZN) foi tentar estabelecer uma relação direta entre os parâmetros de sintonia de um algoritmo PID com características de determinados processos típicos. O critério de desempenho desejado para a sintonia era a obtenção de uma resposta em malha fechada com $1/4$ de razão de declínio, como apresentado na Figura 2.1. Os parâmetros de sintonia foram então relacionados com a constante de tempo, atraso

e ganho estático do processo, sendo estas características facilmente obtidas. Desta forma, tornou-se possível obter uma sintonia “universal” a partir da resposta em degrau em malha aberta. O cuidado na utilização do termo “universal” vem do fato de que, na realidade, o método tenta englobar uma grande variedade de plantas típicas que representem uma boa parcela dos processos existentes, mas naturalmente não será adequado para todo e qualquer processo.

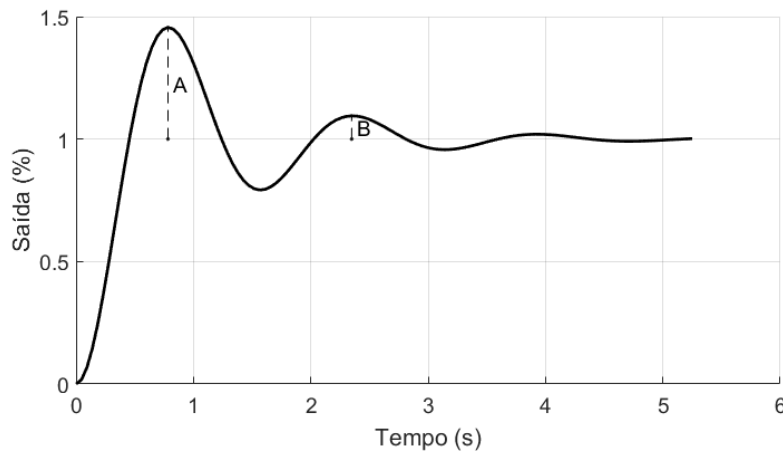


Figura 2.1: Razão de declínio (B/A).

Apesar da importância histórica do método e de sua larga utilização por muitos anos, uma desvantagem é que o mesmo não leva em consideração a robustez da sintonia proposta, sendo algumas vezes considerado inadequado ou muito agressivo. Além disto, não é possível adaptar diretamente a sintonia dada pelo método ZN para outros critérios de desempenho desejados, ou seja, o critério adotado será sempre o de 1/4 de razão de declínio. Os próprios autores afirmam que o método não é recomendado para qualquer tipo de processo, como por exemplo a aplicação em controle de nível de um vaso pulmão. Outros trabalhos analisaram o desempenho do método ZN em relação a processos com o fator de controlabilidade θ/τ (atraso sobre constante de tempo) elevado, onde Corripio (2000) sugere bons resultados para θ/τ entre 0,1 e 0,3 e Rivera et al. (1986) sugere resultados aceitáveis entre 0,2 e 1,4. Campos & Teixeira (2006) afirmam que, para fatores de controlabilidade maiores que 4, o método ZN resulta em sistemas de controle instáveis.

Outros métodos surgiram baseados na mesma ideia central: relacionar diretamente os parâmetros de alguns modelos com uma regra de sintonia “universal” que determine diretamente os parâmetros do controlador. Muitos dos métodos desen-

volvidos diferem basicamente por conta do critério de desempenho utilizado como referência para a sintonia proposta e a forma de identificação do processo. Por exemplo, em Chien & Reswick (1952) propõe-se uma sintonia menos agressiva se comparada ao método ZN, visto que o critério de desempenho adotado para sintonia era obter a resposta mais rápida possível sem ocorrência de sobressinal (*overshoot*). Uma vantagem deste método é que normalmente leva a sintonias mais robustas, podendo absorver mais variações na dinâmica do processo devidas a não-linearidades e erros de modelagem.

Em Cohen (1953), o foco é no desenvolvimento de regras de sintonia para processos com atraso mais relevante (maiores relações de θ/τ). Em Lopez (1967) e Rovira et al. (1970), os critérios utilizados são relacionados à minimização de funções do erro como IAE e ITAE para os casos regulador e servo, respectivamente, determinando a relação entre os parâmetros de uma planta do tipo FOPDT (*First Order Plus Dead Time*) e os ganhos/tempos do controlador.

Outra ideia de bastante relevância para a área de controle foi inicialmente proposta por Dahlin et al. (1968), em que a estrutura e sintonia do controlador são definidas a partir do desempenho de malha fechada desejado (λ) para um determinado modelo do processo. O método ficou conhecido como *Internal Model Control* (IMC) ou *lambda-tuning* e inicialmente não visava a implementação necessariamente numa estrutura PID.

Esta ideia central também foi bastante explorada e desenvolvida por outros autores, como por exemplo na proposta de sintonia IMC especificamente para controladores PID apresentada em Rivera et al. (1986), onde os autores definem tabelas relacionando o tipo de processo (primeira ordem, segunda ordem, integrador, FOPDT, dentre outros), a estrutura PID recomendada (P, PI ou PID) e os valores dos ganhos/tempos da sintonia. Uma vantagem deste método é a certa flexibilidade que se possui na definição do parâmetro λ , sendo possível obter sintonias mais rápidas ou mais lentas de forma relativamente simples, ajustando apenas um parâmetro. Faz-se necessárias algumas adaptações e cuidados, por exemplo, para processos de fase não mínima ou instáveis em malha aberta.

A grande relevância dos controladores PID para a indústria, observada até os dias de hoje, e as dificuldades encontradas na sintonia dos mesmos ainda fomentam a pesquisa e desenvolvimento na área. Outros métodos tais como análise do lugar

das raízes e alocação de polos, métodos baseados em resposta em frequência, sintonias através de respostas em malha fechada, dentre outros, surgiram durante os anos e cada um trouxe contribuições diferentes e relevantes para este campo. Além disto, naturalmente muitos métodos decorrem de modificações ou são baseados em ideias ou trabalhos anteriores que trazem contribuições para solucionar necessidades específicas.

Rice e Cooper (Rice & Cooper (2002)) propõem uma sintonia simplificada baseada no método IMC. Em Shamsuzzoha & Lee (2008) é dado foco no método IMC para o caso regulatório, utilizando-se filtro de referência para obter-se um melhor desempenho para o caso servo. Em Tyreus & Luyben (1992), os autores demonstram algumas fragilidades do método IMC e propuseram um método baseado em resposta em frequência, com objetivo de obter um coeficiente de amortecimento de 0,4. Em Kookos et al. (1999) propõe-se a utilização de sintonias especificando margens de fase e ganho bem como uma técnica que utiliza otimização de índices tais como IAE e ISE ponderado, para os casos SISO e MIMO. Ali e Majhi (Ali & Majhi (2010)) tratam do caso integrador com primeira ordem com atraso, desenvolvendo uma sintonia que otimiza o ISE com restrições estabelecidas para a resposta em frequência. Já Skogestad (Skogestad (2003)) propõe tabelas com sintonias universais para diversos modelos de plantas, baseado no método IMC modificado. O autor ressalta a impossibilidade de utilização da técnica para processos oscilatórios ou instáveis em malha aberta. Diversos métodos de sintonia já foram estudados e propostos especificamente para processos integradores com tempo morto, demonstrando a relevância do tema e constatando a dificuldade em estabelecer-se o critério de desempenho ideal para cada caso prático (Luyben (1996), Wang & Cluett (1997) e Sree & Chidambaram (2005)).

Åström et al. (1998) trazem uma abordagem com objetivo de estabelecer um método ótimo de sintonia aplicável a uma grande variedade de processos, mantendo um comportamento aceitável (desempenho e robustez). Inicialmente, o problema considerava apenas controladores do tipo PI. As regras foram obtidas através de um problema de maximização do ganho integral do controlador, sujeito a restrições na função sensibilidade. Os autores demonstram que a maximização do ganho integral é equivalente à minimização da integral do erro para o caso de perturbação de carga do tipo degrau. Em Panagopoulos et al. (2002), o trabalho é estendido para

controladores do tipo PID.

Em Grimholt & Skogestad (2018), os autores propõem a comparação do método SIMC com um método de sintonia ótima que visa minimizar o índice IAE sujeito a restrições no máximo pico da função de sensibilidade e da complementar de sensibilidade. Para estabelecer uma comparação, o valor de τ_c do método SIMC¹ é ajustado para obter-se a robustez desejada para o sistema. A partir destes resultados, mostra-se que, para alguns casos, pode haver vantagens no ajuste do tempo derivativo da regra SIMC para obter-se um melhor desempenho, onde denominam a nova regra proposta como iSIMC (do inglês, *improved* SIMC). São considerados modelos FOPDT, IPDT e atraso puro. A função objetivo proposta pondera o IAE para o caso de distúrbio na entrada e na saída do processo. Os autores ressaltam que, apesar do melhor desempenho, há um maior esforço de controle bem como pior comportamento frente a ruídos. Afirmam ainda que, para a maioria dos processos industriais, o método SIMC pode ainda ser a melhor escolha.

Garpinger et al. (2014) apresentaram resultados sobre a avaliação do compromisso entre desempenho e robustez de diversos métodos de sintonia. Os autores sugerem um novo formato de representação gráfica para as análises, no qual explicitamente pode-se avaliar os compromissos envolvidos, em que afirmam que tais resultados são úteis para entender as diferentes propriedades de diversos métodos de sintonia, seus pontos fortes e pontos fracos, bem como desenvolver um senso crítico/intuição para a sintonia de malhas. Alguns métodos relevantes são selecionados como alvo para o estudo, tais como IMC, SIMC e A-MIGO.

Em Garpinger & Hägglund (2015), foi desenvolvido um *software* de sintonia ótima para PID no qual o algoritmo busca minimizar o índice IAE sujeito a restrições de robustez (máximo pico da função sensibilidade e da complementar de sensibilidade) e máxima norma H_2 da função de transferência do ruído de medição para a ação de controle (MV), visando evitar possíveis desgastes excessivos dos atuadores. Os autores ressaltam que, apesar dos métodos de sintonia baseados em regras preestabelecidas (ou métodos “universais”) serem de fácil e rápida aplicação e intuitivos, os mesmos não fornecem a sintonia ótima bem como não levam em conta, ao mesmo tempo, os critérios de robustez, desempenho e sensibilidade ao ruído. Por outro lado, o *software* proposto requer modelos mais precisos do processo bem como pode

¹Descrito na Seção 2.3.

tornar-se inviável de aplicar na indústria quando necessita-se realizar a sintonia de muitas malhas e tem-se pouco tempo para esta atividade. Os autores acreditam que o futuro dos métodos de sintonia de controladores PID tenderão a caminhar mais no sentido do desenvolvimento de *softwares* de sintonia ótima de fácil uso na indústria ao invés de novas regras “universais” (simplificadas) de sintonia.

2.1 Approximate M-constrained Integral Gain Optimization (A-MIGO)

O método A-MIGO (Hagglund & Åström (2002)) foi uma generalização da técnica desenvolvida em Åström et al. (1998) com objetivo de estabelecer regras universais e simples de sintonia para diversos modelos típicos de processos. Os autores definem as seguintes características como fundamentais para que o método proposto seja considerado eficiente:

- deve ser aplicável a uma grande variedade de sistemas e ser capaz de introduzir especificações que capturem a essência de problemas de controle reais;
- ser robusto no sentido de ser capaz de prover os parâmetros de sintonia adequados, caso eles existam;
- caso as especificações não possam ser alcançadas, um diagnóstico apropriado deve ser fornecido.

Inicialmente, o problema considerava apenas controladores do tipo PI. Para garantir a robustez das sintonias, utiliza-se uma restrição na função sensibilidade conforme apresentado pela Equação 2.1.

Sejam $G(s)$ o modelo do processo, $C(s)$ o controlador e $L(s) = G(s) \cdot C(s)$ a função de transferência de malha aberta, define-se a restrição

$$M_s = \max(|S(i\omega)|), \omega \in [0, \infty) \quad (2.1)$$

com $S(s) = 1/(1 + L(s))$ sendo a função de sensibilidade. Valores típicos de M_s variam entre 1,2 e 2,0, onde as tabelas/regras foram desenvolvidas utilizando $M_s = 1,4$ com objetivo de obter-se um bom compromisso entre robustez e desempenho,

tipicamente sem oscilações. Os autores definem ainda um índice de monotonicidade, dado pela Equação 2.2.

$$m = \frac{\int_0^{\infty} g(t)dt}{\int_0^{\infty} |g(t)|dt}, \quad (2.2)$$

sendo $g(t)$ a resposta ao impulso. Nota-se que m será então um índice entre 0 e 1, sendo considerado que o processo é essencialmente monotônico para $m > 0,8$ e o método aplicável apenas para estes casos. Exemplos deste tipo de respostas são apresentados na Figura 2.2. Afirma-se ainda que este método não lida bem com quaisquer casos de zeros de fase não mínima e também com casos de sistemas pouco amortecidos ($\zeta < 0,5$). Vale ressaltar que o método foca na sintonia ótima para o caso regulador, com a possibilidade de ajuste posterior de um filtro de referência para obter-se uma resposta aceitável para o caso servo.

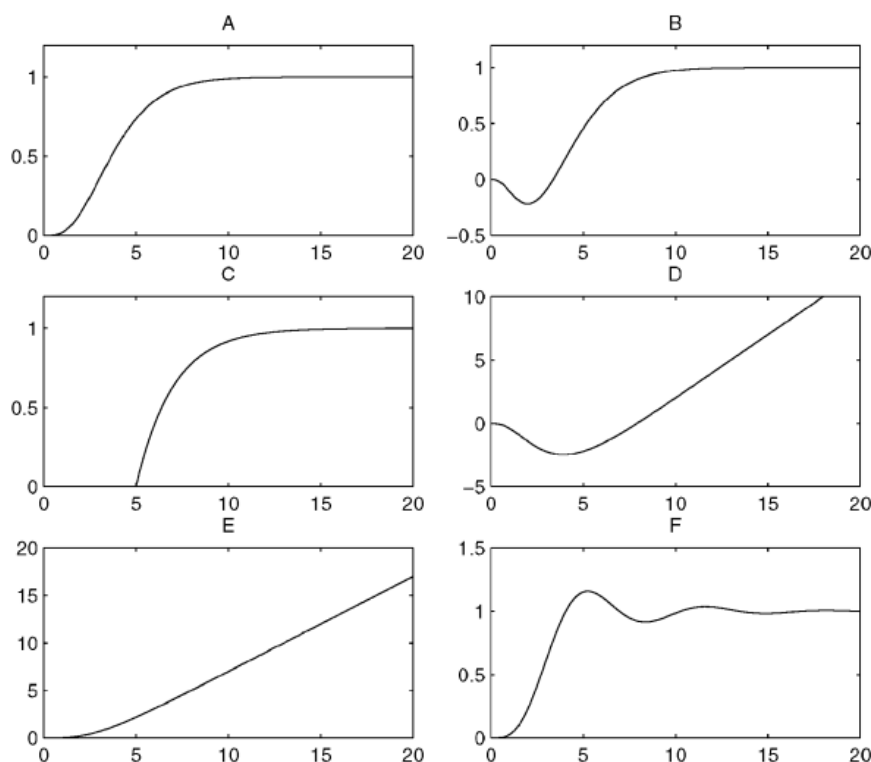


Figura 2.2: Processos típicos com respostas ao degrau essencialmente monotônicas (Hagglund & Åström (2002)).

Em Åström & Häggglund (2004), o método foi estendido para controladores tipo PID. Assim, para cada uma das abordagens (PI e PID) tem-se naturalmente tabelas diferentes de sintonia, sendo papel do usuário a seleção da mais adequada para

cada tipo de processo. Os autores afirmam que as vantagens na utilização do termo derivativo estão fortemente correlacionadas com o atraso de tempo relativo, definido como $\tau_{rel} = \theta/(\theta + \tau)$. Para processos cujo atraso é dominante (τ_{rel} próximo a 1), a ação derivativa provê benefícios marginais, enquanto estes benefícios aumentam com τ_{rel} menores. É feita ainda uma ressalva quanto a processos com $\tau_{rel} < 0,5$, de forma que se sugere a utilização de modelos mais precisos do que aqueles encontrados através de uma resposta ao degrau.

A sintonia utilizando o método A-MIGO segue basicamente as seguintes etapas:

- identificação do processo e aproximação do mesmo por uma função simplificada. Os autores sugerem a utilização da técnica representada pela Figura 2.3, através da resposta a uma entrada degrau unitário;
- aplicação das regras de sintonia propostas, seja para controladores tipo PI e/ou PID.

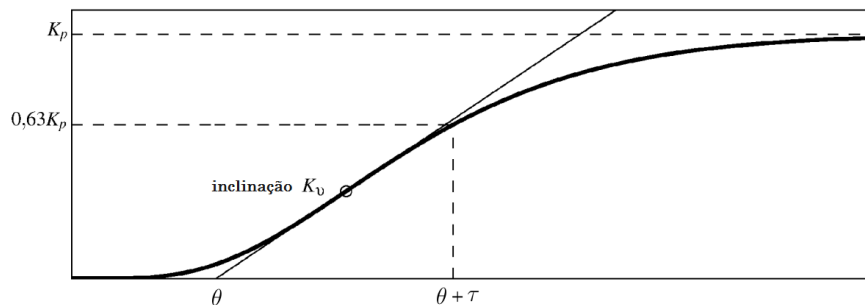


Figura 2.3: Resposta ao degrau unitário e procedimento utilizado para determinar os parâmetros K_p , θ , τ e K_v (adaptado de Hagglund & Åstrom (2002)).

As Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam as regras da sintonia A-MIGO para controladores PI, considerando modelos do tipo IFOPDT. Para modelos puramente FOPDT, o autor sugere a utilização dos parâmetros conforme a Tabela 2.3 e para processos puramente integradores a Tabela 2.4 é sugerida.

A Tabela 2.5 apresenta as regras da sintonia A-MIGO para controladores PID e para o caso de processos puramente integradores, tem-se a Tabela 2.6.

Nota-se que, apesar de apresentar regras relativamente simples, existe uma boa variação das mesmas para que seja possível englobar os diversos modelos típicos de

Tabela 2.1: Definição do parâmetro P para controladores PI e processos IFOPDT.

Parâmetro P	Relação entre θ e τ
$\frac{0,35}{K_v \cdot \theta} - \frac{0,6}{K_p}$	$\theta < \tau/6$
$\frac{0,25\tau}{K_p \cdot \theta}$	$\tau/6 < \theta < \tau$
$\frac{0,1\tau}{K_p \cdot \theta} - \frac{0,15}{K_p}$	$\theta \geq \tau$

Tabela 2.2: Definição do parâmetro T_I para controladores PI e processos IFOPDT.

Parâmetro T_I	Relação entre θ e τ
7θ	$\theta < 0,11\tau$
$0,8\tau$	$0,11\tau < \theta < \tau$
$0,3\theta + 0,5\tau$	$\theta \geq \tau$

Tabela 2.3: Definição dos parâmetros P e T_I para controladores PI e processos FOPDT.

Parâmetro P	Parâmetro T_I
$\frac{0,28\tau}{(K_p\theta)} + \frac{0,14}{K_p}$	$0,33\theta + \frac{6,8\tau\theta}{(10\theta + \tau)}$

Tabela 2.4: Definição dos parâmetros P e T_I para controladores PI e processos integradores.

Parâmetro P	Parâmetro T_I
$\frac{0,35}{K_v \cdot \theta}$	7θ

Tabela 2.5: Método A-MIGO para controladores PID.

Parâmetro P	Parâmetro T_I	Parâmetro T_D
$\frac{1}{K_p} \left(0,2 + \frac{0,45\tau}{\theta} \right)$	$\theta \left(\frac{0,4\theta + 0,8\tau}{\theta + 0,1\tau} \right)$	$\frac{0,5\theta\tau}{0,3\theta + \tau}$

processos desejados. Com isto, fica a cargo do usuário selecionar corretamente qual tabela bem como qual estrutura de controlador (PI ou PID) utilizar. Além disto, ambas as abordagens (sintonia PI e PID) tratam apenas de um controlador único,

Tabela 2.6: Método A-MIGO para controladores PID e processos integradores.

Parâmetro P	Parâmetro T _I	Parâmetro T _D
$\frac{0,45}{K_v}$	8θ	$0,5\tau$

não sendo possível uma aplicação direta em estratégias do tipo cascata. Nestes casos, incorre-se numa maior complexidade bem como ressalvas adicionais para aplicação adequada do método. Contudo, considerando que a malha escrava possua uma dinâmica suficientemente rápida se comparada à malha mestre, pode-se dividir o processo em duas sintonias independentes:

1. identificação do processo a ser controlado pelo escravo e aproximação do mesmo a uma função simplificada, utilizando a técnica representada pela Figura 2.3;
2. aplicação das regras de sintonia propostas (deve-se escolher a estrutura do controlador para definir qual tabela/regra utilizar);
3. após fechar a malha do controlador escravo, repete-se o item 1, porém agora aplicando um degrau unitário na entrada do controlador escravo;
4. repete-se o item 2, agora para definição da sintonia do controlador mestre.

2.2 Ziegler-Nichols

O método de sintonia proposto em Ziegler & Nichols (1942) teve como objetivo estudar as três principais ações disponíveis nos principais controladores comerciais da época e fornecer, ainda que de forma simplificada e sem demonstrações matemáticas rebuscadas, regras práticas para determinar-se valores de sintonia adequados para estes parâmetros. O motivador do trabalho é encontrar respostas para as perguntas “como definir de forma rápida os ajustes adequados dos parâmetros dos controladores para qualquer tipo de processo?” (ou seja, uma espécie de técnica “universal”) e “como determinar estes ajustes antes mesmo da operação do sistema?” - por exemplo, na fase de projeto.

A partir daí, os autores conduziram experimentos com um tipo de controlador pneumático associado à movimentação da agulha de um registrador de pena, que

altera sua saída (pressão) para reposicionar uma válvula operada por diafragma. A movimentação da agulha é proporcional a variações de um determinado processo (temperatura, vazão, etc.) e o controlador traduz esta variação em sinais pneumáticos para a modulação de uma válvula de acordo com os parâmetros e ações configurados no mesmo.

Analisando cada ação de controle separadamente, Ziegler e Nichols foram capazes de determinar os valores considerados ótimos para os parâmetros do controlador bem como relacionar tais parâmetros com curvas de reação do processo. As curvas de reação do processo foram definidas conforme apresentado na Figura 2.4. A resposta esperada para a sintonia proposta pelo método levava em conta a obtenção de uma resposta em malha fechada com 1/4 de razão de declínio, conforme já apresentado na Figura 2.1.

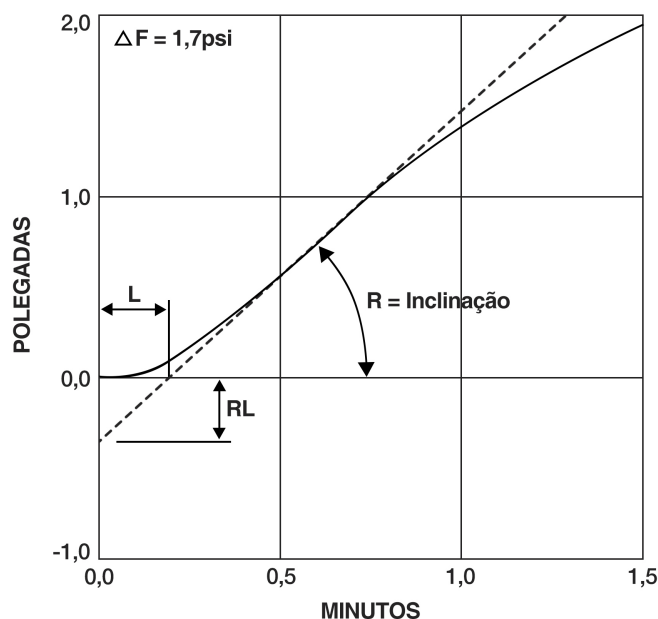


Figura 2.4: Curva de reação do processo (adaptado de Ziegler & Nichols (1942)).

O método pode ser resumido então pelas regras apresentadas na Tabela 2.7, referente aos valores propostos para a sintonia de controladores dos tipos P, PI e PID e a relação dos mesmos com os parâmetros do processo. No caso de processos puramente integradores, tem-se a Tabela 2.8. A decisão por qual tipo de controlador é o mais adequado para cada processo fica a critério do usuário. Pode-se dizer que,

na época da publicação do artigo, ainda existia uma lacuna na definição de quando exatamente seria recomendada a utilização da ação derivativa. Contudo, baseado na experiência prática, o autor sugere que o termo derivativo normalmente não é útil em controles de pressão e de vazão, porém o mesmo tende a ser usado com bons resultados em controles de temperatura.

Tabela 2.7: Método Ziegler-Nichols para processos FOPDT.

Controlador	Parâmetro P	Parâmetro T _I	Parâmetro T _D
P	$\frac{\tau}{K_p\theta}$	—	—
PI	$\frac{0,9\tau}{K_p\theta}$	3,33 θ	—
PID	$\frac{1,2\tau}{K_p\theta}$	2 θ	0,5 θ

Tabela 2.8: Método Ziegler-Nichols para processos IFOPDT.

Controlador	Parâmetro P	Parâmetro T _I	Parâmetro T _D
P	$\frac{1}{K_v\theta}$	—	—
PI	$\frac{0,9}{K_v\theta}$	3,33 θ	—
PID	$\frac{1,2}{K_v\theta}$	2 θ	0,5 θ

O método é aplicável para estratégias contendo um único controlador, não sendo possível a aplicação direta no caso de estratégias do tipo cascata. Caso a malha escrava possua uma dinâmica suficiente rápida se comparada à malha mestre, pode-se dividir o processo em duas sintonias independentes, de forma análoga à que foi descrita na Seção 2.1.

2.3 Skogestad Internal Model Control (SIMC)

Skogestad (2003) pontua que os principais objetivos do método proposto são: trazer regras simples e de fácil memorização; obtidas analiticamente baseadas no modelo o qual se deseja controlar; e que sejam aplicáveis a uma grande variedade de

processos existentes. O autor ressalta ainda que a sistemática proposta não busca a otimalidade, mas sim a simplicidade e aplicabilidade prática.

O ponto inicial para a sintonia é a obtenção de um modelo FOPDT ou SOPDT (*Second Order Plus Dead Time*) do processo a ser controlado. Para a estimativa do modelo, propõe-se utilizar-se a regra “*half-rule*” para a aproximação do tempo morto efetivo, na qual basicamente distribui-se a dinâmica mais rápida igualmente entre o tempo morto e a constante de tempo mais lenta. Por exemplo, considerando

$$G(s) = \frac{e^{-s}}{(2s + 1)(0,2s + 1)},$$

tem-se o modelo FOPDT aproximado como

$$G_0(s) = k \frac{e^{-\theta s}}{\tau_1 s + 1},$$

com $k = 1$, $\theta = 1 + 0,2/2 = 1,1$ e $\tau_1 = 2 + 0,2/2 = 2,1$. A Figura 2.5 mostra a comparação entre o modelo original e o aproximado utilizando a regra supracitada.

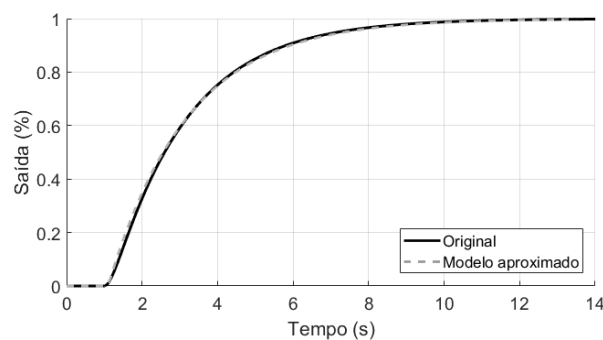


Figura 2.5: Comparação entre o modelo original $G(s)$ e o identificado $G_0(s)$.

O autor detalha ainda os procedimentos sugeridos para redução do modelo para sistemas de segunda ordem bem como para representação de possíveis zeros, que poderão ser consultados facilmente em Skogestad (2003). Como forma de ilustrar o método, considere um processo cujo modelo é dado por

$$G_2(s) = \frac{2(15s + 1)}{(20s + 1)(s + 1)(0,1s + 1)^2},$$

onde tem-se o seguinte procedimento: primeiro, faz-se necessário remover o zero,

onde sugere-se fazê-lo através do cancelamento com um polo na vizinhança. Considerando um par zero e polo $\frac{T_0s+1}{\tau_0s+1}$, utiliza-se um conjunto de 5 regras, apresentadas pelas Equações 2.3, para decidir a melhor aproximação possível.

$$\frac{T_0s+1}{\tau_0s+1} \approx \begin{cases} T_0/\tau_0, & \text{for } T_0 \geq \tau_0 \geq \theta \\ T_0/\theta, & \text{for } T_0 \geq \theta \geq \tau_0 \\ 1, & \text{for } \theta \geq T_0 \geq \tau_0 \\ T_0/\tau_0, & \text{for } \tau_0 \geq T_0 \geq 5\theta \\ \frac{\min(\tau_0, 5\theta)/\tau_0}{(\min(\tau_0, 5\theta) - \tau_0)s + 1}, & \text{for } \min(\tau_0, 5\theta) \geq T_0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Em seguida, aplicando-se a *half-rule*, encontra-se

$$G_{2a}(s) = k \frac{e^{-\theta s}}{\tau_1 s + 1},$$

com $k = 2(15s + 1)/(20s + 1) \approx 2 \cdot 15/20 = 0,75$, $\theta = 0,1/2 + 0,1 = 0,15$ e $\tau_1 = 1 + 0,1/2 = 1,05$. Para um modelo SOPDT na forma

$$G_{2b}(s) = k \frac{e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)},$$

tem-se $k = 0,75$, $\theta = 0,1/2 = 0,05$, $\tau_1 = 1$ e $\tau_2 = 0,1 + 0,1/2 = 0,15$. A Figura 2.6 mostra a comparação entre o modelo original e ambos os modelos aproximados (FOPDT e SOPDT).

Nota-se que, apesar de serem regras relativamente simples, tornam-se mais complexas de acordo com o modelo original o qual se deseja reduzir. Além disto, dependendo da aplicação e do modelo original em questão, os modelos reduzidos podem não atender aos objetivos desejados devido aos erros trazidos pelas aproximações, evidenciados na Figura 2.6. Como as sintonias são derivadas analiticamente com base nestes modelos, é de se esperar que este erro de modelagem impacte no resultado final da sintonia.

A partir do modelo do processo o qual se deseja controlar, aplica-se a técnica IMC para encontrar a sintonia. O método IMC parte da especificação da resposta em malha fechada desejada para encontrar o controlador que seja capaz de prover tal

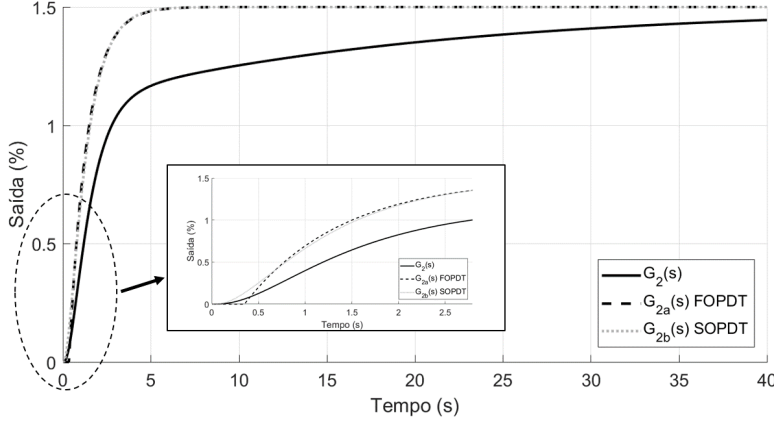


Figura 2.6: Comparação entre $G_2(s)$ e os modelos aproximados $G_{2a}(s)$ e $G_{2b}(s)$.

comportamento. Considerando um modelo

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{G(s)C(s)}{1 + G(s)C(s)},$$

pode-se facilmente encontrar o controlador $C(s)$ desejado em função do modelo da planta em malha aberta ($G(s) = k \frac{e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$) através da equação

$$C(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{Y_d(s)}{1 - Y_d(s)},$$

com $Y_d(s) = \frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{e^{-\theta s}}{\tau_c s + 1}$ sendo a resposta desejada em malha fechada.

O atraso θ de $G(s)$ é mantido na resposta desejada visto que é intrínseco ao processo, sendo inactível seu cancelamento. Utilizando-se uma aproximação da série de Taylor de primeira ordem para o atraso $e^{-\theta s} \approx 1 - \theta s$, obtém-se então a equação do controlador como

$$C(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{k} \frac{1}{s(\tau_c + \theta)},$$

que é equivalente a um controlador PID tipo série, conforme apresentado na Equação 2.4, com $K_c = \frac{1}{k(\tau_c + \theta)}$, $T_I = \tau_1$ e $T_D = \tau_2$.

$$C(s) = K_c \frac{(T_I \cdot s + 1)}{T_I \cdot s} (T_D \cdot s + 1), \quad (2.4)$$

Nota-se que o controlador cancela a dinâmica de primeira ordem da planta (τ_1) através da seleção do tempo integral $T_I = \tau_1$. Skogestad (2003) ressalta que este método é robusto e traz bons resultados para o caso servo bem como para rejeição de distúrbios na saída do processo, contudo não tem bons resultados nos casos de rejeição de distúrbios na entrada do processo (*input load disturbances*) principalmente para casos em que o atraso é dominante (e.g., processos integradores). Nestes casos, faz-se necessário reduzir o tempo integral do controlador, porém até certo limite em que se começaria a ter oscilações nas respostas. Analisando a frequência destas oscilações e forçando para que a resposta em malha fechada possua um coeficiente de amortecimento $\zeta = 1$ (criticamente amortecido), o autor encontra $T_I = 4(\tau_c + \theta)$ como o valor recomendado para o tempo integral do controlador.

Desta forma, a Tabela 2.9 apresenta os valores propostos para a sintonia de controladores para processos do tipo FOPDT, IFOPDT e integradores com atraso pelo método SIMC. Percebe-se que a estrutura do controlador (PI ou PID) já é definida no momento em que o usuário seleciona o tipo do processo a ser controlado.

Tabela 2.9: Método SIMC para processos FOPDT, IFOPDT e integradores.

Processo	Modelo $G(s)$	P	T_I	T_D
FOPDT	$K_p \frac{e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{K_p(\theta + \tau_c)}$	$\min(\tau, 4(\tau_c + \theta))$	–
IFOPDT	$K_v \frac{e^{-\theta s}}{s(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{1}{K_v(\theta + \tau_c)}$	$4(\tau_c + \theta)$	τ_2
Integ.	$K_v \frac{e^{-\theta s}}{s}$	$\frac{1}{K_v(\theta + \tau_c)}$	$4(\tau_c + \theta)$	–

A variável τ_c representa a constante de tempo de malha fechada desejada e necessita ser definida pelo usuário, sendo que a mesma é um compromisso entre:

- resposta rápida e com boa rejeição de perturbação, favorecido por pequenos valores de τ_c ;
- estabilidade, robustez e pequenas variações na entrada, favorecido por valores grandes de τ_c .

O autor sugere a escolha $\tau_c = \theta$ para obter-se uma resposta rápida e com boa robustez. Uma vantagem do método é a possibilidade de realizar um *detuning* na

sintonia (suavização) através da seleção de valores de τ_c maiores. Contudo, vale ressaltar que o método não trata sistemas instáveis (exceto integradores) bem como sistemas oscilatórios (com polos ou zeros complexos) e pode apresentar desempenhos insatisfatórios ou até mesmo respostas instáveis nestes casos. Além disto, o método é somente aplicável para estratégias contendo um único controlador, não sendo possível a aplicação direta no caso de estratégias do tipo cascata. Caso a malha escrava possua uma dinâmica suficiente rápida se comparada à malha mestre, pode-se dividir o processo em duas sintonias independentes.

Capítulo 3

SINTONIA ÓTIMA BASEADA EM REQUISITOS DE DESEMPENHO

O método aqui proposto visa sistematizar um procedimento de sintonia ótima que seja flexível, facilmente relacionada com requisitos qualitativos e aplicável a diversos tipos de problemas. Para isto, foram estabelecidas diferentes parcelas que irão constituir um índice de desempenho (função custo) bem como definiu-se orientações para a composição deste índice de acordo com as particularidades de cada processo. Além disto, o método foi generalizado para a aplicação em estratégias multi-malhas, permitindo a aplicação direta e simplificada em uma maior quantidade de problemas. Outro aspecto importante é a inclusão de restrições relacionadas à robustez, tais como margem de fase e margem de ganho mínimas, as quais tendem a trazer sintonias aceitáveis mesmo frente a determinadas incertezas de modelos ou não-linearidades, bem como buscam garantir a estabilidade do sistema.

A descrição detalhada do método foi dividida em três etapas, sendo apresentadas nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3.

3.1 Definição do problema

Conforme discutido no Capítulo 1, o bom entendimento do problema de sintonia em questão é importante para que o resultado final esteja em linha com as expectativas. Neste sentido, o primeiro passo para a aplicação do método aqui proposto

é determinar, ainda que qualitativamente, os requisitos e características desejadas para o controle e conhecer as restrições do processo, sejam estes limites operacionais, limitações de atuadores, dentre outros. Alguns exemplos podem ser citados, como:

- deseja-se uma rejeição de perturbação rápida ou são aceitáveis tempos de resposta maiores?
- existe uma determinada faixa em relação à referência na qual deseja-se que a variável de processo seja mantida? São aceitáveis picos?
- é aceitável que o sistema possua oscilações (ou desejável, no caso de vasos pulmão)?
- existem restrições relacionadas ao acionamento dos atuadores ou da malha escrava? São aceitáveis picos, oscilações, altas taxas de variação, dentre outros?
- as incertezas e imprecisões dos modelos são moderadas? É possível definir um compromisso entre maior robustez e melhor desempenho?

Apesar desta etapa poder trazer certa subjetividade ao método - visto que pessoas diferentes poderão ter visões diferentes quanto aos requisitos finais - pode-se recorrer a uma análise em equipe ou diálogo com indivíduos chave (por exemplo, operadores ou engenheiros com larga experiência no processo em questão) para uma maior objetividade e clareza na definição do problema.

Por outro lado, também pode-se considerar uma vantagem do método o fato de que seja possível projetar controladores completamente diferentes para um mesmo tipo de modelo de processo apenas definindo requisitos qualitativos diferentes.

Outro ponto a ser ressaltado é a importância da percepção do usuário quanto ao compromisso entre os diversos requisitos. Na definição de problemas multi-objetivos, normalmente tem-se requisitos contraditórios, sendo a resposta ótima encontrada um compromisso entre os mesmos. Por exemplo, caso defina-se que o problema exige uma rejeição de perturbação rápida e ao mesmo tempo um pequeno pico e pequena taxa de variação da variável manipulada, o resultado final tenderá a ser um meio termo entre ambos os requisitos (o que não necessariamente será indesejado).

3.2 Índice de desempenho

A partir da definição do problema, é possível correlacionar os requisitos qualitativos e restrições com um conjunto de índices (I_1, I_2, \dots, I_n) relativamente comuns na literatura e compor um índice de desempenho ponderado, conforme apresentado na Equação 3.1.

$$ID_\lambda = \lambda_1 \cdot I_1 + \lambda_2 \cdot I_2 + \dots + \lambda_n \cdot I_n. \quad (3.1)$$

O ID_λ pode ser ajustado atribuindo-se pesos para os diversos λ_n de forma a equilibrar a influência de cada critério na composição final. Na prática, o ID representa a função objetivo de um problema de otimização multi-objetivos escalarizado. O conjunto de valores Pareto ótimos são denominados superfície ótima de compromisso (Boyd & Vandenberghe (2004)), em que a determinação dos λ_n permite explorar esta superfície. De forma alternativa, pode-se enxergar o fator λ_1/λ_2 , por exemplo, como um fator de compromisso entre os objetivos I_1 e I_2 , ou seja, o grau de importância que se deseja atribuir a um objetivo em relação ao outro.

Em um problema de sintonia ótima, os pesos podem ser interpretados como novos parâmetros de sintonia, o que aumenta a subjetividade e dificuldade do método. Dependendo das parcelas I_n selecionadas para compor o índice final do problema de controle (por exemplo, ISE, tempo de resposta, máximo pico), as mesmas podem apresentar valores com diversas ordens de grandeza de diferença entre si. Como forma de simplificar a definição do índice, propôs-se então a normalização das parcelas que o compõem, sistematizando o processo de sintonia. A normalização é dada pela Equação 3.2.

$$ID = \left(\frac{I_1}{I_{1max}} + \frac{I_2}{I_{2max}} + \dots + \frac{I_n}{I_{nmax}} \right) \frac{100}{ID_{max}}, \quad (3.2)$$

sendo I_{nmax} os valores máximos de cada parcela num conjunto de casos comparados. O índice final é representado por um valor entre 0 e 100%, em que a sintonia ótima é aquela que resolve o problema de minimização deste índice.

Posto isso, selecionou-se diversas possíveis parcelas I_n para compor um ID geral, de forma que o usuário poderá selecionar quais destas serão consideradas em cada

problema de acordo com a correlação entre os requisitos de desempenho desejados¹:

- I_1 : Pico na PV (*Process Variable*);
- I_2 : ISE (*Integral Squared Error*);
- I_3 : IAE (*Integral Absolute Error*);
- I_4 : Oscilação da PV;
- I_5 : Somatório da taxa de variação (TV) da PV;
- I_6 : Taxa de variação máxima da PV;
- I_7 : Pico na MV (*Manipulated Variable*);
- I_8 : Oscilação da variável manipulada;
- I_9 : Taxa de variação máxima da MV;
- I_{10} : Somatório da taxa de variação da MV;
- I_{11} : IACE (*Integrated Absolute Control Effort*).

Além disto, pode-se incluir no problema de otimização restrições relacionadas à robustez da sintonia projetada, tais como margem de fase e de ganho mínimas, conforme descrito na Seção 3.3.

Exemplificando a composição do ID , considere um problema em que se deseje limitar o pico da PV porém com um esforço de controle moderado. Neste caso, pode-se selecionar as parcelas I_1 (pico da PV) e I_{11} (IACE). Para reduzir o tempo de resposta, pode-se acrescentar ainda o I_2 (ISE) no índice final. Na hipótese de que seja necessário evitar manipulações bruscas do atuador (por exemplo, para evitar distúrbios em um processo à jusante ou evitar desgaste mecânico excessivo de uma válvula), pode-se utilizar a taxa de variação máxima da MV (I_9) no ID .

Vale ressaltar ainda que outras parcelas podem ser adicionadas para compor o índice final, sem perda de generalidade. Os índices definidos aqui mostraram-se úteis nos problemas explorados neste trabalho, contudo pode-se de maneira simples acrescentar novas parcelas tais como ITAE, ITSE, variância da PV e da MV, dentre outros. Assim sendo, existem inúmeras combinações de parcelas possíveis que poderão ser selecionadas e fornecerão diferentes resultados de desempenho, contudo sempre respeitando as restrições impostas (margem de ganho mínima, margem de fase mínima, dentre outros).

¹O cálculo das parcelas I_1 à I_{11} é descrito no Apêndice A.

3.3 Otimização

A última etapa do processo de sintonia é a utilização de uma técnica de otimização para minimizar o ID estabelecido na Seção 3.2. Para problemas mais simples, por exemplo, considerando um único controlador e o índice de desempenho composto apenas pelo ISE, seria possível encontrar a solução analítica para o problema de otimização. Contudo, esta solução seria dificilmente adaptável para problemas com maior complexidade (mais parcelas no ID , sintonia multi-malhas, restrições de margem de fase e de ganho, dentre outros), restringindo a abrangência e aplicabilidade da mesma. Desta forma, propõe-se a utilização de uma técnica heurística de otimização (GA) visto que pode ser aplicada desde em problemas simples até outros mais complexos tais como multi-objetivo, não-lineares, não-convexos, com restrições, dentre outras características, bem como são consideradas técnicas de otimização global. Os passos para realização da etapa de otimização são:

- levantamento do modelo do processo a ser controlado;
- definir faixa de busca dos parâmetros de sintonia do(s) controlador(es);
- realizar uma busca em *grid* inicial para encontrar os fatores para normalização dos ID_n selecionados. Recomenda-se que a busca considere os extremos das faixas de cada parâmetro mais 3 a 5 outros pontos equidistantes dentro das faixas;
- executar algoritmo genético para encontrar os valores dos parâmetros do(s) controlador(es) que minimizam o ID escolhido, sujeito a restrições.

Para a determinação do modelo do processo podem ser aplicadas técnicas de identificação em malha aberta, malha fechada, realizada modelagem fenomenológica, dentre outros. O método aqui proposto não possui qualquer restrição em relação a ordem do modelo utilizado ou forma de obtenção do mesmo. Contudo, para uma grande parte de processos é suficiente uma identificação de modelo aproximado de primeira ou segunda ordem com atraso, ou modelo integrador com atraso. Desta forma, recomenda-se a aplicação das técnicas apresentadas no Capítulo 2.

Algumas orientações gerais podem ainda serem dadas para a definição das faixas de busca. Para o ganho proporcional, a utilização de um coeficiente de conversão de

escala para o controlador (saída e entrada) normalmente facilita a escolha da faixa visto que traz o ganho proporcional para valores típicos (evitam-se ganhos muito pequenos ou muito elevados). Para o tempo integral e tempo derivativo, pode-se arbitrar uma faixa em que se englobe um intervalo largo o suficiente para a dinâmica dos processos em questão.

Em relação a busca em *grid*, recomenda-se ainda que respostas instáveis sejam removidas do universo das respostas obtidas, visto que poderão distorcer o cálculo da normalização das parcelas do *ID*.

Capítulo 4

ALGORITMO GENÉTICO

Algoritmos genéticos (GA) são técnicas heurísticas de otimização inspiradas em conceitos básicos da teoria da evolução pela seleção natural das espécies. Outras técnicas heurísticas também possuem como inspiração para seus desenvolvimentos conceitos biológicos diversos, tais como enxame de partículas, colônia de formigas, dentre outros. A ideia central do GA relaciona-se com a teoria da seleção natural apresentada por Charles Darwin em 1859 e largamente conhecida. O conceito base é o processo de descendência e a sobrevivência dos mais aptos, ou seja, num processo evolutivo afirma-se que indivíduos de uma população que possuam determinadas características propícias ao ambiente em que vivem terão maiores probabilidades de sobrevivência e de gerar proles.

Em contrapartida, indivíduos que apresentam características desfavoráveis tenderão a possuir menores chances de sobrevivência, as vezes nem mesmo sendo capazes de gerar descendentes. Dado que suas características são fruto do material genético de cada indivíduo, com o passar das gerações espera-se observar uma evolução da espécie em questão através de uma seleção natural, de forma que na população haverá uma concentração cada vez maior de indivíduos aptos, visto que são resultantes do cruzamento entre os mais aptos de cada geração.

Um exemplo clássico é a resistência desenvolvida por determinados microrganismos a antibióticos: considerando uma população de bactérias, existem variações nos seus materiais genéticos de forma que um grupo poderá ser rapidamente eliminado ao ser submetido a um certo medicamento. Outras poderão apresentar genes que as tornem menos vulneráveis ao mesmo antibiótico, sendo capazes de sobreviver a

tratamentos que não atendam a um determinado período mínimo. Desta forma, estas bactérias sobreviventes irão se reproduzir e a nova geração tenderá a conter uma maior proporção de bactérias mais resistentes, visto que aquelas menos aptas foram eliminadas anteriormente. Repetindo este ciclo por um número relevante de gerações, a nova população de bactérias poderá evoluir até que o antibiótico utilizado anteriormente seja praticamente inócuo. Comportamentos similares são observados também em diversos outros campos e espécies.

A aplicação destes conceitos em técnicas de otimização segue os mesmos princípios da seleção natural. A mensuração de quão apto é cada indivíduo é normalmente a função matemática (função objetivo) a qual se deseja otimizar (encontrar um mínimo ou máximo). Por conseguinte, os indivíduos são soluções candidatas para o problema de otimização. Cada população é então formada por n indivíduos aleatórios, em que são aplicados “operadores genéticos” tais como *crossovers* (cruzamentos) e mutações. A aptidão dos mesmos (valor da função objetivo para cada um) é medida e em seguida realiza-se a seleção dos mais aptos para avançar de uma geração para outra, repetindo o ciclo evolutivo. A Figura 4.1 apresenta um fluxograma simplificado do processo iterativo, onde cada operador, etapas, conceitos e possíveis variações serão detalhadas e discutidas nas seções seguintes. Serão apresentados ainda os formatos de aplicação destes elementos para o problema alvo deste trabalho.

4.1 Indivíduos e genes

Cada indivíduo “x” possui seu determinado material genético e constitui uma possível solução para o problema de otimização. A representação do mesmo pode ser normalmente em formato binário, através da caracterização de seus genes por uma cadeia de bits (*bit strings*), ou real, onde tem-se um vetor com p elementos reais, representando os genes. A escolha do formato depende da concepção do problema em questão, complexidade, dentre outros aspectos.

Por exemplo, lidando-se com problemas cujas variáveis são contínuas, a utilização de cadeias de bits é menos direta visto que é necessário acrescentar duas etapas no algoritmo: codificação, para representar os valores reais em cadeias de bits; e decodificação, seja para viabilizar o cálculo da aptidão de cada indivíduo ou para exibir os resultados em um formato compreensível e explícito. Diversos trabalhos

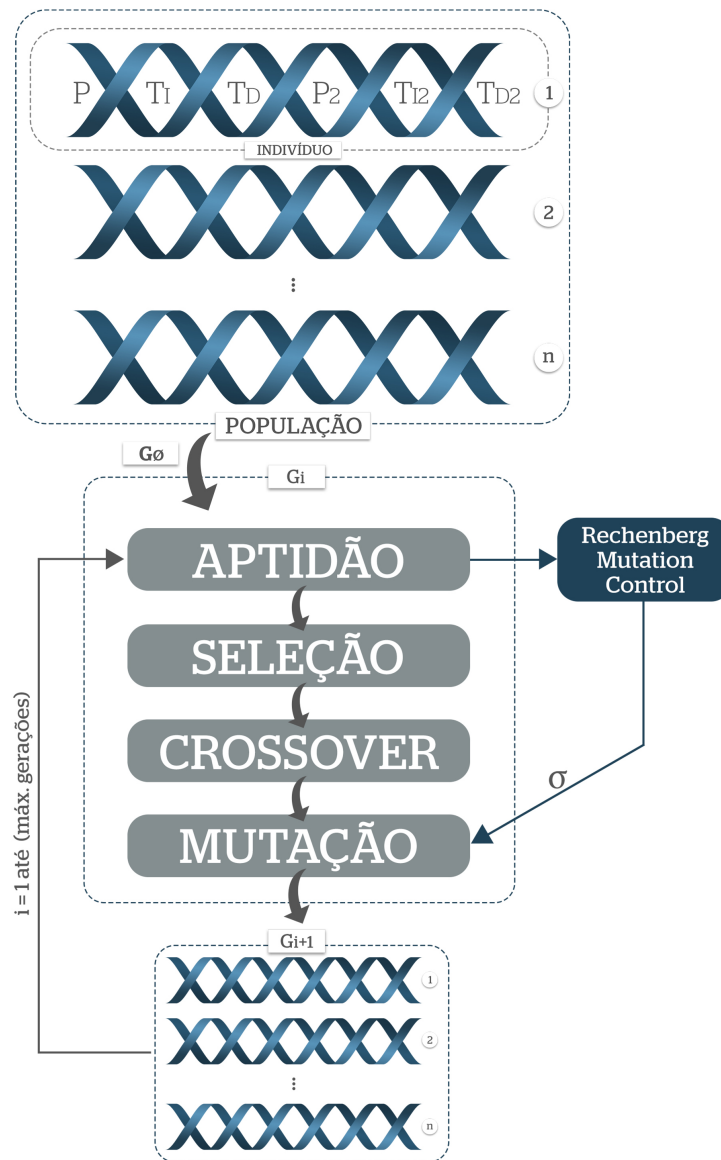


Figura 4.1: Fluxograma simplificado para execução do GA.

discorrem sobre as vantagens, quando possível, da utilização da representação real (Wright (1991) e Michalewicz (1996)).

Diante do exposto e dadas as características do problema alvo deste trabalho, a representação real mostrou-se mais adequada. Cada indivíduo será caracterizado pelos parâmetros de sintonia típicos de malhas de controle: ganho proporcional (P), tempo integral (T_I) e tempo derivativo (T_D). Como forma de possibilitar a utilização em problemas multi-malhas, definiu-se então a representação conforme apresentada

na Figura 4.2 e retratada em forma de vetor pela Equação 4.1

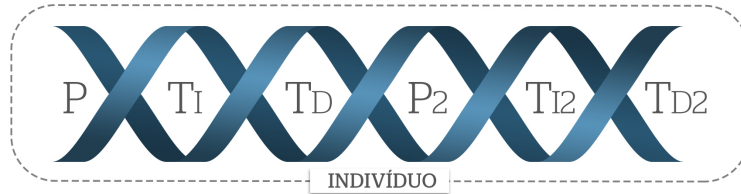


Figura 4.2: Formato de representação real definido para cada indivíduo.

$$x_n = (P, T_I, T_D, P_2, T_{I2}, T_{D2}) \quad (4.1)$$

A ordem dos genes, neste caso, não afeta a solução do problema. Contudo, para uma estratégia com dois controladores em cascata, convencionou-se que os três primeiros genes serão P , T_I e T_D do controlador mestre e os três últimos serão P_2 , T_{I2} e T_{D2} , referente ao escravo. Nota-se também que, na teoria genética, isoladamente os genes são fatores normalmente não observáveis, porém seu conjunto se expressa em determinadas características (fenótipo), sendo estas visíveis. Tome como exemplo um controlador com parâmetros $P = 2$, $T_I = 100$ e $T_D = 1$ (genes), onde percebe-se que os valores dos parâmetros não trazem informações diretas sobre as características da resposta do processo frente a distúrbios ou alterações de referência, em que neste caso o fenótipo seria, por exemplo, o tempo de subida, sobressinal, dentre outros.

4.2 Função objetivo

A função objetivo (também referida comumente como função custo) é o centro do problema de otimização, onde o propósito será de maximizar ou minimizar a mesma. Sem perda de generalidade, já que um problema de maximização pode ser convertido num problema equivalente de minimização e vice-versa, neste trabalho será considerado um problema de minimização. No algoritmo genético, a função objetivo mede a aptidão de cada indivíduo, ou seja, quão favoráveis são suas características no ambiente.

Para o problema de sintonia ótima estudado neste trabalho, pode-se considerar, de forma análoga e para efeito ilustrativo, o seguinte paralelo:

- a população é formada por “ n ” indivíduos (conjunto de controladores) com “ p ” genes cada;
- os genes dos indivíduos são representados pelos parâmetros de sintonia. Estes genes se expressam como características observáveis;
- as características favoráveis estão relacionadas com o objetivo de controle. Por exemplo, caso o objetivo seja uma malha de controle que rejeite rapidamente perturbações, indivíduos que apresentem tempos de resposta rápidos serão considerados mais aptos;
- a aptidão dos indivíduos será medida pela função objetivo, representada pelo índice de desempenho definido na Seção 3.2;
- neste caso, quanto menor a função de objetivo, mais apto o indivíduo. Desta forma, temos um problema de minimização.

4.3 Cruzamento ou *Crossover*

A formação de novos indivíduos a partir de outros previamente existentes se dá pelos operadores de *crossover* e mutação. *Crossovers* são cruzamentos do material genético de dois indivíduos, combinando-os para formação de descendentes. Desta forma, espera-se que ao combinar genitores com boa aptidão (ambos possuem características favoráveis), haveria boas chances de obter proles também aptas e possivelmente que superem seus genitores.

Os cruzamentos podem ser implementados de diversas formas diferentes em algoritmos genéticos, de modo que não existe um formato único que apresentará o melhor resultado para qualquer tipo de problema. Esta definição muitas vezes é proveniente de testes práticos (tentativa e erro) direcionados ao problema em estudo. Um exemplo de implementação dos cruzamentos pode ser a permuta de um ou mais fragmentos de uma cadeia de bits, conforme apresentado na Figura 4.3.

De forma semelhante, no caso da representação real dos indivíduos também é possível realizar o *crossover* através da permuta de determinado gene ou fragmentos de genes. Contudo, existem ainda outras possibilidades para este operador. Para a geração de descendentes pode-se, por exemplo, realizar a média aritmética

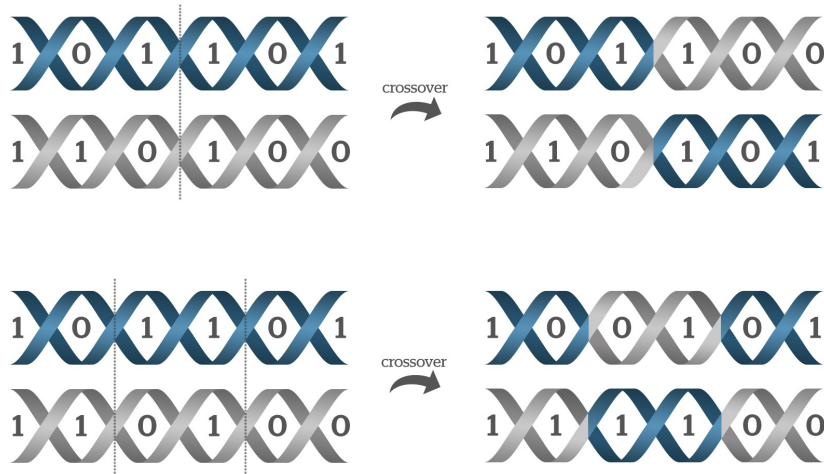


Figura 4.3: Exemplos de tipos de *crossover* entre dois indivíduos representados por cadeias de bits.

ou efetuar uma combinação linear dos genes dos genitores. Diversos testes foram realizados para o problema apresentado neste trabalho, onde optou-se pela utilização da combinação linear para a implementação do *crossover*.

Dados dois indivíduos x_1 e x_2 (genitores), a Equação 4.2 apresenta matematicamente a formação dos descendentes conforme supracitado. Bons resultados da utilização de técnicas aritméticas para cruzamentos podem ser encontrados em Wright (1991) e Michalewicz (1996).

$$\begin{aligned}
 x_3 &= \alpha \cdot x_1 + (1 - \alpha) \cdot x_2 \\
 x_4 &= (1 - \alpha) \cdot x_1 + \alpha \cdot x_2 \\
 \alpha &\in [0, 1].
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

4.4 Mutação

Mutações são transforma es aleatórias de um ou mais genes de um mesmo indivíduo. Apesar de aparentar ser um operador genético simples,   importante que as muta es atendam a algumas características que permitam uma busca efetiva das solu es ótimas: alcance, neutralidade e escalabilidade (Kramer (2017)).

A primeira característica visa tentar garantir que, a partir de um ponto arbitrário, todos os pontos no espaço de possíveis solu es tenham uma mínima probabilidade de serem alcançáveis a partir de uma muta o. A neutralidade (*unbiasedness*) está

relacionada com operadores não tendenciosos, ou seja, a aqueles que não induzem uma ou mais direções de busca específicas, o que poderia desfavorecer o encontro de ótimos globais. Por sua vez, a escalabilidade permite que as mutações sejam adaptáveis durante o processo evolutivo, permitindo ajustar a busca dos pontos ótimos durante a execução do algoritmo genético. O parâmetro responsável por esta propriedade é normalmente denominado taxa de mutação.

Novamente, diversas formas de implementação deste operador foram verificadas com objetivo de obter bons resultados para o problema alvo deste trabalho. Para representações contínuas - tal como a apresentada na Seção 4.1 - um formato bastante utilizado e com bons resultados na literatura é a mutação Gaussiana. Nesta abordagem, é gerado um vetor de ruído com distribuição normal com “ p ” elementos, sendo “ p ” o número de genes que possui cada indivíduo. A distribuição de cada elemento do vetor segue a curva apresentada na Figura 2.3, sendo μ a média e σ o desvio padrão.

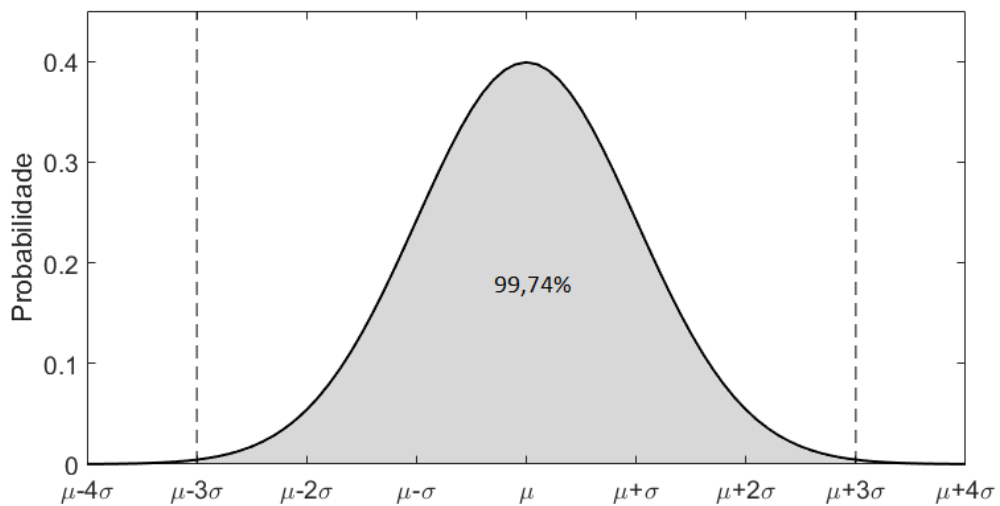


Figura 4.4: Distribuição da mutação Gaussiana para cada gene.

Desta forma, um novo indivíduo x'_n gerado pela aplicação do operador mutação pode ser descrito como

$$x'_n = x_n + \sigma \cdot N(\mu, 1),$$

sendo $x_n = (P, T_I, T_D, P_2, T_{I2}, T_{D2})$, σ a taxa de mutação e $N(\mu, 1)$ a distribuição normal padrão com média deslocada em μ . Note que a escolha adequada do parâmetro σ garante a escalabilidade e permite o alcance de todas as regiões do espaço de busca, enquanto a simetria da distribuição Gaussiana assegura a neutralidade do operador.

Algumas técnicas visam ainda aprimorar a busca do ponto ótimo através do ajuste da taxa de mutação durante a execução do GA, sendo algumas exemplificadas e comparadas em Thierens (2002). Uma forma possível é iniciar a busca com valores elevados de σ e gradativamente reduzi-lo com o passar das gerações. A ideia por trás do método é garantir uma busca ampla no início do algoritmo, para evitar uma atração precoce à um ótimo local, e gradativamente ir focando as buscas em regiões menores do espaço.

Outra forma, bastante utilizada, é a taxa de mutação de Rechenberg (Rechenberg (1973)), que implementa um mecanismo adaptativo de controle da taxa de mutação de acordo com o desempenho em tempo real do GA. O método avalia dentro de uma janela de gerações quantas destas foram capazes de gerar soluções melhores que as anteriores. Caso este número seja maior do que 20%, propõe-se que a taxa de mutação seja aumentada para acelerar a busca do ótimo. Caso menor do que 20%, significa que a busca está com dificuldade de encontrar valores ótimos e portanto a taxa de mutação deveria ser reduzida para focar em regiões menores. Tome como exemplo uma janela de 10 gerações consecutivas: caso mais de duas delas apresentem resultados melhores, aumenta-se a taxa de mutação; caso apenas uma tenha apresentado resultados melhores, diminui-se a taxa de mutação; caso contrário, mantém-se a taxa de mutação corrente. Em Kramer (2017), apresenta-se um exemplo comparativo entre dois algoritmos, um utilizando o método de Rechenberg e outro com uma taxa de mutação constante, evidenciando um melhor desempenho do primeiro.

Neste trabalho utilizou-se a mutação gaussiana associada ao método de Rechenberg para controle da taxa de mutação. Como os genes possuem faixas de busca e valores distintos, foram definidas p taxas σ_p e médias μ_p independentes para cada gene. O operador mutação é aplicado conforme a Equação 4.3.

$$x'_n = x_n + [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \dots \ \sigma_p] \cdot \begin{bmatrix} N(\mu_1, 1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N(\mu_2, 1) & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & N(\mu_p, 1) \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Note que esta implementação garante que todos os genes possuam probabilidade positiva de sofrerem mutações com intensidade variável e dependente de σ , ajustado ao longo das gerações pelo método de controle da taxa de mutação adotado.

4.5 Seleção

O método de seleção é baseado na aptidão de cada indivíduo, em que naturalmente deverá haver uma preferência por aqueles mais aptos. Em termos práticos, este operador deverá buscar dentro de uma população aqueles que apresentam os menores valores da função objetivo (no caso de minimização). Existem diversos métodos de seleção bem como trabalhos que investigam e comparam a eficiência entre estes, tais como podemos observar em Blickle & Thiele (1995) e Blickle (1997). Neste trabalho, o foco será dado aos conceitos envolvidos e não na aplicação e comparação minuciosa entre todos os métodos.

Um critério importante é a pressão de seleção, representando em que grau um indivíduo mais apto é favorecido de uma geração para outra. Quanto maior a pressão de seleção, mais serão favorecidos os melhores indivíduos e, conseqüentemente, descartados indivíduos menos aptos. Apesar de parecer um ajuste simples, estudos mostram que algoritmos genéticos cuja pressão de seleção é muito elevada tendem a convergir para ótimos locais. Por outro lado, baixas pressões de seleção levam a convergências muito lentas. Diversos estudos avaliam o desempenho de GA sujeitos a diferentes pressões de seleção, como por exemplo Goldberg et al. (1993) e Miller et al. (1995).

Uma técnica bastante utilizada é a seleção proporcional, na qual cada indivíduo possui uma chance de seleção proporcional à sua aptidão, sendo portanto aplicável somente a problemas com funções objetivos não negativas. Desta forma, a pressão de seleção é dada intrinsecamente de acordo com o valor da função objetivo (aptidão) de cada indivíduo.

Outra técnica comum é a seleção por torneio, que funciona da seguinte forma: numa população com n indivíduos, aleatoriamente formam-se subgrupos com m indivíduos, selecionando um ou mais vencedores de cada grupo. Os tamanhos dos subgrupos e quantidade de vencedores são parâmetros que ajustam a pressão de seleção. De forma bastante semelhante, tem-se a técnica de seleção por elites, na qual escolhem-se os indivíduos mais aptos dentre toda a população.

Nota-se que uma preocupação constante para este operador é garantir um compromisso entre uma convergência eficiente e evitar ótimos locais. Neste sentido, Blickle (1997) indica que a seleção por torneios possui melhor desempenho. Obteve-se bons resultados neste trabalho utilizando a técnica de elitismo, na qual a pressão de seleção foi ajustada a partir da quantidade de indivíduos elite em cada geração.

Outra característica também importante nos algoritmos genéticos para evitar ótimos locais é a busca pela diversidade das soluções, em que pode ser interessante utilizar técnicas que evitem indivíduos que sejam muito parecidos, ou seja, que na prática representam uma mesma solução. Neste caso, utilizou-se uma faixa em torno de cada gene para eliminar indivíduos elite similares em cada geração, em que a largura da faixa decresce gradativamente para permitir uma busca acurada em torno das regiões ótimas encontradas a medida que as gerações avançam. Além disto, a cada nova geração acrescentam-se novos indivíduos aleatórios para manter a diversidade, tentando cobrir todo o espaço de busca do problema.

4.6 Restrições

Problemas de otimização podem possuir condições específicas as quais devem ser atendidas por diversos motivos: restrições físicas, de desempenho, econômicas, graus de liberdade, dentre outros. Normalmente, para um mesmo problema, a inclusão de restrições aumenta em maior ou menor grau a complexidade do mesmo. Na prática, restrições representam uma redução do espaço de soluções, podendo dificultar ou até mesmo inviabilizar a utilização de determinados métodos de otimização.

Em se tratando de algoritmos genéticos, existem algumas formas para a inclusão de restrições. Em alguns casos, é possível a reformulação do problema de forma a transformá-lo em um problema irrestrito, evitando a necessidade de lidar com as limitações impostas. Caso isto não seja viável, a forma mais direta de lidar com as

restrições em GA é comumente chamada de pena de morte (*death penalty*), na qual os indivíduos que não atendem às restrições impostas são imediatamente descartados e substituído por um novo, aleatório. Este método mostra-se bastante ineficiente pela necessidade repetitiva de geração de novos indivíduos e de recalcular as suas funções de aptidão, bem como diminui as probabilidades de determinação do ótimo global, podendo descartar precocemente indivíduos muito próximos do ponto ótimo.

Outra técnica é a inclusão de fatores de penalidades na função objetivo que aumentam (no caso de problemas de minimização) o valor da mesma caso uma ou mais restrições não sejam atendidas. Isto permite a busca em regiões não factíveis (em torno da fronteira das regiões factíveis de soluções), o que é vantajoso na determinação do ponto ótimo já que o mesmo muitas vezes está justamente em uma ou mais restrições. A penalidade na função objetivo será tão maior quanto for a violação da restrição. Evidentemente, este método só pode ser aplicado para casos em que é viável o cálculo da função objetivo mesmo quando a restrição é violada.

Neste trabalho, adotou-se a utilização das funções de penalidade para a inclusão de restrições de margem de fase (MF) e margem de ganho (MG) ao problema original. Desta forma, é somado ao ID definido na Seção 3.2 um fator proporcional à violação.

4.7 Parâmetros

Além da grande variedade existente para implementação dos operadores genéticos, deve-se ainda realizar o ajuste dos parâmetros de cada operador. Normalmente não existe uma definição única e objetiva de como utilizar cada operador para cada tipo de problema. Desta forma, muitas vezes estas definições são inspiradas em resultados empíricos obtidos em trabalhos semelhantes bem como na experimentação (tentativa e erro) de diversas possibilidades para o problema em questão. Kramer (2017) sugere que o bom conhecimento dos conceitos e fundamentos dos algoritmos genéticos envolvidos é uma boa fonte para se conseguir ajustes adequados dos parâmetros.

Além disto, a experiência com determinados tipos de problemas naturalmente trará uma maior precisão na seleção dos parâmetros apropriados, assim como ao se deparar com problemas completamente novos poderá ser necessário um novo ajuste através da tentativa e erro. Existem também outras técnicas mais elaboradas, sejam

visando estabelecer os parâmetros ótimos para o GA tratando-o como um novo problema de otimização, ou até mesmo utilizando métodos estatísticos (De Landgraaf et al. (2007)). Alguns métodos incluem um grau tão elevado de esforço e execução repetitiva do algoritmo genético para ajuste dos parâmetros que pode-se questionar as suas efetividades (Kramer (2017)).

Para o problema alvo deste trabalho, os ajustes destes parâmetros foram baseados na tentativa e erro, comparando-se os resultados obtidos pelo algoritmo genético frente a diferentes parâmetros para um mesmo problema. Os valores finais obtidos são descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros de ajuste do GA utilizado.

Parâmetro	Valor
Tamanho da população (n)	50
Número máximo de gerações	100
Elitismo	4
Cruzamentos	4
Mutações	10

O problema de otimização descrito é representado pela Equação 4.4.

$$\begin{aligned} \min_x \quad & \left(\frac{I_1}{I_{1max}} + \frac{I_2}{I_{2max}} + \dots + \frac{I_n}{I_{nmax}} \right) \frac{100}{ID_{max}}, \\ \text{s.a.} \quad & MG \geq 1, 2 \\ & MF \geq 30^\circ \end{aligned} \tag{4.4}$$

sendo $x = [P \ T_I \ T_D \ P_2 \ T_{I2} \ T_{D2}]^T$ os parâmetros de sintonia dos controladores (indivíduos).

4.8 Observações finais

Algoritmos genéticos têm-se mostrado eficazes na resolução de problemas de otimização, em que o avanço da tecnologia e acessibilidade a sistemas computacionais permitiu grandes avanços neste campo. Os mesmos possuem uma boa flexibilidade para tratar diversos tipos de problemas e estudos apontam os mesmos como técnicas de otimização global. Contudo, os ajustes e definições adequados dos operadores

genéticos não são triviais, necessitando um bom conhecimento sobre o funcionamento dos mesmos e experiência.

Para o trabalho em questão, a escolha da utilização do algoritmo genético vem da boa associação entre características do problema estudado e as particularidades deste tipo de técnica heurística, como podemos citar:

- a flexibilidade de aplicação em diversos problemas diferentes, viabilizando a utilização para diferentes modelos (FOPDT, SOPDT, IFOPDT, dentre outros) e estruturas (controladores P, PI, PD, PID, malha simples, multi-malhas, entre outras);
- GA podem lidar com restrições diversas, possibilitando a inclusão de requisitos de robustez à sintonia das malhas, parâmetro normalmente de importância relevante em controle de processos;
- a possibilidade de lidar com problemas multi-objetivos e facilidade de alteração da função custo, se ajustando perfeitamente com a definição do Índice de Desempenho necessário à aplicação do método de sintonia aqui proposto;
- como o problema de sintonia estudado não requer soluções em tempo real, o maior custo computacional do GA se comparado a outros métodos não é fator limitante.

Contudo, vale ressaltar que a sistemática de sintonia aqui proposta pode ser também aplicada, sem perda de generalidade, utilizando-se outros métodos de otimização.

Capítulo 5

ESTUDO DE CASOS

Como forma de ilustrar a aplicação do método desenvolvido neste trabalho, serão apresentados alguns exemplos de processos e as sintonias obtidas a partir da aplicação da sistemática proposta. Além disto, serão aplicadas outras técnicas de sintonia para efeito de comparação dos resultados, trazendo uma análise crítica dos prós e contras de cada método. As técnicas a serem comparadas serão: A-MIGO para sintonias de controladores PI e PID (Hagglund & Åström (2002) e Åström & Hägglund (2004), respectivamente); Ziegler-Nichols (Ziegler & Nichols (1942)); e a SIMC (Skogestad (2003)).

5.1 Controle de nível em cascata com vazão

Controladores de nível são comuns em unidades industriais, sejam eles relacionados a vasos, tanques, colunas de destilação ou diversos outros processos. Muitos problemas de controle e operação de unidades industriais decorrem de variações ou falhas na estratégia de ajuste das malhas de nível (Campos & Teixeira (2006)). Além disto, os ajustes para este tipo de malha podem ser contraintuitivos à primeira vista, em que muitas vezes faz-se necessário aumentar o ganho proporcional para reduzir as oscilações no processo.

Frequentemente tem-se ainda um controlador de nível associado a uma malha escrava de vazão. A inclusão desta segunda malha, apesar de benéfica no sentido de melhorar o desempenho regulatório na rejeição de distúrbios na vazão, acrescenta ao problema a necessidade de sintonia de mais uma malha.

A Figura 5.1 apresenta um diagrama típico para o caso abordado, no qual deseja-se controlar o nível de um vaso (controlador mestre, LC) através da manipulação da vazão de entrada do mesmo (controlador escravo, FC). Tem-se ainda, normalmente, alarmes de nível alto e baixo para o nível, bem como intertravamentos por nível muito alto ou muito baixo para, por exemplo, proteção contra eventos de segurança de processo ou para garantir a integridade de determinados equipamentos.

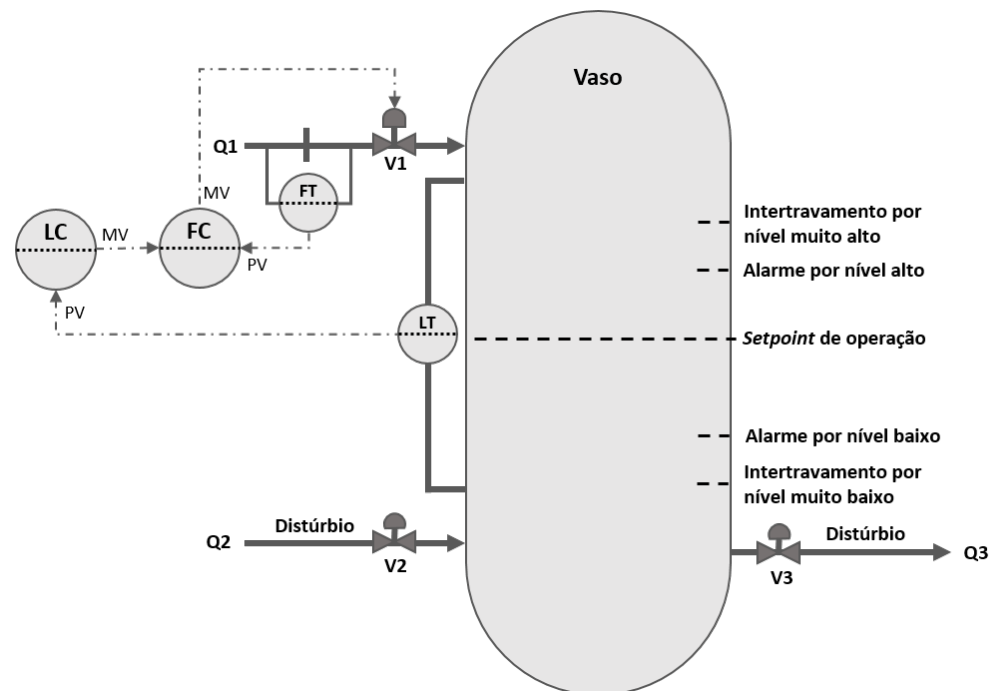


Figura 5.1: Controle de nível em cascata com vazão.

Uma sintonia adequada para este tipo de controle pode variar de acordo com cada processo no qual o mesmo está inserido. É comum, por exemplo, que estes vasos sejam utilizados com objetivo de atenuar distúrbios de uma seção da planta para outra (vaso pulmão), de forma que a sintonia deve ser tal que permita certa variação do nível. Contudo, em alguns casos pode ser desejável um controle mais agressivo, seja por operar muito próximo de faixas limites para o nível (segurança/continuidade operacional) ou para manter um inventário mínimo determinado para seções à jusante. Com isto, a flexibilidade do método proposto neste trabalho traz vantagens em relação a métodos universais no sentido de poder atender de forma simples quaisquer destes objetivos por meio da seleção das parcelas desejadas do índice de desempenho a ser otimizado. O método permite ainda a sintonia dos controladores

mestre e escravo ao mesmo tempo bem como determina de forma implícita a estrutura dos controladores (P, PI ou PID), simplificando o processo para o usuário. Além disto, são impostas restrições de margem de fase e de ganho como forma de buscar uma robustez para controladores projetados.

Para ilustração da sistemática para sintonia de uma malha em cascata de nível com vazão escolheu-se como exemplo um caso prático encontrado pelo autor numa unidade industrial.

5.1.1 Modelo do processo

A modelagem simplificada do processo descrito pode ser obtida através de um teste degrau na planta. Para o modelo do nível, outra forma de obtenção do modelo seria através dos desenhos de projeto do vaso e equações de balanço de massa. Neste estudo de caso foi possível a utilização de testes reais em um processo industrial, em que a Figura 5.2 apresenta a resposta das plantas (vazão e nível) ao degrau aplicado.

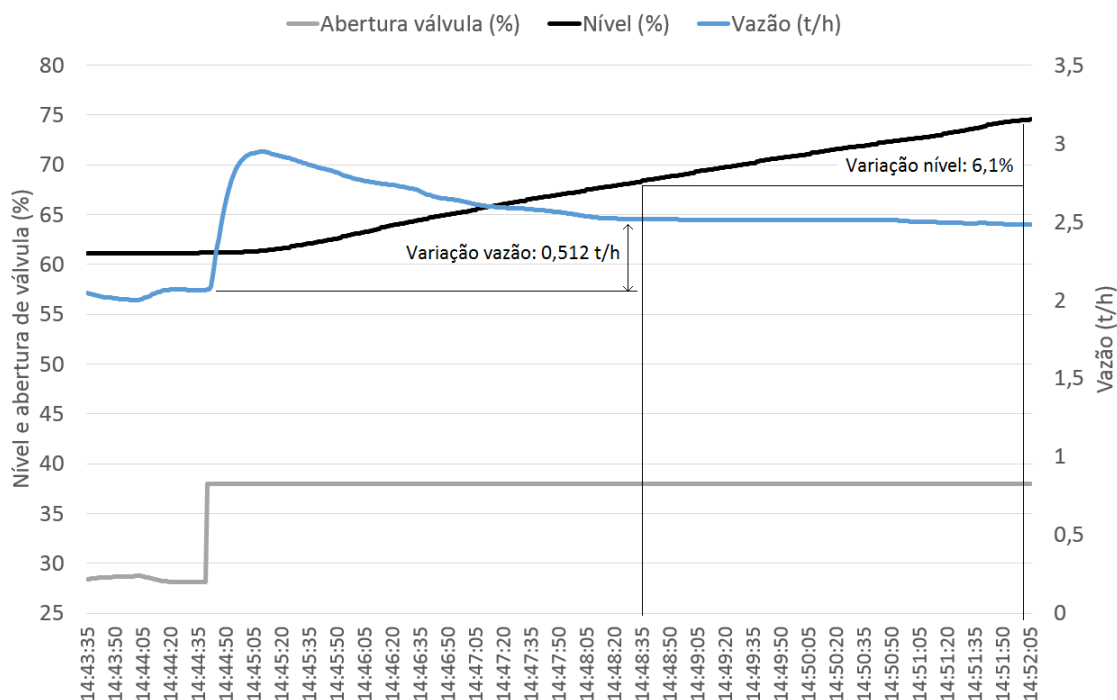


Figura 5.2: Teste degrau realizado para identificação dos modelos.

A partir do balanço de massa do sistema, apresentado na equação 5.1, pode-se encontrar o modelo desejado.

$$Q_{ent}(t) - Q_{sai}(t) = \frac{dV}{dt}, \quad (5.1)$$

sendo $Q_{ent}(t)$ a somatória das vazões entrando no vaso e $Q_{sai}(t)$ a somatória das vazões saindo do vaso, ambas em toneladas por hora. Sem perda de generalidade e para simplificação da equação, será utilizada a notação $Q(t) = Q_{ent}(t)$ (modelo sem perturbação) para a análise e modelagem matemática do sistema.

Para o vaso aqui exemplificado tem-se $V = A \cdot h$, visto que trata-se de um vaso cilíndrico, sendo A a seção transversal (m^2) e h o nível (m). Pode-se considerar ainda um atraso, θ_1 , de forma a representar os atrasos inerentes ao sistema digital de coleta de dados, relacionados as medições/instrumentação, bem como possíveis aproximações utilizadas na identificação do modelo. Tem-se então que

$$Q(t - \theta_1) = A \frac{dh}{dt},$$

onde

$$H(s) = \frac{Q(s)}{A \cdot s} e^{-\theta_1 s}.$$

No processo em questão temos a medição de nível em percentual e das vazões em tonelada por hora, sendo necessário realizar conversões de unidades para compatibilizar com as equações do balanço de massa. A vazão volumétrica pode ser obtida através da densidade do produto (ρ), e o nível a partir da distância entre as tomadas do medidor de nível ($D_{tomadas}$), apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Informações do processo.

Parâmetro	Valor
Densidade (ρ)	0,884 kg/m ³
$D_{tomadas}$	1,15 m

Desta forma, a partir dos resultados do teste degrau e equações supracitadas pode-se encontrar o modelo apresentado pela Equação 5.2, onde foi acrescentado o atraso θ_1 devido às aproximações utilizadas para o modelo matemático bem como os atrasos inerentes ao sistema digital de coleta de dados.

$$Gp_1(s) = \frac{N(s)}{Q(s)} = \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{s} \frac{100}{\rho D_{tomadas}} e^{-\theta_1 s}, \quad (5.2)$$

com $N(s)$ sendo o nível em percentual, $Q(s)$ a vazão resultante, $A = 0,47 \text{ m}^2$, $\theta_1 = 5\text{s}$, $\rho = 0,884 \text{ kg/m}^3$ e $D_{tomadas} = 1,15 \text{ m}$.

Para o modelo da vazão, aplicando o método de identificação proposto em Hagglund & Åstrom (2002) - descrito na Seção 2.1 - obteve-se o modelo de primeira ordem aproximado apresentado pela Equação 5.3.

$$Gp_2(s) = \frac{Q(s)}{U(s)} = \frac{k_2}{\tau_2 s + 1} e^{-\theta_2 s}, \quad (5.3)$$

com $k_2 = 1,5333 \cdot 10^{-05} \text{ t/s}\%$, $\theta_2 = 1\text{s}$ e $\tau_2 = 5,966\text{s}$, sendo $U(s)$ e $Q(s)$ as transformadas de Laplace da abertura da válvula ($\%$) e da vazão (t/s), respectivamente.

O parâmetro “A” do modelo do nível pode ser ainda ratificado através da documentação de projeto do vaso, apresentada na Figura 5.3.

A partir do diâmetro do vaso (800mm), obtém-se $A = 0,5 \text{ m}^2$, representando um erro de apenas 6% ($0,03 \text{ m}^2$) em relação ao valor da área encontrado através do teste de grau.

5.1.2 Modelo do controlador

Com objetivo de compatibilizar os resultados com os sistemas de controle da planta em questão, utilizou-se a implementação digital do algoritmo PID do fabricante Yokogawa. Nesta implementação, o fabricante utiliza o incremento da variável manipulada, calculada a cada instante “n”, representado por ΔMV_n na Equação 5.4.

$$\Delta MV_n = K_s \cdot \frac{100}{BP} \left(\Delta E_n + \frac{\Delta T}{T_I} E_n + \frac{T_D}{\Delta T} \Delta(\Delta E_n) \right), \quad (5.4)$$

com $K_s = (MSH - MSL)/(SH - SL)$, sendo

- n : instante de tempo;
- ΔT : amostragem;
- PV_n : variável de processo (em unidade de engenharia);
- SV_n : referência (em unidade de engenharia);
- E_n : erro ($E_n = PV_n - SV_n$);
- ΔE_n : variação do erro entre duas amostragens ($\Delta E_n = E_n - E_{n-1}$);

- BP : banda proporcional;
- P : ganho proporcional ($P = 100/BP$);
- T_I : tempo integral;
- T_D : tempo derivativo;
- K_s : coeficiente de conversão de escala;
- MSH : limite máximo da escala da MV ;
- MSL : limite mínimo da escala da MV ;
- SH : limite máximo da escala da PV ;
- SL : limite mínimo da escala da PV .

Desta forma, os parâmetros de sintonia encontrados neste trabalho poderão ser aplicados diretamente no sistema de controle da planta em questão.

5.1.3 Sintonia utilizando o método A-MIGO

Seguindo a sistemática descrita na Seção 2.1, tem-se as seguintes etapas para o processo de sintonia:

- identificação da planta de vazão (abertura de válvula *versus* vazão);
- aplicação das regras de sintonia para o controle de vazão (malha escrava). Neste caso, serão avaliadas as respostas do controle tipo PI e tipo PID visto que o método não define diretamente a estrutura mais adequada;
- identificação da planta de nível (vazão de entrada *versus* nível), com o controle de vazão já em malha fechada;
- aplicação das regras de sintonia para o controle de nível (malha mestre), também considerando as opções de controle PI e PID.

Nota-se que, a partir da sistemática descrita acima, tem-se quatro combinações possíveis de estruturas para o mestre e escravo (PI/PI; PID/PI; PI/PID e PID/PID). Desta forma, haverá ainda a necessidade de uma análise qualitativa das respostas pelo usuário para a escolha da melhor sintonia dentre as quatro possíveis, de modo que será importante o conhecimento dos requisitos e restrições do processo em questão. Utilizando os modelos já identificados na Seção 5.1.1 e através de simulações no software *MATLAB*, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 5.3.

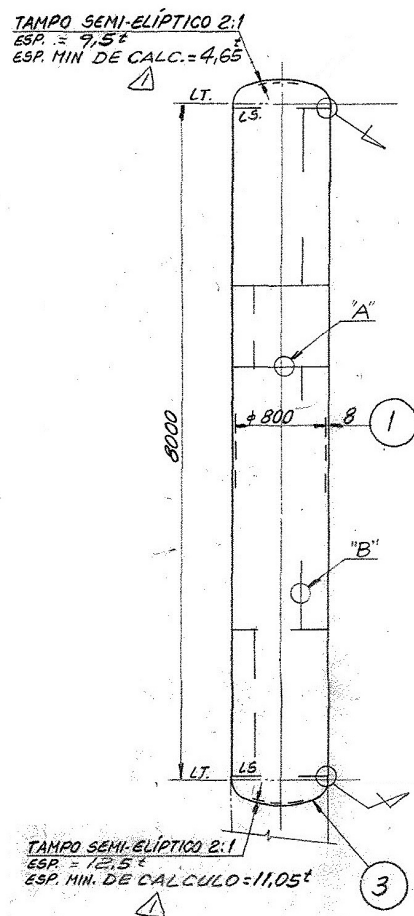


Figura 5.3: Documentação de projeto do vaso.

A Figura 5.4 apresenta as quatro respostas obtidas frente a um distúrbio típico de 1,0 t/h na entrada (vazão V2, Figura 5.1).

Tabela 5.3: Parâmetros de sintonia obtidos pelo método A-MIGO.

Caso	BP	T _I	T _D	BP ₂	T _{I2}	T _{D2}
PI/PI	5,3	33	-	52,9	4,8	-
PID/PI	0,9	37,7	2,4	52,9	4,8	-
PI/PID	5,3	33	-	27,3	3,2	0,5
PID/PID	0,9	37,7	2,4	27,3	3,2	0,5

Observa-se que todas as respostas apresentam picos pequenos no nível (< 0,6%), conforme apresentado na Tabela 5.4, rejeitando a perturbação de forma relativamente rápida. Para isto, conseqüentemente tem-se uma atuação rápida na válvula,

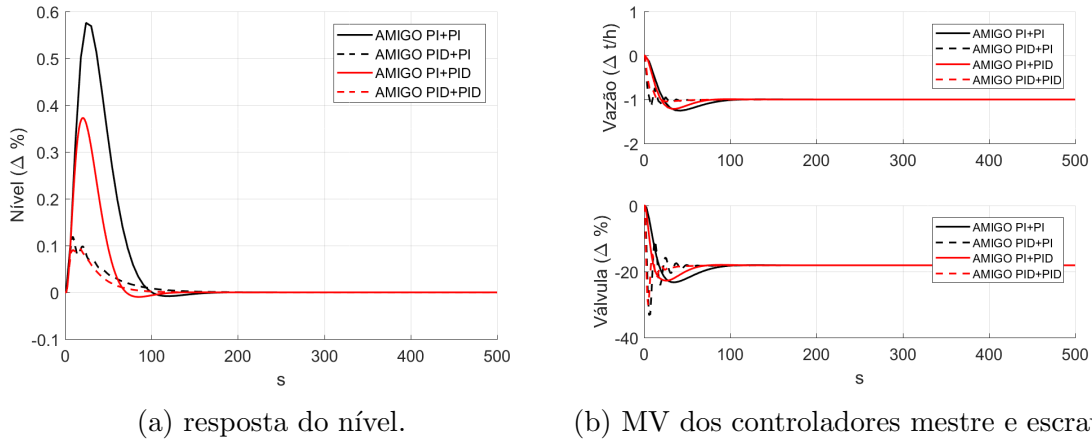


Figura 5.4: Respostas obtidas para as sintonias conforme a Tabela 5.3.

o que pode ser indesejado. Analisando a Figura 5.4b pode-se perceber que as respostas considerando a estrutura PID para o mestre apresentam oscilações na saída do controlador escravo e picos elevados. Como forma de mensurar e avaliar a agressividade do controlador pode-se calcular índices tais como taxa de variação (TV) máxima e picos da MV bem como a integral absoluta do esforço de controle (ou do inglês IACE, *Integrated Absolute Control Effort*), apresentados na Tabela 5.5. Foi dado foco a MV do controlador escravo apenas, visto que a MV do mestre não representa um atuador real mas sim a referência do controlador escravo.

Tabela 5.4: Cálculo de índices de desempenho para o nível (A-MIGO).

Caso	Pico PV	ISE
PI/PI	0,58%	10,496
PID/PI	0,12%	0,296
PI/PID	0,37%	3,334
PID/PID	0,10%	0,215

Tabela 5.5: Cálculo de índices do esforço de controle (A-MIGO).

Caso	Pico MV	TV máx.	IACE
PI/PI	-23,3%	-1,4%/s	10,1%
PID/PI	-33,2%	-8,9%/s	64,5%
PI/PID	-22,8%	-2,3%/s	24,7%
PID/PID	-30,1%	-12,0%/s	62,8%

Percebe-se em alguns casos picos de mais de 33% bem como taxas máximas de

variação da válvula relativamente altas ($-8,85\%/s$ e $-12,01\%/s$), o que poderá ocasionar problemas de desgaste no atuador e partes móveis da válvula. Com intuito de minimizar estes problemas bem como tender a uma sintonia com maior robustez, o usuário poderia selecionar, por exemplo, a estrutura PI/PI, visto que controladores menos agressivos tendem a ser mais robustos frente a incertezas, erros de modelagem e não linearidades do sistema.

Conclui-se que, apesar do método trazer simplificações importantes para a sintonia e ser aplicável a uma grande variedade de processos típicos, ainda assim é importante conhecer o processo a ser controlado para a tomada de decisões durante a sintonia. Além disto, o método torna-se mais complexo a medida que se acrescenta mais de uma malha (por exemplo, estratégia cascata), devido ao número de combinações possíveis, bem como não existem parâmetros de ajuste fino para adequação da sintonia obtida, quando necessário. Por exemplo, caso considere-se que o esforço de controle ou o tempo de resposta esteja inadequado, o usuário teria que ajustar os parâmetros do controlador fornecidos pelo método através de tentativa e erro.

5.1.4 Sintonia utilizando o método ZN

Utilizando o método ZN, as etapas para sintonia das malhas serão análogas às realizadas para o método A-MIGO, em que primeiramente realiza-se a identificação da malha de vazão e faz-se a sintonia do controlador escravo, em seguida realiza-se a identificação da malha de nível e a sintonia do controlador mestre. Obtém-se então quatro combinações possíveis, com os resultados apresentados na Tabela 5.6 e respostas do nível e MV do controlador ilustradas na Figura 5.5. A Tabela 5.7 apresenta algumas métricas de desempenho calculadas para as quatro estruturas possíveis.

Tabela 5.6: Parâmetros de sintonia obtidos pelo método ZN.

Caso	BP	T _I	T _D	BP ₂	T _{I2}	T _{D2}
PI/PI	1,93	9,6	-	14,69	3,33	-
PID/PI	1,45	5,8	1,44	14,69	3,33	-
PI/PID	1,88	7,85	-	11,01	2,0	0,5
PID/PID	1,41	4,72	1,18	11,01	2,0	0,5

Observa-se que todas as respostas apresentam picos pequenos no nível e rejei-

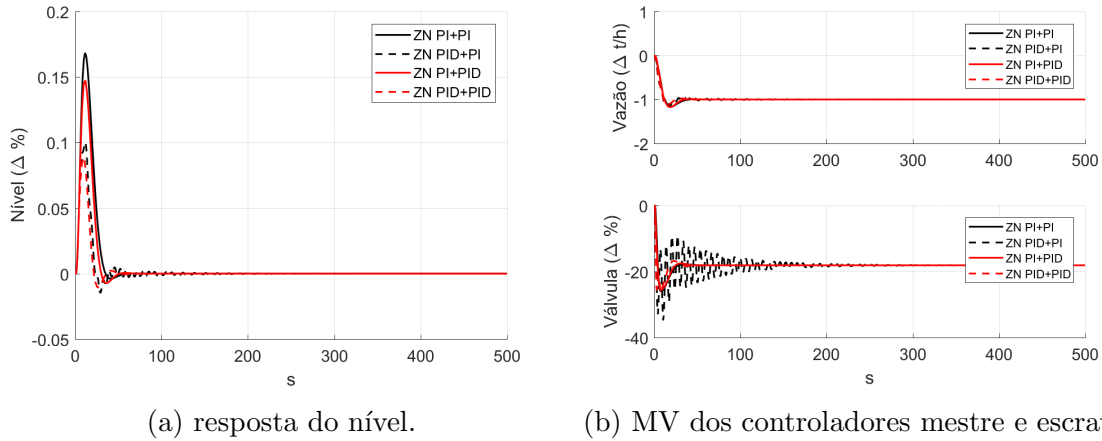


Figura 5.5: Respostas obtidas para as sintonias conforme a Tabela 5.6.

Tabela 5.7: Cálculo de índices de desempenho para o nível e esforço de controle (ZN).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
PI/PI	0,17%	0,331	-26,0%	-6,3%/s	21,2%
PID/PI	0,10%	0,099	-34,8%	-14,1%/s	592,4%
PI/PID	0,15%	0,241	-25,7%	-7,7%/s	36,3%
PID/PID	0,09%	0,070	-26,2%	-18,4%/s	54,5%

tam a perturbação de forma relativamente rápida. Avaliando o esforço de controle, notam-se algumas respostas bastante agressivas, como por exemplo o caso PID/PI em que se tem quase 600% de IACE e MV do escravo com taxa de variação máxima de $-14,1\%/s$ e pico de $34,8\%$. Similarmente à filosofia adotada na Seção 5.1.3, o usuário poderia selecionar, por exemplo, a estrutura PI/PI, também visando uma sintonia mais robusta e menor desgaste do atuador/válvula. Assim como o método A-MIGO, o método ZN também não traz parâmetros de ajuste fino para possíveis necessidades de adequação da sintonia. Além disto, conforme apresentado no Capítulo 2, o critério adotado para sintonia ZN ($1/4$ de razão de declínio) muitas vezes traz sintonias pouco robustas e muito agressivas.

5.1.5 Sintonia utilizando o método SIMC

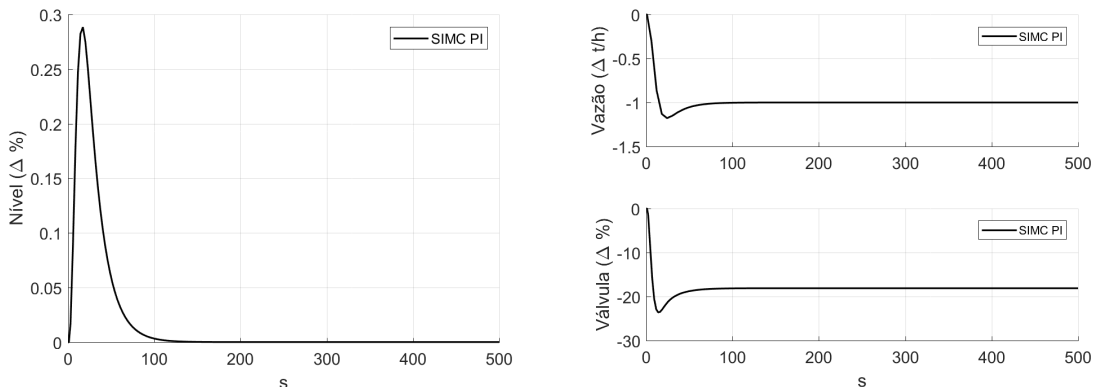
O método SIMC também trará etapas para sintonia das malhas análogas àquelas realizadas pelo método A-MIGO e ZN, conforme já descrito nas Seções 5.1.3 e 5.1.4.

Por outro lado, de acordo com o tipo de modelo do processo, o método já sugere a estrutura do controlador, de forma que se reduzem as combinações possíveis. No caso do controle de nível em cascata com vazão, tem-se um modelo FOPDT para identificação da malha de vazão e pode-se adotar um modelo integrador com atraso para a malha de nível visto que a dinâmica da malha de vazão é não-dominante, resultando na escolha da estrutura PI/PI. Além disto, o método provê um parâmetro de ajuste τ_c que permite que o usuário selecione a constante de tempo de malha fechada desejada, estabelecendo um compromisso entre desempenho (τ_c menores) e robustez (τ_c maiores). Conforme apresentado na Seção 2.3, uma escolha recomendada seria selecionar τ_c igual ao atraso do modelo (θ). Desta forma, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Parâmetros de sintonia obtidos pelo método SIMC.

Caso	BP	T _I	T _D	BP ₂	T _{I2}	T _{D2}
PI/PI	2,51	25,3	-	26,44	6	-

A Figura 5.6 apresenta a resposta obtida e a Tabela 5.9 traz o cálculo das métricas de desempenho avaliadas. Percebe-se que a sintonia obtida é menos agressiva do que daquela encontrada pelo método ZN, porém um pouco mais agressiva se comparada à estrutura PI/PI obtida pelo método A-MIGO.



(a) resposta do nível.

(b) MV dos controladores mestre e escravo.

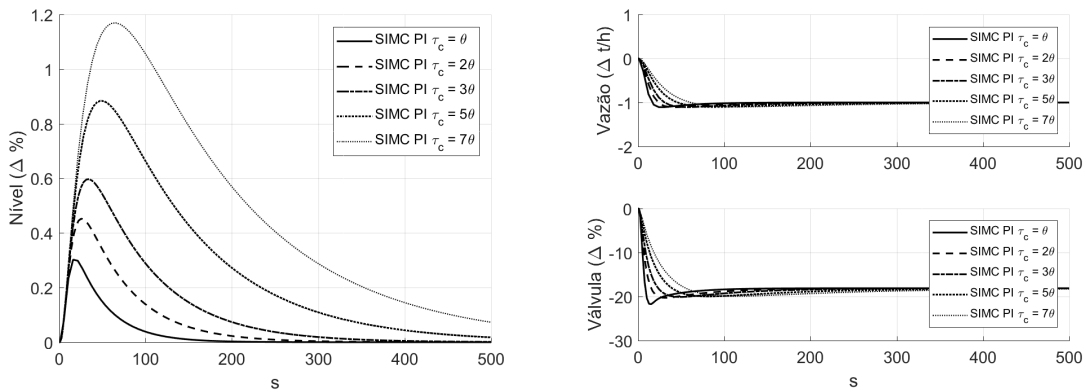
Figura 5.6: Respostas obtidas para as sintonias conforme a Tabela 5.8.

Como forma de avaliar qual o impacto da variação do parâmetro τ_c na sintonia, foram realizadas novas simulações com $\tau_c = \theta$ até $\tau_c = 7\theta$. A Figura 5.7 ilustra o grau de liberdade que o usuário teria utilizando este método, onde nota-se uma boa

Tabela 5.9: Cálculo de índices para o nível e esforço de controle (SIMC).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
PI/PI	0,29%	1,7	-23,6%	-3,1%/s	13,0%

versatilidade e diferencial interessante frente a outros métodos. Contudo, apesar da boa flexibilidade, ainda assim é uma flexibilidade limitada e não relaciona diretamente requisitos qualitativos de desempenho (exceto a própria constante de tempo de malha fechada desejada τ_c). Não é possível, por exemplo, permitir maior flexibilidade de oscilação do nível, impor menores picos ou taxas máximas de variação do esforço de controle, dentre outros objetivos.



(a) resposta do nível.

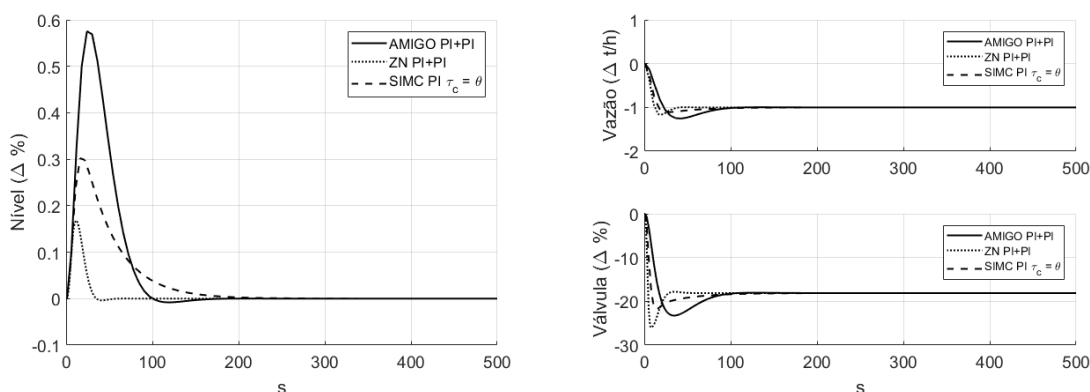
(b) MV dos controladores mestre e escravo.

Figura 5.7: Respostas obtidas para as sintonias variando τ_c .Tabela 5.10: Cálculo de índices para o nível e esforço de controle variando τ_c (SIMC).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
$\tau_c = \theta$	0,29%	1,7	-23,6%	-3,1%/s	13,0%
$\tau_c = 2\theta$	0,42%	5,7	-21,6%	-2,1%/s	10,2%
$\tau_c = 3\theta$	0,56%	13,5	-21,2%	-1,6%/s	9,8%
$\tau_c = 5\theta$	0,82%	45,1	-21,0%	-1,1%/s	8,6%
$\tau_c = 7\theta$	0,88%	77,9	-20,0%	-1,0%/s	5,8%

A Figura 5.8 apresenta uma síntese das três sintonias obtidas nas Seções 5.1.3, 5.1.4 e 5.1.5, bem como a Tabela 5.11 traz a comparação entre as métricas de desempenho. Foram selecionadas algumas respostas representativas de cada método. Nota-se que o método ZN trouxe a resposta mais agressiva dentre os três métodos (pico na MV de -26% e taxa máxima de variação da MV de -6,3%/s) e menor pico

na PV (0,17%). Por outro lado, o método A-MIGO teve a resposta mais suave no esforço de controle (pico na MV de -23,3% e taxa máxima de variação da MV 77% menor que o ZN) porém com um pico na PV 3,4 vezes maior que o ZN. O método SIMC apresentou pico e esforço de controle intermediários, se comparado aos outros dois.



(a) resposta do nível.

(b) MV dos controladores mestre e escravo.

Figura 5.8: Respostas obtidas utilizando-se os três métodos apresentados.

Tabela 5.11: Comparação entre os três métodos apresentados.

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
A-MIGO PI/PI	0,58%	10,496	-23,3%	-1,4%/s	10,1%
ZN PI/PI	0,17%	0,331	-26,0%	-6,3%/s	21,2%
SIMC	0,29%	1,7	-23,6%	-3,1%/s	13,0%

5.1.6 Sintonia ótima baseada no ID normalizado

O primeiro passo para sintonia pelo método proposto (aqui referenciado como SOID) é a análise da planta que se deseja controlar. A partir do conhecimento do processo em questão (representado pela Figura 5.1) pode-se determinar, ainda que qualitativamente, os requisitos e características desejadas para o controle do nível, tais como:

- o nível não deve atingir com frequência, em operação normal, os valores de alarmes de nível baixo e alto. Contudo, é aceitável que ocorram picos no nível em torno de +- 10% da referência, desde que não haja oscilações excessivas;

- a atuação sobre a válvula de controle V1 (Figura 5.1) deve ser relativamente suave, evitando um desgaste excessivo do atuador e partes móveis da válvula;
- o caso servo não é prioritário visto que o vaso opera com referência constante;
- há certa flexibilidade no tempo de acomodação.

Desta forma, pode-se correlacionar os requisitos qualitativos com índices bem conhecidos e utilizados largamente tais como ISE, ITAE, IAE, pico e taxa de variação das PV e MV, dentre outros. Uma possibilidade simples e direta seria compor o índice para este controle utilizando as parcelas:

- somatório das variações da PV, com objetivo de evitar oscilações do nível, porém com maior flexibilidade para o valor de pico atingido;
- derivada máxima das saídas dos controladores, com objetivo de suavizar a atuação das malhas e consequentemente evitar atuações bruscas na válvula de controle.

A definição destas parcelas consta descrita na Seção 3.2. Vale ressaltar que o método proposto não exige a definição a priori da estrutura dos controladores (P, PI, PD, PID, etc.), bem como permite a sintonia simultânea do controle de nível (mestre) e de vazão (escravo).

A partir da definição do índice de desempenho a ser otimizado, definem-se as faixas de busca para cada parâmetro. A utilização do coeficiente de conversão de escala (K_s) facilita a definição da faixa para a banda proporcional, visto que funciona como uma normalização entre a PV e a MV do controlador. Para os tempos integradores e tempos derivativos, arbitra-se uma faixa em que se englobe um intervalo largo o suficiente para a dinâmica dos processos em questão. No caso de a sintonia ótima encontrada estar localizada em algum extremo da faixa, a mesma deve ser alargada e uma nova otimização executada. Posto isto, as faixas de busca foram definidas como $2 \leq BP \leq 300$, $10 \leq T_I \leq 500$, $0 \leq T_D \leq 10$, $2 \leq BP_2 \leq 300$, $1 \leq T_{I2} \leq 150$, $0 \leq T_{D2} \leq 10$.

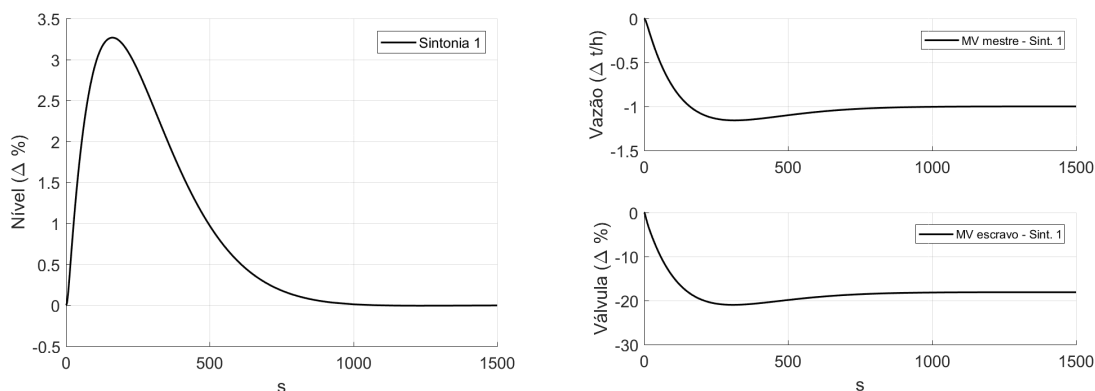
A sistemática de sintonia segue executando uma busca em *grid* considerando os extremos das faixas de cada parâmetro mais três a cinco outros pontos equidistantes

dentro das faixas. A busca em *grid* somente precisa ser executada uma única vez, com objetivo de definir os pesos para a normalização das parcelas do índice. Após isto, executa-se o processo de otimização utilizando algoritmo genético, conforme descrito no Capítulo 4. Os valores obtidos para os parâmetros de sintonia dos controladores são apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Parâmetros obtidos pelo método da sintonia ótima com ID normalizado.

Caso	BP	T_I	T_D	BP ₂	T_{I2}	T_{D2}
SOID (sint.1)	32	270 (s)	1,4 (s)	42	3,4	1,1

A Figura 5.9 ilustra os resultados obtidos para a sintonia de ambos os controladores, apresentando o comportamento do nível, vazão e variáveis manipuladas frente a um distúrbio típico de 1,0 t/h na vazão de entrada do vaso.



(a) resposta do nível.

(b) MV dos controladores mestre e escravo.

Figura 5.9: Respostas obtidas para a sintonia conforme a Tabela 5.12.

A convergência do algoritmo genético é apresentada na Figura 5.10, na qual foi evidenciado, para cada geração, o indivíduo mais apto (parâmetros P , T_I , T_D , P_2 , T_{I2} , T_{D2}) e seu respectivo índice de desempenho. Observa-se que a resposta obtida para o nível não apresenta oscilações e que o esforço de controle traz uma resposta suave. Além disto, conforme esperado, o pico no nível atingiu um valor maior se comparado aos outros métodos de sintonia apresentados, contudo ainda dentro de limites aceitáveis. Vale ressaltar ainda que estão sendo consideradas restrições nas margens de fase ($\geq 30^\circ$) e de ganho ($\geq 1,2$), o que provê certa robustez aos controladores projetados.

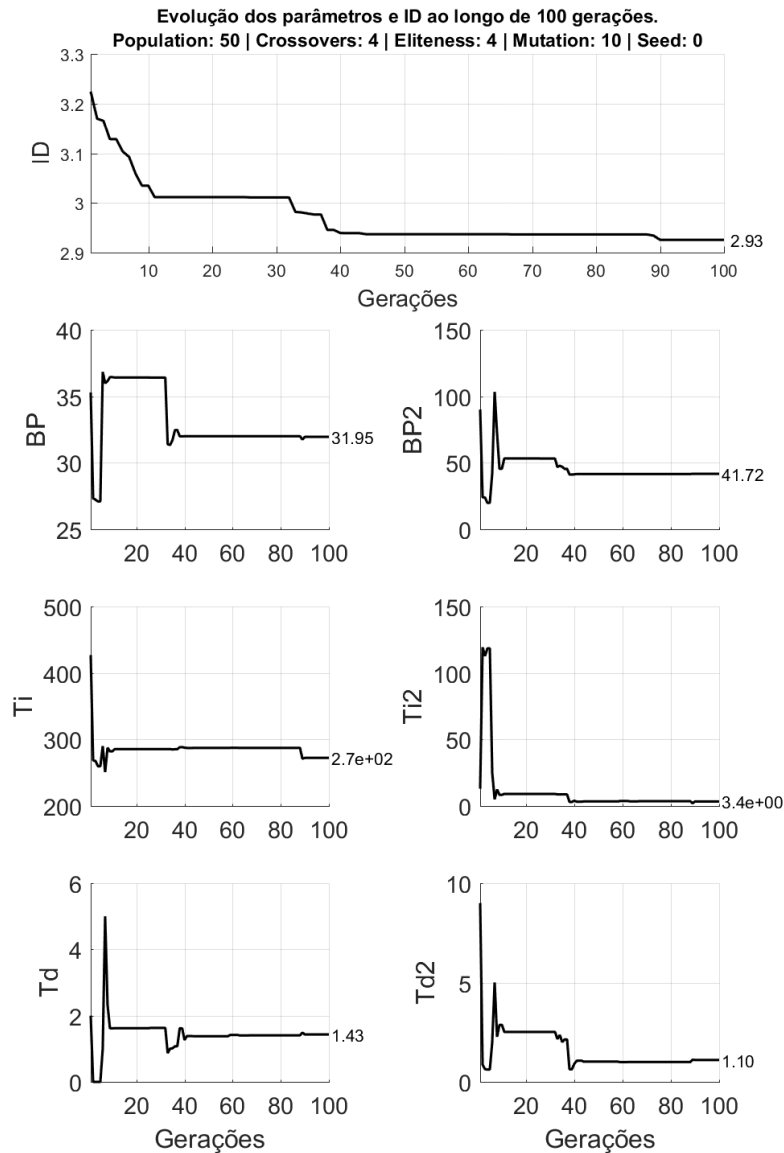


Figura 5.10: Evolução dos parâmetros do algoritmo genético.

Outro ponto interessante é que os resultados obtidos apontam na direção de que seria adequada a utilização de uma estrutura PI para o mestre e PI para o escravo, evidenciado pela tendência de valores baixos (próximos de zero) dos tempos derivativos ótimos encontrados.

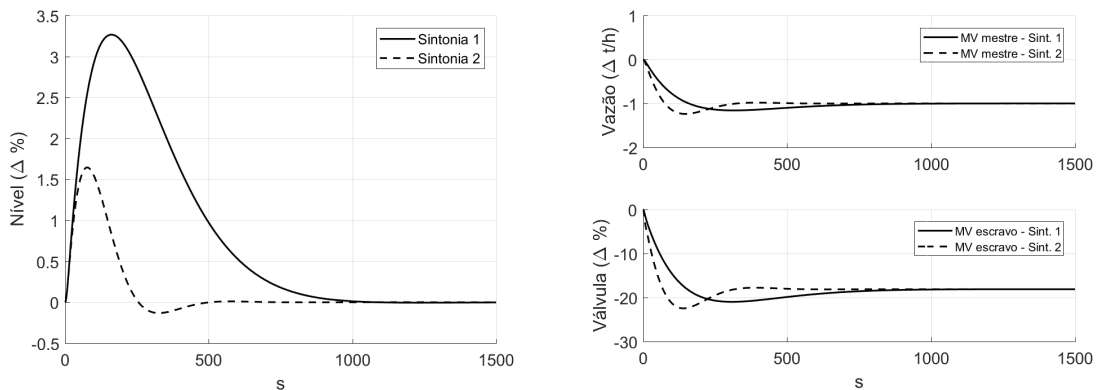
Como forma de ilustrar a flexibilidade do método, considere que, hipoteticamente,

deseja-se uma resposta com pico no nível ainda menor do que aquela obtida na sintonia apresentada pela Figura 5.9. Executa-se então novamente o algoritmo de otimização apenas acrescentando a parcela referente ao pico máximo do nível na função custo. Não é necessário executar uma nova busca em *grid* visto que as faixas da busca não foram alteradas. Os novos parâmetros encontrados são apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Parâmetros de sintonia acrescentando pico da PV no ID.

Caso	BP	T_I	T_D	BP_2	T_{I2}	T_{D2}
SOID (sint.2)	18,5	80 (s)	1,5 (s)	33	2	0,3

A Figura 5.11 ilustra os resultados obtidos comparando os dois casos, na qual se nota o menor pico atingido para o nível, conforme desejado. Obviamente, por se tratar de requisitos contraditórios, a atuação sobre a válvula foi mais agressiva se comparada à sintonia anterior, contudo este é um compromisso fundamental que o usuário deve estar ciente durante a escolha da sintonia mais adequada. Isto reforça ainda mais a relevância de se conhecer o processo, limitantes físicos e restrições dos equipamentos em questão, visto que são fatores importantes para o que o projeto dos controladores atenda da melhor forma possível o compromisso entre os requisitos envolvidos.



(a) resposta do nível.

(b) MV dos controladores mestre e escravo.

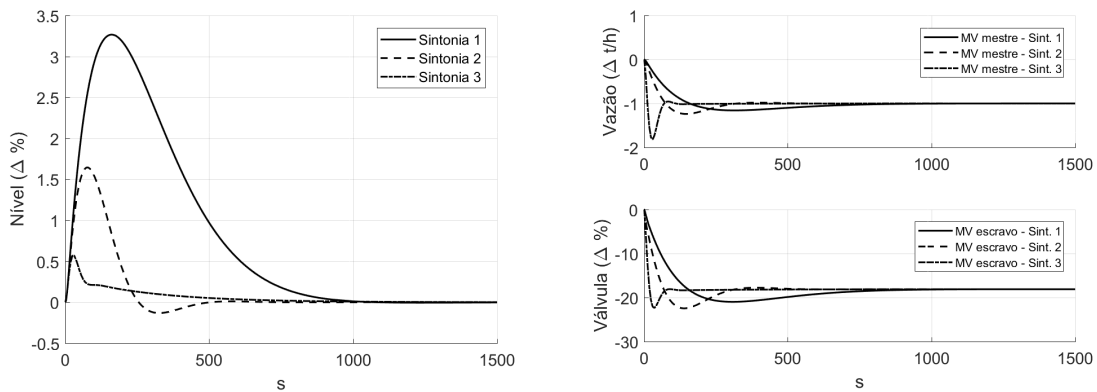
Figura 5.11: Comparação entre as sintonias das Tabelas 5.12 e 5.13.

Considere ainda que, hipoteticamente e para efeito comparativo, deseja-se uma rejeição mais agressiva do distúrbio. Uma forma de obter este resultado seria acrescentar um novo termo à função custo que reflita qualitativamente este requisito,

como por exemplo a integral do erro ao quadrado (ISE). Os parâmetros encontrados são apresentados na Tabela 5.14. A Figura 5.12 ilustra os resultados encontrados comparando os três casos, evidenciando novamente o compromisso entre os requisitos, e a Tabela 5.15 apresenta as respectivas métricas calculadas para cada caso.

Tabela 5.14: Parâmetros de sintonia acrescentando ISE no ID.

Caso	BP	T_I	T_D	BP_2	T_{I2}	T_{D2}
SOID (sint.3)	2,34	281 (s)	0,8 (s)	114	18	1,35



(a) resposta do nível.

(b) MV dos controladores mestre e escravo.

Figura 5.12: Comparação entre as 3 sintonias apresentadas.

Tabela 5.15: Métricas de desempenho das três sintonias avaliadas.

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
Sintonia 1	3,27%	2862	-21,0%	-0,2%/s	6,7%
Sintonia 2	1,65%	281	-22,5%	-0,6%/s	14,9%
Sintonia 3	0,57%	19,9	-22,4%	-1,1%/s	4,7%

5.1.7 Análise de sensibilidade

Com objetivo de verificar o comportamento da sintonia frente às incertezas do modelo, realizou-se uma análise de sensibilidade. Esta análise é interessante como forma de avaliar, dentro de uma margem de erro confortável, que a sintonia encontrada não tenderá a causar problemas ou instabilidade na planta.

Uma possibilidade de erro de modelagem pode estar atribuída ao modelo do nível. Uma hipótese é de que a densidade do fluido (ρ) seja diferente daquela definida em

projeto, o que impactará diretamente no comportamento do nível. Considere ainda, de forma ilustrativa, que por conta de imprecisões nos testes de identificação houve um erro de estimativa da área transversal A do vaso. A análise será apresentada então para o pior caso considerado, variando-se A e ρ em mais 25% e menos 25% em relação aos valores nominais. As Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam os resultados para cada método de sintonia apresentado neste capítulo.

Para a sistemática proposta nesta dissertação (SOID), pode-se notar que, mesmo com erros consideráveis no modelo, as respostas variaram de forma suave, não representando instabilidade ou tendências oscilatórias. Um comportamento similar ocorreu para o método A-MIGO, onde pode-se atribuir o bom desempenho às restrições de robustez consideradas nesta técnica. Os métodos ZN e SIMC apresentaram tendências oscilatórias na MV do controlador escravo bem como respostas do nível menos suaves.

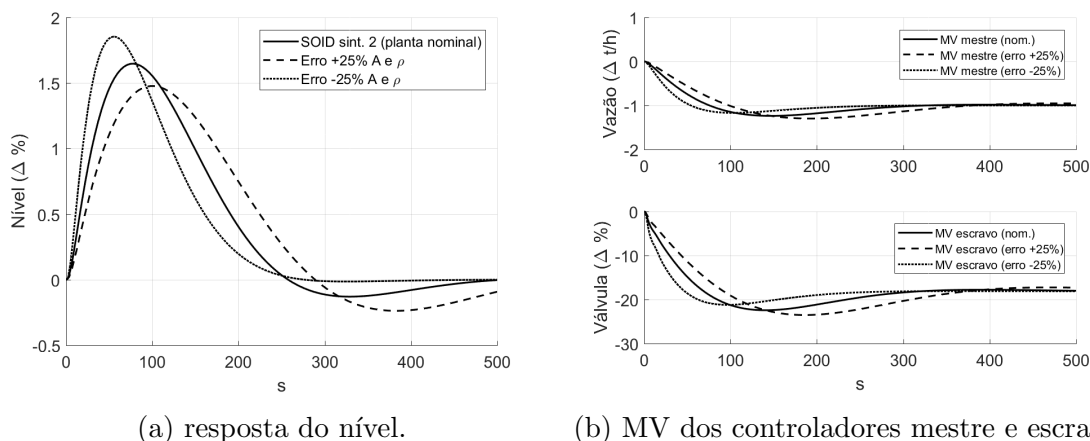
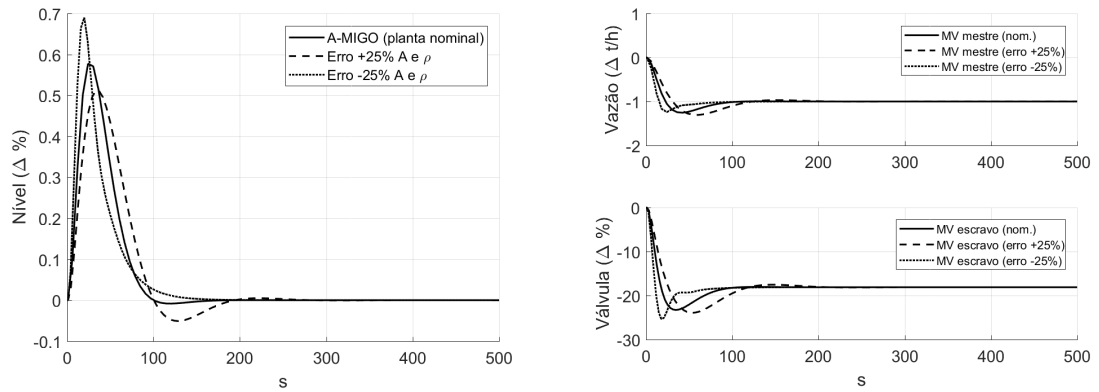


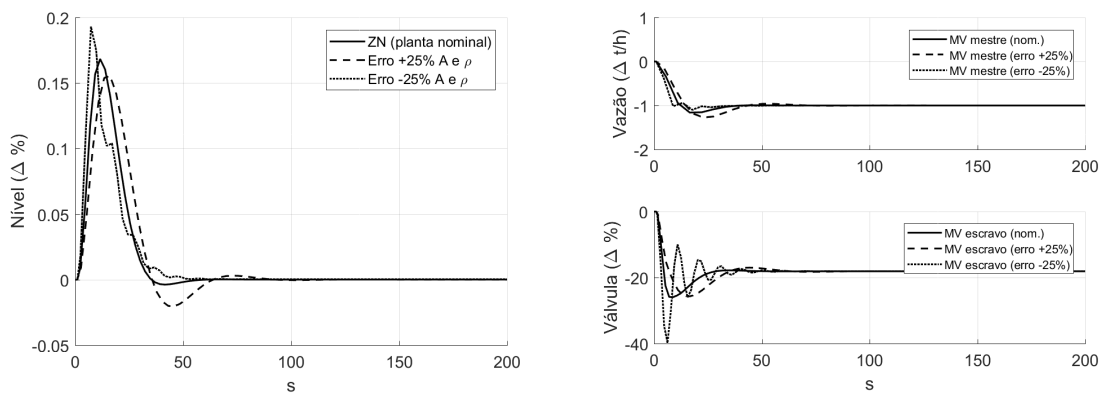
Figura 5.13: Análise de sensibilidade para a sintonia SOID (sint.2).



(a) resposta do nível.

(b) MV dos controladores mestre e escravo.

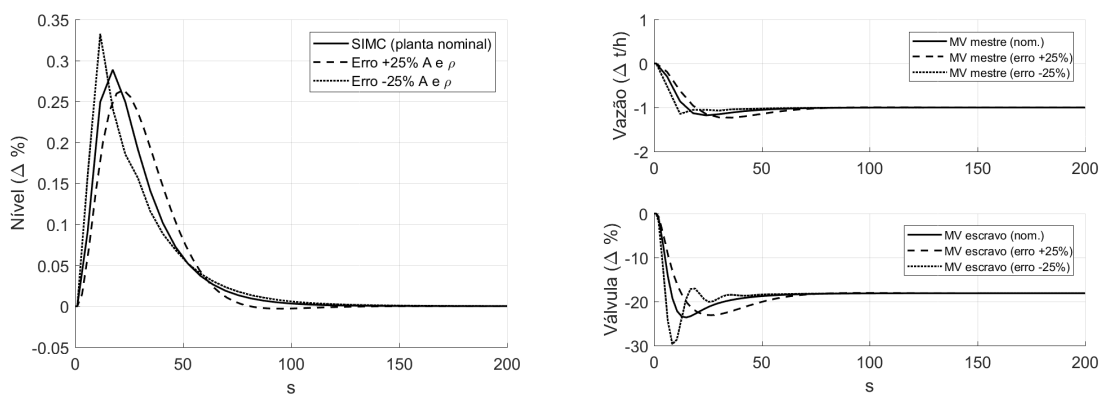
Figura 5.14: Análise de sensibilidade para a sintonia A-MIGO.



(a) resposta do nível.

(b) MV dos controladores mestre e escravo.

Figura 5.15: Análise de sensibilidade para a sintonia ZN.



(a) resposta do nível.

(b) MV dos controladores mestre e escravo.

Figura 5.16: Análise de sensibilidade para a sintonia SIMC.

5.1.8 Observações finais

A Figura 5.17 e a Tabela 5.16 apresentam uma comparação entre as respostas obtidas através do método SOID e as demais encontradas nas Seções 5.1.3, 5.1.4 e 5.1.5.

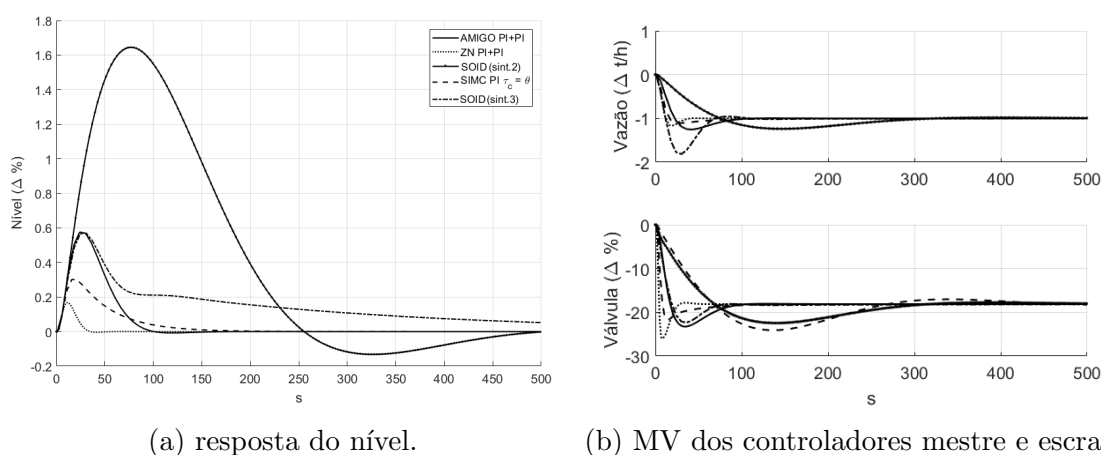


Figura 5.17: Respostas obtidas para os quatro métodos apresentados.

Tabela 5.16: Comparação entre os quatro métodos apresentados.

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
SOID (sint.2)	1,65%	281	-22,5%	-0,6%/s	14,9%
SOID (sint.3)	0,57%	19,9	-22,4%	-1,1%/s	4,7%
A-MIGO PI/PI	0,58%	10,496	-23,3%	-1,4%/s	10,1%
ZN PI/PI	0,17%	0,331	-26,0%	-6,3%/s	21,2%
SIMC	0,29%	1,7	-23,6%	-3,1%/s	13,0%

Vale ressaltar que a comparação entre métodos de sintonia pode ser muitas vezes injusta levando em consideração que existe uma infinidade de métodos e cada um se propõe a determinados objetivos, muitas vezes completamente diferentes. Por exemplo, não faz sentido exigir resultados sem oscilação de métodos tais como Ziegler-Nichols, visto que o desenvolvimento do mesmo visa obter respostas com razão de declínio de 1/4. Ainda assim, pode-se realizar uma comparação qualitativa entre os quatro métodos apresentados.

O método ZN pode ser visto como o mais limitado dentre os quatro, no qual o critério utilizado é pouco robusto e normalmente leva a respostas muito agressivas. Além disto, não possui parâmetros de ajuste fino. O método A-MIGO traz uma

vantagem relevante ao considerar restrições na função sensibilidade que garantem robustez à sintonia, contudo também não permite ajustes de forma prática caso o resultado obtido necessite de adequações. Neste sentido, o método SIMC traz o parâmetro τ_c , provendo certa flexibilidade, ainda que de certa forma limitada. Por outro lado, o SIMC não considera restrições para garantir a robustez da sintonia. Vale ressaltar ainda que, mesmo não sendo exigido por estes métodos que se conheça os requisitos e restrições do processo para obter a sintonia, esta etapa acaba se tornando muitas vezes necessária, como foi evidenciado nas Seções 5.1.3, 5.1.4 e 5.1.5.

Nota-se que o método SOID possui uma boa flexibilidade para a sintonia, sempre levando em conta compromissos qualitativos entre os requisitos de controle e não abrindo mão das restrições de margem de ganho e margem de fase, dando robustez aos resultados. Além disto, o ajuste fino, quando necessário, é intuitivo e de acordo com as especificidades do processo em questão. Outra vantagem é a possibilidade da sintonia do mestre e escravo ao mesmo tempo, bem como a possibilidade de inclusão de outros parâmetros que possam vir a ser necessários, dada a versatilidade que a utilização do algoritmo genético traz.

5.2 Controle de pressão de um coletor de vapor através da geração de vapor em caldeira

Unidades industriais de processo necessariamente requerem fontes de energia para sua operação, sendo as formas mais comuns o vapor superaquecido e a eletricidade. Comumente estas unidades possuem associadas às mesmas uma planta de utilidades, sendo esta responsável pelo fornecimento dos níveis de vapor e de eletricidade necessários ao processo, atendendo aos requisitos de qualidade e confiabilidade. No presente estudo de caso, analisou-se um coletor de vapor de muito alta pressão (VHS, 120 kgf/cm²) de uma planta típica.

O controle de pressão do coletor de VHS atua na demanda de carga¹ de uma ou mais caldeiras, que são responsáveis por fornecer vapor de acordo com a necessidade do processo. Este controle normalmente é um dos mais importantes da unidade, onde variações bruscas podem acarretar até mesmo o *trip* (*shutdown*/parada abrupta de um equipamento ou unidade industrial) das unidades de processo à jusante.

A Figura 5.18 apresenta uma estrutura típica encontrada, na qual se utiliza um PID para o controle da pressão do coletor.

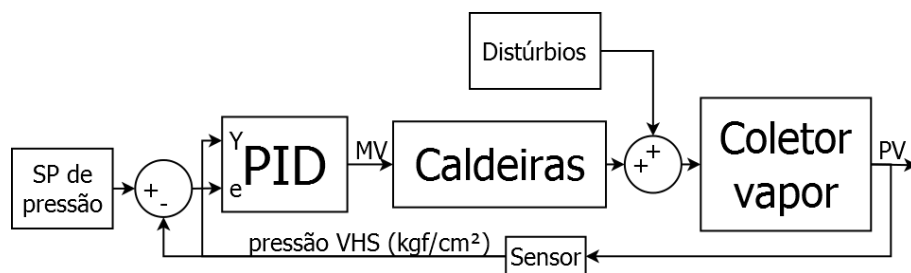


Figura 5.18: Malha de controle de pressão do coletor de vapor.

A queda ou mesmo a entrada em operação de um grande consumidor ou produtor pode ser responsável pela violação dos limites operacionais de pressão dos coletores, podendo ocasionar o *trip* de outros equipamentos vitais para o processo. Além disto, pequenos e médios consumidores e produtores podem aumentar ou diminuir seus consumos e produções a todo momento, de acordo com as demandas de seus respectivos processos aos quais estão inseridos. Desta forma, existem distúrbios

¹Sinal enviado ao controle de limite cruzado das caldeiras, onde são moduladas as vazões de ar e combustível das mesmas com intuito de aumentar ou diminuir a produção de vapor.

ocorrendo constantemente, sendo estes não mensuráveis para o controle de pressão por estarem situados em diferentes plantas. Já o problema servo (seguimento de trajetória) é normalmente considerado menos relevante, visto que o controle opera com referência fixa.

A sistemática proposta nesta dissertação será aplicada ao caso de controle de pressão do coletor de vapor supracitado, bem como serão avaliados outros três métodos (A-MIGO, ZN e SIMC) para comparação dos resultados. Como os passos da sistemática já foram discutidos em detalhes na Seção 5.1, algumas etapas serão descritas de forma mais resumida.

5.2.1 Modelo do processo e controlador

Os modelos da caldeira e do coletor VHS podem ser representados pelas Equações 5.5 e 5.6, respectivamente.

$$Gp_1(s) = \frac{F(s)}{L_B(s)} = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} e^{-\theta_1 s}, \quad (5.5)$$

$$Gp_2(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k_2}{s} e^{-\theta_2 s}. \quad (5.6)$$

Os parâmetros dos modelos são $k_1 = 12\% \cdot \text{t/h}$, $\tau_1 = 120 \text{ s}$, $\theta_1 = \theta_2 = 5 \text{ s}$ e $k_2 = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ kgf} \cdot \text{s/cm}^2$. $F(s)$ é a vazão de vapor produzida pela caldeira, em toneladas por hora; $L_B(s)$ representa o sinal de demanda de carga, em percentual; $Y(s)$ é a pressão do vapor no coletor de VHS, em kgf/cm^2 ; e $X(s)$ é a vazão total de vapor entrando no coletor, em toneladas por hora. O valor considerado para o distúrbio foi baseado em dados históricos de uma planta industrial com uma produção de vapor média de 600 t/h, onde utilizou-se um distúrbio típico de 10% da vazão nominal (60 t/h) para as simulações e sintonias realizadas neste trabalho.

Para o controlador, será adotado o mesmo algoritmo PID comercial apresentado na Equação 5.4.

5.2.2 Sintonia utilizando o método A-MIGO

Seguindo a sistemática descrita na Seção 2.1, tem-se duas estruturas possíveis (PI ou PID). Esta escolha novamente fica a cargo do usuário, pois o método não

sugere uma forma de determinação da melhor estrutura para cada caso. Para processos integradores, como é o caso estudado nesta seção, o método A-MIGO estabelece a simplificação do modelo utilizado para sintonia através da determinação dos parâmetros K_v e L , obtidos da resposta da planta conforme ilustrado na Figura 2.3. Desta forma, aplicando este método para os modelos da planta apresentados na Seção 5.2.1, obtém-se $K_v=0.00634 \text{ kgf/cm}^2/\%$ e $L=125 \text{ s}$ (Figura 5.19).

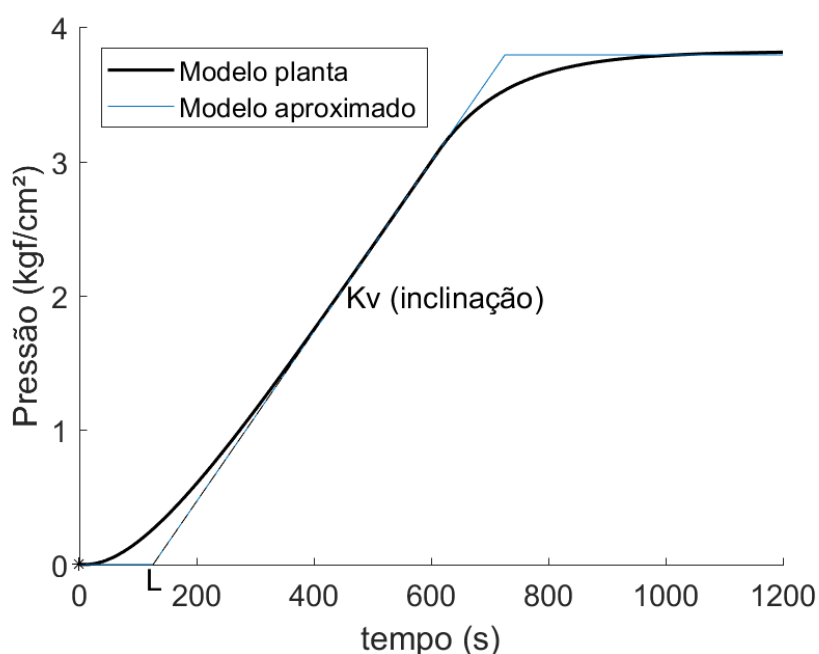


Figura 5.19: Identificação dos parâmetros K_v e L .

A partir do modelo aproximado foi aplicado o método A-MIGO para os casos PI e PID, em que os resultados obtidos através de simulações no software *MATLAB* são apresentados na Tabela 5.17. Nota-se que, para o caso PI, obtém-se uma resposta lenta e com um pico elevado (aproximadamente 10 kgf/cm^2 , representando $8,3\%$ do valor de estado estacionário); para o caso PID, a sintonia obtida é instável. A Figura 5.20 apresenta a resposta do controlador PI obtida frente a um distúrbio típico de 10% da vazão nominal de produção de vapor das caldeiras (60 t/h), onde a resposta instável do PID foi omitida.

Vale ressaltar que, apesar do método se propor a trazer sintonias adequadas para uma grande variedade de modelos, os autores ressaltam que para o caso PID é impossível encontrar regras de sintonia universais para processos integradores (Hag-

Tabela 5.17: Parâmetros de sintonia obtidos pelo método A-MIGO.

Caso	BP	T _I	T _D
A-MIGO PI	325	882	-
A-MIGO PID	2	1007	63

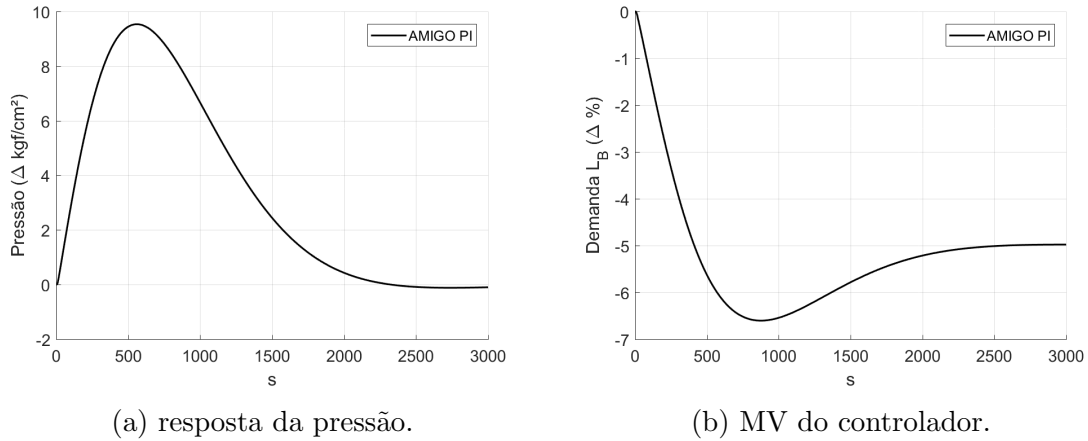


Figura 5.20: Respostas obtida para a sintonia PI, conforme a Tabela 5.17.

glund & Åstrom (2002)). Como forma de comparação com os outros métodos, são apresentados na Tabela 5.18 algumas métricas de desempenho da PV e do esforço de controle.

Tabela 5.18: Cálculo das métricas para a pressão e esforço de controle (A-MIGO).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
A-MIGO PI	9,53 kgf/cm ²	70 · 10 ³	-6,6%	-0,0146%/s	18,6 · 10 ³ %
A-MIGO PID	instável	instável	instável	instável	instável

Ambas as respostas obtidas possivelmente seriam consideradas inadequadas para o processo em questão, sendo que o método não provê parâmetros de ajuste fino que permitissem uma tentativa de ajuste. Contudo, o desempenho aquém do esperado pode ser atribuído em parte ao fato de que o método considera determinadas aproximações e simplificações dos modelos visando tentar definir regras universais. Especificamente para modelos IFOPDT, não foram estabelecidas regras gerais considerando a constante de tempo, mas apenas levando em conta o coeficiente de inclinação Kv e o atraso estimado L , o que nem sempre irá garantir o desempenho esperado.

Porém, sabe-se que o método A-MIGO é uma aproximação do método MIGO (Åström et al. (1998)), de forma que se pode aplicar diretamente o método completo para os casos em que notadamente há um prejuízo para os resultados por conta das aproximações. A proposição inicial deste trabalho de utilização do método aproximado teve como objetivo simplificar a obtenção das sintonias, visto que os autores demonstraram a boa aplicação do A-MIGO para uma grande variedade de problemas, sem prejuízos relevantes. Todavia, para o caso estudado nesta seção, será ilustrada a aplicação do método MIGO, implementado utilizando o próprio algoritmo de otimização (GA) sujeito a restrições desenvolvido nesta dissertação. Åström et al. (1998) buscam a obtenção da sintonia ótima que minimiza o critério IE (do inglês, *Integral Error*), sujeito a restrição no máximo valor da função de sensibilidade (M_s), conforme apresentado na Seção 2.1. A resolução do problema, utilizando o algoritmo GA desenvolvido nesta dissertação, pode ser resumida pelos passos:

- seleção do índice de desempenho $ID = IE$;
- inclusão da restrição de máximo valor da função de sensibilidade no problema de otimização, utilizando o algoritmo genético;
- execução do algoritmo genético para solução do problema.

O problema de otimização descrito é representado pela Equação 5.7.

$$\begin{aligned} \min_{P, T_I, T_D} \quad & IE, \\ \text{s.a.} \quad & M_s \leq 1,6. \end{aligned} \tag{5.7}$$

O limite de 1,6 para o M_s foi escolhido tomando como base o intervalo sugerido pelos autores do método MIGO (entre 1,2 e 2,0), bem como levando em consideração que, para $M_s = 1,6$, garante-se uma margem de fase maior ou igual a $36,4^\circ$ (Grimholt & Skogestad (2018)), semelhante à restrição proposta na Seção 4.7 para o método SOID, tornando a comparação entre os métodos mais neutra. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.19. A Figura 5.21 apresenta as respostas dos controladores PI e PID. Para o caso PI, pode-se notar uma resposta de certa forma semelhante à obtida pelo método A-MIGO (Figura 5.20), porém com um pico 30% menor (em torno de $6,71 \text{ kgf/cm}^2$) e uma taxa de variação da MV 71% maior

(-0,025%/s). Vale ressaltar que o método A-MIGO utiliza $M_s=1,4$, o que justifica o comportamento mais agressivo (e com melhor desempenho) em relação ao caso MIGO com $M_s=1,6$. Para o caso PID, enquanto o método A-MIGO apresentou instabilidade, a resposta apresentada pelo método MIGO trouxe um pico pequeno de $0,99 \text{ kgf/cm}^2$, porém com oscilações na PV e uma taxa de variação e pico elevados da MV (-2,06%/s e -16,3%, respectivamente).

Tabela 5.19: Parâmetros de sintonia obtidos pelo método MIGO.

Caso	BP	T _I	T _D
MIGO PI	192,6	688,6	-
MIGO PID	18,4	70,5	58,8

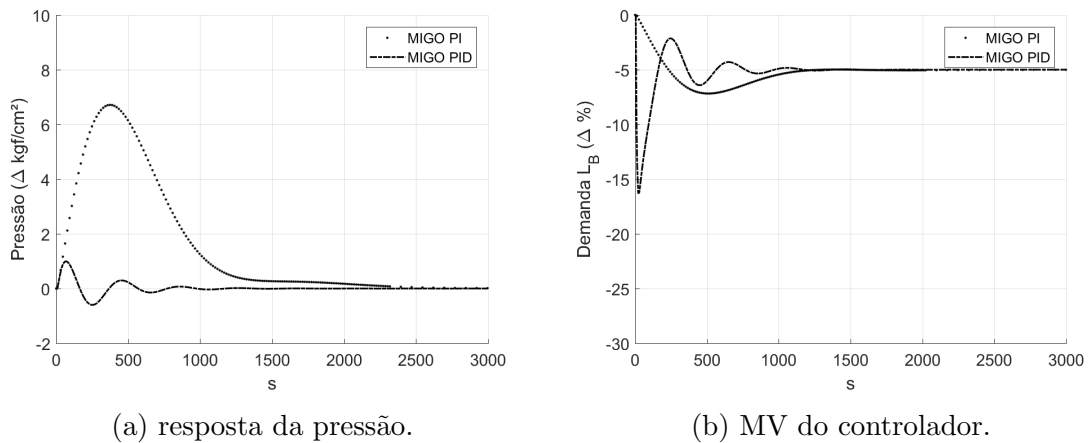


Figura 5.21: Respostas obtida para as sintonias da Tabela 5.19.

A Tabela 5.20 apresenta as métricas de desempenho calculadas.

Tabela 5.20: Cálculo das métricas para a pressão e esforço de controle (MIGO).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
MIGO PI	6,71 kgf/cm ²	$21,5 \cdot 10^3$	-7,2%	-0,025%/s	$18,6 \cdot 10^3\%$
MIGO PID	0,99 kgf/cm ²	$0,122 \cdot 10^3$	-16,3%	-2,06%/s	$18,6 \cdot 10^3\%$

5.2.3 Sintonia utilizando o método ZN

O método ZN foi aplicado utilizando-se os mesmos modelos aproximados identificados na Seção 5.2.2 e distúrbio típico, de forma que se obtiveram as duas possíveis

sintonias, apresentadas na Tabela 5.21. As respostas da pressão bem como o comportamento da MV foram ilustradas na Figura 5.22 e a Tabela 5.22 apresenta algumas métricas de desempenho calculadas para as duas estruturas possíveis (PI e PID).

Tabela 5.21: Parâmetros de sintonia obtidos pelo método ZN.

Caso	BP	T _I	T _D
ZN PI	126	419	-
ZN PID	95	252	63

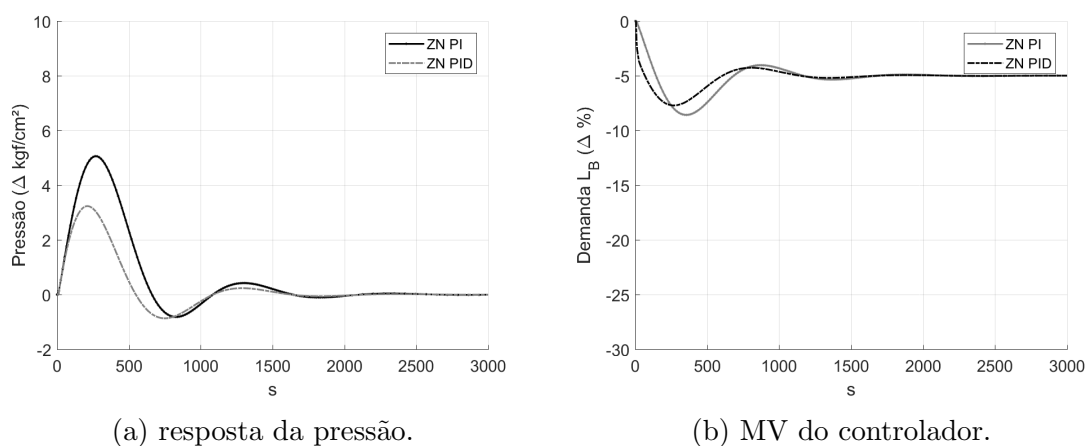


Figura 5.22: Respostas obtidas para as sintonias conforme a Tabela 5.21.

Tabela 5.22: Cálculo das métricas para a pressão e esforço de controle (ZN).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
ZN PI	5,06 kgf/cm ²	$7,7 \cdot 10^3$	-8,6%	-0,0386%/s	$18,6 \cdot 10^3\%$
ZN PID	3,23 kgf/cm ²	$2,8 \cdot 10^3$	-7,7%	-0,3808%/s	$18,6 \cdot 10^3\%$

Observa-se que as respostas apresentaram picos entre 3 kgf/cm² e 5 kgf/cm² na PV e picos máximos na MV em torno de 8%. O método também não disponibiliza graus de liberdade para um ajuste fino da sintonia obtido, caso o usuário considere-a inadequada para o processo em questão.

5.2.4 Sintonia utilizando o método SIMC

Conforme mencionado na Seção 2.3, o método SIMC define previamente a estrutura do controlador de acordo com o tipo de modelo do processo, de forma que, para

os modelos definidos na Seção 5.2.1, tem-se um controle PID. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.23.

Tabela 5.23: Parâmetros de sintonia obtidos pelo método SIMC.

Caso	BP	T _I	T _D
SIMC PID	18,2	80	120

A Figura 5.23 apresenta a resposta obtida e a Tabela 5.24 traz o cálculo de métricas para avaliação do desempenho.

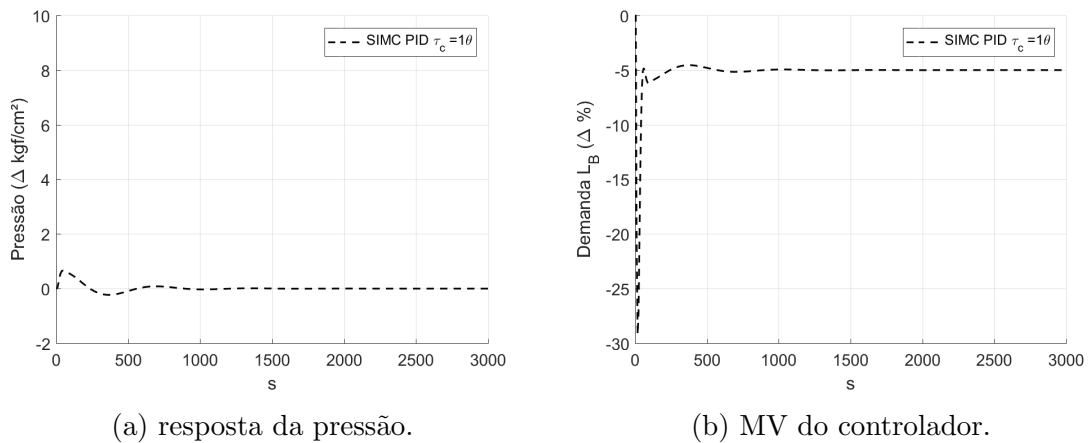


Figura 5.23: Respostas obtidas para as sintonias conforme a Tabela 5.23.

Tabela 5.24: Cálculo de métricas de desempenho (SIMC).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
SIMC PID	0,66 kgf/cm ²	0,051 · 10 ³	-29,2%	-3,74%/s	18,6 · 10 ³ %

Como forma de avaliar qual o impacto da variação do parâmetro τ_c na sintonia, foram realizadas novas simulações com $\tau_c = \theta$ até $\tau_c = 9\theta$, apresentadas na Figura 5.24. A disponibilização de um parâmetro de ajuste fino pode ser uma vantagem em muitos casos, visto que o método permite, de forma simples, estabelecer um compromisso entre rejeição rápida do distúrbio e menor esforço de controle. Através das métricas apresentadas na Tabela 5.25, pode-se observar explicitamente este compromisso, em que para τ_c crescentes temos um aumento do pico na PV e do ISE, e uma redução no pico e taxa de variação da MV. Para o IACE, os resultados são muito próximos nesta faixa de variação de τ_c , devido a natureza do processo (integrador) e o padrão obtido das respostas (sem oscilação).

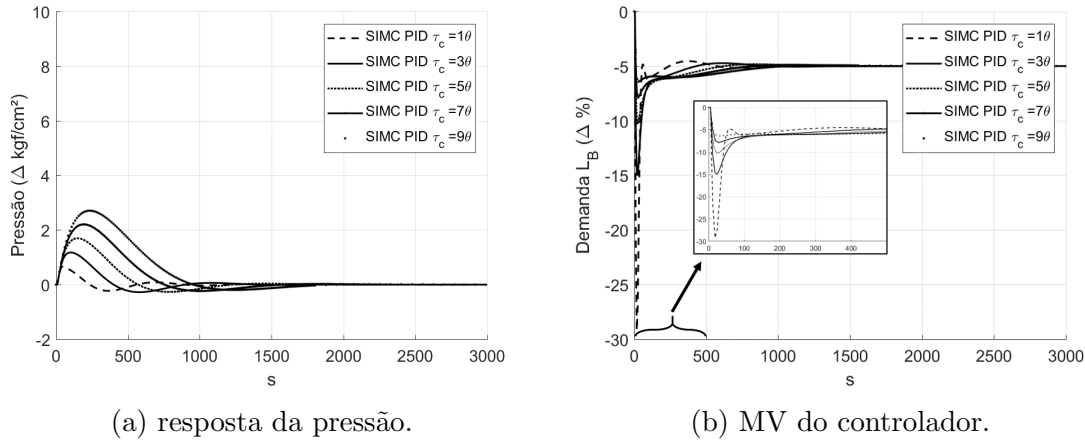


Figura 5.24: Respostas obtidas para as sintonias variando τ_c .

Tabela 5.25: Cálculo de métricas de desempenho variando-se τ_c (SIMC).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
$\tau_c = \theta$	0,66%	$0,051 \cdot 10^3$	-29,2%	-3,74%/s	$18,6 \cdot 10^3\%$
$\tau_c = 3\theta$	1,18%	$0,26 \cdot 10^3$	-15,0%	-1,87%/s	$18,6 \cdot 10^3\%$
$\tau_c = 5\theta$	1,70%	$0,73 \cdot 10^3$	-10,3%	-1,20%/s	$18,6 \cdot 10^3\%$
$\tau_c = 7\theta$	2,21%	$1,54 \cdot 10^3$	-7,9%	-0,90%/s	$18,6 \cdot 10^3\%$
$\tau_c = 9\theta$	2,70%	$2,80 \cdot 10^3$	-6,4%	-0,70%/s	$18,6 \cdot 10^3\%$

A Figura 5.25 apresenta uma síntese das sintonias obtidas nas Seções 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4, bem como a Tabela 5.26 traz as métricas de desempenho calculadas. Pode-se observar que cada método trouxe uma resposta com desempenhos consideravelmente diferentes, de forma que, tomando um problema real e seus requisitos de desempenho específicos, possivelmente apenas um destes métodos estaria atendendo-os plenamente. Os métodos SIMC e MIGO com PID foram os mais agressivos dentre os apresentados (bem como trouxeram os menores picos na PV). O ZN apresentou picos intermediários, se comparados aos outros métodos, porém com respostas oscilatórias. O método MIGO com controlador PI, apesar de um esforço de controle bastante suave, apresentou picos elevados na PV (6,71 kgf/cm²).

5.2.5 Sintonia ótima baseada no ID normalizado

O primeiro passo para a sintonia pelo método proposto (aqui referenciado como SOID) é a análise da planta que se deseja controlar. A partir do conhecimento

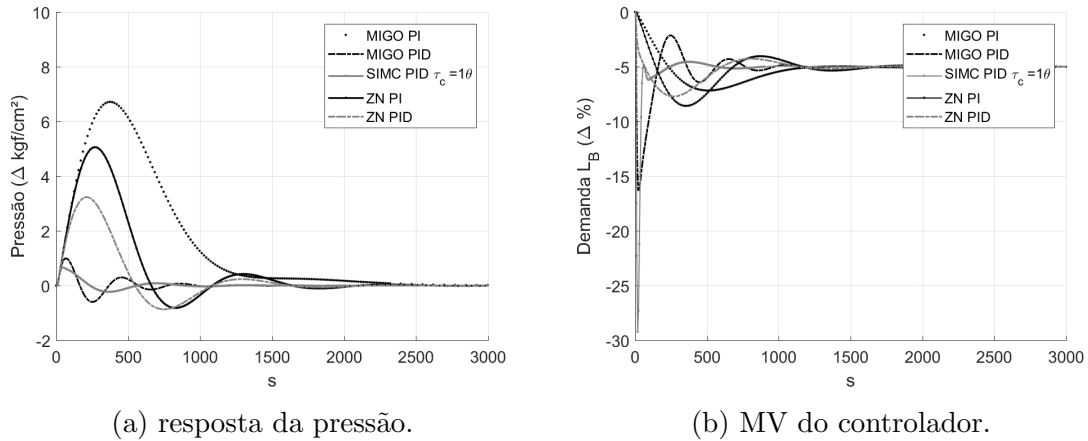


Figura 5.25: Respostas obtidas utilizando-se os três métodos apresentados.

Tabela 5.26: Comparação entre os três métodos apresentados.

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
MIGO PI	6,71 kgf/cm ²	21,5 · 10 ³	-7,2%	-0,025%/s	18,6 · 10 ³ %
MIGO PID	0,99 kgf/cm ²	0,122 · 10 ³	-16,3%	-2,06%/s	18,6 · 10 ³ %
ZN PI	5,06 kgf/cm ²	7,7 · 10 ³	-8,6%	-0,0386%/s	18,6 · 10 ³ %
ZN PID	3,23 kgf/cm ²	2,8 · 10 ³	-7,7%	-0,3808%/s	18,6 · 10 ³ %
SIMC PID	0,66 kgf/cm ²	0,051 · 10 ³	-29,2%	-3,74%/s	18,6 · 10 ³ %

do processo em questão (apresentado na Seção 5.2.1) pode-se determinar, ainda que qualitativamente, os requisitos e características desejadas para o controle da pressão, tais como:

- deve-se evitar gerar grandes variações de carga (produção de vapor) desnecessariamente para o controle regulatório (limite cruzado) das caldeiras;
- deseja-se garantir que a pressão de VHS não oscile com grandes amplitudes, visto que tem influência direta em todos os consumidores à jusante. Contudo, há uma faixa na qual a pressão pode flutuar sem comprometer o processo (em torno de 3%);
- há certa flexibilidade no tempo de acomodação.

Desta forma, pode-se correlacionar os requisitos qualitativos com índices tais como aqueles definidos na Seção 3.2, como por exemplo:

- pico máximo da variável manipulada (MV), com intuito de evitar grandes distúrbios para as caldeiras. Causar um *trip* de queimador ou de caldeira por conta de um controle de pressão muito agressivo o tornaria inadequado ao processo;
- IAE (integral absoluta do erro), que pesa no sentido de garantir a eliminação do *offset* em um tempo razoável. Como há flexibilidade no tempo de acomodação, a utilização do ITAE ou ITSE, por exemplo, seria menos adequada visto que tenderia a resultar em tempos de acomodação menores (desnecessariamente) porém com um maior esforço de controle associado e possivelmente maiores oscilações.

As faixas de busca para a sintonia foram definidas como $2 \leq BP \leq 300$, $50 \leq T_I \leq 9999$, $0 \leq T_D \leq 100$. Utilizou-se ainda restrições de margem de fase ($\geq 30^\circ$) e margem de ganho ($\geq 1, 2$). Os valores obtidos para os parâmetros de sintonia dos controladores são apresentados na Tabela 5.27.

Tabela 5.27: Parâmetros de sintonia (SOID - sintonia 1).

Caso	BP	T _I	T _D
SOID (sint.1)	8,7	177 (s)	37,5 (s)

A Figura 5.26 ilustra os resultados obtidos para a sintonia, apresentando o comportamento da pressão e esforço de controle frente a um distúrbio típico de 60 t/h. As escalas dos gráficos foram mantidas idênticas àquelas utilizadas nas seções anteriores, para facilitar a comparação entre os métodos. A convergência do algoritmo genético é apresentada na Figura 5.27, na qual foi evidenciado, para cada geração, o indivíduo mais apto (parâmetros P , T_I , T_D) e seu respectivo índice de desempenho.

A Tabela 5.28 mostra os valores de algumas métricas de desempenho calculadas. Observa-se que a resposta obtida para a pressão não apresenta *offset* em estado estacionário bem como apresentou um pequeno pico máximo na pressão. Por outro lado, o esforço de controle (demanda de carga para as caldeiras) possivelmente pode estar inadequado, com variações muito bruscas para as caldeiras. Percebe-se ainda que a sintonia ótima encontrada tende a definir por uma estrutura PID, atribuindo valores relevantes para o tempo derivativo (T_D).

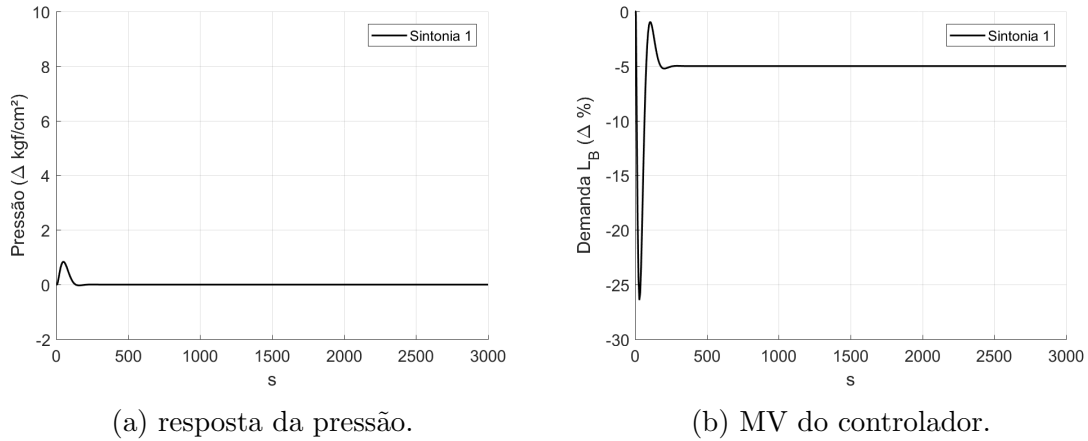


Figura 5.26: Respostas obtidas para a sintonia conforme a Tabela 5.27.

Tabela 5.28: Cálculo de índices para a pressão e esforço de controle (SIMC).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
SOID (sint. 1)	0,84 kgf/cm ²	0,034 · 10 ³	-26,4%	-1,81%/s	18,6 · 10 ³ %

Como forma de ilustrar a utilização da sistemática proposta bem como demonstrar a flexibilidade da mesma, será considerada a hipótese de que a resposta obtida para o esforço de controle foi considerada inadequada. Uma possibilidade seria incluir uma nova parcela ao ID que represente atuações mais suaves da MV, como por exemplo a taxa máxima de variação. Posto isto, uma nova execução do algoritmo de otimização foi realizada, mantendo-se as faixas de busca, modelos e todos os outros parâmetros constantes, porém acrescentando a taxa máxima de variação da MV na função objetivo. A Figura 5.28 ilustra a resposta do novo controlador, considerando o mesmo distúrbio do caso anterior. Os parâmetros de sintonia são apresentados na Tabela 5.29 e a Tabela 5.30 traz as métricas de desempenho calculadas.

Tabela 5.29: Parâmetros de sintonia obtidos (SOID - sintonias 1 e 2).

Caso	BP	T _I	T _D
SOID (sint.1)	8,7	177 (s)	37,5 (s)
SOID (sint.2)	14,5	199 (s)	42,5 (s)

Nota-se que, conforme esperado, a sintonia 2 apresentou uma menor taxa de variação da MV do que a sintonia 1 (36,5% menor), bem como um pico na MV 30,7% menor. Considere ainda uma segunda hipótese em que se deseja incluir uma restrição visando não causar variações de mais de 10% na demanda de carga para as

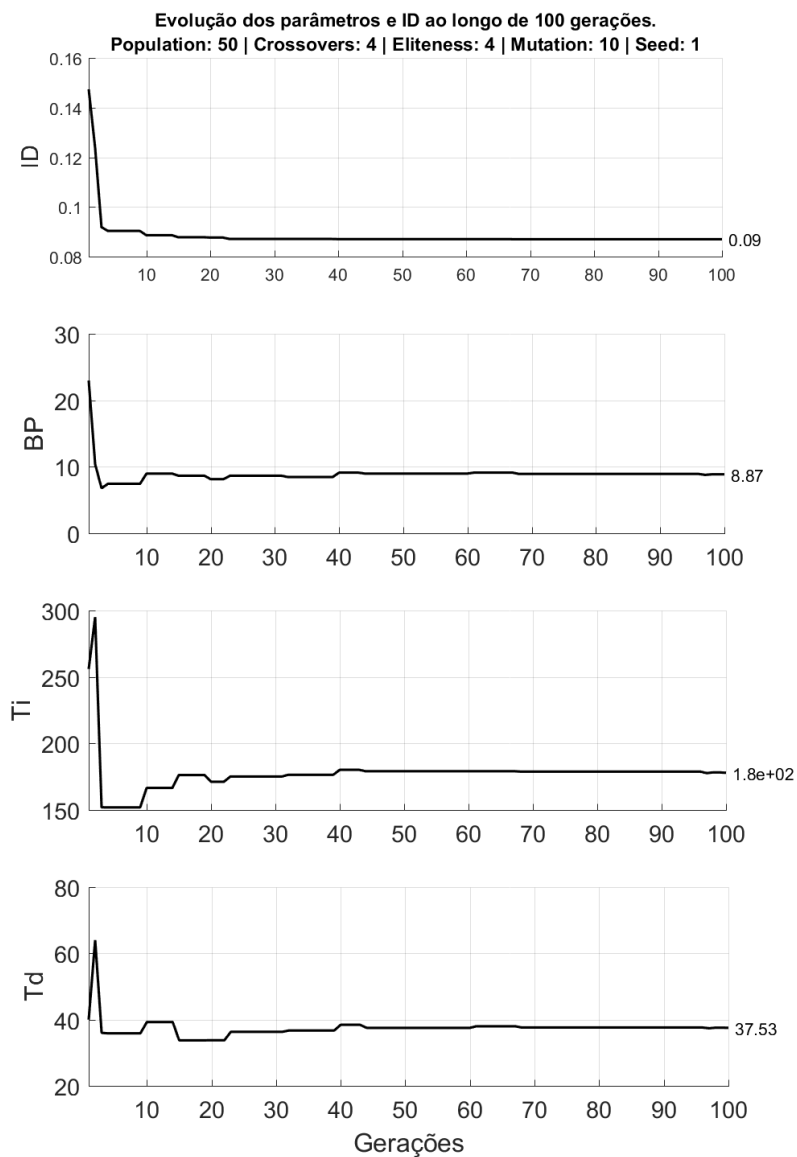


Figura 5.27: Evolução dos parâmetros do algoritmo genético.

Tabela 5.30: Cálculo de índices de desempenho (SOID - sintonias 1 e 2).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
Sintonia 1	0,84 kgf/cm ²	0,034 · 10 ³	-26,4%	-1,81%/s	18,6 · 10 ³ %
Sintonia 2	1,1 kgf/cm ²	0,081 · 10 ³	-18,3%	-1,15%/s	18,6 · 10 ³ %

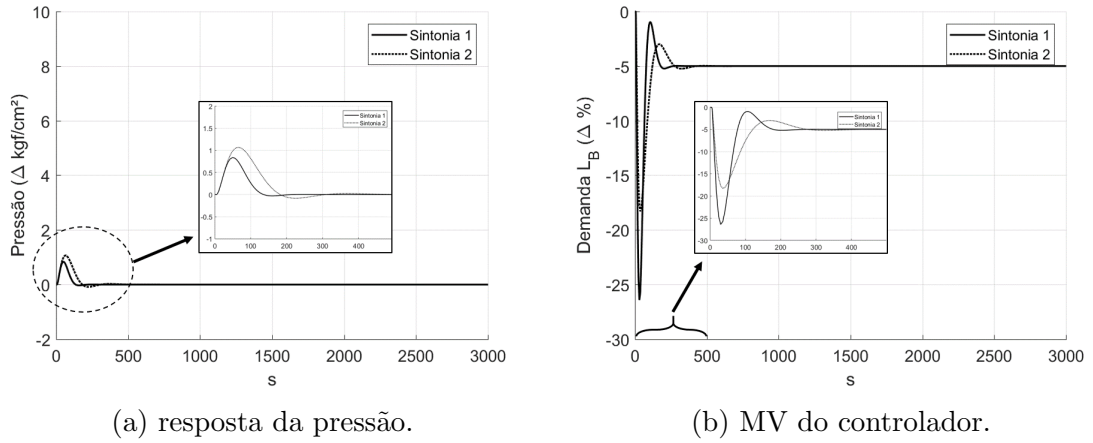


Figura 5.28: Respostas obtidas para a sintonia conforme a Tabela 5.29.

caldeiras, buscando uma maior estabilidade para estes equipamentos. O formato da sistemática proposta permite que facilmente seja acrescentada uma nova penalidade à função custo do algoritmo genético, aumentando a aptidão dos “indivíduos” (controladores) cujas sintonias resultem em respostas que atendam a este novo critério. As respostas obtidas e seus desempenhos são evidenciados na Figura 5.29 e nas Tabelas 5.31 e 5.32. Pode-se notar o atendimento pleno da nova restrição imposta (pico na MV igual 10%), bem como naturalmente tem-se um maior pico na pressão, contudo ainda dentro dos valores considerados aceitáveis.

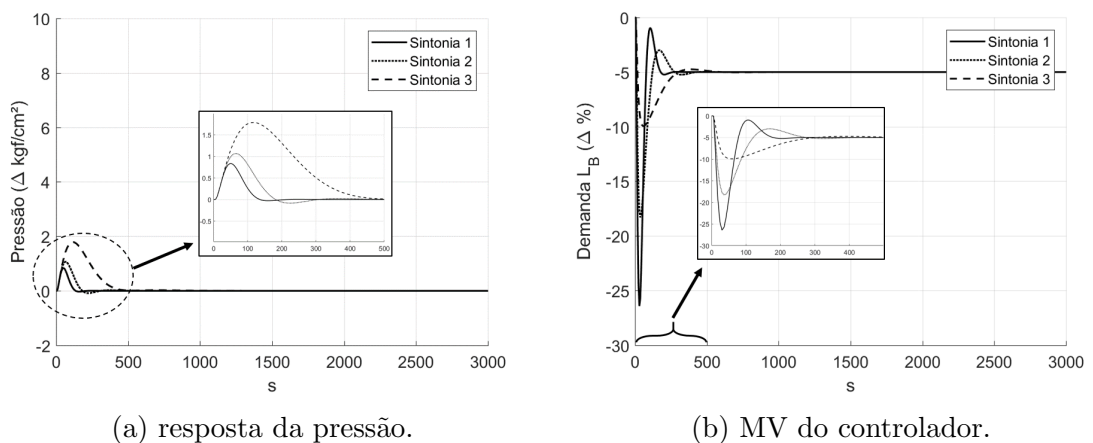


Figura 5.29: Respostas obtidas para a sintonia conforme a Tabela 5.31.

Diversas outras abordagens e hipóteses podem ser consideradas utilizando-se a sistemática proposta com intuito de ressaltar a boa flexibilidade bem como a pos-

Tabela 5.31: Parâmetros de sintonia obtidos (SOID - sintonias 1 e 2).

Caso	BP	T _I	T _D
SOID (sint.1)	8,7	177 (s)	37,5 (s)
SOID (sint.2)	14,5	199 (s)	42,5 (s)
SOID (sint.3)	37,7	298 (s)	56,5 (s)

Tabela 5.32: Cálculo de índices de desempenho (SOID - sintonias 1, 2 e 3).

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
Sintonia 1	0,84 kgf/cm ²	0,034 · 10 ³	-26,4%	-1,81%/s	18,6 · 10 ³ %
Sintonia 2	1,1 kgf/cm ²	0,081 · 10 ³	-18,3%	-1,15%/s	18,6 · 10 ³ %
Sintonia 3	1,8 kgf/cm ²	0,5 · 10 ³	-9,95%	-0,5%/s	18,6 · 10 ³ %

sibilidade de se relacionar, de forma fácil, uma grande variedade de requisitos de desempenho e restrições dos processos com os parâmetros da sistemática, de forma que a sintonia obtida atenda sempre aos objetivos de cada problema prático.

5.2.6 Análise de sensibilidade

De forma semelhante à realizada na Seção 5.1.7, considerou-se as seguintes hipóteses: erro na estimação do parâmetro τ_1 em +25% e -25%; e erro na estimação do atraso θ_2 em +100%.

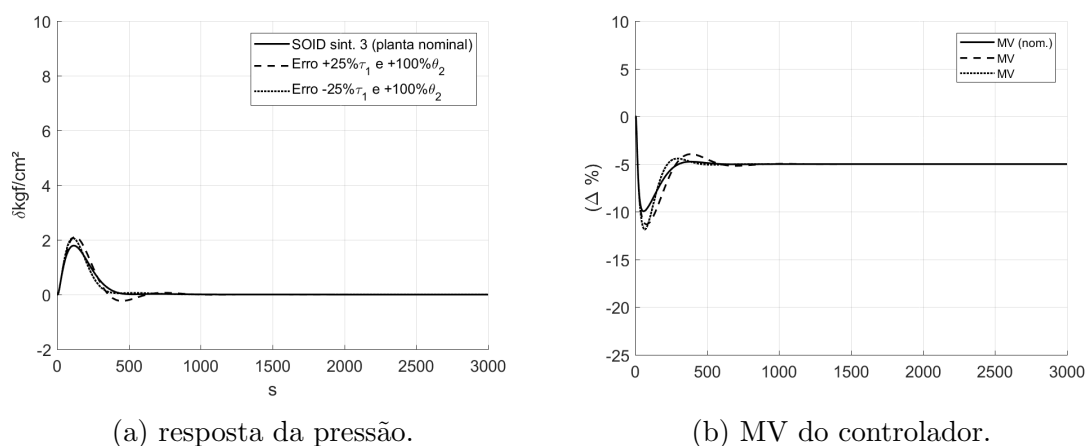


Figura 5.30: Análise de sensibilidade para a sintonia SOID (sint.3).

As Figuras 5.30, 5.31, 5.32 e 5.33 apresentam os resultados para cada método de sintonia. Para os métodos SOID, MIGO PI e ZN foi possível notar que as respostas

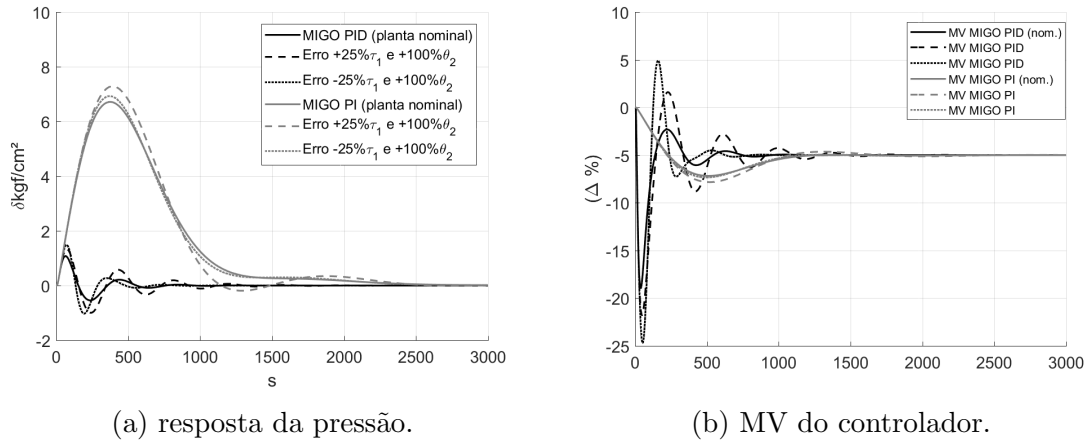


Figura 5.31: Análise de sensibilidade para a sintonia MIGO.

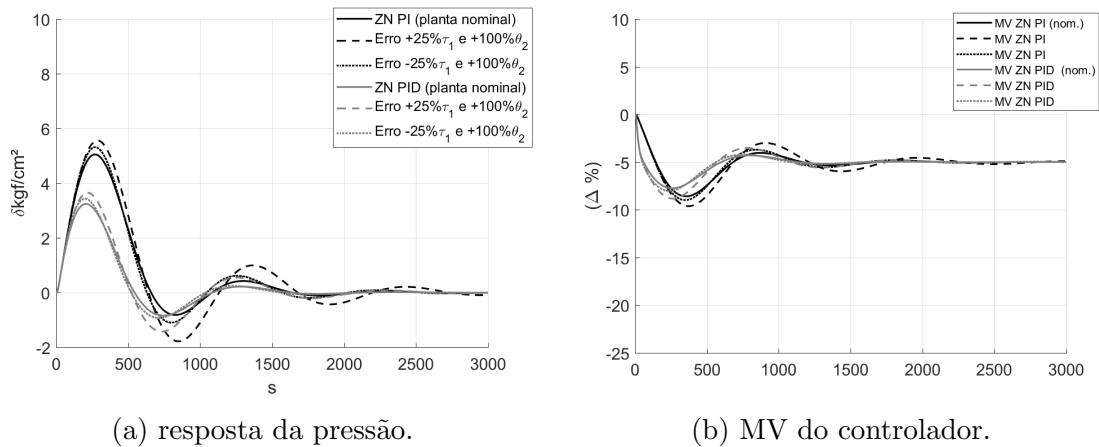


Figura 5.32: Análise de sensibilidade para a sintonia ZN.

variaram de forma suave frente aos erros no modelo impostos, não representando instabilidade ou aumento relevante nas oscilações - o que ocorre com o método MIGO PID, evidenciado especialmente na Figura 5.31b da MV do controlador. O método SIMC, por outro lado, apresentou resposta instável para o caso de -25% de erro no parâmetro τ_1 e 100% de erro no atraso. Contudo, vale destacar que o método SIMC, para o modelo nominal, apresentou a resposta com menor pico na PV e com maior esforço de controle, o que leva naturalmente a uma menor robustez frente a erros nos modelos. Dentre os métodos apresentados, a resposta para o método SOID obteve um melhor desempenho e ainda assim demonstrou bons resultados frente às incertezas.

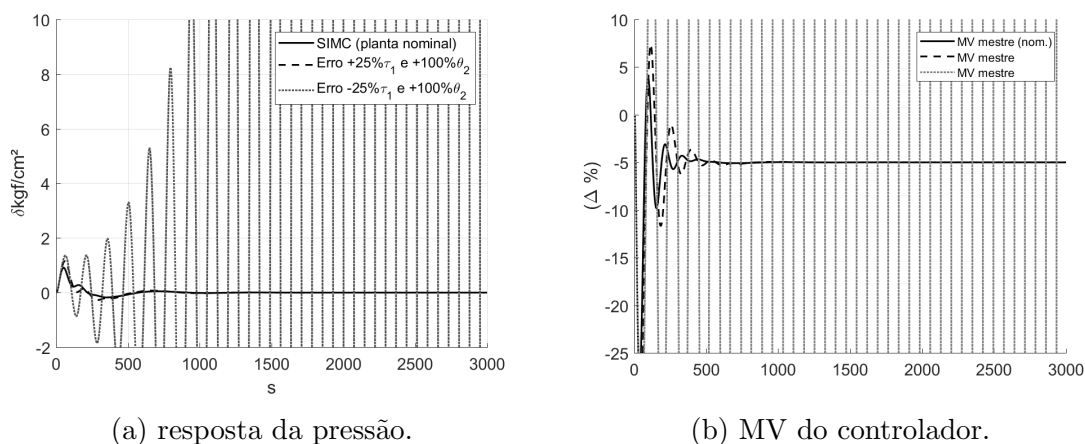


Figura 5.33: Análise de sensibilidade para a sintonia SIMC.

5.2.7 Observações finais

A Figura 5.34 e a Tabela 5.33 apresentam uma comparação entre as respostas obtidas através do método SOID e as demais encontradas nas Seções 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4. Vale ressaltar que a métrica de desempenho IACE apresentou resultados muito próximos para todos os métodos devido a natureza do processo (integrador) e o padrão das respostas obtidas, o que não aconteceria, por exemplo, caso alguma das respostas apresentasse erro de estado estacionário.

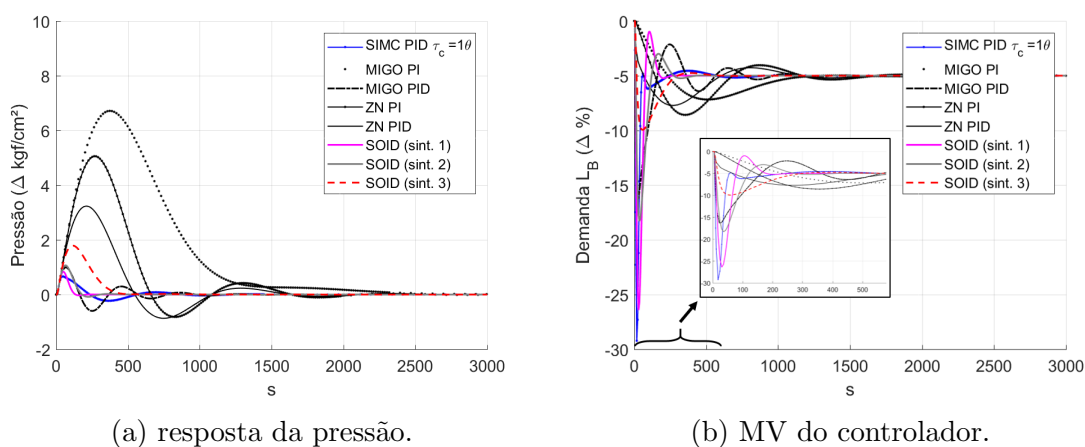


Figura 5.34: Respostas obtidas para os quatro métodos apresentados.

Destaca-se novamente que a comparação entre métodos de sintonia pode ser muitas vezes injusta devido às simplificações impostas a cada um bem como os diferentes

Tabela 5.33: Comparação entre os quatro métodos apresentados.

Caso	Pico PV	ISE	Pico MV	TV máx.	IACE
SOID (sint.1)	0,84 kgf/cm ²	0,034 · 10 ³	-26,4%	-1,81%/s	18,6 · 10 ³ %
SOID (sint.2)	1,1 kgf/cm ²	0,081 · 10 ³	-18,3%	-1,15%/s	18,6 · 10 ³ %
SOID (sint.3)	1,8 kgf/cm ²	0,5 · 10 ³	-9,95%	-0,5%/s	18,6 · 10 ³ %
A-MIGO PI	9,53 kgf/cm ²	70 · 10 ³	-6,6%	-0,0146%/s	18,6 · 10 ³ %
MIGO PI	6,71 kgf/cm ²	21,5 · 10 ³	-7,2%	-0,025%/s	18,6 · 10 ³ %
MIGO PID	0,99 kgf/cm ²	0,122 · 10 ³	-16,3%	-2,06%/s	18,6 · 10 ³ %
ZN PID	3,23 kgf/cm ²	2,8 · 10 ³	-7,7%	-0,3808%/s	18,6 · 10 ³ %
SIMC PID	0,66 kgf/cm ²	0,051 · 10 ³	-29,2%	-3,74%/s	18,6 · 10 ³ %

objetivos dos mesmos. Contudo, para o caso aqui apresentado, algumas observações importantes podem ser citadas. O método ZN novamente pode ser visto como o mais limitado dentre os quatro, visto que não possui parâmetros livres para ajuste fino das sintonias bem como que não contempla em sua concepção nenhuma restrição relacionada à robustez. Percebe-se ainda que o método A-MIGO, apesar de considerar restrições na função sensibilidade com intuito de prover robustez à sintonia, pode mesmo assim trazer respostas instáveis devido às aproximações impostas na concepção do método com intuito de se estabelecer regras universais. Neste caso, pode-se utilizar o método MIGO para evitar os possíveis problemas ocasionados pelas aproximações. Ainda assim, o método MIGO PI apresentou pico muito elevado, enquanto que o MIGO PID apresentou uma resposta oscilatória e muito agressiva.

O método SIMC, apesar de apresentar uma resposta também agressiva com $\tau_c = \theta$, mostrou-se novamente interessante em termos de possibilitar um ajuste fino do parâmetro τ_c , provendo alguma flexibilidade, ainda que de certa forma limitada. Por sua vez, a sistemática SOID proposta nesta dissertação mostrou possuir uma boa flexibilidade para a realização da sintonia das malhas, sempre estabelecendo um paralelo entre os parâmetros de ajuste do método e os requisitos de controle desejados para cada problema. Além disto, inclui de forma simples restrições de margem de ganho, margem de fase, máximo valor da função de sensibilidade (utilizado, por exemplo, no método MIGO com GA) e até mesmo outras restrições possivelmente desejadas para atendimento dos requisitos da planta - como foi exemplificado com a restrição no máximo pico da MV.

Capítulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados demonstraram que uma sistemática de sintonia ótima que seja facilmente relacionada com critérios associados diretamente a demandas de um processo pode trazer vantagens interessantes. O método proposto mostrou-se bastante flexível e adaptável, sendo possível sua aplicação em inúmeros tipos de problemas existentes, simplificando o processo de sintonia.

Outro aspecto relevante do método aqui proposto é a possibilidade de ajuste da sintonia obtida de forma intuitiva, através da seleção de parcelas determinadas do índice de desempenho estabelecido ou até mesmo restrições diretamente relacionadas com o comportamento desejado (máximo pico na MV, máximo pico na PV, dentre outros). Mesmo que o primeiro resultado da sintonia esteja aquém do desejado, provê-se alternativas para que o usuário realize pequenos ajustes ou até mesmo altere completamente a sintonia. Isto viabiliza, por exemplo, a utilização desta sistemática para modelos de processo matematicamente iguais porém com objetivos completamente diferentes, como um controle de nível de vaso pulmão e um controle de nível de um tubulão de caldeira, conforme exemplificado no Capítulo 2.

Deve-se ainda ressaltar a possibilidade de utilização do SOID em estratégias simples ou multi-malhas, de forma que, neste segundo caso, permite-se que o problema seja resolvido de uma só vez, buscando um desempenho final do conjunto de controladores ao invés de dois problemas independentes. Em métodos que tratam apenas de uma única sintonia por vez, ao realizar e fixar a sintonia da malha escrava de forma independente, muitas vezes não se tem ainda, por exemplo, o reflexo da mesma no resultado final - incluindo a malha mestre - o que pode tornar o processo iterativo

e repetitivo, bem como pode trazer dificuldades ao procedimento de sintonia.

A utilização de uma técnica heurística de otimização mostrou-se vantajosa na aplicação da sistemática apresentada, visto que tais técnicas, como por exemplo GA, trazem características que simplificam a aplicação do método. O Capítulo 4 descreveu uma possível forma de utilização deste tipo de técnica, bem como evidenciou a boa associação entre a mesma e o tipo de problema que este trabalho se propôs a investigar.

No Capítulo 5 foi ilustrada a aplicação completa da sistemática proposta nesta dissertação em dois problemas distintos, incluindo a comparação com três outros métodos relevantes (A-MIGO/MIGO, ZN e SIMC), onde os resultados obtidos se mostraram satisfatórios. Para o problema apresentado na Seção 5.1, foi evidenciada a flexibilidade do método proposto, permitindo sintonias agressivas ou mais suaves, o que nem todos os métodos comparados foram capazes de propiciar. A Seção 5.2 apresentou a aplicação da sistemática em mais um caso de estudo, sempre estabelecendo um paralelo com os possíveis requisitos de controle desejados, demonstrando as vantagens da mesma e comparando os resultados com outros métodos existentes. Exemplificou-se ainda uma forma direta de inclusão de novas restrições, como por exemplo, para o atendimento de um possível objetivo específico do processo em questão (pico máximo da MV), bem como inclusão de outras restrições típicas tal como a de máximo valor da função de sensibilidade.

Ademais, exemplificou-se qualitativamente, através da análise de sensibilidade, as vantagens da utilização de restrições associadas à margem de ganho, margem de fase e função de sensibilidade, buscando obter-se características de robustez da malha frente a erros nos modelos.

6.1 Perspectivas de trabalhos futuros

No presente trabalho, foi proposto um conceito para sintonia sistemática baseada em um índice normalizado. Devido à flexibilidade da proposta, diversos aspectos podem ser aprofundados. Algumas possibilidades para trabalhos futuros são:

- inclusão de novos índices de desempenho a serem considerados na função objetivo, que possam ser úteis em outros problemas de controle;

- avaliar o desempenho do algoritmo incluindo outros tipos de restrição além das apresentadas, tais como máximo pico na função de sensibilidade, tempo de assentamento máximo, tempo de subida máximo, máximo sobressinal, dentre outros;
- aplicação de outras técnicas heurísticas de otimização tais como enxame de partículas, colônia de formigas, dentre outras, com objetivo de comparação dos resultados obtidos com o algoritmo genético;
- generalização da técnica para aplicação em problemas MIMO;
- aplicação da sistemática proposta utilizando modelos não lineares;
- comparação da sistemática proposta com abordagens existentes multicritério.

Apêndice A

Cálculo das parcelas do ID

As parcelas que compõem o índice de desempenho proposto nesta dissertação, apesar de largamente conhecidas na literatura e de fácil implementação, podem ser calculadas de diferentes formas. Posto isso, este Apêndice tem como objetivo explicitar o formato utilizado neste trabalho. Dada a implantação de tais parcelas num sistema discreto e considerando as notações de tempo de simulação (T_{sim}); amostragem (ΔT); e instante de tempo (n), tem-se então:

- I_1 : Pico na PV

$$I_1 = \max(|PV_n|) \Big|_{n=1}^{T_{sim}}$$

- I_2 : ISE (*Integral Squared Error*)

$$I_2 = \sum_{n=2}^{T_{sim}} \left(\frac{E_n^2 + E_{n-1}^2}{2} \cdot \Delta T \right)$$

- I_3 : IAE (*Integral Absolute Error*)

$$I_3 = \sum_{n=2}^{T_{sim}} \left(\frac{|E_n| + |E_{n-1}|}{2} \cdot \Delta T \right)$$

- I_4 : Oscilação da PV

$$I_4 = \sum_{n=2}^{T_{sim}} (|PV_n - PV_{n-1}|)$$

- I_5 : Somatório da taxa de variação da PV

$$I_5 = \sum_{n=2}^{T_{sim}} \left(\frac{|PV_n - PV_{n-1}|}{\Delta T} \right)$$

- I_6 : Taxa de variação máxima da PV

$$I_6 = \max \left(\frac{|PV_n - PV_{n-1}|}{\Delta T} \right) \Big|_{n=2}^{T_{sim}}$$

- I_7 : Pico na MV (*Manipulated Variable*)

$$I_7 = \max(|MV_n|) \Big|_{n=1}^{T_{sim}}$$

- I_8 : Oscilação da variável manipulada

$$I_8 = \sum_{n=2}^{T_{sim}} (|MV_n - MV_{n-1}|)$$

- I_9 : Taxa de variação máxima da MV

$$I_9 = \max \left(\frac{|MV_n - MV_{n-1}|}{\Delta T} \right) \Big|_{n=2}^{T_{sim}}$$

- I_{10} : Somatório da taxa de variação da MV

$$I_{10} = \sum_{n=2}^{T_{sim}} \left(\frac{|MV_n - MV_{n-1}|}{\Delta T} \right)$$

- I_{11} : IACE (*Integrated Absolute Control Effort*)

$$I_{11} = \sum_{n=2}^{T_{sim}} \left(\frac{|MV_n| + |MV_{n-1}|}{2} \cdot \Delta T \right)$$

Bibliografia

- Alfaro, V., Vilanova, R., Méndez, V. & Lafuente, J. (2010), Performance/robustness tradeoff analysis of PI/PID servo and regulatory control systems, *in* 'Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on', IEEE, pp. 111–116.
- Ali, A. & Majhi, S. (2010), 'PID controller tuning for integrating processes', *ISA transactions* **49**(1), 70–78.
- Åström, K. & Hägglund, T. (2004), 'Revisiting the ziegler–nichols step response method for PID control', *Journal of Process Control* **14**(6), 635–650.
- Åström, K. J. & Hägglund, T. (1995), 'PID controllers: theory, design, and tuning'.
- Åström, K., Panagopoulos, H. & Hägglund, T. (1998), 'Design of PI controllers based on non-convex optimization', *Automatica* **34**(5), 585–601.
- Bauer, M., Horch, A., Xie, L., Jelali, M. & Thornhill, N. (2016), 'The current state of control loop performance monitoring—a survey of application in industry', *Journal of Process Control* **38**, 1–10.
- Bialkowski, W. (1993), 'Dreams versus reality: a view from both sides of the gap: manufacturing excellence with come only through engineering excellence', *Pulp & Paper Canada* **94**(11), 19–27.
- Blickle, T. (1997), *Theory of evolutionary algorithms and application to system synthesis*, number 17, vdf Hochschulverlag AG.
- Blickle, T. & Thiele, L. (1995), 'A comparison of selection schemes used in genetic algorithms'.
- Boyd, S. & Vandenberghe, L. (2004), *Convex optimization*, Cambridge university press.

- Campos, M. C. M. M. & Teixeira, H. C. (2006), *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*, Edgard Blücher.
- Chien, H. & Reswick (1952), ‘On the automatic control of generalized passive systems’, *Trans. ASME* **74**, 175–185.
- Cohen, G. (1953), ‘Theoretical consideration of retarded control’, *Trans. Asme* **75**, 827–834.
- Corripio, A. B. (2000), *Tuning of industrial control systems*, ISA.
- Dahlin, E. et al. (1968), ‘Designing and tuning digital controllers’, *Instruments and Control systems* **41**(6), 77–83.
- De Landgraaf, W., Eiben, A. & Nannen, V. (2007), Parameter calibration using meta-algorithms, in ‘Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on’, IEEE, pp. 71–78.
- Desborough, L. & Miller, R. (2002), Increasing customer value of industrial control performance monitoring-honeywell’s experience, in ‘AIChE symposium series’, number 326, New York; American Institute of Chemical Engineers; 1998, pp. 169–189.
- Ender, D. B. (1993), ‘Process control performance: Not as good as you think’, *Control Engineering* **40**(10), 180–190.
- Garpinger, O. & Hägglund, T. (2015), ‘Software-based optimal PID design with robustness and noise sensitivity constraints’, *Journal of Process Control* **33**, 90–101.
- Garpinger, O., Hägglund, T. & Åström, K. J. (2014), ‘Performance and robustness trade-offs in PID control’, *Journal of Process Control* **24**(5), 568–577.
- Goldberg, D. E., Deb, K. & Thierens, D. (1993), ‘Toward a better understanding of mixing in genetic algorithms’, *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers* **32**(1), 10–16.
- Grimholt, C. & Skogestad, S. (2018), ‘Optimal PI and PID control of first-order plus delay processes and evaluation of the original and improved SIMC rules’, *Journal of Process Control* **70**, 36–46.

- Hagglund, T. & Åstrom, K. J. (2002), ‘Revisiting the ziegler-nichols tuning rules for PI control’, *Asian Journal of Control* **4**(4), 364–380.
- Kookos, I., Lygeros, A. & Arvanitis, K. (1999), ‘On-line pi controller tuning for integrator/dead time processes’, *European journal of control* **5**(1), 19–31.
- Kramer, O. (2017), *Genetic algorithm essentials*, Vol. 679, Springer.
- Lopez, A. (1967), ‘Tuning controllers with error-integral criteria’, *Instrumentation Technology* **14**, 57–62.
- Luyben, W. L. (1996), ‘Tuning proportional- integral- derivative controllers for integrator/deadtime processes’, *Industrial & engineering chemistry research* **35**(10), 3480–3483.
- Marler, R. & Arora, J. (2004), ‘Survey of multi-objective optimization methods for engineering’, *Structural and Multidisciplinary Optimization* **26**(6), 369–395.
- Michalewicz, Z. (1996), Evolution strategies and other methods, *in* ‘Genetic algorithms+ data structures= evolution programs’, Springer, pp. 159–177.
- Miller, B. L., Goldberg, D. E. et al. (1995), ‘Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise’, *Complex systems* **9**(3), 193–212.
- Morari, M. & Zafiriou, E. (1989), *Robust process control*, Vol. 488, Prentice hall Englewood Cliffs, NJ.
- Panagopoulos, H., Hägglund, T. & Åström, K. (2002), ‘Design of PID controllers based on constrained optimisation’, *IEE Proceedings - Control Theory and Applications* **149**(1), 32–40.
- Rechenberg, I. (1973), ‘Evolutionsstrategie–optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution’.
- Rice, B. & Cooper, D. (2002), ‘Design and tuning of PID controllers for integrating (non-self regulating) processes’, *TECHNICAL PAPERS-ISA* **422**, 437–448.
- Rivera, D. E., Morari, M. & Skogestad, S. (1986), ‘Internal model control: PID controller design’, *Industrial & engineering chemistry process design and development* **25**(1), 252–265.

- Rovira, A. A., Murrill, P. W. & Smith, C. L. (1970), Tuning controllers for set point changes., Technical report, LOUISIANA STATE UNIV BATON ROUGE COLL OF ENGINEERING.
- Shamsuzzoha, M. & Lee, M. (2008), ‘PID controller design for integrating processes with time delay’, *Korean Journal of Chemical Engineering* **25**(4), 637–645.
- Skogestad, S. (2003), ‘Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning’, *Journal of Process Control* **13**(4), 291–309.
- Sree, R. P. & Chidambaram, M. (2005), ‘A simple and robust method of tuning PID controllers for integrator/dead time processes’, *Journal of chemical engineering of Japan* **38**(2), 113–119.
- Thierens, D. (2002), Adaptive mutation rate control schemes in genetic algorithms, *in* ‘Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC 02 (Cat. No.02TH8600)’, IEEE.
- Tyreus, B. D. & Luyben, W. L. (1992), ‘Tuning PI controllers for integrator/dead time processes’, *Industrial & Engineering Chemistry Research* **31**(11), 2625–2628.
- Visioli, A. (2001), ‘Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes’, *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* **148**(2), 180–184.
- Wang, L. & Cluett, W. (1997), ‘Tuning PID controllers for integrating processes’, *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* **144**(5), 385–392.
- Wright, A. H. (1991), Genetic algorithms for real parameter optimization, *in* ‘Foundations of genetic algorithms’, Vol. 1, Elsevier, pp. 205–218.
- Ziegler, J. G. & Nichols, N. B. (1942), ‘Optimum settings for automatic controllers’, *trans. ASME* **64**(11).