UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

JACQUELINE APARECIDA ARAÚJO BARBOSA

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR PREDITIVO GENERALIZADO COM FUNÇÃO DE PESOS VARIANTE NO TEMPO ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS

NATAL/RN
2007

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

JACQUELINE APARECIDA ARAÚJO BARBOSA

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR PREDITIVO GENERALIZADO COM FUNÇÃO DE PESOS VARIANTE NO TEMPO ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências na área de concentração de Sistemas de Controle e Automação Industrial.

ORIENTADOR: Professor D. Sc. André Laurindo Maitelli

NATAL/RN
2007

Divisão de Serviços Técnicos

Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Barbosa, Jacqueline Aparecida Araújo.
Determinação dos parâmetros do controlador preditivo generalizado com função de pesos variante no tempo através de algoritmos genéticos / Jacqueline Aparecida Araújo Barbosa. – Natal, RN, 2007.
118 f.

Orientador: André Laurindo Maitelli.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Engenharia elétrica – Dissertação. 2. TGPC – Dissertação. 3. Parâmetros de controlador – Dissertação. I. Maitelli, André Laurindo. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM CDU 621.3(043.3)

JACQUELINE APARECIDA ARAÚJO BARBOSA

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR PREDITIVO GENERALIZADO COM FUNÇÃO DE PESOS VARIANTE NO TEMPO ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências na área de concentração de Sistemas de Controle e Automação Industrial.

Aprovada em: _____/_____/_____

_____

Prof. D. Sc. André Laurindo Maitelli
Orientador – DCA/UFRN

_____

Prof. D. Sc. Fabio Meneghetti Ugulino de Araújo
Examinador interno – DCA/UFRN

_____

D. Sc. Vicente Delgado Moreira
Examinador externo - PETROBRAS

Aos meus filhos, Caroline e Paulo Roberto,
ao meu esposo, Pinheiro, pela compreensão
nos momentos de minha ausência,
necessários à dedicação a este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Especialmente ao meu orientador Prof. Dr André Laurindo Maitelli, pela confiança, paciência e ensinamentos transmitidos durante a realização deste trabalho.

Agradeço a minha família pelo apoio, incentivo e companheirismo que motivaram meu ingresso em mais esta etapa de minha vida acadêmica.

Ao Coordenador de Informática da Secretaria de Estado da Tributação, Geraldo Marcelo, e aos demais colegas de trabalho, pela compreensão nos momentos em que precisei ausentar-me do trabalho para freqüentar algumas aulas.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação – PPgEEC/UFRN, pelo profissionalismo e dedicação com que conduziram as disciplinas ministradas, e que me proporcionaram enriquecimento acadêmico, profissional e pessoal.

Aos diversos colegas e amigos que conquistei no decorrer do curso, especialmente as amigas Luana, Stella e Raphaela, pelos diversos fins de semana dedicados aos estudos, momentos de descontração e ajuda nas horas difíceis que enfrentei.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Computação e Automação e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A técnica de controle preditivo tem obtido, nos últimos anos, maior número de adeptos em razão da facilidade de ajuste dos seus parâmetros, da extrapolação de seus conceitos para sistemas de entradas múltiplas e saídas múltiplas, de modelos não lineares de processos serem linearizados em um ponto de operação, sendo assim, usados explicitamente no controlador, e principalmente, por ser a única metodologia que pode levar em consideração, durante o projeto do controlador, as limitações dos sinais de controle e saída do processo. O controle preditivo generalizado com função de pesos variante no tempo (TGPC), estudado neste trabalho, é mais uma alternativa aos diversos controles preditivos existentes, caracterizando-se como uma modificação do controle preditivo generalizado (GPC), em que há a utilização de um modelo de referência, calculado de acordo com parâmetros de projeto previamente estabelecidos pelo projetista, e o emprego de uma nova função critério, que ao ser minimizada fornece os melhores parâmetros para o controlador. Utiliza-se a técnica dos algoritmos genéticos para minimização da função critério proposta e busca-se demonstrar a robustez do TGPC através da aplicação de critérios de desempenho, estabilidade e robustez. Para comparar os resultados do controlador TGPC, são utilizados os controladores GPC e proporcional, integral e derivativo (PID), e todas as técnicas são aplicadas a plantas estável, instável e de fase não mínima. Os exemplos ilustrativos simulados realizam-se com o uso da ferramenta MATLAB®. Verifica-se que, as alterações implementadas no TGPC, permitem a comprovação da eficiência deste algoritmo.

Palavras-chave: TGPC. Função critério. Parâmetros do controlador.

ABSTRACT

The predictive control technique has gotten, on the last years, greater number of adepts in reason of the easiness of adjustment of its parameters, of the exceeding of its concepts for multi-input/multi-output (MIMO) systems, of nonlinear models of processes could be linearised around a operating point, so can clearly be used in the controller, and mainly, as being the only methodology that can take into consideration, during the project of the controller, the limitations of the control signals and output of the process. The time varying weighting generalized predictive control (TGPC), studied in this work, is one more an alternative to the several existing predictive controls, characterizing itself as an modification of the generalized predictive control (GPC), where it is used a reference model, calculated in accordance with parameters of project previously established by the designer, and the application of a new function criterion, that when minimized offers the best parameters to the controller. It is used technique of the genetic algorithms to minimize of the function criterion proposed and searches to demonstrate the robustness of the TGPC through the application of performance, stability and robustness criterions. To compare achieves results of the TGPC controller, the GCP and proportional, integral and derivative (PID) controllers are used, where whole the techniques applied to stable, unstable and of non-minimum phase plants. The simulated examples become fulfilled with the use of MATLAB® tool. It is verified that, the alterations implemented in TGPC, allow the evidence of the efficiency of this algorithm.

Keywords: TGPC. Cost function. Controller parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Estratégia de horizonte preditivo 29

Figura 2 Etapas básicas de um AG para a resolução de um problema de otimização 38

Figura 3 Exemplo de cromossomo do algoritmo 39

Figura 4 Exemplo de cruzamento sobre um ponto de quebra 42

Figura 5 Exemplo de mutação 43

Figura 6 Diagrama de blocos do controlador PID 46

Figura 7 Mapeamento usando o método de aproximação trapezoidal ou Tustin 51

Figura 8 Esquema geral da metodologia aplicada ao PID 53

Figura 9 Esquema geral da sistemática aplicada ao TGPC 66

Figura 10 Estrutura do algoritmo genético implementado 70

Figura 11 Esquema da saída desejada do TGPC pelo modelo calculado 73

Figura 12 TGPC para a planta estável 77

Figura 13 GPC para a planta estável 78

Figura 14 PID para a planta estável 78

Figura 15 TGPC para a planta instável 80

Figura 16 GPC para a planta instável 81

Figura 17 Gráfico do lugar das raízes para a planta instável 82

Figura 18 TGPC para a planta de fase não mínima 84

Figura 19 GPC para a planta de fase não mínima 85

Figura 20 PID para a planta de fase não mínima 86

Figura 21 Planta estável: influência do parâmetro a em relação ao critério J . 88

Figura 22 Planta estável: influência do parâmetro b em relação ao critério J . 88

Figura 23 Planta instável: influência do parâmetro a em relação ao critério J 89

Figura 24 Planta instável: influência do parâmetro b em relação ao critério J 89

Figura 25 Planta de fase não mínima: influência do parâmetro a em relação ao critério J 90
Figura 26 Planta de fase não mínima: influência do parâmetro b em relação ao critério J 90
Figura 27 Lugar das raízes do TGPC robusto para a planta estável 92
Figura 28 TGPC robusto para a planta estável 92
Figura 29 Lugar das raízes do TGPC robusto para a planta instável 93
Figura 30 TGPC robusto para a planta instável 93
Figura 31 Lugar das raízes do TGPC robusto para a planta de fase não mínima 94
Figura 32 TGPC robusto para a planta de fase não mínima 94
Figura 33 Resultado obtido da aplicação do teorema 1 ao TGPC para a planta estável..... 96
Figura 34 Resultado obtido da aplicação do teorema 1 ao TGPC para a planta instável..... 96
Figura 35 Resultado obtido da aplicação do teorema 2 ao TGPC para uma planta estável..... 98
Figura 36 Resultado obtido da aplicação do teorema 3 ao TGPC para uma planta instável..... 100
Figura 37 Lugar das raízes do TGPC para a planta de fase não mínima com variação do horizonte de controle N 101
Figura 38 Lugar das raízes do TGPC para a planta de fase não mínima com variação da função de pesos λ 102
Figura 39 Lugar das raízes do TGPC para a planta de fase não mínima com variação da função de pesos β 102
Figura 40 Lugar das raízes do GPC para a planta de fase não mínima com variação do horizonte de controle N 103
Figura 41 Lugar das raízes do GPC para a planta de fase não mínima com variação da função de pesos λ 103

Figura 42 Lugar das raízes do PID para a planta de fase não mínima com variação do ganho proporcional K_p 104
Figura 43 Lugar das raízes do PID para a planta de fase não mínima com variação do ganho proporcional τ_i 104
Figura 44 Lugar das raízes do PID para a planta de fase não mínima com variação do ganho proporcional τ_d 105
Figura 45 TGPC com ruído gaussiano na saída da planta estável 107
Figura 46 TGPC com ruído gaussiano na saída da planta instável 108
Figura 47 TGPC com ruído gaussiano na saída da planta de fase não mínima 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Relação entre a ação e o efeito das parcelas que compõem o PID 49

Tabela 2 Parâmetros de projeto 67

Tabela 3 Parâmetros das plantas utilizadas na simulação 75

Tabela 4 Parâmetros a e b especificados de acordo com o tipo de planta .. 76

Tabela 5 Parâmetros do controlador TGPC obtidos para a planta estável ... 77

Tabela 6 Parâmetros do controlador GPC obtidos para a planta estável 77

Tabela 7 Parâmetros do controlador PID obtidos para a planta estável 79

Tabela 8 Parâmetros do controlador TGPC obtidos para a planta instável .. 80

Tabela 9 Parâmetros do controlador GPC obtidos para a planta instável 81

Tabela 10 Zeros e pólos da planta discreta instável 82

Tabela 11 Parâmetros do controlador TGPC obtidos para a planta de fase não mínima 84

Tabela 12 Parâmetros do controlador GPC obtidos para a planta de fase não mínima 85

Tabela 13 Parâmetros do controlador PID obtidos para a planta de fase não mínima 85

Tabela 14 Valores do índice ISE obtidos para o TGPC, GPC e PID 87

Tabela 15 Valores dos parâmetros das plantas e dos critérios obtidos para o TGPC 91

Tabela 16 Parâmetros da planta utilizada na simulação do teorema 2 97

Tabela 17 Parâmetros da planta utilizada na simulação do teorema 3 99

Tabela 18 Zeros e pólos obtidos para o TGPC, GPC e PID, para a planta de fase não mínima 105

Tabela 19 Valores dos critérios obtidos para o TGPC, GPC e PID 107

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$a \geq 0$	Ponderação do erro quadrático entre a saída da planta e a saída desejada
a_1 e a_2	Parâmetros do polinômio $A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2}$
$b \geq 0$	Ponderação da variação da seqüência de controle quadrática
b_0 e b_1	Parâmetros do polinômio $B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1}$
d	Retardo natural do sistema em múltiplos do período de amostragem ($d \geq 0$)
e(k)	Ruído "branco" de média zero e variância σ^2
E(s)	Erro no domínio de Laplace
e(t)	Erro no domínio do tempo, definido como $e(t) = r(t) - y(t)$
f	Resposta livre devido à resposta natural do sistema a partir das condições atuais, considerando-se uma seqüência de ações de controle futura igual a zero, a partir do instante *k*
$G(q^{-1})$	Função de transferência discreta do modelo nominal
$G_c(s)$	Função de transferência do controlador no domínio de Laplace
$G_r(q^{-1})$	Função de transferência discreta do processo real
Gu	Resposta forçada, obtida devido a consideração das condições iniciais nulas, no instante *k*, e sujeita à seqüência de ações de controle futuras
J	Função critério ou função objetivo a ser minimizada
J_{min}	Valor da aptidão de cada cromossomo.
K	Primeira linha da matriz $(G^T BG + \lambda B)^{-1} G^T B$
K_p	Ganho proporcional do controlador PID
M_p	Máximo sobressinal
M(s)	Função de transferência de malha fechada do modelo desejado no domínio de Laplace
N	Horizonte máximo de predição igual ao horizonte de controle
$N_1 \geq 1$	Horizonte mínimo de predição

NA	Número total de amostras da simulação
q^{-1}	Representa o atraso de transporte do sistema
r(k + j)	Trajetória futura de referência
r(t)	Valor de referência (*setpoint*) no domínio do tempo
T	Período de amostragem
T_c	Taxa de cruzamento
T_m	Taxa de mutação
t_s	Tempo de estabilização
u_d	Ação derivativa do controlador PID
u_i	Ação integral do controlador PID
u_p	Ação proporcional do controlador PID
u(k)	Saída do controlador ou sinal de controle no instante k
U(s)	Ação de controle no domínio de Laplace
u(t)	Variável de controle no domínio do tempo
y(k)	Saída do sistema no instante k
$y_d(k)$	Saída desejada do processo no instante k
y(t)	Valor medido da saída do processo no domínio do tempo
$\hat{y}(k+j)$	Saída predita, cujas previsões em instantes futuros são realizadas utilizando as informações disponíveis até o instante *k*

SÍMBOLOS GREGOS

α_0, α_1, α_2	Coeficientes do numerador da função de transferência discreta do controlador PID
$\beta(j)$	Função de pesos para penalizar o erro e a seqüência de controle, tendo a seguinte forma $\beta(j) = \beta^{j-1}$
β_0, β_1, β_2	Coeficientes do denominador da função de transferência discreta do controlador PID
γ_j	Fatores do numerador da função de transferência discreta da planta real, j = 0,..., nb em que nb é o grau do polinômio $B(q^{-1})$

$\Gamma\ (q^{-1})$	Parcela correspondente à incerteza estruturada
$\Delta = 1 - q^{-1}$	Operador diferença, cuja função é assegurar a ação integral do controlador a fim de cancelar o efeito dos distúrbios da saída degrau
Δu	Vetor de incremento das ações de controle
ε	Tolerância máxima aceitável
η	Constante do filtro da ação derivativa do controlador PID
$\lambda(j) \geq 0$	Ponderação do sinal de controle, que é escolhida como sendo constante e apresentando a forma $(\lambda(j) = \lambda)$
ξ	Coeficiente de amortecimento do sistema
ρ_i	Fatores do denominador da função de transferência discreta da planta real, i = 1,..., na em que na é o grau do polinômio $A(q^{-1})$
τ_d	Constante de tempo derivativo do controlador PID
τ_i	Constante de tempo integral do controlador PID
ω_n	Freqüência natural do sistema

SIGLAS

AG	Algoritmos Genéticos
CARIMA	Controlador Auto-Regressivo Integral Média Móvel
GPC	Controle Preditivo Generalizado
ISE	Integral do Erro Quadrático
ITAE	Integral do Tempo Vezes o Valor Absoluto do Erro
MATLAB®	Marca registrada de *The Mathworks, Inc.*
MIMO	Entradas Múltiplas Saídas Múltiplas
PID	Controlador Proporcional, Integral e Derivativo
SISO	Entrada Única Saída Única
TGPC	Controle Preditivo Generalizado com função de pesos variante no Tempo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E PROPOSTA DE SOLUÇÃO 19

1.2 ORIGEM DO TGPC 20

1.3 MOTIVAÇÃO 21

1.4 OBJETIVOS 22

1.4.1 Objetivo Geral 22

1.4.2 Objetivos Específicos 22

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 23

2 O CONTROLADOR TGPC 25

2.1 MODELAGEM DO SISTEMA 26

2.2 FUNÇÃO CRITÉRIO 28

2.3 SAÍDA PREDITA 29

2.4 LEI DE CONTROLE 32

3 ALGORITMOS GENÉTICOS 34

3.1 UM BREVE HISTÓRICO 35

3.2 PARÂMETROS GENÉTICOS 36

3.2.1 Tamanho da População 36

3.2.2 Taxa de Cruzamento 37

3.2.3 Tipo de Cruzamento 37

3.2.4 Taxa de Mutação 37

3.3 ETAPAS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS 38

3.3.1 Codificação 39

3.3.2 Inicialização 39

3.3.3 Geração da População Inicial 40

3.3.4 Função Critério Proposta 40

3.3.5 Operadores Genéticos 40

3.3.5.1 Operador de Seleção 41

3.3.5.2 Operador de Cruzamento 41

3.3.5.3 Operador de Mutação 42

3.3.6 Atualização da População 43

3.3.7 Critérios de Otimização ou Parada 44

4 O CONTROLADOR PID 45

4.1 DESCRIÇÃO DO CONTROLADOR PID 46

4.1.1 Ação Proporcional 46

4.1.2 Ação Integral 47

4.1.3 Ação Derivativa 48

4.1.4 O Controlador PID Discreto 50

4.1.5 Implementação do PID Discreto 53

5 ASPECTOS DE ESTABILIDADE DO TGPC 55

5.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO 56

5.1.1 Integral do Erro Quadrático 56

5.1.2 Integral do Tempo Vezes o Valor Absoluto do Erro 57

5.2 ANÁLISE DE ROBUSTEZ 58

5.3 ANÁLISE DA ESTABILIDADE 61

6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS DO TGPC 66

6.1 CÁLCULO DO MODELO DE SEGUNDA ORDEM 67

6.2 ALGORITMO GENÉTICO 68

6.2.1 Modelagem 68

6.2.2 Implementação do TGPC e GPC 70

6.2.3 Parâmetros da Função Critério Proposta 71

6.3 TGPC 72

7 RESULTADOS OBTIDOS 74

7.1 SIMULAÇÕES REALIZADAS 75

7.1.1 Planta Estável 76

7.1.2 Planta Instável 78

7.1.3 Planta de Fase Não Mínima 83

7.2 AVALIAÇÃO DE ACORDO COM OS ASPECTOS DE ESTABILIDADE 86

7.2.1 Determinação do Índice de Desempenho 87

7.2.2 Aplicação do Critério de Robustez 91

7.2.3 Aplicação dos Teoremas de Estabilidade 95

7.2.3.1 Teorema 1 95

7.2.3.2 Teorema 2 97

7.2.3.3 Teorema 3 98

7.2.3.4 Estudo do Lugar das Raízes 100

7.3 ADIÇÃO DE RUÍDO NA SAÍDA 106

8 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS 110

REFERÊNCIAS 113

ANEXO A – TEOREMA DE ROUCHÉ 117

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E PROPOSTA DE SOLUÇÃO

O Controle Preditivo Generalizado com função de pesos variante no Tempo (TGPC) consiste em uma modificação no algoritmo de Controle Preditivo Generalizado (GPC), em que foi incluída uma nova função de pesos variante no tempo, que possui a habilidade de promover a redução do esforço computacional e prover melhorias no desempenho, na robustez e na estabilidade do sistema controlado.

No entanto, para que o TGPC possa ser utilizado da forma mais adequada, torna-se necessária a definição prévia de seus parâmetros (N, λ e β), e esta não é uma tarefa fácil de resolver porque são dados que podem variar dentro de uma faixa de valores bastante extensa. Logo, para cada conjunto de três valores possíveis destes parâmetros, pode ou não existir uma solução factível para o problema, mas a solução desejada é a seleção dos três melhores valores entre todos os existentes, respectivamente, do horizonte de controle, N, da função de ponderação da variação da ação de controle, λ e da função de pesos para penalizar o erro e a seqüência de controle, β.

Portanto, em virtude das peculiaridades apresentadas pelo problema, propõe-se o uso de algoritmos genéticos, que constituem uma técnica de busca e otimização paralela, na qual uma população de soluções é avaliada a cada iteração, e por esta razão agiliza, consideravelmente, o processo de obtenção dos parâmetros do TGPC conduzindo à solução mais apropriada, com base na minimização de uma nova função critério, que será aplicada na implementação desse algoritmo computacional, com o propósito de solucionar o problema de otimização dos citados parâmetros.

1.2 ORIGEM DO TGPC

A primeira pesquisa publicada sobre o TGPC foi em Gomma (1999), que apresentou uma abordagem alternativa do GPC desenvolvido por Clarke (Clarke, Mohtadi e Tuffs, 1987), na qual estabeleceu uma nova função de custo, capaz de reduzir o tempo computacional requerido e fornecer melhor desempenho, estabilidade e robustez em relação ao GPC tradicional (apud Bitmead, Gevers e Wertz, 1990). Após isso, Gomma (2001) publicou uma aplicação para o motor de turbina de 1,5 MW, na qual utilizou esta nova técnica de controle preditivo e observou que a mesma apresentara bons resultados. Gomma (2004) ainda propôs uma nova análise da estabilidade para o GPC e o TGPC, através da utilização de teoremas aplicados a casos particulares de ambas as técnicas.

Os critérios de desempenho e robustez do TGPC foram apresentados nos dois primeiros trabalhos descritos por Gomma (1999 e 2001), nos quais foram utilizados, como medida quantitativa apropriada, o índice de desempenho definido pela integral do erro quadrático (ISE) e a análise da robustez estabelecida pelo estudo das incertezas aditivas e multiplicativas, ao passo que em Gomma (2004), foi proposta a análise da estabilidade do GPC através da aplicação de sete teoremas, dos quais três deles são usados, exclusivamente, para o TGPC.

Dessa forma, a concepção da metodologia proposta neste trabalho estabelece o uso de um modelo de referência, que é calculado de acordo com parâmetros desejados de projeto, e o emprego de uma nova função critério para a determinação dos melhores parâmetros do TGPC, que considera a ponderação do erro quadrático entre o sinal de saída da planta e a saída do modelo e a ponderação da variação quadrática do sinal de controle, baseando-se na técnica dos algoritmos genéticos.

Assim, para melhor avaliar esta metodologia, aplicada ao TGPC, os critérios de desempenho, estabilidade e robustez descritos em Gomma (1999, 2001 e 2004), além do uso do índice de desempenho ITAE, do estudo da estabilidade através do método do lugar das raízes e da robustez com base na aplicação de ruído gaussiano na saída do controlador, são utilizados visando a comprovação dos resultados

obtidos, sendo estes, posteriormente comparados com os resultados da aplicação dos controladores GPC e Proporcional, Integral, Derivativo (PID).

1.3 MOTIVAÇÃO

As últimas décadas têm sido marcadas por grandes transformações na área de tecnologia da informação. Essas mudanças se traduzem em grande competitividade entre as empresas, que precisam lançar no mercado produtos capazes de competir em qualquer parte do mundo. Devido a esta exigência de eficiência nos processos de produção industrial muitas empresas têm feito altos investimentos na área de automação de processos.

A necessidade de encontrar soluções que levem a um melhor aproveitamento dos recursos e a obtenção de custos mais baixos com o máximo de desempenho têm proporcionado a utilização de técnicas de otimização que buscam solucionar problemas, como a dificuldade de obtenção dos parâmetros de diversos tipos de controladores, através do emprego de metodologias que possibilitem a automatização do processo de busca da melhor solução para cada tipo de processo utilizado nas empresas.

Assim, a proposta apresentada neste trabalho se justifica no fato de ser altamente vantajoso o uso de um controlador capaz de selecionar automaticamente os seus parâmetros e que não exijam ajustes manuais posteriores para a planta, a qual utiliza um modelo de referência determinado a partir de parâmetros de projeto pré-estabelecidos, tais como sobressinal e tempo de estabilização, capazes de descrever as características de entrada/saída desejadas para o processo em malha fechada e determinadas com base em um modelo discreto do sistema a ser controlado, através de informação futura, que ainda não aconteceu, mas que pode ser predita pelo modelo da planta.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo propor o uso de uma nova função critério para o desenvolvimento de um algoritmo, capaz de permitir a determinação automática dos parâmetros do TGPC, incluindo o fator de ponderação do erro quadrático entre o sinal de saída do processo e a saída do modelo, e de ponderação da variação do sinal de controle quadrático, através da utilização de um método de otimização baseado na técnica dos algoritmos genéticos, visando essencialmente a minimização desta função critério proposta.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos a serem alcançados são os seguintes:

- O algoritmo de controle preditivo generalizado com função de pesos variante no tempo tem como princípios básicos manter o tempo computacional e conseguir melhores resultados no que diz respeito ao desempenho, robustez e estabilidade. Logo, para que estes princípios não sejam violados, esta técnica carece de estudos mais profundos, principalmente em relação aos ajustes de seus parâmetros em malha fechada;
- Realização de um estudo detalhado sobre os algoritmos de controle preditivo generalizado com função de pesos variante no tempo, visando enfatizar suas características positivas, e também, dos algoritmos de controle preditivo generalizado, uma vez que ambos utilizam a mesma estratégia preditiva;

- Desenvolvimento de um algoritmo, que mantenha os princípios básicos do TGPC, mas que possa ser empregado para abranger um número maior de tipos de processos de acordo com a nova função critério proposta;
- Aplicação de critérios de desempenho, robustez e estabilidade nos exemplos utilizados, de forma prática, apresentando uma análise do efeito destes critérios nos parâmetros determinados;
- Execução de uma comparação entre os resultados obtidos com o uso da metodologia aplicada ao TGPC e os resultados obtidos através da aplicação desta mesma metodologia aos controladores GPC e PID, destacando as principais vantagens e desvantagens da implementação do TGPC.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com o intuito de atingir todos os objetivos propostos, esta dissertação está organizada de acordo com as seguintes seções.

Na seção 2, é apresentado o algoritmo de controle preditivo generalizado com função de pesos variante no tempo, inclusive, explicitando a estratégia de predição, originada do GPC desenvolvido por Clarke (Clarke, Mohtadi e Tuffs, 1987) e posteriormente estudado por Bitmead (Bitmead, Gevers e Wertz, 1990).

Na seção 3, são abordados todos os conceitos da técnica dos algoritmos genéticos, adaptados de acordo com as formulações estabelecidas para os algoritmos dos controladores TGPC, GPC e PID, aplicados às plantas nas quais a técnica é utilizada.

Na seção 4, o controlador PID é definido em suas formas contínua e discreta, em que esta última é obtida através da aplicação do método trapezoidal ou de Tustin ao modelo no domínio da freqüência, e cujo algoritmo é utilizado na simulação dos exemplos da seção 7.

Na seção 5, são explicitados os critérios de desempenho, robustez e estabilidade, que serão posteriormente aplicados aos exemplos estudados, notadamente para o controlador TGPC.

Na seção 6, a metodologia aplicada é apresentada detalhadamente através de um esquema que mostra todas as etapas realizadas, bem como a forma como foram implementadas, considerando-se as adaptações realizadas de acordo com cada tipo de controlador em estudo.

Na seção 7, são apresentados os resultados da simulação computacional utilizando os controladores TGPC, GPC e PID, obtidos a partir de exemplos de plantas estáveis, instáveis e de fase não mínima, permitindo uma análise comparativa desses três controladores, além da avaliação dos resultados utilizando-se os critérios de desempenho, de robustez e de estabilidade estudados na seção 5.

Por fim, na seção 8 são apresentadas as conclusões gerais deste trabalho, com enfoque nas vantagens e desvantagens da utilização do TGPC, e as perspectivas para trabalhos futuros.

2 O CONTROLADOR TGPC

Com o advento dos algoritmos de controle preditivo, surgiram também diversas áreas de pesquisa, notadamente dirigidas à técnica do GPC, que apesar de ser bastante aceito na indústria, por ser capaz de controlar processos com dinâmicas complexas, tais como, processos com atraso, de fase não mínima e processos instáveis, ainda apresentavam problemas no que diz respeito à garantia de uma boa ação de controle para os casos com grandes não linearidades, parâmetros variáveis e limitações tecnológicas (Camacho e Bordons, 1994).

Dessa forma, o TGPC foi desenvolvido por Gomma (1999), como uma proposta para resolver diversos problemas que surgiram em sistemas que necessitavam de controladores robustos, para os quais a aplicação do GPC tradicional (Clarke, Mohtadi e Tuffs, 1987) não trazia resultados satisfatórios, apesar das melhorias em termos de desempenho estabelecidas nos trabalhos desenvolvidos por Robinson *e* Clarke*,* (1991), Rossiter e Kouvaritakis (1994) e Yoon *e* Clarke (1995). Estes problemas podem ser considerados como sendo: o aumento das dificuldades matemáticas, a falta de eficiência computacional, nenhuma garantia de robustez e estabilidade e as dificuldades para o operador em aplicar e compreender as novas técnicas. O TGPC, então, surgiu como uma alternativa viável para superação de todos estes problemas.

Conforme será visto com mais detalhes nas subseções seguintes, o TGPC possui uma série de elementos comuns a todos os controladores preditivos (Pimenta, 2003):

- O uso de um modelo matemático do processo que permite realizar a predição do comportamento futuro das variáveis controladas sobre um horizonte de predição;
- A otimização de uma determinada função de custo quadrática sobre um horizonte finito, usando predição de erros futuros;
- O estabelecimento de uma referência ou trajetória desejada futura, com o intuito de obter um efeito antecipativo das variáveis controladas;

- A aplicação da lei de controle de acordo com uma estratégia de horizonte móvel, na qual somente o primeiro elemento da seqüência ótima precedente é aplicado ao sistema.

2.1 MODELAGEM DO SISTEMA

A presença de um modelo matemático é uma condição necessária para o desenvolvimento do TGPC, tendo esse modelo um papel decisivo no desempenho do controlador, uma vez que possibilita o cálculo da saída predita em um horizonte finito.

Atualmente, existem na literatura diversas técnicas para modelagem de sistemas de controle lineares, mas quando se trata de sistemas não-lineares o mesmo não acontece, e quando existe alguma técnica para solução de controle não-linear, ela não pode ser aplicada, na prática, de forma genérica devido a sua complexidade e especificidade. Em tal caso, a grande dificuldade reside no fato de que nenhuma formalização genérica está disponível para o tratamento de todos os problemas não-lineares.

Uma solução possível para tal problema é o emprego de aproximações, visto que as soluções exatas para as equações diferenciais não-lineares são raramente obtidas.

Logo, considerando que o algoritmo do TGPC é aplicável tanto para sistemas com entrada única e saída única (SISO) quanto para sistemas com entradas múltiplas e saídas múltiplas (MIMO), pode-se aplicar a técnica de aproximação conhecida por linearização local, que consiste em aproximar localmente o sistema não-linear por um sistema linear, cuja validade se restringe a uma região limitada em torno de um ponto de operação específico, ou seja, em geral, os modelos não-lineares podem ser linearizados em torno de um ponto de operação. Assim, considere um caso SISO descrito pelo modelo expresso na equação (2.1) (Gomma, 2004):

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})u(k-1) + C(q^{-1})\frac{e(k)}{\Delta} \tag{2.1}$$

em que:

$y(k)$	é a saída do sistema,
$u(k)$	é o controle aplicado à entrada do sistema,
q^{-1}	é o operador atraso,
d	é o retardo, em múltiplos do período de amostragem $(d \geq 0)$,
$e(k)$	é um ruído "branco" de média zero e variância σ^2,
$\Delta = 1 - q^{-1}$	é o operador diferença, cuja função é assegurar a ação integral do controlador a fim de cancelar o efeito dos distúrbios da saída degrau.

Os polinômios *A*, *B* e *C* são definidos por:

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \cdots + a_{na} q^{-na} \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \cdots + b_{nb} q^{-nb} \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \cdots + c_{nc} q^{-nc} \end{aligned} \tag{2.2}$$

Por simplicidade o polinômio *C* é escolhido como sendo igual a *1* ou $C(q^{-1})$ é truncado e absorvido pelos polinômios *A* e *B*, e ainda, sem perda de generalidade, pode-se considerar que o sistema não tem atraso, ou seja, *d* é igual a 0 (Gomma, 2004).

O modelo descrito pela equação (2.1) é conhecido como CARIMA (Controlador Auto-Regressivo Integral Média Móvel), que, por permitir a introdução de um integrador na função de transferência, é capaz de anular todo erro em regime permanente comparado com uma referência constante (Bordons, 1994).

O modelo CARIMA é usado geralmente em aplicações industriais em que os distúrbios são não estacionários, conseqüentemente a ação integral é apropriada. Isto conduzirá a um erro de regime nulo, apesar da presença de distúrbios não modelados (Pimenta, 2003), os quais caracterizam-se pela diferença entre o processo físico real e o modelo parametrizado. Com isso a equação (2.1) é reduzida para:

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k-1) + \frac{e(k)}{\Delta} \tag{2.3}$$

2.2 FUNÇÃO CRITÉRIO

A idéia básica do TGPC é encontrar uma seqüência de ações de controle para minimizar a função de custo de múltiplos estágios, de forma a usar uma função de pesos variante no tempo com a habilidade de determinar a importância dos erros futuros e entradas incrementais comparadas às atuais. Quanto maior for a quantidade de sinais futuros considerados, maior será o esforço computacional do algoritmo. Assim, a seguinte função de custo tem importância fundamental (Gomma, 1999):

$$J = \sum_{j=N_1}^{N} \beta(j)\left([\hat{y}(k+j) - r(k+j)]^2 + \lambda(j)[\Delta u(k+j-1)]^2\right) \tag{2.4}$$

em que:

- $\hat{y}(k+j)$ é a saída predita, cujas previsões em instantes futuros são realizadas utilizando as informações disponíveis até o instante k,
- $r(k+j)$ é a trajetória futura de referência,
- Δu é o incremento de controle,
- $N_1 \geq 1$ é o horizonte mínimo de predição,
- N é o horizonte máximo de predição $(N \geq N_1)$, que é igual ao horizonte de controle,
- $\lambda(j) \geq 0$ é a ponderação do sinal de controle, que é escolhida como sendo constante e apresentando a forma $(\lambda(j) = \lambda)$,
- $\beta(j)$ é a função de pesos para penalizar o erro e a seqüência de controle, tendo a seguinte forma $\beta(j) = \beta^{j-1}$ e
- J é a função critério a ser minimizada.

A minimização do critério J é realizada supondo que o sinal de controle a partir do instante $(k + N - 1)$ é mantido constante, ou seja, entre $(k + N)$ e $(k + N - 1)$

o sinal de controle é igual àquele em *(k + N – 1)*. Isso significa que os incrementos do sinal de controle após o instante *(k + N – 1)*, isto é *Δu(k + N)*, *Δu(k + N + 1)*, ..., são nulos. Esse problema é normalmente resolvido a partir da aplicação de uma identidade polinomial, conhecida por equação diofantina, para separar, em cada instante de amostragem, as parcelas livre e forçada da previsão futura da saída do sistema (Camacho e Bordons, 2004).

2.3 SAÍDA PREDITA

A estratégia de horizonte preditivo consiste em considerar, no instante atual *k*, o comportamento futuro, utilizando explicitamente um modelo matemático do sistema com a finalidade de predizer a saída futura, $\hat{y}(k+j\,|\,k)$, sobre um horizonte *N*, chamado horizonte preditivo. O objetivo desta estratégia é, portanto, fazer coincidir a saída predita da planta, $\hat{y}(k+j\,|\,k)$, com a referência *r(k)*, supostamente conhecida, em um futuro, num horizonte finito, Pimenta (2003), como mostrado na Figura 1.

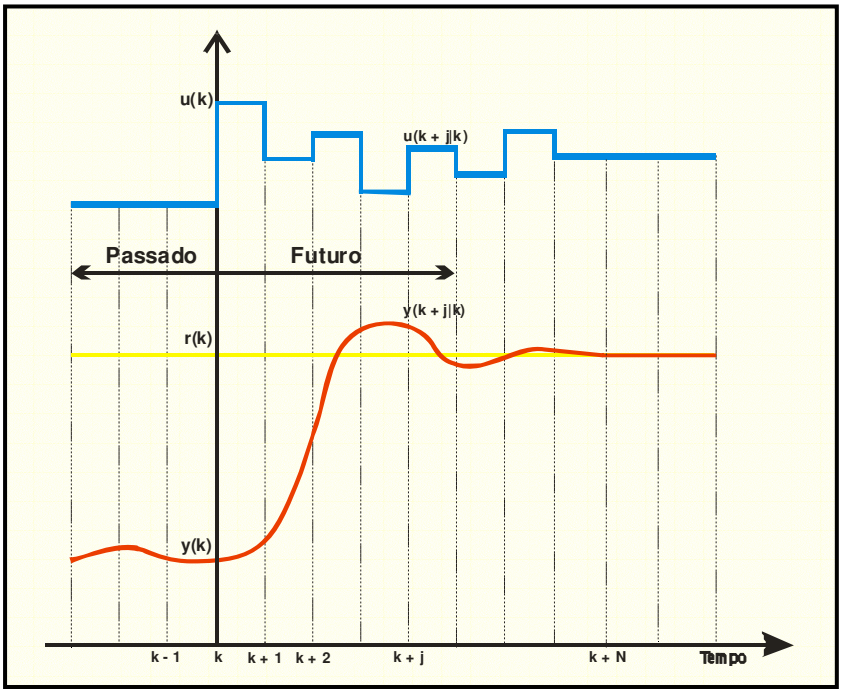

Figura 1 – Estratégia de horizonte preditivo

Visando resolver o problema de minimização da equação (2.4), deve-se fazer a previsão da saída j passos a frente, $\hat{y}(k+j\,|\,k)$ para $j = N_1,..., N$, baseada nas informações conhecidas no instante k e nos valores futuros do controle incremental (Fontes, 2002). Esta previsão envolve o uso da seguinte equação:

$$1 = E_j(q^{-1})\tilde{A}(q^{-1}) + q^{-j}F_j(q^{-1}) \tag{2.5}$$

conhecida por equação diofantina, onde $\tilde{A}(q^{-1}) = \Delta A(q^{-1})$.

Os polinômios E_j e F_j são determinados de forma única e possuem grau $(j-1)$ e na, respectivamente. Eles podem ser obtidos dividindo-se 1 por $\tilde{A}(q^{-1})$ até que o resto desta divisão possa ser fatorado como $q^{-j}F_j(q^{-1})$. O quociente da divisão será $E_j(q^{-1})$ (Fontes, 2002).

Multiplicando-se cada lado da equação (2.3) por $q^j\Delta E_j(q^{-1})$, obtém-se:

$$\begin{aligned} A(q^{-1})\Delta E_j(q^{-1})q^j y(k) &= B(q^{-1})\Delta E_j(q^{-1})q^j u(k-1) + \frac{e(k)\Delta E_j(q^{-1})q^j}{\Delta} \\ \tilde{A}(q^{-1})E_j(q^{-1})y(k+j) &= B(q^{-1})E_j(q^{-1})\Delta u(k+j-1) + E_j(q^{-1})e(k+j) \end{aligned} \tag{2.6}$$

Mas, pela equação (2.5), $E_j(q^{-1})\tilde{A}(q^{-1}) = 1 - q^{-j}F_j(q^{-1})$, que substituindo na equação (2.6), conduz a:

$$y(k+j) = F_j(q^{-1})y(k) + E_j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(k+j-1) + E_j(q^{-1})e(k+j) \tag{2.7}$$

Como o grau do polinômio $E_j(q^{-1})$ é igual a $j-1$, os termos do ruído são todos no futuro, logo a melhor predição é dada por:

$$\hat{y}(k+j) = G_j(q^{-1})\Delta u(k+j-1) + F_j(q^{-1})y(k) \tag{2.8}$$

sendo G_j determinada por:

$$G_j(q^{-1}) = E_j(q^{-1})B(q^{-1})$$

De (2.8), as saídas preditas ótimas podem ser indicadas como:

$$\begin{aligned}
\hat{y}(k+1) &= G_1 \Delta u(k) + F_1 y(k) \\
\hat{y}(k+2) &= G_2 \Delta u(k+1) + F_2 y(k) \\
&\vdots \\
\hat{y}(k+N) &= G_N \Delta u(k+N) + F_N y(k)
\end{aligned} \tag{2.9}$$

que pode ser escrita como:

$$y = Gu + F(q^{-1})y(k) + G'(q^{-1})\Delta u(k-1) \tag{2.10}$$

Uma característica típica dos controladores preditivos é o emprego dos conceitos de resposta livre e forçada (Fontes, 2002). A idéia é expressar a resposta em função da soma destas duas parcelas:

$$y = Gu + f \tag{2.11}$$

em que,

Gu é a resposta forçada, obtida devido a consideração das condições iniciais nulas, no instante *k*, e sujeita à seqüência de ações de controle futuras, e

f é a resposta livre devido à resposta natural do sistema a partir das condições atuais, considerando-se uma seqüência de ações de controle futura igual a zero, a partir do instante *k*.

e,

$$y = \left[\hat{y}(k+1) \quad \hat{y}(k+2) \quad \cdots \quad \hat{y}(k+N)\right]^T \tag{2.12}$$

$$u = \left[\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \cdots \quad \Delta u(k+N-1)\right]$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_1 & g_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \cdots & g_0 \end{bmatrix}, \quad F(q^{-1}) = \begin{bmatrix} F_1(q^{-1}) \\ F_2(q^{-1}) \\ \vdots \\ F_N(q^{-1}) \end{bmatrix}$$

$$G'(q^{-1}) = \begin{bmatrix} (G_1(q^{-1}) - g_0)q \\ (G_2(q^{-1}) - g_0 - g_1 q^{-1})q^2 \\ \vdots \\ (G_N(q^{-1}) - g_0 - g_1 q^{-1} - \cdots - g_{N-1} q^{-(N-1)})q^N \end{bmatrix}$$

Assim a função critério em (2.4) pode ser escrita como:

$$J = (Gu + f - r)^T B(Gu + f - r) + \lambda B u^T u \tag{2.13}$$

com:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \beta & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \beta^{N-1} \end{pmatrix}$$

2.4 LEI DE CONTROLE

Aplicando-se a condição necessária para otimalidade, que consiste em derivar parcialmente a equação (2.13) em relação a *u* (Gomma, 1999), tem-se:

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 2uG^T BG + 2G^T B(f - r) + 2\lambda B u = 0$$

Assim, os incrementos do controle projetado são obtidos da seguinte forma:

$$u = (G^T BG + \lambda B)^{-1} G^T B(r - f) \tag{2.14}$$

em que *G* contém os coeficientes da resposta ao degrau e *f* contém os coeficientes da resposta ao impulso.

No cálculo da matriz *u* é utilizada a estratégia conhecida por estratégia de horizonte móvel, a qual estabelece que os demais elementos de *u*, a partir do segundo, serão desprezados, pois, no instante de tempo seguinte todas as

seqüências de controle são atualizadas e o procedimento completo é repetido (Camacho, Berenguel e Rubio, 1997).

Assim, considerando que somente o primeiro elemento, $\Delta u(k)$, da matriz u será aplicado ao sistema e repetido em cada período de amostragem, então:

$$u(k) = u(k-1) + K(r - f) \tag{2.15}$$

e,

$r = [r(k+1) \quad r(k+2) \quad \cdots \quad r(k+N)]^T$, é o vetor da referência pré-estabelecida,

K é a primeira linha da matriz $(G^T BG + \lambda B)^{-1} G^T B$.

Pode-se observar da equação (2.15) que a solução do TGPC envolve a inversa de uma matriz N x N, que requer uma quantidade substancial de esforço computacional como no GPC (Clarke, Mohtadi e Tuffs, 1987). Entretanto, Gomma (1999) mostrou a eficiência de introduzir β para reduzir esta computação e manter a otimalidade elevada para o algoritmo. Por outro lado, vale a pena ressaltar que ajustar β para 1 resulta no GPC.

3 ALGORITMOS GENÉTICOS

Uma grande classe de problemas relevantes de otimização não possui algoritmos conhecidos que sejam rápidos e eficientes na sua solução. Em algumas aplicações, uma solução próxima do ótimo é aceitável se puder ser computada com razoável rapidez. Uma possível abordagem na busca de tais soluções é utilizar um algoritmo probabilístico que, dado um tempo suficiente, pode encontrar soluções aceitáveis.

Algoritmos genéticos (AG) são uma classe de algoritmos probabilísticos que, a partir de uma população inicial de soluções candidatas, "evoluem" em direção a melhores soluções aplicando operadores modelados em processos genéticos que ocorrem na natureza. Algoritmos genéticos diferem dos algoritmos de busca mais tradicionais (por exemplo, descida na direção do gradiente, "*simulated annealing*", etc.), pois sua busca é conduzida usando a informação de uma população de estruturas, em vez de uma única estrutura. A motivação para essa abordagem é que, considerando várias estruturas como soluções potenciais, o risco da busca chegar a um mínimo local é bastante reduzido (Soares, 1997).

A utilização de algoritmos genéticos na solução de problemas de otimização tem mostrado que estes, embora não necessariamente encontrem soluções ótimas para o problema, são capazes de encontrar boas soluções para problemas que são resistentes a outras técnicas conhecidas (Coelho, 2003).

Os algoritmos genéticos são técnicas de busca que utilizam procedimentos iterativos que simulam o processo de evolução de uma população de possíveis soluções de um determinado problema. O processo de evolução é aleatório, porém, guiado por um mecanismo de seleção baseado na adaptação de estruturas individuais. A cada iteração do algoritmo (uma geração), um novo conjunto de estruturas é criado através da troca de informações (genes ou blocos) entre estruturas bem adaptadas selecionadas da geração anterior. Novas estruturas são obtidas aleatoriamente com uma dada probabilidade e incluídas na população. O resultado tende a ser um aumento da adaptação de indivíduos ao meio, podendo acarretar também em um aumento global da aptidão da população a cada nova

geração (Garrido, 1999). Neste caso, a população evolui a cada geração se aproximando de uma solução ótima.

3.1 UM BREVE HISTÓRICO

Até meados do século 19, os naturalistas acreditavam que cada espécie havia sido criada separadamente por um ser supremo ou através de geração espontânea. O trabalho do naturalista *Carolus Linnaeus* sobre a classificação biológica de organismos despertou o interesse pela similaridade entre certas espécies, levando a acreditar na existência de uma certa relação entre elas. Outros trabalhos influenciaram os naturalistas em direção à teoria da seleção natural, tais como os de *Jean Baptiste Lamark*, que sugeriu uma teoria evolucionária baseada no "uso e desuso" de órgãos; e de *Thomas Robert Malthus*, que propôs que fatores ambientais tais como doenças e carência de alimentos, limitavam o crescimento de uma população (Soares, 1997).

Depois de mais de 20 anos de observações e experimentos, *Charles Darwin* apresentou em 1858 sua teoria de evolução através de seleção natural, simultaneamente com outro naturalista inglês *Alfred Russel Wallace*. No ano seguinte, *Darwin* publica *On the Origin of Species by Means of Natural Selection* com a sua teoria completa, sustentada por muitas evidências colhidas durante suas viagens a bordo do *Beagle*. Este trabalho influenciou muito o futuro não apenas da Biologia, Botânica e Zoologia, mas também teve grande influência sobre o pensamento religioso, filosófico, político e econômico da época (Schnell, 2001).

Por volta de 1900, o trabalho de *Gregor Mendel*, desenvolvido em 1865, sobre os princípios básicos de herança genética, foi redescoberto pelos cientistas e teve grande influência sobre os futuros trabalhos relacionados à evolução. A moderna teoria da evolução combina a genética e as idéias de *Darwin* e *Wallace* sobre a seleção natural, criando o princípio básico de Genética Populacional: a variabilidade entre indivíduos em uma população de organismos que se reproduzem sexualmente é produzida pela mutação e pela recombinação genética. Este princípio foi

desenvolvido durante os anos 30 e 40, por biólogos e matemáticos de importantes centros de pesquisa (Sobrinho e Girardi, 2004).

Entre os anos 50 e 60, vários cientistas da computação estudaram sistemas evolucionários com a idéia de que a evolução poderia ser usada como uma ferramenta de otimização para problemas na engenharia. Os sistemas desenvolvidos pretendiam gerar uma população de candidatos à solução para um dado problema (Coelho, 2003).

Os Algoritmos Genéticos foram inventados por *John Holland* nos anos 60 e desenvolvidos por seus alunos na Universidade de *Michigan* em meados de 1970. O principal objetivo de *Holland* não foi desenvolver algoritmos para solucionar problemas específicos, mas dedicar-se ao estudo formal do fenômeno de evolução, como ocorre na natureza, e desenvolver maneiras de utilizá-lo nos sistemas de computação (Sobrinho e Girardi, 2003).

John Holland, em meados dos anos 70, acreditou que as peculiaridades da Evolução Natural poderiam ser implementadas de forma algorítmica a fim de alcançar uma versão computacional dos processos de evolução.

3.2 PARÂMETROS GENÉTICOS

É importante analisar de que maneira alguns parâmetros influenciam o comportamento dos algoritmos genéticos, para que se possa estabelecê-los conforme as necessidades do problema e dos recursos disponíveis (Pinheiro,1998). A seguir, são listados alguns parâmetros genéticos utilizados freqüentemente:

3.2.1 Tamanho da População

O tamanho da população determina o número de cromossomos na população, afetando diretamente o desempenho global e a eficiência dos AG's. Com

uma população pequena, o desempenho pode cair, pois deste modo a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras (tendência da população a evoluir para uma solução não ótima devido a existência de um individuo com aptidão muito superior às demais aptidões) (Castro, 2001). No entanto, para se trabalhar com grandes populações, são necessários maiores recursos computacionais ou que o algoritmo trabalhe por um período de tempo muito maior.

3.2.2 Taxa de Cruzamento

Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Mas se esta for muito alta, a maior parte da população será substituída, e pode ocorrer perda de estruturas de alta aptidão. Com um valor baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento (Castro, 2001).

3.2.3 Tipo de Cruzamento

O tipo de cruzamento a ser utilizado determina a forma como se procederá a troca de segmentos de informação entre os "casais" de cromossomos selecionados para cruzamento. O ideal seria testar diversos tipos de cruzamento em conjunto com as outras configurações do AG para verificar qual apresenta um melhor resultado (Castro, 2001).

3.2.4 Taxa de Mutação

A taxa de mutação determina a probabilidade em que uma mutação ocorrerá. Mutação é utilizada para introduzir novas informações na população e também para

prevenir que a população se sature com cromossomos semelhantes (convergência prematura). Uma baixa taxa de mutação previne que uma dada posição fique estagnada em um valor. Com uma taxa muito alta a busca se torna essencialmente aleatória além de aumentar muito a possibilidade de que uma boa solução seja destruída. A melhor taxa de mutação é dependente da aplicação, mas, para a maioria dos casos está entre 0,001 e 0,1 (Castro, 2001).

3.3 ETAPAS DOS ALGORÍTMOS GENÉTICOS

A Figura 2 apresenta as etapas do algoritmo genético para a resolução do problema de otimização descrito neste trabalho.

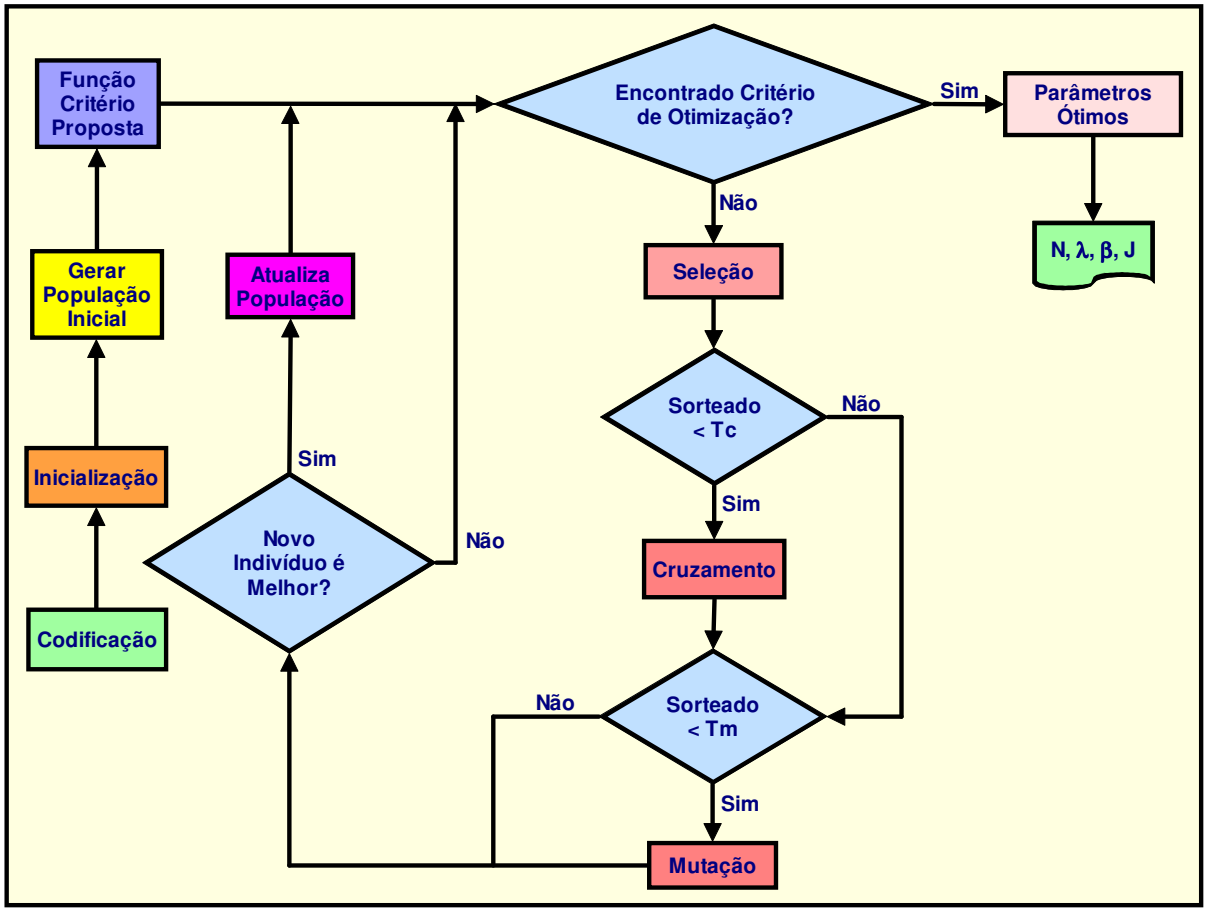

Figura 2 – Etapas básicas de um AG para a resolução de um problema de otimização.

3.3.1 Codificação

Um algoritmo genético processa populações de cromossomos (Castro, 2001). Neste trabalho cada cromossomo é representado por um vetor de inteiros, que representa uma possível solução para o problema em estudo. O conjunto de todas as configurações que o cromossomo pode assumir forma o seu espaço de busca.

	Cromossomo								
Genes	**4**	**1**	**3**	**8**	**5**	**4**	**9**	**2**	**1**
Posição	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**

Figura 3 – Exemplo de cromossomo do algoritmo.

Cada seqüência de valores corresponde a um cromossomo, e cada elemento do cromossomo é equivalente a um gene. O gene da posição 1 representa o valor da variável *N*, que é o horizonte de predição. Os genes das posições 2 a 5 representam o valor do fator λ e os genes das posições 6 a 9 correspondem a variável β. No exemplo da Figura 3, os valores para cada variável seriam, então, calculados a partir da função que calcula o valor dos parâmetros e neste caso, retornaria N = 4, λ = 1,385 e β = 4,921.

3.3.2 Inicialização

A inicialização consiste na definição dos parâmetros do algoritmo genético (Castro, 2001), tais como: tamanho da população, probabilidade de cruzamento, probabilidade de mutação, tolerância e critério de parada, que para o algoritmo em estudo, estes valores foram estabelecidos, respectivamente, iguais a: 60, 80%, 5%, 10^{-7} e 1000.

3.3.3 Geração da População Inicial

Após a definição da representação do cromossomo para o problema, gera-se um conjunto de possíveis soluções, chamadas de soluções candidatas (Castro, 2001). No problema em questão, a população inicial é gerada randomicamente utilizando-se a função apropriada do MATLAB®.

3.3.4 Função Critério Proposta

Os algoritmos genéticos utilizam a informação do valor de uma função critério (Castro, 2001), função objetivo ou função de avaliação da aptidão dos indivíduos da população, que corresponde ao foco principal deste trabalho, e está sendo proposta através da equação (3.1).

$$J = \sum_{k=1}^{NA} [a(y(k) - y_d(k))^2 + b(\Delta u(k))^2] \tag{3.1}$$

em que, *a* e *b* são parâmetros a serem determinados de acordo com a aplicação da metodologia proposta e que será vista em detalhes na seção 6.

A função critério fornece a cada individuo uma medida de quão bem adaptado ao meio ambiente ele está, ou seja, quanto menor o valor da função critério, maiores são as chances do individuo sobreviver no ambiente e reproduzir-se, passando parte de seu material genético a gerações posteriores.

3.3.5 Operadores Genéticos

A utilização dos operadores genéticos tem a finalidade de modificar a população, por meio de sucessivas gerações. Busca-se, com isso, uma população

diversificada e que mantenha as características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores (Schnell, 2001).

O algoritmo genético evolui através de três operadores básicos: seleção, que realiza o processo de adaptabilidade e sobrevivência; cruzamento, que representa o acasalamento entre os indivíduos; e mutação, que introduz modificações aleatórias.

3.3.5.1 Operador de Seleção

O mecanismo de seleção em algoritmos genéticos emula o processo de seleção natural (Schnell, 2001). Neste trabalho, a seleção é feita a partir da obtenção de dois pais e duas mães, escolhidos randomicamente, que serão submetidos à função critério e calculados os valores das respectivas aptidões. A aptidão do Pai_1 é comparada a do Pai_2 e a aptidão da $Mãe_1$ a da $Mãe_2$, o melhor pai e a melhor mãe são então selecionados.

Nesse processo, indivíduos com baixa adequabilidade terão alta probabilidade de desaparecerem da população, enquanto que indivíduos adequados terão grande chance de sobreviverem.

3.3.5.2 Operador de Cruzamento

O cruzamento é considerado o primeiro fator que distingue o algoritmo genético de outras técnicas de otimização. O funcionamento deste processo se dá através de uma operação de cruzamento e recombinação (Schnell, 2001). A compreensão deste operador se resume nos seguintes fatores:

- Escolhem-se dois indivíduos para fazer o cruzamento usando o operador de seleção, originando um casal de pais;
- Escolhe-se também, aleatoriamente, um ponto de quebra para o cruzamento ao longo do cromossomo.

No caso em estudo, o cruzamento possui um parâmetro denominado probabilidade de cruzamento, que consiste em um percentual da população (80%) a cruzar.

Após a identificação do melhor pai e da melhor mãe pelo operador de seleção, o casal é submetido a probabilidade de cruzamento, caso seja escolhido, será definido randomicamente o ponto de quebra do cromossomo. A Figura 4 ilustra este procedimento.

Em seguida, os filhos sofrem um processo de verificação da possibilidade de existência, em que cada cromossomo é verificado para saber se atende às restrições estabelecidas para cada parâmetro, caso não atenda outro ponto de quebra é selecionado para garantir que todos os parâmetros sejam representados atendendo aos critérios de restrições impostos para cada um deles.

Os cromossomos filhos são submetidos à função critério para determinar qual deles possui a melhor aptidão, para somente após isso ser escolhido o melhor.

Cromossomos

Pai	4	3	4	6	0	7	5	3	9
Mãe	3	9	6	1	2	4	7	0	5

Ponto de quebra sorteado: 5

Filho	4	3	4	6	0	4	7	0	5
Filha	3	9	6	1	2	7	5	3	9

Figura 4 – Exemplo de cruzamento sobre um ponto de quebra.

3.3.5.3 Operador de Mutação

A finalidade do operador de mutação é garantir a diversidade dos indivíduos dentro da população e impedir as convergências prematuras para valores ótimos locais (Schnell, 2001). A Figura 5 mostra o funcionamento do operador de mutação

para o caso em estudo. Esta operação possui um parâmetro denominado probabilidade de mutação, que se refere a um percentual aplicado ao total da população (5%). Os genes a serem mutados são escolhidos aleatoriamente, e após este processo, o cromossomo é submetido a rotina de verificação de atendimento às restrições do valor dos parâmetros do TGPC.

Cromossomo

Antes	5	4	6	0	7	5	3	9	8

Genes sorteados para mutação: 3 e 6

Depois	5	4	5	0	7	6	3	9	8

Figura 5 – Exemplo de mutação.

Se o cromossomo não estiver em conformidade com as restrições impostas a cada parâmetro do TGPC, outros genes serão sorteados até ser encontrado um cromossomo que atenda às restrições estabelecidas para cada parâmetro do controlador.

Em seguida, o cromossomo mutado é avaliado através da função critério para cálculo de sua aptidão.

3.3.6 Atualização da População

A atualização da população é realizada através do cálculo da aptidão do cromossomo após a aplicação do operador de mutação. Esta aptidão é comparada com o valor da pior aptidão de todos os cromossomos existentes na população. Se o novo cromossomo é melhor que o pior cromossomo existente na população, então o pior cromossomo é eliminado para dar espaço ao novo cromossomo obtido.

3.3.7 Critérios de Otimização ou Parada

Existem vários critérios de parada para os algoritmos genéticos. Alguns são relacionados a seguir:

- Quando o algoritmo genético atingir um dado número de gerações, interromper o processamento;
- Se o valor ótimo da função objetivo é conhecido, o critério de parada é a chegada a este valor durante o processamento;
- Convergência, isto é, quando não ocorrer redução na aptidão do cromossomo de menor aptidão por um dado número de gerações;
- Convergência a um mesmo valor, quando todos os cromossomos apresentarem a mesma aptidão, ou, quando a diferença entre o melhor cromossomo e a média de todos os cromossomos for menor ou igual a uma tolerância ε.

Neste trabalho, serão utilizados os critérios da convergência a um mesmo valor ou quando a execução do algoritmo atingir o número de iterações máximo previamente estabelecido.

4 O CONTROLADOR PID

Os controladores PID são as técnicas de controle mais utilizadas na indústria. Porém, apesar de sua grande aplicação, é possível fazer uma pesquisa por este tema e deparar-se com mais de uma definição deste algoritmo. Assim, Åström e Wittenmark (1989), definiram que o algoritmo de controle PID possui a seguinte forma:

$$u(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{\tau_i}\int_0^t e(t)dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right) \tag{4.1}$$

em que:

$u(t)$ é a variável de controle,

$e(t)$ é o erro definido como $e(t) = r(t) - y(t)$,

$y(t)$ é o valor medido da saída do processo,

$r(t)$ é o valor de referência (*setpoint*),

K_p é o ganho proporcional,

τ_i é a constante de tempo integral,

τ_d é a constante de tempo derivativo.

Na equação (4.1) K_p, τ_i e τ_d são os parâmetros do controlador, os quais quando sintonizados adequadamente proporcionam um bom comportamento dinâmico ao processo controlado (Marcolla, 2005). A Figura 6 ilustra o diagrama deste controlador.

O sinal de controle $u(t)$, do controlador PID, surge como conseqüência da soma das três ações básicas de controle: proporcional, integral e derivativa, cujos efeitos são conhecidos há várias décadas e que serão descritos nas subseções seguintes (Tacconi et al, 2005).

4.1 DESCRIÇÃO DO CONTROLADOR PID

A atuação de um controlador PID pode ser decomposta em três componentes que são a ação Proporcional (P), a ação Integral (I) e a ação Derivativa (D). A Figura 6 apresenta cada uma destas três componentes e, em seguida, estas ações são descritas sucintamente.

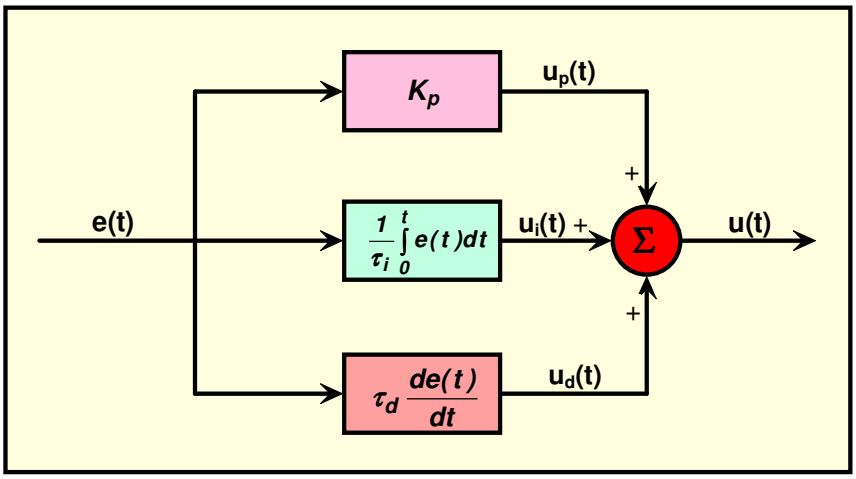

Figura 6 – Diagrama de blocos do controlador PID.

4.1.1 Ação Proporcional

Neste tipo de ação o sinal de controle aplicado a cada instante à planta é proporcional à amplitude do valor do sinal de erro:

$$u_p(t) = K_p e(t) \tag{4.2}$$

Assim, se em um dado instante, o valor da saída do processo é menor (maior) que o valor da referência, $e(t) > 0$ ($e(t) < 0$), o controle a ser aplicado será positivo (negativo) e proporcional ao módulo de $e(t)$.

Nesta ação, quanto maior o ganho K_p menor o erro em regime permanente, isto é, melhor a precisão do sistema em malha fechada. Este erro pode ser diminuído com o aumento do ganho, entretanto nunca será possível anular completamente o erro. Por outro lado, quanto maior o ganho, mais oscilatório tende a ficar o comportamento transitório do sistema em malha fechada. Na maioria dos processos físicos, o aumento excessivo do ganho proporcional pode levar o sistema à instabilidade (Caon Júnior, 1999).

A função de transferência da ação proporcional é dada por:

$$G_{cp}(s) = \frac{U_p(s)}{E(s)} = K_p \tag{4.3}$$

4.1.2 Ação Integral

A ação de controle integral consiste em aplicar um sinal de controle *u(t)* proporcional à integral do sinal *e(t)*:

$$u_i(t) = \frac{K_p}{\tau_i} \int_0^t e(t)dt \tag{4.4}$$

A ação integral tem assim uma função "armazenadora de energia". Se a partir de um determinado tempo *t* o erro é igual a zero, *e(t) = 0*, o sinal de controle *u(t)* será mantido em um valor constante proporcional à "energia armazenada" até o instante *t*. Este fato permitirá, no sistema em malha fechada, obter o seguimento de uma referência com erro nulo em regime permanente, pois a ação integral garantirá a aplicação ao processo de um sinal de controle constante de forma a ter-se *r(t) = y(t)*, *e(t) = 0* (Caon Júnior, 1999).

A função de transferência da ação integral é dada por:

$$G_{ci}(s) = \frac{U_i(s)}{E(s)} = \frac{K_p}{\tau_i s} \tag{4.5}$$

Assim sendo, sob um ponto de vista matemático, a ação integral permite aumentar o tipo do sistema, ou seja, a nova função de transferência em malha aberta será dada por $G_c(s)G(s)$ e possuirá um pólo a mais na origem, fato este que permite obter-se erro nulo em regime permanente a determinadas referências do tipo $1/s^p$. Pelo mesmo raciocínio, a utilização de uma ação integral possibilitará a rejeição assintótica de certas perturbações de carga na saída do processo do tipo $1/s^p$ (Caon Júnior, 1999).

4.1.3 Ação Derivativa

Esta ação corresponde à aplicação de um sinal de controle proporcional à derivada do sinal de erro:

$$u_d(t) = K_p \tau_d \frac{de(t)}{dt} \tag{4.6}$$

A função de transferência desta ação é dada por:

$$G_{cd}(s) = \frac{U_d(s)}{E(s)} = K_p \tau_d s \tag{4.7}$$

A função de transferência, descrita em (4.7), implica em um ganho que cresce com o aumento da freqüência, fato este que deixaria o sistema extremamente sensível a ruídos de alta freqüência. Além do mais a implementação analógica de um derivador puro é fisicamente impossível. Por estes motivos a implementação da ação derivativa dá-se com a introdução de um pólo em alta freqüência que tem justamente a finalidade de limitar o ganho em alta freqüência (Åström e Wittenmark, 1997). A função de transferência torna-se então:

$$G_{cd}(s) = \frac{U_d(s)}{E(s)} = \frac{K_p \tau_d s}{\frac{\tau_d}{\eta} s + 1} \tag{4.8}$$

com o valor de η escolhido entre $3 \leq \eta \leq 20$, sendo normalmente utilizado $\eta = 10$, sem perda de generalidade. Dessa forma, o ganho em baixas freqüências é praticamente mantido, mas em altas freqüências é limitado a $K_p\eta$ (Åström e Wittenmark, 1997).

A derivada de uma função está relacionada intuitivamente com a tendência de variação desta função em um determinado instante de tempo. Assim, aplicar como controle um sinal proporcional à derivada do sinal de erro é equivalente a aplicar uma ação baseada na tendência de evolução do erro. A ação derivativa é então dita antecipatória ou preditiva e tende a fazer com que o sistema reaja mais rapidamente (Åström e Wittenmark, 1997). Este fato faz com que a ação derivativa seja utilizada para obter respostas transitórias mais rápidas, ou seja, para melhorar o comportamento dinâmico do sistema em malha fechada.

Portanto, a equação (4.1) constitui a versão clássica do controlador PID, embora existam outras versões e variações, mas a filosofia de funcionamento, a partir da combinação dos efeitos das três ações básicas, descritas nas seções anteriores, é a mesma, conforme se pode observar na Tabela 1, o resumo do efeito de cada uma dessas ações de controle (Åström e Wittenmark, 1997).

Tabela 1 – Relação entre a ação e o efeito das parcelas que compõem o PID

Ação	**Efeito**
Proporcional	O erro é multiplicado por uma constante K_p e somado à entrada. K_p só é válida em regiões em que a saída do controlador é proporcional ao erro do sistema, ou seja, quanto maior a banda proporcional mais difícil será de ocorrer a saturação do sinal de controle.
Integral	O erro é integrado por um período de tempo, multiplicado por uma constante K_p/τ_i e posteriormente somado à entrada. Isto é feito com o objetivo de se considerar valores passados, além de reduzir a oscilação causada pela predominância da ação integral sobre a proporcional.
Derivativa	A primeira derivada do erro no tempo é calculada. Este valor é então multiplicado por uma constante $K_p\tau_d$ e somado à entrada. Isto é feito para se levar em conta valores futuros, além de aumentar a velocidade da resposta do sistema de controle em relação às saídas do sistema.

4.1.4 O Controlador PID Discreto

Após a aplicação da transformada de Laplace à equação (4.1), considerando-se as alterações feitas na ação derivativa, conforme apresentado na equação (4.8), a ação total de controle do PID é obtida da seguinte forma:

$$U(s) = K_p \left(E(s) + \frac{E(s)}{\tau_i s} + \frac{\tau_d s}{\frac{\tau_d}{\eta} s + 1} E(s) \right) \tag{4.9}$$

e a função de transferência do controlador PID pode ser obtida através da soma dos termos apresentados nas equações (4.3), (4.5) e (4.8), que resulta:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \frac{\tau_d s}{\frac{\tau_d}{\eta} s + 1} \right) \tag{4.10}$$

A função de transferência (4.10) pode ser expressa em termos de uma equação diferencial, que por sua vez pode ser transformada em uma equação à diferenças, cuja solução seja uma aproximação da solução da equação diferencial, a qual poderia ser escrita por uma integral. Dessa forma, deve-se buscar uma maneira de calcular esta integral usando, por exemplo, as aproximações numéricas mais conhecidas, quais sejam: *backward*, que consiste em um retângulo para trás na representação da área; *forward* ou fórmula de Euller, que aproxima a área por um retângulo para frente, e a aproximação trapezoidal, de *Tustin* ou bilinear, que aproxima a área por um trapézio, sendo assim, equivalente à média aritmética das duas primeiras (Barczak, 1994).

Assim, para que um controlador PID possa ser implementado em um computador, ele deve ser convertido para sua forma digital e, uma maneira bastante comum de fazer isso é através da discretização do controlador, ou seja, usar uma das aproximações numéricas descritas para realizar esta tarefa (Barczak, 1994).

Portanto, neste trabalho, será utilizada a aproximação de *Tustin*, uma vez que é o método que mais se aproxima de uma relação exata entre os planos *s* e *z* (Balton, 1995). Além de permitir o mapeamento de um controlador contínuo estável para um controlador discreto estável, e isto é feito através da substituição de *s* na equação (4.10) por:

$$s = \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1} \tag{4.11}$$

Como se pode observar na Figura 7, a aproximação trapezoidal ou de Tustin comprime a região estável do plano s dentro do círculo unitário do plano z. Logo, este método apresenta as seguintes características: todos os sistemas analógicos estáveis são convertidos em equivalentes digitais estáveis; não exigem fatorização da função de transferência; e preserva tanto a resposta ao impulso quanto a resposta em freqüência (Balton, 1995).

Assim, a ação proporcional $u_p(s)$ é discretizada diretamente substituindo a variável contínua por sua versão discreta, ou seja:

$$u_p(k) = K_p e(k) \tag{4.12}$$

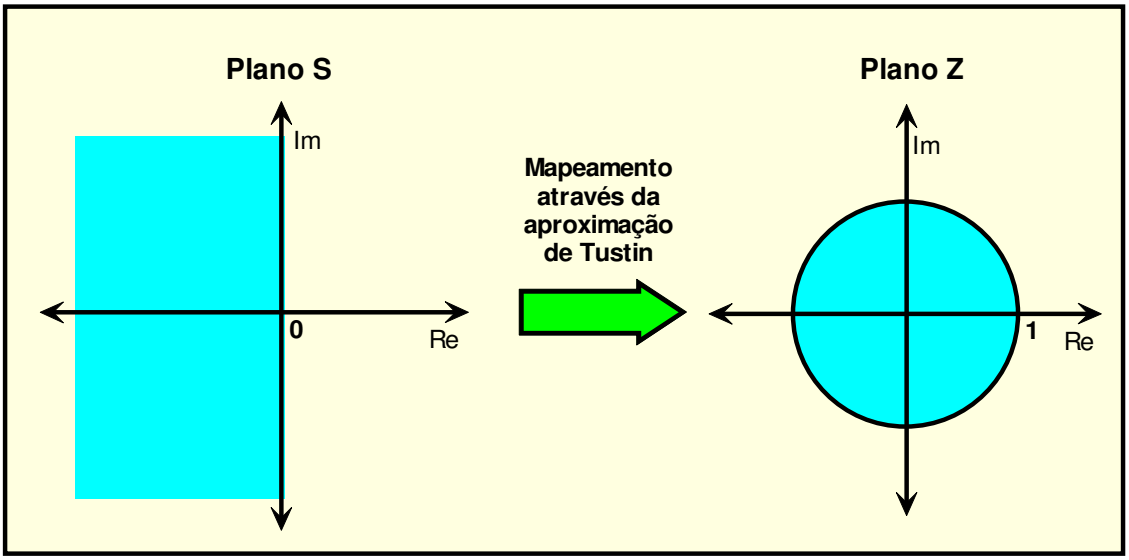

Figura 7 – Mapeamento usando o método de aproximação trapezoidal ou Tustin

A ação integral é discretizada substituindo-se a equação (4.11) na equação (4.5), que após alguns cálculos, resulta:

$$u_i(k) = u_i(k-1) + \frac{K_p T}{2\tau_i}(e(k) + e(k-1)) \tag{4.13}$$

A discretização da ação derivativa filtrada utilizando-se a aproximação de Tustin é feita substituindo-se a equação (4.11) na equação (4.8), que conduz a:

$$u_d(k) = u_d(k-1)\frac{2\tau_d - \eta T}{2\tau_d + \eta T} + \frac{2\eta K_p \tau_d}{2\tau_d + \eta T}(e(k) - e(k-1)) \tag{4.14}$$

em que T é o período de amostragem e,

$$e(k) = r(k) - y(k) \tag{4.15}$$

em que *e(k)* é o erro atual, e

$$e(k-1) = r(k) - y(k-1) \tag{4.16}$$

em que *e(k – 1)* é o erro no instante anterior.

A ação total de controle para o controlador PID discreto é determinada somando-se cada uma das parcelas definidas pelas equações (4.12), (4.13) e (4.14), da seguinte forma, conforme mostrado na Figura 6:

$$u(k) = u_p(k) + u_i(k) + u_d(k) \tag{4.17}$$

Assim, a função de transferência discreta do controlador PID é obtida através da substituição da equação (4.11) na equação (4.10), que efetuando os cálculos necessários e, em seguida agrupando os termos comuns e fazendo as devidas simplificações com base na introdução das variáveis α_0, α_1, α_2, β_0, β_1 e β_2, têm-se:

$$G_c(z) = \frac{\alpha_0 z^2 + \alpha_1 z + \alpha_2}{\beta_0 z^2 + \beta_1 z + \beta_2} \tag{4.18}$$

em que:

$$\alpha_0 = K_p(4\tau_i\tau_d + 2\eta T^2\tau_i + 2T\tau_d + \eta T^3 + 4\eta\tau_i\tau_d)$$

$$\alpha_1 = K_P(-8\tau_i\tau_d + 2\eta T^3 - 8\eta\tau_i\tau_d)$$

$$\alpha_2 = K_p(4\tau_i\tau_d - 2\eta T^2\tau_i - 2T\tau_d + \eta T^3 + 4\eta\tau_i\tau_d)$$

$$\beta_0 = 4\tau_i\tau_d + 2\eta T\tau_i$$

$$\beta_1 = -8\tau_i\tau_d$$

$$\beta_2 = 4\tau_i\tau_d - 2\eta T\tau_i$$

4.1.5 Implementação do PID Discreto

Visando realizar a sintonia ótima do controlador PID, a simulação foi realizada através da implementação do esquema da Figura 8.

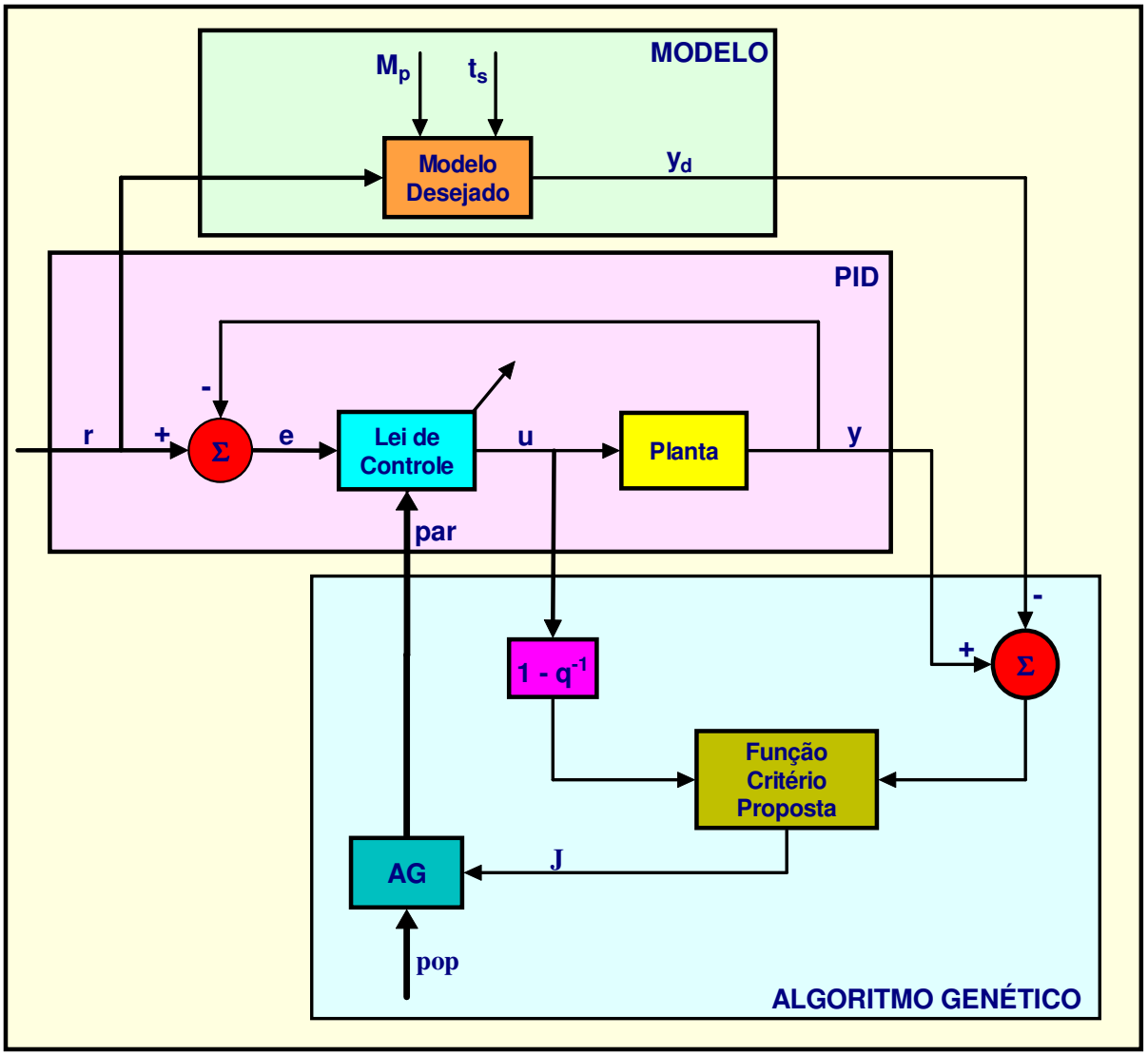

Figura 8 – Esquema geral da metodologia aplicada ao PID

Para as simulações do PID utilizando-se a técnica dos algoritmos genéticos no ambiente MATLAB®, é necessária a definição dos diversos elementos que controlam o processo de evolução, tais como:

- Tamanho da população: constante e formada por 60 cromossomos e cada cromossomo possui 12 genes, que contém números inteiros que podem variar de 0 a 9. A exceção deve ser feita quando todos os valores sorteados forem iguais a zero, uma vez que os genes não podem conter, simultaneamente, somente valores zeros para evitar a inaplicabilidade da técnica;
- Tolerância aceitável: $\varepsilon < 10^{-7}$;
- Número máximo de iterações: 1000;
- Melhor aptidão inicial: 500;
- Tipo de seleção: escolha aleatória de quatro indivíduos da população, sendo dois pais e duas mães, que serão submetidos à função de aptidão para descobrir que casal é melhor. O melhor casal será retornado pela função de seleção;
- Tipo de cruzamento: a técnica de cruzamento implementada é conhecida por cruzamento em um ponto e consiste no seguinte: o casal retornado pela função de seleção será submetido à taxa de cruzamento e se forem selecionados gerarão dois filhos, a partir de um ponto de cruzamento escolhido aleatoriamente, em que a primeira parte do melhor pai unir-se-á à segunda parte da melhor mãe formando o filho e a primeira parte da melhor mãe unir-se-á à segunda parte do melhor pai para formar a filha, sendo ambos submetidos à função de aptidão, retornando o melhor indivíduo através da função de cruzamento;
- Taxa de cruzamento: 80% (oitenta pontos percentuais);
- Tipo de mutação: o melhor filho retornado do cruzamento é submetido à taxa de probabilidade de mutação; caso seja escolhido, é feito o sorteio de dois genes diferentes para serem trocados de posição no cromossomo, retornando o novo indivíduo através da função de mutação;
- Taxa de mutação: 5% (cinco pontos percentuais);
- Espaço de busca de K_p, τ_i e τ_d: 0,001 a 9,999.

5 ASPECTOS DE ESTABILIDADE DO TGPC

Processos complexos podem, em alguns casos, ser controlados de maneira satisfatória através da utilização de controladores que usam modelos apropriados. O TGPC, em estudo neste trabalho, utiliza o modelo CARIMA para representar as dinâmicas da planta. Este modelo não retrata perfeitamente a dinâmica dos processos reais, logo, torna-se necessário o estudo dos aspectos de desempenho, robustez e estabilidade do TGPC.

Entretanto, a idéia básica do controlador TGPC é a utilização de uma função de pesos variante no tempo com a finalidade de reduzir o esforço computacional e melhorar o desempenho, e para isso, usa a função critério J e os índices ISE e ITAE calculados a partir da integral do erro quadrático conforme definido em Gomma (1999 e 2001) e da integral do tempo vezes o valor absoluto do erro como mostrado em Vasconcelos (2007).

Outro problema fundamental é a estabilidade da solução. Ainda que o algoritmo de minimização encontre a solução ótima, este fato não garante a estabilidade em malha fechada do sistema, mesmo que o modelo seja considerado perfeito. Este problema tem sido abordado de diferentes maneiras, mas, neste trabalho, será analisado sob o ponto de vista da aplicação de três teoremas descritos em Gomma (2004) e através do estudo do lugar das raízes das equações características das plantas implementadas.

O estudo da estabilidade do TGPC já é considerado bastante complicado, portanto, algo bem mais difícil de ser abordado é a análise da robustez. Entretanto, neste trabalho serão estudadas duas técnicas pelas quais a robustez pode ser garantida. A primeira, considera a variação dos parâmetros de projeto do modelo nominal e a segunda, acrescenta uma parcela correspondente ao ruído gaussiano no sinal de saída da planta. Assim, a análise é feita estudando-se as incertezas estruturadas, conforme estabelecido em Camacho e Bordons (2004).

5.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO

Com vistas a uma melhor análise do desempenho dos sistemas estudados, tornam-se necessárias medidas quantitativas para avaliação destes sistemas de controle. No TGPC, devido aos numerosos parâmetros de projeto, uma medida quantitativa tal como índice de desempenho é uma técnica essencial para enfatizar o desempenho do sistema de acordo com as especificações desejadas dos processos.

O sistema projetado é considerado um sistema de controle ótimo quando os parâmetros de projeto são selecionados de modo que o índice alcance um valor mínimo. O índice conveniente de desempenho deve ser um número que seja sempre positivo ou zero. Então o melhor sistema é definido como aquele capaz de minimizar tal índice.

Nesta subseção serão considerados dois índices de desempenho a serem aplicados aos exemplos implementados neste trabalho e utilizados, posteriormente, para fins de comparação com os resultados obtidos pela minimização da função critério estabelecida na metodologia estudada na seção 6. O primeiro refere-se à integral do erro quadrático (ISE) e o segundo, à integral do tempo vezes o valor absoluto do erro (ITAE).

Os efeitos dos parâmetros de projeto no desempenho dos sistemas analisados são apresentados na seção 7.

5.1.1 Integral do Erro Quadrático

Um índice bastante apropriado de desempenho é a integral do erro quadrático (ISE) (Gomma, 1999 e 2001), que é definido como:

$$ISE = \int_0^{T_f} e^2(t)dt \tag{5.1}$$

em que T_f é um tempo finito escolhido como sendo maior que o tempo de subida e em torno do tempo de estabilização, e *e(t)* é o erro do sistema que é a diferença

entre a medida da saída *y(t)* e a referência *r(t)* que é escolhida como sendo o degrau unitário.

O critério ISE é muito utilizado devido à facilidade de ser computado, além de proporcionar grandes ponderações para erros grandes e pequenas ponderações para erros pequenos. No entanto, ele apresenta pouca seletividade, uma vez que geralmente as variações nos parâmetros do processo correspondem a pequenas variações no índice ISE, quando este índice é utilizado como critério de minimização de sistemas (Silva, 2005). Nestes casos, estes sistemas tendem a apresentar uma rápida resposta, mas com baixa estabilidade relativa, apresentando oscilações.

O índice ISE pode ser estimado matematicamente da simulação usando a fórmula discreta da seguinte maneira:

$$ISE = \sum_{k=1}^{NA} (y(k) - r(k))^2 \tag{5.2}$$

em que *y(k)* é a saída discreta da planta, *r(k)* a referência discreta e *NA* o número total de amostras do experimento.

5.1.2 Integral do Tempo Vezes o Valor Absoluto do Erro

O índice de desempenho ITAE (integral do tempo vezes o valor absoluto do erro) é definido como:

$$ITAE = \int_0^{T_f} t|e(t)|dt \tag{5.3}$$

em que T_f é um tempo finito escolhido como sendo maior que o tempo de subida e em torno do tempo de estabilização, *t* é o período de tempo, e |*e(t)*| é o valor absoluto do erro do sistema que é a diferença entre a medida da saída *y(t)* e a referência *r(t)* que é escolhida como sendo o degrau unitário.

O comportamento da resposta transitória possui características de desempenho desejadas de um processo especificadas em termos de grandezas no domínio do tempo. Entende-se por resposta transitória aquela que vai do estado

inicial ao estado estacionário ou permanente de um sistema de controle. Essa resposta depende das condições iniciais do sistema. Para a comparação de respostas transitórias de várias configurações da malha de controle, costuma-se considerar inicialmente o sistema em repouso. A resposta transitória de um sistema de controle, na prática, geralmente apresenta oscilações amortecidas antes de alcançar o estado ou regime estacionário (Vasconcelos, 2007). Nesse contexto, o critério ITAE é indicado para reduzir a contribuição exagerada nos primeiros instantes e enfatizar o erro presente na resposta em regime. Assim, a integral do tempo vezes o valor absoluto do erro é o critério de desempenho que melhor concilia propriedades de desempenho e robustez.

O índice de desempenho ITAE pode ainda ser definido, em sua forma discreta pela equação (5.4) e utilizado nas simulações implementadas, da seguinte maneira:

$$ITAE = \sum_{k=1}^{NA} k\left|y(k) - r(k)\right| \tag{5.4}$$

em que *k* é o período de tempo discreto, *y(k)* é a saída discreta da planta, *r(k)* a referência discreta e *NA* o número total de amostras do experimento.

5.2 ANÁLISE DA ROBUSTEZ

Os processos existentes na natureza são incorporados às pesquisas científicas e às indústrias através da elaboração de modelos matemáticos, que possam representá-los de forma satisfatória, porém, com certas simplificações aceitáveis diante da necessidade da automação dos processos. E isso ocorre, basicamente, porque na prática não existem modelos matemáticos capazes de descrever com precisão um processo físico, fazendo com que os controladores sejam projetados com base na informação aproximada sobre o comportamento dinâmico da planta em estudo.

Independentemente da técnica utilizada, sempre deverão ser considerados os erros de modelagem e como estas incertezas podem afetar o comportamento do sistema controlado. Conseqüentemente, é conveniente projetar um controlador, que

possa tratar com o maior valor possível destas incertezas e que forneça desempenho e estabilidade aceitáveis, ou seja, devem-se buscar formas de verificar se o modelo é insensível a estas incertezas e assim, caracterizá-lo como sistema robusto (Gomma, 1999). Esta seção apresenta uma análise global da robustez para a nova técnica do TGPC, com base no estudo das incertezas estruturadas.

Inicialmente, é conveniente diferenciar as duas classes distintas de incertezas do modelo: incertezas estruturadas, que serão o objeto principal na aplicação do critério de robustez estudado neste trabalho, e incertezas não estruturadas (Gomma, 1999):

- Incertezas estruturadas: este tipo trata com a investigação das incertezas possíveis nos parâmetros que definem o processo sem alterar sua ordem, em que a estrutura do modelo é a mesma que a do processo, mas com desvios nos parâmetros em relação aos reais.
- Incertezas não estruturadas: são erros residuais dominantes em altas freqüências, em que o tamanho do seu limite superior pode ser estimado em função da freqüência. Neste trabalho, este tipo de incerteza não será considerado, sendo definido apenas para fins informativos.

No entanto, com relação às incertezas estruturadas, será realizada a implementação dos controladores TGPC, GPC e PID, levando-se em conta variações paramétricas e a inserção de ruído do tipo gaussiano nas plantas estável, instável e de fase não mínima, selecionadas para estudo e análise.

Há pelo menos duas razões que tornam a robustez uma característica desejável nos sistemas de controle:

- a necessidade de que os sistemas de controle funcionem satisfatoriamente, mesmo em condições de operação distintas das consideradas no modelo de projeto;
- a possibilidade de se adotar um modelo de projeto intencionalmente simplificado, reduzindo o tempo gasto na etapa de modelagem e a complexidade do controlador resultante.

Logo, para considerar as incertezas estruturadas, deve-se supor que o comportamento dinâmico de um determinado processo seja descrito não por um

modelo linear invariante no tempo, mas por uma família de modelos lineares (Camacho e Bordons, 2004). Assim o processo real (G_r) estará em uma vizinhança do processo nominal (G), e pode ser definido da seguinte forma:

$$G_r(q^{-1}) = G(q^{-1}) + \Gamma(q^{-1}) \tag{5.5}$$

em que,

$G_r(q^{-1})$ é a função de transferência discreta do processo real,

$G(q^{-1})$ é a função de transferência discreta do modelo nominal, e

$\Gamma(q^{-1})$ é a parcela correspondente à incerteza estruturada.

Uma das técnicas mais utilizadas no projeto de controladores robustos é a consideração das incertezas nos parâmetros da função de transferência do modelo nominal do processo, existindo também, inúmeras maneiras de determinar essas incertezas (Santos, 1998).

A forma utilizada, neste trabalho, refere-se à aplicação de fatores ρ_i e γ_j, em que i = 1,..., na e j = 0,..., nb, sendo *na* e *nb* os graus dos polinômios A e B, conforme definido nas equações (2.2). Assim, a equação (5.5) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Gamma(q^{-1}) = G_r(q^{-1}) - G(q^{-1}) \tag{5.6}$$

em que,

$$G_r(q^{-1}) = \frac{q^{-1}B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{\gamma_0 b_0 q^{-1} + \gamma_1 b_1 q^{-2} + ... + \gamma_{nb} b_{nb} q^{-nb}}{1 + \rho_1 a_1 q^{-1} + \rho_2 a_2 q^{-2} + ... + \rho_{na} a_{na} q^{-na}} \tag{5.7}$$

e,

$$G(q^{-1}) = \frac{q^{-1}B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{b_0 q^{-1} + b_1 q^{-2} + ... + b_{nb} q^{-nb}}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + ... + a_{na} q^{-na}} \tag{5.8}$$

Os valores dos fatores ρ_i e γ_j expressos na equação (5.7) são determinados randomicamente com uma variação de ±20% dos valores dos parâmetros expressos na equação (5.8).

5.3 ANÁLISE DA ESTABILIDADE

Conforme mostrado em Gomma (2001) o TGPC obteve resultados muito bons e forneceu melhorias significativas em termos de desempenho e robustez. Para apresentar uma teoria consolidada para o algoritmo de TGPC, maior atenção deve ser dada aos parâmetros ajustáveis (N, λ e β) desta técnica. A idéia principal é como usar os resultados obtidos de uma maneira eficaz e adaptá-los ao TGPC. A principal dificuldade a ser discutida é devido ao fato de que o horizonte de predição e o horizonte de controle são iguais. Isto conduz a uma matriz quadrada (N x N) que é mais complicada de ser tratada, devido à necessidade do cálculo de sua inversa, conforme se constata na equação (2.13).

Assim, condições especiais serão estudadas para confirmar o cálculo dos resultados matemáticos que serão obtidos na seção 7, com base nos seguintes teoremas:

- **Teorema 1:** *Suponha que* $(N - N_1 + 1) = N$, $\lambda = 0$ *e* $\beta > 0$, *em que N corresponde ao horizonte de predição, então o sistema de malha fechada é estável e as estratégias de controle tendem a lei do deadbeat* (Gomma, 2004).

Prova: Da equação (2.13), a lei de controle pode ser escrita como:

$$u = \underbrace{(G^T BG)^{-1} G^T B}_{L}(r - f) \tag{5.9}$$

Para quaisquer matrizes quadradas G e B, tal que $G^T BG$ seja não-singular, então:

$$L = (G^T BG)^{-1} G^T B = G^{-1} \tag{5.10}$$

em que a matriz G consiste na resposta ao degrau da planta (g_i), conforme equação (2.12). Assim, a lei de controle pode ser dada na seguinte forma:

$$g_1^N \Delta u(k) = g_1^{N-1}\left(r(k+1) - f(k+1)\right) \tag{5.11}$$

Suponha que a trajetória de referência seja constante sobre o horizonte de predição, então a equação (5.10) pode ser escrita como:

$$g_1 \Delta u(k) = \sum_{i=2}^{\infty} g_i \Delta u(k+1-i) + r \tag{5.12}$$

que pode ser escrita por:

$$\Delta u(k) = \frac{r}{g_1 + \sum_{i=2}^{\infty} g_i q^{1-i}} \tag{5.13}$$

Lembrando que a função de transferência do sistema é:

$$y(k) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k) \tag{5.14}$$

Conseqüentemente, substituindo a equação (5.13) na equação (5.14) conduz ao seguinte sistema de malha fechada:

$$y(k) = \frac{B(q^{-1})r}{A(q^{-1})\Delta\left(g_1 + \sum_{i=2}^{\infty} g_i q^{1-i}\right)} \tag{5.15}$$

Da equação (5.15), obtém-se a equação característica que pode ser escrita por:

$$\frac{H(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \Delta\left(g_1 + \sum_{i=2}^{\infty} g_i q^{1-i}\right) = g_1 + (g_2 - g_1)q^{-1} + (g_3 - g_2)q^{-2} + \cdots \tag{5.16}$$

Mas, a resposta ao degrau pode ser expressa por:

$$y(k) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(k-i) \tag{5.17}$$

Logo, a relação entre a resposta ao degrau e a função de transferência da planta pode ser escrita como:

$$\frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = g_1 q^{-1} + (g_2 - g_1)q^{-2} + (g_3 - g_2)q^{-3} + \cdots \tag{5.18}$$

Mas, da equação (5.16), a equação característica de malha fechada pode ser escrita da forma:

$$\frac{H(q^{-1})}{A(q^{-1})} = g_1 + (g_2 - g_1)q^{-1} + (g_3 - g_2)q^{-2} + \cdots \tag{5.19}$$

Então, comparando-se as equações (5.18) e (5.19), pode ser encontrado que:

$$H(q^{-1})(q^{-1}) = B(q^{-1}) \tag{5.20}$$

Recordando que a função de transferência de malha fechada pode ser expressa pela equação (5.15) e substituindo a equação (5.20) em (5.15), tem-se:

$$y(k) = \frac{1}{q} r(k) \tag{5.21}$$

Portanto, os pólos de malha fechada mover-se-ão para a origem e resultará em um controle *deadbeat* estável, que completa a prova.

Observação: Neste teorema, devido ao cancelamento dos zeros e pólos, deve-se mencionar que em um projeto real, um erro poderia ocorrer e por essa razão não produziria um controlador *deadbeat* de malha fechada. Isso se deve ao fato de que novas condições, tais como as previstas em Yoon e Clarke (1995), que podem garantir a estabilidade, nesta e em circunstâncias similares deveriam ser consideradas.

- **Teorema 2:** *Suponha que um sistema de malha aberta estável tem uma resposta ao degrau monotônica* (Gomma, 2004)*, isto é,*

$$0 \leq g_1 \leq g_2 \leq \ldots g_k \leq \ldots \leq g_\infty \tag{5.22}$$

Se $N_1 = 1$, $N = (N - N_1 + 1) = N$, $\lambda = 0$, $\beta > 0$ e $g_1 > g_\infty / 2$, então o sistema de malha fechada é estável.

Prova: Recordando que a equação característica (5.15) pode ser escrita como segue:

$$\frac{H(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \Delta\left(g_1 + \sum_{i=2}^{\infty} g_i q^{1-i}\right) = (1 - q^{-1})\left(g_1 + \sum_{i=2}^{\infty} g_i q^{1-i}\right) \tag{5.23}$$

Assim, o polinômio característico pode ser simplificado da seguinte forma:

$$\frac{H(q^{-1})}{A(q^{-1})} = g_1 + \sum_{i=2}^{\infty} g_i q^{1-i} - g_1 q^{-1} - \sum_{i=2}^{\infty} g_i q^{-i} \tag{5.24}$$

Considerando que a equação (5.24) pode ser definida como:

$$\frac{H(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \sum_{i=0}^{\infty} g_{i+1} q^{-i} - \sum_{i=1}^{\infty} g_i q^{-i} \tag{5.25}$$

Então, a equação (5.25) pode ser expressa por:

$$\frac{H(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \delta_1 + \sum_{i=1}^{\infty} (\delta_{i+1} - \delta_i) q^{-i} \tag{5.26}$$

Do teorema de *Rouché* (Anexo A), como *A* é estável, na equação (5.19) para todas as raízes mantidas dentro do círculo unitário é suficiente que:

$$|\delta_1| > \sum_{i=1}^{\infty} |(\delta_{i+1} - \delta_i)| \tag{5.27}$$

ou que:

$$|g_1| > |(g_2 - g_1)| + |(g_3 - g_2)| + |(g_4 - g_3)| + \cdots \tag{5.28}$$

Como todos os termos no somatório são positivos, assim a equação (5.28) pode ser escrita pela desigualdade:

$$g_1 > (g_\infty - g_1) \tag{5.29}$$

ou alternativamente:

$$g_1 > \frac{g_\infty}{2} \tag{5.30}$$

que completa a prova.

- **Teorema 3:** *Se o sistema de malha aberta é estável e tem resposta ao degrau convexa tal que* $g_1 > (g_2 - g_1) > (g_3 - g_2) > ... > 0$*, então se* $N_1 = 1$*,* $(N - N_1 + 1) = N$*,* $\lambda = 0$ *e* $\beta > 0$*, o sistema de malha fechada é estável* (Gomma, 2004).

Prova: Conforme a equação (5.19), o polinômio característico pode ser definido da seguinte forma:

$$\frac{H(q^{-1})}{A(q^{-1})} = g_1 + (g_2 - g_1)z^{-1} + (g_3 - g_2)z^{-2} + \cdots \tag{5.31}$$

Assim, da condição de suficiência estabelecida pelo teorema de *Rouché* (Anexo A), o sistema de malha fechada será estável se:

$$g_1 > (g_2 - g_1) > (g_3 - g_2) > \cdots > 0 \tag{5.32}$$

que completa a prova.

Observação: é importante observar que muitos sistemas tais como as turbinas de gás têm uma resposta ao degrau convexa. Portanto, a parte mais significativa dos teoremas apresentados é que têm uma importância muito grande na estabilidade do TGPC tal como mostram as novas condições suficientes em que o sistema pode ser estável quando $(N - N_1 + 1) = N = N \geq 1$. Além disso, deve-se observar que quando os citados teoremas são aplicados aos sistemas com atraso (d), o horizonte mínimo de predição (N_1) pode ser escolhido como $N_1 = d + 1$ (Gomma, 2004).

6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS DO TGPC

Nesta seção é apresentada a sistemática aplicada para a determinação dos parâmetros ótimos do TGPC, conforme ilustrado na Figura 9.

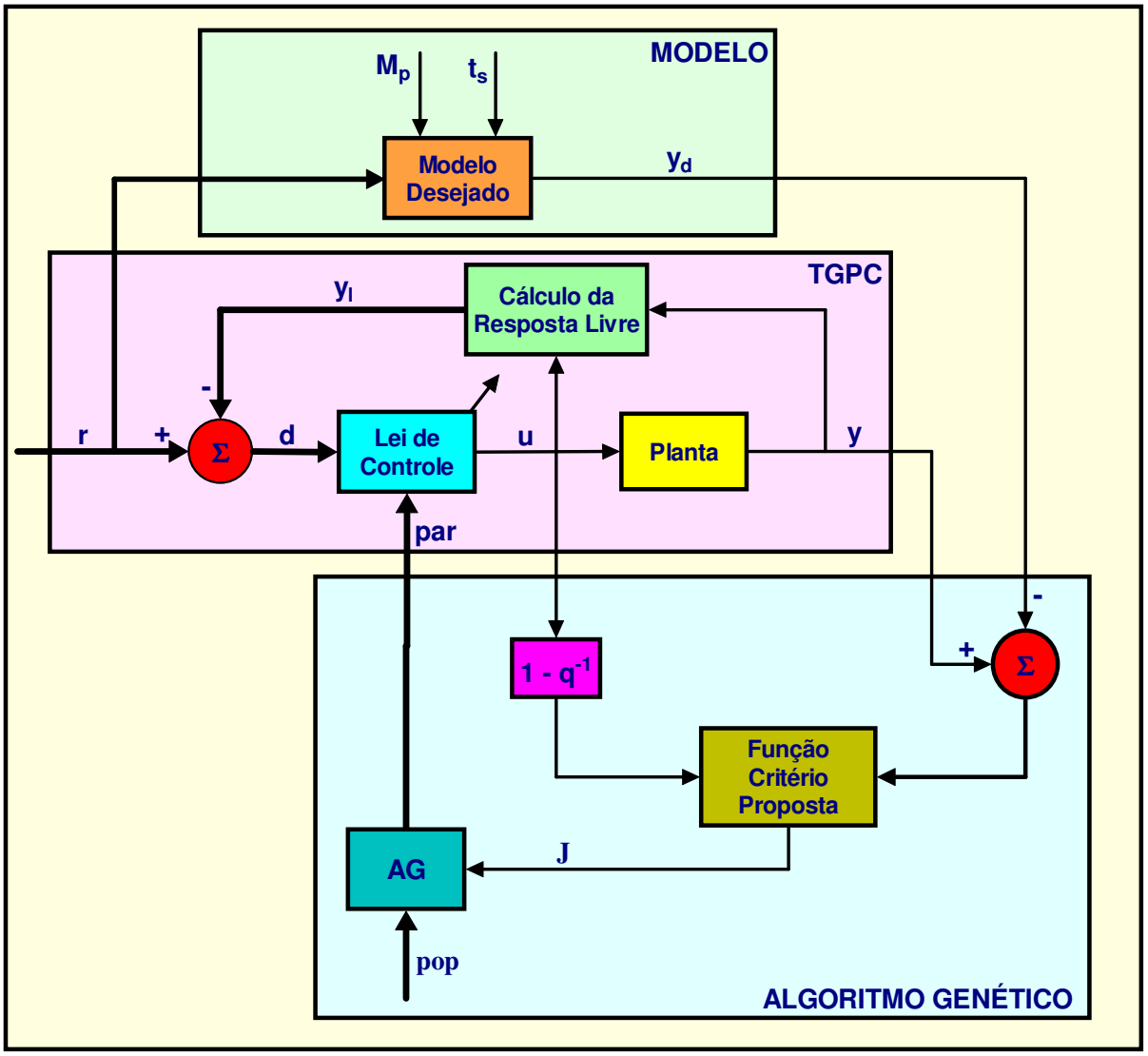

Figura 9 – Esquema geral da sistemática aplicada ao TGPC.

A sistemática mostrada na Figura 9 é necessária para implementação dos algoritmos, considerando as alterações realizadas pela introdução de uma função critério capaz de penalizar o erro quadrático entre a saída da planta e a saída do modelo, bem como a variação quadrática do sinal de controle, fornecendo assim subsídios para a simulação computacional, que será apresentada na seção 7 deste trabalho.

Além disso, a Figura 9 ilustra o esquema geral da metodologia aplicada, na qual são mostrados o esquema específico para o cálculo do modelo, o esquema do TGPC implementado e o otimizador utilizado, com ênfase dada à função critério usada, inicialmente, para determinação dos parâmetros considerados na penalização do erro e na variação do sinal de controle e que serão descritos detalhadamente nas seções subseqüentes.

6.1 CÁLCULO DO MODELO DE SEGUNDA ORDEM

Inicialmente, é feita a determinação de um modelo de segunda ordem, a partir de parâmetros de projeto previamente estabelecidos, conforme exemplificado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de projeto

Parâmetros	**Valor**
Máximo Sobressinal	$M_p < 5\%$
Tempo de Estabilização (2%)	$t_s < 2s$

Os valores estabelecidos na Tabela 2 permitem calcular a função de transferência do modelo desejado através da aplicação das equações (6.1) e (6.2):

$$M_p = e^{-\left(\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)} \tag{6.1}$$

$$t_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \tag{6.2}$$

De acordo com Ogata (1995) a forma-padrão para a função de transferência de um sistema de segunda ordem, em função de ξ e ω_n, é dada por:

$$M(s) = \frac{Y_d(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{6.3}$$

em que, $M(s)$ é a função de transferência de malha fechada do modelo desejado, $Y_d(s)$ é a saída desejada, $R(s)$ a referência de entrada, ξ é o coeficiente de amortecimento do sistema e ω_n é a freqüência natural.

6.2 ALGORITMO GENÉTICO

6.2.1 Modelagem

Cada cromossomo contém, em seus genes, números inteiros que podem variar de 0 a 9, exceto nas seguintes situações:

- O gene 1, que contém o valor do horizonte de predição e controle *N*, não pode conter valor menor ou igual a ordem da função de transferência da planta;
- Os genes 2 a 9 não podem conter, simultaneamente, somente valores zeros, uma vez que, para o TGPC é necessário que os valores de λ e β sejam diferentes de zero;
- O gene 6, só poderá conter o valor um se pelo menos um dos genes 7 a 9 forem diferentes de zero, pois conforme o disposto na seção 2, se β for igual a 1 resulta no GPC.

A solução ótima, embora desconhecida, em razão da impossibilidade de a saída da planta ser exatamente igual à saída do modelo desejado, bem como devido à ponderação da variação do sinal de controle, será aquela cuja aptidão mais se aproximar do valor zero (mínimo global).

Elementos estabelecidos de acordo com as características do problema a solucionar:

- Tamanho da população: constante e formada por 60 cromossomos e cada cromossomo possui 9 genes;
- Tolerância aceitável: $\varepsilon < 10^{-7}$;

- Número máximo de iterações: 1000;
- Melhor aptidão inicial: 500;
- Tipo de seleção: escolha aleatória de quatro indivíduos da população, sendo dois pais e duas mães, que serão submetidos à função de aptidão para descobrir que casal é melhor. O melhor casal será retornado pela função de seleção;
- Tipo de cruzamento: a técnica de cruzamento implementada é conhecida por cruzamento em um ponto e consiste no seguinte: o casal retornado pela função de seleção será submetido à taxa de cruzamento e se forem selecionados gerarão dois filhos, a partir de um ponto de cruzamento escolhido aleatoriamente, em que a primeira parte do melhor pai unir-se-á à segunda parte da melhor mãe formando o filho e a primeira parte da melhor mãe unir-se-á a segunda parte do melhor pai para formar a filha, sendo ambos submetidos à função de aptidão, retornando o melhor indivíduo através da função de cruzamento;
- Taxa de cruzamento: 80% (oitenta pontos percentuais);
- Tipo de mutação: o melhor filho retornado do cruzamento é submetido à taxa de probabilidade de mutação, caso seja escolhido, é feito o sorteio de dois genes diferentes para serem trocados de posição no cromossomo, retornando o novo indivíduo através da função de mutação;
- Taxa de mutação: 5% (cinco pontos percentuais);
- Espaço de busca de N, λ e β: ordem da planta mais 1 até 9, para N e 0,001 a 9,999, para λ e β;
- Para o GPC, foram considerados os mesmos elementos estabelecidos para o TGPC, com exceção do valor de β, que foi considerado igual a 1.

6.2.2 Implementação do TGPC e GPC

O algoritmo genético implementado possui as seguintes características: após a geração da população, são selecionados quatro indivíduos, que serão submetidos à taxa de cruzamento. Se forem sorteados, serão realizados os procedimentos necessários ao cruzamento e ao final, será retornado o melhor elemento, senão, o melhor elemento dos quatro sorteados será retornado e em ambas situações, o indivíduo resultante será submetido à taxa de mutação. Novamente, se for sorteado, será aplicado o procedimento de mutação, senão o indivíduo será avaliado com o intuito de ser integrado à população.

```
Algoritmo Genético para Determinação dos Parâmetros Ótimos do TGPC
   Gerar a população inicial P de cromossomos
   Calcular a aptidão dos individuos na população P através da função critério proposta
   Repita
       Selecionar dois individuos para cruzamento
       Se probabilidade de cruzamento sorteada < pc
           Aplicar o operador de cruzamento
           Calcular a aptidão dos individuos gerados
        Senão
           Calcular a aptidão dos individuos selecionados
       Fim-se
       Escolher o melhor individuo
       Se probabilidade de mutação sorteada < pm
           Aplicar o operador de mutação
           Calcular a aptidão do individuo gerado
       Fim_se
       Se individuo escolhido ou gerado é melhor que o pior da população
           Eliminar o pior individuo da população
           Inserir o novo individuo na população
        Fim_se
        Calcular a aptidão do individuo escolhido ou gerado
       Se melhor_aptidão > aptidão
           Fazer melhor_aptidão = aptidão
        Fim_se
       Repita
           Calcular a aptidão de todos os individuos da população
           Somar a aptidão de todos os indivudos da população
       Fim_repita
       Calcular aptidão_média através da soma da aptidão de todos os indivudos, dividida pela população
       Se melhor_aptidão - aptidão_média < ε
           Número_maximo_iterações igual ao máximo permitido
       Fim_se
   Até que número_maximo_iterações seja atingido
   Imprimir individuo solução
Fim
```

Figura 10 – Estrutura do algoritmo genético implementado.

Apenas um indivíduo é inserido por vez na população inicial, e somente após ser avaliado para obtenção do valor da aptidão. O novo indivíduo será incluído na população em substituição ao pior elemento existente no momento da inserção. Caso o novo cromossomo seja pior que todos os já existentes, então, nada é alterado e procede-se a uma nova seleção de indivíduos.

O procedimento é repetido até que ocorra a convergência para um único valor da aptidão ou o número máximo de iterações permitidas seja atingido.

A implementação do algoritmo genético foi feita através do uso do ambiente MATLAB® versão 6 para Windows. A Figura 10 apresenta a estrutura do algoritmo implementado.

6.2.3 Parâmetros da Função Critério Proposta

A função critério proposta, utilizada pelo algoritmo genético para determinação dos parâmetros ótimos dos controladores TGPC, GPC e PID, é implementada a partir da minimização da equação (6.4), como segue:

$$J_{min} = \sum_{k=1}^{NA} [a(y(k) - y_d(k))^2 + b(\Delta u(k))^2] \tag{6.4}$$

em que:

$y(k)$ é a saída da planta,

$y_d(k)$ é a saída desejada,

$\Delta u(k)$ é o incremento de controle,

NA é o número total de amostras da simulação,

$a \geq 0$ é a ponderação do erro quadrático entre a saída da planta e a saída desejada,

$b \geq 0$ é a ponderação da variação da seqüência de controle quadrática, e

J_{min} é o valor da aptidão de cada cromossomo.

Os parâmetros *a* e *b* correspondem aos valores percentuais estabelecidos de acordo com as características do projeto e conforme as necessidades das aplicações nas quais a metodologia será aplicada, sendo assim, constituem dados que deverão ser fornecidos pelo projetista.

A seleção dos parâmetros *a* e *b* pode ser feita, inclusive, considerando-se *a* igual a α, e este escolhido entre 0 e 1 e, *b* como sendo igual a $(1 - \alpha)$. Embora, esta escolha não esteja necessariamente condicionada a estes critérios, uma vez que o projetista pode ter a liberdade de estabelecer tais parâmetros, em função do tipo de planta a ser controlada e, à ponderação que deseja aplicar ao erro quadrático entre a saída da planta e a saída do modelo utilizado, bem como à ponderação da variação quadrática do sinal de controle.

Portanto, para que seja dada prioridade à semelhança entre a saída da planta e a do modelo, o valor do parâmetro *a* deverá ser elevado, situação que ocorre quando se utiliza, por exemplo, a planta estável, ao passo que se a prioridade estiver na redução ou eliminação da saturação do sinal de controle, então o parâmetro *b* é que deve ser elevado e, neste caso, a adoção deste critério à planta de fase não mínima, caracteriza um exemplo típico.

6.3 TGPC

A partir da escolha dos parâmetros *a* e *b* da função critério proposta, definidos conforme especificado na subseção 6.2.3, o algoritmo genético é utilizado para a obtenção dos melhores parâmetros (N, λ e β) do TGPC, para as plantas utilizadas como exemplos, conforme será mostrado na seção 7.

O esquema apresentado na Figura 11 mostra o funcionamento do algoritmo do TGPC utilizado na obtenção de seus melhores parâmetros, para cada tipo de planta estudado.

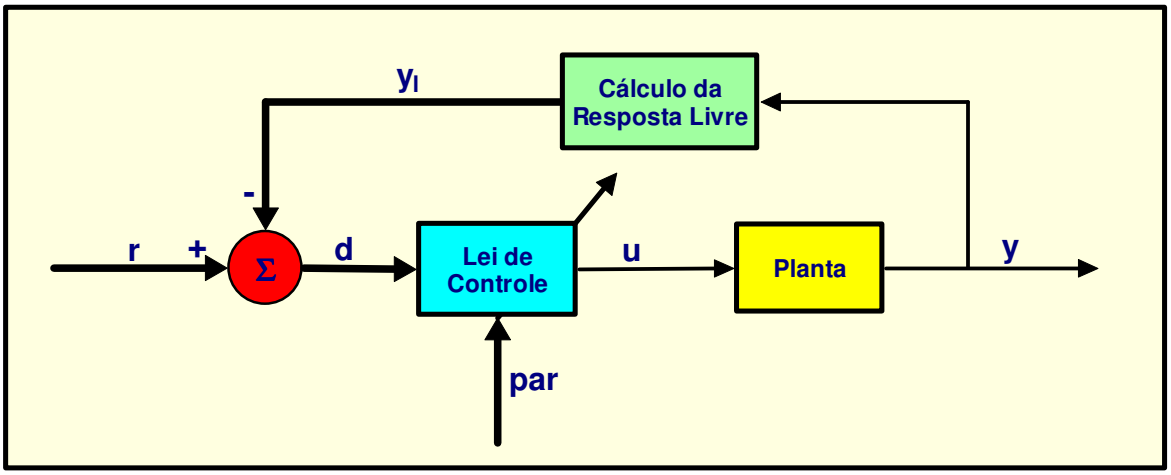

Figura 11 – Esquema da saída desejada do TGPC pelo modelo calculado.

Conforme se observa na Figura 11, o algoritmo TGPC tem início a partir da entrada dos parâmetros (N, λ e β) oriundos do algoritmo genético. Estes parâmetros são utilizados para obtenção dos valores: sinal de controle u, que corresponde à entrada do processo; e, para a determinação da resposta livre que será subtraída do valor da saída do modelo com vistas ao cálculo da função critério, J_{min}. Em seguida, a saída predita é determinada e empregada tanto no cálculo da resposta livre como na determinação da função critério, J_{min}. A resposta livre é, ainda, subtraída da referência resultando no vetor d. A primeira linha deste vetor é, então, usada como entrada para a lei de controle e o procedimento é repetido até que sejam obtidos os valores dos parâmetros do TGPC capazes de minimizar a função critério apresentada na equação (6.4).

Deve-se salientar que este mesmo procedimento foi aplicado para obtenção da função critério J_{min} e do sinal de controle u, para o controlador GPC, a partir dos parâmetros N e λ, determinados através do algoritmo genético, no qual o parâmetro β foi considerado igual a 1.

7 RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos com a implementação do TGPC, de acordo com cada tipo de planta utilizada, e comparados com os resultados apresentados pelos controladores GPC e PID, para os quais foi aplicada a mesma metodologia para obtenção de seus melhores parâmetros, N, λ e β, para o TGPC, N e λ, para o GPC e K_p, τ_i e τ_d, para o PID.

A escolha dos controladores GPC e PID para realização das comparações entre os resultados deve-se ao fato de o controlador TGPC ter sido originado a partir de uma alteração realizada no GPC, enquanto que a escolha do controlador PID teve, por essência, o fato de este controlador ser utilizado na maioria das indústrias de processos. O controle PID é o mais utilizado pela simplicidade de sua estrutura, e conseqüentemente, facilidade de implementação e flexibilidade para atendimento às necessidades da indústria. Na literatura, existem inúmeros trabalhos que comprovam a eficiência do PID, uma vez que a teoria de controle já estuda a ação destes controladores desde o início do século passado.

Serão feitas, também nesta seção, as análises de desempenho, robustez e estabilidade do controlador em estudo, através da aplicação dos métodos especificados na seção 5 deste trabalho, e a aplicação de ruído nas saídas dos diversos processos estudados, como forma de comprovar os aspectos positivos do TGPC.

Os controladores implementados têm por objetivo levar a saída do processo a atingir e permanecer no *setpoint*, conforme resposta ao degrau apresentada pelo modelo determinado na seção 6.1, aplicando-se, para este fim, os parâmetros calculados em conformidade com o estabelecido nas seções 6.2 e 6.3.

Para as simulações utilizou-se o programa MATLAB® versão 6.0. As funções dos controladores foram todas desenvolvidas, dessa forma não foi utilizado o *toolbox* de controle preditivo disponível na ferramenta, o que permitiu maior flexibilidade dos controladores implementados.

Os tempos de simulação de 12, 10 e 16s utilizados nas subseções 7.1.1, 7.1.2 e 7.1.3, respectivamente, foram escolhidos conforme o tipo de planta a ser implementada levando-se em consideração que as comparações são feitas para cada tipo separadamente e de forma a não apresentar dúvidas em relação ao seguimento da trajetória de referência.

7.1 SIMULAÇÕES REALIZADAS

As simulações foram realizadas para plantas estável, instável e de fase não mínima, todas de segunda ordem, com valores dos parâmetros dados conforme mostrado na Tabela 3 e aplicados à equação (2.2).

Tabela 3 – Parâmetros das plantas utilizadas na simulação

Tipo	**Parâmetros**			
	a_1	a_2	b_0	b_1
Estável	-1,8	0,9	1,0	0,5
Instável	1,8	-0,9	1,0	0,5
Fase Não Mínima	-1,5	0,7	-1,0	2,0

Os valores dos parâmetros constantes na Tabela 3 foram reproduzidos de Królikowski e Jerzy (2001).

Foram selecionados, também, com vistas às simulações, os parâmetros constantes na Tabela 4, que mostra os valores percentuais utilizados para ponderação da função critério, para as três técnicas empregadas de acordo com os três tipos de plantas simuladas.

Vale relembrar que a escolha dos parâmetros apresentados na Tabela 4 pode ser feita a critério do projetista, sendo ele o agente responsável pela definição de tais parâmetros conforme as necessidades do projeto em uso, que podem ser estabelecidos com base em critérios empíricos ou desejáveis.

Tabela 4 – Parâmetros a e b especificados de acordo com o tipo de planta

Tipo de Planta	Ponderação (%)	
	a	b
Estável	90	10
Instável	90	10
Fase Não Mínima	10	90

7.1.1 Planta Estável

Nas simulações do TGPC, GPC e do PID foram utilizados os parâmetros apresentados nas Tabelas 3 e 4 e os resultados estão apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7. As Figuras 12, 13 e 14 ilustram os resultados obtidos da simulação feita com a planta estável, cuja saída do processo foi determinada utilizando-se os parâmetros mostrados na Tabela 3, com base no modelo CARIMA e na equação (7.1).

$$y(k) = \frac{B(q^{-1})}{\Delta A(q^{-1})} \Delta u(k-1) \tag{7.1}$$

em que:

$A(q^{-1}) = 1 - 1{,}8q^{-1} + 0{,}9q^{-2}$

$B(q^{-1}) = 1 + 0{,}5q^{-1}$

$\Delta = 1 - q^{-1}$

que substituindo na equação (7.1), resulta:

$$y(k) = \frac{q^{-1} + 0{,}5q^{-2}}{1 - 2{,}8q^{-1} + 2{,}7q^{-2} - 0{,}9q^{-3}} \Delta u(k) \tag{7.2}$$

com *u(k)* calculado conforme estabelecido na equação (2.14) e,

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \tag{7.3}$$

Tabela 5 – Parâmetros do controlador TGPC obtidos para a planta estável.

Parâmetros TGPC	Valores Obtidos
N	7
λ	9,995
β	2,712
J_{min}	0,0225

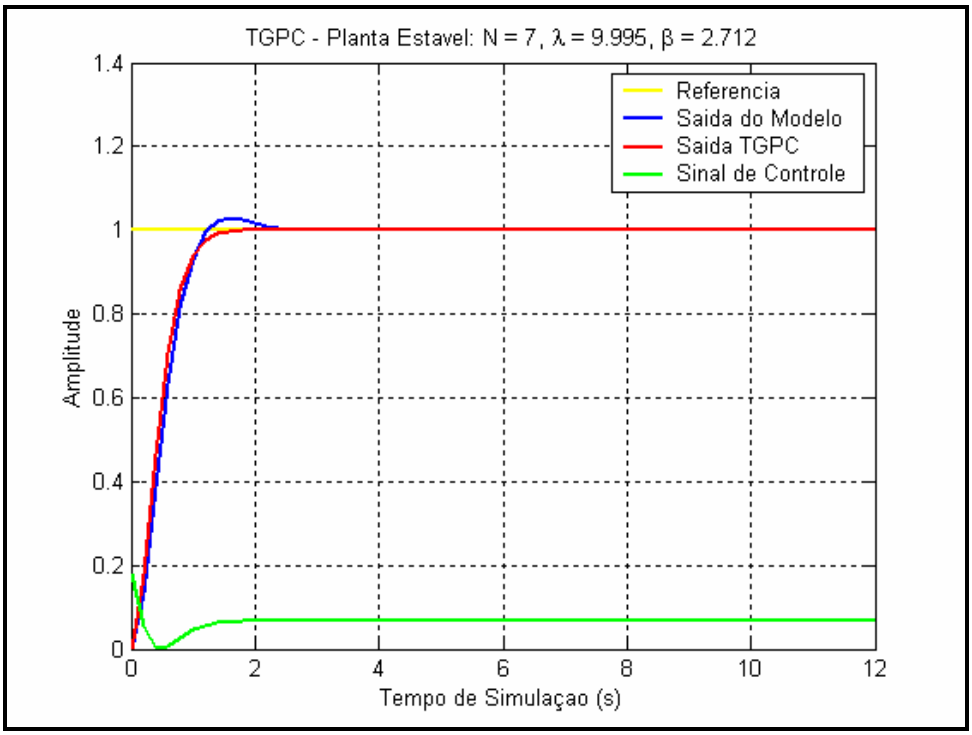

Figura 12 – TGPC para a planta estável.

A simulação realizada com o controlador GPC, para a planta estável, teve a saída do processo determinada utilizando-se os parâmetros mostrados na Tabela 3, com base no modelo CARIMA e na equação (7.2), considerando-se o sinal de controle calculado de acordo com a equação (2.14), fazendo-se o parâmetro β igual a 1.

Tabela 6 – Parâmetros do controlador GPC obtidos para a planta estável.

Parâmetros GPC	Valores Obtidos
N	8
λ	9,996
J_{min}	0,0955

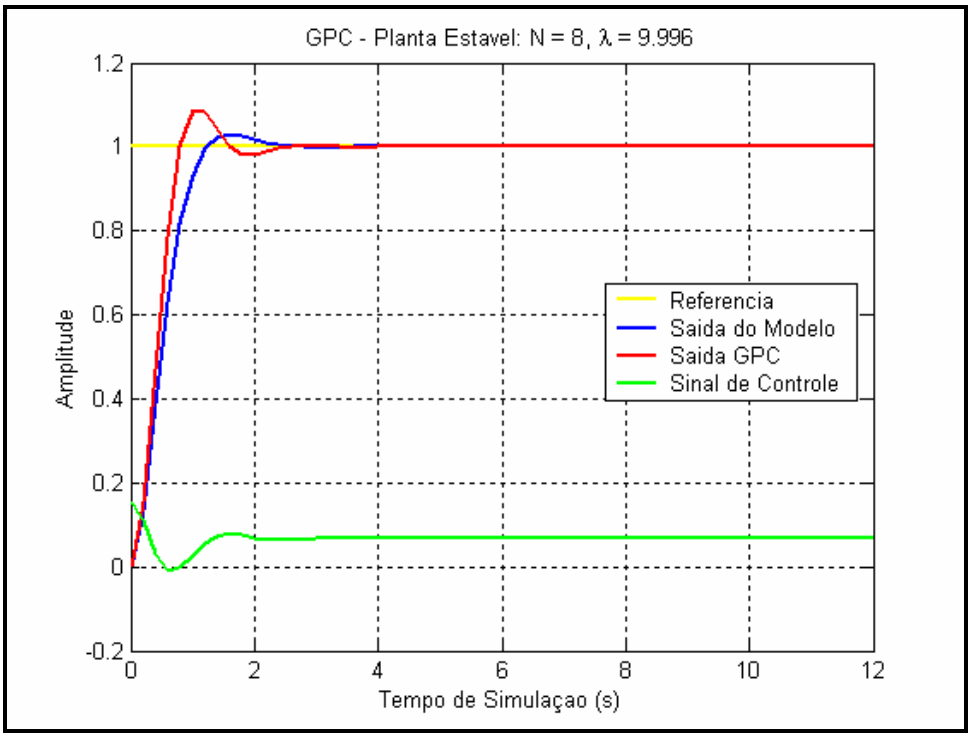

Figura 13 – GPC para a planta estável.

Na simulação do controlador PID, a saída do controlador foi calculada de acordo com a equação (7.2), o sinal de controle *u(k)* utilizando-se a equação (4.17) e *Δu(k)* conforme a equação (7.3) .

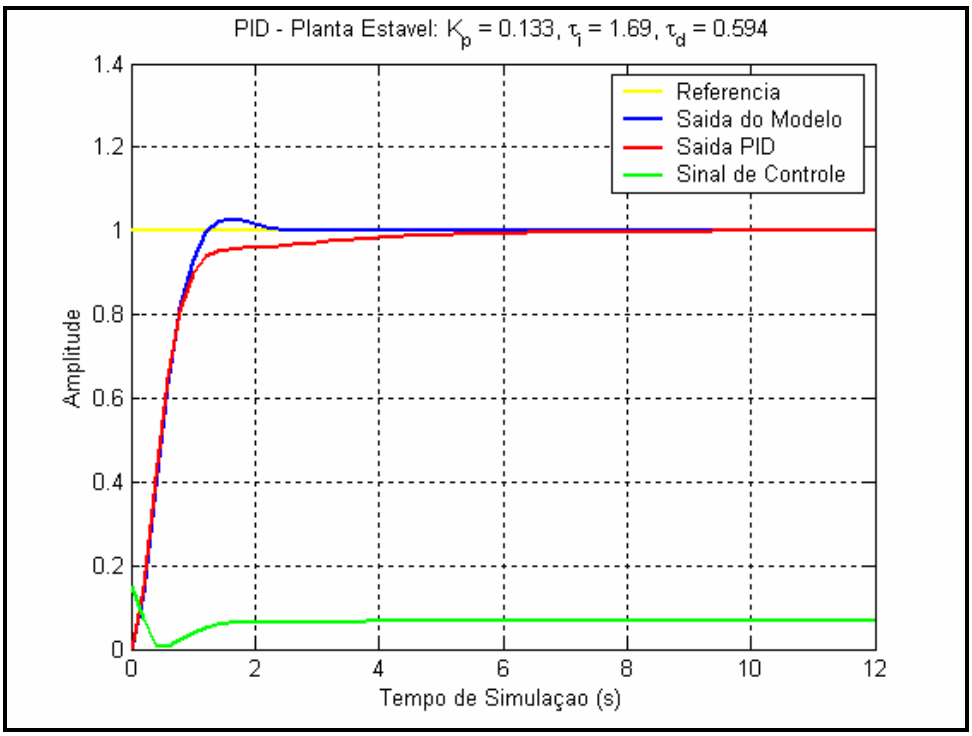

Figura 14 – PID para a planta estável.

Tabela 7 – Parâmetros do controlador PID obtidos para a planta estável.

Parâmetros PID	Valores Obtidos
K_p	0,133
τ_i	1,690
τ_d	0,594
J_{min}	0,0335

Comparando-se os resultados obtidos nas Tabelas 5, 6 e 7, notadamente em relação aos valores de J_{min}, determinados de acordo com a minimização da função critério definida pela equação (6.4), e observando-se as Figuras 12, 13 e 14, pode-se perceber que o melhor resultado obtido para o algoritmo GPC é 324,4% maior que o melhor resultado obtido para o TGPC, enquanto que para o PID é cerca de 48,9% maior que o melhor resultado obtido para o TGPC, o que indica, para a planta estável implementada, um resultado mais satisfatório deste último algoritmo.

7.1.2 Planta Instável

Para a planta instável, foram utilizados nas simulações do TGPC, GPC e do PID os parâmetros apresentados nas Tabelas 3 e 4 e os resultados apresentados nas tabelas 8 e 9. As Figuras 15 e 16 ilustram os resultados obtidos da simulação realizada para os controladores TGPC e GPC, cuja saída do processo foi determinada aplicando-se os parâmetros correspondentes a este tipo planta, na equação (7.1), em que:

$A(q^{-1}) = 1 + 1{,}8q^{-1} - 0{,}9q^{-2}$

$B(q^{-1}) = 1 + 0{,}5q^{-1}$

$\Delta = 1 - q^{-1}$

que substituindo na equação (7.1), resulta:

$$y(k) = \frac{q^{-1} + 0{,}5q^{-2}}{1 + 0{,}8q^{-1} - 2{,}7q^{-2} + 0{,}9q^{-3}} \Delta u(k) \tag{7.4}$$

com *u(k)* calculado conforme estabelecido na equação (2.14) e *Δu(k)* de acordo com a equação (7.3).

Tabela 8 – Parâmetros do controlador TGPC obtidos para a planta instável.

Parâmetros TGPC	Valores Obtidos
N	4
λ	9,530
β	4,969
J_{min}	0,0589

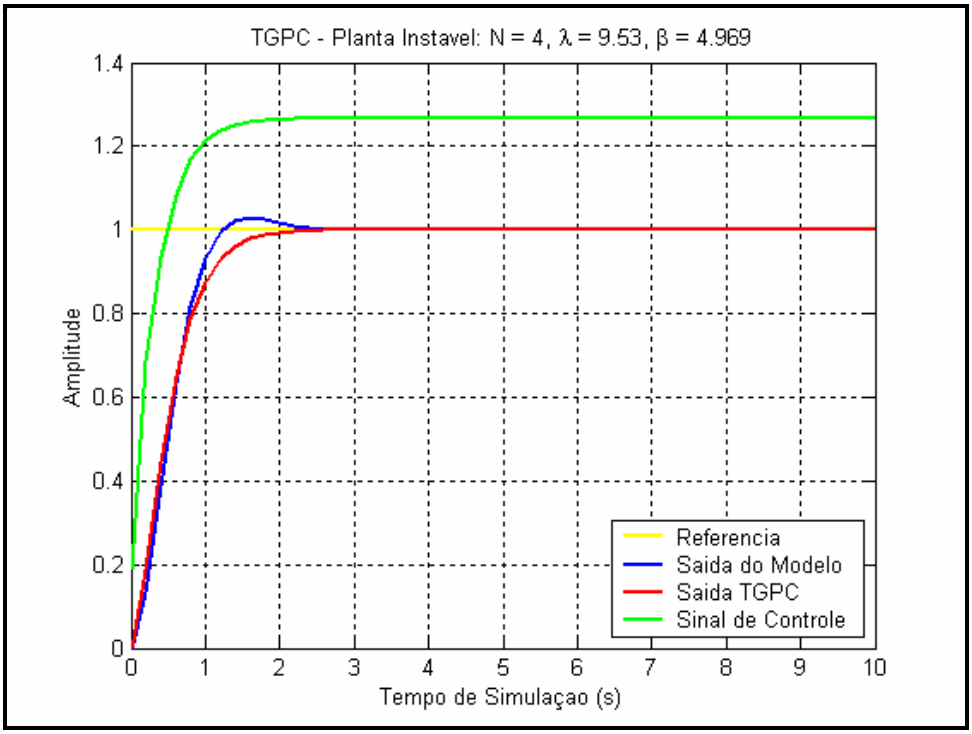

Figura 15 – TGPC para a planta instável.

A simulação do controlador GPC, para a planta instável, teve a saída do processo determinada utilizando-se os parâmetros mostrados na Tabela 3, com base no modelo CARIMA e na equação (7.4), considerando-se o sinal de controle calculado de acordo com a equação (2.14), fazendo-se o parâmetro β igual a 1.

Tabela 9 – Parâmetros do controlador GPC obtidos para a planta instável.

Parâmetros GPC	Valores Obtidos
N	8
λ	2,776
J_{min}	0,0709

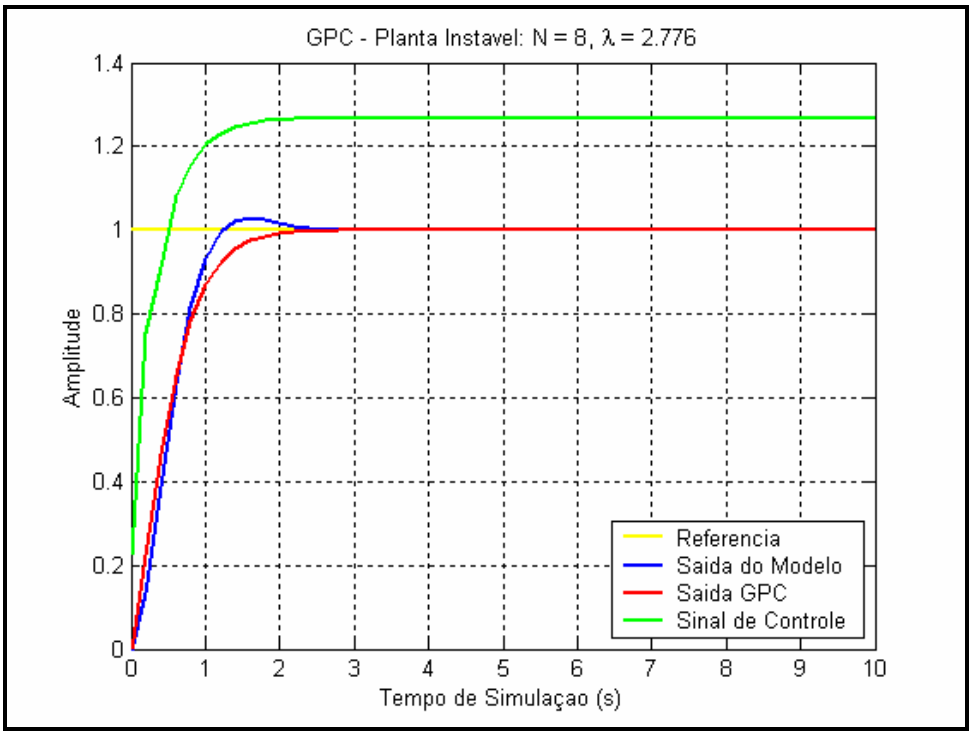

Figura 16 – GPC para a planta instável.

A função de transferência discreta da planta em estudo é descrita por:

$$G(z) = \frac{y(z)}{r(z)} = \frac{z + 0{,}5}{z^2 + 1{,}8z - 0{,}9} \tag{7.5}$$

em que *y(z)* é a saída da planta e *r(z)* é a trajetória de referência.

Para este tipo de planta, instável, não foi possível obter a convergência dos parâmetros do PID utilizando-se a técnica dos algoritmos genéticos e, devido a isso, não foi apresentado o resultado da simulação. Assim, torna-se necessário o estudo de uma técnica capaz de explicar tal comportamento deste controlador.

A técnica escolhida para justificar a não convergência dos parâmetros do controlador PID é baseada no método do lugar das raízes, conforme mostra o gráfico da Figura 17. Os valores dos zeros e pólos encontrados, para o sistema em malha aberta já com o controlador PID, estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Zeros e pólos do sistema discreto instável.

Zeros	Pólos
0,5143 + 0,4703i	-2,2077
0,5143 – 0,4703i	-0,9048
-0,5000	1,0000
	0,4077

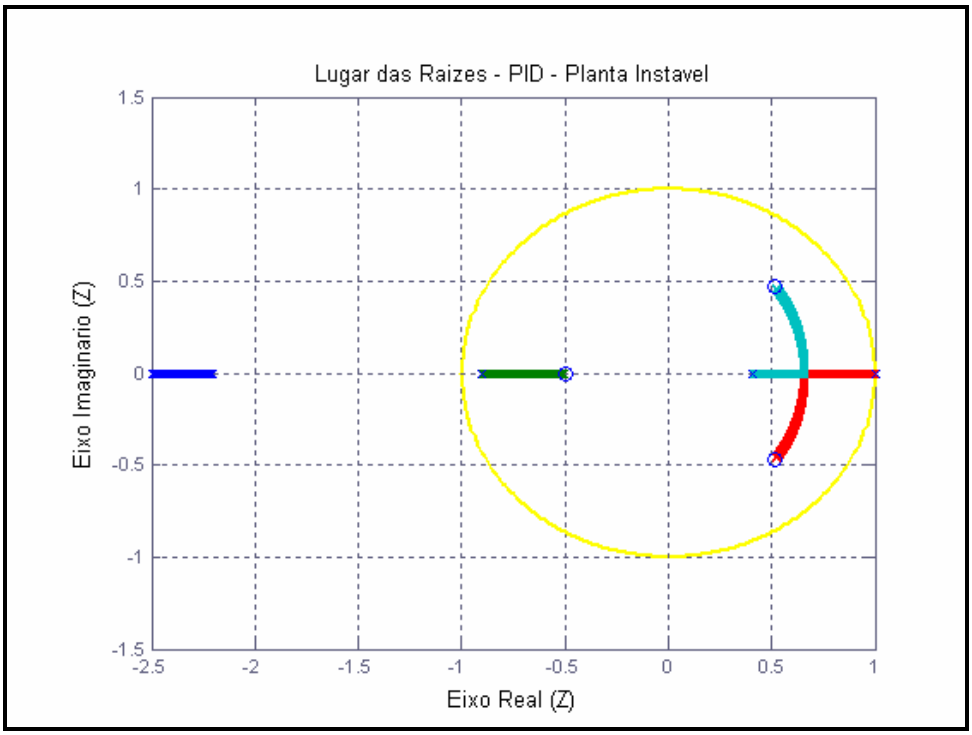

Figura 17 – Lugar das raízes para a planta instável.

Conforme se observa na Tabela 10 e no gráfico da Figura 17 a existência de um ramo fora do círculo unitário, no semiplano esquerdo, que tem início no pólo *z = -2,2077* provoca a instabilidade do sistema e, apesar das alterações fornecidas aos parâmetros do controlador PID, não são suficientes para permitir a estabilidade

do sistema. Neste caso, seria necessário utilizar um controlador em cascata com o PID para tornar o sistema estabilizável.

Dessa forma, para a planta discreta instável, especificada na equação (7.5), o uso do controlador PID não seria adequado, mas este processo é facilmente controlado pelos controladores TGPC e GPC, sendo que o melhor resultado obtido para o GPC é 20,4% maior que o melhor resultado obtido com o TGPC, conforme sugerem os gráficos das Figuras 15 e 16.

7.1.3 Planta de Fase Não Mínima

Nas simulações do TGPC, GPC e do PID foram utilizados os parâmetros apresentados nas Tabelas 3 e 4 e os resultados estão apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13. As Figuras 18, 19 e 20 ilustram os resultados obtidos da simulação feita com a planta de fase não mínima, cuja saída do processo foi determinada utilizando-se os parâmetros mostrados na Tabela 3, com base no modelo CARIMA expresso pela equação (7.1). Em que,

$A(q^{-1}) = 1 - 1{,}5q^{-1} + 0{,}7q^{-2}$

$B(q^{-1}) = -1 + 2q^{-1}$

$\Delta = 1 - q^{-1}$

que substituindo na equação (7.1), resulta:

$$y(k) = \frac{-q^{-1} + 2q^{-2}}{1 - 2{,}5q^{-1} + 2{,}2q^{-2} - 0{,}7q^{-3}} \Delta u(k) \tag{7.6}$$

com $u(k)$ calculado conforme estabelecido na equação (2.14) e $\Delta u(k)$ de acordo com a equação (7.3).

Tabela 11 – Parâmetros do controlador TGPC obtidos para a planta de fase não mínima.

Parâmetros TGPC	Valores Obtidos
N	9
λ	9,959
β	0,979
J_{min}	0,0930

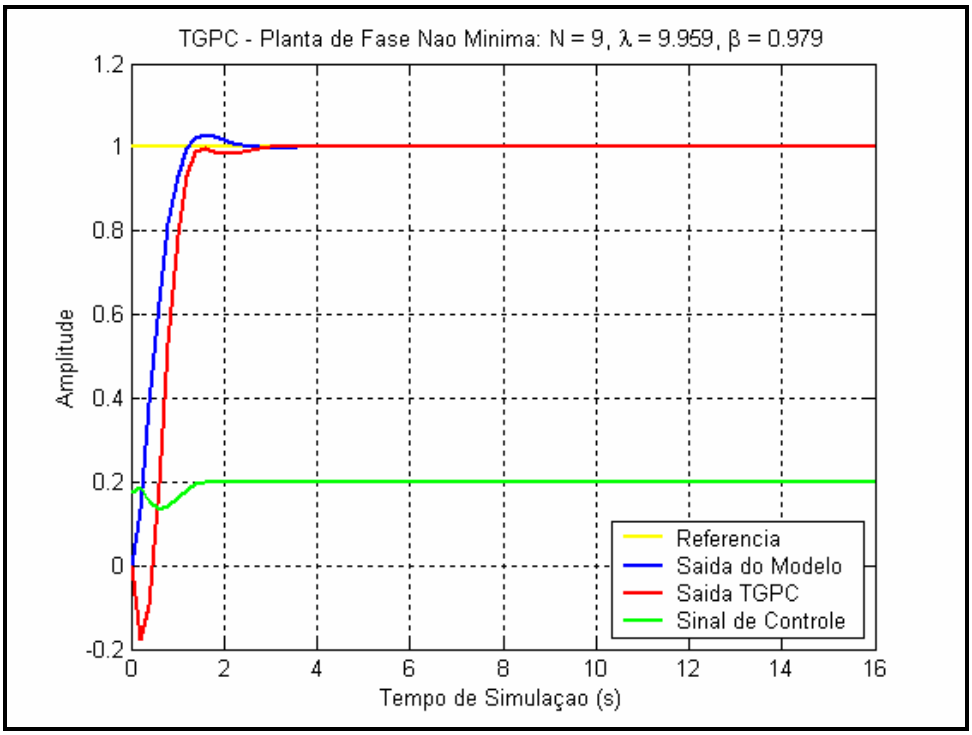

Figura 18 – TGPC para a planta de fase não mínima.

De forma similar aos demais tipos de plantas já apresentados, a simulação realizada com o controlador GPC, para a planta de fase não mínima, teve a saída do processo determinada utilizando-se os parâmetros mostrados na Tabela 3, com base no modelo CARIMA e na equação (7.6), considerando-se o sinal de controle calculado de acordo com a equação (2.14), fazendo-se o parâmetro β igual a 1.

Tabela 12 – Parâmetros do controlador GPC obtidos para a planta de fase não mínima.

Parâmetros GPC	Valores Obtidos
N	7
λ	9,979
J_{min}	0,0931

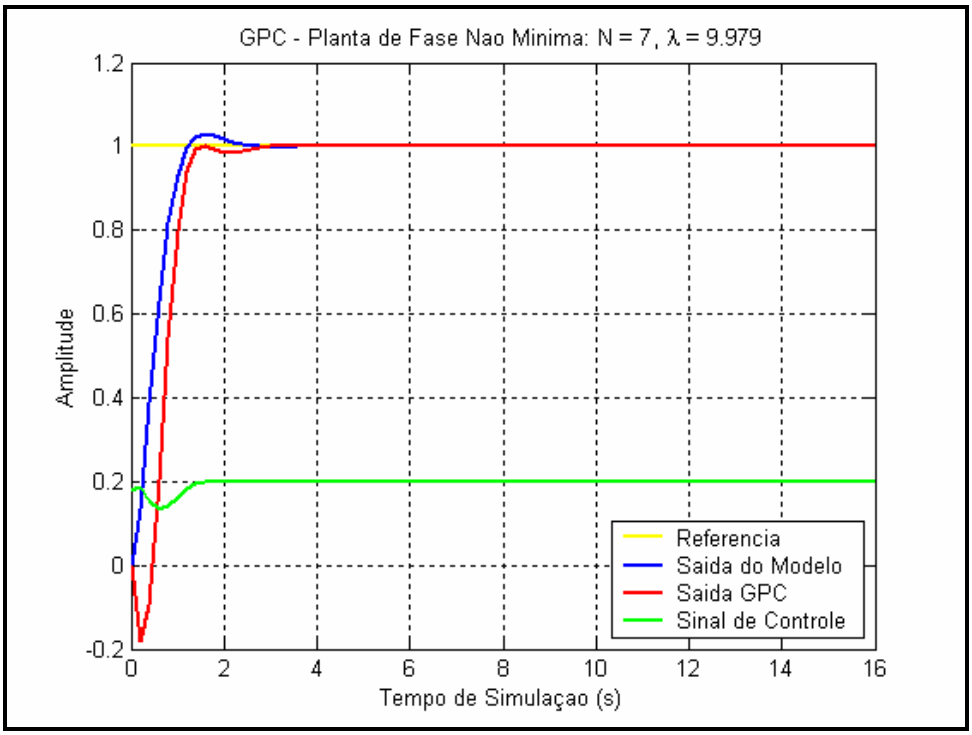

Figura 19 – GPC para a planta de fase não mínima.

Na simulação do controlador PID, a saída do controlador foi calculada de acordo com a equação (7.6), o sinal de controle *u(k)* utilizando-se a equação (4.17) e *Δu(k)* conforme a equação (7.3).

Tabela 13 – Parâmetros do controlador PID obtidos para a planta de fase não mínima.

Parâmetros PID	Valores Obtidos
K_p	0,032
τ_i	0,222
τ_d	0,227
J_{min}	0,1827

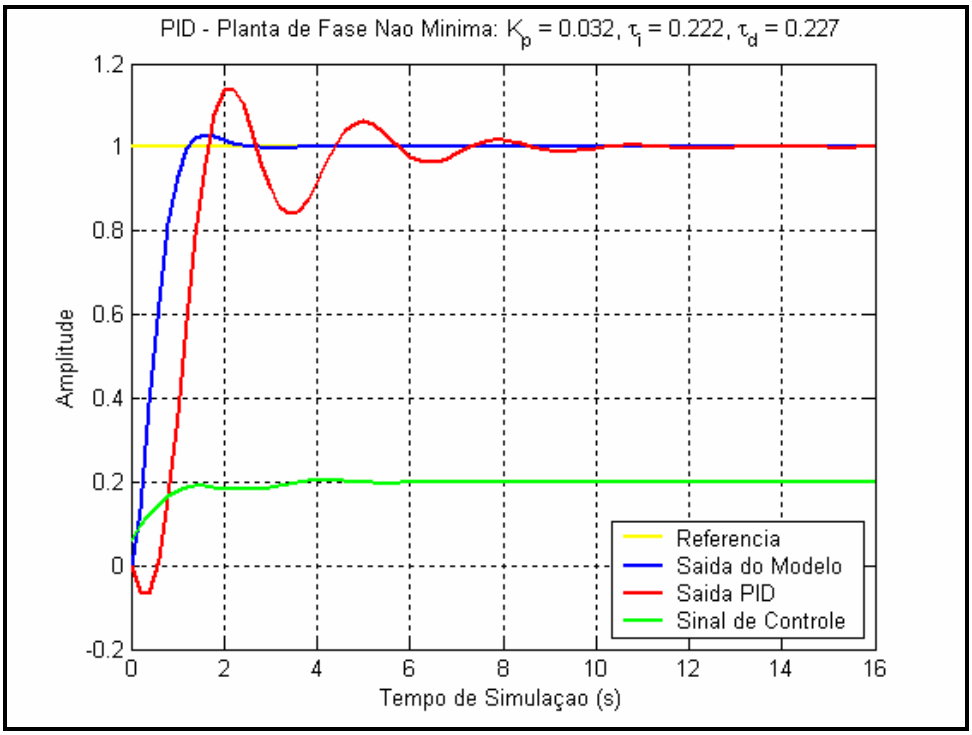

Figura 20 – PID para a planta de fase não mínima.

Comparando-se os resultados obtidos nas Tabelas 11, 12 e 13, notadamente em relação aos valores de J_{min}, determinados de acordo com a minimização da função critério definida pela equação (6.4), e observando-se as Figuras 18, 19 e 20, pode-se perceber que o melhor resultado obtido para o algoritmo PID é cerca de 96% maior que o melhor resultado obtido para o TGPC, porém, para o tipo de planta analisado, planta de fase não mínima, os resultados obtidos para o GPC e o TGPC são praticamente os mesmos, tendo este último apresentado uma melhora praticamente insignificante em relação ao GPC.

7.2 AVALIAÇÃO DE ACORDO COM OS ASPECTOS DE ESTABILIDADE

Nesta seção serão utilizados os critérios de desempenho, robustez e estabilidade estudados na seção 5 e aplicados aos exemplos definidos na subseção 7.1, e para estes casos, serão obtidos os índices de desempenho, estabelecidos parâmetros nominais para todos os processos, aplicados os teoremas que garantem a estabilidade do TGPC, de acordo com as simplificações neles descritas e

utilizando o método do lugar das raízes para comprovar a estabilidade das plantas estudadas.

7.2.1 Determinação dos Índices de Desempenho

Conforme visto na subseção 5.1, os índices de desempenho baseado na integral do erro quadrático (ISE) e na integral do tempo vezes o valor absoluto do erro (ITAE), são calculados através das equações (5.2) e (5.4). A Tabela 14 apresenta os valores encontrados para estes índices, de acordo com cada tipo de planta, apresentadas nas equações (7.2), (7.4) e (7.6).

Tabela 14 – Valores dos índices ISE e ITAE obtidos para o TGPC, GPC e PID.

Tipo de Planta	**ISE**			**ITAE**		
	TGPC	**GPC**	**PID**	**TGPC**	**GPC**	**PID**
Estável	2,0697	2,0585	2,2591	3,0875	3,1989	5,9034
Instável	2,1631	2,0836	-	3,6860	3,6907	-
Fase Não Mínima	4,5043	4,4824	5,6787	5,8821	5,7789	17,9111

O desempenho das técnicas de controle foi qualificado sob os critérios das equações (5.1) e (5.3), selecionados para avaliar de forma efetiva a diferença entre as respostas dos controladores TGPC, GPC e PID implementados. Assim, comparando-se os resultados obtidos nas simulações e mostrados na Tabela 14, observa-se que o TGPC apresenta melhor desempenho que o PID, pois os valores dos índices ISE e ITAE para este controlador é menor do que para o PID em todos os tipos de processos avaliados. Mas, no tocante ao critério ISE, quando comparados com os resultados obtidos pelo GPC, os resultados do TGPC são um pouco piores para todos os tipos de plantas implementados, embora que em relação ao critério ITAE apenas o TGPC para a planta de fase não mínima apresentou resultado pior que o GPC correspondente.

No entanto, comparando-se os melhores resultados obtidos para o critério J_{min} com os parâmetros de ponderação dos sinais de saída das plantas e os sinais de saída dos controladores, considerando-se a variação destes parâmetros, iniciando-se em 0,0 e 1,0 até 1,0 e 0,0, para os parâmetros *a* e *b*, respectivamente, conforme

se observa nas figuras 21 a 26, percebe-se que uma análise global indica o melhor desempenho do controlador TGPC, para todos os tipos de plantas, uma vez que apresenta, de forma geral, menor variação da influência destes parâmetros relativamente à minimização da função critério J_{min}.

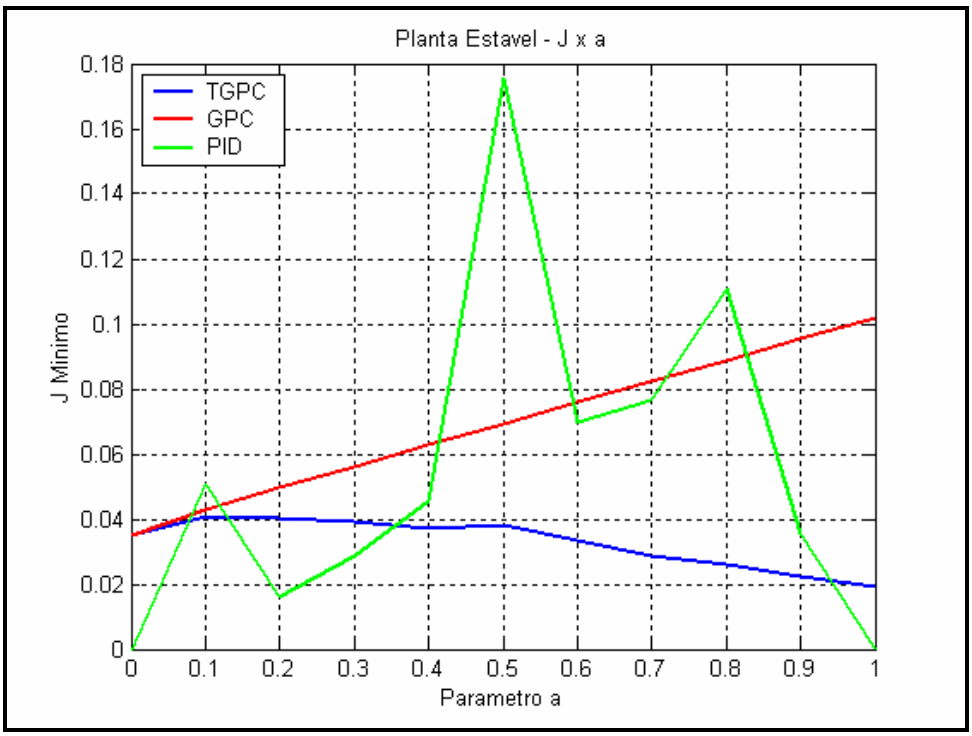

Figura 21 – Planta estável: influência do parâmetro a em relação ao critério J_{min}.

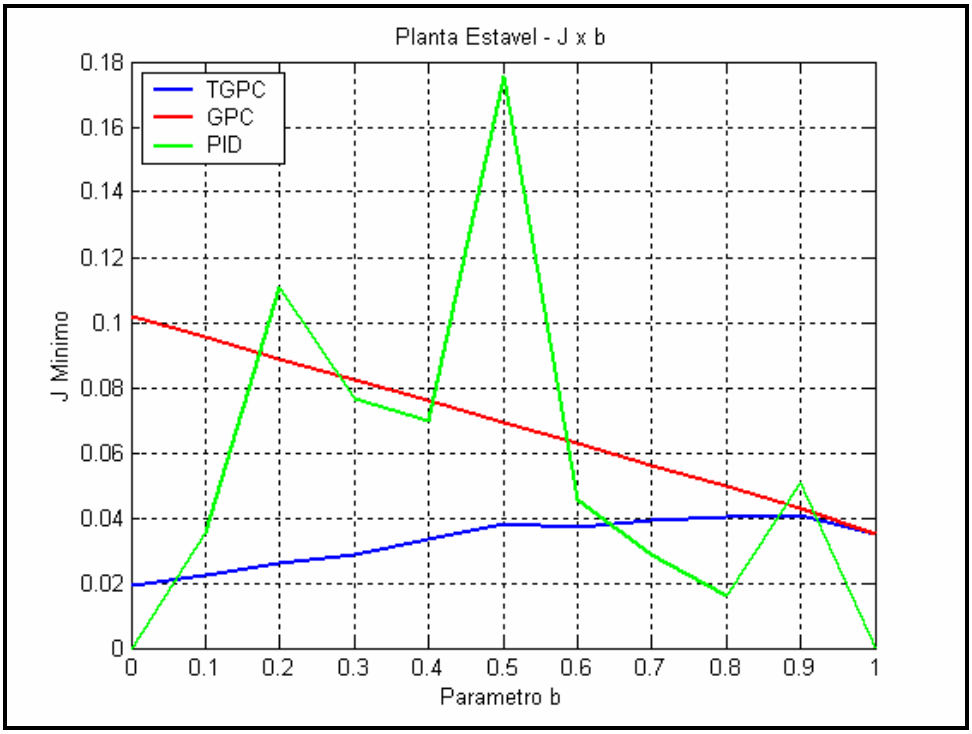

Figura 22 – Planta estável: influência do parâmetro b em relação ao critério J_{min}.

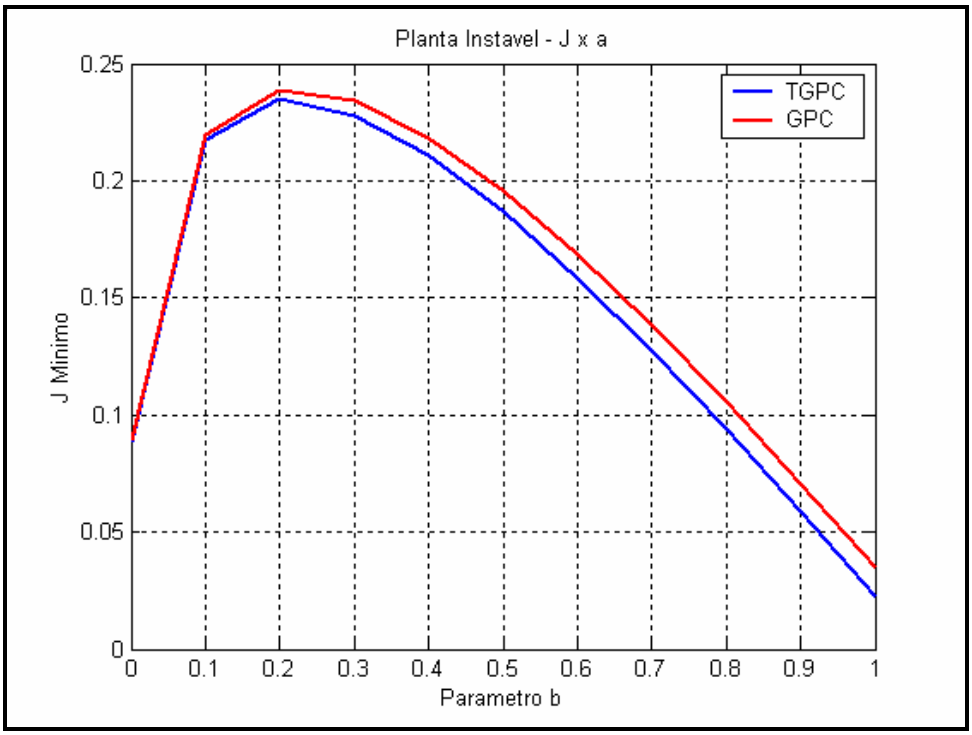

Figura 23 – Planta instável: influência do parâmetro a em relação ao critério J_{min}.

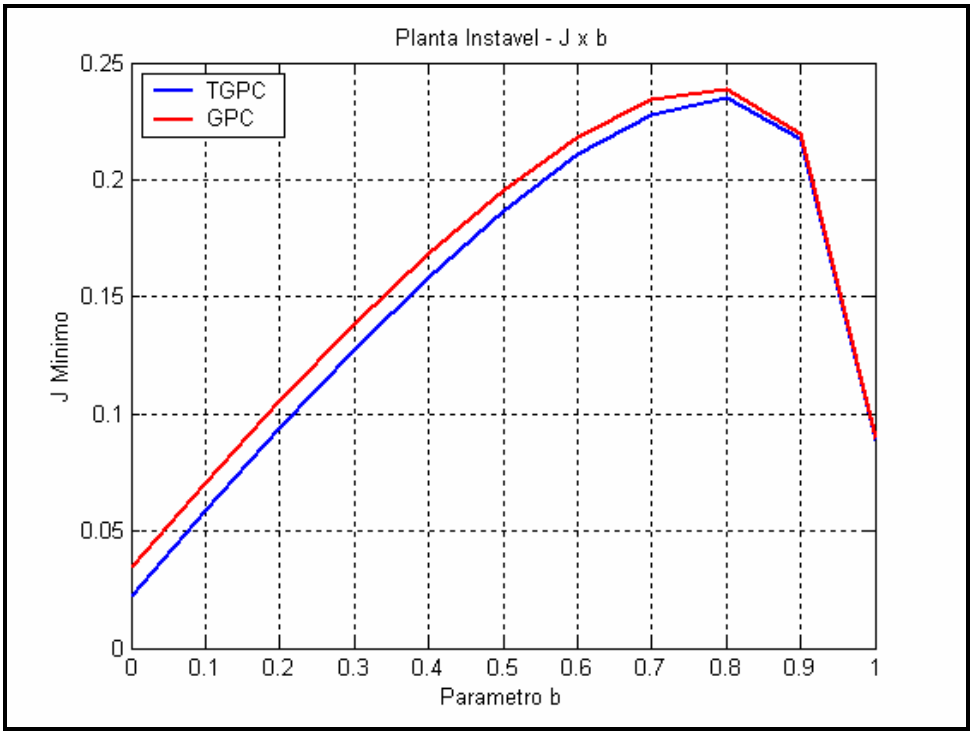

Figura 24 – Planta instável: influência do parâmetro b em relação ao critério J_{min}.

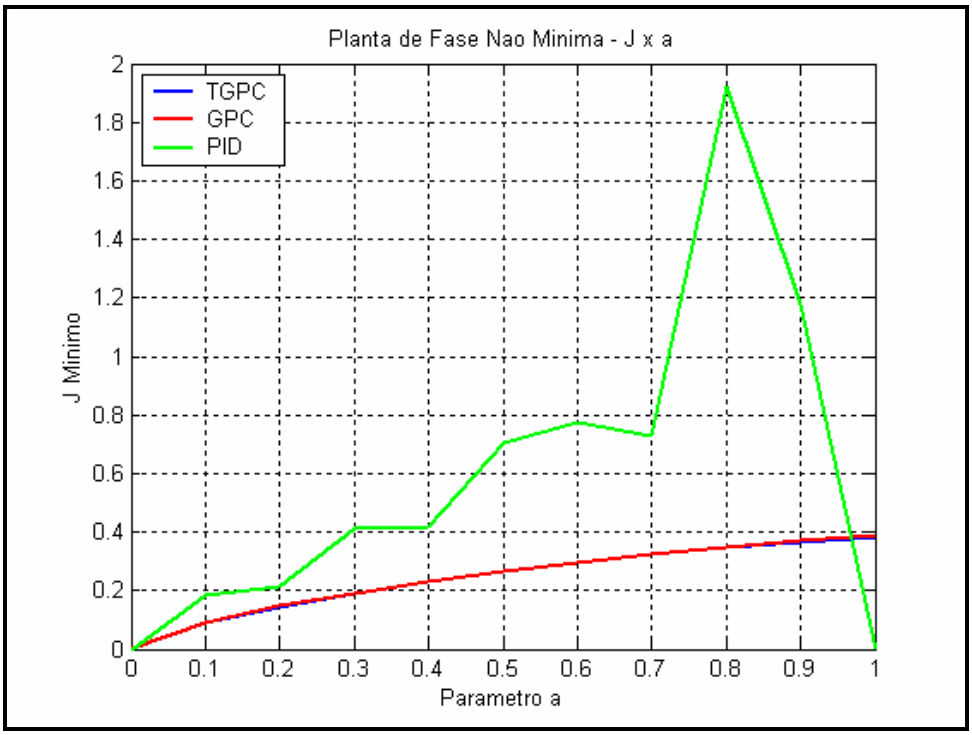

Figura 25 – Planta de fase não mínima: influência do parâmetro a em relação ao critério J_{min}.

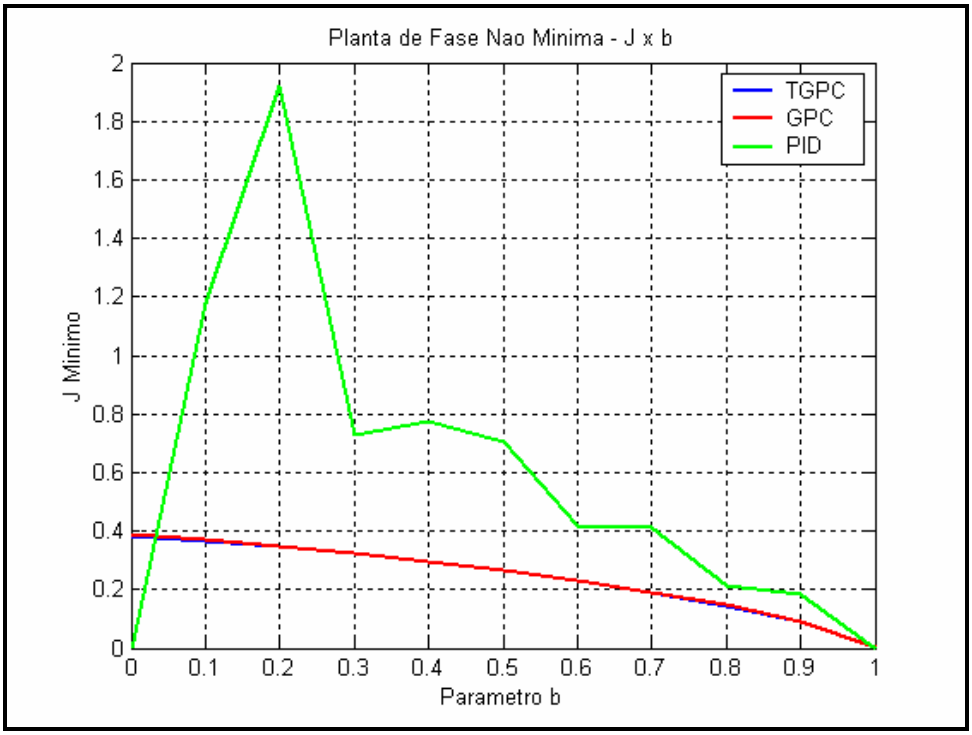

Figura 26 – Planta de fase não mínima: influência do parâmetro b em relação ao critério J_{min}.

Vale ressaltar que nos resultados apresentados nas Figuras 21, 22, 25 e 26, para os valores de *a* e *b* iguais a 0,0 e 1,0 e 1,0 e 0,0, respectivamente, referentes ao controlador PID, como não foi possível a convergência do algoritmo genético para tais parâmetros, então, estes foram considerados iguais a zero apenas para fins de representação gráfica.

7.2.2 Aplicação do Critério de Robustez

Nas diversas aplicações, deseja-se que o sistema de controle apresente robustez aos efeitos de fatores como: erros de modelagem, variações nos parâmetros do sistema a ser controlado, ruídos e distúrbios, visto que estes fatores alteram de forma imprevisível o comportamento dos sistemas, dificultando o projeto de sistemas de controle de alto desempenho (Santos, 1998).

Nesta subseção o critério de robustez será analisado através da aplicação do critério discutido na subseção 5.2, que se refere à implementação da variação dos parâmetros da planta, sendo estes limitados pelos fatores ρ_i e γ_j, em que i = 1, ..., *na* e j = 0, ..., *nb*, os quais podem variar de ±20%, em relação aos parâmetros do processo nominal e, são capazes de manter as condições desejáveis da saída para uma família de plantas.

Tabela 15 – Valores dos parâmetros das plantas e dos critérios obtidos para o TGPC.

Tipo de Planta	Simulação	Parâmetros				Critérios		
		a_1	a_2	b_0	b_1	J_{min}	ISE	ITAE
Estável	Melhor Caso	-1,584	1,044	0,880	0,520	0,0105	2,2282	3,4125
	Pior Caso	-2,160	0,972	1,160	0,400	0,0430	1,9546	2,9480
Instável	Melhor Caso	1,728	-1,044	1,000	0,480	0,0531	2,0940	3,3596
	Pior Caso	2,088	-0,972	0,880	0,480	0,2002	2,7587	5,8040
Fase Não Mínima	Melhor Caso	-1,560	0,840	-0,800	2,320	0,0487	3,5152	4,5210
	Pior Caso	-1,680	0,756	-1,160	1,840	0,1968	6,0524	9,1566

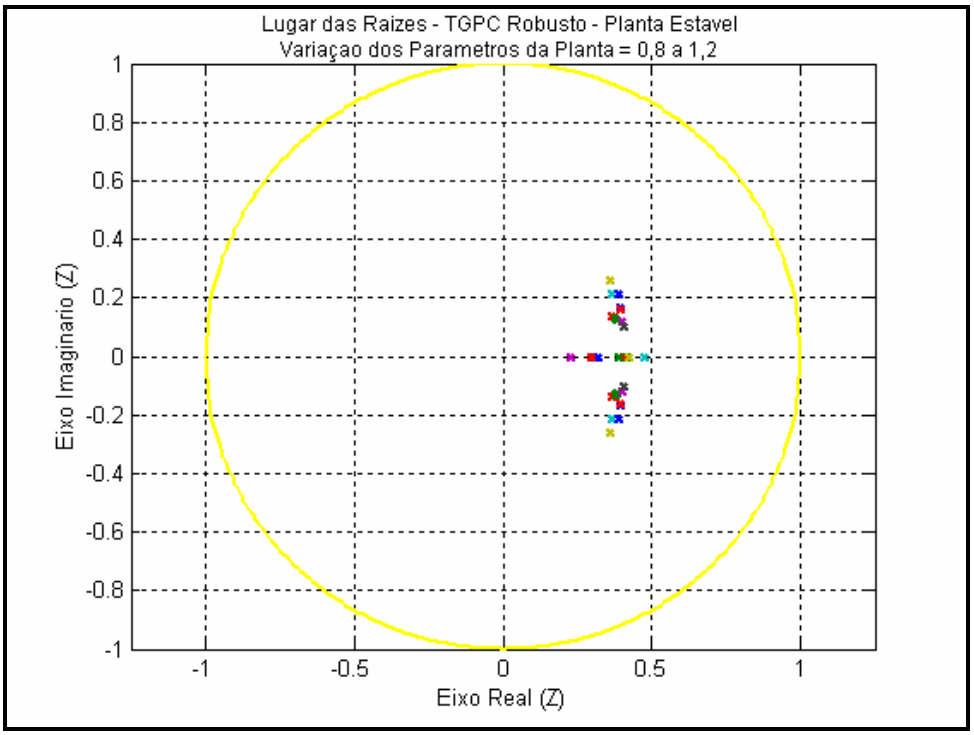

Figura 27 – Lugar das raízes do TGPC robusto para a planta estável.

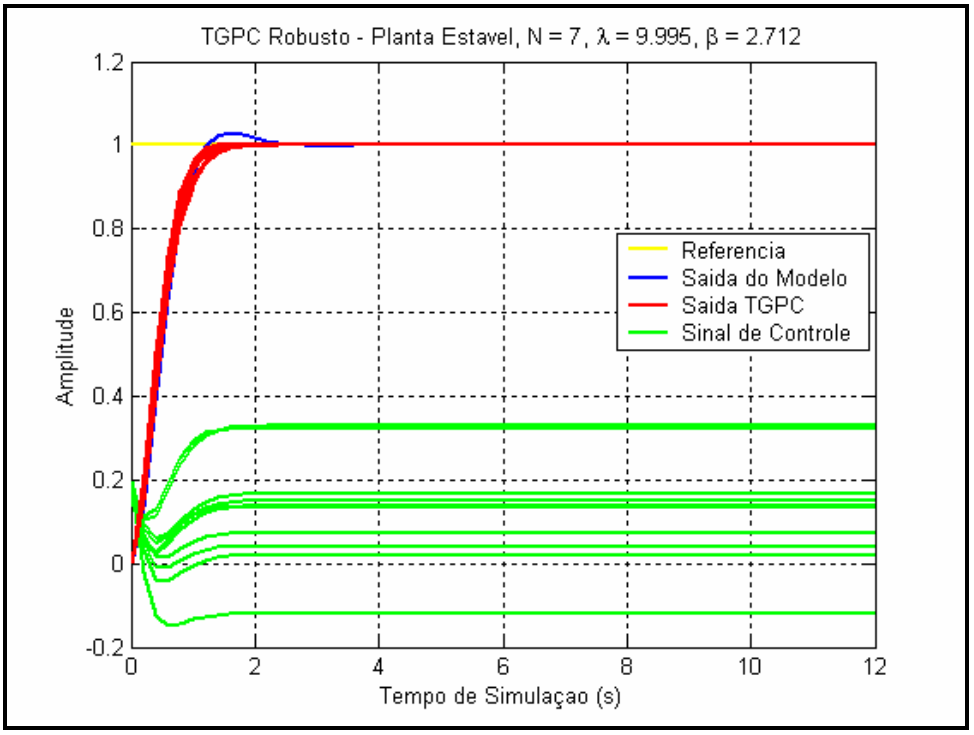

Figura 28 – TGPC robusto para a planta estável.

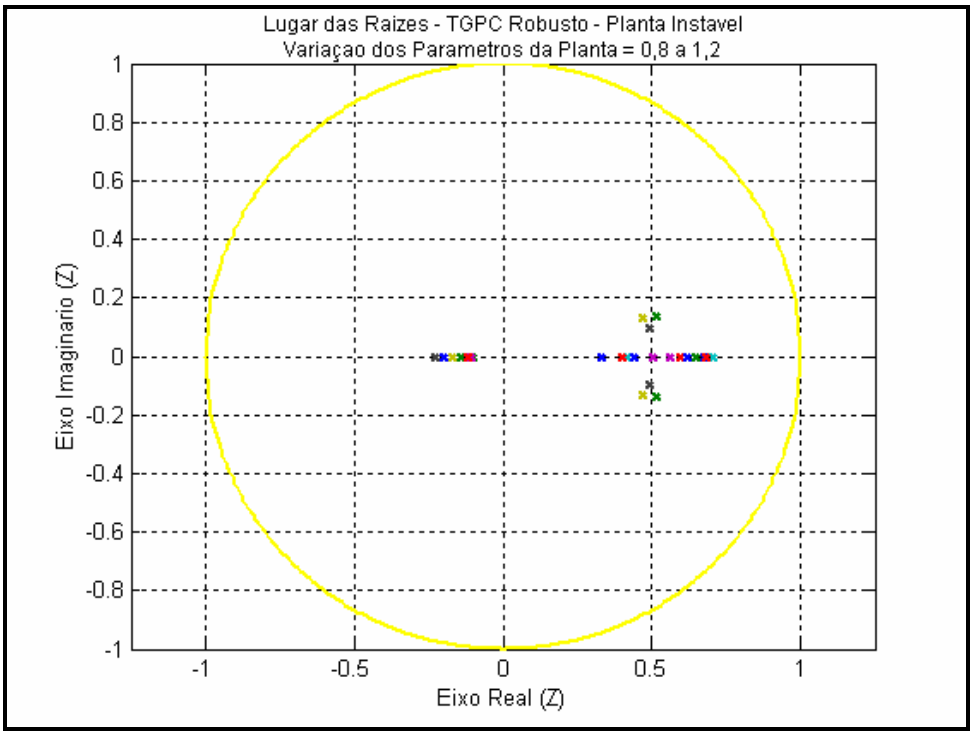

Figura 29 – Lugar das raízes do TGPC robusto para a planta instável.

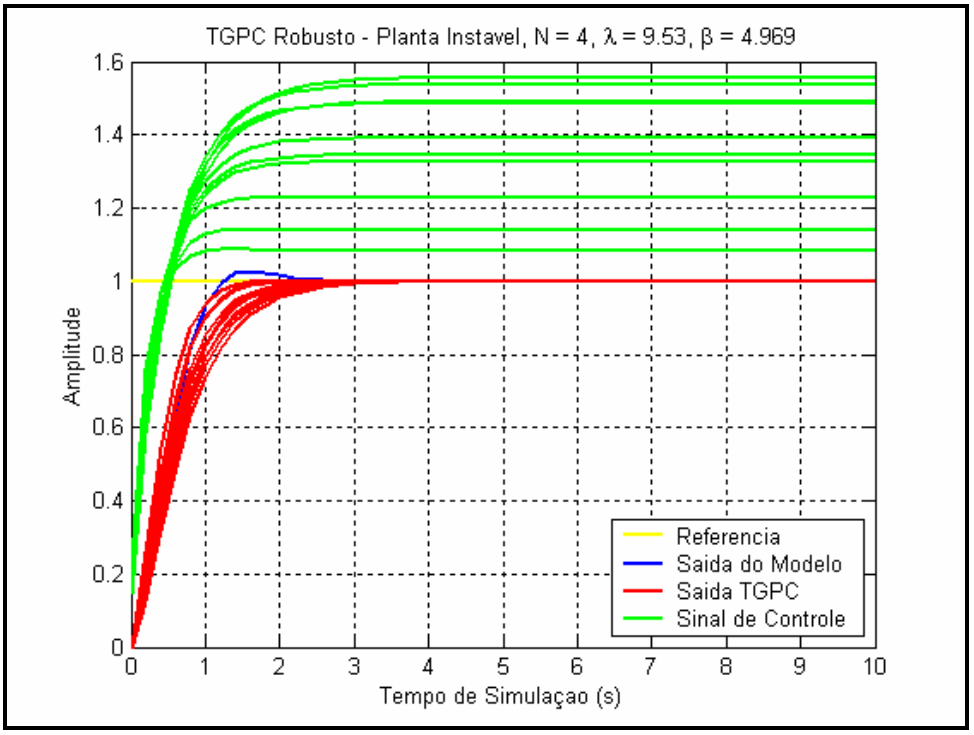

Figura 30 – TGPC robusto para a planta instável.

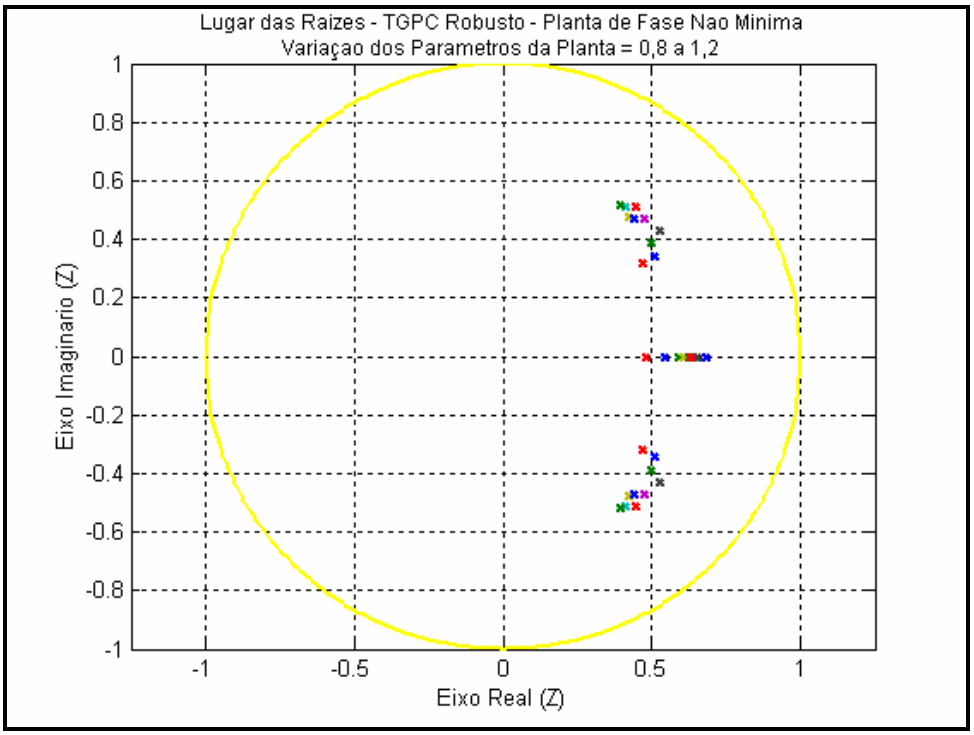

Figura 31 – Lugar das raízes do TGPC robusto para a planta de fase não mínima.

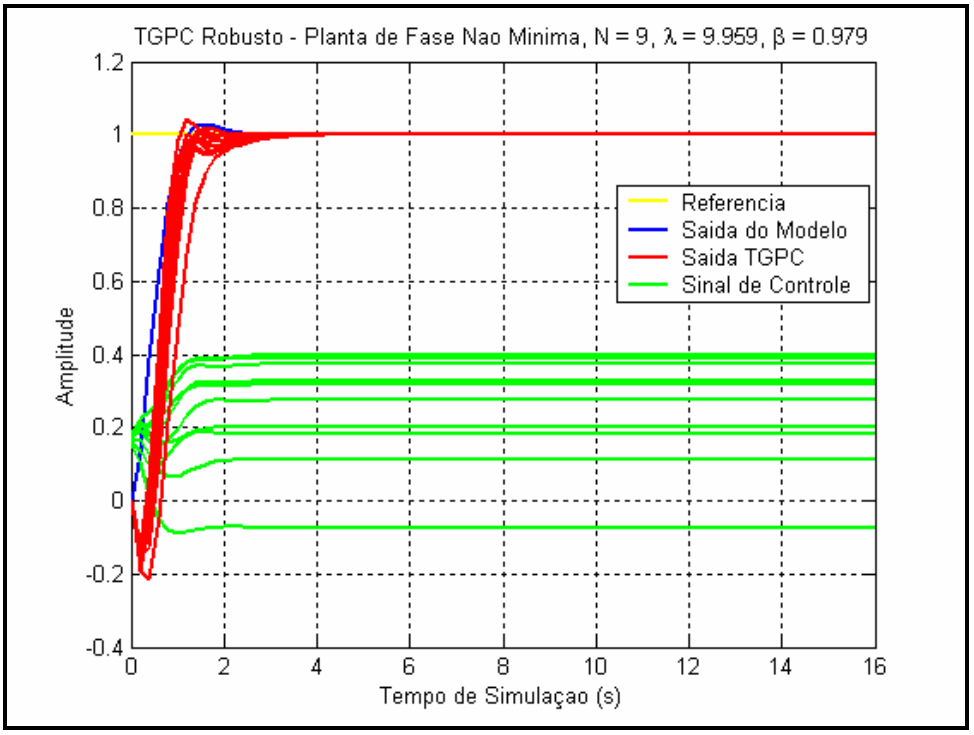

Figura 32 – TGPC robusto para a planta de fase não mínima.

Os resultados das simulações apresentados na Tabela 15 e mostrados nas Figuras 27 a 32 comprovam a robustez do TGPC frente à variação dos parâmetros da planta nominal, em que foi considerada uma família de plantas composta por dez amostras, cujos parâmetros foram escolhidos randomicamente, sendo, também, considerado que todas as plantas possuem a mesma ordem.

A Tabela 15 apresenta os valores dos parâmetros dos polinômios $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$, respectivamente, para os melhores e piores casos obtidos nas simulações realizadas para as plantas estável, instável de fase não mínima e, conforme se observa nas Figuras 27 a 32 o TGPC mantém-se dentro de uma banda aceitável de incerteza nas proximidades dos parâmetros nominais. Assim, pode-se considerar que a planta real esteja definida entre uma destas plantas obtida na simulação.

Caso os exemplos utilizados na simulação tivessem sido obtidos a partir de uma planta real conhecida, seria possível estabelecer exatamente a variação a ser aplicada aos parâmetros da planta nominal, e dessa forma, possibilitaria verificar qual a melhor faixa de variação a ser utilizada, simplesmente através da comparação dos resultados obtidos com a função de transferência da planta real.

7.2.3 Aplicação dos Teoremas de Estabilidade

Serão mostradas nesta subseção, as implementações dos teoremas de estabilidade apresentados na subseção 5.3, os quais serão aplicados apenas aos casos em que as condições estabelecidas nos teoremas 1, 2 e 3 sejam verificadas.

7.2.3.1 Teorema 1

As Figuras 33 e 34 apresentam os resultados obtidos da aplicação do Teorema 1, às plantas estável e instável, uma vez que não foi possível aplicar este Teorema à planta de fase não mínima, em razão de suas peculiaridades.

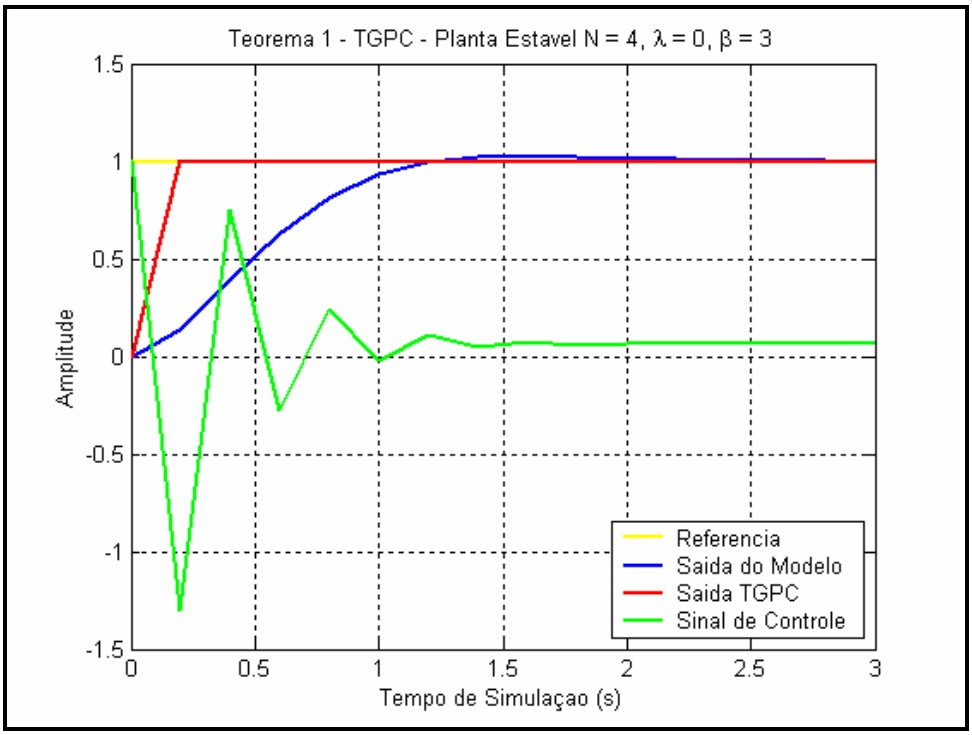

Figura 33 – Resultado obtido da aplicação do teorema 1 ao TGPC para a planta estável.

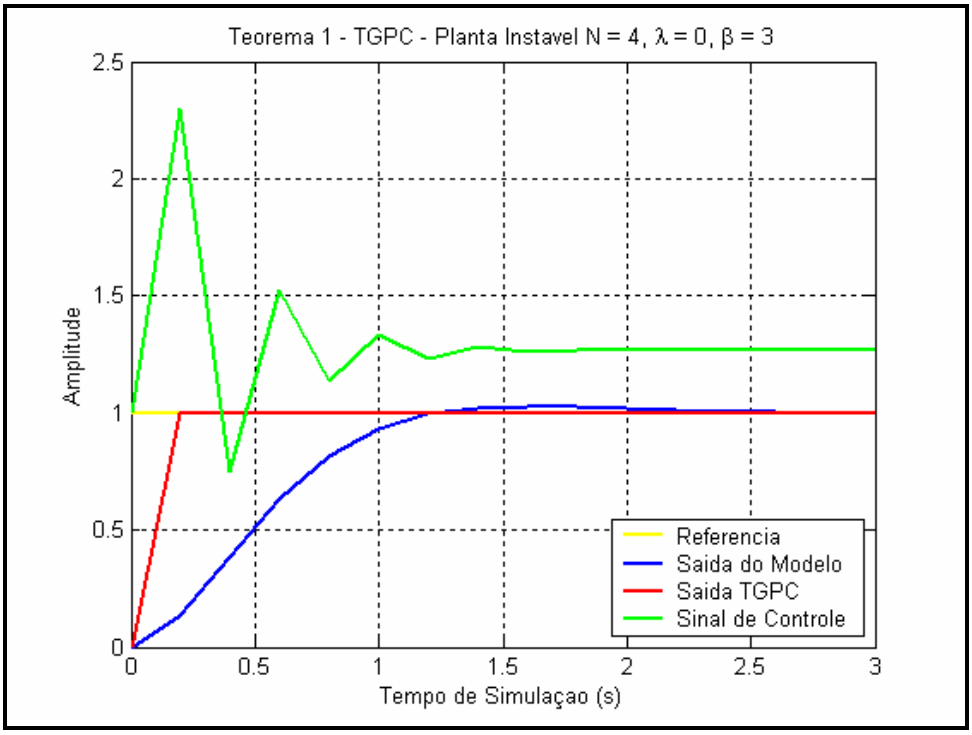

Figura 34 – Resultado obtido da aplicação do teorema 1 ao TGPC para a planta instável.

Analisando-se os resultados obtidos, conforme mostram as Figuras 33 e 34, pode-se destacar que, apesar de a planta instável possuir um pólo em malha aberta

em z = -2,2077, o que leva o sistema a instabilidade, a aplicação do Teorema 1 a este processo causa o deslocamento dos pólos de malha fechada para os zeros da função de transferência do processo, restando ainda um pólo na origem, conduzindo em ambas as situações, planta estável e instável, a um controle *deadbeat* estável. Porém, o mesmo não acontece com a planta de fase não mínima, uma vez que o cancelamento dos zeros e pólos não ocorre de forma perfeita, o que causa a instabilidade do sistema. Logo, para este caso, a lei de controle obtida é inviável.

7.2.3.2 Teorema 2

Este teorema supõe que um sistema de malha aberta estável possui uma resposta ao degrau monotônica, que deve obedecer à equação (5.30) e $N_1 = 1$, $N = (N - N_1 + 1) = N$, $\lambda = 0$, $\beta > 0$ e $g_1 > g_\infty / 2$. Dessa forma, foi obtido o sistema cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 16 e que possui os coeficientes da resposta ao degrau conforme equação (7.7).

Tabela 16 – Parâmetros da planta utilizada na simulação do teorema 2.

Tipo	**Parâmetros**			
	$\mathbf{a_1}$	$\mathbf{a_2}$	$\mathbf{b_0}$	$\mathbf{b_1}$
Estável	0,2	-0,5	2,0	0,8

$$G = \begin{bmatrix} 2{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 \\ 2{,}4000 & 2{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 \\ 3{,}3200 & 2{,}4000 & 2{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 \\ 3{,}3360 & 3{,}3200 & 2{,}4000 & 2{,}0000 & 0{,}0000 \\ 3{,}7928 & 3{,}3360 & 3{,}3200 & 2{,}4000 & 2{,}0000 \end{bmatrix} \tag{7.7}$$

Analisando-se a matriz G expressa por (7.7), pode-se observar que os coeficientes da resposta ao degrau atendem ao critério estabelecido em (5.20) e que $g_1 > g_5/2$, ou seja, o valor do lado direito da desigualdade equivale a 1,8964 e,

portanto, esse outro critério também é obedecido, pois $g_1 = 2$. Assim, tomando-se $N_1 = 1$, $N = 5$, $\lambda = 0$ e $\beta = 5$, obtém-se o gráfico mostrado na Figura 35.

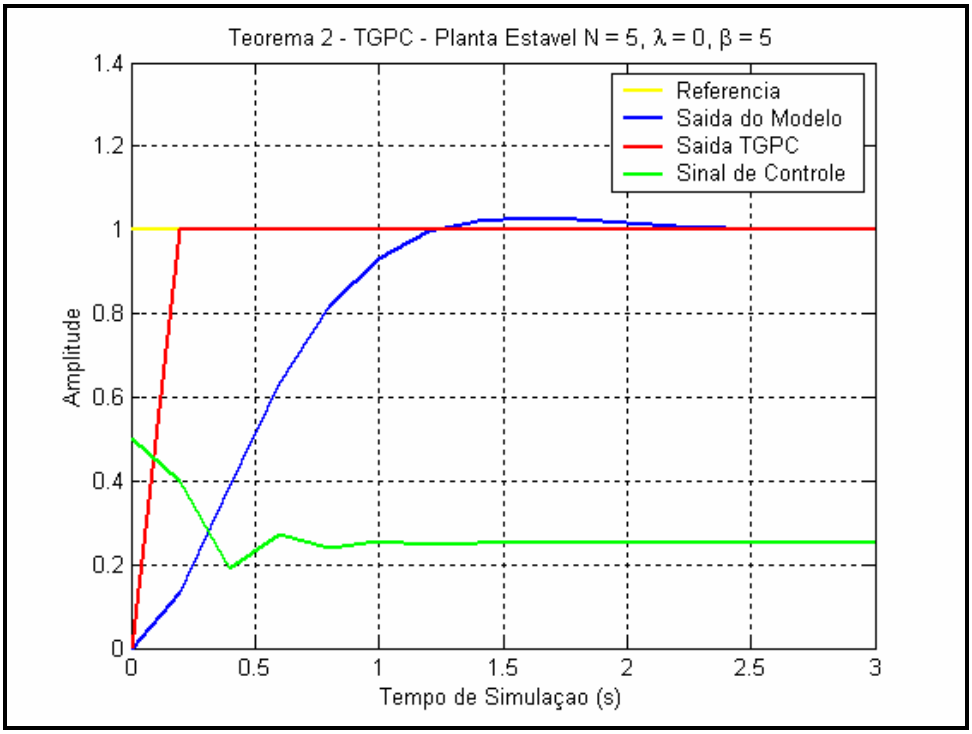

Figura 35 – Resultado obtido da aplicação do teorema 2 ao TGPC para uma planta estável.

Logo, do enunciado do teorema 2, conclui-se que o sistema com controlador TGPC apresentado na Tabela 16, cujo resultado obtido na simulação do TGPC está ilustrado na Figura 35, é estável em malha fechada. Mas, da mesma forma que o teorema 1, a lei de controle obtida da minimização da função objetivo de passo único, impõe a colocação dos pólos em malha fechada sobre os zeros da função de transferência do processo, o que conduz a um controlador *deadbeat* estável.

7.2.3.3 Teorema 3

O teorema 3 condiciona que se um sistema de malha aberta é estável e possui resposta convexa, de modo que a equação (5.30) seja atendida e se $N_1 = 1$,

$(N - N_1 + 1) = N$, $\lambda = 0$ e $\beta > 0$ então, pode-se garantir que o sistema de malha fechada é estável.

Assim, considerando-se a planta, cujos parâmetros discretos sejam mostrados na Tabela 17 e a matriz G, correspondente aos coeficientes da resposta ao degrau, de acordo com a equação (7.8) e tomando-se $N_1 = 1$, $N = 6$, $\lambda = 0$ e $\beta = 10$, obtém-se o resultado da simulação do TGPC conforme apresentado na Figura 36.

Tabela 17 – Parâmetros da planta utilizada na simulação do teorema 3.

Tipo	**Parâmetros**			
	$\mathbf{a_1}$	$\mathbf{a_2}$	$\mathbf{b_0}$	$\mathbf{b_1}$
Estável	-1,8	0,9	15,4	-13,4

$$G = \begin{bmatrix} 15{,}4000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 \\ 29{,}9200 & 15{,}4000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 \\ 42{,}1960 & 29{,}9200 & 15{,}4000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 \\ 51{,}2248 & 42{,}1960 & 29{,}9200 & 15{,}4000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 \\ 56{,}4282 & 51{,}2248 & 42{,}1960 & 29{,}9200 & 15{,}4000 & 0{,}0000 \\ 57{,}6685 & 56{,}4282 & 51{,}2248 & 42{,}1960 & 29{,}9200 & 15{,}4000 \end{bmatrix} \tag{7.8}$$

Analisando-se os coeficientes da matriz *G* expressa em (7.8), observa-se que os citados coeficientes obedecem à condição estabelecida em (5.30), uma vez que, 15,4 > (29,92 – 15,4) > (42,196 – 29,92) > (51,2248 – 42,196) > (56,4282 – 51,2248) > (57,6685 – 56,4282), ou seja, 15,4 > 14,52 > 12,276 > 9,0288 > 5,2034 > 1,2403 > 0. Além disso, conforme se observa na Tabela 17 e na Figura 36, todos os demais critérios exigidos foram atendidos. Portanto, pode-se inferir que a planta utilizada na simulação do TGPC, para o teorema 3, é estável em malha fechada.

Observa-se, ainda, que para este teorema a minimização da função objetivo gera uma lei de controle que desloca os pólos de malha fechada para a mesma posição dos zeros da função de transferência do processo, conduzindo, também, a um controlador *deadbeat* estável.

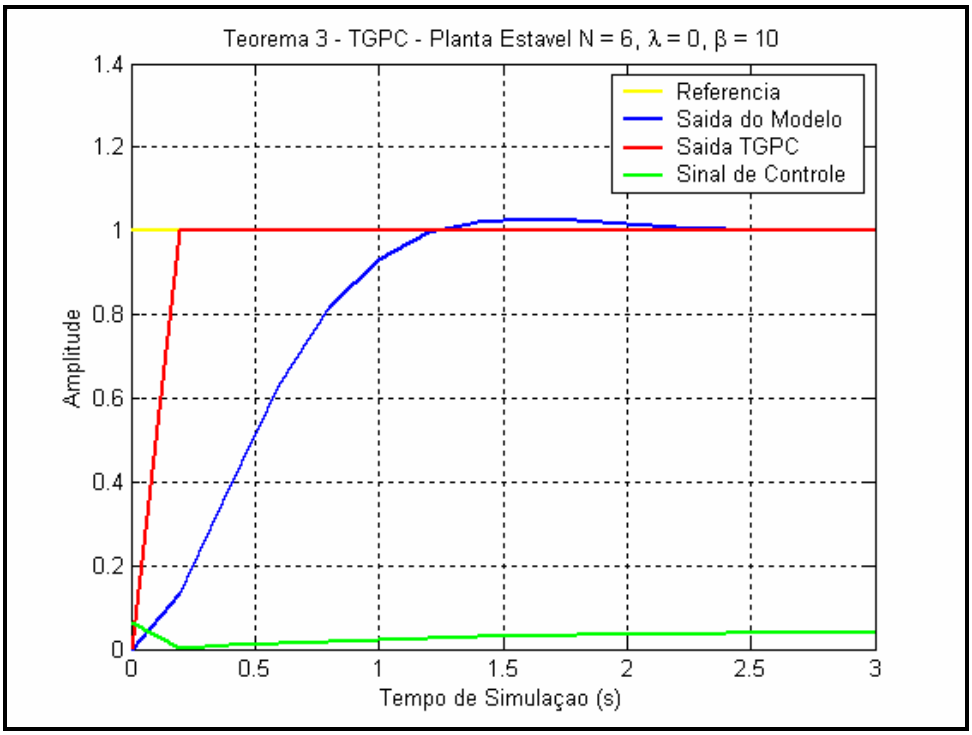

Figura 36 – Resultado obtido da aplicação do teorema 3 ao TGPC para uma planta estável.

7.2.3.4 Estudo do Lugar das Raízes

Considerando-se que os Teoremas 1, 2 e 3 possuem aplicação restritiva, esta subseção tem por objetivo a utilização de um critério de estabilidade que possa ser generalizado para os controladores TGPC, GPC e PID implementados neste trabalho, independentemente do tipo de planta utilizada.

Um sistema discreto, causal, linear e invariante no tempo é estável se todas as raízes da equação característica tiverem módulo inferior à unidade, isto é, os pólos do sistema discreto devem estar localizados, relativamente ao plano *z*, no interior da circunferência de raio unitário.

Os pólos e zeros de uma função de transferência podem ser representados através de um diagrama, determinado conforme o método do lugar das raízes, que em geral, baseiam-se no uso de métodos computacionais para cálculo destas raízes, que em seguida são usadas no traçado do lugar das raízes.

O lugar das raízes mostra a localização dos pólos de malha fechada em função da variação de um determinado parâmetro da função de transferência. Além de possibilitar a determinação da estabilidade de um sistema em malha fechada, o lugar das raízes é um método bastante utilizado no projeto de controladores.

Assim, para as simulações, foi feita a variação de cada parâmetro separadamente sem a preocupação com os demais. Em todos os casos, apenas um dos parâmetros foi variado por vez e os demais, foram fixados em seus valores ótimos já determinados anteriormente, conforme mostrado nas Figuras 37 a 44.

As Figuras 37 a 44 mostram as simulações realizadas para todos os tipos de processos estudados, mas aplicadas apenas para a planta de fase não mínima e, na Tabela 18 são apresentados os zeros e pólos obtidos para este tipo de planta, considerando-se os controladores TGPC, GPC e PID, respectivamente.

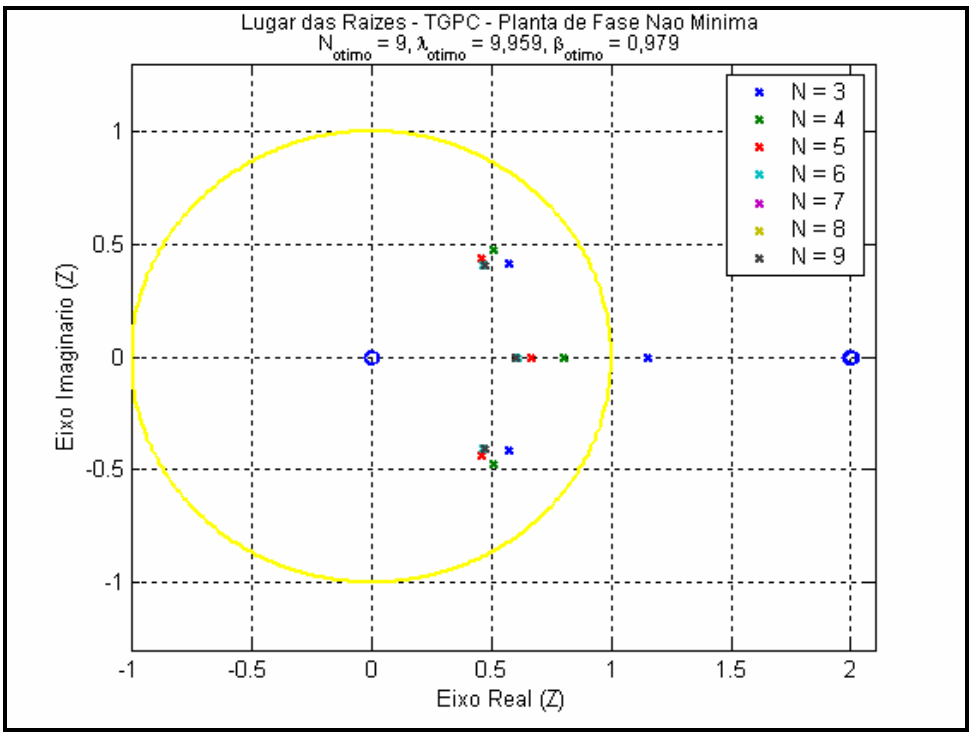

Figura 37 – Lugar das raízes do TGPC para a planta de fase não mínima com variação do horizonte de predição N.

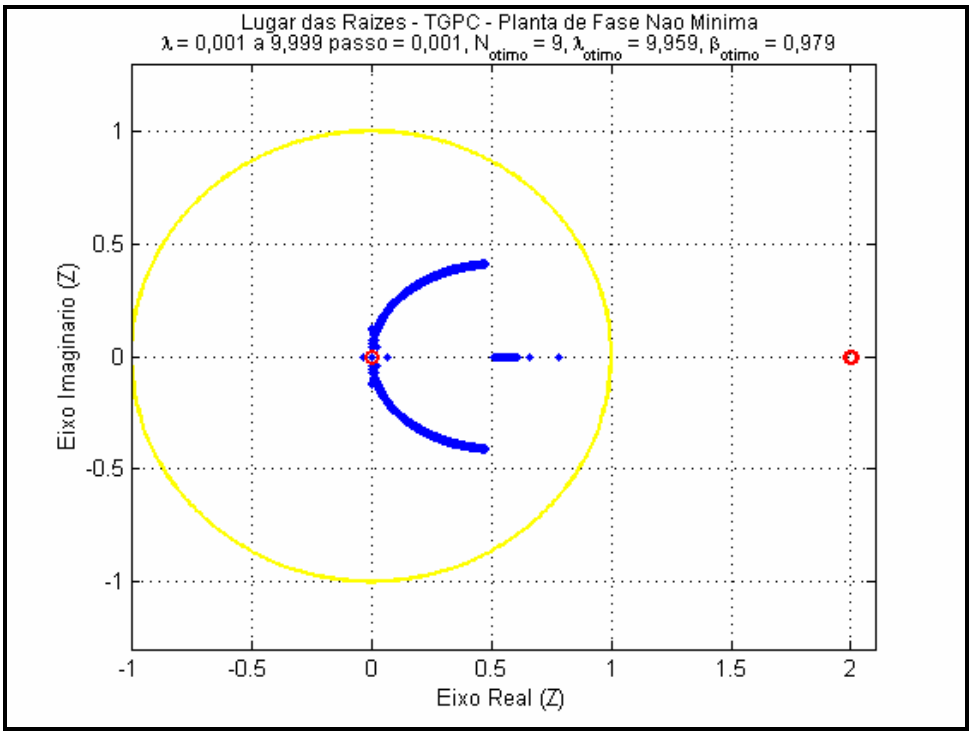

Figura 38 – Lugar das raízes do TGPC para a planta de fase não mínima com variação da função de pesos λ.

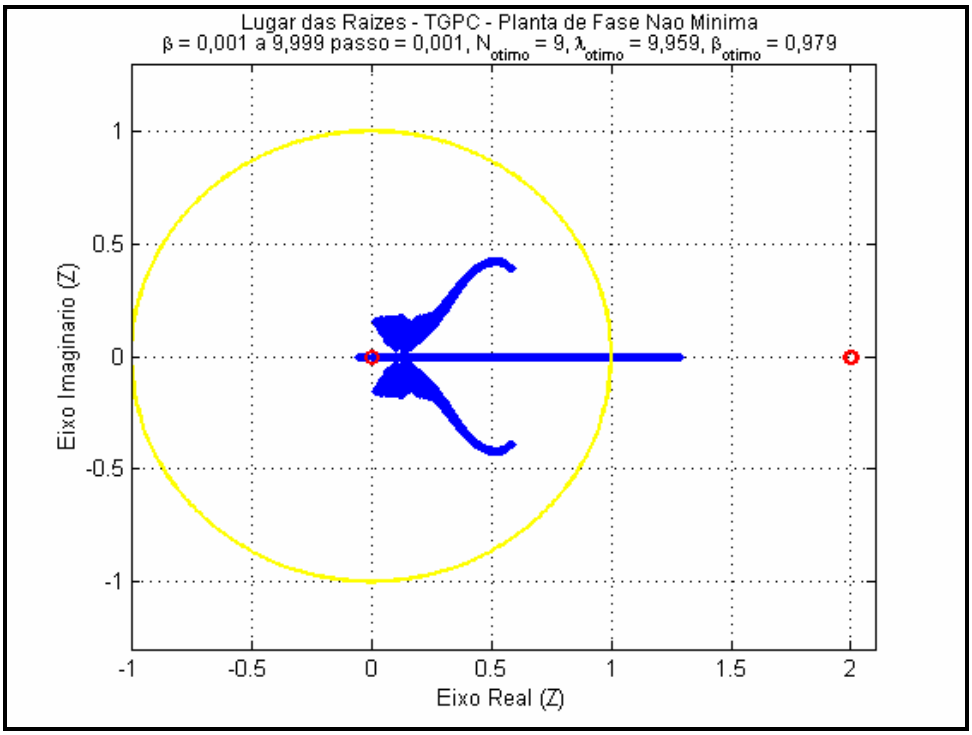

Figura 39 – Lugar das raízes do TGPC para a planta de fase não mínima com variação da função de pesos β.

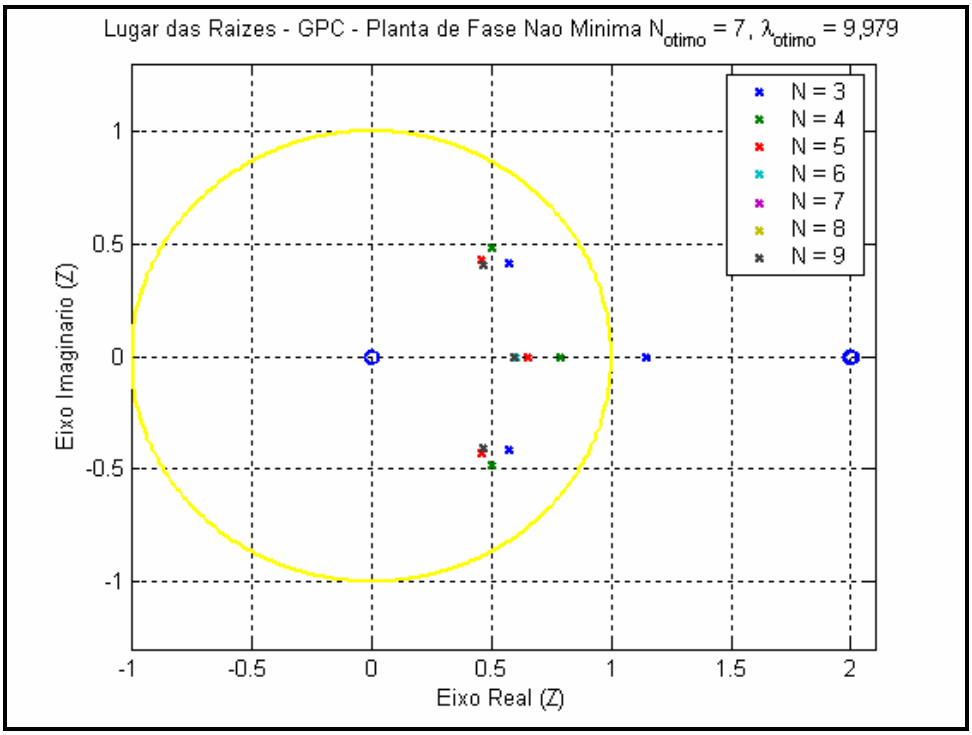

Figura 40 – Lugar das raízes do GPC para a planta de fase não mínima com variação do horizonte de predição N.

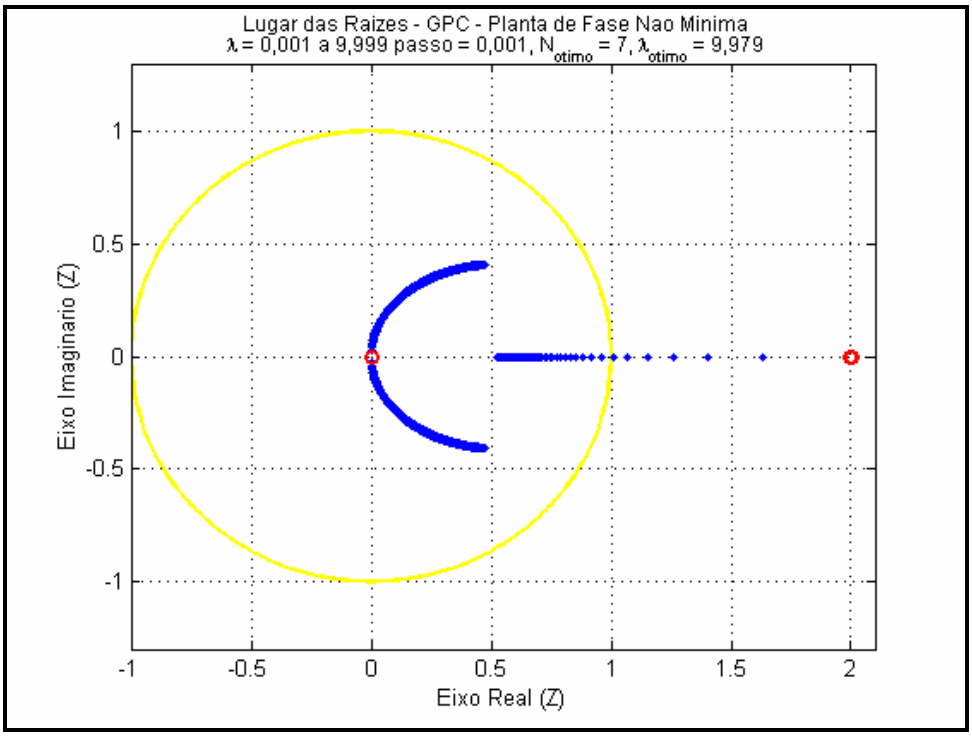

Figura 41 – Lugar das raízes do GPC para a planta de fase não mínima com variação da função de pesos λ.

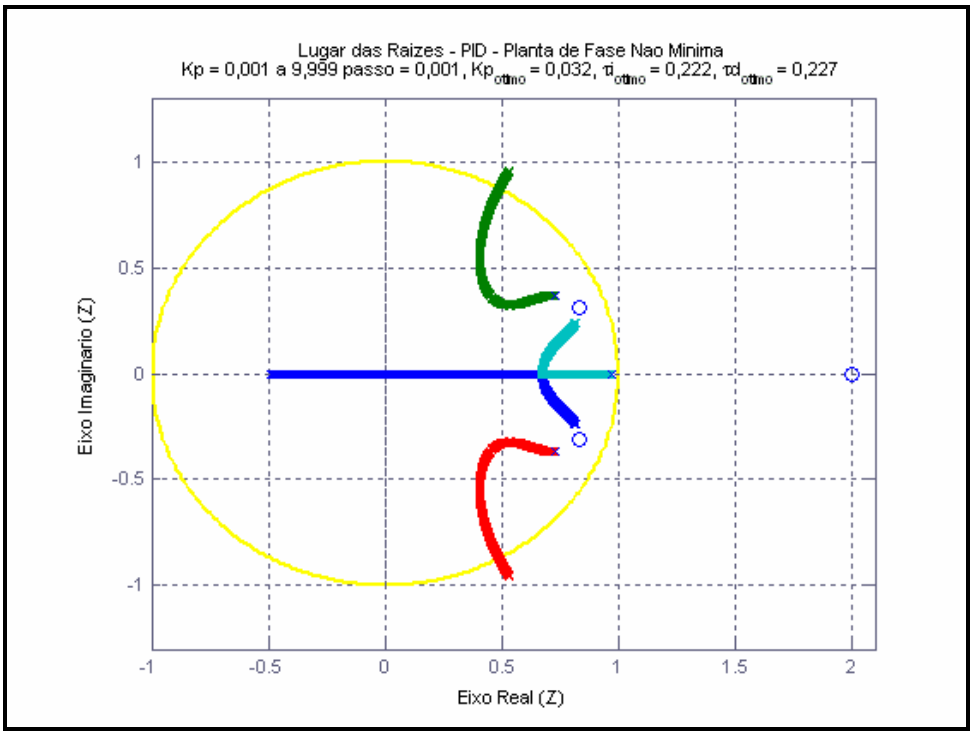

Figura 42 – Lugar das raízes do PID para a planta de fase não mínima com variação do ganho proporcional K_p.

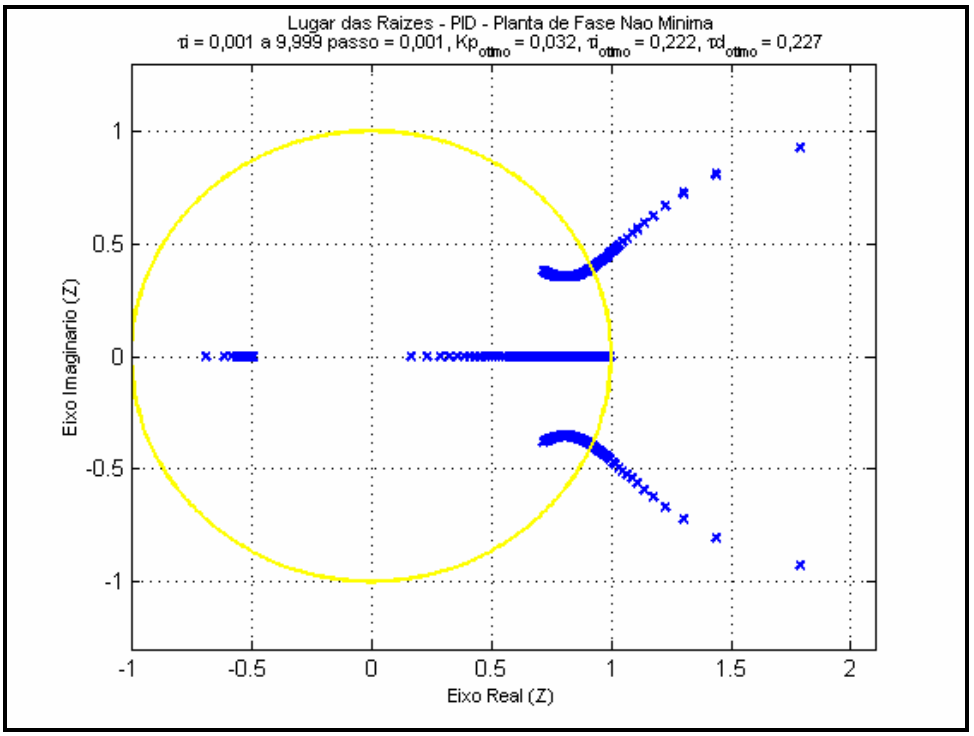

Figura 43 – Lugar das raízes do PID para a planta de fase não mínima com variação da constante de tempo integral τ_i.

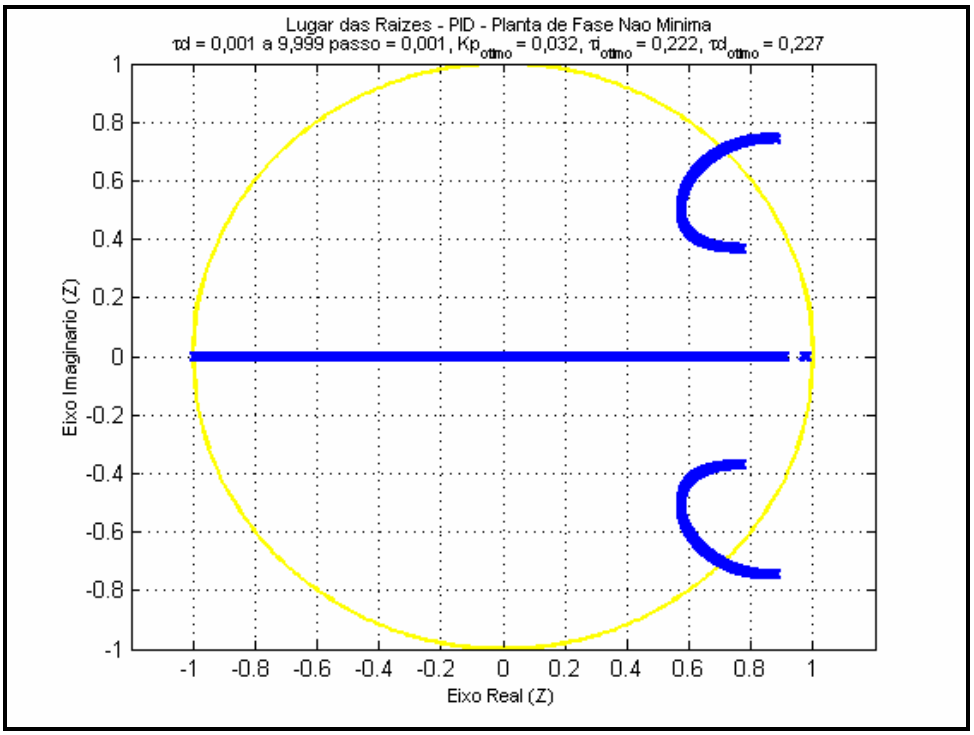

Figura 44 – Lugar das raízes do PID para a planta de fase não mínima com variação da constante de tempo derivativo τ_d.

Tabela 18 – Zeros e pólos obtidos para o TGPC, GPC e PID, para a planta de fase não mínima.

Controlador	N/Kp	λ/τ_i	β/τ_d	Zeros	Pólos
TGPC	9	9,959	0,979	0	0,6052
				2	0,4729 + 0,4098i
					0,4729 - 0,4098i
GPC	7	9,979	1,000	0	0,5932
				2	0,4714 + 0,4068i
					0,4714 - 0,4068i
PID	0,032	0,222	0,227	2	-0,4912
				0,8330 + 0,3112i	0,9698
				0,8330 - 0,3112i	0,7334 + 0,3712i
					0,7334 - 0,3712i

Analisando-se os resultados apresentados nas Figuras 37 a 44 e na Tabela 18, observa-se que para o controlador TGPC, o valor do horizonte de predição e controle *N*, quando igual a 3, causa a instabilidade do sistema, porém, a existência

do parâmetro β diferente de 1, impede a ocorrência de valores da função de ponderação da variação do sinal de controle, λ, capazes de instabilizar o processo embora, a própria função de pesos, β, apresente maior sensibilidade ao valor do horizonte de controle, *N*, pois β apresenta valores que tornam o sistema instável, conforme mostra a Figura 39.

Relativamente ao GPC, como a função de pesos β, não exerce qualquer influência sobre os demais parâmetros, visto que possui valor igual a 1, quando o valor do horizonte de controle é igual a 3, o processo torna-se instável, e neste caso, a função de ponderação, λ, também possui valores localizados fora do círculo unitário.

No tocante ao PID, pode-se constatar que quando o ganho ultrapassa o valor de 9,66, o sistema torna-se instável. Assim como, dentro da faixa estudada, existem valores para os parâmetros τ_i e τ_d, que instabilizam o sistema conforme se observa nas Figuras 11 e 12.

Logo, para os valores ótimos determinados através da aplicação do algoritmo genético, para os parâmetros dos diversos controladores utilizados nesta simulação, pode-se comprovar que a planta de fase não mínima é estável, com base no método do lugar das raízes.

7.3 ADIÇÃO DE RUÍDO NA SAÍDA

O conhecimento da dinâmica do ruído a ser aplicado ao processo é fator determinante da qualidade das predições feitas acerca das saídas destes processos. Quanto melhores forem as predições melhor será o desempenho do controlador preditivo (Kerscher, 2006). Assim, nesta seção, será analisado o efeito da inserção de um ruído gaussiano na saída do processo, ou seja, a adição de uma quantidade $\xi(k)$ à saída dos processos estudados.

Serão mostradas apenas as respostas dos sistemas descritos pelas equações (7.1), (7.2) e (7.3), relativamente ao TGPC, porém, a Tabela 19, apresenta também

os resultados obtidos para os controladores GPC e PID. Assim, as Figuras 45, 46, e 47, apresentam os resultados obtidos para o TGPC, nos quais se considerou a inserção de um ruído do tipo gaussiano de média zero e variância igual a 0,01, sobre a saída *y(k)* de todos os processos implementados.

Tabela 19 – Valores dos critérios obtidos para o TGPC, GPC e PID.

Controlador	Critério	Estável	Instável	Fase Não Mínima
	J_{min}	0,0341	0,0884	0,1519
TGPC	ISE	2,1917	2,1859	4,8884
	ITAE	10,6344	9,0773	51,8727
	J_{min}	0,1202	0,0916	0,1526
GPC	ISE	2,2179	2,0990	4,8694
	ITAE	14,1994	8,0035	51,6357
	J_{min}	0,1983	-	0,2183
PID	ISE	2,6311	-	6,0582
	ITAE	21,6074	-	67,0216

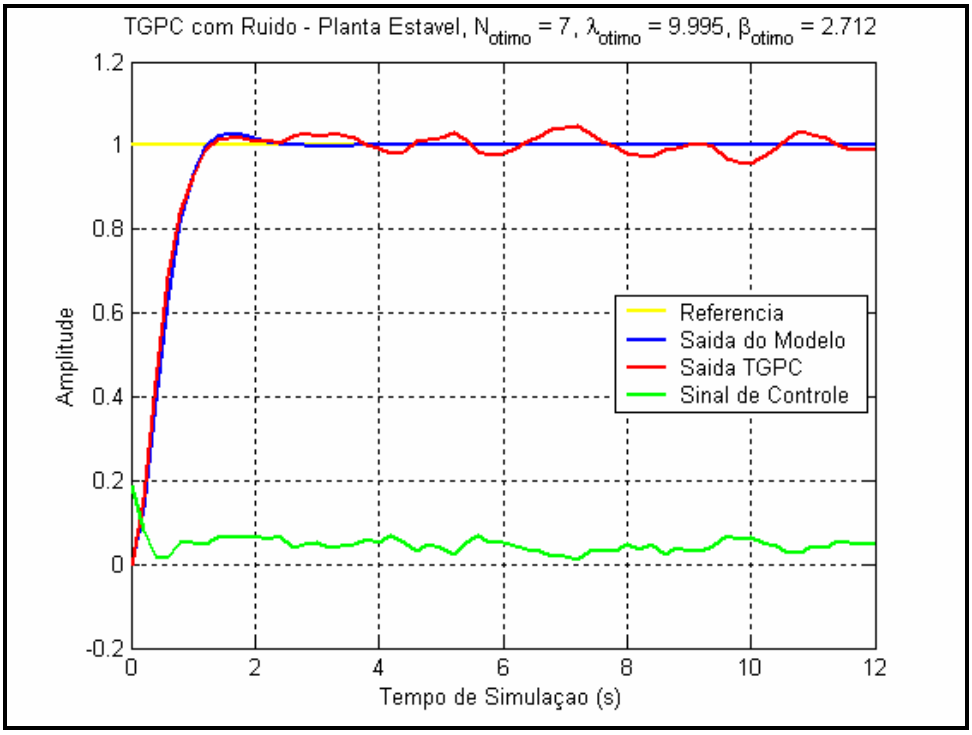

Figura 45 – TGPC com ruído gaussiano na saída para a planta estável.

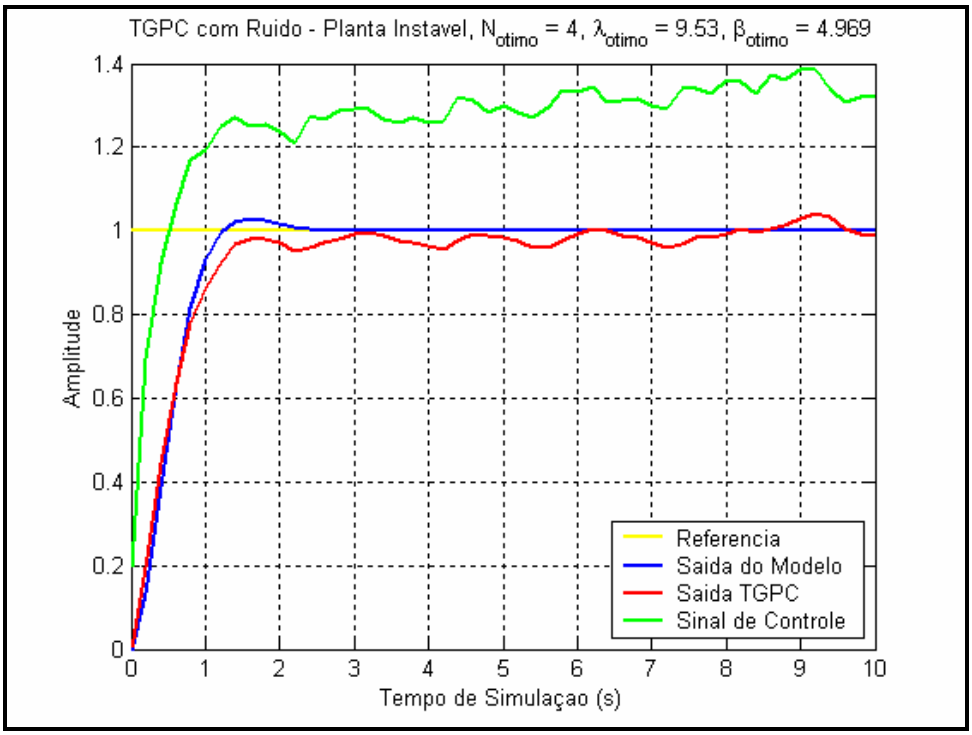

Figura 46 – TGPC com ruído gaussiano na saída para a planta instável.

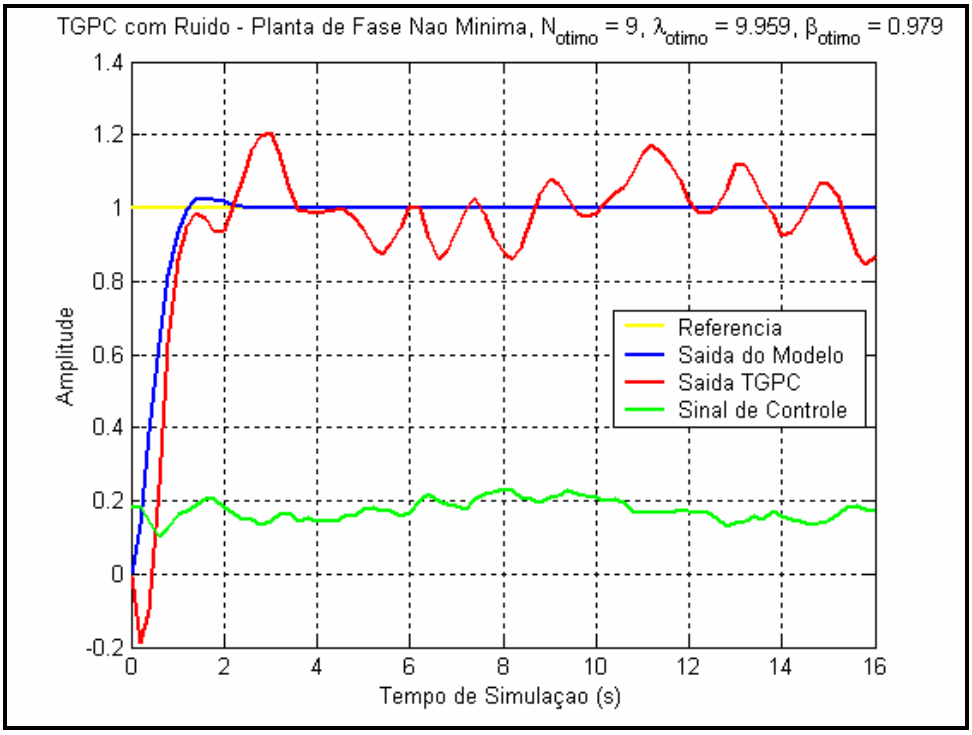

Figura 47 – TGPC com ruído gaussiano na saída para a planta de fase não mínima.

Analisando-se a Tabela 19 e as Figuras 45, 46 e 47, verifica-se o comportamento do controlador TGPC para os diversos tipos de plantas estudadas e percebe-se que mesmo com a significante amplitude do ruído, este controlador apresentou o menor valor para a função critério J_{min}. Embora, comparando-se com o resultado obtido com o GPC, para os critérios ISE e ITAE, conforme já esperado, o TGPC não apresentou melhores resultados, quando comparados para as plantas instável e de fase não mínima, uma vez que estes índices não levam em consideração a ponderação do valor da variação do sinal de controle.

Conseqüentemente, o controlador TGPC apresenta melhor robustez frente ao ruído inserido na variável de saída *y(k)*, quando comparado com os controladores GPC e PID, levando-se em consideração o critério J_{min} apresentado pela metodologia estudada neste trabalho.

8 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

As contribuições deste trabalho tiveram como focos principais a utilização de uma metodologia para determinação dos parâmetros ótimos de controladores TGPC de forma automática e a aplicação de critérios de desempenho, estabilidade e robustez com o intuito de demonstrar que os parâmetros selecionados automaticamente, através da aplicação de um algoritmo genético, são capazes de gerar um controlador TGPC robusto.

Foi apresentado, também, um estudo comparativo entre os algoritmos TGPC, GPC e PID, aos quais foram aplicados a sistemática proposta, visando demonstrar, através de simulações e da análise dos resultados obtidos, maneiras de garantir a estabilidade em malha fechada das plantas estável, instável e de fase não mínima.

Os parâmetros da função critério proposta devem ser selecionados de forma que possa ser avaliada efetivamente a diferença entre as respostas dos controladores implementados, uma vez que o parâmetro *a* somente avalia a ponderação do erro quadrático, sendo esta a diferença entre a trajetória de referência e a saída do sistema, ao passo que o parâmetro *b* leva em consideração apenas a ponderação da variação quadrática do sinal de controle e ambos devem ser escolhidos com prudência para cada processo particular, visto que sua escolha corresponde ao compromisso entre penalizar-se o erro de rastreamento ou a variação do sinal de controle. Esta escolha deve respeitar as características particulares de cada processo onde será levada em conta a maior importância da eliminação do erro ou da preservação dos atuadores, conforme o caso.

A principal vantagem da utilização da metodologia proposta está no fato de esta sistemática dispensar completamente o ajuste manual dos controladores estudados, evitando-se com isso, possíveis falhas decorrentes do ajuste indevido dos parâmetros de tais controladores.

Portanto, através do TGPC foi possível atingir todos os objetivos, inicialmente definidos, bem como comprovar que este algoritmo possui robustez para sistemas de segunda ordem, conforme apresentado pelos processos utilizados como exemplos, sendo possível, também, constatar que os algoritmos genéticos são

técnicas de buscas bastante eficientes para esses tipos de aplicações, pois conseguem encontrar valores satisfatórios para o controlador, vez que são robustos e aplicáveis a uma grande variedade de problemas, não exigem o conhecimento dos gradientes da superfície definida pela função objetivo, são mais resistentes a se prenderem a ótimos locais, além de serem de fácil implementação e proporcionarem maior flexibilidade no tratamento do problema a ser resolvido.

Dessa forma, o TGPC é uma técnica bastante atrativa porque pode ser utilizada para controlar uma grande variedade de processos, desde os muito simples até aqueles com dinâmicas complexas como processos com grande tempo morto, de fase não mínima, instáveis ou multivariáveis. Seu caráter preditivo faz compensar intrinsecamente os tempos mortos, introduz um controle antecipativo e de forma natural as perturbações mensuradas são compensadas. A lei de controle é facilmente implementada e, ainda, permitem tratar as restrições de uma forma sistemática e conceitualmente muito simples durante a fase de projeto.

Quanto às desvantagens da aplicação do TGPC, pode-se citar a obrigatoriedade de utilização de um modelo capaz de representar de forma mais adequada possível o processo real. Como essa não é uma tarefa muito fácil é absolutamente compreensível que, embora esse tipo de controlador apresente resultados bastante satisfatórios, careça de estudos mais profundos, para se obter com maior facilidade o modelo mais apropriado para o processo a ser implementado.

Outra desvantagem do TGPC, refere-se à determinação de seus parâmetros, principalmente, com relação ao valor do horizonte de controle ou predição, N, pois quanto maior o valor deste parâmetro maior será o esforço computacional requerido. Isto ocorre em virtude de o TGPC realizar o cálculo da inversa de uma matriz N x N, e assim, tornar o algoritmo excessivamente lento para grandes valores de N.

Como perspectivas de trabalhos futuros, podem ser apresentadas as seguintes sugestões:

- utilização de restrições na ação de controle, com o intuito de eliminar a parcela excedente do sinal de controle, capaz de provocar a violação das restrições, que poderia conduzir a um desempenho insatisfatório do sistema em malha fechada;

- . estudos relativos a robustez do sistema em relação aos parâmetros de sintonia dos controladores (variação da função λ, avaliação da ponderação da função β, horizonte de predição/controle, N);
- aplicação da metodologia proposta a sistemas com grandes atrasos de transportes e plantas com tempo morto desconhecido;
- estender a sistemática utilizada para sistemas com ordem superior a segunda ordem;
- estudo de técnicas menos restritivas, para demonstrar a estabilidade do TGPC, que possam ser aplicadas a uma maior variedade de processos, mas que mantivesse a facilidade de implementação do algoritmo;
- aplicação da metodologia a plantas reais, visando a realização de ajustes na própria metodologia, para permitir a melhor resposta possível para o sistema em análise.
- utilização de técnicas híbridas para obtenção dos parâmetros ótimos do TGPC, pois, apesar de apresentarem resultados satisfatórios, os algoritmos genéticos possuem uma certa deficiência na convergência final, sobretudo porque, na fase final a população compartilha praticamente de um mesmo código genético. A partir deste estágio, qualquer melhoria deve-se praticamente à mutação, que, além de ocorrer com baixa probabilidade (comparativamente ao cruzamento), também age aleatoriamente. A precisão na solução para o problema de convergência final pode ser a junção do AG com um método determinístico, visto que os métodos determinísticos têm a forte característica de fornecer resultados precisos com poucas iterações.
- pode-se ainda sugerir dentro de um âmbito mais geral, os seguintes temas: investigar a robustez do TGPC em relação à rejeição das incertezas não estruturadas; utilização de modelos não lineares; implementação da identificação dinâmica da planta a ser controlada e fornecer em tempo real o modelo ao TGPC.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Ricardo Matsumura de. **Computação evolutiva aplicada ao aprendizado de máquinas**. 2004. 49 f. Monografia (Especialização em Computação)-Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

ÅSTRÖM, Karl Johan; WITTENMARK Björn. **Adaptive control**. Sweden: Department of Automatic Control, 1989.

_____. **Computer-controlled systems: theory and design**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

BARCZAK, Czeslau L. **Controle digital de sistemas dinâmicos: projeto e análise**. São Paulo: Edgard Blücher, 1995.

BITMEAD, Robert R.; GEVERS, Michel; WERTZ, Vincent. **Adaptive control systems: the thinking man's GPC**. Rio de Janeiro: Prentice Hall, 1990.

BOLTON, W. **Engenharia de controle**. Tradução de Valcere Vieira Rocha e Silva. São Paulo: Makron Books, 1995.

BORDONS, Carlos. **Control predictivo generalizado de procesos industriales: formulaciones aproximadas**. 1994. 203 f. Tesis (Doctoral en Ingeniería)-Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Sevilla, España.

BORDONS, Carlos; CAMACHO, Eduardo F. **A generalized predictive controller for a wide class of industrial processes**. IEEE Transactions on control systems technology, v. 26, nº 3, May 1998.

CAMACHO, Eduardo F.; BERENGUEL, Manuel; RUBIO, Francisco R. **Advanced control of solar plants**. Sevilla: Springer, 1997.

CAMACHO, Eduardo F.; BORDONS, Carlos. **Control predictivo: pasado, presente y futuro**. 2004. 24 f. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, España.

CAON JÚNIOR, José Roberto. **Controladores PID industriais com sintonia automática por realimentação a relê**. 1999. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CASTRO, Rodrigo Evangelista de. **Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos: estudo e aplicações**. 2001. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CLARKE, D. W.; MOHTADI, C.; TUFFS, P. S. **Generalized predictive control – part I and II**. Automatica, Vol. 23, Nº 2, pp. 137-160, 1987.

COELHO, Leandro Santos. **Fundamentos, potencialidades e aplicações dos algoritmos evolutivos**. 103 f. (Notas de Matemática Aplicada; 2). São Paulo: SBMAC, 2003.

FONTES, Adhemar de Barros. **Desenvolvimento e avaliação de controladores preditivos baseados em modelos bilineares**. 2002. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte.

GARRIDO, Santiago. **Identificación, estimación y control de sistemas no-lineales mediante optimización genética restringida**. 1999. 187 f. Tesis (Maestro en Ingeniería)-Departamento de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, España.

GOMMA, H. W.; OWENS, D. H. **Time varying weighting generalized predictive control (TGPC) with prediction to performance, stability and robustness**. Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control, Arizona, USA, December 1999.

GOMMA, H. W.; OWENS, D. H.; ROSSITER, D. **Time varying weighting generalized predictive control (TGPC): an application to a 1.5 MW free turbine engine**. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications, Mexico City, Mexico, September 2001.

GOMMA, H. W.; OWENS, D. H. **Stability for generalized predictive control (GPC) and time varying weighting generalized predictive control (TGPC)**. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, Taipei, Taiwan, September 2004.

KERSCHER, Luis Fernando. **Controle preditivo baseado em modelo com critérios de otimização aplicada a processos de refino**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Federal do Paraná, Paraná.

KRÓLIKOWSKI, Andrzej; JERZY, Damian. **Self-tuning generalized predictive control with input constraints**. International Journal Appl. Math. Comput. V. 11, nº 2, 2001.

MARCOLLA, Reinaldo Feliponi. **Investigação e aplicação de técnicas de modelagem e controle de processos baseados em redes neurais com ajuste em linha utilizando algoritmos genéticos**. 2005. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

PIMENTA, Karla Boaventura. **Controle de juntas robóticas usando controlador preditivo generalizado adaptativo direto**. 2003. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

PINHEIRO, Frederico Antônio. **Aplicação de um algoritmo genético no estudo das perdas e do controle de tensão em sistemas elétricos de potência**. 1998. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

RICO, Julio Elias Normey. **Controle preditivo de processos com grandes atrasos de transporte**. 2004. 61 f. (Notas de Aula)-Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

ROBINSON, B. D.; CLARKE, D. W. **Robustness effects of a prefilter in generalised predictive control**. IEE Proceeding part D, v. 138, Nº 1, January 1991.

ROSSITER, J. A.; KOUVARITAKIS, B. **Numerical robustness and efficiency of generalised predictive control algorithms with guaranteed stability**. Proceeding of IEE control 94, Warwick, UK, 1994.

SANTOS, José Eli Santos dos. **Critérios de desempenho e aspectos de robustez na síntese de controladores preditivos adaptativos**. 1998. 125 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

SCHNELL, Alex Sandro. **Algoritmos genéticos para determinação de raízes de equações não lineares: estudo e aplicações**. 2001. 124 f. Monografia (Graduação em Computação)-Faculdade de Informática, Universidade Luterana do Brasil, Rio Grande do Sul.

SILVA, Flávio Thimotio. **Simulated annealing aplicado ao problema de sintonia de parâmetros de controladores PID**. 2005. 73 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação)-Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

SOARES, Gustavo Luis. **Algoritmos genéticos: estudo, novas técnicas e aplicações**. 1997. 145 f. Monografia (Especialização em Engenharia)-Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

SOBRINHO, Antonio Carlos C. da S.; GIRARDI, Maria Del Rosário. **Uma análise das aplicações dos algoritmos genéticos em sistemas de acesso à informação personalizada**. 2004. 12 f. (Artigo)-Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, Maranhão.

TACCONI, Eugênio et al. **Controladores basados en estratégias PID**. 2005. 54 f. LEICI, Facultad de Ingeniería,

VASCONCELOS, Antonio Santos. **Desenvolvimento de um módulo de avaliação da qualidade de controle em sistemas industriais distribuídos sobre a plataforma arcos**. 2007. 58 f. Monografia (Graduação em Ciências da Computação)-Departamento de Ciências da Computação, Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia.

YOON, Tae-Woong; CLARKE, D. W. **A reformulation of receding-horizon predictive control**. International Journal Systems SCI. v. 26, Nº 7, 1995.

ZUBEN, Fernando J. Von. **Computação evolutiva: uma abordagem pragmática**. 200_. 21 f. (Tutorial)-Departamento de Controle e Automação, Universidade de Campinas, São Paulo.

ANEXO A – TEOREMA DE ROUCHÉ

O Teorema de Rouché permite conhecer o número de zeros e pólos, inclusive os que possuem multiplicidade, de uma função *f* dentro de uma região delimitada, através do conhecimento do número de zeros e pólos nesta região, de outra função conhecida *g*.

Teorema de Rouché. Seja, *f* e *g* duas funções meromorfas em Ω. Seja $\gamma \subset \Omega$ uma curva de Jordan (fechada) homotópica para um ponto em Ω e que não passa pelos zeros nem pelos pólos de *f* nem de *g*. Seja *R* a região delimitada fechada por γ. Se

$$|f(z)+g(z)| < |f(z)| + |g(z)| \quad \forall z \in \gamma^* \tag{A.1}$$

então a quantidade de zeros menos a quantidade de pólos de *f* em *R* (incluindo as multiplicidades) é igual a quantidade de zeros menos a quantidade de pólos de g em *R* (incluindo as multiplicidades).

Nota. A desigualdade nas hipóteses do Teorema de Rouché pode ser substituída pela seguinte. Se se verifica que:

$$|f(z)-g(z)| < |g(z)| \quad \forall z \in \gamma^* \tag{A.2}$$

então, vale o enunciado do Teorema de Rouché.

De fato, se é verdade que $|f(z)-g(z)| < |g(z)| \quad \forall z \in \gamma^*$, então $|f(z)+-g(z)| < |-g(z)| + |f(z)|$ e se verifica a hipótese do Teorema de Rouché para *f* e –*g*. Portanto se verifica o enunciado do Teorema de Rouché, já que os zeros e pólos de –*g* e *g* são os mesmos com as mesmas multiplicidades.

Demonstração:

Dividindo a desigualdade da hipótese entre $|g(z)| \neq 0$, para $z \in \gamma^*$, obtém-se:

$$\left| \frac{f(z)}{g(z)} + 1 \right| < \frac{|f(z)|}{|g(z)|} + 1 \tag{A.3}$$

Então, o quociente *f(z)/g(z)* não é um número real ≥ 0, para nenhum $z \in \gamma^*$, já que para todo número real $\lambda \geq 0$ se observa que $|\lambda + 1| = \lambda + 1$ e não a desigualdade da hipótese.

Então a função

$$h(z) = Log_{[0,2\pi)} \frac{f(z)}{g(z)} \tag{A.4}$$

está bem definida e é contínua e derivável para todo $z \in \gamma^*$, já que o número complexo dentro do logaritmo nunca é um real $\lambda \geq 0$. Derivando *h(z)* obtém-se:

$$h'(z) = \frac{g(z)}{f(z)} . \frac{f'(z)g(z) - f(z)g'(z)}{(g(z))^2} = \frac{f'(z)}{f(z)} - \frac{g'(z)}{g(z)} \tag{A.5}$$

Pela regra de Barrow $\int_\gamma h'(z)dz - 0$, já que a curva γ é fechada. Logo, pode-se deduzir que:

$$0 = \int_\gamma h'(z)dz = \int_\gamma \frac{f'(z)}{f(z)} dz - \int_\gamma \frac{g'(z)}{g(z)} dz = 0 \tag{A.6}$$

em que:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_\gamma \frac{f'(z)}{f(z)} dz = \frac{1}{2\pi i} \int_\gamma \frac{g'(z)}{g(z)} dz \tag{A.7}$$

Aplicando o princípio do argumento, o primeiro membro da igualdade (A.7) é igual a quantidade de zeros menos a quantidade de pólos de *f* na região *R* (incluindo as multiplicidades). Analogamente, o segundo membro da igualdade (A.7) é igual a quantidade de zeros menos a quantidade de pólos de *g* na região *R* (incluindo as multiplicidades). Portanto, fica completada a prova.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo