

**DINCON 2017**CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES  
30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

## Sintonia Eficiente do Esforço de Controle do GPC com horizonte de controle unitário

**Ademir José Piontkovsky Filho**<sup>1</sup>

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UFES, Vitória - ES

**José Leandro Félix Salles**<sup>2</sup>

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UFES, Vitória - ES

**Resumo.** O presente trabalho apresenta uma técnica para sintonia de parâmetros do Controlador Preditivo Generalizado (*Generalized Predictive Control* – GPC) com horizonte de controle unitário. Este caso particular do GPC permite desenvolver um método de sintonia que utiliza, numa primeira etapa, o Lugar das Raízes (LR) da equação característica para escolha de um conjunto de parâmetros de sintonia que garantam a estabilidade do GPC. Em seguida, este conjunto de parâmetros deve formar a população inicial do Algoritmo Genético (AG), o qual determina a melhor sintonia do controlador GPC que atenda às especificações da resposta transitória. Resultados numéricos mostram a eficiência desta abordagem na sintonia dos parâmetros do GPC aplicado a uma planta instável.

**Palavras-chave.** GPC, Sintonia, Algoritmo Genético, Lugar das Raízes

## 1 Introdução

Ao longo dos anos, observou-se um aumento na utilização de controladores preditivos na indústria de base no Brasil em virtude de sua aplicabilidade tanto em processos mais simples – como Sistemas de Primeira Ordem mais Tempo Morto (*First Order Plus Dead Time* – FOPDT) – como em processos de ordem superior multivariáveis e variantes no tempo [1]. Apesar da maioria das aplicações industriais utilizarem a estratégia do controlador PID (Proporcional Integral e Derivativo), verifica-se que o MPC (*Model Predictive Control*) possui um desempenho melhor que o PID devido a sua capacidade de manipulação das restrições presentes nas variáveis de processo e de controle. Os principais obstáculos enfrentados para a implementação do MPC na indústria são: (i) o custo computacional elevado; (ii) algoritmos de otimização não estarem disponíveis nos *hardwares* mais usados para malhas de controle [2].

De fato, o desempenho e a estabilidade do controlador preditivo depende da sintonia adequada dos horizontes de predição  $h_p$  e controle  $h_c$ , além dos fatores de erro de previsão  $\delta$  e de esforço de controle  $\lambda$ .

---

<sup>1</sup> demiopiontkovsky@gmail.com

<sup>2</sup> jleandro@ele.ufes.br

O método de escolha destes parâmetros, em geral, é realizada através de tentativa e erro ou por métodos heurísticos [3]. Além disto, de acordo com [4], não existe um método geral para sintonia do esforço de controle  $\lambda$ . Já o horizonte de previsão  $hp$  deve pertencer ao intervalo entre o número de amostras contido no máximo tempo morto estimado e o número de amostras contido no tempo de acomodação, como sugerem [5], [6] e [7]. Em relação ao horizonte de controle  $hc$ , quando este é fixado em 1, é possível encontrar a solução explícita da função de transferência em malha fechada do sistema. Logo, a partir da equação característica é possível obter o lugar das raízes, o qual pode ser utilizado como principal ferramenta para a escolha dos parâmetros do GPC [8].

Através da análise do lugar das raízes, [8] realizou escolhas do esforço de controle  $\lambda$  nas regiões onde se obtinha valores de fator de amortecimento  $\zeta$  perto de 0,707, o que é fácil de se visualizar no lugar das raízes, e simulou sistemas em malha fechada para cada uma dessas escolhas, ou seja, um processo não-automático, avaliando os índices Integral do Erro Quadrático  $ISE$ , *overshoot*  $OV$ , tempo de acomodação  $ts$ , máximo valor da variação do sinal de controle  $\Delta u(k)$ , máximo valor do sinal de controle  $u(k)$ , para então decidir qual melhor valor de  $\lambda$ .

Outra maneira de solução explícita foi proposta por [2], onde obteve-se antecipadamente todas as possíveis soluções do problema de otimização do MPC para posteriormente implementá-las em *hardware*. Este método é utilizado para controle de sistemas com dinâmica rápida, como em [9], sendo necessário o conhecimento preciso do modelo matemático do processo para ser implementado.

Já o método proposto neste artigo a sintonia dos parâmetros  $\lambda$  e  $\delta$  do GPC é feita por Algoritmo Genético após uma pré escolha do usuário da faixa adequada destes parâmetros por meio do lugar das raízes, podendo ser toda região estável, ou apenas uma região de interesse do operador, otimizando o processo realizado por [8]. Ao se escolher uma região adequada como inicialização do AG, este tenderá mais rapidamente para o melhor caso, prevenindo os indivíduos de resultarem em casos instáveis, além de reduzir a quantidade de repetições necessárias, consequentemente demandando menos tempo de processamento.

Este artigo está organizado da seguinte forma no que se refere aos assuntos centrais: na seção 2 discutiremos os conceitos em torno do caso específico do GPC quando  $hc$  é fixado em 1; em seguida apresentaremos o método de sintonia do parâmetro  $\lambda/\delta$  através do algoritmo genético cuja população inicial é definida através do Lugar das Raízes; na seção 3 apresentaremos os resultados computacionais que validam o método proposto, e na última seção finalizaremos com a conclusão além da proposta para futuras pesquisas.

## 2 Métodos

### 2.1 Solução do GPC monovariável com $hc = 1$

Familiarizado com as equações e suas respectivas variáveis escalares, vetores, matrizes e polinômios mostrados por [3], quando  $hc$  é fixado em 1 as matrizes presentes na solução do GPC se tornam vetores de 1 coluna e, com isso, o cálculo da variação de sinal de controle  $\Delta u$  se torna uma multiplicação de vetores, como demonstra [8], chega-se nas equações explícitas abaixo:

$$P(z^{-1}) = \left( \sum_{l=0}^{N-1} [g_l^2] + \sum_{l=0}^{N-1} [g_l z^l \bar{H}_{d+l+1}] \right) \tilde{A}(z^{-1}) + B(z^{-1})z^{-(d+1)} \left( \sum_{l=0}^{N-1} g_l F_{d+l+1} \right) \quad (1)$$

$$\frac{Y(z^{-1})}{W(z^{-1})} = \frac{\gamma * B(z^{-1}) * z^{-(d+1)}}{P(z^{-1}) + \frac{\lambda}{\delta} * \bar{A}(z^{-1})} \quad (2)$$

Sendo:  $\gamma = \sum_{i=0}^{N-1} [g_i]$ .

$$1 + \frac{\lambda}{\delta} * \frac{\bar{A}(z^{-1})}{P(z^{-1})} = 0 \quad (3)$$

Note que (1) está contida no denominador de (2), onde (2) é a função de transferência em malha fechada do sistema, e (1) contém os polinômios  $\bar{H}_{d+l+1}$  e  $F_{d+l+1}$  os quais dependem do horizonte de previsão  $hp$ , significando que o mesmo influencia na quantidade e na posição dos pólos da equação característica do sistema e, consequentemente, em sua estabilidade.

Ao fixar o horizonte de controle  $hc$  em 1, restam os parâmetros horizonte de previsão  $hp$ , fator erro de previsão  $\delta$  e de esforço de controle  $\lambda$  para serem sintonizados.

Como (3) tem a característica de uma ferramenta de controle clássico, chamada lugar das raízes, pode-se utilizar ferramentas computacionais já desenvolvidas no ambiente do *MATLAB* para a geração do mesmo, como o *rltool*, que foi a ferramenta utilizada no presente trabalho.

## 2.2 Sintonia do esforço de controle $\lambda$ e fator de erro de previsão $\delta$ do GPC usando AG com auxílio do LR

De posse do lugar das raízes da equação (3) é possível escolher a região que abrange o valor de  $\lambda/\delta$  e resulta no sistema com melhor caso de OV e  $\Delta u(k)$ , determinada pelos valores mínimo e máximo da relação  $\lambda/\delta$ . A Figura 1, apresenta um exemplo da determinação de uma região, cujos valores de  $\lambda/\delta$  foram de  $2,88 \cdot 10^{-7}$  até 0,000977.

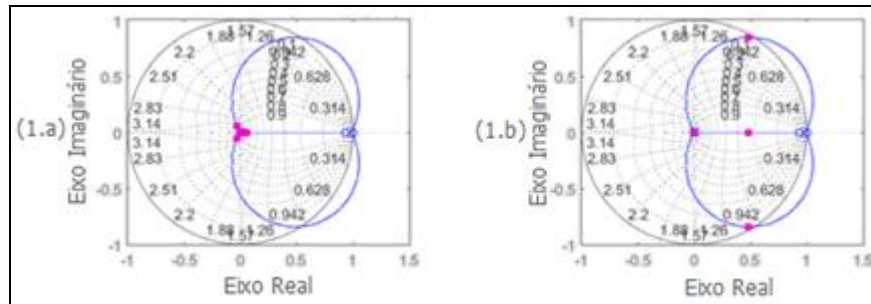


Figura 1: (1.a) Escolha do valor mínimo do intervalo de  $\lambda/\delta$  e (1.b) Escolha do valor máximo do intervalo de  $\lambda/\delta$

Neste contexto, o AG é inicializado com o intervalo de  $\lambda/\delta$  que representa toda região estável, otimizando assim o processo de busca. Esta implementação previne que os indivíduos resultantes produzam casos instáveis, além de reduzir a quantidade de repetições necessárias e, consequentemente, demandar menor tempo de processamento.

A primeira etapa do AG é a criação da população inicial a partir de um conjunto de indivíduos, constituído por um vetor de dois elementos:  $\delta$  e  $\lambda$ . Na segunda etapa são avaliados cada um dos indivíduos gerados, selecionando aqueles que resultem nas melhores funções de aptidão (*fitness*). Esta função é dada pela Integral do Erro Quadrático (*Integral Square Error* – ISE). Já na última etapa são feitas reproduções de novos indivíduos utilizando operações

genéticas, como a reprodução, *crossover* e mutação.

Na primeira etapa, os indivíduos são criados de forma aleatória respeitando os valores mínimo e o máximo da relação  $\lambda/\delta$ . Os valores de  $\delta_i$  estão contidos na faixa entre 1 e 100, já os valores de  $\lambda_i$  são escolhidos de acordo com o resultado da relação  $\lambda_i = \delta_i * \left(\frac{\lambda}{\delta}\right)_i$ . As próximas gerações convergirão para o melhor caso dentro do intervalo escolhido, e como este intervalo é consideravelmente menor que o intervalo máximo de zero a infinito, pode-se escolher valores menores de tamanho da população e de quantidade de gerações o que demanda menos tempo de processamento do algoritmo.

O método de seleção por roleta associado a técnica elitista garante que as gerações futuras serão sempre melhores que as passadas. Além disso, o algoritmo desenvolvido garante que os indivíduos que geraram sistemas em malha fechada com valores de  $OV$  e  $\Delta u(k)$  acima do desejado, sejam qualificados como valores indesejados, descartando-os nas próximas gerações.

Para se realizar mais facilmente estes testes, foi desenvolvida uma interface gráfica, na qual o usuário escolhe as entradas da planta, do GPC e do AG.

### 3 Resultados

Como forma de exemplificar os benefícios do algoritmo desenvolvido, neste trabalho será utilizada uma planta teórica instável com atraso e de fase não mínima. As funções de transferência contínua e discreta (utilizando um período de amostragem de 1 segundo e um segurador de ordem zero) são dadas, respectivamente, por:

$$G(s) = \frac{s-1}{15s^2+s} e^{-3s} \quad G(z^{-1}) = z^{-4} \frac{0.03189 - 0.09638 z^{-1}}{1 - 1.936 z^{-1} + 0.9355 z^{-2}}$$

Após avaliar a característica do lugar das raízes variando-se  $hp$ , escolheu-se  $hp = 8$  por ter sido o menor valor no qual foi possível obter regiões que resultavam em sistemas estáveis e em uma boa região de amortecimento, conforme ilustra a Figura 2. Para valores de  $hp$  acima de 8 o lugar das raízes não apresentou regiões melhores, além disso, quanto maior o valor de  $hp$  mais capacidade de processamento é exigida do *hardware* de implementação.

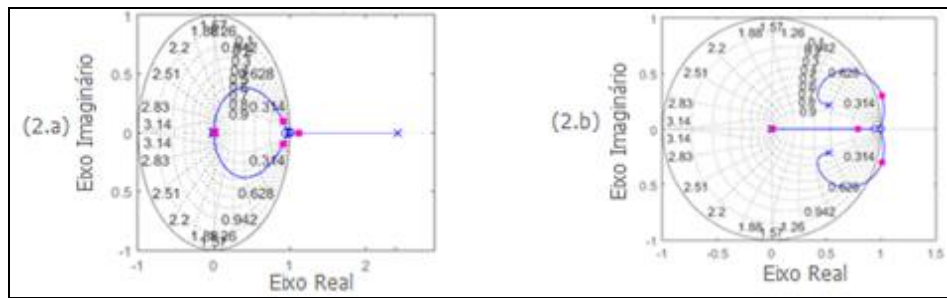


Figura 2: Lugar das Raízes de  $G(z^{-1})$  para os casos de (2.a)  $hp = 5$  e (2.b)  $hp = 8$ .

Foram realizados dois testes, variando-se os intervalos de  $\lambda/\delta$ . O primeiro caso abrangeu toda a região estável, com  $\lambda/\delta$  de 0,0022 a 0,191. O segundo caso utilizou a faixa máxima, isto é, de 0 até infinito (definido por  $10^{20}$ ). Estabeleceu-se, como valores desejados de  $OV$  e  $\Delta u(k)$ , 15% e 2,5,

respectivamente. Com relação ao AG, foram considerados uma população de 50 indivíduos, 5 gerações e 3 reinicializações. Esta seleção de valores demandou um tempo de processamento de aproximadamente 1 minuto para cada teste. Os resultados dos testes são apresentados, respectivamente, pelas Figuras 3 e 4.

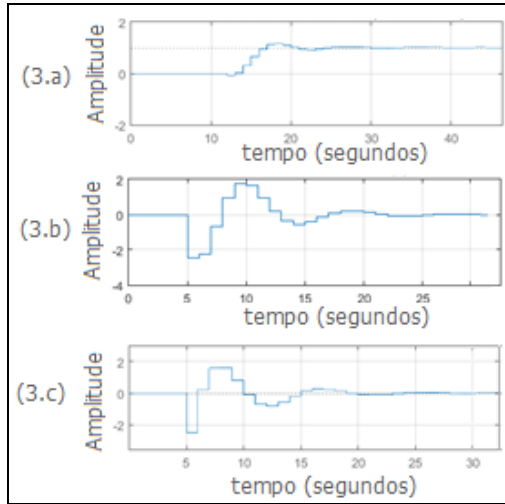


Figura 3: caso1 (3.a) Resposta ao degrau ; (3.b) Sinal de Controle ; (3.c) Variação do Sinal de Controle

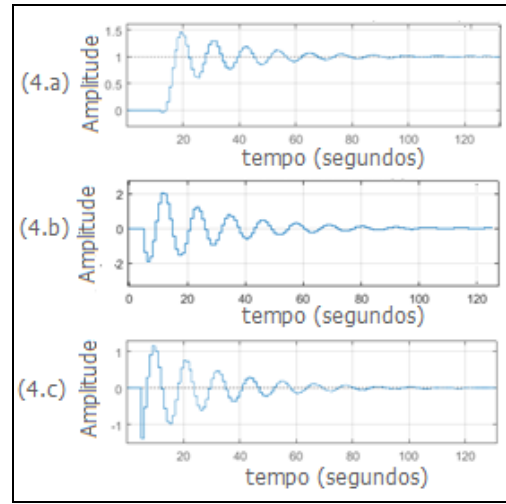


Figura 4: caso2 (4.a) Resposta ao degrau ; (4.b) Sinal de Controle ; (4.c) Variação do Sinal de Controle

Observa-se que, para o Caso 1, foi obtida uma resposta com  $OV = 14,97\%$ ,  $t_s = 28$  segundos e  $\Delta u(k) = 2,1$ , atendendo aos valores desejados de  $OV$  e  $\Delta u(k)$ .

Já para o Caso 2, foi obtida uma resposta com  $OV = 44,85\%$ ,  $t_s = 94$  segundos e  $\Delta u(k) = 1,1$ . Portanto, embora o valor de  $\Delta u(k)$  tenha permanecido dentro do desejável, os valores de  $OV$  e de  $t_s$  apresentaram-se inferiores aos do Caso 1.

Além disto, partindo da premissa de que a população inicial do AG é dada por valores aleatórios que obedecem à uma determinada faixa de valores, ambos os testes foram repetidos cerca de 20 vezes. Os resultados do Caso 1 não apresentaram variações relevantes (100% dos testes realizados foram obtidas respostas próximas ao que mostra a Figura 3), diferentemente do Caso 2, que por se tratar de um intervalo de  $\lambda/\delta$  ser amplo, apenas 10% dos testes apresentaram respostas aceitáveis.

## 4 Conclusões

Este artigo apresentou um método automático de sintonia dos parâmetros fator de erro de previsão  $\delta$  e esforço de controle  $\lambda$  com o objetivo de otimizar a sintonia de controladores preditivos generalizados ao se utilizar Algoritmo Genético. A demonstração proposta consiste em automatizar um processo de sintonia do GPC além de resultar em um ganho adicional na etapa de busca e obtenção dos parâmetros.

A proposta foi ilustrada por meio de um exemplo teórico, apresentando-se em dois casos de situações opostas, com utilização de intervalos de  $\lambda/\delta$  apenas na região estável e de zero a infinito.

Incorporar a informação retirada do lugar das raízes na escolha dos intervalos de  $\lambda/\delta$  fez com que o AG convergisse mais rapidamente para casos próximos da solução ótima. Demonstrando assim, uma maneira rápida e precisa de se encontrar parâmetros que resultem em respostas estáveis respeitando valores desejados de sobressinal e sinal de controle.

Dessa forma, uma vez que é necessário a informação extraída do lugar das raízes para auxiliar o AG na escolha do melhor caso e, sabendo-se que esta informação pode ser obtida através de métodos de cálculos de estabilidade, como por exemplo, o Critério de Estabilidade de Jury, sugere-se para futuras pesquisas a utilização de tais ferramentas para a complementação deste algoritmo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Capes pelo apoio financeiro.

## Referências

- [1] E. F. CAMACHO e C. C. BORDONS, Model Predictive Control., New York, 2nd. ed., (2000).
- [2] G. Valencia-Palomo e J. Rossiter, Programmable logic controller implementation of an auto-tuned predictive control based on minimal plant information, ISA Transactions, vol. 50, 92-100, (2011).
- [3] G. ALMEIDA e J. L. SALLES, CONTROLE PREDITIVO Sintonia e aplicações na siderurgia, Curitiba - PR: Appris, 1st ed., (2016).
- [4] J. GARRIGA e M. SOROUGH, Model predictive control tuning methods: a review, Ind. Eng. Chem. Res., vol. 39, 3505-3515, (2010).
- [5] D. W. CLARKE, C. MOHTADI e P. S. TUFFS, Generalized predictive control. part i. the basic algorithm., Automatica, (1987).
- [6] D. CLARKE e C. MOHTADI, Properties of generalized predictive control., Automatica, vol. 25, (1989).
- [7] P. BANERJEE e S. SHAH, Tuning guidelines for robust generalized predictive control, Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control, 3233-3234, (1992).
- [8] B. MAZOCO e J. L. SALLES, PROPOSTA DE UM ALGORITMO GPC ADAPTATIVO COM BAIXO CUSTO COMPUTACIONAL, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Vitória - ES: UFES, (2015).
- [9] G. P. C. Weinkeller, J. Salles e T. F. Filho, Predictive Control via Multi-Parametric Programming Applied to the Dynamic Model of a Robotic Wheelchair, Fortaleza (CE): In: IX Latin American Robotics Symposium (LARS), (2012).