

PROJETO DE CONTROLADOR PID DIGITAL NEBULOSO ROBUSTO VIA ESTRATÉGIA GENÉTICA MULTI OBJETIVA PARA SISTEMAS DINÂMICOS INCERTOS COM TEMPO DE ATRASO

DANÚBIA SOARES PIRES E GINALBER LUIZ DE OLIVEIRA SERRA*

*Departamento de Eletroeletrônica: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada a Tecnologia
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
São Luís - MA, Brasil

Email: danubiapires@ifma.edu.br e ginalber@ifma.edu.br

Abstract— In this paper, a robust fuzzy digital PID control strategy, via multiobjective genetic algorithm, based on the gain and phase margins specifications, with applications to uncertain dynamic systems with time delay, is proposed. A mathematical formulation based on the gain and phase margins, the fuzzy model TS (Takagi-Sugeno) and PID digital controller structures, and the time delay of the uncertain dynamic system, is deduced. A multiobjective genetic strategy is defined to tune the fuzzy controller parameters, so the gain and phase margins specified to the fuzzy control system are met. Experimental results show the efficiency of the proposed methodology through tracking of the reference and the gain and phase margins keeping closed of the specified ones.

Keywords— Fuzzy Control, Digital PID Controller, Uncertain Dynamic Systems, Multiobjective Genetic Algorithm, Robust Control

Resumo— Neste artigo, é proposta uma estratégia de controle PID digital nebuloso robusto, baseado nas especificações das margens de ganho e fase. Uma formulação matemática, baseada nas margens de ganho e fase, para o modelo nebuloso TS (Takagi-Sugeno), as estruturas dos controladores digitais PID e o atraso de tempo do sistema dinâmico incerto é deduzida. Uma estratégia genética multiobjetiva é utilizada para encontrar os parâmetros do controlador nebuloso, de modo que as margens de ganho e fase especificadas para o sistema de controle nebuloso sejam alcançadas. Resultados experimentais mostram a eficiência da metodologia proposta, uma vez que a trajetória de referência é seguida e as margens de ganho e fase permanecem próximas às especificadas.

Keywords— Controle Fuzzy, Controlador PID Digital, Sistemas Dinâmicos Incertos, Algoritmo Genético Multiobjetivo, Controle Robusto

1 Introdução

Um controle é robusto quando o mecanismo de ajuste do controlador considera certas classes de incertezas paramétricas e dinâmicas da planta a ser controlada. Desde que projetistas e engenheiros precisam lidar com plantas cada vez mais complexas, levando em consideração características estruturais e dinâmicas, tais como não-linearidades, incertezas, variações paramétricas, tempo de atraso, entre outras, muitos métodos de controle robusto tem sido propostos, permitindo que em sua formulação o uso de restrições e requisitos de desempenho (Matausek and Sekara, 2011)(Serra, 2012)(Cheng et al., 2009)(Peng, 2011)(Zhong, 2006). Em (Okuyama, 2010), observa-se a estabilização de um sistema de controle robusto no tempo discreto com base no modelo de referência. Em (Pahuja and Rai, 2012) é apresentada um controle robusto para sistemas com perturbação. Neste contexto, os controladores nebulosos tem sido uma boa alternativa para controle de sistemas dinâmicos complexos, uma vez que a estrutura nebulosa baseada em regras permite trabalhar com incertezas, não-linearidades e tempo de atraso(Wang and Lin, 2011). Em (Linke et al., 2011) é proposto um controle PID nebuloso a fim de melhorar a estabilidade de um sistema hidráulico de posição servo. Neste artigo,

é proposta uma estratégia genética multiobjetiva para projeto de controlador PID digital nebuloso robusto, baseado em modelo, por meio de especificações de margens de ganho e fase, com aplicações em sistemas dinâmicos incertos com tempo de atraso.

2 Estratégia para o projeto do controlador PID digital nebuloso robusto

2.1 Fórmulas para sintonia de controle baseado em modelo através de especificações de margens de ganho e fase

O sistema de inferência nebuloso TS a ser usado como modelo do sistema dinâmico incerto $H(z, \nu)$, apresenta a $i^{\text{ésima}}$ regra dada por:

$R^{(i)}$: SE $\tilde{y}(k-1)$ É $F_{k|\tilde{y}(k-1)}^i$ ENTÃO

$$G_P^i(z) = \frac{K_1^i z + K_2^i}{\alpha^i z^2 + b^i z + c^i}$$

onde $\alpha^i, b^i, c^i, K_1^i$ e K_2^i são os parâmetros a serem estimados pelo algoritmo de mínimos quadrados. A variável $\tilde{y}(k-1)|^{[t=1,2,\dots,n]}$ pertence ao conjunto nebuloso $F_{k|\tilde{y}(k-1)}^i$ com um valor $\mu_{F_{k|\tilde{y}(k-1)}^i}^i$ definido por uma função de pertinência $\mu_{\tilde{y}(k-1)}^i : R \rightarrow [0, 1]$, com $\mu_{F_{k|\tilde{y}(k-1)}^i}^i \in \mu_{F_{1|\tilde{y}(k-1)}^i}^i, \mu_{F_{2|\tilde{y}(k-1)}^i}^i$,

$\mu_{F_{3|\tilde{y}(k-1)}}^i, \dots, \mu_{F_{p|\tilde{y}(k-1)|\tilde{y}(k-1)}}^i$, onde $p_{\tilde{y}(k-1)}$ corresponde ao número de partições do universo de discurso relacionado à variável linguística $\tilde{y}(k-1)$. O controlador PID digital nebuloso TS apresenta a $j|j=1,2,\dots,l$ -ésima regra dada por:

$R^{(j)}$: SE $\tilde{y}(k-1)$ É $F_{k|\tilde{y}(k-1)}^j$ ENTÃO

$$G_c^j(z) = \frac{\alpha^j z^2 + \beta^j z + \gamma^j}{z^2 + z}$$

onde:

$$\alpha^j = K_P^j + \frac{K_I^j T}{2} + \frac{K_D^j}{T}$$

$$\beta^j = \frac{K_I^j T}{2} - K_P^j - \frac{2K_D^j}{T}$$

$$\gamma^j = \frac{K_D^j}{T}$$

e K_P , K_I , K_D são os ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador nebuloso, respectivamente (Jacquot, 1995). Logo, o controlador nebuloso TS $G_c(\tilde{y}(k-1), z)$ é uma soma ponderada de sub-controladores PID lineares locais.

No ramo direto do sistema de controle em malha fechada, considerando o modelo nebuloso TS, o tempo de atraso z^{-n} e o controlador PID digital nebuloso, tem-se:

$$\begin{aligned} G_c(\tilde{y}(k-1), z)G_p(\tilde{y}(k-1), z) = \\ \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^l \gamma_i(\tilde{y}(k-1)) \times \gamma_j(\tilde{y}(k-1)) \times \\ \times \left(\frac{\alpha^j z^2 + \beta^j z + \gamma^j}{z^2 + z} \right) \times \frac{K_1^i z + K_2^i}{a^i z^2 + b^i z + c^i} z^{-n} \end{aligned} \quad (1)$$

A equação característica em malha fechada do sistema (1), considerando o tempo de atraso z^{-n} é dada por:

$$\begin{aligned} GM(\tilde{y}(k-1), z) = a^i z^{n+4} + (b^i - a^i) z^{n+3} + \\ + (c^i - b^i) z^{n+2} - c^i z^{n+1} + \dots + \alpha^j K_1^i z^3 + \\ (\alpha^j K_2^i + \beta^j K_1^i) z^2 + (\beta^j K_2^i + \gamma^j K_1^i) z + \gamma^j K_2^i \end{aligned} \quad (2)$$

As margens de ganho e fase do sistema de controle nebuloso são dadas por:

$$\arg[G_c(\tilde{y}(k-1), e^{j\omega_p})G_p(\tilde{y}(k-1), e^{j\omega_p})] = -\pi \quad (3)$$

$$A_m = \frac{1}{|G_c(\tilde{y}(k-1), e^{j\omega_p})G_p(\tilde{y}(k-1), e^{j\omega_p})|} \quad (4)$$

$$|G_c(\tilde{y}(k-1), e^{j\omega_g})G_p(\tilde{y}(k-1), e^{j\omega_g})| = 1 \quad (5)$$

$$\phi_m = \arg[G_c(\tilde{y}(k-1), e^{j\omega_g})G_p(\tilde{y}(k-1), e^{j\omega_g})] + \pi \quad (6)$$

onde a margem de ganho é dada por (3) e (4) e a margem de fase é dada por (5) e (6), respectivamente. A frequência de cruzamento de fase é ω_p e ω_g é conhecida como a frequência de cruzamento de ganho.

2.2 Estratégia multiobjetiva genética para sintonia do controlador

O AG desenvolvido neste artigo otimiza os parâmetros K_P^j , K_I^j e K_D^j do controlador PID digital nebuloso na j -ésima regra através das especificações de margens de ganho e fase e apresenta a função de custo dada por:

$$Custo = |A_{mc} - A_{me}| + |P_{mc} - P_{me}| \quad (7)$$

onde A_{mc} e A_{me} correspondem às margens de ganho calculada e especificada, respectivamente; P_{mc} e P_{me} correspondem às margens de fase calculada e especificada, respectivamente.

O cruzamento entre dois cromossomos usado no algoritmo genético multiobjetivo gera dois novos descendentes através de um simples operador de cruzamento, o qual realiza uma soma ponderada entre os genes dos pais para gerar o descendente, como segue:

$$\begin{aligned} C_1 = [K_{P1}, K_{I1}, K_{D1}] \\ C_2 = [K_{P2}, K_{I2}, K_{D2}] \\ d_{new1} = \beta * C_1 + (1 - \beta) * C_2 \\ d_{new2} = \beta * C_2 + (1 - \beta) * C_1 \end{aligned} \quad (8)$$

onde os termos K_{P1}, K_{I1}, K_{D1} e K_{P2}, K_{I2}, K_{D2} representam os genes do cromossomo-mãe (C_1) e os genes do cromossomo-pai (C_2), respectivamente, d_{new} é a nova geração obtida através dos dois cromossomos e β é um valor aleatório compreendido entre 0 e 1. O operador de mutação usado neste artigo seleciona aleatoriamente um gene de um cromossomo da população e modifica o valor por outro, dentro da faixa de valores possíveis para os ganhos do controlador nebuloso. O melhor cromossomo da geração anterior permanece na próxima geração, a qual é complementada pelos pais e o resultado da mutação nos descendentes. Os estágios de avaliação, classificação, seleção de pais, cruzamento, mutação e formação da nova população são repetidos em cada iteração do algoritmo (Li et al., 2009)(Wang et al., 2006)(Haupt and Haupt, 2004)(?).

3 Resultados experimentais

3.1 Descrição da plataforma para controle de temperatura em tempo real

A plataforma de controle em tempo real é composta de um processo térmico, o software LabVIEW, o CompactRIO 9073, o módulo de entrada analógica NI 9219, o módulo de saída analógica NI 9263, o sensor de temperatura LM 35 e o atuador através do CI TCA 785. O sistema térmico consiste em uma torradeira monofásica de 220Volts AC, com temperatura funcional compreendida no intervalo de 25°C a 265°C. O LabVIEW é um software que utiliza a linguagem gráfica para programação, no qual o sistema supervisor foi desenvolvido para análises em tempo real do sistema de controle em malha-fechada: a temperatura e os sinais de entrada de tensão serão recebidos pelo sensor através de um sistema de aquisição de dados, o controlador PID digital nebuloso robusto foi implementado para o controle do sinal a ser enviado ao processo térmico. A plataforma do sistema de controle em tempo real do processo térmico é mostrado na Fig. 1.

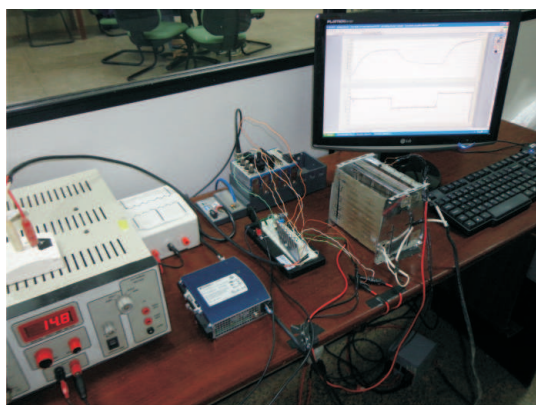


Figura 1: Plataforma do sistema de controle do processo térmico

3.2 Modelagem nebulosa TS do processo térmico

Na etapa de identificação, foram utilizados os sinais de entrada e saída, conforme a Fig. 2. O tempo de atraso foi estimado pela correlação cruzada entre os dados de entrada e saída do sistema, resultando em um tempo de atraso de 136 amostras, ou seja, 2.312 segundos, conforme Fig. 3.

O algoritmo FCM foi implementado para 2 agrupamentos, expoente de ponderação $m=1.3$ e tolerância $\epsilon=0.01$, obtendo-se os conjuntos nebulosos da Fig.4. Sobre os dados de entrada e saída do sistema dinâmico incerto, considerando as funções de pertinência, o algoritmo de mínimos quadrados foi utilizado a fim de estimar os submodelos do consequente. A estrutura destes submodelos encontrados foram otimizados utilizando

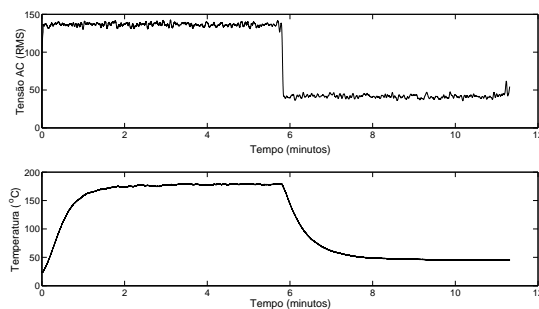


Figura 2: Sinal de entrada e saída utilizados na etapa de identificação

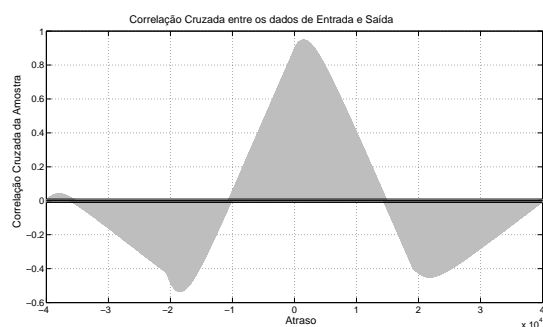


Figura 3: Correlação cruzada entre os sinais de entrada e saída

algoritmo genético, a fim de encontrar ganhos DC correspondentes aos submodelos. Os valores dos ganhos DC obtidos foram $g_1 = 0.0055$ e $g_2 = 0.72$, para os sub-modelos G_p^1 e G_p^2 , respectivamente. A análise comparativa da resposta temporal pode ser observada na Fig.5 e a estrutura otimizada do modelo nebuloso na equação (9).

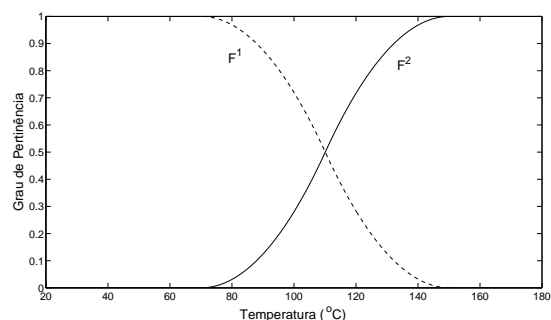


Figura 4: Funções de Pertinência - FCM

$R^1 : SE \text{ Temperatura é } F^1 , \text{ ENTÃO}$

$$G_p^1(z) = 0.0055 \frac{0.0513z + 0.0504}{z^2 - 0.5815z - 0.4177} z^{-136}$$

R^2 : SE Temperatura é F^2 , ENTÃO

$$G_p^2(z) = 0.72 \frac{0.1344z - 0.1334}{z^2 - 0.5921z - 0.4072} z^{-136} \quad (9)$$

onde:

$$F^1(a, b) | a=70; b=150.2 \quad (10)$$

$$\begin{cases} 1, & \text{Temperature} \leq a \\ 1 - 2 \left(\frac{\text{Temperature} - a}{b - a} \right)^2, & a \leq \text{Temperature} \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \left(b - \frac{\text{Temperature}}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq \text{Temperature} \leq b \\ 0, & \text{Temperature} \geq b \end{cases}$$

e $F^2 = 1 - F^1$.

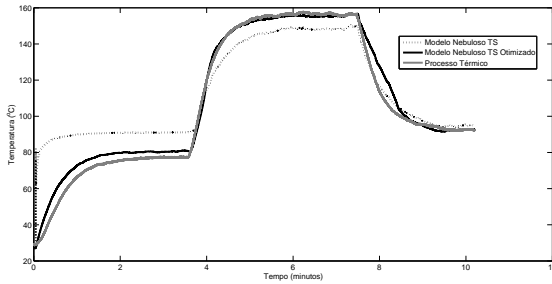


Figura 5: Comparação das respostas temporais do processo, modelo nebuloso TS identificado e modelo nebuloso TS otimizado

Com a estratégia multiobjetiva genética proposta, especificando as margens de ganho de 2.5 e de fase de 60° para o sistema de controle nebuloso e considerando o processo térmico, os parâmetros do controlador PID digital nebuloso, bem como as margens de ganho e fase obtidas, podem ser observados na Tabela. 1. Pode-se comprovar a eficiência da metodologia desenvolvida para o projeto do controlador PID baseado em modelo, uma vez que os valores especificados para as margens de ganho e fase foram alcançados através da estratégia multiobjetiva genética desenvolvida.

Tabela 1: Parâmetros do Controlador PID e as Margens de Ganho e Fase obtidas para os sub-modelos.

Sub-modelo	(A_{mc}, P_{mc})	(A_{mc}, P_{mc})	Ganhos do PID (K_P, K_I, K_D)
G_p^1	(2.5, 60°)	(2.9643, 63.8115°)	(10, 0.15, 0.004)
G_p^2	(2.5, 60°)	(2.5936, 62.6088°)	(2.2178, 0.3176, 0.0013)

O algoritmo genético multiobjetivo utilizado possui os seguintes parâmetros: 300 gerações, população inicial aleatória de 100 cromossomos, onde cada cromossomo compreende três genes, a taxa de seleção de 50% e a taxa de mutação de 12%. O desempenho da estratégia genética multiobjetiva, a fim de minimizar a função custo (7),

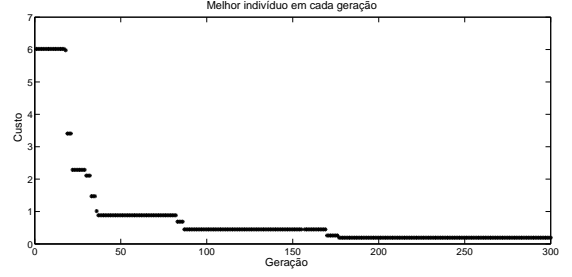


Figura 6: O custo do melhor indivíduo em cada geração

no decorrer das gerações, pode ser observado na Fig. 6.

Foi realizada uma análise de estabilidade do sistema de controle nebuloso em malha fechada, através do Critério de Jury (Jury and Blanchard, 1961). A partir da equação característica (2), temos (11) e (12), pelas quais foram estruturadas as Tabelas. 2 e 3.

$$\begin{aligned} & \text{Equação característica de } G_p^1 G_c^1 z^{-n} : \\ & z^{140} - 1.5815z^{139} + 0.1638z^{138} + 0.4177z^{137} + \\ & 0.0029z^3 - 1.1611e - 004z^2 + \\ & -0.002836z + 6.5225 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

(11)

$$\begin{aligned} & \text{Equação característica de } G_p^2 G_c^2 z^{-n} : \\ & z^{140} - 1.592z^{139} + 0.1849z^{138} + 0.4072z^{137} + \\ & +0.2223z^3 - 0.4497z^2 + 0.2345z - 0.007144 \end{aligned}$$

(12)

Nestas tabelas observa-se que os primeiros valores das linhas ímpares são positivos, garantindo a estabilidade do sistema de controle em malha fechada segundo o Critério de Jury.

Os parâmetros do controlador PID digital nebuloso robusto obtidos através da estratégia genética multiobjetiva foi comparada a um controlador projetado através do Método Ziegler-Nichols (Jacquot, 1995). O desempenho da resposta temporal da metodologia proposta é mostrada na Fig. 7.

A temperatura inicial de referência foi de 100°C . A mudança de referência para 150°C foi realizada em 425 segundos. Uma variação no ganho foi aplicada ao processo térmico em 212 segundos. As ações de controle obtidas pelos controladores PID digital nebuloso robusto e Ziegler-Nichols, bem como as margens de ganho e fase instantâneas obtidas pelo controlador PID digital nebuloso robusto, são observadas nas Fig. 8 e Fig. 9, respectivamente.

Tabela 2: Análise de Estabilidade por Critério de Jury para $G_p^1 G_c^1$

Linha	z^{140}	z^{139}	z^{138}	...	z^1	z^0
1	1	-1.5815	0.1638	...	-0.002836	6.5225×10^{-5}
2	6.5225×10^{-5}	-0.002836	-1.1611×10^{-4}	...	-1.5815	1
3	1	-1.5815	...	...	-0.0001	-0.0027
4	-0.0027	-0.0001	...	...	-1.5815	1
5	1	...	...	...	-0.0044	...
...
11	0.9999	...	...	...	-0.0039	...
...
25	0.9998	...	...	...	-0.0038	...
...
39	0.9997	...	...	...	-0.0038	...
...
53	0.9996	...	...	...	-0.0037	...
...
67	0.9995	...	...	...	-0.0036	...
...
83	0.9994	...	...	...	-0.0035	...
...
99	0.9993	...	...	...	-0.0035	...
...
117	0.9992	...	...	...	-0.0034	...
...
135	0.9991	...	...	...	-0.0033	...
...
153	0.9990	...	...	...	-0.0032	...
...
173	0.9989	...	...	...	-0.0031	...
...
193	0.9988	...	...	...	-0.0031	...
...
215	0.9987	...	...	...	-0.0030	...
...
237	0.9986	...	...	...	-0.0029	...
...
263	0.9985	...	...	...	-0.0028	...
...
277	0.8261	-1.6485	0.8224	...	...	...
278	0.8224	-1.6485	0.8261	...	...	...
279	0.0072	-0.0072	...	...	...	...

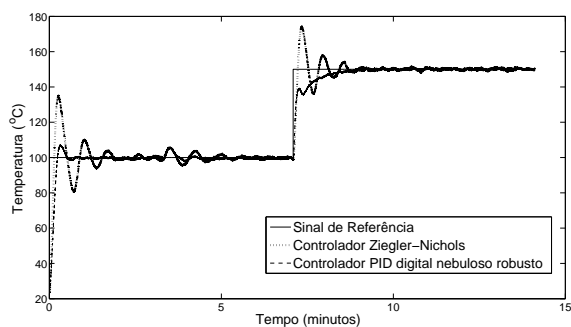


Figura 7: Comparação das respostas temporais do controlador PID digital nebuloso robusto e o controlador de Ziegler-Nichols

4 Conclusões

Neste artigo, foi proposta uma estratégia para o projeto de controlador PID digital nebuloso ro-

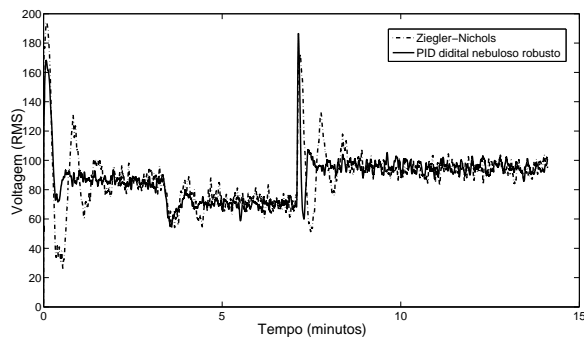


Figura 8: Comparação das ações de controle

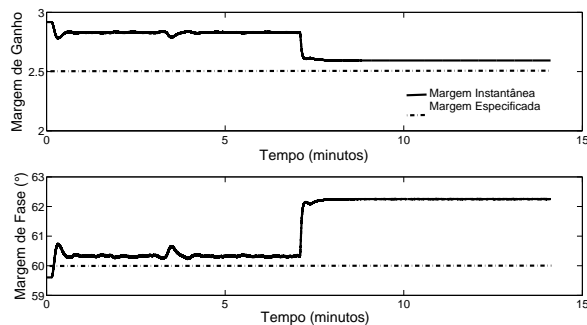


Figura 9: Margens de ganho e fase instantâneas obtidas pelo controlador PID digital nebuloso robusto

busto, baseado nas especificações das margens de ganho e fase para controle de sistemas dinâmicos incertos com tempo de atraso. A estratégia genética multiobjetiva desenvolvida, mostrou-se eficiente, uma vez que, as margens de ganho e fase especificadas foram alcançadas e mantidas na análise do controle do processo térmico, bem como a resposta em relação à trajetória de referência mostrou-se satisfatória, comparada a um PID projetado pelo método de Ziegler-Nichols, mesmo na presença de perturbações e tempo de atraso.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMA pelo suporte financeiro à pesquisa e a PPGE-UFMA pelo incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

Referências

Cheng, X., Lei, Z. and Junqiu, Y. (2009). *Fuzzy PID Controller for Wind Turbines*, 2nd International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems:74-77.

Haupt, R. L. and Haupt, S. E. (2004). *Practical Genetic Algorithms.*, John Wiley Sons, New Jersey.

Jacquot, R. G. (1995). *Modern Digital Control Systems*, Marcel Dekker.

Jury, E. I. and Blanchard, J. (1961). *A Stability Test for Linear Discrete-Time Systems in Table Forms*, Proc. IRE, 49:1947-1948.

Li, H., Pan, C. and Teng, F. (2009). *Adaptive Fuzzy Control based on Genetic Algorithm for Vertical Electric Furnace*, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics:933-938.

Lin-ke, Y., Jian-ming, Z., Qi-long, Y., Ji-ming, X. and L.Yan (2011). *Fuzzy PID Control for Direct drive Electro-hydraulic Position Servo System*, International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks:370-373.

Matausek, M. R. and Sekara, T. B. (2011). *PID controller frequency-domain tuning for stable, integrating and unstable processes, including dead-time*, Journal of Process Control 21:17-27.

Okuyama, Y. (2010). *Model-reference type discretized PID control for continuous plants*, Proceedings of SICE Annual Conference:1402-1405.

Pahuja, P. and Rai, H. M. (2012). *Design of Robust Control for Perturbed Systems using QFT*, Second Internacional Conference on Advanced Computing and Communication Technologies:219-224.

Peng, Y. F. (2011). *Development of robust intelligent tracking control system for uncertain nonlinear systems using H_∞ control technique*, Applied Soft Computing 11 3, April:3135-3146.

Pereira, D. S. and Pinto, J. O. P. (2005). *Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control*, Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.

Serra, G. (2012). *Frontiers in Advanced Control Systems*, Rijeka: In Tech.

Wang, Q. G., Ye, Z. and Hang, C. C. (2006). *Tuning of phase-lead compensators for exact gain and phase margins*, Vol. 42, Automatica.

Wang, W. and Lin, W. (2011). *Decentralized PDC for large-scale TS fuzzy systems*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems:779-786.

Zhong, Q. C. (2006). *Robust Control of Time-delay Systems*, British Library, USA.

Tabela 3: Tabela para Análise de Estabilidade por Critério de Jury para $G_p^2 G_c^2$

Linha	z^{140}	z^{139}	z^{138}	...	z^1	z^0
1	1	-1.5920	0.1849	...	0.2345	-0.0071
2	-0.0071	0.2345	-0.4497	...	-1.5920	1
3	0.9999	-1.59031	...	-0.4484	0.2231	
4	0.2231	-0.4484	...	-1.59031	0.9999	
5	0.9502	...	...	...	-0.0935	
6	-0.0935	...	...	...	0.9502	
7	0.9410	...	...	...	0.0380	
8	0.0380	...	...	...	0.9410	
9	0.9394	...	...	...	-0.0188	
10	-0.0188	...	...	...	0.9394	
11	0.9390	...	...	...	0.0058	
.		
.		
.		
33	0.9389	...	...	...	-0.0021	
.		
.		
67	0.9388	...	...	...	-0.0027	
.		
.		
91	0.9387	...	...	...	-0.0031	
.		
.		
109	0.9386	...	...	...	-0.0033	
.		
.		
125	0.9385	...	...	...	-0.0036	
.		
.		
139	0.9384	...	...	...	-0.0038	
.		
.		
151	0.9383	...	...	...	-0.0039	
.		
.		
163	0.9382	...	...	...	-0.0041	
.		
.		
175	0.9381	...	...	...	-0.0042	
.		
.		
185	0.9380	...	...	...	-0.0043	
.		
.		
195	0.9379	...	...	...	-0.0044	
.		
.		
205	0.9378	...	...	...	-0.0045	
.		
.		
213	0.9377	...	...	...	-0.0046	
.		
.		
223	0.9376	...	...	...	-0.0047	
.		
.		
239	0.9374	...	...	...	-0.0048	
.		
.		
247	0.9373	...	...	...	-0.0049	
.		
.		
263	0.9371	...	...	...	-0.0050	
.		
.		
271	0.9370	-1.6485	-0.0051	...		
.		
.		
277	0.7630	-1.5183	0.7553	...		
278	0.7553	-1.5183	0.7630	...		
279	0.0154	-0.0154	...	...