



DINCON 2017

CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES

30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

ESTUDO COMPARATIVO DE ALGORITMO GMV E PID FUZZY APLICADOS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

Mauro Gomes da Silva¹

Carlos Tavares da Costa Júnior²

Antonio da Silva Silveira³

Universidade Federal do Pará

Laboratório de Controle de Sistemas, Belém, PA, Brasil

Resumo. Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo comparativo de duas técnicas de controle, GMV (*Generalized Minimum Variance*) e PID Fuzzy. Inicialmente, os projetos destes controladores e os índices de desempenho, utilizados para avaliação quantitativa dos resultados, são brevemente descritos. Na sequência, os algoritmos do GMV e PID Fuzzy são aplicados aos sistemas propostos, apresentando-se comparações dos índices de desempenho e aspectos como rastreamento de referência e rejeição de perturbação de carga. Os resultados apresentados são baseados em simulações numéricas.

Palavras-chave. Controle GMV, controle PID fuzzy, controle de processos.

1 Introdução

O projeto de controle baseados em sistemas lineares e invariantes no tempo tem sido a força motriz por trás de boas estratégias de controle [1]. Algoritmos de controle preditivo como GMV (*Generalized Minimum Variance Control*), vem sendo amplamente utilizado dentro de espaços acadêmicos e principalmente na indústria, no controle de processos, assim como técnicas de controle inteligente que devido a potencialidade de se adaptar e aprender, trouxe melhorias significativas e soluções para problemas de controle que antes eram intratáveis por técnicas de controle clássicas [2,3]. Um estudo comparativo entre controle preditivo GMV e PID Fuzzy, ambos não adaptativos aplicados em processos comumente encontrados nas indústrias é a principal contribuição deste trabalho, incorporando estabilidade e robustez da teoria de controle linear. Este trabalho está organizado da seguinte forma. Seções 2 e 3 apresentam uma descrição dos projetos dos controladores GMV e PID Fuzzy. Seção 4 discute dois estudos de casos, fazendo uma análise comparativa entre os controladores. Conclusões são apresentadas na seção 5.

¹maurogomes@ufpa.br

²cartav@ufpa.br

³asilveira@ufpa.br

2 Controlador GMV

O problema de controle GMV estabelece que, uma saída generalizada a d -passos à frente [4].

$$\phi(k+d) = P(q^{-1})y(k+d) - T(q^{-1})y_r(k+d) + Q(q^{-1})u(k), \quad (1)$$

submetida a ordem e forma geral dos polinômios de ponderação $P(q^{-1})$, $T(q^{-1})$ e $Q(q^{-1})$ definidos no domínio do operador de deslocamento q^{-1} , sendo $y(k+d)$ o sinal de saída do processo a d -passos à frente, d o atraso de transporte, $y_r(k)$ o sinal de referência e $u(k)$ o sinal de controle, tende a um valor mínimo de variância de acordo com a minimização do índice de desempenho quadrático

$$J = \mathbb{E} [\phi^2(k+d)], \quad (2)$$

onde $\mathbb{E} [.]$ corresponde ao operador esperança matemática. O problema de controle GMV é baseado em plantas de modelo estocástico, por exemplo, modelos ARMAX da forma

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})q^{-d}u(k) + C(q^{-1})\xi(k), \quad (3)$$

onde $C(q^{-1})\xi(k)$ representa a parte estocástica e d é o atraso de tempo discreto e considerando-se a saída preditiva generalizada $\phi(k+d)$ na Equação (1) e com base na Equação (3), impõem-se que

$$A(q^{-1})y(k+d) = B(q^{-1})u(k) + C(q^{-1})\xi(k+d), \quad (4)$$

pode ser determinada. No entanto, devido à influência aleatória de $\xi(k+d)$, a melhor solução para determinar $y(k+d)$ e conseqüentemente $\phi(k+d)$ é através da teoria de estimação ótima e filtro de Kalman que conduz para o preditor de variância mínima ou (*Minimum Variance Predictor* - MVP), desta forma, obtêm-se a saída estimada preditiva a d -passos a frente [4].

$$\hat{y}(k+d|k) = \frac{B(z^{-1})E(z^{-1})}{P(q^{-1})C(q^{-1})}u(k) + \frac{F(q^{-1})}{P(q^{-1})C(q^{-1})}y(k), \quad (5)$$

onde $E(q^{-1})$ e $F(q^{-1})$ são os polinômios determinados pela solução da equação de Diophantine.

$$P(q^{-1})C(q^{-1}) = A(q^{-1})E(q^{-1}) + q^{-d}F(q^{-1}), \quad (6)$$

onde a ordem dos polinômios $P(q^{-1})$, $C(q^{-1})$, $A(q^{-1})$, $E(q^{-1})$, $F(q^{-1})$, como por exemplo, n_p , n_c , n_a , n_e e n_f respectivamente, e o atraso de tempo discreto d é que define a complexidade do polinômio $E(z^{-1})$ e $F(z^{-1})$, n_e e n_f são calculados por [4].

$$n_e = d - 1; n_f = \max(n_a, n_p + n_c) \quad (7)$$

e a lei de controle GMV é dada por

$$u = \frac{C(q^{-1})T(q^{-1})y_r(k+d) - F(q^{-1})y(k)}{B(q^{-1})E(q^{-1}) + C(q^{-1})Q(q^{-1})} \quad (8)$$

que garante que a variância da saída generalizada, σ_ϕ^2 seja mínima em regime permanente. O algoritmo GMV utilizado neste trabalho pode ser simplificado da seguinte forma: $P(q^{-1}) = T(q^{-1}) = 1$; $Q(q^{-1}) = \lambda$; São utilizados modelos ARX de primeira e terceira ordem para todos os testes. Logo,

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}, \\ B(q^{-1}) &= b_0 + \dots + b_n z^{-n}, \\ C(q^{-1}) &= 1, \\ d &= 1. \end{aligned} \tag{9}$$

Afim de garantir rastreamento de referência com erro nulo, o modelo do processo do tipo-0 (sem integrador) pode ser aumentado, assumindo a seguinte estrutura

$$\Delta A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})q^{-1}\Delta u(k) + C(q^{-1})\xi(k) \tag{10}$$

$$\Delta = 1 - z^{-1}, \tag{11}$$

$$\Delta A(q^{-1}) = \bar{A}(q^{-1}) = 1 + \bar{a}_1 z^{-1} + \dots + \bar{a}_n z^{-n} \tag{12}$$

A equação de Diophantine mostrada na Equação (6) resulta os seguintes polinômios

$$E(q^{-1}) = e0 = 1, \tag{13}$$

$$F(q^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + \dots + f_n z^{-n}, \tag{14}$$

onde,

$$\begin{aligned} f_0 &= -\bar{a}_1 e0, \\ f_1 &= -\bar{a}_2 e0, \\ f_2 &= -\bar{a}_3 e0, \\ f_3 &= -\bar{a}_4 e0, \end{aligned} \tag{15}$$

A lei de controle mostrada na Equação (8) pode ser reescrita na forma aumentada da seguinte forma:

$$\Delta u(k) = \frac{C(q^{-1})y(k+1) - F(q^{-1})y(k)}{B(q^{-1}) + C(q^{-1})\lambda}, \tag{16}$$

onde, $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$, pode ser aplicado na planta.

3 Controlador PID Fuzzy

Neste artigo é implementado um controlador do tipo PD fuzzy em conjunto com Integrador fuzzy utilizando a estrutura proposta por [5]. O controlador PD possui uma base de regras bidimensional (7x7) com um total de 49 regras e o Integrador fuzzy apresenta uma base de regras unidimensional (7x1) com um total de 7 regras. As variáveis fuzzy erro (e) e variação do erro (Δe), assim como o sinal de controle u_{PD} e u_{PI} podem ser representadas por sete qualificadores linguísticos {NB, NM, NS, AZ, PS, PM, PB} onde, $N = Negative$; $P = Positive$, B, M, S e AZ são: *Big*, *Medium*, *Small* e *Almost zero* respectivamente. Tanto para o PD fuzzy quanto para o Integrador fuzzy utilizou-se sete funções de pertinências do tipo triangular igualmente espaçadas. As regras utilizadas para gerar o sinal do PID fuzzy são mostradas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Base de regras para o controlador PD fuzzy.

NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	AZ
NM	NB	NB	NB	NM	NS	AZ	PS
NS	NB	NM	NM	NS	AZ	PS	PM
AZ	NB	NS	NS	AZ	PS	PM	PB
PS	NM	NS	AZ	PS	PM	PB	PB
PM	NS	AZ	PS	PM	PB	PB	PB
PB	AZ	PS	PM	PM	PB	PB	PB
e/Δe	NB	NM	NS	AZ	PS	PM	PB

Tabela 2: Base de regras para o Integrador fuzzy.

e	NB	NM	NS	AZ	PS	PM	PB
u_I	NB	NM	NS	AZ	PS	PM	PB

4 Estudos de Caso

4.1 Válvula de Controle Não Linear

Na Figura (1) é representado o diagrama de blocos do sistema em malha fechada com o controlador que para este artigo pode ser um controlador GMV ou PID fuzzy, a válvula não linear e um processo (a) e a curva estática da válvula não linear (b). A válvula estática $f(\cdot)$ é caracterizada por:

$$v = f(u) = u^4 \text{ para } u \geq 0 \quad (17)$$

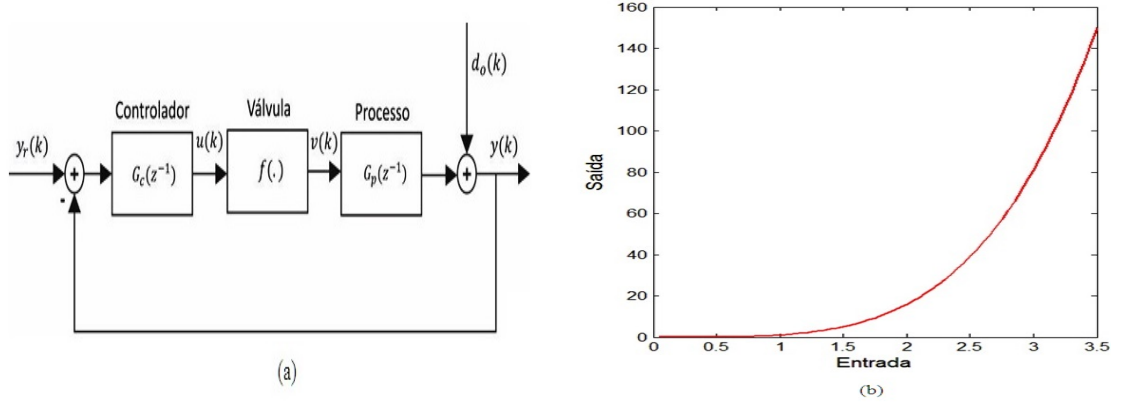


Figura 1: Diagrama de blocos do sistema (a) e curva de não linearidade estática da válvula (b).

O processo G_p no domínio do tempo discreto com período de amostragem $T_s = 0,6$ segundos é descrito por:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 - 1,646z^{-1} + 0,9036z^{-2} - 0,1653z^{-3} \\ B(z^{-1}) &= 0,02312 + 0,05934z^{-1} + 0,00934z^{-2}, \end{aligned} \quad (18)$$

O processo em malha aberta é estável, porém, em malha fechada, apresenta oscilações para elevados pontos de operação conforme apresentado na Figura 2(a) com o controlador PI proposto por [6] dado $K_c = 0,15$ e $T_i = 0,15$. Na Figura 2(b) é mostrada a resposta do sistema com rastreamento nos valores de referências 1, 3 e 5, com perturbação de carga igual a 10% do valor de referência e sinal de ruído aleatório com variância estimada, $\xi(k) = 0,00962$. Observa-se que, mesmo com mudanças nas condições de operação do sistema, tanto o GMV quanto o PID Fuzzy conseguem apresentar desempenhos transiente satisfatórios ao controle do processo.

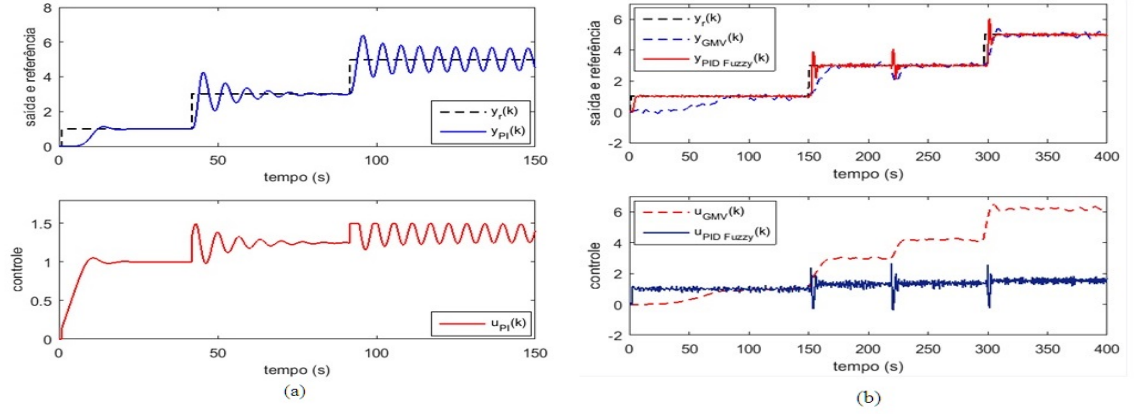


Figura 2: Sistema em malha fechada com o controlador PI (a) e com os controladores GMV e PID fuzzy (b) nos valores de referência 1, 3 e 5

Os limites adotados para a variável erro, (e) e variação do erro, (Δe) para o PD fuzzy foram:

$$e \rightarrow [-2, +2]; \Delta e \rightarrow [-0,015, +0,015]; u_{PD} \rightarrow [-2, +2],$$

e para o Integrador fuzzy são:

$$e \rightarrow [-2, +2]; u_I \rightarrow [-2, +2]$$

4.2 Controle de Concentração

O problema de controle de concentração consiste em manipular o fluido que flui através de um tubo, sem mistura, e através de um tanque, com mistura perfeita. Sendo, c_{in} a concentração na entrada do tubo, V_d , V_m e q que são, o volume do tubo, o volume do tanque e o fluxo de operação respectivamente, que são determinados pelo projetista e c , a concentração no tanque de saída. Segundo [6], um balanço de massa no tanque é dado por:

$$V_m = \frac{dc(k)}{dt} = q(k)(c_{in}(k-d) - c(k)) \quad (19)$$

onde, d é o atraso de transporte dado por, $d = \frac{V_d}{q(k)}$. Para um fluxo fixo, isto é, quando $q(k)$ é constante, a dinâmica que descreve o comportamento do processo é dada por:

$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_0 z^{-d}}{1 + a_1 z^{-1}} \quad (20)$$

onde, $b_0 = 0,5$ e $a_1 = \frac{V_m}{q(k)}$. Os valores utilizados para V_d e V_m foram, $V_d = 0,5$ e $V_m = 1$. Para o fluxo, $q(k)$ foi submetido a uma faixa de variação entre 0,5 e 1,5 de volume. Na Figura (3) é mostrada a resposta do sistema com nos valores de referências 1, 3 e 2, com perturbação de carga igual a 80% do valor de referência e ruído com variância estimada $\xi(k) = 0,00962$. com fluxos de operação, $q = 0,5$ (a) e $q = 1,5$ (b) respectivamente.

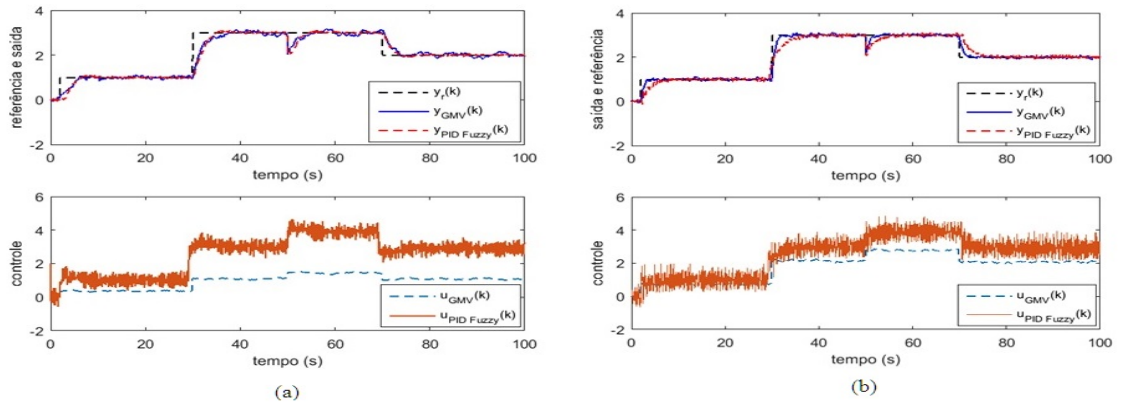


Figura 3: Resposta do sistema ao degrau com fluxos de operação, $q=0,5$ (a) e $q=1,5$ (b)

Observou-se que, apesar do controlador PID Fuzzy apresentar um desempenho satisfatório rejeitando perturbação de carga e ruído, apresenta um desempenho ligeiramente inferior quando comparado ao GMV por apresentar características de reduzir os efeitos do ruído na saída e estimar dinâmica de sequência aleatória presente no sistema. Isso é evidenciado na Tabela 3.

Tabela 3: Índices de desempenho para o sistema da válvula não linear.

Teste	ISE	TVC
GMV - $\lambda = 80$	135,512	37,5294e+02
PID Fuzzy	2,1849e+02	2,3582e+02

5 Conclusão

Neste artigo, foi apresentado um estudo comparativo entre duas técnicas de controle, preditivo e PID fuzzy. Os controladores projetados GMV e PID Fuzzy foram aplicados em processos comumente encontrados nas indústrias como válvula de controle não linear e

sistema de controle de concentração. Testes de rastreamento de referências com ruído aleatório e perturbação de carga foram realizados a partir de sinais de entrada do tipo degrau. A partir dos resultados apresentados, observou-se que, ambos os controladores foram capazes de lidar com as diferentes condições de operação dos processos, garantindo robustez, desempenho e estabilidade dinâmica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PPGEE da Universidade Federal do Pará, ao (LACOS), ao CNPq (408559/2016-0) e a FAPESPA, ICAF 049/2016.

Referências

- [1] A. S. Silveira; A. A. R. Coelho e F. J. Gomes, GMV-PID Controller Design with Gradient Method for the Energy Weighting Factor in Nonlinear Plants, IFAC Proceedings Volumes, vol.45, pp. 394–399, (2012b).
- [2] O. M. Almeida e A. A. R. Coelho, Controladores PID Auto-Ajustavel e Nebulosos: Aspectos de Projeto, IV SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, pp. 675–680, (1999).
- [3] V. L. Knihs, Projetos de controlador GMV em malhas de controle na indústria, Universidade Federal de Santa Catarina, (2011).
- [4] D. W. Clarke and P. J. Gawthrop, Self-tuning controller, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 122, pp. 929–934, (1975).
- [5] E. H. Mandani, Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 121, pp. 1585–1588, (1974).
- [6] K. J. Åström and B. Wittenmark, Adaptive control, Courier Corporation, (1995).