

CONTROLADOR TIPO ESTRUTURA VARIÁVEL BASEADO NO VARIÂNCIA MINÍMA GENERALIZADA

GUILHERME A. ROSA*, EDWIN C. DURANDAL*, REJANE DE B. ARAÚJO*, ANTONIO A. R. COELHO*

*Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Automação e Sistemas, 88040-900
Florianópolis, SC, Brasil

Emails: guilherme.americo.rosa@posgrad.ufsc.br, edwin.calla@posgrad.ufsc.br,
rejane.barros@posgrad.ufsc.br, antonio.arc@ufsc.br

Abstract— This paper presents the design of a discrete-time Generalized Minimum Variance (GMV) controller obtained from the minimization of the sliding surface using the Sliding-Mode Control technique (SMC), a particular case of the Variable Structure Systems (VSS). A polynomial with two degrees of freedom (2-DOF) is added in the control weighting, influencing directly the closed-loop system response. Two numerical simulations are used on discrete-time nonlinear SISO systems to show the efficiency of the proposed controller methodology and performance indices measure the quality of the closed-loop dynamic.

Keywords— Generalized minimum variance, sliding-mode control, two degrees of freedom, energy factor, stability

Resumo— Este trabalho apresenta o projeto do controlador de Variância Mínima Generalizada (*Generalized Minimum Variance* - GMV) discreto obtido a partir da minimização da superfície de deslizamento empregando a técnica de Controle por Modos Deslizantes (SMC), sendo um caso particular do Sistemas de Estrutura Variável (VSS). Um polinômio com dois graus de liberdade (2-DOF) é adicionado na ponderação do controle, influenciando diretamente a resposta do sistema de malha fechada. Duas simulações numéricas são empregadas em sistemas não lineares SISO discretos para mostrar a eficiência metodológica e os índices de desempenho do controlador proposto medindo a qualidade do sistema de malha fechada.

Palavras-chave— Variância mínima generalizada, controle por modos deslizantes, dois graus de liberdade, ponderação do controle, estabilidade

1 Introdução

O conceito de Controle por Modos Deslizantes (Sliding Mode Control - SMC) é um método resultante do Sistema a Estrutura Variável (Variable Structure Systems - VSS) apresentado através de um trabalho de pesquisa desenvolvido por Vaidin (1977). No entanto, essa metodologia ganhou atenção da comunidade internacional nas últimas décadas, principalmente por ser robusto tendo a capacidade de lidar com incertezas paramétricas, plantas não lineares e perturbações.

O SMC baseado no VSS para o caso de sistemas contínuos, não é robusto quando as incertezas excedem os limites de projeto (Patete et al., 2007). As metodologias desenvolvidas para o controle VSS, apresentam as seguintes condições: i) implementam um algoritmo posicional; ii) os zeros da planta de malha aberta devem ser assintoticamente estáveis; iii) o polinômio de ponderação do controle, definido na superfície de deslizamento, deve ser zero para evitar offset (erro nulo em regime permanente) (Coelho and Sumar, 2001).

Furuta (1993) apresentou um método no qual a superfície de deslizamento é função do erro e do sinal de controle, contornando alguns problemas de implementação e simplificando o projeto. A proposta do VSS no domínio discreto é somado ao controlador de Variância Mínima Generalizada (*Generalized Minimum Variance* - GMV). O GMV é obtido a partir da minimização da entrada

auxiliar (superfície), entrada auxiliar ponderada e um termo não linear chaveado. Essa estrutura pode ser reescrita na forma RST (Fig. 1). O controlador é projetado para duas hipóteses: parâmetros conhecidos ou desconhecidos. Na literatura existem diferentes algoritmos para combinar as incertezas paramétricas, com o objetivo de alcançar a melhor dinâmica para o processo a ser controlado (Patete et al., 2007; Sumar et al., 2015).

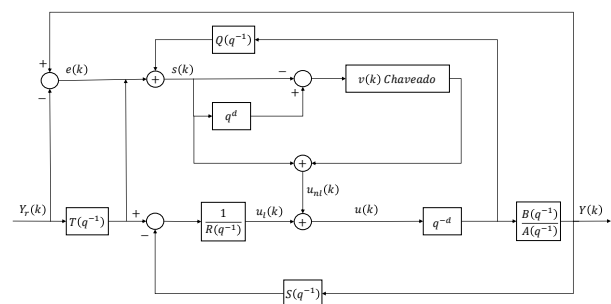


Figura 1: Estrutura RST com a parcela não linear do tipo VSS.

A ideia do VSS aplicado ao controlador GMV tem recebido atenção da comunidade de controle de processos e vem proporcionando resultados experimentais satisfatórios (sucesso) em aplicações como: motores elétricos, sistemas de atuadores eletro hidráulicos e manipuladores robóticos.

Este artigo apresenta um projeto GMV dis-

creto estendido baseado no controle por modos deslizantes (*Generalized Minimum Variance Extend Controller based on Sliding Mode Control-GMVE-SMC*) inserindo um polinômio com dois graus de liberdade (2-DOF) na lei de controle, com o intuito de melhorar o desempenho do controlador e estabilidade de malha fechada. Para justificar essa proposta, é realizado duas simulações em plantas não lineares verificando sua eficiência através de simulações e índices de desempenho.

O artigo está organizado da seguinte forma: Seção 2 apresenta o projeto VSS no domínio discreto aplicado ao GMV para uma planta conhecida. Seção 3 aborda a introdução de um parâmetro com dois graus de liberdade ao controlador GMV baseado no SMC. Os resultados de simulação e as conclusões são apresentados nas seções 4 e 5, respectivamente.

2 Controle GMV baseado no VSS

Considere o processo caracterizado pelo seguinte modelo posicional discreto:

$$A(q^{-1})y_k = q^{-d}B(q^{-1})u_k \quad (1)$$

os parâmetros u_k e y_k representam o controle e a saída respectivamente. As raízes dos polinômios $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$ representam os polos e zeros de malha aberta, respectivamente, d é o atraso de transporte discreto e q^{-d} denota o operador deslocamento no tempo, isto é,

$$q^{-d}y_k = y_{k-d} \quad (2)$$

A equação do modelo, equação (1), é conhecida ou estimada e é dada pela seguinte relação:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_naq^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_nbq^{-nb}$$

O objetivo do controle é minimizar a variância da variável controlada s_{k+d} , definida para o caso determinístico como

$$s_{k+d} = T(q^{-1})(y_{k+d} - r_{k+d}) + Q(q^{-1})u_k \quad (3)$$

o termo r_k representa o sinal de referência, $e_{k+d} = (y_{k+d} - r_{k+d})$ expressa o erro de seguimento e os polinômios $T(q^{-1})$ e $Q(q^{-1})$ são da forma

$$T(q^{-1}) = t_0 + t_1q^{-1} + t_2q^{-2} + \dots + t_{nt}q^{-nt}$$

$$Q(q^{-1}) = q_0(1 - q^{-1})$$

que devem ser projetados com o objetivo de tornar o controle do sistema estável e satisfazer as condições do Lema 2.1.

Lema 2.1 (*Åström and Wittenmark, 1995*) A condição necessária e suficiente para um processo

estável de malha fechada sob uma entrada de controle, fazendo $s_{k+d} = 0$, é que todos as raízes do polinômio

$$G_d(q^{-1}) = A(q^{-1})Q(q^{-1}) + B(q^{-1})S(q^{-1}) \quad (4)$$

estejam no interior do círculo unitário, e os termos (Q, S) , (A, S) e (B, Q) não tenham zeros comuns fora desta região.

O controle de variância mínima generalizado para atender a equação (3) é expresso através da seguinte lei de controle posicional:

$$u_k = -R(q^{-1})^{-1}[S(q^{-1})y_k - T(q^{-1})r_{k+d}] \quad (5)$$

no qual

$$R(q^{-1}) = E(q^{-1})B(q^{-1}) + Q(q^{-1})$$

Os polinômios $E(q^{-1})$ e $S(q^{-1})$ são escolhidos com base na equação (6), ou seja,

$$T(q^{-1}) = A(q^{-1})E(q^{-1}) + q^{-d}S(q^{-1}) \quad (6)$$

sendo,

$$S(q^{-1}) = s_0 + s_1q^{-1} + \dots + s_{ns}q^{-ns}$$

$$E(q^{-1}) = e_0 + e_1q^{-1} + \dots + e_{ne}q^{-ne}$$

no qual $n_s = n_a - 1$ e $n_e = d - 1$. Baseado no termo $Q(q^{-1})u_k$ da equação (3), que compõe a lei de controle dada pela equação (5), é possível controlar plantas de fase mínima e não mínima, desde que a dinâmica do processo não seja cancelada (Corradini and Orlando, 1995). O desempenho da lei de controle da equação (5) pode ser melhorado incluindo uma entrada auxiliar ao controlador GMV a partir da técnica VSS (Furuta, 1993), apresentado no Lema 2.2.

Lema 2.2 (*Corradini and Orlando, 1995*) Dado o sistema da equação (1), a seguinte lei de controle pode ser obtida:

$$u_k = -R(q^{-1})^{-1}[T(q^{-1})y_k - S(q^{-1})r_{k+d} - s_k - v_k] \quad (7)$$

garantindo uma superfície de deslizamento estável sobre o hiperplano $s_{k+d} = 0$, ou seja, ocorre o desaparecimento do erro de rastreamento quando v_k é selecionado de acordo com as seguintes restrições:

$$v_k = \begin{cases} -2\sigma\varepsilon/s_k & \text{se } |s_k| \geq \sqrt{\varepsilon} \\ -2\sigma s_k & \text{se } |s_k| < \sqrt{\varepsilon} \end{cases} \quad (8)$$

sendo ε e σ escalares positivos, com $0 < \sigma < 1$ (parâmetros de projeto).

Prova 2.1 Manipulando a equação (3), utilizando a equação (1) e definindo $T(q^{-1}) = P(q^{-1})$, equação (6), é possível obter a lei de controle dada

pela equação (7), proporcionando uma relação entre s_{k+d} e v_k da seguinte forma:

$$\begin{aligned} s_{k+d} &= T(q^{-1})y_{k+d} - T(q^{-1})r_{k+d} + Q(q^{-1})u_k \\ &= (A(q^{-1})E(q^{-1}) + q^{-d}S(q^{-1}))y_{k+d} + \\ &\quad Q(q^{-1})u_k - T(q^{-1})r_{k+d} \\ &= (B(q^{-1})E(q^{-1}) + Q(q^{-1}))u_k - \\ &\quad T(q^{-1})r_{k+d} + S(q^{-1})y_k \\ &= s_k + v_k \end{aligned} \quad (9)$$

Definindo a variável $\Delta s_{k+d} = s_{k+d} - s_k$, a condição de existência do modo deslizante pode ser fixada (Furuta, 1990), isto é,

$$s_k \Delta s_{k+d} < -\frac{1}{2}(\Delta s_{k+d})^2 \quad (10)$$

e da equação (9) pode-se concluir que $\Delta s_{k+d} = v_k$. Considerando o primeiro caso da equação (8) ($|s_k| \geq \sqrt{\varepsilon}$), tem-se que

$$\begin{aligned} s_k \Delta s_{k+d} &= s_k \left[-2\sigma \frac{\varepsilon}{s_k} \right] < -2\sigma^2 \varepsilon \leq -2\sigma^2 \frac{\varepsilon^2}{s_k^2} = \\ &= -\frac{1}{2}(\Delta s_{k+d})^2 \end{aligned} \quad (11)$$

A segunda condição de chaveamento ($|s_k| < \sqrt{\varepsilon}$) é assegurado se

$$s_k \Delta s_{k+d} = s_k (-2\sigma s_k) < -2\sigma^2 s_k^2 = -\frac{1}{2}(\Delta s_{k+d})^2 \quad (12)$$

Observação 2.1 A seleção dos parâmetros σ e ε afeta a duração e a precisão inicial do controle e da variável de saída. Assim, esses termos devem ser selecionados de acordo com a “melhor” relação entre o esforço de controle inicial aceitável e uma duração satisfatória do comportamento transitório (rapidez de resposta).

3 Projeto do GMVE-SMC

Projetos baseados no controlador GMV posicional, não eliminam erro em regime permanente, caso a planta seja submetida a perturbações de carga constante. Um modo de fazer o GMV robusto para seguimento de referência e rejeição de perturbação foi proposto por Tuffs and Clarke (1985), no qual o controlador integral foi obtido por meio de um modelo na forma CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average)(modo implícito). Tuffs and Clarke (1985) alcançaram resultados importantes adicionando uma parcela integral ao controlador GMV, proporcionando assim offset free (Coelho et al., 2014).

Silveira et al. (2012) empregou um polinômio com 2-DOF na lei de controle, denominado GMV2DOF, levando em consideração a estabilidade de malha fechada. Esta técnica é aplicada no GMVE-SMC para o caso posicional, equação (13), e no caso do modelo incremental, equação (14),

$$Q(q^{-1}) = \frac{\lambda \Delta}{(1 - \gamma q^{-1})} \quad (13)$$

$$Q(q^{-1}) = \frac{\lambda}{(1 - \gamma q^{-1})} \quad (14)$$

alterando assim a implementação da lei de controle da equação (5). O parâmetro λ está relacionado a limitação da energia em relação a magnitude do esforço de controle, γ está correlacionado com o acoplamento entre polos e zeros (dinâmica de malha fechada) e $\Delta = (1 - q^{-1})$ é o operador diferencial. Um método para melhorar a representação da malha de controle é reescrever o projeto do controlador GMV na forma RST (Fig. 2) para o caso incremental, ou seja,

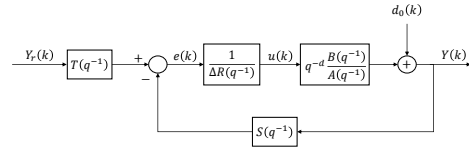


Figura 2: Estrutura incremental na forma RST.

A tabela 1 apresenta as equações de projeto para os casos posicional e incremental.

Tabela 1: Modelos padrão para o controle GMV na forma RST.

(a) Caso Posicional	
- Modelo da planta:	$A(q^{-1})y_k = q^{-d}B(q^{-1})u_k$
- Lei de controle na forma RST:	$R(q^{-1})u_k = T(q^{-1})r_{k+d} - S(q^{-1})y_k$ $R(q^{-1}) = \left[B(q^{-1})E(q^{-1}) + \frac{\lambda \Delta}{(1 - \gamma q^{-1})} \right]$
- Função de transferência de malha fechada :	$\frac{Y}{Y_r} = \frac{B(q^{-1})T(q^{-1})(1 - \gamma q^{-1})}{B(q^{-1})P(q^{-1})(1 - \gamma q^{-1}) + \lambda \Delta A(q^{-1})}$
(b) Caso Incremental	
- Modelo da planta:	$A(q^{-1})\Delta y_k = q^{-d}B(q^{-1})\Delta u_k$
- Lei de controle na forma RST:	$R(q^{-1})\Delta u_k = T(q^{-1})r_{k+d} - S(q^{-1})y_k$ $R(q^{-1}) = \left[B(q^{-1})E(q^{-1}) + \frac{\lambda}{(1 - \gamma q^{-1})} \right]$
- Função de Transferência de Malha Fechada :	$\frac{Y}{Y_r} = \frac{B(q^{-1})T(q^{-1})(1 - \gamma q^{-1})}{B(q^{-1})P(q^{-1})(1 - \gamma q^{-1}) + \lambda \Delta A(q^{-1})}$ $P(q^{-1}) = A(q^{-1})\Delta E(q^{-1}) + q^{-d}S(q^{-1})$

Analisando a tabela 1, pode-se observar a diferença entre as leis de controle. Para o caso particular $P(q^{-1}) = T(q^{-1}) = 1$ é possível verificar a

influência do polinômio $Q(q^{-1})$ nos polos da função de transferência de malha fechada.

A fim de entender como a modificação de $Q(q^{-1})$ afeta o desempenho e a robustez da resposta de malha fechada, será apresentado dois estudos de caso simulados numericamente, tanto para o caso posicional como incremental.

4 Simulações e resultados

Para mostrar a eficiência do controlador proposto, é realizado duas simulações numéricas em sistemas SISO não lineares discretos no tempo. O primeiro exemplo é um processo químico conhecido como reação exotérmica irreversível de primeira ordem ou simplesmente Tanque Reator Agitado Contínuo (Continuous Stirred-Tank Reactor - CSTR) (Hernandez and Arkun, 1993). O segundo exemplo é uma válvula com abertura ajustável composta por um atuador, corpo e obturador de válvula (Al-Duwaish and Naeem, 2001). Este equipamento é utilizado na indústria para processos que trabalham com fluido.

Na primeira simulação numérica o GMVE-SMC é comparado ao GMV2DOF proposto por Silveira et al. (2012) e os dois controladores (GMVE-SMC e GMV2DOF) são projetados na forma incremental. Na segunda simulação numérica o GMVE-SMC é comparado ao GMV baseado no SMC (GMV-SMC) proposto por Corradini and Orlando (1995), com o projeto dos dois controladores (GMVE-SMC e GMV-SMC) apresentados na forma posicional. Para este projeto utiliza-se o caso particular $P(q^{-1}) = T(q^{-1}) = 1$, assim os parâmetros são ajustados com os mesmos valores com o objetivo de analisar e comparar o comportamento e a eficiência dos sistemas não lineares de malha fechada. O estimador dos mínimos quadrados recursivo (MQR) foi aplicado com a finalidade de identificar um modelo linear de segunda ordem para o projeto do controlador GMV e os parâmetros dos controladores foram ajustados por tentativa e erro visando um mínimo sobressinal para a variável controlada.

4.1 Processo CSTR

O processo CSTR tem comportamento estável e instável dependendo do ponto de operação. A dinâmica interna é completamente desconhecida, logo, é utilizado apenas sua entrada e saída (Hernandez and Arkun, 1993), equação (15),

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + D_a(1 - x_1) \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\varphi}}\right) \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + BD_a(1 - x_1) \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\varphi}}\right) + \beta(\mu - x_2) \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (15)$$

sendo x_1 a concentração adimensional de reagentes, x_2 a temperatura do reator e u o controle da temperatura adimensional da camisa de arrefecimento. Os parâmetros do modelo são $D_a = 0.072$, $\varphi = 20$, $B = 8$ e $\beta = 0.3$, que correspondem ao número de Damköhler e representam a energia de ativação adimensional, o coeficiente de reação e a transferência de calor, respectivamente (Hernandez and Arkun, 1993).

Na Fig. 3 observa-se a curva estática do CSTR. O maior desafio para esse processo é controlar o sistema em diferentes pontos de equilíbrio, por exemplo: 0.15 (ponto estável), 0.35 (ponto instável) e 0.75 (ponto estável). Além disso, admite-se que as equações da dinâmica do processo são desconhecidas.

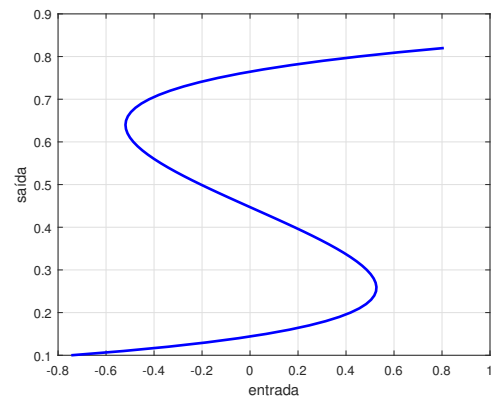


Figura 3: Curva estática do CSTR.

Utilizando a Fig. 3 como referência, os pontos de operação são alterados da seguinte maneira (desejado de malha fechada): $y_r(1 : 200) = 0.15$, $y_r(201 : 400) = 0.25$, $y_r(401 : 600) = 0.4$, $y_r(601 : 800) = 0.55$, $y_r(801 : 1000) = 0.7$ e $y_r(1001 : 1500) = 0.3$. Para essa simulação o controlador GMVE-SMC é comparado ao GMV2DOF e ambos estão na forma incremental. Os sinais de saída e controle do CSTR para os dois controladores podem ser observados nas Figs. 4 e 5. Além disso, é aplicada uma perturbação do tipo degrau (20% da magnitude em relação ao sinal de referência), no instante de tempo 375 s.

Os controladores foram sintonizados com os seguintes polinômios: $Q(q^{-1}) = 0.13/(1 - 0.92q^{-1})$, $\varepsilon = 0.001$, $\sigma = 0.25$ para o GMVE-SMC e $Q(q^{-1}) = 0.13/(1 - 0.92q^{-1})$ para o GMV2DOF. O período de amostragem é 0.3 s e $-1 \leq u(k) \leq 1$.

Como pode ser observado nas Figs. 4 e 5, o GMVE-SMC consegue estabilizar o sistema e garantir seguimento de referência nos diferentes pontos de operação, mesmo havendo perturbação. A tabela 2 compara o rendimento entre os controladores a partir de dois índices de desempenho: Integral do Erro Absoluto (Integral of Absolute Error - IAE) e a Variação Total do Controle (Total Variation of Control - TVC). Observa-se que o GMVE-SMC possui o menor esforço de controle e

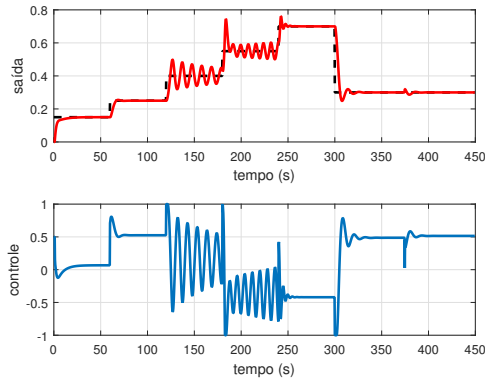


Figura 4: Saída e controle do CSTR para o GMV2DOF.

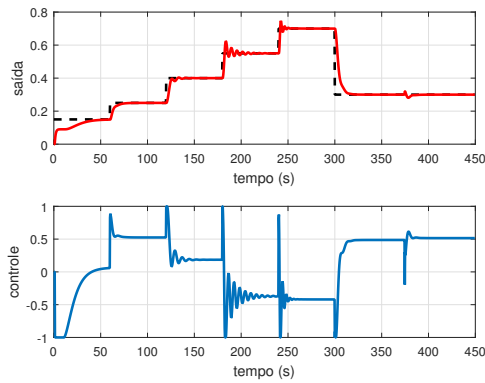


Figura 5: Saída e controle do CSTR para o GMVE-SMC.

garante estabilidade em toda faixa de operação.

Tabela 2: Índices de desempenho dos controladores para o processo CSTR.

	GMVE-SMC	GMV2DOF
IAE	5.6623	7.7390
TVC	10.5723	11.9557

4.2 Processo válvula

Normalmente válvulas são compostas de um atuador responsável por transmitir o sinal de controle, direcionando o movimento da haste e do tampão. A modelagem matemática desse equipamento é escrito na forma do modelo de *Wiener* e dado pelas equações (16) e (17), ou seja,

$$x_k = \frac{(0.0616q^{-1} + 0.0543q^{-2})}{(1 - 1.5714q^{-1} + 0.687q^{-2})} u_k \quad (16)$$

$$y_k = \frac{x_k}{\sqrt{0.10 + 0.9x_k^2}} \quad (17)$$

sendo u_k a pressão do controle, x_k a posição da haste e y_k o fluxo através da válvula (variável controlada). Esse equipamento possui um comportamento não linear, equação (17), como pode-se observar pela curva estática da Fig. 6.

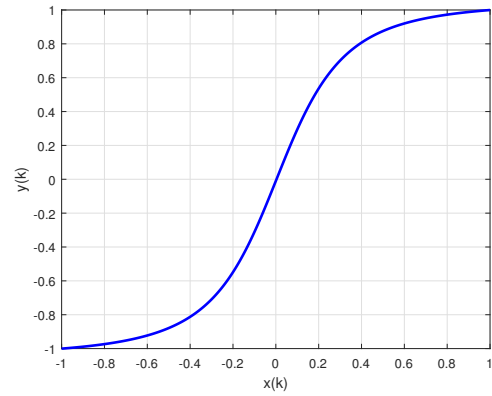


Figura 6: Curva estática da válvula.

Baseado na Fig. 6, é possível verificar diferentes pontos de operação com características linear e não linear. Logo, o sinal de referência é alterado para os seguintes pontos de operação: $y_r(1 : 150) = -0.8$, $y_r(151 : 300) = -0.4$, $y_r(301 : 450) = 0.4$, $y_r(451 : 600) = 0.8$ e $y_r(601 : 900) = 0.0$. Os sinais de saída e controle da válvula podem ser observados para os controladores GMVE-SMC (Fig. 8) e GMV-SMC (Fig. 7) e ambos estão na forma posicional. Uma perturbação na forma degrau (20% da magnitude do valor do sinal de referência) é aplicada no instante de tempo 675 s, o período de amostragem é 0.1 s.

Os controladores foram ajustados com os seguintes parâmetros: $Q(q^{-1}) = 7\Delta/(1 - 0.68q^{-1})$ para o GMVE-SMC e $Q(q^{-1}) = 7\Delta$ para o GMV-SMC. Ambos os controladores utilizam $\varepsilon = 0.2$ e $\sigma = 0.003$.

É importante observar que no trabalho proposto por Corradini and Orlando (1995) o polinômio $Q(q^{-1})$ é diferenciado como $Q(q^{-1}) = \lambda(1 - q^{-1})$, diferente do utilizado na proposta deste trabalho, no qual $Q(q^{-1})$ possui um termo a mais $(1 - \gamma q^{-1})$ para a ponderação do esforço de controle, influenciando também os polos e zeros de malha fechada.

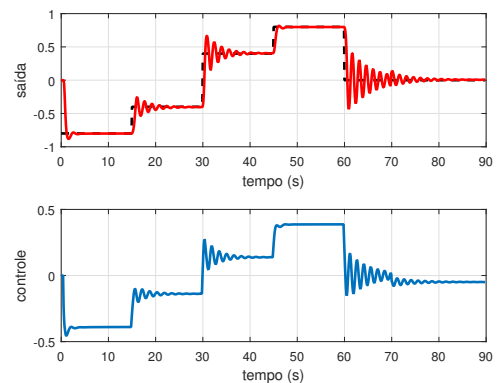


Figura 7: Saída e controle da válvula para o GMV-SMC.

Considerando as Figs. 7 e 8 é possível observar que o GMVE-SMC consegue estabilizar o

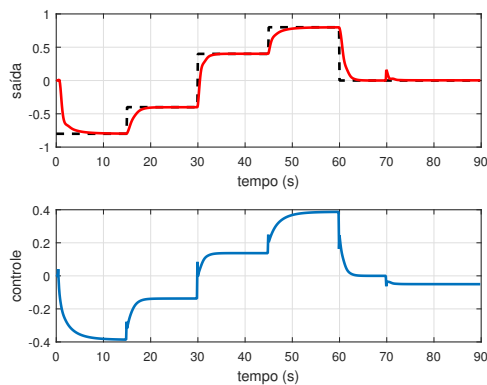


Figura 8: Saída e controle da válvula para o GMVE-SMC.

sistema com um tempo de resposta menor em diferentes pontos de operação se comparado ao controlador avaliado. Os índices de desempenho IAE e TVC são aplicados com o intuito de mostrar a superioridade do GMVE-SMC (Tabela 3).

Tabela 3: Índices de desempenho dos controladores para o processo válvula.

	GMVE-SMC	GMV-SMC
IAE	3.9105	4.2519
TVC	15.8236	17.1710

5 Conclusões

Nesse artigo foi proposto uma extensão para o controlador GMV-SMC com a finalidade de melhorar seu desempenho quando aplicado a processo SISO não lineares. Para alcançar esse objetivo foi utilizado a ideia do GMV2DOF projetado para o caso incremental e posicional, no qual o polinômio associado ao controle assume dois graus de liberdade, afetando diretamente os polos e zeros do sistema de malha fechada.

Através da simulação numérica sobre dois estudos de caso e índices de desempenho, foi possível concluir a superioridade do GMVE-SMC em relação a outros controladores GMV apresentados nesse artigo. Para trabalhos futuros, está sendo pesquisado um modo de aplicar um horizonte de predição estendido na superfície de deslizamento visando aplicações monovariáveis e multivariáveis.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio do CNPq, GPqTCA e PPGEAS/UFSC.

Referências

Al-Duwaish, H. and Naeem, W. (2001). Nonlinear model predictive control of Hammerstein and

Wiener models using genetic algorithms, *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications* pp. 465–469.

Åström, K. J. and Wittenmark, B. (1995). *Adaptive Control*, Addison-Wesley.

Coelho, A. A. R., Araújo, R. B. and Silveira, A. S. (2014). Steady-state tracking properties for the generalized minimum variance controller: A review, proportional-integral-derivative tuning, and applications, *Industrial & Engineering Chemistry Research* **53**(4): 1470–1477.

Coelho, A. A. R. and Sumar, R. R. (2001). Controle a estrutura variável incremental: projeto e estudo de caso, *Proceedings of IX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información, Santa Fé, Argentina* **1**: 300–303.

Corradini, M. L. and Orlando, G. (1995). Discrete variable structure control for nonlinear systems, *Proceedings of European Control Conference, Rome, Italy* pp. 1465–1470.

Furuta, K. (1990). Sliding mode control of a discrete system, *Systems & Control Letters* **14**(2): 145–152.

Furuta, K. (1993). VSS type self-tuning control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **40**(1): 37–44.

Hernandez, E. and Arkun, Y. (1993). Control of nonlinear systems using polynomial ARMA models, *AIChE Journal* **39**(3): 446–460.

Patete, A., Furuta, K. and Tomizuka, M. (2007). Self-tuning control based on generalized minimum variance criterion, *Adaptation and Learning in Control and Signal Processing* **9**(1): 411–416.

Silveira, A. S., Rodríguez, J. E. N. and Coelho, A. A. R. (2012). Robust design of a 2-DOF GMV controller: A direct self-tuning and fuzzy scheduling approach, *ISA Transactions* **51**(1): 13–21.

Sumar, R. R., Coelho, A. A. R. and Goedtel, A. (2015). Multivariable system stabilization via discrete variable structure control, *Control Engineering Practice* **40**: 71–80.

Tuffs, P. and Clarke, D. W. (1985). Self-tuning control of offset: a unified approach, *IEEE Proceedings D Control Theory and Applications* **132**(3): 100–110.

Vadim, I. U. (1977). Survey paper variable structure systems with sliding modes, *IEEE Transactions on Automatic Control* **22**(2): 212–222.