

SISTEMA DE CONTROLE ROBUSTO CHAVEADO PARA SISTEMAS NÃO LINEARES DESCRITOS POR MODELOS FUZZY TAKAGI-SUGENO BASEADOS EM LMIS

Stéfany Oliveira Sousa¹, Wallysonn Alves de Souza²

¹Discente de graduação em Licenciatura em Matemática - IFTO. Bolsista do Programa de de Iniciação Científica do CNPq/IFTO. E-mail: stefany.sousa2@estudante.ifto.edu.br

²Docente do curso de Licenciatura em Matemática - IFTO, Orientador. E-mail: wallysonn.souza@ifto.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias de automação e controle tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas capazes de lidar com sistemas não lineares e incertos, superando as limitações impostas pelos métodos clássicos de projeto. Nesse contexto, os controladores fuzzy, particularmente aqueles baseados no modelo Takagi-Sugeno (TS) (TAKAGI; SUGENO, 1985), têm se destacado como alternativa promissora para representar a dinâmica de sistemas complexos por meio de combinações de modelos lineares locais.

Este projeto concentra-se no estudo de controladores fuzzy chaveados (SOUZA et al., 2014), os quais selecionam dinamicamente um ganho de realimentação a partir de critérios de estabilidade definidos via funções de Lyapunov e condições expressas por LMIs. Essa abordagem é especialmente vantajosa em situações nas quais funções de pertinência explícitas são desconhecidas ou de difícil obtenção, além de permitir a incorporação de índices de desempenho e restrições operacionais.

Apesar dos benefícios apontados na literatura, a aplicação prática desses métodos ainda encontra desafios, tanto na modelagem quanto no custo computacional, razão pela qual se torna relevante investigá-los em comparação com controladores tradicionais, amplamente utilizados no ensino e na indústria.

2 OBJETIVO

O objetivo principal deste projeto foi compreender, por meio de estudo teórico e simulações numéricas, as vantagens e desvantagens dos controladores fuzzy chaveados, baseados em LMIs, em relação a métodos tradicionais, considerando diferentes configurações da matriz de entrada de controle $B(\alpha)$ e a presença de incertezas no sinal de controle. Ademais, busca-se fornecer uma base sólida para uma possível incorporação dessa técnica moderna de controle nos currículos de engenharias.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento da pesquisa seguiu a abordagem qualitativa e de natureza básica, fundamentada em referências clássicas e recentes sobre modelos fuzzy TS e controladores chaveados (TANIGUCHI et al., 2001; SOUZA et al., 2014). O trabalho contou com as seguintes etapas:

1. Estudo teórico:
 - Revisão da teoria de estabilidade de Lyapunov aplicada a sistemas fuzzy TS;
 - Análise das leis de controle chaveadas e critérios para seleção de ganhos via LMIs;
 - Entendimento das implicações de considerar a matriz $B(\alpha)$ constante e não constante.
2. Simulações numéricas:
 - Implementação no MATLAB de modelos fuzzy TS seguindo os exemplos propostos por Souza et al. (2013) em relação ao levitador magnético;

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações numéricas realizadas permitiram comparar o desempenho do controlador fuzzy chaveado proposto nesta pesquisa com duas abordagens de referência: os métodos de controle tradicionais e o controlador fuzzy não chaveado desenvolvido na primeira etapa do estudo. Os controladores clássicos foram projetados segundo técnicas consolidadas no domínio da frequência, enquanto a abordagem fuzzy segue o paradigma Takagi-Sugeno (TAKAGI; SUGENO, 1985), com condições de estabilidade formuladas via desigualdades matriciais lineares (LMIs), conforme a linha de pesquisa consolidada por Tanaka, Ikeda e Wang (1998) e aprofundada por Cardim (2009).

No caso do controlador fuzzy não chaveado, adotado inicialmente, a lei de controle é única e fixa para todo o espaço de operação do sistema. Tal abordagem, embora mais robusta que os controladores clássicos, ainda apresenta limitação na adaptação a variações abruptas na dinâmica. Já o controlador fuzzy chaveado, desenvolvido com base na metodologia de Souza et al. (2014), introduz um mecanismo de seleção dinâmica dos ganhos de realimentação, escolhendo, a cada instante, aquele que minimiza a derivada da função de Lyapunov. Essa característica confere maior capacidade de adaptação, aproximando-se das vantagens esperadas de sistemas de controle robusto para sistemas não lineares (MARQUEZ, 2003).

Os resultados evidenciaram que, quanto ao tempo de estabilização, os controladores tradicionais apresentaram desempenho satisfatório apenas em regimes lineares ou com baixa variação paramétrica, sofrendo degradação significativa frente a não linearidades mais acentuadas. O controlador fuzzy não chaveado mostrou redução desse tempo em relação aos métodos clássicos, mas manteve certa limitação em cenários com forte variação na matriz $B(\alpha)$. Já o controlador fuzzy chaveado obteve reduções consistentes no tempo de estabilização em todos os cenários testados, sobretudo em sistemas com $B(\alpha)$ não constante, confirmando o potencial do chaveamento na aceleração da resposta dinâmica (SOUZA et al., 2014).

Quanto à robustez, controladores tradicionais demonstraram baixa tolerância a incertezas paramétricas e perturbações externas, característica já discutida na literatura por Santim et al. (2012) e Cardim (2009). O controlador fuzzy não chaveado apresentou robustez intermediária, preservando estabilidade sob perturbações moderadas. O fuzzy chaveado, por sua vez, manteve a estabilidade mesmo diante de variações significativas nos parâmetros e na dinâmica, reforçando a vantagem da abordagem proposta por Souza et al. (2013, 2014) para sistemas não lineares complexos.

No aspecto flexibilidade, observou-se que os controladores clássicos, embora simples de implementar, não são diretamente aplicáveis a sistemas fortemente não lineares sem técnicas adicionais de compensação. O controlador fuzzy não chaveado, seguindo a estrutura proposta por Taniguchi et al. (2001), requer definição explícita das funções de pertinência, o que pode demandar conhecimento aprofundado do sistema e afetar o desempenho caso as funções não representem adequadamente a realidade. Já o controlador fuzzy chaveado eliminou a necessidade de funções de pertinência explícitas, utilizando apenas a estrutura polinomial do modelo Takagi-Sugeno e garantindo desempenho consistente mesmo em condições de incerteza estrutural.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa permitiu aprofundar o conhecimento sobre controladores fuzzy chaveados baseados em LMIs e compreender suas vantagens e limitações em comparação com métodos tradicionais. Confirmou-se que tais controladores oferecem desempenho superior em termos de robustez e tempo de resposta, sendo especialmente úteis em sistemas com não linearidades significativas e incertezas. Entretanto, sua aplicação requer maior esforço de modelagem e recursos computacionais, o que pode restringir sua adoção em

contextos com infraestrutura limitada. Este estudo contribui para a disseminação de técnicas modernas de controle, alinhando a formação acadêmica com práticas de pesquisa avançadas e fomentando a aplicação de conceitos atuais no contexto do IFTO – Campus Palmas.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq e ao IFTO pelo fomento e apoio para a execução do projeto.

REFERÊNCIAS

CARDIM, R. **Projeto de Controladores Baseados em LMIs: realimentação derivativa e sistemas chaveados utilizando estrutura variável**. 2009. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009

MARQUEZ, H. J. **Nonlinear Control Systems - Analysis and Design**. 1. ed. Canada: John Wiley Professional, 2003.

SANTIM, M. P. A. et al. Design of a Takagi-Sugeno fuzzy regulator for a set of operation points. **Mathematical Problems in Engineering**, New York, v. 2012, p. 17, abr. 2012.

SOUZA, W. A.; TEIXEIRA, M. C. M.; SANTIM, M. P. A.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E. On switched control design of linear time-invariant systems with polytopic uncertainties. **Mathematical Problems in Engineering**. v. 2013, 10p, 2013.

SOUZA, Wallysonn Alves de; TEIXEIRA, M. C. M.; SANTIM, M. P. A.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E.. Robust Switched Control Design for Nonlinear Systems Using Fuzzy Models. **Mathematical Problems in Engineering** (Online), v. 2014, p. 1-11, 2014.

SOUZA, Wallysonn Alves de. **Projeto de controladores robustos chaveados para sistemas não lineares descritos por modelos fuzzy Takagi-Sugeno**. 2013. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica - Automação) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. 15, n. 1, p.116–132, feb. 1985.

TANAKA, K.; IKEDA, T.; WANG, H. O. Fuzzy regulators and fuzzy observers: Relaxed stability conditions and LMI-based designs. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, New York, v. 6, n. 2, p. 250–265, may 1998.

TANIGUCHI, T. et al. Model construction, rule reduction, and robust compensation for generalized form of Takagi-Sugeno fuzzy systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, New York, v. 9, n. 4, p. 525–537, aug. 2001.