RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 11/11/2023.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira - SP

GUSTAVO JORGE PEREIRA

CONTROLE CHAVEADO DE SISTEMAS FUZZY T-S COM INCERTEZAS PARAMÉTRICAS E ATRASO NO TEMPO

Ilha Solteira - SP
2021

GUSTAVO JORGE PEREIRA

CONTROLE CHAVEADO DE SISTEMAS FUZZY T-S COM INCERTEZAS PARAMÉTRICAS E ATRASO NO TEMPO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos necessário para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
Orientador

Ilha Solteira - SP
2021

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P436c

Pereira, Gustavo Jorge.
Controle chaveado de sistemas Fuzzy T-S com incertezas paramétricas e atraso no tempo / Gustavo Jorge Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
62 f.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2021

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
Inclui bibliografia

1. Sistemas não lineares com incertezas paramétricas e atraso no tempo. 2. Controlador chaveado. 3. Modelos Fuzzy Takagi-Sugeno. 4. Desigualdades matriciais lineares . 5. Funcional de Lyapunov-krasovskii.

João Josué Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Controle Chaveado de Sistemas Fuzzy T-S com Incertezas Paramétricas e Atraso no Tempo.

AUTOR: GUSTAVO JORGE PEREIRA
ORIENTADOR: MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. RODRIGO CARDIM (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. FLAVIO ANDRADE FARIA (Participaçao Virtual)
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Profa. Dra. MARTA CILENE GADOTTI (Participaçao Virtual)
Departamento de Matemática / UNESP/Câmpus de Rio Claro

Prof. Dr. WALLYSONN ALVES DE SOUZA (Participaçao Virtual)
Coordenação de Ciências Matemáticas e Naturais / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins - IFTO

Ilha Solteira, 11 de novembro de 2021

À minha esposa Simone e à minha filha Clara por todo amor, apoio, confiança e incentivo em todos os momentos.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos os familiares, amigos, professores e funcionários da FEIS-UNESP, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, dedico meus agradecimentos:

- A Deus, por ter me dado força e saúde para chegar até aqui;
- Aos meus pais Angelina e José Jorge, aos meus irmãos Juliano e Fabiana e a meu sobrinho Felipe pelo carinho, apoio e incentivo;
- À minha esposa Simone que sempre esteve ao meu lado durante minha formação acadêmica, dando força nos momentos difíceis, incentivo e, principalmente, me motivando para que esse sonho pudesse ser realizado.
- À minha filha Clara pelo amor e incentivo em todos os momentos deste trabalho;
- Ao Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira, por todo ensinamento, incentivo, confiança e orientação;
- Ao Prof. Dr. Uiliam Nelson Lendzion Tomaz Alves, pelo acompanhamento (co-orientação), sugestões e incentivo;
- Ao meu amigo Dr. Willian R. B. M. Nunes pela ajuda nos programas, pelo apoio, incentivo e conversas agradáveis;
- Ao meu amigo Arshad Jalal pelo incentivo, apoio e conversas agradáveis;
- Aos colegas professores da matemática do IFSP, campus Birigui, agradeço pelo companheirismo, solidariedade e toda ajuda prestada na reta final do meu doutorado;
- Aos meus amigos e colegas do laboratório de pesquisa e controle (LPC) que de forma direta ou indiretamente me ajudaram;
- Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFSP) por conceder o afastamento integral para conclusão desta tese;
- O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Ainda que tivesse o dom da profecia,
o conhecimento de todos os mistérios
e de toda a ciência,
ainda que tivesse toda a fé,
a ponto de transformar montanhas
se não tivesse a caridade, nada seria”

Coríntios 13, 2

RESUMO

Nesta tese são propostas condições que garantem a estabilidade de uma classe de sistemas não lineares com incertezas paramétricas e atraso no tempo, com a especificação da taxa de decaimento e utilizando um controle chaveado. Os projetos dos controladores são realizados com base no modelo fuzzy Takagi-Sugeno (T-S) com representação exata do sistema não linear com atraso no tempo. Novos teoremas são propostos com condições baseadas em desigualdades matriciais lineares (do inglês Linear Matrix Inequalities - LMIs) e funcional de Lyapunov-Krasovskii (L-K) com intuito de obter vários ganhos para o controlador. O controlador chaveado, em um certo instante de tempo, é formado por um único ganho, escolhido entre um conjunto de ganhos previamente projetados, que é determinado pela lei de chaveamento. Essa lei retorna o menor valor da derivada temporal do funcional de L-K. Os controladores chaveados apresentam um desempenho melhor ou igual, quando comparados com o controlador de ganho único na realimentação do vetor de estado, e as LMIs utilizadas para determinar os ganhos do controle chaveado são mais relaxadas do que as LMIs que determinam o ganho único, pois proporcionam áreas factíveis maiores ou iguais. Para verificar a eficácia da metodologia proposta, nesta tese são apresentadas simulações numéricas abordando projetos de controladores chaveados e de ganho único para modelos fuzzy T-S com atraso no tempo e parâmetros incertos, incluindo por exemplo um sistema Truck-Trailer.

Palavras-chave: Sistemas não lineares com incertezas paramétricas e atraso no tempo. Controlador chaveado. Modelos fuzzy Takagi-Sugeno. Desigualdades matriciais lineares (LMIs). Funcional de Lyapunov-Krasovskii.

ABSTRACT

This thesis proposes conditions to ensure stabilization of a class of nonlinear systems with uncertain parameters, time delay and considering the specification of the decay rate, using a switched control. The designs of the switched controllers are performed based on the Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model which exactly describes the nonlinear systems with time delay. New theorems are proposed with conditions based on Linear Matrix Inequalities (LMIs) and Lyapunov-Krasovskii (L-K) functional for obtaining several gains for the control. The switched controller, at a certain instant of time, is formed by a single gain, chosen from a set of previously projected gains, which is determined by the switching law. This law returns the smallest value of the time derivative of the L-K functional. The switched controller performs better than or equal to the controller with only one state feedback gain, and the LMIs for this switched control are more relaxed than the LMIs for one state feedback gain, because it offers feasible regions greater than or at least equal to that obtained with only one controller gain. To verify the efficacy of the proposed methodology, this thesis presented numerical simulations about the designs of switched and one state feedback gain controllers to T-S fuzzy models with time delay and uncertain parameters, including for instance a Truck-Trailer fuzzy system.

Keywords: Nonlinear systems with uncertain parameters and time delay. Takagi- Sugeno fuzzy model. Linear matrix inequalities (LMIs). Lyapunov-Krasovskii functional.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Região de factibilidade: Teorema 3.1 (◯) e Corolário 3.1 (×). 32

Figura 2 Trajetórias de $x(t)$ do sistema (3.25) sob a lei de controle (3.6), $\tau = 20\,s$ e o índice de chaveamento σ. 33

Figura 3 Região de factibilidade: Teorema 4.2 (◯) e Corolário 4.1 (×). 50

Figura 4 Zoom da região de factibilidade do Exemplo 4.1. 51

Figura 5 Trajetórias de $x(t)$ do sistema (4.57), lei de controle (4.30) para $\tau = 1,5\,s$ e os índices de chavemento σ e ω. 52

Figura 6 Modelo Truck-Trailer. 53

Figura 7 Região de factibilidade: Teorema 4.2 (◯) e Corolário 4.1 (×). 55

Figura 8 Trajetórias de $x(t)$ do sistema (4.65) sob a lei de controle (4.30) e $\tau = 1,345\,s$. 56

Figura 9 Índices de chaveamento σ e ω para $\tau = 1,345\,s$. 56

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SIGLAS

LMIs	Linear Matrix Inequalities
CDP	Compensação Distribuída Paralela
T-S	Takagi-Sugeno
L-K	Lyapunov-Krasovskii
PVI	Problema de Valor Inicial

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathbb{R}$	Conjunto dos números reais.
$\mathbb{R}^+$	Conjunto dos números reais positivos.
$\mathbb{R}^n$	Conjunto dos vetores $n \times 1$ com elementos reais.
$\mathbb{R}^{n\times m}$	Conjunto das matrizes $n \times m$ com elementos reais.
$P > (\geq) 0$	P é uma matriz simétrica e definida (semi-definida) positiva.
$P < (\leq) 0$	P é uma matriz simétrica e definida (semi-definida) negativa.
$\mathbb{K}_r$	Conjunto $\{1, 2, \ldots, r-1, r\}$.
$\|x\|_2$	Norma Euclidiana do vetor $x \in \mathbb{R}^n$.
$\|\phi\|_c$	Norma $\max\limits_{a\leq\psi\leq b} \|\phi(\psi)\|$, para $\phi \in C[a,b]$.
$diag(P_1, P_2, \ldots, P_n)$	Matriz bloco diagonal cujos elementos são $P_1, P_2, \cdots, P_n$.
$arg^* \min\limits_{i\in\mathbb{K}_r}\{h_i\}$	Menor índice $j \in \mathbb{K}_r$ tal que, para o conjunto $\{h_1, h_2, \ldots, h_r\}$, $h_j = \min\limits_{i\in\mathbb{K}_r}\{h_i\}$.
I	Matriz identidade de ordem apropriada.
O	Matriz nula de ordem apropriada.
Π	Produto entre elementos.
$C^1([c,d],\mathbb{R})$	Funções $[c,d] \to \mathbb{R}$ contínuas e diferenciáveis em $[c,d]$.
$C[a,b]$	Conjunto de funções contínuas $[a,b] \to \mathbb{R}^n$.
$l([-\tau, 0], \mathbb{R}^n)$	É o espaço de Banach das aplicações contínuas de $[-\tau, \mathbb{R}]$ em $\mathbb{R}^n$.
C_H	Conjunto das aplicações contínuas $\phi \in l([-\tau, 0], \mathbb{R}^n)$ tal que $\|\phi\| \leq H$.
$*$	O asterisco denota a transposição dos termos em seu lado direito.

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**13**
2	**RESULTADOS PRELIMINARES**	**17**
2.1	DEFINIÇÃO DE EQUAÇÃO DIFERENCIAL FUNCIONAL COM ATRASO	22
2.2	ESTABILIDADE DE SISTEMAS COM ATRASO NO TEMPO	24
3	**MODELO FUZZY TAKAGI-SUGENO**	**25**
3.1	CONTROLE CHAVEADO DE MODELOS FUZZY T-S COM ATRASO NAS VARIÁVEIS DE ESTADO E COM A MATRIZ B CONSTANTE	26
3.2	EXEMPLO NUMÉRICO	31
3.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	34
4	**CONTROLE CHAVEADO DE MODELOS FUZZY T-S COM A MATRIZ B DEPENDENTE DE α, ATRASO NO TEMPO E TAXA DE DECAIMENTO**	**35**
4.1	NOVO CONTROLE CHAVEADO	43
4.2	CONTROLADOR DE GANHO ÚNICO	47
4.3	EXEMPLO NUMÉRICO	50
4.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	57
5	**CONCLUSÕES**	**58**
	REFERÊNCIAS	**59**

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas com atraso também são chamados de sistemas hereditários ou equações diferenciais de diferença. Estas equações representam modelos em que o estado futuro do sistema depende do seu passado e, por este motivo, esta dependência é conhecida como efeito hereditário. Sistema com atraso no tempo é uma subclasse de equações diferenciais funcionais. No século XVIII Bernoulli, Euler e Concordet foram uns dos primeiros a estudar equações com atraso (FRIDMAN, 2014).

No ano de 1931 Volterra escreveu um livro sobre o papel dos efeitos hereditários em modelos para a iteração de espécies. Em 1940 este tema é fortemente estudado na Ex-União Soviética em modelos de engenharia de controle (SOUZA, 2019). Nas décadas de 50 e 60 surgiram as teorias básicas que tratam da estabilidade do sistema com atraso no tempo. Elas abrangem a existência e unicidade de soluções para equações dinâmicas, teoria de estabilidade para solução trivial, etc (WU; HE; SHE, 2010). Nas décadas seguintes surgiram os livros Differential-Difference Equation de R. Bellman e K. L. Cooke de 1963 e o livro Functional Differential Equations de Jack K. Hale de 1977 tratando deste tema (SOUZA, 2019).

Muitos sistemas de controle contínuos no tempo apresentam atraso podendo ocasionar instabilidade ou oscilações. A estabilidade e o controle dos sistemas com atraso no tempo é importante tanto na parte teórica como na parte prática. Modelos com atraso no tempo surgiram primeiramente na área de ciências biológicas e mais tarde foram encontrados em diversos sistemas da engenharia, tais como, transmissão mecânica, transmissão de fluído, processos metalúrgicos e controle de redes (KOLMANOVSKII; MYSHKIS, 2012, HALE; LUNEL, 2013, FRIDMAN, 2014, WU; HE; SHE, 2010).

Segundo Fridman (2014) o começo do século XXI pode ser caracterizado como o ápice do estudo de sistemas com atraso no tempo, pois foram obtidos vários resultados importantes (GUAN; CHEN, 2004, CAO; FRANK, 2001, MOON *et al.*, 2001, GU, 2000, GU; CHEN; KHARITONOV, 2003, LIN; WANG; LEE, 2006, ZHAO *et al.*, 2008).

O projeto de sistemas de controle, para plantas não lineares, baseado nos modelos fuzzy Takagi-Sugeno (T-S) (TAKAGI; SUGENO, 1985) está presente em diversos trabalhos (WANG; LAM, 2019, ANGULO; DAVID; BERNAL, 2018, CHE *et al.*, 2018, COSKUN, 2020, GAO *et al.*, 2019, LIAN *et al.*, 2017, SOUZA *et al.*, 2014b, LIN; WANG; LEE, 2006,). Ele é bastante eficaz em projeto de controle principalmente quando não se conhece toda a planta do projeto.

A descrição de sistemas não lineares com atraso através de modelos fuzzy T-S possibilita

representá-los como uma combinação de modelos locais ponderados por uma função de pertinência (WANG; TANAKA; GRIFFIN, 1996, WANG; TANAKA; GRIFFIN, 1995, TEIXEIRA; ASSUNÇÃO; AVELLAR, 2003). Com esta representação é possível utilizar LMIs (do inglês Linear Matrix Inequalities) (BOYD *et al.*, 1994) em projetos de controle para sistemas com atraso no tempo.

O método mais eficiente para analisar a estabilidade de sistemas com atraso no tempo é o de Lyapunov. Para estes sistemas, são dois os procedimentos mais importantes para o estudo da estabilidade, com base nos resultados de Lyapunov: o de Krasovskii (KRASOVSKII, 1963, GU; CHEN; KHARITONOV, 2003, ANGULO; DAVID; BERNAL, 2018, WANG; LAM, 2019,) e o de Razumikhin (RAZUMIKHIN, 1956, LIN; WANG; LEE, 2006).

Existem vários artigos publicados com a temática sobre sistemas fuzzy T-S com atraso no tempo. A grande maioria desses trabalhos buscam maximizar o atraso admissível dentro da estabilidade e diminuir o conservadorismo e, para isso, são desenvolvidos diversos tipos de funcionais de Lyapunov-Krasovskii (L-K) (WANG; LAM, 2018, ANGULO; DAVID; BERNAL, 2018, CHE *et al.*, 2018). Um estudo mais profundo sobre sistemas fuzzy T-S com atraso no tempo pode ser encontrado em Wang e Lam (2018). Em Fridman (2014) encontra-se um tutorial sobre métodos baseados em Lyapunov para estabilidade de sistemas com atraso no tempo e alguns resultados avançados sobre o tema.

Segundo Wang e Lam (2018) a maioria dos teoremas que garantem estabilidade para o sistema fuzzy T-S não utilizam as funções de pertinência no funcional de L-K tornando assim as condições para a estabilidade do sistema mais conservadoras. De fato, os melhores resultados presentes na literatura que abordam a estabilidade do sistema fuzzy T-S com atraso no tempo com menor conservadorismo e máximo atraso são os que utilizam as funções de pertinência no funcional de L-K (ANGULO; DAVID; BERNAL, 2018, WANG; LAM, 2018).

Recentemente o controle chaveado tem sido utilizado em projeto de controle mostrando um desempenho melhor ou pelo menos igual comparado com um controlador de ganho único (constante). O controlador chaveado proposto por Souza *et al.* (2013) para plantas lineares e invariantes no tempo com incertezas politópicas é menos conservador do que o controlador de ganho único na realimentação do vetor de estado. Um novo método de projeto de controle chaveado e um novo critério de estabilidade para sistemas não lineares incertos descrito por modelos fuzzy T-S são propostos em Souza *et al.* (2014a, 2014b). O projeto do controlador chaveado é baseado na função de Lyapunov quadrática por partes do tipo mínimo e na minimização da derivada temporal desta função de Lyapunov. No projeto de controle chaveado em Alves *et al.* (2016a, 2016b) são apresentados condições que garantem a estabilização local, com taxa de decaimento, de uma classe de sistemas não lineares contínua no tempo, incertas e com saturação no atuador. Além disso, Oliveira *et al.* (2018) considera o índice de desempenho $\mathscr{H}_\infty$ nesta estrutura. Em Wolmuth *et al.* (2019) é proposto o projeto de controle $\mathscr{H}_\infty$ chaveado

com realimentação derivativa de sistemas lineares incertos considerando a saturação do sinal de controle. Em Carniato *et al.* (2020) foi realizado um estudo do problema de controle robusto envolvendo custo $\mathscr{H}_\infty$ para sistemas lineares chaveado no tempo contínuo, sujeito à saturação no atuador e com incertezas politópicas considerando leis de chaveamento e controle chaveado dependentes da saída da planta.

De acordo com Santim *et al.* (2012) mesmo que o sistema não linear tenha parâmetros incertos é possível obter um modelo fuzzy que o represente através de um modelo exato dentro de uma região de operação. Porém, as funções de pertinência obtidas são incertas, pois dependem de parâmetros incertos e, desse modo, não podem ser aplicadas as técnicas de controle que utilizam a Compensação Distribuída Paralela (CDP).

Inspirado em Souza *et al.* (2014a, 2014b) este trabalho propõe um projeto de controle chaveado para modelos fuzzy T-S com atraso no tempo. A principal vantagem em utilizar o controlador chaveado que será empregado, é que o conhecimento das funções de pertinência não é necessário na sua implementação. Na verdade, sua definição é baseada no funcional de L-K e na minimização da derivada temporal desse funcional. O controlador chaveado, em um certo instante de tempo, é formado por um único ganho, escolhido entre um conjunto de ganhos previamente projetados, que é determinado pela lei de chaveamento. Esta lei retorna o menor valor da derivada temporal do funcional de L-K.

Para exemplificar a metodologia proposta, implementações computacionais foram realizadas utilizando a linguagem Yalmip (LOFBERG, 2004) com o solver SeDuMi (STURM, 1999) ou LMILab (GAHINET *et al.*, 1994).

No Capítulo 2 apresentam-se lemas e proposições que são fundamentais na demonstração do principal resultado desta tese e é introduzido o conceito de equações diferenciais com atraso no tempo.

No Capítulo 3 é feita uma breve introdução sobre o método proposto por T-S para determinar uma representação de uma classe de sistemas não lineares com atraso como uma combinação convexa de sistemas lineares com atraso. Define-se a lei de chaveamento para sistemas fuzzy T-S com matriz B constante, o controle chaveado e o controle de ganho único. Os resultados que garantem a estabilidade do sistema apresentam taxa de decaimento para os controladores chaveado e de ganho único. São realizadas simulações numéricas comprovando que o desempenho do controlador chaveado é melhor ou pelo menos igual ao do obtido com um controlador de ganho único.

Uma nova lei de controle chaveada é proposta no Capítulo 4 para sistemas não lineares com atraso no tempo em que a matriz B possui parâmetros incertos que são representados por modelos fuzzy T-S. O controlador chaveado proposto apresenta um bom desempenho e elimina a necessidade de encontrar as expressões explícitas das funções de pertinência que, muitas vezes,

podem serem desconhecidas devido às incertezas na planta. Neste capítulo o principal resultado que garante a estabilidade do sistema com controle chaveado, permite a especificação da taxa de decaimento e, também, são adicionadas restrições nas normas dos ganhos do controlador. São apresentadas simulações numéricas para comprovar a eficácia da metodologia. Neste caso, foi observado que a região de factibilidade para o controlador chaveado é superior à região de factibilidade para o controlador de ganho único.

O Capítulo 5 aborda as conclusões finais e as perspectivas futuras.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram propostos novos métodos de projeto de controle chaveado de sistemas não lineares com parâmetros incertos e atraso no tempo utilizando o modelo fuzzy T-S para determinar LMIs, com taxa de decaimento, que garante a estabilidade assintótica da origem do sistema. Uma nova lei de controle chaveada foi definida para este sistema com matriz B constante e com matriz B dependente de parâmetros incertos.

No Capítulo 3, foram propostos novos métodos de controle para sistemas não lineares com parâmetros incertos e atraso no tempo descritos por modelo fuzzy T-S com matriz B constante. Neste controlador o ganho é escolhido por uma lei de chaveamento que retorna o menor valor da derivada temporal do funcional L-K. Além disso, as LMIs utilizadas para determinar os ganhos são menos conservadoras do que as LMIs que utilizam apenas um ganho único de realimentação do vetor de estado, como pode ser visto na Figura 1.

No Capítulo 4 foi proposta uma lei de controle para sistemas não lineares com parâmetros incertos e atraso no tempo descritos por modelos fuzzy T-S com incertezas na matriz B. Neste caso, a lei de chaveamento, também, retorna o menor valor da derivada temporal do funcional L-K. As LMIs utilizadas para determinar os ganhos do controle chaveado são menos conservadoras quando comparada com as LMIs que utilizam ganho único na realimentação do vetor de estado. Este resultado pode ser visto nas Figuras 4 e 7.

Uma proposta de trabalho futuro seria adicionar no modelo fuzzy T-S com atraso no tempo uma região de operação e saturação no atuador. Como observado na Figura 2 o surgimento de chattering, utilizar a definição de mínimo suave desenvolvida por Alves *et al.* (2016a, 2016b) e, de modo análogo, construir um controle chaveado suave com intuito de minimizá-lo no sinal de controle. Fazer uma implementação prática utilizando o projeto de controle chaveado proposto em sistemas não lineares com atraso no tempo.

REFERÊNCIAS

ALVES, U. N. L. T.; TEIXEIRA, M. C. M.; OLIVEIRA, D. R.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E. Smoothing switched control for uncertain T-S fuzzy systems with unknown membership functions, actuator saturation and disturbance. *In:* IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS, 2016. Vancouver. **Proceedings of the** [...]., Vancouver: IEEE, 2016, p. 2212–2219, 2016a.

ALVES, U. N. L. T.; TEIXEIRA, M. C. M.; OLIVEIRA, D. R.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E.; SOUZA, W. A. d. Smoothing switched control laws for uncertain nonlinear systems subject to actuator saturation. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, Oxford, v. 30, n. 8-10, p. 1408–1433, 2016b.

ANGULO, S.; DAVID, V.; BERNAL, M. Nonquadratic stabilization conditions for time-delay nonlinear systems in a Takagi-Sugeno form. *In:* IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS **Proceedings of the** [...]. Rio de Janeiro: IEEE, 2018.

BOYD, S. P.; L., G. E.; FERON, E.; BALAKRISHNAN, V. **Linear matrix inequalities in system and control theory.** Philadelphia: SIAM, 1994.

CAO, Y.-Y.; FRANK, P. M. Stability analysis and synthesis of nonlinear time-delay systems via linear Takagi–Sugeno fuzzy models. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 124, n. 2, p. 213–229, 2001.

CARNIATO, L. A.; CARNIATO, A. A.; TEIXEIRA, M. C. M.; CARDIM, R.; JUNIOR, E. I. M.; ASSUNÇÃO, E. Output control of continuous-time uncertain switched linear systems via switched static output feedback. **International Journal of Control**, Abingdon, v. 93, n. 5, p. 1127–1146, 2020.

CHE, C.; PENG, J.; ZHAO, T.; XIAO, J.; ZHOU, J. Improved stabilization conditions for nonlinear systems with input and state delays via T-S fuzzy Model. Mathematical Problems in Engineering, London, v. 2018, 2018.

COSKUN, S. Robust delay-dependent h_∞ control design for uncertain takagi-sugeno time-delay systems. **Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences**, Istambul, v. 38, n. 3, p. 1351–1368, 2020.

FRIDMAN, E. Tutorial on Lyapunov-based methods for time-delay systems. **European Journal of Control**, Amsterdam, v. 20, n. 6, p. 271–283, 2014.

GAHINET, P.; NEMIROVSKII, A.; LAUB, A. J.; CHILALI, M. The lmi control toolbox. *In:* IEEE CONFERENCE ON DECISION CONTROL, 33, 1994, Lake Buena Vista. **Proceedings of the** [...]. Lake Buena Vista: IEEE, 1994. v. 3, p. 2038–2041.

GAO, Y.; XIAO, F.; LIU, J.; WANG, R. Distributed soft fault detection for interval type-2

fuzzy-model-based stochastic systems with wireless wensor Networks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 334–347, 2019.

GU, K. An integral inequality in the stability problem of time-delay systems. *In:* IEEE. PROCEEDINGS OF THE IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 39, 2000. Sydney. **Proceedings of the** [...]. Sydney: IEEE, 2000. v. 3, p. 2805–2810.

GU, K.; CHEN, J.; KHARITONOV, V. L. **Stability of time-delay systems.** New York: Springer Sience & Business Media, 2003.

GUAN, X. P.; CHEN, C. L. Delay-dependent guaranteed cost control for T-S fuzzy systems with times delays. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 12, n. 2, p. 236–249, 2004.

HALE, J. K.; LUNEL, S. M. V. **Introduction to functional differential equations**. New York: Springer Science & Business Media, 2013.

KOLMANOVSKII, V.; MYSHKIS, A. **Applied theory of functional differential equations**. New York: Springer Science & Business Media, 2012.

KRASOVSKII, N. N. **Stability of motion**. Stanford: Stanford University Press, 1963.

LIAN, Z.; HE, Y.; ZHANG, C. K.; WU, M. Further robust stability analysis for uncertain takagi-sugeno fuzzy systems with time-varying delay via relaxed integral inequality. **Information Sciences**, Philadelhia, v. 409/410, p. 139–150, 2017.

LIN, C.; WANG, Q.-G.; LEE, T. H. Delay-dependent lmi conditions for stability and stabilization of T-S fuzzy systems with bounded time-delay. **Fuzzy sets and systems**, Amsterdam, v. 157, n. 9, p. 1229–1247, 2006.

LOFBERG, J. Yalmip : a toolbox for modeling and optimization in matlab. *In:* IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2004, Taipei. **Proceedings of the** [...]. . Taipei: IEEE, 2004. p. 284–289.

MOON, Y. S.; PARK, P.; KWON, W. H.; LEE, Y. S. Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems. **International Journal of Control**, Abingdon, v. 74, n. 14, p. 1447–1455, 2001.

OLIVEIRA, D. R.; TEIXEIRA, M. C. M.; ALVES, U. N. L. T.; SOUZA, W. A. de; ASSUNÇÃO, E.; CARDIM, R. On local $\mathscr{H}_\infty$ switched controller design for uncertain t–s fuzzy systems subject to actuator saturation with unknown membership functions. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 344, p. 1–26, 2018.

RAZUMIKHIN, B. Stability of delay systems. **Prikladnaâ Matematika i Mehhanika**, Moskow, v. 20, n. 4, p. 500–512, 1956.

SANTIM, M. P. A.; TEIXEIRA, M. C. M.; SOUZA, W. A.; ASSUNÇÃO, E.; CARDIM, R. Design of a Takagi-Sugeno fuzzy regulator for a set of operation points. **Mathematical Problems in Engineering**, New York, v. 2012, n. 1, p. 1–17, 2012.

SOUZA, K. S. **Estudo sobre existência de soluções e oscilação para equações diferenciais**

funcionais com retardamento. 2019. 71 f. Dissertação (Mestrado profissional em matemática) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista , Rio Claro, 2019.

SOUZA, W. A.; TEIXEIRA, M. C.; CARDIM, R.; ASSUNCAO, E. On switched regulator design of uncertain nonlinear systems using Takagi-Sugeno fuzzy models. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 22, n. 6, p. 1720–1727, 2014a.

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

SOUZA, W. A.; 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**, New York, v. 2014, 2014b.

STURM, J. F. Using sedumi 1.02, a matlab toolbox for optimization over symmetric cones. **Optimization Methods and Software**, Abingdon, v. 11, n. 1-4, p. 625–653, 1999.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and Its applications to modeling and control. **IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics**, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 116–132, 1985.

TEIXEIRA, M. C. M.; ASSUNÇÃO, E.; AVELLAR, R. G. On relaxed lmi-based designs for fuzzy regulators and fuzzy observers. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway , v. 11, n. 5, p. 613–623, 2003.

TUAN, H. D.; APKARIAN, P.; NGUYEN, T. Q. Robust and reduced-order filtering: new lmi-based characterizations and methods. **IEEE Transactions on Signal Processing**, Piscataway, v. 49, n. 12, p. 2975–2984, 2001.

WANG, H. O.; TANAKA, K.; GRIFFIN, M. Parallel distributed compensation of nonlinear systems by takagi-sugeno fuzzy model. *In:* PROCEEDINGS OF IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS, 1995, Yokohama. **Proceedings of the** [...]. Yokoham: IEEE, 1995. v. 2, p. 531–538.

WANG, H. O.; TANAKA, K.; GRIFFIN, M. F. An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues. **IEEE transactions on fuzzy systems**, Piscataway, v. 4, n. 1, p. 14–23, 1996.

WANG, L.; LAM, H. K. A new approach to stability and stabilization analysis for continuous-time Takagi-Sugeno fuzzy systems with time delay. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, IEEE, Piscataway, v. 26, n. 4, p. 2460–2465, 2018.

WANG, L.; LAM, H. K. New stability criterion for continuous-time Takagi-Sugeno fuzzy systems with time-varying delay. **IEEE Transactions on Cybernetics**, IEEE, Piscataway, v. 49, n. 4, p. 1551–1556, 2019.

WOLMUTH, L. D.; ALVES, U. N. L. T.; TEIXEIRA, M. C. M.; ASSUNÇÃO, E.; CARDIM, R.; MOREIRA, M. R. Derivative feedback control for a class of uncertain linear systems subject to actuator saturation. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Heidelberg, v. 30, n. 4, p. 490–500, 2019.

WU, M.; HE, Y.; SHE, J.-H. **Stability analysis and robust control of time-delay systems**. New York: Springer, 2010.

ZHAO, Y.; GAO, H.; LAM, J.; DU, B. Stability and stabilization of delayed t–s fuzzy systems: a delay partitioning approach. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, IEEE, Piscataway, v. 17, n. 4, p. 750–762, 2008.

ZORICH, V. A. **Mathematical analysis II**. New York: Springer, 2016.