RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo deste documento será
disponibilizado a partir de
07/02/2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

Anthony Fluker Cueva

CONTROLE CHAVEADO $\mathcal{H}_\infty$ SEM CHATTERING DE SISTEMAS NÃO LINEARES COM INCERTEZAS VIA MODELOS FUZZY TAKAGI-SUGENO E FUNÇÕES DE LYAPUNOV NÃO QUADRÁTICAS

Ilha Solteira
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

Anthony Fluker Cueva

CONTROLE CHAVEADO $\mathcal{H}_\infty$ SEM CHATTERING DE SISTEMAS NÃO LINEARES COM INCERTEZAS VIA MODELOS FUZZY TAKAGI-SUGENO E FUNÇÕES DE LYAPUNOV NÃO QUADRÁTICAS

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira.

Área de Conhecimento: Automação.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Fluker Cueva, Anthony.
F646c Controle chaveado $\mathcal{H}\infty$ sem chattering de sistemas não lineares com incertezas via modelos Fuzzy Takagi-Sugeno e funções de Lyapunov não quadráticas / Anthony Fluker Cueva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
77 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2024

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira

Inclui bibliografia

1. Funcional de Lyapunov não quadrático. 2. Controle chaveado. 3. Sem deslizamento. 4. Modelos Fuzzy Takagi-Sugeno. 5. Desigualdades lineares matriciais.

Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CONTROLE CHAVEADO H SEM CHATTERING DE SISTEMAS NÃO LINEARES COM INCERTEZAS VIA MODELOS FUZZY TS E FUNÇÕES DE LYAPUNOV NÃO QUADRÁTICAS

AUTOR: ANTHONY FLUKER CUEVA
ORIENTADOR: MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

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

Prof. Dr. EDVALDO ASSUNÇÃO (Participaçao Presencial)
Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. UILIAM NELSON LENDZION TOMAZ ALVES (Participaçao Virtual)
Departamento de Eixo de Controle e Processos Industriais / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná - IFPR

Ilha Solteira, 07 de fevereiro de 2024

Dedico este trabalho à minha família,
com especial carinho para minha esposa
Rosangel e à minhã mãe Juana.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me capacitou, deu me saúde e forças para que tudo isso fosse possível.

À minha melhor amiga e esposa amada Rosangel pelo companheirismo, paciência e carinho que ela teve para comigo durante esse trabalho.

Aos meus pais amados, Juana e Miguel, que sempre acreditaram em mim e aos meus demais familiares.

Ao professor Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira por aceitar me orientar nesse trabalho, pelos ensinamentos, por compartilhar comigo seus conhecimentos acadêmicos, pela paciência, pelas sugestões a esse trabalho, por acreditar em mim e no meu potencial e tornar esse trabalho um aprendizado prazeroso. Se cheguei até aqui foi porque tive pessoas iguais a você que acreditaram em mim.

A todos os meus amigos que tive a oportunidade de conhecer durante a minha vida acadêmica, por terem me motivado a prosseguir, dividirem comigo seus conhecimentos e tornarem essa jornada mais alegre e prazerosa.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"Mas os que esperam em Jeová renovarão as suas forças; subirão com asas como águias; correrão e não se cansarão, andarão e não se fatigarão."
(Isaías 40:31)

RESUMO

Esta dissertação propõe o projeto de um método de controle chaveado $\mathcal{H}_\infty$ sem deslizamento para sistemas não lineares com incertezas, descritos por modelos fuzzy Takagi-Sugeno (T-S) baseados em um Funcional de Lyapunov Não Quadrático (em inglês Non-Quadratic Lyapunov Functional (NQLF)) com atraso de tempo, o que permite gerar uma região de factibilidade maior do que a obtida com um controlador baseado em uma Função de Lyapunov Quadrática (em inglês Quadratic Lyapunov Function (QLF)). Além disso, o método de controle proposto gera condições de estabilidade não conservativas e evita o cálculo das Funções de Pertinência (em inglês Members Functions (MF)) correspondentes aos modelos fuzzy T-S. A validação do método proposto neste trabalho será demonstrada matematicamente e também através de simulações.

Palavras-chave: funcional de Lyapunov não quadrático; controle chaveado; sem deslizamento; modelos fuzzy Takagi-Sugeno; desigualdades lineares matriciais.

ABSTRACT

This dissertation proposes the design of a switched $\mathcal{H}_\infty$ method control without chattering for uncertain nonlinear systems, described by Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy models based on a Non-Quadratic Lyapunov Functional (NQLF) with time delay, allowing the generation of a larger feasibility region than that obtained with a controller based on a Quadratic Lyapunov Function (QLF). Additionally, the proposed control method generates non-conservative stability conditions and avoids the computation of the Membership Functions (MF) corresponding to the T-S fuzzy models. The validation of the proposed method in this work will be demonstrated both mathematically and through simulations.

Keywords: non-quadratic Lyapunov functional; switched control; chattering; Takagi-Sugeno fuzzy models; linear matrix inequalities.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Região de factibilidade correspondente ao *Teorema 1* (△, ◯, ×), *Teorema 2* (△, ◯), *Teorema 3* (△). 30

Figura 2 – Comportamento dinâmico do sistema não linear descrito em (17) e (75) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento (14) - (16), considerando uma NQLF com retardo temporal $\varphi = 0,1s$ e as condições LMIs (30). 32

Figura 3 – Variação temporal de $\alpha_i(t)$ correspondente ao sistema não linear descrito em (17) e (75) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento (14) - (16), considerando uma NQLF com retardo temporal (9) e as condições de factibilidade. 33

Figura 4 – Variação temporal da regra de chaveamento σ correspondente ao sistema não linear descrito em (17) e (75) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento (14) - (16), considerando uma NQLF (9) e as condições de factibilidade. 34

Figura 5 – Variação temporal de $h_i(t)$ correspondente ao sistema não linear descrito em (17) e (75) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento (14) - (16), considerando uma NQLF (9) e as condições de factibilidade. 35

Figura 6 – Varição temporal de $h_i^-(t)$ correspondente ao sistema não linear descrito em (17) e (75) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento (14) - (16), considerando uma NQLF (9) e as condições de factibilidade. 35

Figura 7 – Variação temporal de $v_l(t)$ correspondente ao sistema não linear descrito em (17) e (75) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento (14) - (16), considerando uma NQLF (9) e as condições de factibilidade. 36

Figura 8 – Região de factibilidade correspondente ao *Teorema 6* (△), *Teorema 5* (△, ◯) e *Teorema 4* (△, ◯, ×). 46

Figura 9 – Comportamento dinâmico do sistema não linear descrito em (77) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento $\mathcal{H}_\infty$ (14)-(16), considerando uma NQLF com retardo temporal $\varphi = 0,1s$ e as condições de factibilidade. 47

Figura 10 – A variação temporal de $\alpha_i(t)$ é mostrada para o sistema não linear descrito em (77) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento $\mathcal{H}_\infty$ (14)-(16), considerando uma NQLF (9) e as condições de factibilidade. 48

Figura 11 – A variação temporal da regra de chaveamento σ correspondente ao sistema não linear descrito em (77) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento $\mathcal{H}_\infty$ (14)-(16), considerando uma NQLF (9) e as condições de factibilidade. 49
Figura 12 – Variação temporal de $h_i(t)$ correspondente ao sistema não linear descrito em (77) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento $\mathcal{H}_\infty$ (14)-(16), considerando uma NQLF (9) e as condições de factibilidade. 50
Figura 13 – Variação temporal de $h_i^-(t)$ correspondente ao sistema não linear descrito em (77) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento $\mathcal{H}_\infty$ (14)-(16), considerando uma NQLF (9) e as condições de factibilidade. 51
Figura 14 – Variação temporal de $v_l(t)$ correspondente ao sistema não linear descrito em (77) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento $\mathcal{H}_\infty$ (14)-(16), considerando uma NQLF (9) e as condições de factibilidade. 52
Figura 15 – Comparação dos índices de desempenho γ correspondentes ao *Teorema 5* (◯) e ao *Teorema 6* (△). 53
Figura 16 – Comparação do comportamento dinâmico do sistema não linear descrito em (77) diante de um controlador definido pelo *Teorema 5* e pelo *Teorema 7*. 59
Figura 17 – Comparação do comportamento dinâmico do sistema não linear descrito em (77) diante de um controlador definido pelo *Teorema 5* e pelo *Teorema 7* entre 10 e 20 segundos. 60
Figura 18 – A variação temporal de $\alpha_i(t)$ é mostrada para o sistema não linear descrito em (14), (15) e (120) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento $\mathcal{H}_\infty$ sem chattering, considerando uma NQLF com atraso temporal (9). 61
Figura 19 – Comparação da regra de chaveamento σ e λ do sistema não linear descrito em (77) diante de um controlador definido pelo *Teorema 5* e pelo *Teorema 7*. 62
Figura 20 – Variação temporal de $h_i(t)$ correspondente ao sistema não linear descrito em (14), (15) e (120) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento $\mathcal{H}_\infty$ sem chattering, considerando uma NQLF com atraso temporal (9) 63
Figura 21 – Variação temporal de $h_i^-(t)$ correspondente ao sistema não linear descrito em (14), (15) e (120) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento $\mathcal{H}_\infty$ sem chattering, considerando uma NQLF com atraso temporal (9). 64

Figura 22 – Variação temporal de $v_l(t)$ correspondente ao sistema não linear descrito em (5) - (7), (75) com $a = 3$ e $b = -1$, controlado pela lei de chaveamento $\mathcal{H}_\infty$ sem chattering, considerando uma NQLF com atraso temporal (9). 65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

T-S	Takagi-Sugeno
NQLF	Non-Quadratic Lyapunov Functional
QLF	Quadratic Lyapunov Function
MF	Member Function
PDC	Parallel Distributed Compensation
LMI	Linear Matrices Inequalities

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathbb{R}$	Conjunto dos números reais
$\mathbb{R}^n$	Espaço dos vetores coluna de dimensão n com entradas reais
$\mathbb{R}^{n\times m}$	Espaço das matrizes de dimensão n por m com entradas reais
I_n	Matriz Identidade de ordem n
M_z	Matriz com incertezas politópicas
K_r	Conjunto {1,2,. . . ,r}
d/dt	Operador derivada em relação ao tempo
$x(t)$	Vetor de estado
$u(t)$	Lei de controle
r	Número de termos variantes da matriz $A(t)$
$N = 2^r$	Número de modelos locais *fuzzy*
$V(x)$	Função de Lyapunov
$\alpha_i(t)$	Funções de pertinência
$h_j(t)$	Lei de chaveamento
σ	Índice de chaveamento
λ	Índice de chaveamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS 18

2.1 TÉCNICAS DE PARAMETRIZAÇÃO EM LMIs 18

2.2 REPRESENTAÇÃO GERAL DE UM SISTEMA NÃO LINEAR COM INCERTEZAS PARAMÉTRICAS E PERTURBAÇÕES EXTERNAS 19

2.3 REPRESENTAÇÃO EXATA DE UM SISTEMA NÃO LINEAR COM INCERTEZAS PARAMÉTRICAS E PERTURBAÇÕES EXTERNAS ATRAVÉS DO MODELO FUZZY T-S 19

2.4 FUNCIONAL DE LYAPUNOV NÃO QUADRÁTICO COM ATRASO TEMPORAL 20

2.5 LEI DE CONTROLE CHAVEADO 21

3 CONTROLE CHAVEADO COM ATRASO TEMPORAL EM SISTEMAS NÃO LINEARES FUZZY T-S 22

3.1 PROJETO DE UM CONTROLADOR CHAVEADO EM SISTEMAS NÃO LINEARES FUZZY T-S UTILIZANDO UMA NQLF COM ATRASO TEMPORAL 24

3.2 PROJETO DE UM CONTROLADOR CHAVEADO EM SISTEMAS NÃO LINEARES FUZZY T-S UTILIZANDO UMA QLF 26

3.3 EXEMPLOS 29

4 CONTROLE CHAVEADO $\mathcal{H}_\infty$ EM SISTEMAS NÃO LINEARES FUZZY T-S COM RETARDO TEMPORAL 37

4.1 PROJETO DE UM CONTROLADOR CHAVEADO $\mathcal{H}_\infty$ EM SISTEMAS NÃO LINEARES FUZZY T-S UTILIZANDO NQLF COM RETARDO TEMPORAL 39

4.2 PROJETO DE UM CONTROLADOR CHAVEADO $\mathcal{H}_\infty$ EM SISTEMAS NÃO LINEARES FUZZY T-S UTILIZANDO QLF 42

4.3 EXEMPLOS 45

5 CONTROLE CHAVEADO $\mathcal{H}_\infty$ SEM CHATTERING EM SISTEMAS NÃO LINEARES FUZZY T-S COM RETARDO TEMPORAL 54

5.1 Exemplos 58

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS 66

REFERÊNCIAS 67

APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS NO EXEMPLO 2 69

APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS NO EXEMPLO 4 73

APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS NO EXEMPLO 5 77

1 INTRODUÇÃO

Dentro do projeto de controladores para sistemas não lineares, há várias razões que tornam os modelos fuzzy Takagi-Sugeno (T-S) são efetivos. Por exemplo, sua representação exata ou aproximada de uma ampla classe de sistemas não lineares em um conjunto compacto do espaço de estados, que se comporta como um conjunto (combinação convexa) de modelos lineares, facilitando a análise da estabilidade e o projeto de controladores utilizando o método direto de Lyapunov (Takagi; Sugeno, 1985). Outra característica é a definição das funções de pertinência (em inglês Members Functions (MF)) (Taniguchi *et al.*, 2001), que permite associar facilmente as não-linearidades comuns em certos modelos independentes. Uma característica adicional é a busca por um controlador adequado por meio de uma Compensação Distribuída em Paralelo (PDC) até atingir certas condições na forma de uma ou várias Desigualdades Lineares Matriciais (em inglês Linear Matrix Inequalities (LMIs)), que são resolvidas por métodos de otimização convexa.

Esses modelos fuzzy T-S foram abordados inicialmente utilizando por uma função de Lyapunov quadrática (em inglês Quadratic Lyapunov Function (QLF)), onde as condições de estabilidade eram suficientes devido à falta de unicidade na construção desses modelos e à maneira como as MF eram consideradas como somas convexas, cuja resolução era feita a partir da definição da função de Lyapunov $V(x)$.

Entendendo a relevância da função de Lyapunov na análise dos modelos fuzzy T-S, neste trabalho testa-se uma função de Lyapunov mais geral, como a função de Lyapunov fuzzy ou também chamada não quadrática, a qual nos permite obter condições globais de estabilidade, apesar de manter a incerteza das derivadas temporais das MF, à custa de impor estruturas restritivas para garantir que a integral de linha seja independente da trajetória. Sobre estas considerações, leva-se em conta a inclusão de um atraso temporal (φ) que permite aumentar sua região de factibilidade, considerando na função de Lyapunov integrais adequadas das MF para obter condições globais e evitar as derivadas temporais das MF no cálculo da derivada com relação ao tempo da função de Lyapunov. A utilização deste procedimento proporciona condições mais relaxadas do que as obtidas com QLF. Este Funcional de Lyapunov Não Quadrático (em inglês Non-Quadratic Lyapunov Functional (NQLF)) foi proposto em (Marquez *et al.*, 2016).

Essas considerações foram levadas em conta em (Buzetti, 2021) que propõe um novo controlador chaveado para sistemas não lineares incertos descritos através de modelos fuzzy T-S sem chattering, baseado em uma NQLF com atraso temporal, evitando assim o cálculo das MF correspondentes aos modelos fuzzy T-S, propriedade herdada do controlador chaveado apresentado em (Souza *et al.*, 2013). No entanto, nesta última proposta, não foram incluídas perturbações externas ao sistema.

Controladores chaveados podem ter chattering (chaveamento em alta frequência,

teoricamente infinita), sendo um problema já que sistemas reais não possuem chaveamento ideal, podendo não ser capaz de chavear com a frequência exigida e podendo também danificar os sistemas controlados (Buzetti, 2021).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é criar um método de controle chaveado $\mathcal{H}_\infty$ sem chattering em sistemas não lineares, descritos por modelos fuzzy T-S cujo controlador está baseado em uma NQLF com atraso temporal, com base no procedimento proposto em (Buzetti, 2021).

Assim, espera-se ao incluir a técnica de controle $\mathcal{H}_\infty$ à metodologia desenvolvida (Buzetti, 2021), reduzir o efeito dessas perturbações na saída do sistema.

Para validar a metodologia de controle proposta, serão utilizados os resultados apresentados em Marquez *et al.* (2016) e (Buzetti, 2021) como referências. As simulações serão realizadas utilizando as ferramentas de otimização matemática (Löfberg, 2004) e (Sturm, 1999) no Matlab.

A seguir, descreve-se a notação que será utilizada ao longo do trabalho: $\mathbb{K}_r = \{1, 2, \ldots, r\}, r \in \mathbb{N}$. O símbolo $(*)$ denota a transposição dos termos em seu lado esquerdo quando se trata de uma expressão em linha; e no caso de expressões matriciais, denotará a transposição de sua entrada de bloco simétrico. I_n representa uma matriz identidade de ordem n. Finalmente, M_z representa uma matriz com incertezas politópicas que pode ser descrita por uma combinação convexa de N matrizes M_i, onde $N = 2^r$ representa o número de vértices do conjunto politopo e r representa o número de parâmetros incertos distintos para sistemas lineares ou o número de funções não lineares distintas para sistemas não lineares, de forma que:

$$\begin{gathered} M_z = \sum_{i=1}^{r} \alpha_i M_i, \\ \alpha = [\alpha_1 \alpha_2 \ldots \alpha_r]^T \in \Lambda_r = \left\{ \alpha \in \mathbb{R}^r : \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^{r} \alpha_i = 1, i \in \mathbb{K}_r \right\}. \end{gathered} \tag{1}$$

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi desenvolvida e proposta uma metodologia de controle chaveado $\mathcal{H}_\infty$ sem chattering aplicado a sistemas não lineares com incertezas paramétricas e perturbações externas descritas por modelos fuzzy T-S e uma NQLF com atraso temporal.

A motivação desta pesquisa foi a busca por uma metodologia de controle que nos permita manter uma maior faixa de viabilidade em relação a outras metodologias baseadas em QLF e garantir a estabilidade mesmo na presença de perturbações.

A teoria do controle $\mathcal{H}_\infty$ tem sido amplamente reconhecida por sua capacidade de lidar com problemas de estabilidade e desempenho em sistemas de controle. Neste caso, essa teoria foi utilizada para projetar um controlador chaveado sem chattering que minimize os efeitos adversos gerados por perturbações externas, proporcionando assim uma maior robustez ao sistema.

Para garantir a estabilidade global do sistema, foi utilizada uma NQLF com atraso temporal no projeto do controlador. Essas funções têm se mostrado uma escolha acertada, permitindo ampliar a faixa de viabilidade que um sistema pode abordar em casos reais.

Um dos aspectos mais destacados deste controlador é a sua capacidade de resistir a perturbações externas e variações nos parâmetros do sistema. Essa robustez é um fator crítico na aplicação prática, onde os sistemas frequentemente estão sujeitos a perturbações e variações que podem afetar seu desempenho.

Em conclusão, este trabalho representa um passo significativo em direção ao desenvolvimento de técnicas de controle mais avançadas e efetivas para sistemas não lineares incertos.

REFERÊNCIAS

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

BOYD, S.; GHAOUI, L. E.; FERON, E.; BELAKRISHNAN, V. **Linear matrix inequalities in system and control theory**. Philadelphia, USA: SIAM, 1994. (SIAM: Studies In Applied Mathematics).

BUZETTI, A. S. **Controle Chaveado de Sistemas Não Lineares com Incertezas utilizando Funções de Lyapunov Não Quadráticas**. 2021. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2021.

GU, K.; CHEN, J.; KHARITONOV, V. L. **Stability of Time-Delay Systems**. [*S.l.: s.n.*]: Springer, 2003.

LÖFBERG, J. Yalmip: a toolbox for modeling and optimization in matlab. *In*: IEEE. **Proceedings of the CACSD Conference, Taipei, Taiwan**. [*S.l.: s.n.*], 2004. p. 284–289.

MARQUEZ, R.; GUERRA, T.; BERNAL, M.; KRUSZEWSKI, A. A non-quadratic lyapunov functional for $\mathcal{H}_\infty$ control of nonlinear systems via takagi–sugeno models. **Journal of the Franklin Institute**, Elsevier, v. 353, n. 4, p. 781–796, 2016.

PEAUCELLE, D.; ARZELIER, D.; BACHELIER, O.; BERNUSSOU, J. A new robust d-stability condition for real convex polytopic uncertainty. **Systems & Control Letters**, v. 40, n. 1, p. 21–30, 2000.

SANTIM, M. P. A.; TEIXEIRA, M. C. M.; SOUZA, W. A.; ASSUNCAO, E.; CARDIM, R. Design of a takagi-sugeno fuzzy regulator for a set of operation points. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, v. 2012, p. 1–17, 2012.

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

SOUZA, W. A. d.; 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**, Hindawi, v. 2013, p. 10, 2013.

STURM, J. Using sedumi 1.02, a matlab toolbox for optimization over symmetric cones. **Optimization Methods and Software**, v. 11, n. 12, p. 625–653, 1999.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, IEEE, v. 15, n. 1, p. 116–132, 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**, IEEE, v. 6, n. 2, p. 250–265, 1998.

TANIGUCHI, T.; TANAKA, K.; OHTAKE, H.; WANG, H. O. Model construction, rule reduction, and robust compensation for generalized form of takagi-sugeno fuzzy systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, IEEE, v. 9, n. 4, p. 525–537, 2001.

TUAN, H. D.; APKARIAN, P.; NARIKIYO, T.; YAMAMOTO, Y. Parameterized linear matrix inequality techniques in fuzzy control system design. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, IEEE, v. 9, n. 2, p. 324–332, 2001.