

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 25/02/2024.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

DANTE JAVIER SOLIS ONCOY

**SÍNTESE DE CONTROLE CHAVEADO PARA SISTEMAS
FUZZY TAKAGI-SUGENO USANDO UMA FUNÇÃO DE
LYAPUNOV FUZZY**

Ilha Solteira
2023

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DANTE JAVIER SOLIS ONCOY

**SÍNTESE DE CONTROLE CHAVEADO PARA SISTEMAS
FUZZY TAKAGI-SUGENO USANDO UMA FUNÇÃO DE
LYAPUNOV FUZZY**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira-UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Especialidade: Automação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Cardim

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S687s Solis Oncoy, Dante Javier.
Síntesis de controle chaveado para sistemas Fuzzy Takagi-Sugeno usando uma função de Lyapunov Fuzzy / Dante Javier Solis Oncoy . -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
103 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2023

Orientador: Rodrigo Cardim

Inclui bibliografia

1. Sistemas Fuzzy Takagi-Sugeno. 2. Controle chaveado. 3. Função de Lyapunov Fuzzy.


Amanda Sertori dos Santos

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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SÍNTESE DE CONTROLE CHAVEADO PARA SISTEMAS FUZZY TAKAGI-SUGENO USANDO UMA FUNÇÃO DE LYAPUNOV FUZZY

AUTOR: DANTE JAVIER SOLIS ONCOY

ORIENTADOR: RODRIGO CARDIM

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

Prof. Dr. RODRIGO CARDIM (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

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

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

Documento assinado digitalmente



UILIAM NELSON LENDZION TOMAZ ALVES

Data: 25/08/2023 12:36:28-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ilha Solteira, 25 de agosto de 2023

*Dedico este trabalho à Deus,
e com especial carinho para minha mãe e minha namorada.*

Agradecimentos

Agradeço principalmente a Deus por me permitir concluir essa etapa com serenidade, me dando saúde, cuidando dos meus familiares e me iluminando nos momentos de dificuldade. Sem essa ajuda, este trabalho não teria sido possível.

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

À minha amada mãe Beatriz, por seu apoio e amor incondicional durante toda a vida.

Ao professor Dr. Rodrigo Cardim, pela oportunidade, pela excelente orientação e pela grande amizade que me ofereceu ao longo dessa etapa. Sem dúvida, será um grande prazer continuarmos trabalhando juntos.

Ao professor Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira, pelos ensinamentos, pela amizade e pelos conselhos profissionais e pessoais compartilhados durante todo esse período. Sem dúvida, o senhor é um exemplo de professor, pesquisador e pessoa.

Ao meu amado irmão e meu querido pai, pela amizade e pela inspiração para a pesquisa.

Aos professores Dr. Edvaldo Assunção e Dr. Flavio Faria, pelas dicas de pesquisa e amizade.

A todos os meus amigos do laboratório de pesquisa de controle, pelas conversas interessantes sobre pesquisa e a vida, que fazem com que seja um prazer pertencer a este grande laboratório.

A todos os meus amigos e compatriotas que moram na Ilha, por fazerem desta bela cidade um lugar mais confortável para se viver.

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.

*"A verdadeira riqueza não consiste em ter grandes posses,
mas em ter poucas necessidades."
(Epicteto)*

Resumo

O uso de uma função Lyapunov fuzzy tem vantagens no estudo da estabilidade dos sistemas fuzzy Takagi-Sugeno (T-S), assim como no projeto de estratégias de controle mais eficientes. Nesta dissertação, é proposta uma nova abordagem para o projeto de controladores chaveados usando uma função de Lyapunov fuzzy. Utilizando as propriedades da combinação convexa de números, são apresentadas novas condições de projeto expressas na forma de desigualdades matriciais lineares (LMIs) para um controlador chaveado com uma lei de chaveamento baseada nas funções *max* e *min*, as quais são amplamente usadas na literatura com respeito aos sistemas chaveados. A vantagem da abordagem proposta é que ela apresenta um baixo esforço computacional no projeto dos ganhos e um baixo número de controladores a serem chaveados, em comparação com outros métodos apresentados na literatura. Além disso, ela pode ser estendida para o projeto de controladores chaveados usando uma função de Lyapunov fuzzy generalizada, diminuindo o conservadorismo das condições para um grau mais alto de generalização. Portanto, com base nessa proposta, um controlador chaveado será projetado levando em conta um sistema não linear com a presença de incertezas e, no caso de sistemas não lineares sem a presença de incertezas, a estratégia do controlador chaveado será aplicada a um controlador baseado na compensação paralela distribuída (PDC), para logo apresentar o controlador de não compensação paralelo distribuído (non-PDC) chaveado, a fim de reduzir o conservadorismo das condições de projeto. Vários exemplos serão analisados a fim de esclarecer os conceitos fundamentais que serão úteis para o desenvolvimento deste trabalho, assim como para verificar a eficiência dos resultados obtidos em relação a outros métodos propostos na literatura.

Palavras-chave: função de Lyapunov fuzzy; sistemas fuzzy Takagi-Sugeno; controle chaveado; desigualdades matriciais lineares.

Abstract

The use of a fuzzy Lyapunov function has advantages in studying the stability of fuzzy Takagi-Sugeno (T-S) systems as well as in designing more efficient control strategies. In this work, a new approach to the design of switched controllers using a fuzzy Lyapunov function is proposed. Based on the properties of convex combinations of numbers and a switching law based on the *max* and *min* functions widely used in the literature related to switched systems, new design conditions for the switched controller are presented in the form of linear matrix inequalities (LMIs). The advantage of the proposed approach is that it has a low computational complexity in the design of the gains and a small number of controllers to be switched, compared to other methods presented in the literature. Moreover, it can be extended to the design of switched controllers using a generalised fuzzy Lyapunov function, reducing the conservatism of the conditions for a higher degree of generalisation. Therefore, based on this proposal, a switched controller will be designed considering a nonlinear system with the presence of uncertainties and, in the case of nonlinear systems without the presence of uncertainties, the switched controller strategy will be applied to a controller based on parallel distributed compensation (PDC), and then, is presented a non parallel distributed compensation (non-PDC) switched controller, in order to reduce the conservatism of the design conditions. Several examples will be analysed in order to clarify the basic concepts that will be useful for the development of this work, as well as to verify the efficiency of the results obtained in relation to other methods proposed in the literature.

Keywords: fuzzy Lyapunov function; Takagi-Sugeno fuzzy systems; switched control; linear matrix inequalities.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Circuito equivalente de um conversor buck básico	27
Figura 2 – Funções de pertinência das variáveis premissa	27
Figura 3 – Diferentes superfícies de nível incluídas na região \mathbf{F}	36
Figura 4 – Trajetórias das funções quadráticas locais e a função de Lyapunov fuzzy para uma condição inicial $x_0 = [0.3 \quad -0.3]$	37
Figura 5 – Regiões admissíveis para a trajetória do sistema no Exemplo 3, \mathbf{F} (linhas ponteadas), $\mathbf{F} \cap \mathbf{H}$ (cor amarela) e \mathbf{G}_{c^*} (cor verde) (a) $\rho_i = 9$. (b) $\rho_i = 4$	38
Figura 6 – Visão geral da divisão do espaço \mathbb{R}^n devido à uma função de comutação $\sigma(x(t))$	41
Figura 7 – Sub-regiões obtidas pela função por partes fornecida no Exemplo 4	42
Figura 8 – Diagrama de blocos do controlador chaveado	45
Figura 9 – Diagrama de blocos do controlador chaveado para sistemas incertos	47
Figura 10 – Região de factibilidade para $\rho_i = \pi/4, i \in \mathbb{K}_r$, Mozelli, Palhares e Avellar (2009) (\bullet), método do politopo (\circ, \bullet, \bullet). (a) Faria, Silva e Oliveira (2013) para $k = 1$ (\bullet, \bullet). (b) Faria, Silva e Oliveira (2013) para $k = 4$ (\bullet)	57
Figura 11 – Região de factibilidade para $\rho_i = 10, i \in \mathbb{K}_r$, Mozelli, Palhares e Avellar (2009) (\bullet), método do politopo (\circ, \bullet, \bullet). (a) Faria, Silva e Oliveira (2013) para $k = 1$ (\bullet, \bullet). (b) Faria, Silva e Oliveira (2013) para $k = 4$ (\bullet)	58
Figura 12 – Regiões admissíveis para as trajetórias de estado do sistema para $\rho_i = 10$, $\partial\mathbf{F}$ (linhas ponteadas), $\mathbf{F} \cap \mathbf{H}$ (cor amarela) e as superfícies de nível estimadas com o Teorema 6 (a) $[a, b] = [-6, 35]$. (b) $[a, b] = [-2, 12]$	59
Figura 13 – Valores máximos de λ em relação a ρ no Exemplo 7	60
Figura 14 – Região de factibilidade para $\rho_i = 10, i \in \mathbb{K}_r$ considerando matrizes auxiliares fuzzy em todas as estratégias, Mozelli, Palhares e Avellar (2009) (\bullet), Faria, Silva e Oliveira (2013) para $k = 1$ (\bullet, \bullet) e o método do politopo (\circ, \bullet, \bullet)	63
Figura 15 – Regiões admissíveis da trajetória do sistema para $\rho_i = 10$, $\partial\mathbf{F}$ (linhas ponteadas), $\mathbf{F} \cap \mathbf{H}$ (cor amarela) e as superfícies de nível estimadas com o Teorema 6: linha preta (sem matrizes auxiliares fuzzy) e linha azul (considerando matrizes auxiliares fuzzy)	63
Figura 16 – Forma geral do politopo convexo \mathcal{F}	66
Figura 17 – (a) Região de factibilidade obtida com o Teorema 8 (\bullet), o Corolário 1 (\bullet, \bullet), e o Teorema 12 (\bullet, \bullet, \circ), (b) Região de factibilidade ampliada para o Corolário 1 (\bullet), e o Teorema 12 (\bullet, \circ)	76
Figura 18 – Esquema do sistema de suspensão magnética	77

Figura 19 – Comparação das respostas temporais do sistema, entre o Teorema 7, o Teorema 8, e o Teorema 12. (a) Posição da massa. (b) Velocidade da massa. (c) Sinal de controle. (d) Lei de chaveamento $\sigma(t)$	79
Figura 20 – Comparação das respostas temporais do sistema, entre o Teorema 7, o Teorema 8, e o Teorema 12. (a) Sinal de controle. (b) Posição da massa	80
Figura 21 – (a) Região de factibilidade obtida com o Teorema 4 (\bullet), Mozelli, Palhares e Avellar (2009) (\bullet, \bullet), Lazarini (2021) ($\bullet, \bullet, \bullet$) e o Corolário 2 ($\bullet, \circ, \bullet, \bullet$); (b) Região de factibilidade ampliada para o Corolário 2 (\bullet), e o Teorema 13 (\bullet, \circ)	85
Figura 22 – Região de factibilidade obtida com o Teorema 13 (\bullet) e o Teorema 14 (\bullet, \circ)	88
Figura 23 – Diagrama de blocos do controlador non-PDC chaveado	90
Figura 24 – (a) Região de factibilidade obtida com o Teorema 13 (\bullet) e o Teorema 15 (\bullet, \circ). (b) Região de factibilidade obtida com o Teorema 14 (\bullet) e o Teorema 16 (\bullet, \circ)	95
Figura 25 – Perspectiva para a divisão do politopo. (a) Considerando a superfície de chaveamento. (b) Considerando uma superfície arbitrária	98

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Valores máximos de λ para diferentes valores de ρ no Exemplo 7	60
Tabela 2	–	Tabela comparativa do número de LMIs das estratégias analisadas para a análise de estabilidade.	69
Tabela 3	–	Tabela comparativa do número de LMIs (análise de estabilidade) com respeito ao número de variáveis premissa.	69
Tabela 4	–	Tabela comparativa do número de LMIs e ganhos a serem chaveados. .	70
Tabela 5	–	Tabela comparativa do número de ganhos a serem chaveados com respeito ao número de variáveis premissa.	70
Tabela 6	–	Tabela comparativa do número de LMIs e ganhos a serem chaveados (entre parênteses).	75
Tabela 7	–	Parâmetros de simulação.	78
Tabela 8	–	Valores máximos de b com respeito a alguns valores de a e o número de LMIs de cada estratégia.	95

Lista de abreviaturas e siglas

LMI	Linear Matrix inequalities
LPV	Linear Parameter-Varying
LTI	Linear Time-Invariant
PDC	Parallel Distribution Compensation
T-S	Takagi Sugeno
MFs	Membership Functions
FLF	Função de Lyapunov fuzzy
FLG	Função de Lyapunov generalizada

Lista de símbolos

\mathbb{R}	Conjunto dos números reais.
\mathbb{R}_{0+}	Conjunto dos números reais não negativos incluindo o zero.
\mathbb{R}^n	Espaço euclidiano de dimensão n .
$\mathbb{R}^{n \times m}$	Conjunto de matrizes de dimensão n por m .
\mathbb{N}	Conjunto dos números naturais.
\mathbb{K}_r	Representa o conjunto de números $\{1, 2, \dots, r\}, \forall r \in \mathbb{N}$.
\mathbf{D}	Representa um conjunto compacto que inclui a origem.
$\mathbf{D} - \{0\}$	Representa o conjunto compacto \mathbf{D} sem incluir a origem.
X^T	Representa a transposta da matriz X
I	Matriz Identidade de ordem apropriado.
$X \geq (>)0$	Matriz X simétrica positiva semidefinida (definida).
$*$	Bloco simétrico de uma matriz simétrica.
Λ_r	Conjunto convexo de dimensão r , ou seja, $\Lambda_r = \{\alpha \in \mathbb{R}^n / \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^r \alpha_i = 1, i \in \mathbb{K}_r\}$.
$X(\alpha)$	Matriz fuzzy $\sum_{i=1}^r \alpha_i(t)X_i$, sendo $\alpha_i(t) \in \Lambda_r$

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS E CONCEITUAIS	21
2.1	SISTEMAS NÃO LINEARES	21
2.1.1	Estabilidade de Lyapunov	23
2.2	MODELO FUZZY TAKAGI-SUGENO	24
2.2.1	Incertezas dos parâmetros	28
2.2.2	Controle fuzzy	30
2.2.3	Condições de projeto alternativas	31
2.2.4	Análise da estabilidade assintótica local	34
2.3	FUNÇÃO DE LYAPUNOV FUZZY	36
2.4	TÉCNICAS DE RELAXAMENTO BASEADAS EM SUB-REGIÕES	40
2.4.1	Técnicas de relaxamento usando expressões positivas	40
2.5	CONTROLE CHAVEADO	44
2.5.1	Controle chaveado com parâmetros incertos	46
3	ANÁLISE DA ESTABILIDADE CONSIDERANDO UMA FLF	50
3.1	ANÁLISE DAS DERIVADAS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA .	50
3.1.1	Estratégias iniciais	51
3.1.2	Estratégias que consideram cenários factíveis	52
3.2	ANÁLISE DA ESTABILIDADE	54
3.2.1	Condições de estabilidade considerando matrizes auxiliares fuzzy	60
4	CONTROLE CHAVEADO PARA SISTEMAS NÃO LINEA- RES INCERTOS	65
4.1	PROJETO DE CONTROLE CHAVEADO BASEADO NO MÉTODO DO POLITÓPO	65
4.1.1	Análise do esforço computacional	68
4.2	ESTRATÉGIA ALTERNATIVA	70
4.3	VALIDAÇÃO	75
5	PROJETO DE CONTROLE CHAVEADO USANDO UMA FLG	81
5.1	PROJETO DE CONTROLE PDC CHAVEADO	81
5.1.1	Projeto de controle chaveado usando uma FLF	82
5.1.2	Projeto de controle chaveado usando uma FLG	84
5.2	PROJETO DE CONTROLE NON-PDC CHAVEADO	88

5.2.1	Projeto de controle chaveado usando uma função de Lyapunov não quadrática	89
5.2.2	Projeto de controle chaveado usando uma função de Lyapunov não quadrática generalizada	93
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
6.1	CONCLUSÕES	96
6.2	POSSÍVEIS PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	97
6.2.1	Análise de estabilidade	97
6.2.2	Projeto de controle chaveado	98
6.2.3	Extensão dos resultados	98
	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

Na realidade, a não linearidade é uma propriedade que está presente na grande maioria dos sistemas. Em contraste com os sistemas lineares, o comportamento dos sistemas não lineares abrange vários fenômenos, como ciclos-limite, múltiplos pontos de equilíbrio, bifurcações, caos, entre outros, que surgem devido aos múltiplos termos não lineares presentes no modelo analítico do sistema (SLOTINE; LI, 1991). Portanto, o estudo da estabilidade a partir de uma análise direta do modelo matemático apresenta diversas dificuldades específicas para cada sistema. Focado no objetivo de estudar a estabilidade dos sistemas não lineares, o método direto de Lyapunov (ou apenas só método de Lyapunov) representa a abordagem mais favorável para esse tipo de sistemas. Este método relaciona o comportamento de um sistema a uma função denominada função de Lyapunov. Então, uma análise direta da função de Lyapunov pode apresentar menos dificuldade e gerar resultados sobre o comportamento do sistema.

De modo geral, nos sistemas lineares invariantes no tempo (do inglês, linear time invariant (LTI)), o método direto de Lyapunov se baseia na análise de uma função conhecida como a função de Lyapunov quadrática. Nesse caso, o método de Lyapunov apresenta a vantagem de garantir que existe uma função de Lyapunov quadrática que garante o conhecimento da estabilidade da origem respeito do sistema LTI dado. Contudo, nos sistemas não lineares, a principal desvantagem do método de Lyapunov reside no caráter contingente das respostas obtidas, ou seja, a análise de uma determinada função de Lyapunov não garante o conhecimento das propriedades do sistema. Com base nisso, um dos principais objetivos do estudo de sistemas não lineares é a busca por novas funções de Lyapunov candidatas que possam gerar uma melhor informação sobre o comportamento do sistema.

Por outro lado, a origem da lógica fuzzy data de tempos mais recentes (ZADEH, 1965). Entretanto, foi apenas em 1974 que essa ferramenta foi aplicada no projeto do controlador fuzzy (MAMDANI, 1974) e, depois, na modelagem de sistemas não lineares (TAKAGI; SUGENO, 1985). Essa última aplicação apresentou uma nova perspectiva sobre a análise de sistemas não lineares pelo fato de que esses sistemas poderiam ser aproximados em qualquer nível de precisão por meio de um sistema fuzzy Takagi-Sugeno (T-S). Os sistemas fuzzy T-S aproximam um sistema não linear por meio de uma combinação convexa de um conjunto de subsistemas lineares com seus respectivos pesos. Essa representação gera uma enorme vantagem ao analisar a estabilidade de um ponto de equilíbrio de um sistema não linear por meio de uma função de Lyapunov quadrática e obter condições do comportamento do sistema com base na solução de um conjunto de desigualdades matriciais lineares (do inglês, linear matrix inequalities (LMIs)) (TANAKA; WANG, 2001). Da mesma forma, com o avanço da computação, os algoritmos baseados

na busca pela solução das LMIs tiveram um grande avanço na década dos anos 1990 (BOYD et al., 1994), obtendo resultados altamente precisos por meio do desenvolvimento do método de pontos interiores. Portanto, esses progressos em conjunto impulsionaram o estudo da estabilidade de sistemas não lineares com base em seu modelo fuzzy T-S.

Embora o modelo T-S fuzzy gere uma perspectiva favorável para a análise de um sistema não linear por meio de uma função de Lyapunov quadrática, a desvantagem característica do método de Lyapunov em sistemas não lineares ainda permanece, o que implica que as condições obtidas na forma de LMIs por meio de uma função de Lyapunov quadrática são apenas condições suficientes para garantir a estabilidade do sistema. A fim de obter condições que permitam uma solução para um número maior de sistemas, um dos objetivos principais de pesquisa na área de sistemas fuzzy T-S se foca em reduzir o conservadorismo das condições. Na literatura, esse objetivo foi desenvolvido em princípio por meio de duas abordagens principais: por meio de técnicas de relaxamento que abordam diretamente as LMIs e pela proposta de novas funções de Lyapunov candidatas. Com relação à primeira abordagem, várias técnicas foram propostas na literatura, reduzindo o conservadorismo das condições com base em uma função de Lyapunov quadrática (KIM; LEE, 2000; TEIXEIRA; ASSUNÇÃO; AVELLAR, 2003; FANG et al., 2006). Contudo, essas técnicas introduzem matrizes de relaxamento auxiliares, aumentando o número de variáveis de decisão e o número de LMIs a serem resolvidos. O incremento das LMIs, mostram outra desvantagem importante dos sistemas fuzzy T-S, o considerável aumento do esforço computacional na busca de soluções para as LMIs em relação ao aumento do número de variáveis de premissa. Portanto, o baixo esforço computacional na busca de soluções tornou-se outro objetivo a ser levado em conta. Com relação à segunda abordagem, várias funções de Lyapunov candidatas foram propostas, entre elas, a função de Lyapunov por partes (JOHANSSON; RANTZER; ARZEN, 1999), a função de Lyapunov fuzzy (TANAKA; HORI; WANG, 2003), a função de Lyapunov baseadas em integral de linha (RHEE; WON, 2006), entre outras. Essa abordagem encontra a limitação da função quadrática e introduzem informações adicionais na função de Lyapunov candidata. Portanto, elas geram condições menos conservadoras sem a necessidade de aumentar o esforço computacional. No entanto, também introduzem novos desafios para lidar com essas novas informações, a fim de manter as condições na forma de LMIs.

Nos últimos anos, a busca para reduzir o conservadorismo das condições de estabilidade tem se concentrado principalmente na consideração das informações das funções de pertinência (do inglês, membership functions (MFs)) do sistema fuzzy T-S. Essas informações são aproveitadas sendo introduzidas principalmente nas funções de Lyapunov candidatas. Adicionalmente, uma enorme vantagem da consideração das MFs é que algumas funções de Lyapunov, como a função de Lyapunov fuzzy ou a função baseada na integral de linha, podem ser generalizadas (BERNAL; GUERRA, 2010; GONZÁLEZ; SALA; BERNAL, 2019). Essa generalização assegura que o conservadorismo seja progres-

sivamente reduzido à medida que a função de Lyapunov candidata se torna mais genérica. Esta vantagem gerou um impulso principalmente no estudo da função de Lyapunov fuzzy (MOZELLI; PALHARES; AVELLAR, 2009; GUERRA; BERNAL, 2009; LEE; PARK; JOO, 2011; FARIA; SILVA; OLIVEIRA, 2013; LAZARINI, 2021), contudo, o principal desafio de usar essa função está em obter uma restrição das derivadas das MFs. A busca de uma solução para esse problema pode ser classificada em duas perspectivas: assumindo que as derivadas das MFs pertencem a um intervalo arbitrário e, assim, obtendo uma análise de estabilidade local, ou por meio de termos baseados na integral das MFs que, ao serem derivadas, eliminam a necessidade de lidar com as derivadas das MFs. Embora a última abordagem apresente uma análise de estabilidade global, a primeira abordagem geralmente apresenta menos conservadorismo ao considerar intervalos cada vez menores. Além disso, essa abordagem torna-se mais forte se levarmos em conta que o modelo fuzzy T-S geralmente aproxima um sistema não linear somente em uma região fechada. Portanto, é evidente que existe um intervalo finito no qual as derivadas dos MFs com relação aos estados pertencentes à região modelada estão dentro desse intervalo.

Em conjunto com as condições de estabilidade, o projeto de controladores para sistemas fuzzy T-S, tem sido um tópico de muita pesquisa nos últimos anos. Como ponto de partida, o controlador baseado na compensação paralela distribuída (do inglês, parallel distributed compensation (PDC)) (WANG; TANAKA; GRIFFIN, 1995) tem sido amplamente abordado na literatura. Isso se deve ao fato de que um sistema fuzzy T-S em malha fechada com um controlador PDC apresenta uma facilidade para estender as condições de estabilidade do sistema na forma de LMIs para as condições de projeto dos ganhos. Essa vantagem tornou possível aproveitar os vários métodos de relaxamento para análise de estabilidade a fim de obter condições de projeto menos conservadoras do controlador PDC (TANAKA; HORI; WANG, 2003; RHEE; WON, 2006; MOZELLI; PALHARES; AVELLAR, 2009; FARIA; SILVA; OLIVEIRA, 2013; LAZARINI, 2021). Entretanto, a principal desvantagem reside na limitação de reduzir o conservadorismo das condições de projeto na presença de funções de Lyapunov não quadráticas. Com foco nesse problema, foi proposto o controlador de não compensação paralela distribuída (do inglês, nonparallel distributed compensation (non-PDC)) (GUERRA; VERMEIREN, 2004) e, desde então, ele tem sido considerado como um controlador com baixo conservadorismo das condições de projeto. O controlador non-PDC é projetado com base em uma função de Lyapunov não quadrática e apresenta um menor conservadorismo em relação ao controlador PDC. Além disso, ele tem a vantagem de incluir as informações das MFs, aproveitando as abordagens propostas para lidar com as derivadas das MFs (LEE; PARK; JOO, 2012; GUERRA et al., 2012; CHEN et al., 2016; MÁRQUEZ et al., 2016). Contudo, o controlador non-PDC apresenta maior complexidade na implementação em relação ao controlador PDC. Isso se deve ao fato de que ele precisa obter a inversa de uma matriz em cada instante de tempo. Assim, essa desvantagem é mais evidenciada quando se analisam sistemas com um elevado

número de variáveis de estado.

Por outro lado, o controlador chaveado é uma estratégia que aborda uma classe mais geral de sistemas (LIBERZON, 2003). Inicialmente, essa estratégia tinha uma forte ênfase em sistemas sujeitos a diferentes necessidades, nos quais era necessário ativar um controlador específico para atender às necessidades de cada contexto (LIBERZON; MORSE, 1999; HESPANHA; MORSE, 2002). Nesse caso, o objetivo era projetar um conjunto de controladores de forma que o sistema de malha fechada fosse estável em qualquer forma de chaveamento. No entanto, outra abordagem importante para o controlador chaveado é a análise do sistema em malha fechada como um sistema chaveado. Então, se for dado um conjunto de controladores de tal forma que, em malha fechada com o sistema, eles sejam instáveis, uma forma apropriada de chaveamento pode estabilizar o sistema. A última abordagem pode tirar proveito das estratégias de estabilização propostas para os sistemas chaveados (LIBERZON, 2003; GEROMEL; COLANERI, 2006b) e estendê-las aos sistemas T-S fuzzy, a fim de reduzir o conservadorismo das condições de projeto.

Nos sistemas T-S fuzzy, a estratégia de controle chaveado foi abordada principalmente para sistemas não lineares na presença de parâmetros incertos. Dentro desse contexto, a principal desvantagem é que os MFs dependerão de parâmetros incertos, tornando inviável a realimentação. Portanto, os controladores dependentes dos MFs, como os controladores PDC ou non-PDC, não podem ser implementados. Focado nesse problema, inicialmente foi proposto um controlador chaveado que comuta apenas os ganhos constantes projetados para o controlador PDC com base em uma função quadrática de Lyapunov e por meio de uma lei de chaveamento específica que estabiliza o sistema (SOUZA et al., 2013). Em seguida, essa estratégia foi estendida para ser projetada por uma função de Lyapunov por partes, obtendo um conservadorismo menor nas condições de projeto (SOUZA et al., 2014). Seguindo essa abordagem, resultados mais recentes estendem o projeto do controlador a vários índices de desempenho, como limitar a norma de \mathcal{H}_∞ (OLIVEIRA et al., 2018b; ONCOY et al., 2022), na redução do custo garantido dos estados (RAMOS et al., 2019; SILVA et al., 2020), no caso de saturação no atuador (ALVES et al., 2016). Além disso, foi estendido nos sistemas fuzzy T-S discretos (OLIVEIRA et al., 2018a; SANTOS et al., 2020); assim também em aplicações para sistemas importantes (GAINO et al., 2020; COVACIC et al., 2020; TEODORO et al., 2020; ONCOY; CARDIM; TEIXEIRA, 2022). Contudo, o foco da estratégia de controle chaveado empregada nesses trabalhos, ainda não foi abordado usando uma função de Lyapunov fuzzy.

Este trabalho apresenta uma síntese da aplicação do controlador chaveado nos sistemas não lineares, por meio de uma função de Lyapunov fuzzy e com foco na redução do conservadorismo das condições de projeto. Esta dissertação propõe uma nova abordagem para limitar os termos dependentes das derivadas das MFs. Além disso, a abordagem proposta tem a vantagem de ser estendida ao uso de funções de Lyapunov dependentes das

MFs mais gerais sem aumentar o número de controladores a serem chaveados. Portanto, a proposta do controle chaveado será estendida ao projeto de controladores PDC e non-PDC chaveados, comprovando a redução considerável do conservadorismo das condições de projeto. Diversos exemplos de simulação serão apresentados, a fim de explicar os conceitos necessários para o desenvolvimento do trabalho e verificar os aprimoramentos obtidos em relação a outros trabalhos recentes na literatura. Assim, esta dissertação está organizada da seguinte forma:

No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos teóricos gerais e uma análise destes, a fim de obter um desenvolvimento adequado do texto.

No Capítulo 3, será apresentada uma análise geral das condições de estabilidade usando uma função de Lyapunov fuzzy e alguns métodos propostos na literatura.

No Capítulo 4, é apresentada uma abordagem para o projeto de um controlador chaveado usando uma função Lyapunov fuzzy. Este capítulo se concentrará nos sistemas não lineares com parâmetros incertos.

No Capítulo 5, a proposta do capítulo anterior será estendida para o uso de uma função Lyapunov fuzzy generalizada. Neste capítulo, o controle PDC e non-PDC chaveados serão apresentados.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e algumas proposta para trabalhos futuros.

Além disso, algumas das contribuições que são apresentadas neste trabalho culminaram na publicação dos seguintes artigos:

- ONCOY, D. J. S.; CARDIM, R.; TEIXEIRA, M. C. M. Switched control based on Takagi- Sugeno fuzzy model for dual active bridge dc-dc converter. In: IEEE Internati- onal Conference on Fuzzy Systems. Padua, 2022. p. 1–7.
- ONCOY, D. J. S.; CARDIM, R.; TEIXEIRA, M. C. M.; ASSUNÇÃO, E. Robust switched controller based on Takagi-Sugeno fuzzy model for dc-dc converters against disturbances. In: IEEE. 16th Int. Workshop Variable Struct. Syst. Rio de Janeiro, 2022. p. 1–7.
- ONCOY, D. J. S.; CARDIM, R.; TEIXEIRA, M. C. M.; FARIA, F. A.; ASSUNÇÃO, E.; LAZARINI, A. Z. N. New stabilization conditions for fuzzy-based sampled-data control systems using a fuzzy Lyapunov functional. IEEE Access, Piscataway, v. 11, p. 15390– 15403, 2023.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tratou de um tópico muito importante na literatura dos sistemas fuzzy T-S, sendo proposto uma abordagem que melhora os resultados com respeito a métodos propostos anteriormente. Além disso, procurou-se não apenas fornecer os resultados obtidos, mas também fornecer uma análise do processo que levou à obtenção desses resultados.

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho começa apresentando alguns conceitos fundamentais dos sistemas não lineares e, na sequência, apresenta os fundamentos importantes que estão presentes na extensa literatura sobre a análise de estabilidade e o projeto de controle dos sistemas fuzzy T-S mediante uma função de Lyapunov fuzzy. Embora algumas conclusões parciais foram mencionadas no final de cada capítulo, é importante destacar que a estratégia de controle chaveado permite aproveitar a teoria presente nos sistemas chaveados. Dessa forma, as técnicas de relaxamento baseadas no conceito de sub-regiões obtidas pela função de chaveamento podem ser exploradas nos sistemas fuzzy T-S, reduzindo o conservadorismo das condições em relação à consideração de um único ganho para o controlador.

No Capítulo 3, foi realizada uma análise de alguns métodos propostos na literatura para obter as condições de estabilidade dos sistemas fuzzy T-S por meio de uma função de Lyapunov fuzzy. Foi demonstrado que os métodos que consideram uma análise de estabilidade local apresentam um conservadorismo menor em relação aos métodos que consideram uma análise de caráter global. Além disso, um subconjunto do domínio de atração pode ser estimado por meio da otimização da superfície de nível da função de Lyapunov. Entretanto, a conclusão mais importante deste capítulo é que, entre os métodos analisados, o método baseado no politopo tem mais vantagens do que os outros métodos, pois inclui todos os cenários possíveis do vetor $\dot{\alpha}(t) \in \mathcal{P}$. Portanto, conclui-se que não existe outro conjunto que inclua todos os cenários possíveis do vetor $\dot{\alpha}(t)$ e proporcione menos conservadorismo do que o método do politopo.

O Capítulo 4 iniciou mostrando uma estratégia de controle chaveado com base no método de politopo. No entanto, foi mostrado que essa estratégia pode apresentar um número muito grande de ganhos a serem comutados, aumentando ainda mais o esforço computacional das condições de projeto. Portanto, um conjunto convexo é definido a fim de apresentar uma nova abordagem que limita as derivadas das MFs pela propriedade da combinação convexa de números. Essa abordagem permitiu o desenvolvimento de novas condições de projeto para um controlador chaveado com base em uma função de Lyapunov fuzzy. É importante ressaltar que o controlador chaveado proposto também adiciona um

termo positivo, aunque diferente aos métodos propostos na literatura, mas que é a base para o relaxamento das condições (veja a Observação 19). Por fim, esses resultados foram aplicados a sistemas não lineares na presença de incertezas e foram comparados com outros métodos da literatura, demonstrando um menor conservadorismo e uma maior eficiência do controlador.

Na parte final deste trabalho, no Capítulo 5, ampliamos os resultados obtidos para fazer uso de uma função de Lyapunov fuzzy generalizada. Para esse caso, foi obtida uma função de chaveamento dependente das MFs. Além disso, uma vantagem importante do método proposto no capítulo anterior é que os resultados estendidos não incrementam o número de controladores a serem chaveados. Então, esses resultados são aplicados a um controlador PDC chaveado. Os resultados deste capítulo mostram que o controlador PDC chaveado apresenta um conservadorismo menor das condições em relação a um controlador PDC. Além disso, o uso de uma função de Lyapunov fuzzy generalizada pode reduzir significativamente as condições para uma generalização superior. Na segunda parte, o enfoque proposto é usado para obter condições de projeto de um controlador non-PDC chaveado. Este controlador também pode ser generalizado para qualquer valor de N . Os resultados deste capítulo mostra que a estratégia proposta oferece um baixo conservadorismo nas condições de projeto, bem como baixo esforço computacional na busca de soluções.

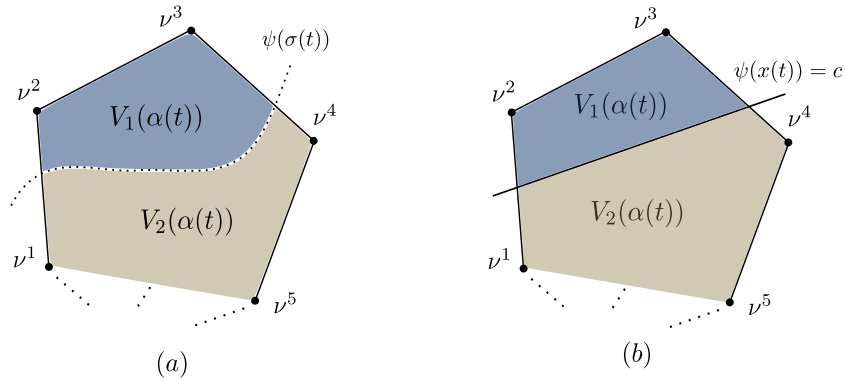
6.2 POSSÍVEIS PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora a contribuição deste trabalho esteja concentrada no projeto de um controlador chaveado. Este trabalho, também apresenta uma perspectiva para a exploração de novas possibilidades para melhorar os resultados do sistema de controle.

6.2.1 Análise de estabilidade

Dado que o método do politopo apresenta um ótimo resultado para a análise da estabilidade de sistemas fuzzy. Esta abordagem pode ser aproveitada com o uso de uma função de Lyapunov fuzzy por partes. O possível enfoque para aproveitar a função de Lyapunov por partes seria dividir o politopo em regiões a fim de designar uma respectiva função de Lyapunov para cada uma delas. A Figura 25 ilustra algumas alternativas nas quais o polítopo pode ser dividido para o caso $V_i(\alpha)$, $i \in \{1, 2\}$. Para o primeiro caso, o politopo pode ser dividido baseado em uma superfície de chaveamento baseada nas funções $\min \dots$ ou $\max \dots$. Neste caso, a superfície estaria dada por $\psi_{\sigma(t)} = \{x(t) \in \mathbb{R}^n / V_1(\alpha) = V_2(\alpha)\}$ e a função de Lyapunov por partes teria a forma dada em (57), tendo a vantagem de não ter pontos descontínuos nos instantes de chaveamento. Para o segundo caso, o politopo poderia ser dividido em base a uma superfície escolhida arbitrariamente. Neste

Figura 25 – Perspectiva para a divisão do politopo. (a) Considerando a superfície de chaveamento. (b) Considerando uma superfície arbitrária



Fonte: Elaboração do próprio autor.

caso, a superfície $\psi_{x(t)}$ poderia ser dada por exemplo, $x(t) = c$, $\dot{x}(t) = c$, entre outros, em que c é um escalar dado. Este enfoque já foi abordado na literatura (JOHANSSON; RANTZER; ARZEN, 1999; BERNAL; GUERRA; KRUSZEWSKI, 2009), no entanto, ainda não foi aproveitado nas funções de Lyapunov fuzzy.

6.2.2 Projeto de controle chaveado

Como foi mencionado no texto, o enfoque proposto tem a vantagem de ser extensível para qualquer valor de N . Portanto, seria interessante obter as condições gerais de projeto para qualquer valor de N e analisar o aumento do esforço computacional juntamente com a redução do conservadorismo.

Por outro lado, levando em conta que os termos positivos dados em (60) não foram usados neste trabalho, é possível adicionar esse termo positivo a fim de reduzir ainda mais as condições de projeto do controlador. Nesse caso, uma questão interessante seria o desenvolvimento de métodos para introduzir o termo positivo não linear dado em (60), que tem um grande potencial para reduzir o conservadorismo das condições.

6.2.3 Extensão dos resultados

Adicionalmente, a proposta de controle chaveado deste trabalho pode ser estendida ao estudo de algumas condições de desempenho, tais como a consideração de uma taxa de decaimento, o estudo da presença de perturbações a fim de reduzir a norma \mathcal{H}_∞ , ou a redução do custo garantido. Assim como na extensão para sistemas discretos ou sistema mais gerais como os sistemas híbridos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, U. N. L. T.; TEIXEIRA, M. C. M.; OLIVEIRA, D. R. de; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E.; SOUZA, W. A. de. Smoothing switched control laws for uncertain nonlinear systems subject to actuator saturation. **Int. J. Adapt. Control Signal Process**, Wiley Online Library, Oxford, v. 30, n. 8-10, p. 1408–1433, 2016.
- BERNAL, M.; GUERRA, T. M. Generalized nonquadratic stability of continuous-time Takagi–Sugeno models. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 18, n. 4, p. 815–822, 2010.
- BERNAL, M.; GUERRA, T. M.; KRUSZEWSKI, A. A membership-function-dependent approach for stability analysis and controller synthesis of Takagi–Sugeno models. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 160, n. 19, p. 2776–2795, 2009. Theme: Control.
- BOYD, S.; GHAOUI, L. E.; FERON, E.; BALAKRISHNAN, V. **Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994.
- CHEN, C.-T. **Linear system theory and design**. 3. ed. New York: Oxford University Press, 1998. ISBN 0-19-511777-8.
- CHEN, J.; XU, S.; ZHANG, B.; CHU, Y.; ZOU, Y. New relaxed stability and stabilization conditions for continuous-time T–S fuzzy models. **Information Sciences**, Philadelphia, v. 329, p. 447–460, 2016. ISSN 0020-0255. Special issue on Discovery Science.
- CHEN, Y.-J.; OHTAKE, H.; TANAKA, K.; WANG, W.-J.; WANG, H. O. Relaxed stabilization criterion for T–S fuzzy systems by minimum-type piecewise-Lyapunov-function-based switching fuzzy controller. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 20, n. 6, p. 1166–1173, 2012.
- COVACIC, M. R.; TEIXEIRA, M. C. M.; CARVALHO, A. A. D.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E.; SANCHES, M. A. A.; FUJIMOTO, H. S.; MINEO, M. S.; BIAZETO, A. R.; GAINO, R. Robust T-S fuzzy control of electrostimulation for paraplegic patients considering norm-bounded uncertainties. **Math. Probl. Eng.**, London, v. 2020, 2020.
- FANG, C.-H.; LIU, Y.-S.; KAU, S.-W.; HONG, L.; LEE, C.-H. A new LMI-based approach to relaxed quadratic stabilization of T-S fuzzy control systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 386–397, 2006.
- FARIA, F. A.; SILVA, G. N.; OLIVEIRA, V. A. Reducing the conservatism of LMI-based stabilisation conditions for T-S fuzzy systems using fuzzy Lyapunov functions. **International Journal of Systems Science**, Taylor & Francis, Oxfordshire, v. 44, n. 10, p. 1956–1969, 2013.
- GAINO, R.; COVACIC, M. R.; CARDIM, R.; SANCHES, M. A. A.; CARVALHO, A. A. D.; BIAZETO, A. R.; TEIXEIRA, M. C. M. Discrete Takagi-Sugeno fuzzy models applied to control the knee joint movement of paraplegic patients. **IEEE Access**, Piscataway, v. 8, p. 32714–32726, 2020.
- GEROMEL, J. C.; COLANERI, P. Robust stability of time varying polytopic systems. **Systems & Control Letters**, Amsterdam, v. 55, n. 1, p. 81–85, 2006.

- GEROMEL, J. C.; COLANERI, P. Stability and stabilization of continuous-time switched linear systems. **SIAM Journal on Control and Optimization**, Philadelphia, v. 45, n. 5, p. 1915–1930, 2006.
- GONZÁLEZ, T.; SALA, A.; BERNAL, M. A generalised integral polynomial Lyapunov function for nonlinear systems. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 356, p. 77–91, 2019. ISSN 0165-0114. Theme: Control Engineering.
- GOYAL, V. K.; SHUKLA, A. Two-stage hybrid isolated dc–dc boost converter for high power and wide input voltage range applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Piscataway, v. 69, n. 7, p. 6751–6763, 2022.
- GUERRA, T. M.; BERNAL, M. A way to escape from the quadratic framework. In: **IEEE International Conference on Fuzzy Systems**. Jeju: IEEE, 2009. p. 784–789.
- GUERRA, T. M.; BERNAL, M.; GUELTON, K.; LABIOD, S. Non-quadratic local stabilization for continuous-time Takagi–Sugeno models. **Fuzzy Sets and Systems**, Elsevier, Amsterdam, v. 201, p. 40–54, 2012.
- GUERRA, T. M.; VERMEIREN, L. LMI-based relaxed nonquadratic stabilization conditions for nonlinear systems in the Takagi–Sugeno’s form. **Automatica**, Oxford, v. 40, n. 5, p. 823–829, 2004.
- HESPANHA, J. P.; MORSE, A. Switching between stabilizing controllers. **Automatica**, Oxford, v. 38, n. 11, p. 1905–1917, 2002.
- JADBABAIE, A. A reduction in conservatism in stability and L_2 gain analysis of Takagi–Sugeno fuzzy systems via linear matrix inequalities. In: **IFAC Proceedings Volumes**. Beijing: Elsevier, 1999. v. 32, n. 2, p. 5451–5455.
- JOHANSSON, M.; RANTZER, A.; ARZEN, K.-E. Piecewise quadratic stability of fuzzy systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 7, n. 6, p. 713–722, 1999.
- KHALIL, H. K. **Nonlinear systems**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. ISBN 0-13-067389-7.
- KIM, E.; LEE, H. New approaches to relaxed quadratic stability condition of fuzzy control systems. **IEEE Transactions on Fuzzy systems**, Piscataway, v. 8, n. 5, p. 523–534, 2000.
- KIM, S. H. Improvement of slack variable-free relaxation method and its application to control design of T-S fuzzy systems. **IEEE Access**, Piscataway, v. 10, p. 71830–71836, 2022.
- LAM, H. A review on stability analysis of continuous-time fuzzy-model-based control systems: From membership-function-independent to membership-function-dependent analysis. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Oxford, v. 67, p. 390–408, 2018.
- LAZARINI, A. Z. N. **Condições relaxadas para estabilidade e estabilização de sistemas não lineares T-S utilizando majorantes ótimos da derivada de funções de Lyapunov fuzzy e controladores chaveados**. 2021. 103 p. Tese (Doutorado em

Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2021.

LEE, D. H.; PARK, J. B.; JOO, Y. H. A new fuzzy Lyapunov function for relaxed stability condition of continuous-time Takagi–Sugeno fuzzy systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 19, n. 4, p. 785–791, 2011.

LEE, D. H.; PARK, J. B.; JOO, Y. H. A fuzzy Lyapunov function approach to estimating the domain of attraction for continuous-time Takagi–Sugeno fuzzy systems. **Information Sciences**, Philadelphia, v. 185, n. 1, p. 230–248, 2012.

LIAN, K.-Y.; LIOU, J.-J.; HUANG, C.-Y. LMI-based integral fuzzy control of dc-dc converters. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 14, n. 1, p. 71–80, 2006.

LIBERZON, D. **Switching in systems and control**. 1. ed. Cham: Birkhäuser Science, 2003. v. 190.

LIBERZON, D.; MORSE, A. S. Basic problems in stability and design of switched systems. **IEEE control systems magazine**, Piscataway, v. 19, n. 5, p. 59–70, 1999.

LOFBERG, J. YALMIP : a toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In: **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. New Orleans: IEEE, 2004. p. 284–289.

MAMDANI, E. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, Hertfordshire, v. 121, n. 12, p. 1585–1588, 1974.

MOZELLI, L. A.; ADRIANO, R. L. S. On computational issues for stability analysis of LPV systems using parameter-dependent Lyapunov functions and LMIs. **International Journal of Robust and Nonlinear Control**, Oxford, v. 29, n. 10, p. 3267–3277, 2019.

MOZELLI, L. A.; PALHARES, R. M.; AVELLAR, G. S. A systematic approach to improve multiple Lyapunov function stability and stabilization conditions for fuzzy systems. **Information Sciences**, Philadelphia, v. 179, n. 8, p. 1149–1162, 2009.

MÁRQUEZ, R.; GUERRA, T. M.; BERNAL, M.; KRUSZEWSKI, A. A non-quadratic Lyapunov functional for \mathcal{H}_∞ control of nonlinear systems via Takagi–Sugeno models. **Journal of the Franklin Institute**, Oxford, v. 353, n. 4, p. 781–796, 2016.

OLIVEIRA, D. R. D.; SANTOS, G. R. D.; TEIXEIRA, M. C. M.; ASSUNÇÃO, E.; CARDIM, R.; ALVES, U. N. L. T. On switched control of discrete-time Takagi–Sugeno fuzzy systems with unknown membership functions. In: IEEE. **IEEE International Conference on Fuzzy Systems**. Rio de Janeiro, 2018. p. 1–8.

OLIVEIRA, D. R. de; TEIXEIRA, M. C. M.; ALVES, U. N. L. T.; SOUZA, W. A. de; ASSUNÇÃO, E.; CARDIM, R. On local \mathcal{H}_∞ 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.

ONCOY, D. J. S.; CARDIM, R.; TEIXEIRA, M. C. M. Switched control based on Takagi–Sugeno fuzzy model for dual active bridge dc-dc converter. In: IEEE. **IEEE International Conference on Fuzzy Systems**. Padua, 2022. p. 1–7.

- ONCOY, D. J. S.; CARDIM, R.; TEIXEIRA, M. C. M.; ASSUNÇÃO, E. Robust switched controller based on Takagi-Sugeno fuzzy model for dc-dc converters against disturbances. In: IEEE. **16th Int. Workshop Variable Struct. Syst.** Rio de Janeiro, 2022. p. 1–7.
- ONCOY, D. J. S.; CARDIM, R.; TEIXEIRA, M. C. M.; FARIA, F. A.; ASSUNÇÃO, E.; LAZARINI, A. Z. N. New stabilization conditions for fuzzy-based sampled-data control systems using a fuzzy Lyapunov functional. **IEEE Access**, Piscataway, v. 11, p. 15390–15403, 2023.
- RAMOS, I. T. M.; ALVES, U. N. L. T.; TEIXEIRA, M. C. M.; ASSUNÇÃO, E.; CARDIM, R.; LAZARINI, A. Z. N. On robust switched controller design to minimize the guaranteed cost of polynomial fuzzy systems. In: IEEE. **IEEE International Conference on Fuzzy Systems**. New Orleans, 2019. p. 1–6.
- RHEE, B.-J.; WON, S. A new fuzzy Lyapunov function approach for a Takagi-Sugeno fuzzy control system design. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 157, n. 9, p. 1211–1228, 2006.
- ROTONDO, D.; PUIG, V.; NEJJARI, F.; WITCZAK, M. Automated generation and comparison of Takagi-Sugeno and polytopic quasi-LPV models. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 277, p. 44–64, 2015.
- SALA, A.; ARIÑO, C. Asymptotically necessary and sufficient conditions for stability and performance in fuzzy control: Applications of Polya's theorem. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 158, n. 24, p. 2671–2686, 2007.
- SANTOS, G. R. D.; OLIVEIRA, D. R. de; TEIXEIRA, M. C. M.; ASSUNÇÃO, E.; CARDIM, R.; LAZARINI, A. Z. N. Switched control for local stabilization of discrete-time uncertain Takagi-Sugeno fuzzy systems with relaxed estimate of the domain of attraction. In: IEEE. **IEEE International Conference on Fuzzy Systems**. Glasgow, 2020. p. 1–8.
- SILVA, H. R. M.; RAMOS, I. T.; ALVES, U. N. L. T.; CARDIM, R.; TEIXEIRA, M. C. M.; ASSUNÇÃO, E. Switched control design with guaranteed cost for uncertain nonlinear systems subject to actuator saturation. In: **IFAC-PapersOnLine**. Berlin: Elsevier, 2020. v. 53, n. 2, p. 8025–8030.
- SLOTINE, J.-J. E.; LI, W. **Applied nonlinear control**. 1. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1991. ISBN 0-13-040890-5.
- SOUZA, W. A. de; TEIXEIRA, M. C. M.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, 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, 2014.
- SOUZA, W. A. de; TEIXEIRA, M. C. M.; SANTIM, M.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E. On switched control design of linear time-invariant systems with polytopic uncertainties. **Math. Probl. Eng.**, London, v. 2013, 2013.
- STURM, J. F. Using SeDuMi 1.02, a Matlab toolbox for optimization over symmetric cones. **Optimization Methods and Software**, Oxfordshire, v. 11, n. 1-4, p. 625–653, 1999.
- TAKABA, K.; MORIHIRA, N.; KATAYAMA, T. A generalized Lyapunov theorem for descriptor system. **Systems & Control Letters**, Amsterdam, v. 24, n. 1, p. 49–51, 1995.

- TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, Piscataway, SMC-15, n. 1, p. 116–132, 1985.
- TANAKA, K.; HORI, T.; WANG, H. A fuzzy Lyapunov approach to fuzzy control system design. In: IEEE. **Proceedings of the 2001 American Control Conference**. Arlington, 2001. v. 6, p. 4790–4795 vol.6.
- TANAKA, K.; HORI, T.; WANG, H. O. A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 11, n. 4, p. 582–589, 2003.
- TANAKA, K.; WANG, H. O. **Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. ISBN 0-471-32324-1.
- TANAKA, K.; YOSHIDA, H.; OHTAKE, H.; WANG, H. O. A sum-of-squares approach to modeling and control of nonlinear dynamical systems with polynomial fuzzy systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, IEEE, Piscataway, v. 17, n. 4, p. 911–922, 2009.
- TANIGUCHI, T.; TANAKA, K.; YAMAFUJI, K.; WANG, H. O. Fuzzy descriptor systems: stability analysis and design via LMIs. In: IEEE. **Proceedings of the 1999 American Control Conference**. San Diego, 1999. v. 3, p. 1827–1831 vol.3.
- 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.
- TEODORO, R. G.; NUNES, W. R. B. M.; ARAUJO, R. A. de; SANCHES, M. A. A.; TEIXEIRA, M. C. M.; CARVALHO, A. A. de. Robust switched control design for electrically stimulated lower limbs: A linear model analysis in healthy and spinal cord injured subjects. **Control Engineering Practice**, Oxford, v. 102, p. 104530, 2020.
- TOGNETTI, E. S.; OLIVEIRA, R. C. L. F.; PERES, P. L. D. Selective \mathcal{H}_2 and \mathcal{H}_∞ stabilization of Takagi–Sugeno fuzzy systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 19, n. 5, p. 890–900, 2011.
- WANG, H.; TANAKA, K.; GRIFFIN, M. Parallel distributed compensation of nonlinear systems by Takagi–Sugeno fuzzy model. In: IEEE. **Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Fuzzy Systems**. Yokohama, 1995. v. 2, p. 531–538 vol.2.
- WANG, Y.; ZHENG, L.; ZHANG, H.; ZHENG, W. X. Fuzzy observer-based repetitive tracking control for nonlinear systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 28, n. 10, p. 2401–2415, 2020.
- XU, Q.; VAFAMAND, N.; CHEN, L.; DRAGICEVIC, T.; XIE, L.; BLAABJERG, F. Review on advanced control technologies for bidirectional dc/dc converters in dc microgrids. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 1205–1221, 2021.
- ZADEH, L. Fuzzy sets. **Information and Control**, Maryland Heights, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.