

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 12/02/2022.

ARIEL STARCKE BUZETTI

**Controle Chaveado de Sistemas Não Lineares com
Incertezas utilizando Funções de Lyapunov Não
Quadráticas**

Ilha Solteira - SP
2021



ARIEL STARCKE BUZETTI

**Controle Chaveado de Sistemas Não Lineares com Incertezas utilizando
Funções de Lyapunov Não Quadráticas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Automação.

Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
Orientador

Ilha Solteira - SP
2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B992c Buzetti, Ariel Starcke.
Controle chaveado de sistemas não lineares com incertezas utilizando
funções de Lyapunov não quadráticas / Ariel Starcke Buzetti. -- Ilha Solteira:
[s.n.], 2021
132 f. : il.

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

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
Inclui bibliografia

1. Função de Lyapunov não quadrática. 2. Controle robusto. 3. Controle
chaveado. 4. Chattering. 5. Modelos *fuzzy* Takagi-Sugeno.


Raiane da Silva Santos



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Controle Chaveado de Sistemas Não Lineares com Incertezas utilizando Funções de Lyapunov Não Quadráticas


AUTOR: ARIEL STARKE BUZETTI

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 (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. JEAN MARCOS DE SOUZA RIBEIRO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


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


Prof. Dr. ALEXANDRE ATAÍDE CARNIATO (Participação Virtual)
Departamento de Indústria / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP


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

Ilha Solteira, 12 de fevereiro de 2021

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:

- Ao Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira, por todo ensinamento, incentivo, confiança e orientação;
- Aos meus pais Salatiér e Wilma e ao meu irmão Bruno pelo carinho, apoio e incentivo;
- Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Pesquisa em Controle (LPC) que de forma direta ou indireta me ajudaram.

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

RESUMO

Esse trabalho propõe um novo método de controle chaveado robusto de sistemas não lineares com incertezas descritos por modelos fuzzy Takagi-Sugeno, que utiliza várias matrizes simétricas positivas definidas. É verificado que esse método apresenta menor conservadorismo do que alguns controladores chaveados disponíveis, que costumam ser menos conservadores comparados a controladores com ganho único. Adicionalmente, permite preservar a robustez e controlar sistemas com parâmetros incertos, utilizando uma taxa de decaimento para garantir o desempenho do sistema. É proposta também uma técnica de projeto de controle chaveado que evita um chaveamento de alta frequência entre os ganhos do sistema, permitindo alterar o ganho apenas quando ocasionar uma diminuição significativa na derivada da função de Lyapunov. Essa técnica é importante porque um determinado sistema prático pode ser incapaz de chavear de forma muito rápida, e ainda este chaveamento de alta frequência pode causar desgaste no sistema e *chattering* no sinal de controle. A validação dos métodos propostos neste trabalho foi comprovada matematicamente e por meio de simulações e implementações práticas no laboratório de controle no sistema *2DOF ball balancer* da Quanser.

Palavras-chave: Função de Lyapunov Não Quadrática; Controle Robusto; Controle Chaveado; Chattering; Modelos Fuzzy Takagi-Sugeno.

ABSTRACT

This work proposes a switched robust control method for uncertain nonlinear systems described by Takagi-Sugeno fuzzy models, that uses several symmetric positive definite matrices. It is less conservative than other available switched controllers, which are usually less conservative than control laws with single gain, while maintaining the robustness that allows the control of systems with parametric uncertainties and the specification of the decay rate to ensure good system performance. Another switched control design technique is also proposed that prevents high frequency changes among the system's gains, allowing the system to switch the gain in use only when it lowers the time derivative of the Lyapunov function significantly. This technique is important because the system may be unable to switch too fast, and also switching in high frequencies may cause system deterioration and chattering on the control signal. The validity of all the methods presented in this work has been proven mathematically and through simulation and implementation on a *2DOF ball balancer* system.

Keywords: Non-Quadratic Lyapunov Function; Robust Control; Switched Control; Chattering; Takagi-Sugeno Fuzzy Models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Factibilidade do método de controle chaveado apresentado no Teorema 2 (\triangle), no Teorema 1 (\triangle , \circ) e em (MÁRQUEZ <i>et al.</i> , 2016) (\triangle , \circ , x).	33
Figura 2	Resultado de simulação do sistema representado por (1), (2) e (27), com $a = 2$ e $b = 1,5$, controlado por (3), considerando (28)-(30). A variável de estado $x_1(t)$ está representada com uma linha azul e a variável de estado $x_2(t)$ com uma linha pontilhada vermelha.	34
Figura 3	$\alpha_i(t)$, $i \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (1), (2) e (27), controlado por (28), considerando (28)-(30).	35
Figura 4	$h_j(t)$, $j \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (1), (2) e (27), controlado por (28), considerando (28)-(30).	36
Figura 5	$h_k^-(t)$, $k \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (1), (2) e (27), controlado por (28), considerando (28)-(30).	37
Figura 6	$v_l(t)$, $l \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (1), (2) e (27), controlado por (28), considerando (28)-(30).	38
Figura 7	Equipamento <i>2DOF ball balancer</i> , pertencente ao DEE-FEIS-LPC.	39
Figura 8	Planta esquemática do <i>2DOF ball balancer</i> na direção x	39
Figura 9	Resultado de simulação do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (1), (2), (42) e (43), controlado por (3), considerando (44)-(46).	55
Figura 10	$h_j(t)$, $j \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (3), considerando (44)-(46).	56
Figura 11	$h_k^-(t)$, $k \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (3), considerando (44)-(46).	57
Figura 12	$v_l(t)$, $l \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (3), considerando (44)-(46).	57
Figura 13	Eixo x : resultado de implementação do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (1), (2), (42) e (43), controlado por (3), considerando (44)-(46).	58

Figura 14	Eixo x : $h_j(t)$, $j \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (3), considerando (44)-(46).	59
Figura 15	Eixo x : $h_k^-(t)$, $k \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (3), considerando (44)-(46).	60
Figura 16	Eixo x : $v_l(t)$, $l \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (3), considerando (44)-(46).	60
Figura 17	Eixo y : resultado de implementação do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (1), (2), (42) e (43), controlado por (3), considerando (44)-(46).	61
Figura 18	Eixo y : $h_j(t)$, $j \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (3), considerando (44)-(46).	62
Figura 19	Eixo y : $h_k^-(t)$, $k \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (3), considerando (44)-(46).	63
Figura 20	Eixo y : $v_l(t)$, $l \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (3), considerando (44)-(46).	63
Figura 21	Fluxograma da lei de chaveamento do método anti- <i>chattering</i>	67
Figura 22	Simulação do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (2), (42), (43) e (47), utilizando o controlador (49) com $\psi = 2,5$ e $\beta = 0$, considerando (67), (68) e (69).	73
Figura 23	$\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (2), (42), (43) e (47), utilizando o controlador (49), considerando (67), (68) e (69).	74
Figura 24	$\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 0 e 5 segundos.	74
Figura 25	$\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 0 e 0,5 segundos.	75
Figura 26	$\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 35 e 45 segundos.	75
Figura 27	$\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 40 e 40,5 segundos.	76

Figura 28	Simulação do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (2), (42), (43) e (47), utilizando o controlador (49) com $\psi = 0$ e $\beta = 2,5$, considerando (67), (68) e (69).	77
Figura 29	$\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (2), (42), (43) e (47), utilizando o controlador (49), considerando (67), (68) e (69).	77
Figura 30	$\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , nos períodos entre 0 e 5 segundos e 0 e 0,5 segundos.	78
Figura 31	$\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 35 e 45 segundos e 40 e 40,5 segundos.	78
Figura 32	Eixo x da implementação no sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (2), (42), (43) e (47), utilizando o controlador (49) com $\psi = 2,5$ e $\beta = 0$, considerando (67), (68) e (69).	79
Figura 33	Eixo x : $\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (2), (42), (43) e (47), utilizando o controlador (49), considerando (67), (68) e (69).	80
Figura 34	Eixo x : $\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 0 e 5 segundos.	80
Figura 35	Eixo x : $\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 0 e 0,5 segundos.	81
Figura 36	Eixo x : $\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 35 e 45 segundos.	81
Figura 37	Eixo x : $\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 40 e 40,5 segundos.	82
Figura 38	Eixo y da implementação no sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (2), (42), (43) e (47), utilizando o controlador (49) com $\psi = 2,5$ e $\beta = 0$, considerando (67), (68) e (69).	83
Figura 39	Eixo y : $\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (2), (42), (43) e (47), utilizando o controlador (49), considerando (67), (68) e (69).	83
Figura 40	Eixo y : $\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 0 e 5 segundos.	84

Figura 41	Eixo y: $\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 0 e 0,5 segundos.	84
Figura 42	Eixo y: $\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 35 e 45 segundos.	85
Figura 43	Eixo y: $\lambda(t)$ e $\sigma(t)$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , no período entre 40 e 40,5 segundos.	85
Figura 44	Resultado de simulação do sistema representado por (70), (2) e (82), controlado por (71), considerando (83)-(85) e $\psi = 0,01$. A variável de estado $x_1(t)$ está representada com uma linha azul e a variável de estado $x_2(t)$ com uma linha pontilhada vermelha.	96
Figura 45	$\alpha_i(t)$, $i \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (70), (2) e (82), controlado por (83), considerando (83)-(85) e $\psi = 0,01$	97
Figura 46	$h_j(t)$, $j \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (70), (2) e (82), controlado por (83), considerando (83)-(85) e $\psi = 0,01$	98
Figura 47	$h_k^-(t)$, $k \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (70), (2) e (82), controlado por (83), considerando (83)-(85) e $\psi = 0,01$	99
Figura 48	$v_l(t)$, $l \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (70), (2) e (82), controlado por (83), considerando (83)-(85).	100
Figura 49	Resultado de simulação do sistema representado por (70), (2) e (82), controlado por (71), considerando $\psi = 0$. A variável de estado $x_1(t)$ está representada com uma linha azul e a variável de estado $x_2(t)$ com uma linha pontilhada vermelha.	101
Figura 50	$\alpha_i(t)$, $i \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (70), (2) e (82), controlado por (83), considerando $\psi = 0$	102
Figura 51	$h_j(t)$, $j \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (70), (2) e (82), controlado por (83), considerando $\psi = 0$	103
Figura 52	$h_k^-(t)$, $k \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (70), (2) e (82), controlado por (83), considerando $\psi = 0$	104
Figura 53	$v_l(t)$, $l \in \mathbb{K}_4$, em cada instante do sistema representado por (70), (2) e (82), controlado por (83), considerando $\psi = 0$	105

Figura 54	Ampliação do sinal de controle $u(t)$, do resultado de simulação utilizando a teoria anti- <i>chattering</i> ($\psi = 0,01$), apresentado na Figura 44, na faixa entre 2 e 3,3 segundos.	106
Figura 55	Ampliação do sinal de controle $u(t)$, do resultado de simulação sem utilizar a teoria anti- <i>chattering</i> ($\psi = 0$), apresentado na Figura 49, na faixa entre 2 e 3,3 segundos.	106
Figura 56	Resultado de simulação do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (70), (2), (86) e (87), controlado por (71), considerando (88)-(90). . . .	119
Figura 57	$h_j(t)$, $j \in \mathbb{K}_4$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (71), considerando (88)-(90).	120
Figura 58	$h_k^-(t)$, $k \in \mathbb{K}_4$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (71), considerando (88)-(90).	121
Figura 59	$v_l(t)$, $l \in \mathbb{K}_4$ do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (71), considerando (88)-(90).	121
Figura 60	Eixo x : resultado de implementação do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (70), (2), (86) e (87), controlado por (71), considerando (88)-(90).	123
Figura 61	Eixo x : $h_j(t)$, $j \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (71), considerando (88)-(90).	124
Figura 62	Eixo x : $h_k^-(t)$, $k \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (71), considerando (88)-(90).	125
Figura 63	Eixo x : $v_l(t)$, $l \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (71), considerando (88)-(90).	125
Figura 64	Eixo y : resultado de implementação do sistema <i>2DOF ball balancer</i> , descrito por (70), (2), (86) e (87), controlado por (71), considerando (88)-(90).	126
Figura 65	Eixo y : $h_j(t)$, $j \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (71), considerando (88)-(90).	127
Figura 66	Eixo y : $h_k^-(t)$, $k \in \mathbb{K}_4$, do sistema <i>2DOF ball balancer</i> em cada instante, controlado por (71), considerando (88)-(90).	128

Figura 67 Eixo y : $v_l(t)$, $l \in \mathbb{K}_4$, do sistema *2DOF ball balancer* em cada instante, controlado por (71), considerando (88)-(90). 128

SÍMBOLOS

\mathbb{R}	Conjunto dos números reais.
\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.
\mathbb{K}_r	Conjuntos dos r primeiros números inteiros positivos $\{1, 2, \dots, r\}$.
$x(t)$	Matriz de estado do sistema.
s	Número de vértices da planta do sistema.
n	Dimensão das matrizes A e de P .
d	Letra usada para designar derivada.
P	Matriz simétrica positiva definida.
α_i	Valores escalares que servem para representar a planta com incertezas politópicas. Obedecem as regras: $\alpha_i \geq 0$ e $\sum_{i=1}^s \alpha_i = 1$.
A e B	Matriz planta do sistema (pode conter incerteza, sendo escrita de forma simplificada como $A = \sum_{i=r}^s \alpha_i A_i$ e $B = \sum_{i=r}^s \alpha_i B_i$).

A_i e B_i

Vértices das matrizes A e B .

$\sigma = \arg \min_{i \in \mathbb{K}_r} \{h_i\}$

Menor índice $i \in \mathbb{K}_r$ tal que, para o conjunto $\{h_1, h_2, \dots, h_r\}$, $h_i = \min_{i \in \mathbb{K}_r} \{h_i\}$; por exemplo, dado $\lambda_i \in \mathbb{R}$, então o conjunto $H = \{h_1 = 4, h_2 = 2, h_3 = 5, h_4 = 3, h_5 = 2\}$, sendo $r = 5$, então $\arg \min_{i \in \mathbb{K}_r} \{h_i\} = \min\{2, 5\} = 2$.

λ

Índice do ganho (utilizado na teoria do controle chaveado anti-*chattering*).

SUMÁRIO

1	Introdução	19
2	Controlador Chaveado Utilizando Funções de Lyapunov com Múltiplas Matrizes Definidas Positivas	22
2.1	Conceitos Teóricos	22
2.2	Projeto de controle	28
2.2.1	Projeto do primeiro sistema	29
<i>2.2.1.1</i>	<i>Resultados do primeiro sistema</i>	<i>33</i>
2.2.2	O Sistema 2DOF Ball Balancer Quanser[®]	38
2.2.3	Projeto do sistema 2DOF ball balancer	41
<i>2.2.3.1</i>	<i>Resultados de simulação do sistema 2DOF ball balancer</i>	<i>54</i>
<i>2.2.3.2</i>	<i>Resultados de implementação no sistema 2DOF ball balancer</i>	<i>58</i>
2.3	Considerações	64
3	Controle Chaveado com Estabilidade Assintótica do Ponto de Equilíbrio e Sem <i>Chattering</i>	65
3.1	Projeto de Controle	71
3.2	Resultados de Simulação e Implementação	72
3.3	Considerações	86
4	Estabilidade Assintótica do Ponto de Equilíbrio via Controle Chaveado Sem <i>Chattering</i> utilizando Múltiplas Funções de Lyapunov Não Quadráticas	87
4.1	Conceitos Teóricos	87
4.2	Projeto de controle	91

4.2.1	Projeto do primeiro sistema	91
<i>4.2.1.1</i>	<i>Resultados do primeiro sistema</i>	<i>95</i>
4.2.2	Projeto do sistema 2DOF ball balancer	107
<i>4.2.2.1</i>	<i>Resultados de simulação do sistema 2DOF ball balancer</i>	<i>118</i>
<i>4.2.2.2</i>	<i>Resultados de implementação no sistema 2DOF ball balancer</i>	<i>122</i>
4.3	Considerações	129
5	Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros	130
	REFERÊNCIAS	131

1 INTRODUÇÃO

A redução do conservadorismo nos métodos de controle é uma preocupação constante na comunidade científica (LAM, 2018), já que um método menos conservador possui maior flexibilidade para abordar problemas de controle como a garantia de desempenho do sistema, problemas de saturação, entrada exógena e robustez do controlador. Métodos de controle que utilizam função de Lyapunov não quadrática têm mostrado menor conservadorismo que os métodos que utilizam função de Lyapunov quadrática (ZELENTSOVSKY, 1994; TANAKA; HORI; WANG, 2003; LENDEK; GUERRA; LAUBER, 2014; CHERIFI *et al.*, 2019; COUTINHO *et al.*, 2019; VAFAMAND, 2020).

É vantajoso e muitas vezes necessário que o controlador seja robusto para controlar o sistema, mesmo que haja incertezas na planta do sistema, para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema controlado. Um sistema de controle projetado para tolerar falhas de atuadores ou sensores, dentro de um subconjunto pré-especificado de todos os atuadores ou sensores, mantendo as propriedades desejadas do sistema de controle, é chamado de sistema de controle confiável (VEILLETTE; MEDANIC; PERKINS, 1992; MINQING, 2009).

O objetivo desse trabalho é criar um método de controle chaveado utilizando função de Lyapunov não quadrática, que seja pouco conservador, capaz de controlar sistemas com incertezas politópicas e com desempenho garantido por uma taxa de decaimento.

As principais inspirações para esse trabalho foram (MÁRQUEZ *et al.*, 2016), que demonstra como reduzir consideravelmente o conservadorismo de métodos de controle ao utilizar função de Lyapunov não quadrática e (SOUZA *et al.*, 2013), que apresenta um método de controle chaveado que é capaz de controlar sistemas com parâmetros incertos na planta do sistema. Os controladores chaveados são menos conservadores, como visto em (SOUZA *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2014; SOUZA *et al.*, 2014), do que os controladores de ganho único (BOYD *et al.*, 1994).

Controladores chaveados podem ter *chattering* (chaveamento em alta frequência, teori-

camente infinita), sendo um problema já que sistemas reais não possuem chaveamento ideal, podendo não ser capaz de chavear com a frequência exigida, danificar os aparelhos ou causar *chattering* no sinal de controle (LEVANT, 2010). Esse problema já foi abordado para métodos de controle que utilizam modos deslizantes (LEE; UTKIN, 2007; BARTOLINI; FERRARA; USAI, 1998; BOIKO; FRIDMAN, 2005) e função de Lyapunov (WICKS; PELETIES; DECARLO, 1994; ISHII; FRANCIS, 2001; GEROMEL; COLANERI, 2006). Esta tese aborda o problema de *chattering* em controladores chaveados que utilizam função de Lyapunov, permitindo o chaveamento do controlador apenas quando essa comutação causar uma diminuição significativa na derivada da função de Lyapunov. Segue uma descrição dos próximos capítulos.

O Capítulo 2 apresenta o método de controle chaveado com múltiplas matrizes definidas positivas. É apresentada também uma prova matemática de que se um determinado sistema pode ser controlado utilizando um método de controle chaveado com uma única matriz definida positiva na função de Lyapunov, então considerando os mesmo parâmetros, é assegurado que o método de controle chaveado que utiliza várias matrizes definidas positivas na função de Lyapunov também será capaz de controlar o sistema. Um sistema fictício abordado em (MÁRQUEZ *et al.*, 2016) será utilizado para comparar o conservadorismo do método proposto com o método apresentado em (MÁRQUEZ *et al.*, 2016), bem como com o método de controle chaveado que utiliza apenas uma matriz definida positiva, baseado em (SOUZA *et al.*, 2014). Adicionalmente, para demonstrar eficácia do controlador chaveado proposto na prática, serão realizados o projeto, a simulação e a implementação em laboratório em um sistema *2DOF ball balancer*, sujeito a uma falha de até -50% no atuador.

O método de controle chaveado anti-*chattering* será apresentado no Capítulo 3, junto com uma prova matemática de que o método evita *chattering* no chaveamento e no sinal de controle. Um projeto de controle para o sistema *2DOF ball balancer*, sujeito a uma falha de até -50% no atuador, seguido pelos resultados de simulação e implementação em laboratório, será apresentado, para demonstrar a eficácia do método em um sistema real. Adicionalmente foi mostrada a simulação de um controlador chaveado sem utilizar o método anti-*chattering* para permitir comparar a frequência de chaveamento entre os controladores que utilizam o método anti-*chattering* e o que não utiliza.

O Capítulo 4 demonstra como utilizar a teoria de controle que utiliza múltiplas matrizes definidas positivas na função de Lyapunov em conjunto com a teoria anti-*chattering*. O método demonstrado nesse capítulo será utilizado em projeto e simulado no sistema

fictício apresentado em (MÁRQUEZ *et al.*, 2016) e em um sistema *2DOF ball balancer*, sujeito a falhas de até -50% no atuador, adicionalmente foi feita a implementação em bancada no *2DOF ball balancer*. Essas simulações serão empregadas para comparar a frequência de chaveamento e o *chattering* do sinal de controle entre o controlador chaveado que utiliza várias matrizes definidas positivas na função de Lyapunov em conjunto com a teoria anti-*chattering* com o controlador chaveado robusto que utiliza várias matrizes definidas positivas na função de Lyapunov sem utilizar a teoria anti-*chattering*.

Ao longo desse trabalho foram utilizadas as seguintes notações: $(\cdot)^T$ indica a transposição de um vetor ou matriz. O símbolo $(*)$ denota genericamente cada bloco simétrico de uma LMI. O símbolo (\cdot) acima de uma variável simboliza sua derivada. O conjunto \mathbb{K}_r é composto pelos r primeiros números inteiros positivos, $\{1, 2, \dots, r\}$.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Foi proposto um controlador robusto chaveado que utiliza várias matrizes definidas positivas na definição da função de Lyapunov, que é não quadrática. Esse controlador apresenta a vantagem de ser menos conservador que outros métodos de controle chaveado que utilizam apenas uma matriz definida positiva na especificação da função de Lyapunov, além de manter a confiabilidade e garantir taxa de decaimento de β .

Para evitar que controladores chaveados troquem de ganho de forma muito rápida, foi proposto um método que permite ao sistema alterar o ganho utilizado apenas quando essa alteração ocasionar uma diminuição significativa na derivada da função de Lyapunov ($\dot{V}(x(t))$). Evitar um chaveamento de alta frequência é importante porque o sistema real pode ser incapaz de mudar o ganho rapidamente, além de evitar problemas relacionados ao desgaste do sistema.

As teorias propostas foram demonstradas matematicamente, simuladas e implementadas em um sistema *2DOF ball balancer*.

Como trabalho futuro pretende-se projetar um controlador com falhas no vetor de estado, estimar o tempo mínimo entre os chaveamento na teoria anti-*chattering*, adicionar a teoria \mathcal{H}_∞ e considerar a saturação do sinal de controle.

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. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, West Sussex, v. 30, n. 8-10, p. 1408–1433, 2016. ISSN 08906327.
- BARTOLINI, G.; FERRARA, A.; USAI, E. Chattering avoidance by second-order sliding mode control. *IEEE Transactions on automatic control*, New York, v. 43, n. 2, p. 241–246, 1998.
- BOIKO, I.; FRIDMAN, L. Analysis of chattering in continuous sliding-mode controllers. *IEEE transactions on automatic control*, New York, v. 50, n. 9, p. 1442–1446, 2005.
- BOYD, S.; GHAOUI, L. E.; FERON, E.; BALAKRISHNAN, V. *Linear matrix inequalities in system and control theory*. Philadelphia, PA: SIAM - Soc. Ind. Appl. Math., 1994. (Studies in Applied Mathematics, v. 15).
- CHERIFI, A.; GUELTON, K.; ARCESE, L.; LEITE, V. J. Global non-quadratic D-stabilization of Takagi–Sugeno systems with piecewise continuous membership functions. *Applied Mathematics and Computation*, Amsterdam, v. 351, p. 23–36, 2019.
- COUTINHO, P. H. S.; LAUBER, J.; BERNAL, M.; PALHARES, R. M. Efficient LMI conditions for enhanced stabilization of discrete-time Takagi–Sugeno models via delayed nonquadratic Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Piscataway, v. 27, n. 9, p. 1833–1843, 2019.
- 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.
- ISHII, H.; FRANCIS, B. A. Stabilizing a linear system by switching control with dwell time. In: IEEE. *Proceedings of the 2001 American Control Conference. (Cat. No. 01CH37148)*. [S.l.], 2001. v. 3, p. 1876–1881.
- LAM, H.-K. 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*, Amsterdam, v. 67, p. 390–408, 2018.
- LEE, H.; UTKIN, V. I. Chattering suppression methods in sliding mode control systems. *Annual reviews in control*, Amsterdam, v. 31, n. 2, p. 179–188, 2007.
- LENDEK, Z.; GUERRA, T.-M.; LAUBER, J. Controller design for ts models using

delayed nonquadratic Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Cybernetics*, New York, v. 45, n. 3, p. 439–450, 2014.

LEVANT, A. Chattering analysis. *IEEE transactions on automatic control*, New York, v. 55, n. 6, p. 1380–1389, 2010.

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*, Amsterdam, v. 353, n. 4, p. 781–796, 2016.

MINQING, X. Reliable robust guaranteed cost control of delta operator linear uncertain systems with sensor failure. In: *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation - Icicta, 2., 2009, [S. L.]. Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2009. v. 1, p. 834–837.

OLIVEIRA, D. R.; TEIXEIRA, M. C. M.; ALVES, U. N. L. T.; SOUZA, W. A.; 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*, v. 344, p. 1 – 26, 2018. ISSN 0165-0114. Theme: Control Engineering. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165011417304281>>.

OLIVEIRA, D. R.; TEIXEIRA, M. C. M.; ASSUNÇÃO, E.; SOUZA, W. A.; MOREIRA, M. R.; SILVA, J. H. P. Projeto de controle robusto \mathcal{H}_∞ chaveado: Implementação prática em um sistema de suspensão ativa. In: *Congresso Brasileiro De Automática - CBA, 20., 2014, Belo Horizonte. Anais...* Belo Horizonte, MG: [s.n.], 2014. p. 2194–2201.

QUANSER. *2D ball balancer control using QUARC: instructor manual*. Canadá, 2008. 87 p.

SILVA, E. R. P.; ASSUNÇÃO, E.; TEIXEIRA, M. C. M.; CARDIM, R. Robust controller implementation via state-derivative feedback in an active suspension system subjected to fault. In: *2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 752–757.

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

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

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.

TANIGUCHI, T.; K.; OHATAKE, H.; WANG, H. O. Model construction, rule reduction, and robust compensation for generalized form of Takagi-Sugeno fuzzy systems. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 525–537, 2001.

- VAFAMAND, N. Global non-quadratic Lyapunov-based stabilization of T–S fuzzy systems: A descriptor approach. *Journal of Vibration and Control*, London, v. 26, n. 19-20, p. 1765–1778, 2020.
- VEILLETTE, R.; MEDANIC, J.; PERKINS, W. R. Design of reliable control systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, Piscataway, v. 37, n. 3, p. 290–304, Mar 1992.
- WICKS, M. A.; PELETIES, P.; DECARLO, R. A. Construction of piecewise Lyapunov functions for stabilizing switched systems. In: IEEE. *Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control*. [S.l.], 1994. v. 4, p. 3492–3497.
- ZELENTSOVSKY, A. Nonquadratic Lyapunov functions for robust stability analysis of linear uncertain systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, New York, v. 39, n. 1, p. 135–138, 1994.