

# RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, este  
arquivo será disponibilizado somente a  
partir de  
26/01/2025.

**Ary Franco Junior**

**Condições Relaxadas para o Controle Chaveado com  
Especificação da Região de Operação de Modelos Fuzzy T-S  
Incertos utilizando Otimizadores não Derivativos**

Ilha Solteira  
2023



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Ary Franco Junior**

**Condições Relaxadas para o Controle Chaveado com  
Especificação da Região de Operação de Modelos Fuzzy T-S  
Incertos utilizando Otimizadores não Derivativos**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do  
Campus de Ilha Solteira - UNESP como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Doutor em En-  
genharia Elétrica.

Especialidade: Automação.

**Orientador:** Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto  
Teixeira

Ilha Solteira

2023

## FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F825c Franco Junior, Ary.  
Condições relaxadas para o controle chaveado com especificação da região de operação de modelos fuzzy T-S incertos utilizando otimizadores não derivativos / Ary Franco Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023  
134 f. : il.

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

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira  
Inclui bibliografia

1. Sistemas não lineares incertos contínuos no tempo. 2. Modelos fuzzy Takagi-Sugeno. 3. Controle chaveado. 4. Desigualdades Matriciais Lineares (LMIS). 5. Otimizador não derivativo. 6. Sistema Fotovoltaico (MPPT).

  
Raiane da Silva Santos

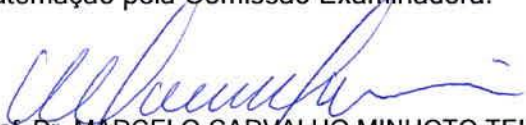
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

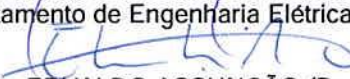
**TÍTULO DA TESE:** Condições Relaxadas para o Controle Chaveado com Especificação da Região de Operação de Modelos Fuzzy T-S Incertos utilizando Otimizadores não Derivativos

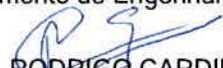
**AUTOR: ARY FRANCO JUNIOR**

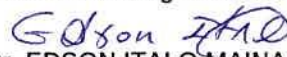
**ORIENTADOR: MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA**


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 Presencial)  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

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

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

  
Prof. Dr. EDSON ITALO MAINARDI JUNIOR (Participação Presencial)  
Departamento de Eletroeletrônica / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul - IFMS

  
Prof. Dr. DIOGO RAMALHO DE OLIVEIRA (Participação Presencial)  
Departamento de Eletroeletrônica / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul - IFMS

Ilha Solteira, 26 de janeiro de 2023

## Agradecimentos

Esta tese foi desenvolvida com muita dedicação, empenho, e superando muitos desafios. Desafios estes, em que não estive sozinho.

Agradeço a Deus pela minha saúde e por ter iluminado meu caminho com sabedoria e conhecimentos adquiridos durante esta jornada.

À minha querida esposa Jacqueline, por ser tão importante em minha vida, contribuindo para este trabalho com seu carinho, apoio emocional e amor incondicional.

Agradeço meu pai Ary, minha mãe Josefina e minha irmã Lidiane, por todo incentivo aos estudos, desde criança, e pelos valores transmitidos.

À psicoterapeuta Caroline Macedo, que me acompanha a alguns anos, pela ajuda e suporte na busca do meu autoconhecimento.

Ao professor Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira, que me orienta desde a Iniciação Científica, passando pelo mestrado, e agora neste doutorado, agradeço pelo apoio, paciência, confiança e orientação. Foram 5 anos, 8 meses, e 23 dias, desde meu primeiro contato pedindo sua orientação para o doutorado até a data da defesa desta tese.

Agradeço aos membros e ex-membros do Laboratório de Pesquisa em Controle (LPC), por toda ajuda recebida, em especial ao Igor Thiago Minari Ramos, Wallysonn Alves de Souza, e Talita Tozetto Esteves Bolandim.

Aos professores Rodrigo Cardim e Uiliam Nelson Lenzion Tomaz Alves, pelo apontamentos feitos na qualificação deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, pelo afastamento concedido durante parte deste trabalho.

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

“A verdade é filha do tempo e não da autoridade,  
mas a dúvida é o começo da sabedoria.”  
(Galileu Galilei)

## Resumo

Esta tese apresenta condições relaxadas para o projeto de controladores chaveados, para plantas não lineares com parâmetros incertos descritas exatamente através de modelos fuzzy Takagi-Sugeno (T-S), utilizando matrizes  $A(\alpha)$  e  $B(\alpha)$ , através da busca extremal realizada por um otimizador não derivativo. A ideia principal da estratégia de controle proposta foi mitigar a influência das incertezas na matriz de entrada  $B(\alpha)$ . Foi considerada uma região de operação para a modelagem fuzzy T-S exata da planta e o chaveamento dos ganhos do controlador é feito através de um otimizador não derivativo, visando a minimização de uma função de Lyapunov quadrática para o sistema realimentado. O conhecimento do vetor dos pesos normalizados  $\alpha$  na modelagem fuzzy T-S da planta, que no caso depende de parâmetros incertos e não linearidades da planta, não é necessário na implementação da lei de controle chaveada proposta. O otimizador não derivativo, que é um tipo de controle extremal, é usado para buscar o máximo ou mínimo de uma função. Foi realizada uma revisão de seu funcionamento, e como exemplo de sua operação, ele foi utilizado para ser o Rastreador do Ponto de Máxima Potência (MPPT) na simulação de um sistema fotovoltaico. Outros tipos de controle por busca extremal também são brevemente descritos. A representação exata dos sistemas não lineares incertos e/ou com não linearidades é feita exatamente por modelos fuzzy T-S incertos, que possuem funções de pertinência incertas e modelos locais conhecidos. Mas, como a representação do sistema através de combinação convexa obtida é válida apenas em uma região do espaço de estados, não há garantias de que o vetor de estado do sistema permaneça nessa região. O procedimento de projeto se inicia com a inclusão de LMIs que garantam a permanência das trajetórias do sistema em uma região de operação especificada, dada uma região de condições iniciais, em três teoremas diferentes disponíveis na literatura que até então garantiam a estabilidade assintótica global do ponto de equilíbrio  $x = 0$  do sistema fuzzy T-S. Além disso, são adicionadas LMIs que garantam uma taxa de decaimento mínima (tempo de resposta), bem como uma restrição no sinal de controle. Foram comparadas as regiões de factibilidade destes três teoremas adaptados e escolhido o que apresenta a maior região factível, para obter os ganhos do controlador. Os parâmetros do otimizador não derivativo foram então definidos e ajustados. Foram realizadas simulações numéricas para um pêndulo invertido, contendo incerteza na massa do carrinho, em quatro cenários possíveis. Em todos os casos o sistema foi controlado e se manteve dentro da região de operação especificada. As condições de projeto para os controladores chaveados utilizando otimizadores não derivativos propostos, nos casos estudados, apresentaram áreas factíveis maiores do que as obtidas para o projeto de uma classe de controladores chaveados disponível na literatura. Este fato ilustra o principal resultado desta tese, que é a relaxação das condições para o projeto de controladores chaveados utilizando otimizadores não de-

rivativos, mitigando no projeto a influência das incertezas na matriz de entrada  $B(\alpha)$  da planta, representada através de modelos fuzzy T-S.

**Palavras-chave:** Sistemas não lineares incertos contínuos no tempo. Modelos fuzzy Takagi-Sugeno. Controle chaveado. Desigualdades matriciais lineares (LMIs). Otimizador Não Derivativo. MPPT. Sistema Fotovoltaico.

## Abstract

This thesis presents relaxed conditions for the design of switched controllers, for nonlinear plants with uncertain parameters exactly described through Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy models, using matrices  $A(\alpha)$  and  $B(\alpha)$ , based on extremum seeking control performed by a non-derivative optimizer. The main idea of the proposed control strategy was to mitigate the influence of uncertainties in the input matrix  $B(\alpha)$ . An operating region was considered for the exact fuzzy T-S modeling of the plant and the switching of the controller gains is done by a non-derivative optimizer, aiming at the minimization of a quadratic Lyapunov function for the feedback system. The knowledge of the vector of normalized weights  $\alpha$  in the fuzzy T-S modeling of the plant, which in this case depends on uncertain parameters and nonlinearities of the plant, is not necessary in the implementation of the proposed switched control law. The non-derivative optimizer, which is a type of extremum seeking control, is used to find the maximum or minimum of a function. A review of its operation was carried out, and as an example of its operation, it was used to be the Maximum Power Point Tracker (MPPT) in the simulation of a photovoltaic system. Other types of extreme search control are also briefly described. The exact representation of uncertain nonlinear systems and/or systems with nonlinearities is made exactly by uncertain T-S fuzzy models, which have uncertain membership functions and known local models. But, as the representation of the system through convex combination obtained is valid only in a region of the state space, there is no guarantee that the state vector of the system will remain in that region. The design procedure begins with the inclusion of LMIs that guarantee the permanence of the system trajectories in a specified operating region, given a region of initial conditions, in three different theorems available in the literature that until then guaranteed the global asymptotic stability of the equilibrium point  $x = 0$  of the fuzzy T-S system. In addition, LMIs are added that guarantee a minimum decay rate (response time), as well as a restriction on the control signal. The feasibility regions of these three adapted theorems were compared and the one with the largest feasible region was chosen to obtain the controller gains. The non-derivative optimizer parameters were then defined and adjusted. Numerical simulations were performed for an inverted pendulum, containing uncertainty in the mass of the cart, in four possible scenarios. In all cases the system was controlled and remained within the specified operating region. The design conditions for switched controllers using proposed non-derivative optimizers, in the studied cases, presented larger feasible areas than those obtained for the design of a class of switched controllers available in the literature. This fact illustrates the main result of this thesis, which is the relaxation of the conditions for the design of switched controllers using non-derivative optimizers, mitigating in the design the influence of uncertainties in the input matrix  $B(\alpha)$  of the plant, represented by T-S fuzzy models.

**Keywords:** Uncertain continuous-time nonlinear systems. Takagi-Sugeno fuzzy models. Switched control. Linear matrix inequalities (LMIs). Non-Derivative Optimizer.

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Método das Perturbações Senoidais. . . . .	31
Figura 2 – Superfícies de Deslizamento. . . . .	33
Figura 3 – Esquema de Controle Extremal por Modos Deslizantes. . . . .	35
Figura 4 – Esquema de Controle Extremal por Aproximação. . . . .	37
Figura 5 – Diagrama de blocos do otimizador T-Z. . . . .	40
Figura 6 – Sinais de entrada e saída de um detector de pico mínimo. . . . .	40
Figura 7 – Trajetória típica do otimizador T-Z. . . . .	43
Figura 8 – Reiniciador do detector de pico mínimo. . . . .	44
Figura 9 – Diagrama do sistema fotovoltaico com MPPT. . . . .	47
Figura 10 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica. . . . .	48
Figura 11 – Características de tensão-corrente e tensão-potência do módulo fotovoltaico para o caso de temperatura ambiente constante, $T_a = 25^\circ C$ , e irradiação variável. Os pontos com * indicam o MPP. . . . .	51
Figura 12 – Características de tensão-corrente e tensão-potência do módulo fotovoltaico para o caso de irradiação constante, $G_c = 1000W/m^2$ , e temperatura ambiente variável. Os pontos com * indicam o MPP. . . . .	52
Figura 13 – Esquema de simulação no Simulink <sup>®</sup> para o Otimizador Não Derivativo aplicado ao módulo fotovoltaico. . . . .	53
Figura 14 – Gráfico de $\frac{dP_{PV}(V_{PV})}{dV_{PV}}$ para o caso de temperatura ambiente constante, $T_a = 25^\circ C$ , e irradiação variável. Os pontos com * indicam o valor máximo de $\frac{dP_{PV}(V_{PV})}{dV_{PV}}$ . . . . .	55
Figura 15 – Gráfico de $\frac{dP_{PV}(V_{PV})}{dV_{PV}}$ para o caso de irradiação constante, $G_c = 1000W/m^2$ , e temperatura ambiente variável. Os pontos com * indicam o valor máximo de $\frac{dP_{PV}(V_{PV})}{dV_{PV}}$ . . . . .	55
Figura 16 – Simulação do sistema de MPPT do módulo fotovoltaico para o caso de temperatura ambiente constante, $T_a = 25^\circ C$ e irradiação variável, $G_c$ . . . . .	57
Figura 17 – Simulação do sistema de MPPT do módulo fotovoltaico para o caso de irradiação constante, $G_c = 1000W/m^2$ , e temperatura ambiente variável, $T_a$ . . . . .	58
Figura 18 – Controlador Chaveado com Otimizador Não Derivativo. . . . .	73
Figura 19 – Sistema Pêndulo Invertido. . . . .	78
Figura 20 – Diagrama de corpo livre do pêndulo invertido. . . . .	79
Figura 21 – Comparação das regiões factíveis para o pêndulo invertido utilizando: Teorema 1 (“+”); Teorema 2 (“×”); Teorema 3 (“○”). Todos utilizados em conjunto com o Teorema 5 com $\mu_0 = 0,001$ , para $0 \leq \beta \leq 2 \times 10^{-3}$ . . . . .	89

Figura 22 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : variáveis de estado $x(t)$ . . . . .	92
Figura 23 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : sinal de controle $u(t)$ , índice de chaveamento $\sigma$ , saída do otimizador $\Theta_{ot}$ . . . . .	93
Figura 24 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : massa do carrinho $M$ , Reiniciador $B_{ot}$ , Comparador $M_{ot}$ , Função de Lyapunov $V(x)$ . . . . .	94
Figura 25 – Detalhe da resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : variáveis de estado $x(t)$ . . . . .	95
Figura 26 – Comportamento da variável de estado $x_1(t)$ a partir de sua condição inicial $x_1(0)$ , sua região de operação ( $\mathcal{X}$ ), e região de condições iniciais desejadas ( $\mathfrak{X}$ ), para $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . . . . .	96
Figura 27 – Comportamento da variável de estado $x_3(t)$ a partir de sua condição inicial $x_3(0)$ , sua região de operação ( $\mathcal{X}$ ), e região de condições iniciais desejadas ( $\mathfrak{X}$ ), para $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . . . . .	97
Figura 28 – Detalhe da resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : sinal de controle $u(t)$ , índice de chaveamento $\sigma$ , saída do otimizador $\Theta_{ot}$ . . . . .	98
Figura 29 – Detalhe da resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : massa do carrinho $M$ , Reiniciador $B_{ot}$ , Comparador $M_{ot}$ , Função de Lyapunov $V(x)$ . . . . .	99
Figura 30 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável $M(t) = 10kg$ para $t < 10s$ , $M(t) = 8kg$ para $10s \leq t < 15s$ , e $M(t) = 5kg$ para $t \geq 15s$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : variáveis de estado $x(t)$ . . . . .	100

- Figura 31 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo,  $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : sinal de controle  $u(t)$ , índice de chaveamento  $\sigma$ , saída do otimizador  $\Theta_{ot}$ . 101
- Figura 32 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo,  $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : massa do carrinho  $M$ , Reiniciador  $B_{ot}$ , Comparador  $M_{ot}$ , Função de Lyapunov  $V(x)$ . . . . . 102
- Figura 33 – Detalhe da resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo,  $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : variáveis de estado  $x(t)$ . . . . . 103
- Figura 34 – Comportamento da variável de estado  $x_1(t)$  a partir de sua condição inicial  $x_1(0)$ , sua região de operação ( $\mathcal{X}$ ), e região de condições iniciais desejadas ( $\mathfrak{X}$ ), para  $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ ,  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . . . . . 104
- Figura 35 – Comportamento da variável de estado  $x_3(t)$  a partir de sua condição inicial  $x_3(0)$ , sua região de operação ( $\mathcal{X}$ ), e região de condições iniciais desejadas ( $\mathfrak{X}$ ), para  $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ ,  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . . . . . 105
- Figura 36 – Detalhe da resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo,  $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : sinal de controle  $u(t)$ , índice de chaveamento  $\sigma$ , saída do otimizador  $\Theta_{ot}$ . . . . . 106
- Figura 37 – Detalhe da resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo,  $\beta = 1,8 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : massa do carrinho  $M$ , Reiniciador  $B_{ot}$ , Comparador  $M_{ot}$ , Função de Lyapunov  $V(x)$ . . . . . 107

Figura 38 – Comparação das regiões factíveis para o pêndulo invertido utilizando: Teorema 1 (“+”); Teorema 2 (“×”); Teorema 3 (“○”). Todos utilizados em conjunto com o Teorema 5, para $60 \times 10^{-3} \leq \beta \leq 67 \times 10^{-3}$ . . . . .	108
Figura 39 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : variáveis de estado $x(t)$ . . . . .	111
Figura 40 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : sinal de controle $u(t)$ , índice de chaveamento $\sigma$ , saída do otimizador $\Theta_{ot}$ . . . . .	112
Figura 41 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : massa do carrinho $M$ , Reiniciador $B_{ot}$ , Comparador $M_{ot}$ , Função de Lyapunov $V(x)$ . . . . .	113
Figura 42 – Comportamento da variável de estado $x_1(t)$ a partir de sua condição inicial $x_1(0)$ , sua região de operação ( $\mathcal{X}$ ), e região de condições iniciais desejadas ( $\mathfrak{X}$ ), para $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . . . . .	114
Figura 43 – Comportamento da variável de estado $x_3(t)$ a partir de sua condição inicial $x_3(0)$ , sua região de operação ( $\mathcal{X}$ ), e região de condições iniciais desejadas ( $\mathfrak{X}$ ), para $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . . . . .	115
Figura 44 – Detalhe da resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : sinal de controle $u(t)$ , índice de chaveamento $\sigma$ , saída do otimizador $\Theta_{ot}$ . . . . .	116
Figura 45 – Detalhe da resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho fixa em $M = 8kg$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : massa do carrinho $M$ , Reiniciador $B_{ot}$ , Comparador $M_{ot}$ , Função de Lyapunov $V(x)$ . . . . .	117
Figura 46 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo, $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável $M(t) = 10kg$ para $t < 10s$ , $M(t) = 8kg$ para $10s \leq t < 15s$ , e $M(t) = 5kg$ para $t \geq 15s$ , $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : variáveis de estado $x(t)$ . . . . .	118

- Figura 47 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo,  $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : sinal de controle  $u(t)$ , índice de chaveamento  $\sigma$ , saída do otimizador  $\Theta_{ot}$ . 119
- Figura 48 – Resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo,  $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : massa do carrinho  $M$ , Reiniciador  $B_{ot}$ , Comparador  $M_{ot}$ , Função de Lyapunov  $V(x)$ . . . . . 120
- Figura 49 – Comportamento da variável de estado  $x_1(t)$  a partir de sua condição inicial  $x_1(0)$ , sua região de operação ( $\mathcal{X}$ ), e região de condições iniciais desejadas ( $\mathfrak{X}$ ), para  $\beta = 66 \times 10^{-3}$ ,  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . 121
- Figura 50 – Comportamento da variável de estado  $x_3(t)$  a partir de sua condição inicial  $x_3(0)$ , sua região de operação ( $\mathcal{X}$ ), e região de condições iniciais desejadas ( $\mathfrak{X}$ ), para  $\beta = 66 \times 10^{-3}$ ,  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . 122
- Figura 51 – Detalhe da resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo,  $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : sinal de controle  $u(t)$ , índice de chaveamento  $\sigma$ , saída do otimizador  $\Theta_{ot}$ . . . . . 123
- Figura 52 – Detalhe da resposta temporal para uma simulação do sistema pêndulo invertido, em malha fechada, com Otimizador Não Derivativo,  $\beta = 66 \times 10^{-3}$ , massa do carrinho variável  $M(t) = 10kg$  para  $t < 10s$ ,  $M(t) = 8kg$  para  $10s \leq t < 15s$ , e  $M(t) = 5kg$  para  $t \geq 15s$ ,  $x(0) = [\frac{4\pi}{180} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ : massa do carrinho  $M$ , Reiniciador  $B_{ot}$ , Comparador  $M_{ot}$ , Função de Lyapunov  $V(x)$ . . . . . 124

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados de placa e estimados do módulo fotovoltaico. . . . .	51
Tabela 2 – Valores de $G_c$ , $T_c$ , $V_{mp}$ e $P_{mp}$ para as curvas da Figura 11. . . . .	51
Tabela 3 – Valores de $G_c$ , $T_c$ , $V_{mp}$ e $P_{mp}$ para as curvas da Figura 12. . . . .	52
Tabela 4 – Valores médios de $V_{PV}$ e $P_{PV}$ obtidos da Figura 16, desprezado o transitório $t < 0,5s$ , para cada valor de $G_c$ , e os valores de $V_{mp}$ e $P_{mp}$ da Tabela 2 para comparação. . . . .	57
Tabela 5 – Valores médios de $V_{PV}$ e $P_{PV}$ obtidos da Figura 17, desprezado o transitório $t < 0,5s$ , para cada valor de $T_a$ , e os valores de $V_{mp}$ e $P_{mp}$ da Tabela 3 para comparação. . . . .	58
Tabela 6 – Parâmetros do sistema pêndulo invertido. . . . .	83
Tabela 7 – Teste de Factibilidade do Pêndulo Invertido para $0 \leq \beta \leq 2 \times 10^{-3}$ . . . . .	89
Tabela 8 – Valores máximos e mínimos do sinal de entrada e das variáveis de estado para o Cenário 1. . . . .	94
Tabela 9 – Valores máximos e mínimos do sinal de entrada e das variáveis de estado para o Cenário 2. . . . .	102
Tabela 10 – Teste de Factibilidade do Pêndulo Invertido para $60 \times 10^{-3} \leq \beta \leq 67 \times 10^{-3}$ . . . . .	108
Tabela 11 – Valores máximos e mínimos do sinal de entrada e das variáveis de estado para o Cenário 3. . . . .	113
Tabela 12 – Valores máximos e mínimos do sinal de entrada e das variáveis de estado para o Cenário 4. . . . .	120

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>17</b>
1.1	Objetivos . . . . .	24
1.2	Estrutura da Tese . . . . .	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE CONCEITOS . . . . .</b>	<b>26</b>
2.1	Modelo Fuzzy T-S . . . . .	26
2.2	Representação Exata de uma Classe de Sistemas Não Lineares Incertos por Modelos Fuzzy T-S . . . . .	28
2.2.1	Forma Generalizada de Sistemas Fuzzy T-S . . . . .	28
2.3	Controle por Busca Extremal . . . . .	30
2.3.1	Controle Extremal por Perturbação Senoidal ou <i>Dither</i> . . . . .	31
2.3.2	Controle Extremal por Modos Deslizantes . . . . .	32
2.3.3	Controle Extremal por Aproximação ou Otimização Numérica . . . . .	36
2.3.4	Controle Extremal por Adaptação ou Modelo . . . . .	38
2.3.5	Controle Extremal por Redes Neurais . . . . .	39
2.4	Otimizador Não Derivativo . . . . .	39
<b>3</b>	<b>MPPT DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO USANDO OTIMIZADOR NÃO DERIVATIVO . . . . .</b>	<b>46</b>
3.1	Modelagem Matemática de uma Célula Fotovoltaica . . . . .	48
3.2	Aplicação do Otimizador Não Derivativo como MPPT do Sistema Fotovoltaico . . . . .	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS BÁSICOS . . . . .</b>	<b>60</b>
4.1	Região de Operação . . . . .	60
4.2	Região de Condições Iniciais . . . . .	62
4.3	Tempo de Resposta . . . . .	63
4.4	Estabilidade de Sistemas Fuzzy T-S via LMIs . . . . .	63
4.5	Restrição do Sinal de Controle . . . . .	69
<b>5</b>	<b>CONTROLADORES CHAVEADOS PARA SISTEMAS NÃO LINEARES INCERTOS COM OTIMIZADOR NÃO DERIVATIVO . . . . .</b>	<b>72</b>
5.1	Controlador Chaveado com Otimizador Não Derivativo . . . . .	72
5.1.1	Prova Matemática do Funcionamento da Configuração de Controle Proposta . . . . .	76
5.1.2	Escolha de parâmetros do Otimizador Não Derivativo . . . . .	76

5.2	Pêndulo Invertido - Representação do Sistema Dinâmico no Espaço de Estados . . . . .	78
5.3	Pêndulo Invertido - Modelo Fuzzy T-S . . . . .	82
5.4	Pêndulo Invertido - Simulações . . . . .	86
5.4.1	Região de Factibilidade com $\beta$ pequeno . . . . .	88
5.4.2	Simulação do Cenário 1 . . . . .	91
5.4.3	Simulação do Cenário 2 . . . . .	99
5.4.4	Região de Factibilidade com $\beta$ grande . . . . .	107
5.4.5	Simulação do Cenário 3 . . . . .	110
5.4.6	Simulação do Cenário 4 . . . . .	117
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>125</b>
6.1	Perspectivas Futuras . . . . .	126
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>127</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, problemas vinculados à teoria de controle têm sido estudados, principalmente com foco na análise da estabilidade e o projeto de novos controladores. Muitos estudos utilizam Desigualdades Matriciais Lineares (do inglês “*Linear Matrix Inequalities - LMIs*”), as quais oferecem procedimentos metódicos para o projeto de controladores, que asseguram a estabilidade assintótica do sistema controlado. Para plantas não lineares, este procedimento teve um grande avanço utilizando a representação das plantas através de modelos fuzzy Takagi-Sugeno (T-S). O procedimento em que os modelos fuzzy T-S descrevem um sistema não linear de forma exata pode ser encontrado em Taniguchi et al. (2001). Ele utiliza a combinação de um certo número de modelos locais lineares invariantes no tempo, sendo que a combinação é realizada por funções de pertinência fuzzy, e o projeto do regulador fuzzy é construído por meio da compensação distribuída paralela (do inglês “*Parallel Distributed Compensation - PDC*”), como proposto em Tanaka, Ikeda e Wang (1998) (SOUZA, 2013).

O PDC oferece um procedimento para projetar um controlador fuzzy a partir do modelo T-S. Para realizar o PDC, uma planta a ser controlada (sistema não linear) é primeiro representada por um modelo fuzzy T-S. No PDC, cada regra de controle é projetada a partir da regra correspondente de um modelo fuzzy T-S. O controlador fuzzy projetado compartilha os mesmos conjuntos fuzzy com o modelo fuzzy nas partes premissas (TANAKA; IKEDA; WANG, 1998).

Com base na PDC e nas LMIs, diferentes técnicas de projeto de controle foram propostas nas últimas décadas para o controle de sistemas não lineares representados através de modelos fuzzy T-S.

Em Lam (2018) foi realizada uma revisão sobre a análise de estabilidade de sistemas de controle baseados em modelos fuzzy (do inglês “*Fuzzy-Model-Based - FMB*”) em tempo contínuo. Ele resume as questões nos quatro aspectos fundamentais e essenciais: os tipos de correspondência de função de pertinência; tipos de funções de Lyapunov; tipos de análise de estabilidade; e as técnicas de análise de estabilidade. Esses aspectos desempenham um papel importante em relação com as seguintes questões dos sistemas de controle FMB:

- Aplicabilidade: trata-se da capacidade de aplicar os resultados da análise e os métodos de projeto aos problemas de controle;
- Computação: trata-se do nível de demanda computacional necessário para obter uma solução viável para as condições de estabilidade obtidas sob a mesma abordagem de análise de estabilidade;

- Conservatividade : trata-se do nível conservador das condições de estabilidade obtidas sob a mesma abordagem de análise de estabilidade;
- Complexidade: trata da complexidade estrutural do controlador fuzzy;
- Flexibilidade: trata da flexibilidade de projeto do controlador fuzzy, como a liberdade de escolher suas funções de pertinência e número de regras;
- Implementação: trata dos custos de implementação do controlador fuzzy;
- Robustez: trata-se da capacidade do controlador fuzzy de tolerar as incertezas da planta não linear, que estão embutidas nas funções de pertinência do modelo fuzzy.

Os tipos de correspondência de função de pertinência podem ser classificados em premissas com correspondência perfeita, parcial ou imperfeita, em relação às funções de pertinência da premissa e ao número de regras usadas no modelo fuzzy e controlador fuzzy que forma o sistema de controle FMB (LAM, 2018):

Entre os tipos de candidatas a função de Lyapunov podem ser citadas: função de Lyapunov quadrática, função de Lyapunov polinomial, função de Lyapunov linear por partes/chaveada, função de Lyapunov fuzzy e função de Lyapunov de ordem superior. O emprego de diferentes candidatas à função de Lyapunov para a análise de estabilidade levará a diferentes níveis de relaxamento das condições de estabilidade. Em geral, candidatas a função de Lyapunov mais complexas geralmente levam a condições de estabilidade mais relaxadas. No entanto, requerem técnicas mais avançadas para conduzir a análise de estabilidade. A candidata a função de Lyapunov quadrática é simples e amplamente utilizada. No entanto, sempre leva a resultados de análise de estabilidade mais conservadores em comparação com outras candidatas de função de Lyapunov mais sofisticadas devido à quantidade limitada de características do sistema de controle FMB que é utilizada, pois uma matriz de Lyapunov comum deve ser encontrada para todos os subsistemas da equação fuzzy (LEE; PARK; JOO, 2011; LAM, 2018).

Existem principalmente dois tipos de análise de estabilidade em termos de se as informações das funções de pertinência estão sendo usadas:

- A análise de estabilidade com funções de pertinência independentes (do inglês “*Membership-Function-Independent - MFI*”) não leva em consideração as informações de funções de pertinência, o que implica no conservadorismo da análise de estabilidade;
- A análise de estabilidade com funções de pertinência dependentes (do inglês “*Membership-Function-Dependent - MFD*”), as condições de estabilidade conterão algumas informações das funções de pertinência.

Em comparação com a análise de estabilidade MFD, a análise de estabilidade MFI é mais simples, em termos de menor número de condições de estabilidade e variáveis de decisão, uma vez que as funções de pertinência são geralmente descartadas para obter as condições de estabilidade. Na prática, para lidar com o problema de controle, as condições de estabilidade MFI podem ser aplicadas em primeiro lugar, considerando-se que menor demanda computacional é necessária para encontrar uma solução viável.

As técnicas para a análise de estabilidade MFI irão eliminar as funções de pertinência no processo de construção de condições de estabilidade. Na literatura, em um caso especial em que o controlador fuzzy compartilha as mesmas funções de pertinência da premissa e número de regras que as do modelo fuzzy, está na categoria de premissas perfeitamente combinadas ou conhecido como PDC. Os resultados da análise de estabilidade podem ser progressivamente relaxados usando o Teorema de Pólya, considerando as permutações de funções de pertinência, e este é um exemplo de técnica de análise de estabilidade. Vários trabalhos se desenvolveram em torno desta linha de pesquisa, entre eles: Kim e Lee (2000); Liu e Zhang (2003a); Liu e Zhang (2003b); Teixeira, Assunção e Avellar (2003); Fang et al. (2006); Sala e Ariño (2007).

A análise de estabilidade MFD pode carregar as informações de limite global, informação de limite local ou funções de pertinência aproximadas para a análise de estabilidade. A ideia principal é extrair as informações das funções de pertinência e utilizá-las nas condições de estabilidade. As maneiras de capturar as informações das funções de pertinência e as técnicas de sua utilização na análise de estabilidade apontarão uma direção para obter resultados de análise de estabilidade mais relaxados (LAM, 2018).

Funções quadráticas de Lyapunov foram extensivamente usadas na análise de estabilidade de sistemas fuzzy T-S. Além disso, a maioria das técnicas de controle existentes para o modelo T-S utilizam a lei PDC, que se utiliza das funções de pertinência para tal, ou variações dessas características. Com funções quadráticas de Lyapunov e lei PDC, há uma grande quantidade de resultados de estabilidade para sistemas fuzzy T-S expressos em LMIs e na sua grande maioria utilizam as funções de pertinência. Entre alguns trabalhos nesta linha, podem ser citados: Ding, Sun e Yang (2006) ao estender uma função de Lyapunov não quadrática e aplicar uma lei de compensação distribuída não paralela (não PDC), novos resultados para a estabilização foram apresentados, oferecendo uma generalização de alguns resultados disponíveis na literatura na época, para o modelo fuzzy T-S discreto no tempo.

Em Dong e Yang (2008) os controladores fuzzy chaveados foram explorados no projeto de controle, que são comutados com base nos valores das funções de pertinência, e o esquema de controle é uma extensão do esquema PDC; em Lam e Narimani (2009) sob a premissa imperfeita do casamento em que o modelo fuzzy T-S e o controlador fuzzy não compartilham as mesmas funções de pertinência, um controlador fuzzy com

flexibilidade de projeto aprimorada e propriedade de robustez é proposto para controlar uma planta não linear, ou seja, o controlador fuzzy proposto permite o emprego de funções de pertinência diferentes das do modelo fuzzy.

Em Dong, Wang e Yang (2009) um novo esquema de controle fuzzy com feedbacks não lineares locais é proposto, e o novo método de projeto de controle é baseado em menos regras fuzzy e menos carga computacional, mas ainda usa funções de pertinência; em Lee, Park e Joo (2011) apresenta uma nova função fuzzy de Lyapunov (FFL) para a análise de estabilidade de sistemas fuzzy T-S de tempo contínuo. Ao contrário dos FFLs convencionais, o proposto não depende apenas das funções de ponderação fuzzy dos sistemas fuzzy T-S, mas também de suas derivadas de tempo de primeira ordem.

Em Chen et al. (2012), foi proposto um controlador fuzzy chaveado que chaveia acompanhando uma função de Lyapunov quadrática por partes e foram obtidos novos critérios de estabilização menos conservadores. Porém, algumas condições estabelecidas são baseadas em uma classe particular de BMIs que, segundo os autores, podem ser resolvidas de forma eficiente pelo método *path-following*; em Liu e Zhang (2003a), os resultados particulares apresentados se mostram interessantes opções na modelagem e projeto de sistemas de controle fuzzy, já que são apresentadas condições de estabilidade quadrática mais simples junto a teoremas que são associados aos conceitos de LMIs, compostas pelos coeficientes de todos os subsistemas fuzzy (SILVA, 2020).

Quando o sistema não linear possui parâmetros incertos ainda assim pode-se obter um modelo fuzzy que represente exatamente este sistema em uma região de operação, com o procedimento mostrado em Santim et al. (2012). Contudo, com este procedimento, embora sejam conhecidos os modelos locais, as funções de pertinência obtidas são incertas, dependentes dos parâmetros incertos. Assim, técnicas que utilizam o conceito de controle PDC não podem ser diretamente utilizadas, pois estas funções de pertinência dependem de parâmetros incertos (ALVES, 2017).

Os controladores chaveados têm mostrado um avanço significativo nos estudos da teoria de controle. Esses controladores selecionam um ganho, em um conjunto de ganhos, por meio de uma lei de chaveamento, por exemplo, uma que retorna o menor valor da derivada temporal da função de Lyapunov quadrática, e está alicerçada no fato de que o mínimo de um conjunto de números reais é menor ou igual que qualquer combinação convexa dos elementos deste conjunto. A lei de controle chaveada proposta em Souza et al. (2014a) e Souza et al. (2014b) não utiliza as funções de pertinência do modelo na estrutura do controlador, e então, não necessita das expressões que definem as funções de pertinência para o cálculo do sinal de controle (ALVES, 2017). Esta metodologia proposta apresenta a vantagem de estabelecer condições mais relaxadas, no projeto de controle de sistemas lineares e, para os sistemas não lineares, a vantagem de não alterar as LMIs dadas em métodos de projeto de controle comumente utilizadas, bem como um melhor

desempenho, em alguns casos, em termos de tempo de estabilização dos controladores projetados, quando comparados com o controlador não chaveado normalmente implementado como, por exemplo, os apresentados em Tanaka, Ikeda e Wang (1998) para o caso não linear (SOUZA, 2013), além é claro, de eliminar a necessidade de obter as expressões explícitas das funções de pertinência, para implementar a lei de controle.

Embora observa-se um menor conservadorismo da lei de controle chaveada frente à realimentação de estado com um único ganho, por outro lado, os teoremas propostos em Souza et al. (2014a) e Souza et al. (2014b) ainda são conservadores. O primeiro, pelo fato de que a obtenção das condições baseadas em LMIs para o projeto dos controladores chaveados foi possível às custas de um certo conservadorismo, adicionando matrizes artificiais. O segundo, pelo fato da exigência de que a matriz  $B$  deve ser constante. Estes dois procedimentos de projeto não necessitam do acesso às funções de pertinência do modelo fuzzy T-S da planta (que no caso podem depender de parâmetros incertos) na implementação das leis de controle. Este fato importante também ocorre na nova lei de controle chaveada proposta nesta tese, que oferece condições com factibilidade maior ou igual do que a obtida com o procedimento apresentado em Souza et al. (2014a).

Como o controle chaveado de sistemas não lineares através de modelos fuzzy T-S é dependente do modelo utilizado, uma vez que ele descreve exatamente o sistema não linear através de uma combinação convexa de modelos locais apenas na região de operação considerada, uma condição para que a trajetória de estado do sistema permaneça nesta região de validade deve ser obtida. O procedimento de projeto proposto em Alves (2017) fornece uma região positivamente invariante  $\mathcal{E}(P, 1)$  na qual, para todo  $x(0) \in \mathcal{E}(P, 1)$ , o vetor de estado do sistema controlado  $x(t)$ ,  $t > 0$ , permanece na região de operação considerada para a obtenção do modelo fuzzy T-S que descreve a dinâmica não linear. Em consequência, garante-se que o sistema não linear é exatamente descrito pelo modelo fuzzy T-S, durante toda a trajetória de estado do sistema iniciada com  $x(0) \in \mathcal{E}(P, 1)$  (ALVES, 2017). Alguns resultados desta linha de pesquisa podem ser encontrados em Blanchini (1999), Klug et al. (2015), Klug, Castelan e Coutinho (2015), Alves et al. (2016).

O otimizador apresentado em Teixeira e Žak (1998), chamado de Otimizador Teixeira & Žak (T-Z) (LEE; ZAK, 2001), é um sistema (de otimização) que proporciona robustez e eficiência ao projeto de busca pelo mínimo de uma função objetivo sem a necessidade de conhecer explicitamente a derivada de tal função. Este otimizador, devido à sua estrutura modular, pode ser facilmente modificado para problemas com dimensionalidades diferentes.

O Controle por Busca Extremal (do inglês: *Extremum Seeking Control* - ESC) tem conexão estreita com o bem conhecido problema de Otimização em Tempo Real. Os algoritmos mais populares para otimização sem restrição utilizam informação da derivada ou do gradiente da função objetivo. Entretanto, em muitos problemas de controle extre-

mal, o gradiente da função objetivo pode não ser acessível em tempo real ou ser muito dispendioso ter essa informação. Portanto, existe uma necessidade clara de algoritmos de otimização não derivativos (OLIVEIRA; HSU; PEIXOTO, 2011).

Em Lee e Žak (2002), foi utilizado um otimizador bidimensional (2-D) não derivativo de Teixeira e Žak (1998) para calcular a derrapagem de roda ótima para a superfície de uma estrada (controle do sistema de freio ABS): o otimizador não derivativo encontra os deslizamentos de roda (dianteiras e traseiras) ótimos que maximizam o coeficiente de aderência da estrada. As entradas para os componentes da lógica fuzzy das rodas dianteiras e traseiras são os deslizamentos de roda ótimos obtidos pelo otimizador não derivativo. Os componentes fuzzy então calculam os torques de freio que forçam os deslizamentos atuais das rodas a seguir os deslizamentos ótimos das rodas, consequentemente isso minimiza a distância de parada do veículo.

Em Peixoto (2007) aborda o controle de sistemas não lineares incertos via realimentação de saída. São propostas estratégias para rastreamento de plantas com grau relativo arbitrário, baseadas em modelo de referência e modos deslizantes. As superfícies de deslizamento são construídas a partir de estimativas baseadas em alto ganho e a amplitude do sinal de controle é gerada por um observador da norma do estado, livre do fenômeno de pico. Propõe-se uma estratégia baseada em uma função de monitoração, obtendo-se rastreamento semi-global e exato por meio de um diferenciador exato e local. No contexto de algoritmos de otimização com função objetivo não diferenciável, encontra-se também conexão entre sistemas por modos deslizantes e direção de controle desconhecida (ou variante), onde problemas de otimização são solucionados variando a direção de busca.

Em Oliveira, Hsu e Peixoto (2011) foi tratado o projeto de controle por modos deslizantes para o rastreamento de trajetória em plantas monovariáveis incertas com grau relativo unitário e com sinal de ganho de alta frequência (do inglês: *High Frequency Gain* - HFG) desconhecido, i.e., a direção de controle é assumida desconhecida. Demonstra-se que é possível obter rastreamento global e exato utilizando-se apenas realimentação de saída por meio de uma função de chaveamento periódica e filtros de entrada e saída. Uma vantagem significativa desse novo esquema é sua robustez na direção de controle variante no tempo que foi teoricamente justificada para variações do tipo salto e testada com sucesso através de simulações. Essa propriedade torna a abordagem adequada para resolver problemas de busca extremal. Uma aplicação da otimização não derivativa ilustra a viabilidade prática do esquema de controle proposto (controle do sistema de freio ABS). Segundo os autores, uma vantagem peculiar da nova abordagem não observada plenamente pelas outras estratégias na literatura é sua robustez com respeito a mudanças frequentes da direção de controle. É essa propriedade os motivaram a aplicação da função de chaveamento periódica ao problema de controle por busca extremal via realimentação

de saída de sistemas incertos utilizando otimizadores não derivativos. Assim sendo, outra contribuição adicional foi mostrar que o controlador por realimentação de saída proposto pode também ser aplicado no ESC de sistemas incertos.

Em Oliveira, Peixoto e Hsu (2012), um novo controlador de modo deslizante de busca extrema com realimentação de saída baseado na função de comutação periódica e observação do estado da norma foi desenvolvido para uma classe mais geral de plantas não lineares incertas do que o considerado até aquele momento na literatura de controle por modo deslizante. A abordagem resultante garante a convergência em tempo finito da saída do sistema para uma pequena vizinhança do ponto extremo. Resultados de simulação de um problema de otimização não derivativa foram realizados para ilustrar o desempenho do controlador. Embora a utilização de modos deslizantes no controle de busca de extremos não fosse algo novo, soluções em tempo real com propriedades de convergência global e baseadas apenas em realimentação de saída não existiam até o momento.

Em Calli et al. (2012), o objetivo foi ajudar engenheiros e pesquisadores a escolher entre as técnicas ESC para aplicações robóticas, como apreensão de objetos, reconhecimento ativo de objetos e otimização de pontos de vista. Essas técnicas são categorizadas em cinco grupos principais: ESC de modo deslizante, ESC de rede neural, ESC baseado em aproximação, ESC baseado em perturbação e ESC adaptativo. Esses grupos são explicados brevemente enfatizando seus princípios de trabalho e o efeito dos parâmetros. Em seguida, as técnicas são comparadas quanto à sua robustez ao ruído e dinâmica do sistema por meio de simulações. Em conclusão, propõe-se o uso dos métodos baseados em aproximação quando o nível de ruído é desprezível. Quando o ruído está presente, os otimizadores baseados em rede neural são a melhor escolha graças às suas funções de histerese. No entanto, se o sistema tem alto ruído e efeitos dinâmicos, então o método baseado em perturbação é preferível, uma vez que grandes movimentos fornecem robustez ao ruído e referências suaves geradas pelo algoritmo são menos propensas a causar instabilidade.

Em Silva et al. (2017) foi explorada a busca pela região de operação de um sistema linear com grandes incertezas, quando não existe uma combinação convexa entre os subsistemas da planta, mas o otimizador T-Z permitiu projetar uma lei de chaveamento estabilizante.

Em Calli et al. (2018) uma nova estratégia de visão ativa é proposta para otimizar o ponto de vista do sensor de visão de um robô para um determinado critério de sucesso. A estratégia é baseada no ESC, que apresenta duas vantagens principais: 1) a abordagem é livre de modelo: não requer uma função objetivo explícita ou qualquer outro modelo de tarefa para calcular a direção do gradiente para otimização do ponto de vista. Isso traz novas possibilidades para o uso da visão ativa em ambientes não estruturados, uma vez que não é necessário o conhecimento a priori do entorno e dos objetos alvo. 2)

ESC conduz otimização contínua apoiada com mecanismos para escapar de máximos locais. Isso permite uma execução eficiente de uma tarefa de visão ativa. Os experimentos mostraram que a otimização contínua do ponto de vista pode aumentar eficientemente a qualidade dos dados para o algoritmo subjacente, mantendo a robustez.

Em Sousa (2018) foi associado o otimizador T-Z a técnicas ESC na busca pelo máximo ponto de potência (do inglês: *Maximum Power Point Tracking* - MPPT) do modelo matemático de uma célula fotovoltaica.

Em Silva (2020) foi utilizado o otimizador T-Z como principal ferramenta no controle chaveado de sistemas não lineares incertos. Os resultados obtidos possibilitam o projeto de controladores para plantas não lineares com um nível maior de incertezas do que tolerado com os métodos disponíveis, assegurando uma estabilidade *ultimate bounded*. A aplicação, através de simulações no domínio do tempo, desta metodologia em um sistema numérico representando um pêndulo invertido atestaram a validade do método.

Os trabalhos acima relacionados mostram a importância e praticidade do ESC.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi utilizar o otimizador T-Z no projeto de controladores chaveados, para sistemas não lineares com incertezas descritos por modelos fuzzy T-S com direção de controle desconhecida, em busca de encontrar o ganho ótimo, dentre um conjunto de ganhos, através da minimização da derivada da função de Lyapunov. Desta forma, o acesso às funções de pertinência pela lei de chaveamento não foi necessário. Ainda foram estabelecidas condições LMIs que garantiram a operação do sistema dentro de uma região de operação, para um conjunto de condições iniciais previamente especificadas.

De forma mais geral, os resultados esperados da metodologia proposta foram apresentar uma aplicabilidade e flexibilidade ampla aos problemas de controle, com menor conservadorismo e alta robustez (capaz de tolerar as incertezas na planta).

## 1.2 Estrutura da Tese

A estrutura desta tese é composta por:

- Capítulo 1: Introduz o tema abordado na tese, com uma revisão bibliográfica. Apresenta os objetivos gerais do trabalho e a organização do texto.
- Capítulo 2: Algumas notações são definidas. Expõe os conceitos fundamentais necessários para a elaboração dos próximos capítulos, como o modelo fuzzy T-S, e a representação exata do sistema não linear incerto através do modelo fuzzy T-S. São

descritos alguns métodos ESC, sendo detalhado o método que utiliza o Otimizador T-Z.

- Capítulo 3: Como exemplo de aplicação do Otimizador T-Z, o mesmo é aplicado como um método de rastreamento do ponto de máxima potência, para o funcionamento eficiente na simulação de um sistema fotovoltaico.
- Capítulo 4: São propostos três teoremas que garantem estabilidade, taxa de decaimento, restrição no sinal de controle, operação do sistema em uma região de operação previamente especificada, e região de condições iniciais do sistema.
- Capítulo 5: Descreve o projeto de controle chaveado utilizando o Otimizador Não Derivativo. Como exemplo, este projeto é aplicado em um sistema pêndulo invertido, que foi representado através de modelos fuzzy T-S contendo incertezas.
- Capítulo 6: Apresenta as conclusões finais, e as perspectivas futuras.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas condições relaxadas para o projeto de sistemas de controle chaveado, para uma classe de sistemas não lineares incertos descrita por modelos fuzzy Takagi-Sugeno, utilizando um Otimizador Não Derivativo.

O controle chaveado proposto não utiliza na sua implementação parâmetros do modelo matemático da planta na forma de modelos fuzzy Takagi-Sugeno, que dependem de não linearidades e incertezas relacionadas às matrizes  $A(\alpha)$  e  $B(\alpha)$ .

O Otimizador Não Derivativo proposto em Teixeira e Žak (1998) é um método de busca extremal que proporciona robustez e eficiência ao projeto de busca pelo mínimo de uma função objetivo sem a necessidade de conhecer explicitamente a derivada de tal função. No Capítulo 3 o Otimizador T-Z foi aplicado como um método de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (“MPPT”), para o funcionamento eficiente de um sistema fotovoltaico, cujos resultados de simulação iniciais foram satisfatórios.

A representação exata dos sistemas não lineares incertos foi feita por modelos fuzzy T-S incertos, conforme apresentada na Seção 2.2, através de uma combinação convexa de modelos lineares locais. Como a representação exata do sistema não linear é determinada através de um domínio de atuação do sistema, ou seja, em uma região do espaço de estados, as leis de controle propostas encontram-se em um contexto local.

No Capítulo 4, condições LMIs garantiram então a operação do sistema em uma região de operação previamente especificada, e também LMIs asseguraram a região das condições iniciais do sistema. Os teoremas testados ainda garantiram, além da estabilidade, taxa de decaimento (tempo de resposta), e restrição no sinal de controle.

No Capítulo 5, foi descrito o projeto de controle chaveado utilizando o Otimizador Não Derivativo. No caso deste trabalho, a função objetivo foi uma função de Lyapunov para o sistema. Como exemplo, este projeto foi aplicado em um sistema pêndulo invertido, que foi representado através de modelos fuzzy T-S contendo incertezas. O sistema possuía a incerteza da massa do carrinho, que era variável. Foram simulados 4 cenários possíveis, sendo a massa do carrinho fixa ou variável, e a taxa de decaimento pequena ou grande. Em todos os casos, o sistema foi controlado e respeitando a região de operação especificada. Nos gráficos apresentados foi possível verificar a atuação do otimizador, através de alguns de seus parâmetros monitorados.

Para o projeto de um controlador chaveado para um sistema não linear, o Otimizador Não Derivativo se mostrou eficiente na busca do mínimo de uma função Lyapunov, escolhendo entre subsistemas do projeto a partir dos ganhos do controlador ( $K_{\sigma_1}$  ou  $K_{\sigma_2}$ ,  $\{\sigma_1; \sigma_2\} \in \mathbb{K}_r$ ). Esta metodologia permitiu o projeto com um nível maior de incertezas na planta, quando comparada com resultados provenientes de procedimentos similares.

Assim, o otimizador associado ao sistema foi capaz de fazer a melhor opção de escolha entre os ganhos de realimentação de modo contínuo.

Mais especificamente, as condições de projeto de controladores chaveados utilizando otimizadores não derivativos propostas podem ser descritas pelos Teoremas 1 e 2, enquanto que o Teorema 3 apresenta condições que já foram utilizadas com sucesso no projeto de controladores chaveados, sem o acesso às funções de pertinência do modelo fuzzy T-S da planta, que podem depender de parâmetros incertos. Nos exemplos numéricos foi possível observar que os Teoremas 1 e 2 apresentaram uma região de factibilidade maior do que a obtida com o Teorema 3. Este fato ilustra o principal resultado desta tese, que é a relaxação das condições para o projeto de controladores chaveados utilizando otimizadores não derivativos, mitigando no projeto a influência das incertezas na matriz de entrada  $B(\alpha)$  da planta, representada através de modelos fuzzy Takagi-Sugeno.

## 6.1 Perspectivas Futuras

Como extensão da pesquisa deste estudo, sugere-se:

- Procurar aplicar a estrutura proposta em outros problemas de controle, por exemplo, considerando adicionalmente distúrbios casados (somados à entrada da planta) e/ou minimizando a norma  $H_\infty$  e/ou levando-se em conta a saturação do sinal de entrada;
- Outra ideia seria usar outros otimizadores na estrutura do sistema de controle chaveado proposta.

## REFERÊNCIAS

- ALONSO GARCÍA, M.; BALENZATEGUI, J. Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on nominal operation cell temperature calculations. *Renewable Energy*, Oxford, v. 29, n. 12, p. 1997–2010, 2004. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148104001260>>. Acesso em: 2 jul. 2022.
- ALVES, U. N. L. T. *Controle Chaveado e Chaveado Suave de Sistemas Não Lineares Incertos via Modelos Fuzzy T-S*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2017.
- 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*, Chichester, v. 30, n. 8-10, p. 1408–1433, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/acs.2671>>. Acesso em: 5 jan. 2022.
- AMINDE, N. O. *Controle Extremal via Funções de Monitoração e Realimentação de Saída*. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, jul. 2013.
- ARIYUR, K. B.; KRSTIC, M. *Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control*. Hoboken, New Jersey: JOHN WILEY & SONS, 2003.
- ASSUNÇÃO, E.; TEIXEIRA, M. C. M.; FARIA, F. A.; SILVA, N. A. P. D.; CARDIM, R. Robust state-derivative feedback LMI-based designs for multivariable linear systems. *International Journal of Control*, London, v. 80, n. 8, p. 1260–1270, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207170701283899>>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- BLANCHINI, F. Set invariance in control. *Automatica*, Elmsford, v. 35, n. 11, p. 1747–1767, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109899001132>>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- BOYD, S.; GHAOUI, L. E.; FERON, E.; BALAKRISHNAN, V. *Linear matrix inequalities in system and control theory*. 2. ed. Philadelphia: SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994. v. 15. (SIAM Studies in Applied Mathematics, v. 15).
- BP SOLAR. *120-Watt Multicrystalline Photovoltaic Module*. [S.l.], 2002. 01-4003-2.
- BUZETTI, A. S. *Projeto de Controle Robusto Chaveado com Falhas nos Sensores*. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.
- CALLI, B.; CAARLS, W.; JONKER, P.; WISSE, M. Comparison of extremum seeking control algorithms for robotic applications. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vilamoura, Algarve, Portugal: [s.n.], 2012. p. 3195–3202. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6386180>>. Acesso em: 20 abr. 2022.

- CALLI, B.; CAARLS, W.; WISSE, M.; JONKER, P. P. Active vision via extremum seeking for robots in unstructured environments: Applications in object recognition and manipulation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, New York, v. 15, n. 4, p. 1810–1822, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8310020>>. Acesso em: 30 set. 2021.
- CARDIM, R. *Projeto de Controladores baseados em LMIs: Realimentação Derivativa e Sistemas Chaveados utilizando Estrutura Variável*. 2009. 120 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.
- CARRIJO, D. R.; FERREIRA, R. S.; JUNIOR, S. C. G.; CAMACHO, J. R. Uma proposta de técnica de rastreamento de máxima potência de um painel fotovoltaico. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*. Bonito, MS, Brasil: [s.n.], 2010. p. 2543–2548.
- CELIK, A. N.; ACIKGOZ, N. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. *Applied Energy*, London, v. 84, n. 1, p. 1–15, 2007. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261906000511>>. Acesso em: 15 set. 2021.
- CHEN, Y.-J.; OHTAKE, H.; TANAKA, K.; WANG, W.-J.; WANG, H. Relaxed stabilization criterion for T-S fuzzy systems by minimum-type piecewise-Lyapunov-function-based switching fuzzy controller. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, New York, v. 20, n. 6, p. 1166–1173, dec. 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6189778>>. Acesso em: 27 dez. 2021.
- DING, B.; SUN, H.; YANG, P. Further studies on LMI-based relaxed stabilization conditions for nonlinear systems in Takagi–Sugeno’s form. *Automatica*, Elmsford, v. 42, n. 3, p. 503–508, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109805004085>>. Acesso em: 15 out. 2021.
- DONG, J.; WANG, Y.; YANG, G.-H. Control synthesis of continuous-time T-S fuzzy systems with local nonlinear models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, New York, v. 39, n. 5, p. 1245–1258, 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4804711>>. Acesso em: 5 fev. 2021.
- DONG, J.; YANG, G.-H. State feedback control of continuous-time T–S fuzzy systems via switched fuzzy controllers. *Information Sciences*, New York, v. 178, n. 6, p. 1680–1695, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025507005257>>. Acesso em: 5 fev. 2021.
- 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*, New York, v. 14, n. 3, p. 386–397, jun. 2006. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1638455>>. Acesso em: 7 mar. 2021.
- FERNANDES, U. B. *Controle com Estrutura Variável e Modos Deslizantes Aplicado em Sistema de Suspensão Ativa*. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

- GUAY, M.; ZHANG, T. Adaptive extremum seeking control of nonlinear dynamic systems with parametric uncertainties. *IFAC Proceedings Volumes*, Laxenburg, v. 35, n. 1, p. 459–464, 2002. ISSN 1474-6670. 15th IFAC World Congress. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015390662>>. Acesso em: 11 abr. 2021.
- HEYDARI-DOOSTABAD, H.; KEYPOUR, R.; KHALGHANI, M. R.; KHOOBAN, M. H. A new approach in MPPT for photovoltaic array based on extremum seeking control under uniform and non-uniform irradiances. *Solar Energy*, Kidlington, v. 94, p. 28–36, 2013. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13001771>>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- KIM, E.; LEE, H. New approaches to relaxed quadratic stability condition of fuzzy control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, New York, v. 8, n. 5, p. 523–534, 2000. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/873576>>. Acesso em: 17 mai. 2021.
- KLUG, M.; CASTELAN, E. B.; COUTINHO, D. A T–S fuzzy approach to the local stabilization of nonlinear discrete-time systems subject to energy-bounded disturbances. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Heidelberg, v. 26, p. 191–200, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40313-015-0172-8>>. Acesso em: 20 jun. 2021.
- KLUG, M.; CASTELAN, E. B.; LEITE, V. J.; SILVA, L. F. Fuzzy dynamic output feedback control through nonlinear takagi–sugeno models. *Fuzzy Sets and Systems*, Amsterdam, v. 263, p. 92–111, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165011414002632>>. Acesso em: 9 ago. 2021.
- KOROVIN, S.; UTKIN, V. Using sliding modes in static optimization and nonlinear programming. *Automatica*, Elmsford, v. 10, n. 5, p. 525–532, 1974. ISSN 0005-1098. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109874900533>>. Acesso em: 11 set. 2021.
- KRSTIĆ, M.; WANG, H.-H. Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems. *Automatica*, Elmsford, v. 36, n. 4, p. 595–601, 2000. ISSN 0005-1098. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109899001831>>. Acesso em: 12 set. 2021.
- 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*, Amsterdam, v. 67, p. 390–408, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095219761730221X>>. Acesso em: 12 set. 2021.
- LAM, H. K.; NARIMANI, M. Stability analysis and performance design for fuzzy-model-based control system under imperfect premise matching. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, New York, v. 17, n. 4, p. 949–961, 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4565671>>. Acesso em: 15 set. 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*, New York, v. 19, n. 4, p. 785–791, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5750043>>. Acesso em: 7 out. 2021.

LEE, Y.; ŽAK, S. Designing a genetic neural fuzzy antilock-brake-system controller. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, New York, v. 6, n. 2, p. 198–211, 2002. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/996019>>. Acesso em: 10 out. 2021.

LEE, Y.; ZAK, S. Genetic neural fuzzy control of anti-lock brake systems. In: *Proceedings of the 2001 American Control Conference. (Cat. No.01CH37148)*. Arlington: [s.n.], 2001. v. 2, p. 671–676 vol.2. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/945791>>. Acesso em: 27 dez. 2021.

LIU, X.; ZHANG, Q. Approaches to quadratic stability conditions and  $H_\infty$  control designs for T-S fuzzy systems. *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, New York, v. 11, n. 6, p. 830–839, 2003. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1255418>>. Acesso em: 7 ago. 2021.

LIU, X.; ZHANG, Q. New approaches to  $H_\infty$  controller designs based on fuzzy observers for T-S fuzzy systems via LMI. *Automatica*, Elmsford, v. 39, n. 9, p. 1571–1582, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109803001729>>. Acesso em: 10 out. 2021.

Lofberg, J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In: *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No.04CH37508)*. Taipei: [s.n.], 2004. p. 284–289. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1393890>>. Acesso em: 7 ago. 2020.

MACHADO, E. R. M. D. *Modelagem e Controle de Sistemas Fuzzy Takagi-Sugeno*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2003.

MONTANARI, L. A. Aplicação do otimizador analógico não derivativo Teixeira & Žak junto ao controle chaveado em sistemas lineares chaveados com direção incerta no sinal de realimentação. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. 2016.

MONTEIRO, J. C. E. *Optimization of Nonlinear Systems with Uncertain Objective Functions via Sliding-Mode Control*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2020.

MORSLI, A.; TLEMÇANI, A.; KRAMA, A.; ABBADI, A.; LAID, Z.; NOURI, H. Application of the direct power control strategy in a shunt active filter by exploiting the solar photovoltaic energy as a continuous source. *Nonlinear Dynamics and Systems Theory*, Kyiv, v. 20, p. 410–424, 10 2020. Disponível em: <<https://uwe-repository.worktribe.com/output/6821796>>. Acesso em: 18 jul. 2021.

MOSEK. *MOSEK Optimization Suite*: Release 9.2.40. Copenhagen, Denmark, 2021. 11 p.

NJOMO, A. F. T.; KENNE, G.; DOUANLA, R. M.; SONFACK, L. L. A modified ESC algorithm for MPPT applied to a photovoltaic system under varying environmental conditions. *International Journal of Photoenergy*, New York, v. 2020, 2020. ISSN

1110-662X. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ijp/2020/1956410/>>. Acesso em: 5 jan. 2022.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 4th. ed. New York: Prentice Hall, 2003. 800 p.

OLIVEIRA, D. R. *Controle  $\mathcal{H}_\infty$  chaveado para sistemas não lineares incertos descritos por modelos fuzzy T-S considerando região de operação e saturação do sinal de controle*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2017.

OLIVEIRA, T. R.; HSU, L.; PEIXOTO, A. J. Output-feedback global tracking for unknown control direction plants with application to extremum-seeking control. *Automatica*, Elmsford, v. 47, n. 9, p. 2029–2038, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109811002949>>. Acesso em: 6 fev. 2022.

OLIVEIRA, T. R.; PEIXOTO, A. J.; HSU, L. Global real-time optimization by output-feedback extremum-seeking control with sliding modes. *Journal of the Franklin Institute*, New York, v. 349, n. 4, p. 1397–1415, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003211002031>>. Acesso em: 6 fev. 2022.

OLIVEIRA, T. R. de. *Rastreamento para Sistemas Incertos Fortemente Não-Lineares com Direção de Controle Desconhecida*. 2010. 165 f. Tese (Doutorado) — COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

PEIXOTO, A. J. *Rastreamento de Trajetória por Modos Deslizantes de uma Classe de Sistemas Não-Lineares Incertos via Realimentação de Saída*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.

PERES, J. C.; RAMOS, I. T. M.; TEIXEIRA, M. C. M.; ASSUNÇÃO, E.; CARDIM, R. Projeto de controlador robusto chaveado com custo garantido para sistemas lineares incertos. *Anais da XIV Conferência Brasileira de Controle, Dinâmica e Aplicações*, 2019.

PERUZZO, E. S.; PETERS JUNIOR, G. *Como é Realizado o MPPT*. 2021. Disponível em: <<https://blog.solarinove.com.br/como-e-realizado-o-mppt/>>. Acesso em: 10 fev. 2022.

RIBEIRO, J. M. d. S. *Controle Discreto com Modos Deslizantes em Sistemas Incertos com Atraso no Sinal de Controle*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2006.

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. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165011407003284>>. Acesso em: 7 fev. 2022.

SANTIM, M. P. A. *Projeto e Implementação com Chaveamento de Reguladores Fuzzy Takagi-Sugeno para um Conjunto de Pontos de Operação*. 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

- SANTIM, M. P. A.; TEIXEIRA, M. C. M.; SOUZA, W. A.; ASSUNÇÃO, E.; CARDIM, R. Design of a Takagi-Sugeno fuzzy regulator for a set of operation points. *Mathematical Problems in Engineering*, New York, v. 2012, p. 17, 2012. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/731298/>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- SERA, D.; TEODORESCU, R.; RODRIGUEZ, P. PV panel model based on datasheet values. In: *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Vigo: [s.n.], 2007. p. 2392–2396. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4374981>>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- ŠILJAK, D. D.; STIPANOVIĆ, D. M. Robust stabilization of nonlinear systems: the LMI approach. *Mathematical Problems in Engineering*, New York, v. 6, n. 5, p. 461–493, jun. 2000. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/mpe/2000/810975/abs/>>. Acesso em: 25 mai. 2020.
- SILVA, L. R. C. *Análise De Técnicas De Rastreamento De Máxima Potência (MPPT) Para Aplicação Em Arranjos De Sistemas Fotovoltaicos Conectados á Rede*. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal De Uberlândia, Uberlândia, MG, 2015.
- SILVA, P. H. G. L.; TEIXEIRA, M. C. M.; ALVES, U. N. L. T.; OLIVEIRA, D. R.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E. Controle de sistemas chaveados lineares com grandes incertezas utilizando um otimizador analógico não derivativo. In: *Anais ..., Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações*. São José do Rio Preto, SP: [s.n.], 2017.
- SILVA, P. H. G. L. da. *Controle Chaveado de Sistemas com Incertezas utilizando Otimizadores não Derivativos*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2020.
- SOUSA, M. H. N. Estudo de novas aplicações de otimizadores analógicos não derivativos. Relatório de Iniciação Científica. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. 2018.
- SOUZA, W. A. *Projeto de controladores robustos chaveados para sistemas não lineares descritos por modelos fuzzy Takagi-Sugeno*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2013.
- SOUZA, W. A.; TEIXEIRA, M. C. M.; SANTIM, M. P. A.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E. On switched regulator design of uncertain nonlinear systems using Takagi-Sugeno fuzzy models. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, New York, v. 22, n. 6, p. 1720–1727, Dec 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6722917>>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- SOUZA, W. A.; TEIXEIRA, M. C. M.; SANTIM, M. P. A.; CARDIM, R.; ASSUNÇÃO, E. Robust switched control design for nonlinear systems using fuzzy models. *Mathematical Problems in Engineering*, New York, v. 2014, p. 11, 2014. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/721537/>>. Acesso em: 18 jul. 2020.
- SPELTA, M. J. M. *Busca Extremal Utilizando Controle por Modos Deslizantes Aplicada à Geração de Energia Através de Módulos Fotovoltaicos*. 158 p. Monografia (Projeto de Graduação) — Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro Paulo, 2017.

STERNBY, J. Adaptive control of extremum systems. *Technical Reports; TFRT*, p. 151–160, 1980.

STURM, J. F. Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones. *Optimization Methods and Software*, New York, v. 11–12, p. 625–653, 1999. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10556789908805766>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, New York, v. 15, n. 1, p. 116–132, feb. 1985. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6313399>>. Acesso em: 18 jul. 2020.

TANAKA, K.; IKEDA, T.; WANG, H. O. Fuzzy regulators and fuzzy observers: Relaxed stability conditions and LMI-based designs. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, New York, v. 6, n. 2, p. 250–265, may 1998. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/669023>>. Acesso em: 18 jul. 2020.

TANAKA, K.; WANG, H. O. *Fuzzy control systems design and analysis: a Linear Matrix Inequality approach*. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

TANIGUCHI, T.; TANAKA, K.; OHTAKE, H.; WANG, H. Model construction, rule reduction, and robust compensation for generalized form of Takagi-Sugeno fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, New York, v. 9, n. 4, p. 525–537, aug. 2001. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/940966>>. Acesso em: 18 jul. 2020.

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*, New York, v. 11, n. 5, p. 613–623, out. 2003. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1235989>>. Acesso em: 7 ago. 2021.

TEIXEIRA, M. C. M.; ŽAK, S. H. Analog neural nonderivative optimizers. *IEEE Transactions on Neural Networks*, New York, v. 9, n. 4, p. 629–638, 1998. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/701176>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

TEIXEIRA, M. C. M.; ŽAK, S. H. Stabilizing controller design for uncertain nonlinear systems using fuzzy models. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, New York, v. 7, n. 2, p. 133–142, abr. 1999. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/755395>>. Acesso em: 20 abr. 2021.

TOH, K. C.; TODD, M. J.; TütüNCü, R. H. Sdpt3 — a MATLAB software package for semidefinite programming, version 1.3. *Optimization Methods and Software*, New York, v. 11, n. 1–4, p. 545–581, 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10556789908805762>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

VENDRAMINI, G.; SILVA, P. S. da. Controle de um pêndulo invertido sobre uma plataforma móvel utilizando PID e MFAC (Model-Free Adaptive Control). In: *Anais ..., Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações*. Serra Negra, SP: [s.n.], 2010.

WITTENMARK, B.; EVANS, R. Extremal control of wiener model processes. In: *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002*. Las Vegas:

[s.n.], 2002. v. 4, p. 4637–4642 vol.4. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1185109>>. Acesso em: 20 abr. 2021.

WITTENMARK, B.; URQUHART, A. R. Adaptive extremal control. *Proceedings of 1995 34th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, v. 2, p. 1639–1644 vol.2, 1995. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/480374>>. Acesso em: 15 fev. 2022.

WU, Y.; MAHMUD, M. H.; MOORTHY, R. S. K.; CHINTHAVALI, M.; ZHAO, Y. Adaptive extremum seeking control based LCL filter resonant frequency online estimation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, New York, v. 37, n. 1, p. 59–64, 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9507076>>. Acesso em: 20 abr. 2022.

ZHANG, C.; ORDONEZ, R. Non-gradient extremum seeking control of feedback linearizable systems with application to ABS design. In: *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*. San Diego: [s.n.], 2006. p. 6666–6671. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4177772>>. Acesso em: 23 mar. 2022.

ZHANG, T.; GUAY, M.; DOCHAIN, D. Adaptive extremum seeking control of continuous stirred tank bioreactors. *IFAC Proceedings Volumes*, Laxenburg, v. 35, n. 1, p. 449–454, 2002. ISSN 1474-6670. 15th IFAC World Congress. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015398050>>. Acesso em: 11 abr. 2021.