

Laboratório de Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares

Departamento de Engenharia Eletrônica

Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG Brasil

Fone: +55 31 3409-3470

---

# Máquinas de Comitê Aplicadas na Identificação de Sistemas Dinâmicos

**Leandro Freitas de Abreu**

**Orientador:** Prof. Dr. Luís Antônio Aguirre

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Bruno Henrique Groenner Barbosa

Belo Horizonte, 17 de janeiro de 2018



Laboratório de Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares

Departamento de Engenharia Eletrônica

Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG Brasil

Fone: +55 31 3409-3470



---

# Projeto de Controladores Takagi-Sugeno baseados em Modelos de Referência

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Minas Gerais como  
requisito parcial para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica

**Víctor Costa da Silva Campos**

**Orientador:** Prof. Dr. Leonardo Antônio Borges Tôrres

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Reinaldo Martinez Palhares

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Belo Horizonte  
17 de janeiro de 2018



\AM@currentdocname .png

.png



# Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade. Ao Léo por ter me apresentado ao controle de aeronaves e motivado meus estudos. Ao Reinaldo pelas discussões e por ter me apresentado às LMIs e ao controle fuzzy. Ao prof. Paulo Iscold pela oportunidade de trabalhar no projeto de assistência à pilotagem. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado de tal projeto.

Agradeço à minha família pelo apoio e carinho. À Ana pela motivação, carinho e inspiração nesses últimos meses. Aos amigos por estarem sempre lá. Aos amigos de laboratório e do mestrado, em especial ao Tales, Cristina, Grazi, Dimas, Tiago, Vitinho, Gonçalo e Rogério pela companhia e apoio durante esse período da minha vida.





*"A lesson without pain is meaningless. That's because no one can gain without sacrificing something. But by enduring that pain and overcoming it...  
...he shall obtain a powerful, unmatched heart.  
A fullmetal heart."*

*Edward Elric, FullMetal Achemist Brotherhood*

*"Mozzie: May you live in interesting times.*

*Neal: You know that's the first of two curses.*

*Mozzie: What's the other one?*

*Neal: May you find what you're looking for."*

*White Collar, primeira temporada, episódio 12*



# Resumo

As técnicas de controle fuzzy Takagi-Sugeno (TS) permitem que a síntese de controladores não lineares seja realizada por meio de problemas de otimização sujeitos a Desigualdades Matriciais Lineares e exigem, para isso, um modelo fuzzy TS do sistema a ser controlado.

Neste trabalho, uma função de Lyapunov fuzzy candidata e condições de síntese propostas em trabalhos recentes da literatura são usados para projetar controladores fuzzy TS baseados em modelos de referência. Além disso, algumas modificações em relação a uma técnica numérica de obtenção de modelos fuzzy são sugeridas, de modo a torná-la mais geral.

As condições de síntese supramencionadas são aplicadas ao problema de sincronismo de dois osciladores caóticos acoplados unidirecionalmente por um canal de transmissão e ao problema de controle do movimento longitudinal de uma aeronave de asa fixa.

Em relação ao problema de sincronismo de dois osciladores caóticos, a contribuição deste trabalho está na proposição de uma estratégia de sincronismo em que se estuda formalmente o efeito da distorção introduzida pelo canal de transmissão com banda limitada.

Em relação ao problema de controle do movimento longitudinal de uma aeronave de asa fixa, a lei de controle utilizada pode ser pensada como um controlador de ganho escalonado, sintonizado de forma sistemática graças a representação Takagi-Sugeno (TS) do mesmo. Além disso, o uso de um modelo de referência permite especificar de forma simples o desempenho associado ao problema de Assistência à Pilotagem - um dos temas motivadores deste trabalho.

# Abstract

Takagi-Sugeno fuzzy control techniques allow the synthesis of nonlinear controllers based on Linear Matrix Inequalities, as long as a fuzzy Takagi-Sugeno model of the system is available.

In this work, a fuzzy candidate Lyapunov function and recently proposed synthesis conditions serve as basis to design model reference based fuzzy Takagi-Sugeno controllers. In addition, some modifications are proposed generalizing a numerical technique used to obtain the fuzzy models.

Such synthesis conditions are applied to the problem of synchronizing two chaotic oscillators coupled unidirectionally by a transmission channel, and to the problem of controlling the longitudinal dynamics of a fixed wing aircraft.

Regarding the chaotic oscillators synchronization problem, one of the contributions is the proposition of a synchronization strategy that formally incorporates the transmitted signal distortion introduced by a band-limited transmission channel.

On the problem of fixed wing aircraft longitudinal control, the final control law can be seen as a gain scheduled controller, whose scheduling strategy is automatically accomplished relying on the TS representation of the controller. In addition, the use of a closed loop reference model simplify the performance requirements specification related to the design of piloting assistance systems - a motivating problem to the present work.

# Sumário

# Lista de Figuras

# Lista de Tabelas

# Notação

|                                          |                                                                                           |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a$                                      | Escalar                                                                                   |
| $\mathbf{a}$                             | Vetor                                                                                     |
| $A$                                      | Matriz                                                                                    |
| $\mathcal{A}$                            | Tensor                                                                                    |
| $\mathbf{a}_i$                           | Vetor coluna $i$ da matriz $A$                                                            |
| $a_{ij}$                                 | Elemento da linha $i$ , coluna $j$ da matriz $A$                                          |
| $a_{i_1 i_2 \dots i_N}$                  | Elemento da posição $(i_1, i_2, \dots, i_N)$ do tensor $\mathcal{A}$                      |
| $\mathcal{A}_{(n)}$                      | Matriz de modo $n$ do tensor $\mathcal{A}$                                                |
| $\langle \cdot, \cdot \rangle$           | Operador de produto escalar                                                               |
| $\times_n$                               | Operador de produto modo- $n$ entre um tensor e uma matriz                                |
| $\  \cdot \ $                            | Operador de norma                                                                         |
| $\mathcal{S} \bigotimes_{n=1}^N U^{(n)}$ | Notação curta para $\mathcal{S} \times_1 U^{(1)} \times_2 U^{(2)} \dots \times_N U^{(N)}$ |
| $\mathbf{1}$                             | Vetor cujos componentes são todos iguais a um                                             |
| $A^T$                                    | Matriz transposta da matriz $A$                                                           |
| $*$                                      | Elementos transpostos em uma matriz simétrica                                             |
| $\text{diag}(\cdot)$                     | Matriz bloco diagonal                                                                     |
| $\partial f / \partial \mathbf{x}$       | Gradiente de $f$ (vetor coluna), ou matriz Jacobiana de $f$ (se $f$ for multivariável)    |
| $P \succ 0$                              | Indica que a matriz $P$ é definida positiva                                               |
| $P \succeq 0$                            | Indica que a matriz $P$ é semi-definida positiva                                          |
| $P \prec 0$                              | Indica que a matriz $P$ é definida negativa                                               |
| $P \preceq 0$                            | Indica que a matriz $P$ é semi-definida negativa                                          |



# Lista de Siglas

|              |                                                                                                     |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CNO</b>   | Próxima a Normalizada - <i>Close to Normalized</i>                                                  |
| <b>CNPq</b>  | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico                                       |
| <b>HOSVD</b> | Decomposição de Valores Singulares de Alta Ordem - <i>Higher Order Singular Value Decomposition</i> |
| <b>INO</b>   | Normalizada Inversa - <i>Inverted Normalized</i>                                                    |
| <b>LMI</b>   | Desigualdade Matricial Linear - <i>Linear Matrix Inequality</i>                                     |
| <b>LPV</b>   | Linear com Parâmetros Variantes - <i>Linear Parameter Varying</i>                                   |
| <b>NN</b>    | Não Negativa - <i>Non Negative</i>                                                                  |
| <b>NO</b>    | Normalizada - <i>Normalized</i>                                                                     |
| <b>PDC</b>   | <i>Parallel Distributed Compensation</i>                                                            |
| <b>PDVA</b>  | Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Veículos Autônomos                                           |
| <b>qLPV</b>  | quase-LPV - <i>quasi-Linear Parameter Varying</i>                                                   |
| <b>RNO</b>   | Normalizada Relaxada - <i>Relaxed Normalized</i>                                                    |
| <b>SN</b>    | Normalizada em Soma - <i>Sum Normalized</i>                                                         |
| <b>TS</b>    | Takagi-Sugeno                                                                                       |