

CONTROLE FUZZY POR MODELO DE REFERÊNCIA APLICADO A UM CAÇA MILITAR A JATO

VÍCTOR COSTA DA SILVA CAMPOS*, LEONARDO ANTÔNIO BORGES TÔRRES†,
REINALDO MARTINEZ PALHARES†

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,

†Departamento de Engenharia Eletrônica,
Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901,
Belo Horizonte, MG, Brasil

Emails: victor@cpdee.ufmg.br, torres@cpdee.ufmg.br, palhares@cpdee.ufmg.br

Abstract— This paper presents the use of a model reference fuzzy control technique, based on recent LMI results found on the literature, applied to a militar jet fighter longitudinal model. In order to apply such technique, this paper also makes use of the tensor product model transformation technique to model the aircraft as a fuzzy Takagi-Sugeno system. Simulation results are presented at the end.

Keywords— Aircraft Control, Fuzzy Control, Model Reference Control.

Resumo— Este artigo apresenta o uso de uma técnica de controle fuzzy por modelo de referência, baseada em resultados de LMIs recentes na literatura, aplicada ao modelo longitudinal de um caça militar a jato. Para poder aplicar tal técnica, este trabalho também faz uso da técnica de transformação do modelo via produto tensorial para modelar a aeronave como um sistema fuzzy. Resultados das simulações são apresentados ao final do artigo.

Palavras-chave— Controle de Aeronaves, Controle Fuzzy, Controle por Modelo de Referência.

1 Introdução

O uso de leis de controle com ganho escalonado é uma prática frequente no controle de aeronaves e as técnicas de controle fuzzy Takagi-Sugeno permitem a síntese de controladores de ganho escalonado de uma maneira sistemática e com certas margens de desempenho garantidas. Tais técnicas permitem estender resultados de controle robusto de sistemas lineares para sistemas não-lineares e garantir o desempenho e a estabilidade de um sistema além de permitirem também especificações em termos do tempo de resposta do sistema. Como parte do projeto *Sistema para Assistência à Pilotagem de Aeronaves de Aviação Geral* do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), o desenvolvimento de estratégias de controle que possa ser aplicadas de maneira sistemática a aeronaves deve ser abordado. Além disso, o uso de técnicas de controle por modelo de referência permitem ao projetista especificar diretamente o comportamento desejado para a malha fechada do sistema.

Para a aplicação dessas técnicas faz-se necessário um modelo fuzzy Takagi-Sugeno do sistema. Em casos em que o sistema apresenta um número pequeno de não-linearidades é simples de se conseguir uma representação exata do sistema (Tanaka and Wang, 2001). Porém, quando o número de não-linearidades e a ordem do sistema crescem tal modelagem pode apresentar-se custosa e utilizar um número desnecessariamente grande de modelos lineares.

O objetivo deste artigo é apresentar uma nova técnica de controle fuzzy por modelo de referência

e uma adaptação de uma técnica numérica para aproximar um sistema por um modelo fuzzy Takagi-Sugeno. É também apresentado como tais técnicas são utilizadas para o controle de um modelo do movimento longitudinal de um caça militar a jato.

1.1 Notação

Um T sobrescrito indica matriz/vetor transposto. O símbolo $*$ indica termos transpostos em uma matriz simétrica. A operação $\mathcal{A} \otimes_n U$ indica o produto tensorial do modo n do tensor \mathcal{A} pela matriz U . A operação $\mathcal{A} \otimes_{i=1}^N U_i$ indica a sequência de produtos tensoriais dos modos i do tensor \mathcal{A} pelas matrizes U_i .

2 Metodologia

Esta seção tem o intuito de mostrar os métodos utilizados durante este trabalho. Primeiramente é apresentada a estratégia de síntese da lei de controle para a aeronave. Como tal estratégia requer um modelo fuzzy Takagi-Sugeno, apresenta-se na sequência uma técnica numérica para encontrar tal modelo dado um modelo qLPV (*quasi-Linear Parameter Varying*) do sistema. Por último é apresentada uma modificação no método do produto tensorial que permite o uso de linearizações em diversos pontos de operação dado um modelo não-linear geral.

2.1 Controle Fuzzy por Modelo de Referência

Esta seção apresenta condições relaxadas para a síntese de controladores fuzzy \mathcal{H}_∞ e sua aplicação

para o controlador por modelo de referência.

Considere um modelo fuzzy Takagi-Sugeno do sistema:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^r \beta_i [A_i x + B_{u_i} u + B_{w_i} w], \\ y &= \sum_{i=1}^r \beta_i [C_i x + D_{u_i} u + D_{w_i} w], \end{aligned}$$

e um modelo de referência linear dado por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_m &= A_m x_m + B_m r, \\ y_m &= C_m x_m + D_m r, \end{aligned}$$

onde x são os estados do sistema, y as saídas controladas, w os sinais de perturbação, x_m os estados do modelo de referência, y_m as saída do modelo de referência, e r os sinais de referência.

As equações do sistema aumentado podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{aug} &= \sum_{i=1}^r \beta_i \{ \bar{A}_i x_{aug} + \bar{B}_{u_i} u + \bar{B}_{w_i} w_{aug} \}, \\ z &= \sum_{i=1}^r \beta_i \{ \bar{C} x_{aug} \}, \end{aligned}$$

$$\bar{A}_i = \begin{bmatrix} A_i & 0 & 0 \\ 0 & A_m & 0 \\ C_i & -C_m & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_{u_i} = \begin{bmatrix} B_{u_i} \\ 0 \\ D_{u_i} \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_{w_i} = \begin{bmatrix} B_{u_i} N_j & B_{w_i} \\ B_m & 0 \\ -D_m & D_{w_i} \end{bmatrix},$$

$$\bar{C} = [0 \ 0 \ I], \quad (1)$$

com $x_{aug} = [x^T \ x_m^T \ e_i^T]^T$ e $w_{aug} = [r^T \ w^T]^T$.

Pelo fato de a aplicação apresentada neste trabalho não apresentar resultados viáveis para os ganhos controlador (devido ao grande número de regras) ao se utilizar técnicas baseadas em funções de Lyapunov quadráticas, este trabalho faz uso de resultados recentes para funções de Lyapunov fuzzy em (Mozelli et al., 2009), porém adicionando as restrições extras para que se obtenha um controlador que minimize a norma \mathcal{H}_∞ de w_{aug} para z , para enunciar o seguinte resultado:

Teorema 1 *Dado um sistema fuzzy Takagi-Sugeno aumentado da forma apresentada na equação (1), uma ação de controle da forma*

$$u = \sum_{j=1}^r \beta_j [K_j x_{aug} + N_j r], \quad (2)$$

e um escalar μ , garante-se que a norma H_∞ de w_{aug} para z é menor do que γ se as seguintes LMIs forem satisfeitas:

$$\begin{aligned} \Theta_{ii} &< 0 & \forall i \in 1, \dots, r, \\ \Theta_{ij} + \Theta_{ji} &< 0 & \forall i < j, i, j \in 1, \dots, r, \\ P_i &> 0 & \forall i \in 1, \dots, r, \end{aligned} \quad (3)$$

com Θ_{ij} dado pela equação (6),

$$P_i = M_0 + M_i, \quad M_0 = \begin{bmatrix} 0 & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{12} & 0 & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{1n} & m_{2n} & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} m_{11}^i & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{22}^i & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_{nn}^i \end{bmatrix},$$

e os ganhos do controlador são dados por

$$K_j = S_j R^{-1}. \quad (5)$$

A partir desse teorema pode-se escrever um problema de otimização que minimize o limitante superior da norma H_∞ de w_{aug} para z e forneça uma lei de controle, que pode ser reescrita como:

$$u = \sum_{j=1}^r \beta_j [K_{1j} x + K_{2j} x_m + K_{3j} \int (y - y_m) dt + N_j r]. \quad (7)$$

Em que K_{1j} , K_{2j} e K_{3j} são sub-matrizes associadas aos ganhos de realimentação de estados encontrados, K_j , e N_j é um ganho direto do sinal de referência para a ação de controle (como pode ser visto nas equações do sistema aumentado).

2.2 Transformação do Produto Tensorial (TP model transformation)

A transformação do produto tensorial (*Tensor Product model transformation*) é uma técnica numérica que permite, dada uma representação qLPV de um sistema, encontrar uma representação convexa com características desejadas (Baranyi, 2004). Um ponto interessante dessa técnica é que ela permite fazer uma escolha entre a precisão e a complexidade do modelo (Petres et al., 2005).

A representação convexa encontrada é equivalente a um modelo fuzzy Takagi-Sugeno do sistema e, portanto, permite a utilização das técnicas de controle fuzzy.

2.2.1 Amostragem e Representação Tensorial

Considere um modelo qLPV de um sistema dado por:

$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u, \quad (8)$$

$$\Theta_{ij} = \begin{bmatrix} -\bar{A}_i R - R^T \bar{A}_i^T - \bar{B}_{u_i} S_j - S_j^T \bar{B}_{u_i}^T & * & * & * \\ R^T + P_i - \mu \bar{A}_i R - \mu \bar{B}_{u_i} S_j & \mu(R + R^T) & * & * \\ -\bar{B}_{w_i}^T & -\mu \bar{B}_{w_i}^T & -I & * \\ \bar{C}_i R & 0 & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \quad (6)$$

em que $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ e utilizam-se N componentes do vetor de estados como parâmetros das matrizes $A(x)$ e $B(x)$.

Define-se uma discretização do espaço de N parâmetros de forma que o número total de pontos amostrados seja igual a $N_1 N_2 \dots N_N$; em que N_i é o número de pontos de amostragem para o i -ésimo parâmetro. A partir dessa discretização define-se um tensor, $\mathcal{S}_d \in \mathbb{R}^{N_1 \times N_2 \times \dots \times N_N \times n \times (n+m)}$, que guarda as matrizes A e B amostradas correspondentes a cada ponto do grid.

2.2.2 HOSVD - Decomposição de Valores Singulares de Alta Ordem

Em seguida, utiliza-se uma HOSVD (*Higher Order Singular Value Decomposition*) (De Lathauwer et al., 2000) deste tensor de modo que pode-se escrevê-lo da forma:

$$\mathcal{S}_d = \mathcal{S} \otimes_{i=1}^N U_i. \quad (9)$$

Tal que o modelo qLPV, representado por \mathcal{S}_d , pode ser interpretado como a soma ponderada de vários modelos lineares. Neste caso, \mathcal{S} é um tensor guardando esses modelos lineares e U_i são matrizes de peso desses modelos, onde cada coluna das matrizes U_i , representada por u_j^i , representa uma função de peso relacionada com o parâmetro definido no grid de $1, \dots, N$.

Nesta etapa, a técnica permite que seja realizado um compromisso entre a complexidade do modelo (número de funções de peso) e a precisão da representação.

Quando não for necessária uma representação convexa do modelo, pode-se substituir as colunas das matrizes U_i por aproximações das funções sobre o grid de amostragem.

2.2.3 Representações convexas

No caso deste trabalho, a busca de uma representação convexa do modelo faz-se necessária. Pois esta pode ser vista como uma representação equivalente de um modelo fuzzy Takagi-Sugeno do sistema e permite que utilizemos as técnicas de controle fuzzy por modelo de referência.

Os trabalhos que utilizam a transformação do produto tensorial normalmente definem algumas propriedades para as representações convexas. As seguintes propriedades são utilizadas neste trabalho:

- **SN** (*Sum Normalization*): Uma matriz de pesos é dita ser de soma normalizada se a

soma de suas colunas, u_j^i , resulta em um vetor cujos componentes são todos iguais a um;

- **NN** (*Non Negativeness*): Uma matriz de pesos é dita não negativa se nenhum de seus elementos é negativo;
- **RNO** (*Relaxed Normality*): Uma matriz de pesos é dita normalizada relaxada se ela é SN, NN e:

$$\max(u_j^i) = \max(u_k^i), \forall j, k;$$

- **INO** (*Inverted Normality*): Uma matriz de pesos é dita normalizada inversa se ela é SN, NN e:

$$\min(u_j^i) = 0, \forall j.$$

Para que a representação considerada seja convexa (e, portanto, equivalente a um modelo fuzzy Takagi-Sugeno) bastam as propriedades **SN** e **NN**. No entanto, representações com propriedades adicionais podem apresentar melhores resultados quando utilizadas para a síntese de controladores (Baranyi et al., 2006). Neste trabalho optou-se por encontrar uma representação com todas as quatro propriedades acima.

As técnicas para a transformação das funções de peso, e com isso a transformação do tensor \mathcal{S} , podem ser encontradas em (Baranyi, 1999), para as propriedades **SN** e **NN**, e em (Varkonyi et al., 2005), para as propriedades **RNO** e **INO** juntamente.

Após encontrar uma representação convexa com as características desejadas, substituem-se as colunas das novas matrizes U_i por aproximações das funções sobre o grid de amostragem.

2.3 Linearização Jacobiana Modificada

A transformação do produto tensorial assume que existem um modelo qLPV para o sistema, porém, em alguns casos, a obtenção de tal modelo é uma tarefa não-trivial.

Sendo assim, propõe-se uma estratégia de modelagem um pouco diferente e algumas adaptações sobre a transformação do produto tensorial de modo a utilizar tal estratégia.

Considere um modelo não-linear da forma geral:

$$\dot{x} = f(x, u). \quad (10)$$

O seguinte procedimento é realizado durante a etapa de amostragem da transformação do produto tensorial:

- A cada amostragem monta-se um vetor de estados atual, x_p , composto pelos estados que estão sendo percorridos no grid e zeros nos estados livres (aqueles que não influenciam os parâmetros do modelo);
- Procura-se pelo par de equilíbrio (x^{eq}, u^{eq}) mais próximo ao ponto x_p e os estados livres de x_p são substituídos pelos seus equivalentes em x^{eq} ;
- Lineariza-se o sistema em torno do par (x_p, u^{eq}) . Como este não é necessariamente um ponto de equilíbrio, obtemos um modelo local afim do formato:

$$\dot{x} = A(x - x_p) + B(u - u^{eq}) + f(x_p, u^{eq}); \quad (11)$$

- Encontra-se a mudança de variáveis necessária para se linearizar este modelo afim resolvendo-se o sistema linear:

$$\begin{bmatrix} A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_u \end{bmatrix} = -f(x_p, u^{eq}); \quad (12)$$

- Chega-se em um modelo da forma:

$$\dot{x} = A(x - x_0) + B(u - u_0), \quad (13)$$

onde $x_0 = x_p + d_x$ e $u_0 = u^{eq} + d_u$;

- Utilizam-se as matrizes A e B para compor um tensor, \mathcal{S}_d e os vetores x_0 e u_0 para compor outro tensor, \mathcal{S}_{d0} .

Sobre cada um dos tensores, \mathcal{S}_d e \mathcal{S}_{d0} , a técnica do transformação do produto tensorial é aplicada separadamente.

Para o tensor \mathcal{S}_d , todos os passos da transformação são realizados de modo que encontra-se uma representação da forma:

$$\mathcal{S}_d = \mathcal{S} \otimes_{i=1}^N U_i.$$

sendo que o tensor \mathcal{S} armazena as matrizes A e B do sistema e as matrizes U_i , com as propriedades **SN**, **NN**, **RNO** e **INO**, armazenam as funções de pertinência do sistema.

Para o tensor \mathcal{S}_{d0} , apenas o passo da HOSVD é realizado e encontra-se uma representação da forma:

$$\mathcal{S}_{d0} = \mathcal{S}_0 \otimes_{i=1}^N P_i.$$

Em seguida as matrizes P_i são substituídas por funções interpoladas sobre o grid.

A utilização deste modelo para a síntese do controlador por meio do método explicado anteriormente, faz necessária a seguinte modificação na

ação de controle:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_0 \\ u_0 \end{bmatrix} &= \mathcal{S}_0 \otimes_{i=1}^N p_i(x) \\ u &= u_0 + \sum_{j=1}^r \beta_j [K_{1j}(x - x_0) \\ &\quad + K_{2j}(x_m - x_{m_0}) \\ &\quad + K_{3j} \int (y - y_m) dt + N_j(r - y_0)]. \end{aligned} \quad (14)$$

Em que $p_i(x)$ são as funções de peso encontradas para x_0 e u_0 , e y_0 e x_{m_0} são obtidos a partir das relações existentes entre x , x_m e y . Um exemplo de tal relação será explicitado na seção de aplicação da técnica.

3 Aplicação ao modelo do caça militar a jato

3.1 Modelo do F-16

O modelo utilizado neste trabalho é um modelo do movimento longitudinal de um F-16 com as equações representadas no sistema de coordenadas do vento (Stevens and Lewis, 2003). Para fins de simplificação, não foram consideradas perturbações atmosféricas nas equações.

No sistema de coordenadas do vento, o movimento de uma aeronave pode ser descrito por:

$$\begin{aligned} m\dot{V}_T &= F_T \cos(\alpha + \alpha_T) - D \\ &\quad - mg \sin(\theta - \alpha), \\ mV_T\dot{\alpha} &= -F_T \sin(\alpha + \alpha_T) - L \\ &\quad + mg \cos(\theta - \alpha) + mV_T q, \\ I_{yy}\dot{q} &= M_Y, \\ \dot{\theta} &= q, \\ \dot{h} &= V_T \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (15)$$

onde V_T é o módulo da velocidade da aeronave em relação à atmosfera, α é o ângulo que o vento relativo faz com o eixo de simetria da aeronave (ângulo de ataque), θ é o ângulo de arfagem, q é a velocidade angular de arfagem, h é a altitude, F_T é a força de tração, α_T é o ângulo da força de tração da aeronave em relação ao eixo de simetria, D é a força de arrasto, L é a força de sustentação, M_Y é o torque total sobre a aeronave em torno do eixo y , m é a massa da aeronave, g é a aceleração da gravidade e I_{yy} é o momento de inércia do corpo.

As forças e momentos aerodinâmicos são calculados a partir de tabelas de coeficientes adimensionais que são multiplicados pela pressão dinâmica ($1/2\rho V_T^2$) e pela área da asa da aeronave (e também pela corda média no caso do momento de arfagem) e resultam nas forças de arrasto, sustentação e no momento de arfagem. Tais tabelas foram retiradas do simulador de voo de código livre *FlightGear* (FlightGear, 2011).

3.2 Modelo Fuzzy

Para a obtenção do modelo fuzzy Takagi-Sugeno da Aeronave considerou-se que as variáveis v_t , α , θ e h são aquelas que influenciam a dinâmica da aeronave e discretizou-se o espaço formado por essas variáveis usando 11 subdivisões para cada uma. Considerou-se que $V_T \in [100, 160]$, $\alpha \in [-\pi/18, \pi/12]$, $\theta \in [-\pi/18, \pi/12]$ e $h \in [2000, 4100]$.

Aplicando as técnicas apresentadas anteriormente, encontrou-se um modelo fuzzy com 16 modelos lineares locais com as funções de pertinência apresentadas na Figura 1.

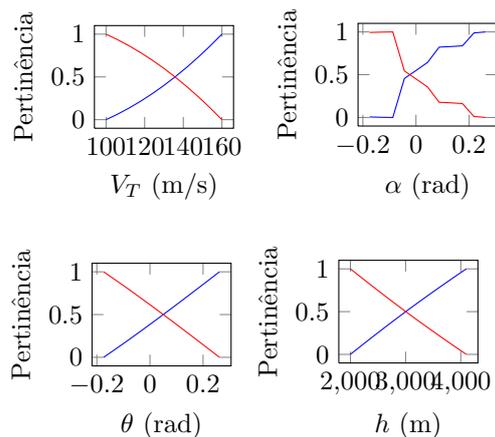


Figura 1: Funções de pertinência discretizadas

3.3 Controlador Encontrado

Tendo uma representação fuzzy Takagi-Sugeno da aeronave, o pacote YALMIP (Löfberg, 2004) foi utilizado para encontrar os ganhos do controlador. Considerou-se um modelo de referência com as matrizes de sistema $A_m = \begin{bmatrix} -0.2 & 0 \\ 0 & -0.2 \end{bmatrix}$, $B_m = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$ e $C_m = I_{2 \times 2}$. Tal modelo foi escolhido por representar um desacoplamento completo entre as malhas, impondo sobre elas uma dinâmica de primeira ordem.

Deste modo pode-se definir $x_{m0} = y_0$ e $y_0 = [v_{t0} \ h_0]^T$ e, então, utilizar a ação de controle apresentada na equação (14).

Utilizando tal lei de controle no modelo não-linear original da aeronave (considerando saturação da ação de controle), a resposta apresentada na Figura 2 foi obtida.

Como as únicas formas de controle consideradas aqui foram o comando de tração, δ_t , e a deflexão do profundor, δ_e , algumas restrições foram impostas sobre os sinais de referência do controlador. Sendo que a principal restrição imposta nesse caso foi a taxa de descida permitida à aeronave. Além disso, foram usados sinais referência

em rampa para evitar a saturação das variáveis manipuladas δ_e e δ_t .

É interessante notar que, durante todas as manobras realizadas, o controlador fez um uso muito maior do comando de tração do que da deflexão de profundor, mesmo para as manobras de mudança de altitude.

4 Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentada a aplicação de uma técnica de síntese de controladores multivariáveis não lineares ao controle longitudinal de um caça militar a jato. A técnica pode ser vista como a elaboração de um projeto de ganho-escalonado realizado de forma sistemática.

A estratégia de controle apresentada neste trabalho permite ao projetista especificar o desempenho desejado para a malha fechada de maneira simples. Além disso, a estratégia de modelagem apresentada permite fazer escolhas entre a simplicidade do modelo obtido (em termos do número de modelos locais necessários) e a precisão do modelo fuzzy encontrado, além de, em alguns casos, encontrar modelos com um número menor de regras do que as abordagens tradicionais.

Uma vez que não foram introduzidas restrições relativas às saturações das variáveis manipuladas no procedimento de otimização para determinação do controlador, foi adotada a estratégia de se limitar a taxa de variação dos sinais de referência de altitude e de velocidade.

Durante a realização deste trabalho, alterou-se a estratégia original de representação por modelos Takagi-Sugeno de forma a incorporar comportamentos lineares locais em torno de condições de não-equilíbrio.

Algumas futuras direções possíveis para continuidade deste trabalho são:

A síntese de controladores com ação *anti-windup*, de modo que a saturação da ação de controle do sistema tenha um efeito menor sobre seu desempenho; A síntese de controladores robustos; Uma estratégia de modelagem representativa, mas que resulte em um número reduzido de modelos.

Agradecimentos

O presente trabalho é financiado pelo CNPq.

Referências

- Baranyi, P. (1999). Reduction of fuzzy rule base via singular value decomposition, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 7(2): 120–132.
- Baranyi, P. (2004). TP model transformation as a way to LMI-based controller design, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 51(2): 387–400.

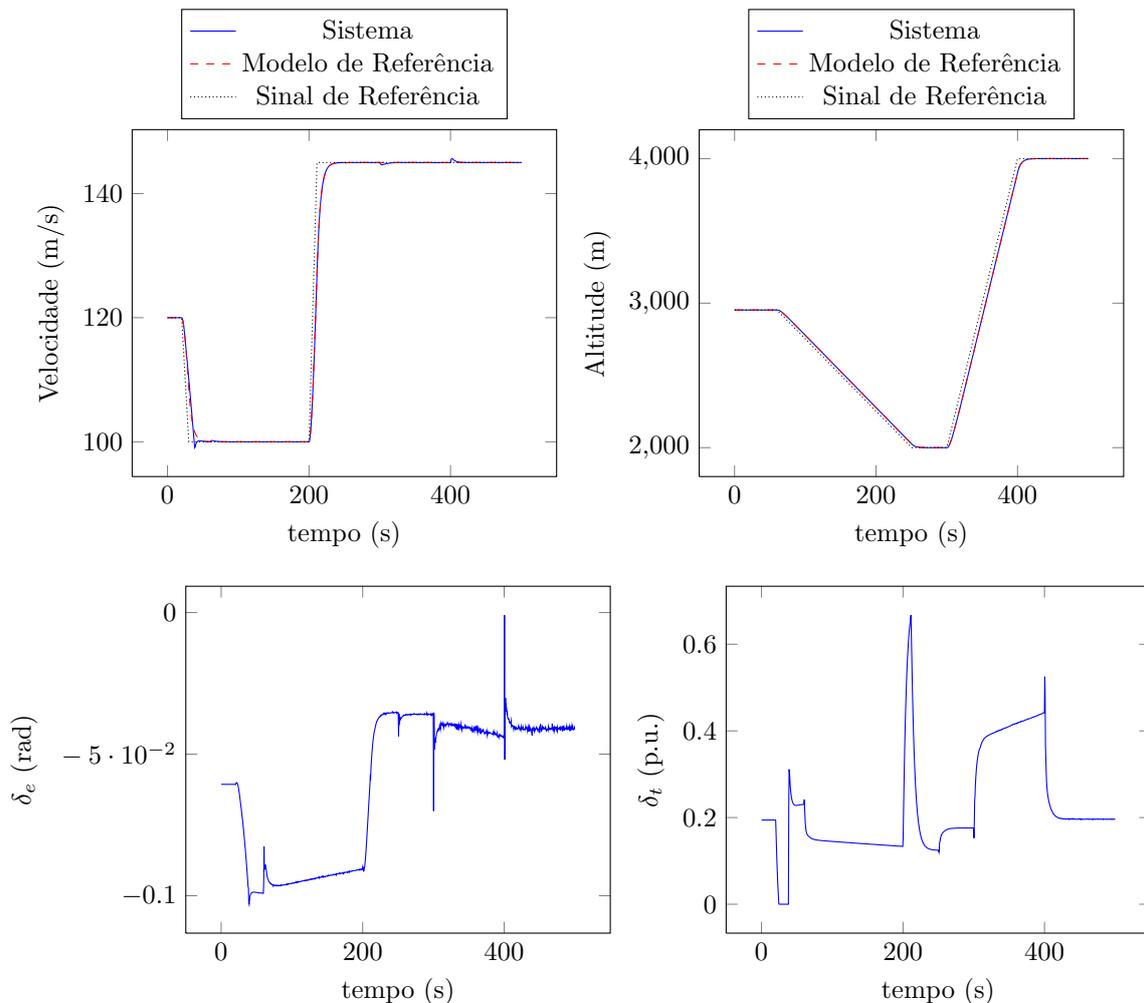


Figura 2: Resultados de simulação para controle de altitude e velocidade de um caça militar F-16. Gráficos na linha superior: (. . .) entrada para o modelo de referência; (- - -) saída do modelo de referência; (—) saída correspondente da aeronave. Gráficos na linha inferior: ações de controle correspondentes a deflexão de profundor δ_e e comando de tração δ_t .

Baranyi, P., Petres, Z., Várkonyi, P. L., Korondi, P. and Yam, Y. (2006). Determination of different polytopic models of the prototypical aeroelastic wing section by tp model transformation, *JACIII* **10**(4): 486–493.

De Lathauwer, L., De Moor, B. and Vandewalle, J. (2000). A Multilinear Singular Value Decomposition, *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications* **21**(4): 1253.

FlightGear (2011). Flight gear flight simulator, Site da Internet.

Löfberg, J. (2004). Yalmip : A toolbox for modeling and optimization in MATLAB, *Proceedings of the CACSD Conference*, Taipei, Taiwan.

Mozelli, L. A., Palhares, R. M. and Avellar, G. S. (2009). A systematic approach to improve multiple Lyapunov function stability and sta-

bilization conditions for fuzzy systems, *Information Sciences* **179**(8): 1149–1162.

Petres, Z., Baranyi, P., Kolonic, F. and Poljungan, A. (2005). Approximation Trade-off by TP Model Transformation, *6th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence*.

Stevens, B. L. and Lewis, F. L. (2003). *Aircraft Control and Simulation*, second edn, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Tanaka, K. and Wang, H. (2001). *Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach*, Wiley-Interscience.

Varkonyi, P., Tikk, D., Korondi, P. and Baranyi, P. (2005). A new algorithm for RNO-INO type tensor product model representation, *2005 IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, INES '05.*, IEEE, pp. 263–266.