

**CBA 2004 - XV Congresso Brasileiro de Automática**

**Centro de Convenções da UFRGS  
Gramado - RS • 21 a 24 de Setembro de 2004**

## Sobre o XV Congresso Brasileiro de Automática

---

O Congresso Brasileiro de Automática (CBA) é um congresso bianual promovido pela Sociedade Brasileira de Automática (SBA), afiliada brasileira da International Federation on Automatic Control (IFAC). O CBA é o maior e mais tradicional evento científico de sua área na América do Sul, já tendo sido realizado anteriormente em 14 oportunidades. A décima quinta edição do CBA - CBA2004 - realiza-se pela primeira vez no Rio Grande do Sul, na cidade de Gramado no período de 21 a 24 de Setembro de 2004 no Centro de Convenções da FAURGS. A organização desta edição do congresso ficou sob a responsabilidade do Grupo de Controle, Automação e Robótica (GCAR) do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRGS.

O CBA2004 recebeu o número recorde de 1.007 artigos, submetidos por mais de 800 autores distintos, o que representa um aumento de aproximadamente 38% com relação à sua edição anterior. A fim de agilizar o processo de submissão e revisão de artigos foi utilizado um sistema totalmente informatizado via internet.

Cada área temática do congresso foi colocada sob a responsabilidade de um ou mais membros do comitê de programa, conforme segue.

- Teoria de Controle:
  - Carlos Emanuel de Souza-LNCC
  - José Cláudio Geromel-UNICAMP
  - Liu Hsu-UFRJ
  - Oswaldo Luiz do Valle Costa-USP
  - Pedro Luis Dias Peres-UNICAMP
  - Rafael Santos Mendes-UNICAMP
- Controle de Processos:
  - Argimiro Resende Secchi-UFRGS
- Automação da Manufatura:
  - José Eduardo Ribeiro Cury-UFSC
  - José Reinaldo Silva-USP
- Sistemas Inteligentes:
  - Aldayr Dantas de Araújo-UFRN
  - Edson de Paula Ferreira-UFES
  - Fernando Antônio Campos Gomide-UNICAMP
  - Luis Pereira Calôba-UFRJ
  - Ricardo Tanscheit-PUC/RJ
- Protocolos e redes:
  - Carlos Eduardo Pereira-UFRGS
- Sistemas de Potência:
  - Antônio José Alves Simões Costa-UFSC
  - Glauco Nery Taranto-UFRJ
  - Luiz Danilo Barbosa Terra-PUC/MG
  - Sandoval Carneiro Jr.-UFRJ
  - Alexandre Sanfelice Bazanella-UFRGS

# O USO DE SISTEMAS DE CONTROLE FUZZY PARA ESTABILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA SUJEITOS A VARIAÇÕES ABRUPTAS E ALEATÓRIAS EM SUAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

NATACHE S. D. ARRIFANO, VILMA A. OLIVEIRA, RODRIGO A. RAMOS, NEWTON G. BRETAS

Depto Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo  
Cx Postal 359, 13560-970 São Carlos, SP

Emails: natachea@sel.eesc.usp.br, vilmao@sel.eesc.usp.br, randrade@sel.eesc.usp.br, ngbretas@sel.eesc.usp.br

**Abstract**— In this paper, a new stabilizing controller for power systems subject to random abrupt variations of the operating conditions is presented. It is considered that the random abrupt variations of operating conditions are caused by fluctuations in the local load patterns, which are described as Markovian jumps in the parameters of the power system. The proposed controller follows the standard structure which combines an automatic voltage regulator with a power system stabilizer. The stabilization is obtained with a fuzzy-model-based control technique formulated in terms of linear matrix inequalities with damping and control input constraints. To illustrate the effectiveness of the control design method proposed, simulation results on a single-machine infinite-bus model are presented and compared to the results of a classical power system stabilizer.

**Keywords**— Fuzzy Logic Control, Power System Stabilizers, Damping Controllers, Linear Matrix Inequalities, Power Systems, Markovian Jumps.

**Resumo**— Neste trabalho é apresentado um novo controlador estabilizante para sistemas de potência sujeitos a variações abruptas e aleatórias em suas condições de operação. Considera-se que as variações abruptas e aleatórias são causadas por mudanças nos padrões da carga local, que são descritas como saltos Markovianos nos parâmetros do sistema de potência. A unidade de controle consiste de um regulador de tensão automático coordenado com um controlador *fuzzy*. A estabilização estocástica é obtida com uma técnica de controle baseada em modelagem *fuzzy* que é formulada em termos de desigualdades matriciais lineares com restrições para reduzir amortecimento e limitar a entrada de controle de formas adequadas à operação do sistema. Visando ilustrar a eficiência da técnica de estabilização proposta, apresentam-se resultados de simulação em um sistema de potência máquina-barramento-infinito, os quais são comparados aos resultados obtidos com um estabilizador de sistema de potência clássico.

**Keywords**— Controle *fuzzy*, sistemas *fuzzy*, estabilizadores de sistema de potência, controladores de amortecimento, desigualdades matriciais lineares, sistemas de potência, saltos Markovianos.

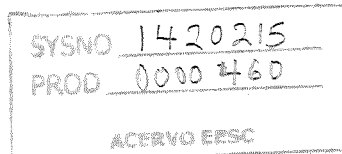
## 1 Introdução

Estabilizadores de sistema de potência (PSS's, do inglês *Power System Stabilizers*) têm sido considerados como uma maneira efetiva de enriquecer o amortecimento das oscilações eletromecânicas em sistemas elétricos de potência (SEP). Os PSS's foram desenvolvidos para estender os limites de estabilidade modulando a excitação do gerador de forma a produzir amortecimento adicional às oscilações dos rotores de máquinas síncronas (Larsen and Swann, 1981). Muitas técnicas de controle têm sido usadas para o projeto de PSS's, tais como, lugar das raízes e análise de sensibilidade (Larsen and Swann, 1981), controle adaptativo (Malik et al., 1986), posicionamento de pólos (Othman and Sanchez-Gasca, 1989) e controle robusto (Rao and Sen, 1999; Chuanjiang et al., 2003). O principal problema com estas técnicas é o fato de que a lei de controle está baseada em um modelo linearizado da máquina síncrona, sendo os parâmetros do controlador sintonizados para atender as condições de operação nominais do sistema. No caso de grandes distúrbios, as condições de operação do sistema podem mudar de maneira fortemente não-linear e, conseqüentemente, os parâmetros do controlador podem não ser mais válidos. Visando superar isto, a técnica de projeto de controle deve considerar as dinâmicas não-lineares do sistema de potência. Neste contexto, algumas soluções de controle para sistemas de potência foram propostas (Guo et al., 2000; Wang et al., 1997; Wang and Hill, 1996).

Recentemente, os controladores *fuzzy* (CF's) apareceram como uma ferramenta eficaz na estabiliza-

ção de sistemas de potência, reduzindo as oscilações eletromecânicas quando usados na unidade geradora coordenados com os reguladores de tensão automáticos (AVR's, do inglês *Automatic Voltage Regulators*) (Guo et al., 2001; Lie et al., 1995). Os CF's combinam conhecimentos quantitativos e qualitativos da operação do sistema seguindo alguma hierarquia. Basicamente, existem dois tipos de CF's: os CF's Mamdani (Mamdani and Assilan, 1975) e os CF's Takagi-Sugeno (Takagi and Sugeno, 1985). Ambos tipos de controladores são flexíveis na solução de controle, porém diferem no tipo de projeto. O projeto dos CF's Mamdani é heurístico pois é baseado no conhecimento de um especialista na operação do sistema, enquanto que o projeto dos CF's Takagi-Sugeno é mais sistemático pois está baseado em técnicas de projeto de controle robusto e não-linear já existentes, além de também utilizar o conhecimento da operação do sistema.

Neste trabalho, utiliza-se um novo tipo de CF para manter a estabilidade e reduzir as oscilações eletromecânicas de sistemas de potência sujeitos a variações abruptas e aleatórias em suas condições de operação causadas por variações nos padrões de cargas locais. O projeto deste CF utiliza o conhecimento das condições de operação nominais do sistema e das probabilidade de ocorrência das variações abruptas e aleatórias que são descritas como saltos Markovianos nos parâmetros do sistema de potência. Em adição, este projeto de CF emprega técnicas de controle *fuzzy* usando conceitos de estabilidade e estabilização estocástica que foram recentemente desenvolvidas e formuladas no contexto de



programação convexa via desigualdades matriciais lineares (LMI's, do inglês *Linear Matrix Inequalities*) com restrições para garantir o amortecimento e limitar a entrada de controle de formas adequadas à operação do sistema.

## 2 Modelagem do SEP

Considere o sistema de potência MBI em esquema de co-geração, como mostrado na Figura 1. As dinâmicas do sistema de potência MBI podem ser obtidas do modelo de Park clássico de uma máquina síncrona (Demello and Concordia, 1969) adotando condições balanceadas e desprezando as resistências dos enrolamento do estator e dos amortecedores, as tensões devidas às derivações do fluxo magnético, os efeitos de saturação e os desvios de frequência nos termos de tensão e velocidade da máquina síncrona. Em adição, a resistência da linha de transmissão é desprezada. Também, considere que a unidade de controle de geração consiste de um AVR coordenado a um PSS. Sob estas considerações, as dinâmicas do sistema de potência MBI são descritas por

$$\dot{\delta} = \omega_0 \omega \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} [P_m - E_q' I_q] \quad (2)$$

$$\dot{E}_q' = \frac{1}{\tau_{do}} [E_{fd} - E_q' + (x_d - x_d') I_d] \quad (3)$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_e} [K_e (V_{ref} - V_t + V_s) - E_{fd}] \quad (4)$$

onde  $V_t = (V_q^2 + V_d^2)^{1/2}$ ,  $V_q = E_q' + x_d' I_d$  e  $V_d = -x_d' I_q$ , com  $\delta$  o ângulo de potência do gerador [rad],  $\omega$  a velocidade do rotor do gerador [rad/s],  $\omega_0$  a velocidade da máquina síncrona [rad/s],  $P_m$  a potência mecânica de entrada [p.u.],  $E_q'$  a FEM transitória no eixo em quadratura do gerador [p.u.],  $E_{fd}$  a FEM equivalente no núcleo de excitação [p.u.],  $I_q$  a corrente no eixo em quadratura [p.u.],  $I_d$  a corrente no eixo direto [p.u.],  $V_q$  a tensão no eixo em quadratura [p.u.],  $V_d$  a tensão no eixo direto [p.u.],  $H$  a constante de inércia [p.u.],  $\tau_{do}$  a constante de tempo do transitório no eixo direto do circuito aberto [s],  $T_e$  a constante de tempo do AVR [s],  $K_e$  o ganho do AVR,  $V_{ref}$  a tensão de referência do AVR [p.u.],  $V_t$  a tensão terminal do gerador [p.u.],  $V_s$  a tensão do PSS [p.u.],  $V_\infty$  a tensão no barramento-infinito [p.u.],  $x_d$  a reatância transitória no eixo direto [p.u.],  $x_d'$  a reatância no eixo direto [p.u.] e  $x_e$  a reatância equivalente do circuito externo [p.u.]. As correntes  $I_q$  e  $I_d$  são obtidas considerando os efeitos de variações abruptas e aleatórias nas condições (ou nos modos) de operação do sistema.

Suponha que diferentes cargas acopladas ao barramento de cargas podem estar ativas ou não durante um período de operação do sistema de potência MBI. As variações neste barramento afetam os modos de operação do sistema. Nestas condições, a frequência de ocorrência de cada carga no barramento pode ser determinada e, então, os modos de operação do sistema podem ser divididos de acordo com a carga que este supre. Esta modelagem é bastante adequada para descrição, por exemplo, de plantas de potência industriais em esquema de co-geração, onde a potência excedente pode ser enviada

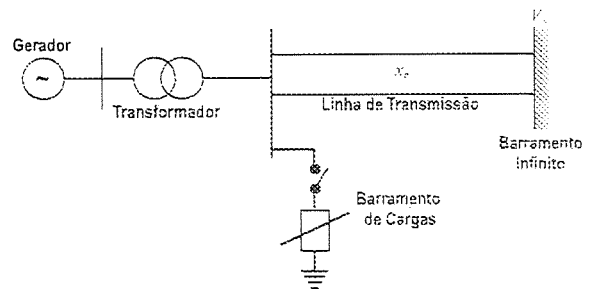


Figura 1: Diagrama unifilar do sistema de potência MBI.

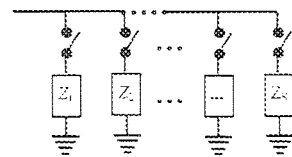


Figura 2: Configuração do barramento de cargas.

ao sistema global. Neste caso, a solução de controle deverá manter a estabilidade do sistema durante a ocorrência das variações das cargas além de reduzir as oscilações eletromecânicas para garantir a eficiência da operação. A Figura 2 ilustra a configuração adotada para o barramento de cargas do sistema.

Considere o conjunto finito  $\mathbb{S} = \{1, 2, \dots, N\}$  como o conjunto dos modos de operação do sistema de potência MBI em esquema de co-geração, com  $N$  o número destes modos. Também, considere que as variações de carga são governadas por um processo estocástico  $\{r\}$  que é um processo de Markov de modos-finitos, assumindo valores no conjunto  $\mathbb{S}$  com probabilidade de transição de um modo  $i$  para um modo  $j$ ,  $i, j \in \mathbb{S}$  dada por

$$\Pr\{r(t + \Delta) = j | r(t) = i\} :=$$

$$\begin{cases} \pi_{ij}\Delta + o(\Delta), & i \neq j \\ 1 - \pi_i\Delta + o(\Delta), & i = j \end{cases} \quad (5)$$

onde  $\Delta > 0$ ,  $\lim_{\Delta \rightarrow 0} o(\Delta)\Delta^{-1} = 0$ ,  $\pi_{ij} \geq 0$  é a taxa de probabilidade entre os modos  $i$  e  $j$ , para  $i \neq j$ ,  $i, j \in \mathbb{S}$  e  $\forall i \in \mathbb{S}$ ,  $\pi_i := -\pi_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \pi_{ij}$ . A matriz  $\Pi := [\pi_{ij}]$  é chamada de matriz de taxas de transição. Considera-se que o processo de Markov  $\{r\}$  tenha distribuição estacionária  $\mu := (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$ , com  $\mu_i := \Pr\{r_0 = i\}$  e que  $r_0 := r(0)$  é uma condição inicial não-aleatória. Supõe-se que os instantes de ativação e desativação de cargas sejam conhecidos. A Figura 3 ilustra a transição entre os modos de operação do sistema de potência de acordo com as variações de carga adotada.

Agora, considere que o sistema de potência MBI

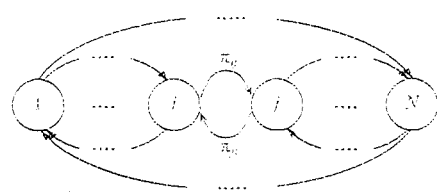


Figura 3: Modos de transição do sistema.

em esquema de co-geração supre duas cargas diferentes:  $Z_1 = R_1 + jX_1$  e  $Z_2 = R_2 + jX_2$ , com  $R_1$  e  $R_2$  as resistências em p.u. e  $X_1$  e  $X_2$  as reatâncias em p.u. Deste modo, é possível determinar as correntes  $I_q$  e  $I_d$  como

$$I_q = K_{1q} \cos \delta + K_{2q} \sin \delta + K_{3q} E'_q \quad (6)$$

$$I_d = K_{1d} \cos \delta + K_{2d} \sin \delta + K_{3d} E'_q \quad (7)$$

onde  $K_{1q}$ ,  $K_{2q}$ ,  $K_{3q}$ ,  $K_{1d}$ ,  $K_{2d}$  e  $K_{3d}$  são parâmetros que variam de acordo com a carga equivalente no barramento de cargas do sistema. As condições de operação do sistema de potência de acordo com as variações de carga são modeladas como uma cadeia de Markov com três diferentes modos de transição ( $N = 3$ ), que correspondem às possíveis combinações entre as cargas  $Z_1$  e  $Z_2$ : modo 1 - somente carga  $Z_1$ , modo 2 - somente carga  $Z_2$  e modo 3 - ambas cargas  $Z_1$  e  $Z_2$ , cuja carga equivalente é dada por  $Z_{eq} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$ . Supõe-se que o sistema operando nas condições nominais é descrito pelo modo 3, porém, durante um período de tempo, as dinâmicas do sistema podem ser alteradas seguindo o processo de Markov  $\{r\}$  com os seguintes parâmetros

$$\mu = (0.30, 0.20, 0.50)$$

e

$$\Pi = \begin{bmatrix} -2.12 & 0.85 & 1.27 \\ 1.27 & -2.20 & 0.93 \\ 0.76 & 1.64 & -2.40 \end{bmatrix}.$$

A distribuição inicial  $\mu$  e a matriz de taxas de transição  $\Pi$  do processo de Markov são parâmetros que podem ser estimados de um banco de dados da operação do sistema de potência. Logo, quanto maior o banco de dados da operação do sistema, mais confiável é a estimativa destes parâmetros. Os valores numéricos dos parâmetros físicos do sistema de potência adotados são:  $\omega_0 = 377$ ,  $H = 5$ ,  $P_m = 1$ ,  $\tau_{do} = 6$ ,  $T_e = 0.01$ ,  $K_e = 100$ ,  $V_\infty = 0.89 \angle 0$ ,  $x'_d = 0.32$ ,  $x_d = 1.60$ ,  $x_e = 0.40$ ,  $R_1 = -4.5$ ,  $R_2 = -3.0$ ,  $X_1 = 6.5$  e  $X_2 = 4.3$ . A Tabela 1 contém os valores dos parâmetros  $K_{1q}$ ,  $K_{2q}$ ,  $K_{3q}$ ,  $K_{1d}$ ,  $K_{2d}$ ,  $K_{3d}$  e  $V_{ref}$  calculados para cada modo de operação. Considera-se que em condições de operação nominais do sistema de potência MBI, o ângulo de potência é mantido na faixa  $\delta \cong 0.7328 \pm 10\%$  rad que assegura uma potência ativa na faixa  $P = 1.0 \pm 10\%$  p.u. e a potência reativa de acordo com as condições de operação assumidas (por exemplo, para o sistema sem carga  $Q = 0.5$ ). Na literatura de sistemas de controle, o sistema de potência MBI apresentado pode ser reconhecido como um exemplo típico de sistemas não-lineares com saltos Markovianos (Mariton, 1990), uma classe de sistemas híbridos com diferentes modos de operação governados pelo processo de Markov  $\{r\}$ .

### 3 Sistemas de Controle Fuzzy

O tipo de CF usado neste trabalho considera uma abordagem não local que é conceitualmente simples e direta, seguindo a teoria dos sistemas *fuzzy* Takagi-Sugeno (TS) onde técnicas de controle lineares com realimentação de estado podem ser utilizadas. Usualmente, os sistemas *fuzzy* TS são usados para aproximar sistemas não-lineares através de uma interpolação *fuzzy* de subsistemas lineares locais. De fato, pode ser provado que os

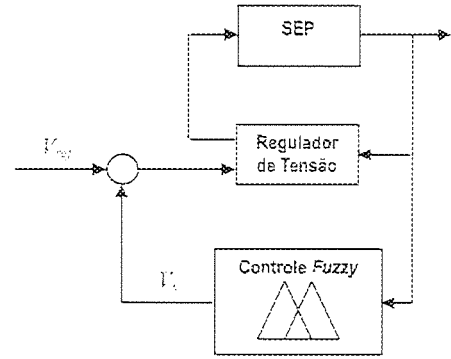


Figura 4: Diagrama em blocos do sistema de controle.

sistemas *fuzzy* TS são aproximadores universais (Tanaka and Wang, 2001). Neste contexto, o projeto de controle está baseado na aproximação *fuzzy* do sistema não-linear via a assim chamada compensação distribuída paralela (CDP), onde uma lei de controle linear com realimentação de estado é projetada para compensar cada subsistema linear local. O controlador *fuzzy* resultante também consiste de uma interpolação *fuzzy* destes controladores lineares locais, que é não-linear em geral. Neste trabalho, as dinâmicas não-lineares do sistema de potência MBI em esquema de co-geração são aproximadas por uma nova modelagem *fuzzy* a qual é utilizada na obtenção de um CF (Arrifano and Oliveira, 2004). Este CF é então coordenado a um AVR para reduzir as oscilações eletromecânicas e manter a estabilidade do sistema diante das variações abruptas e aleatórias das cargas. A Figura 4 mostra o diagrama em blocos do sistema de controle usando o CF proposto.

#### 3.1 Modelagem Fuzzy

Adotando  $x = [\delta, \omega, E'_q, E'_{fd}]^T$  como o vetor das variáveis de estado e  $u = V_s$  como o vetor de entrada, modela-se o sistema de potência MBI com  $N$  modos na seguinte representação espaço de estado

$$\dot{x} = f(x, u, r); \quad x_0 = x(0); \quad r_0 = r(0) \quad (8)$$

onde  $f(\cdot, \cdot, \cdot)$  é um vetor de funções não-lineares suaves em relação ao primeiro e ao segundo argumentos,  $x_0$  é o estado inicial que, por simplicidade, é um vetor constante não aleatório e  $r_0$  é o modo de operação inicial do sistema de potência.

O sistema *fuzzy* usado na representação do sistema (8) tem dois níveis em sua estrutura, um representando o processo de saltos Markovianos  $\{r\}$  e o outro representando as não-linearidades nas variáveis de estado

Tabela 1: Parâmetros do sistema de potência para diferentes condições de operação.

Modo	$K_{1q}$	$K_{2q}$	$K_{3q}$	$K_{1d}$	$K_{2d}$	$K_{3d}$	$V_{ref}$
1	-0.02	1.22	-0.02	1.22	0.02	-1.42	1.05
2	-0.02	1.21	-0.03	1.21	0.02	-1.44	1.07
3	-0.04	1.19	-0.05	1.19	0.04	-1.47	1.11

$x$  e é dado por

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \hat{f}(x, u, r) \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^R m_i(r) n_{ij}(x) (A_{ij}x + B_{ij}u) \end{aligned} \quad (9)$$

onde  $A_{ij}$  e  $B_{ij}$ ,  $i \in \mathbb{S}$ ,  $j = 1, 2, \dots, R$  são matrizes de dimensões apropriadas que descrevem as representações lineares locais das não-linearidades no estado do sistema (8) com

$$m_i(r) = \frac{M_i(r)}{\sum_{i=1}^N M_i(r)} \quad (10)$$

e

$$n_{ij}(x) = \frac{\prod_{k=1}^n N_{ijk}(x_k)}{\sum_{i=1}^R \prod_{k=1}^n N_{ik}(x_k)} \quad (11)$$

as funções indicadora de modo e de pertinência normalizada, respectivamente.  $M_i(r) \in \{0, 1\}$  é a grade de pertinência de  $r$  em um conjunto ordinário  $M_i$  e  $N_{ijk}(x_k) \in [0, 1]$  é a grade de pertinência de  $x_k$  em um conjunto fuzzy  $N_{ijk}$ . Neste trabalho, considera-se que as funções características  $m_i(\cdot)$ ,  $i = 1, 2, 3$  são funções definidas no conjunto  $\{0, 1\}$  representando os modos de operação do sistema de potência MBI em esquema de co-geração de forma que  $m_i(r) = 1$ , quando  $r = i$  e  $m_i(r) = 0$ , caso contrário. As funções de pertinência  $n_{ij}(\cdot)$ ,  $j = 1, 2$ , definidas no intervalo  $[0, 1]$  são escolhidas dentre as funções disponíveis no *Matlab* para representar as faixas das variáveis de estado  $x_1$  e  $x_3$  em cada modo, como mostradas na Figura 5.

Considerando  $\delta \approx 0.7328 \pm 10\%$  rad, pode-se obter duas aproximações lineares locais em cada modo  $i$  através da fórmula de linearização apresentada em Teixeira and Zak (1999), ou seja, obter as matrizes  $(A_{ij}, B_{ij})$ ,  $i = 1, 2, 3$ ,  $j = 1, 2$  em torno dos seguintes pontos de linearização  $\bar{x}$ : modo 1 -  $\bar{x}_{R=1} = [0.58, 0, 1.59, 3.18]^T$  e  $\bar{x}_{R=2} = [0.88, 0, 1.10, 2.10]^T$ , modo 2 -  $\bar{x}_{R=1} = [0.58, 0, 1.68, 3.45]^T$  e  $\bar{x}_{R=2} = [0.88, 0, 1.14, 2.21]^T$  e modo 3 -  $\bar{x}_{R=1} = [0.58, 0, 1.88, 4.13]^T$  e  $\bar{x}_{R=2} = [0.88, 0, 1.20, 2.46]^T$ .

Na modelagem adotada, o erro de aproximação  $\epsilon = f(x, u, i) - \hat{f}(x, u, i)$  em cada modo  $i$  pode ser reduzido considerando um número suficiente de aproximações lineares locais ou escolhendo funções de pertinência em regiões do subespaço que representem melhor as dinâmicas do sistema não-linear sob variações abruptas.

### 3.2 Projeto de CF

O CF compartilha a mesma estrutura do sistema fuzzy (9), ou seja,

$$u = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^R m_i(r) n_{ij}(x) F_{ij}x \quad (12)$$

onde  $F_{ij}$ ,  $i \in \mathbb{S}$ ,  $j = 1, 2, \dots, R$  são vetores de ganhos de realimentação de estado de dimensões apropriadas. Substituindo (12) em (9), o sistema fuzzy com realimentação de estado é obtido como segue

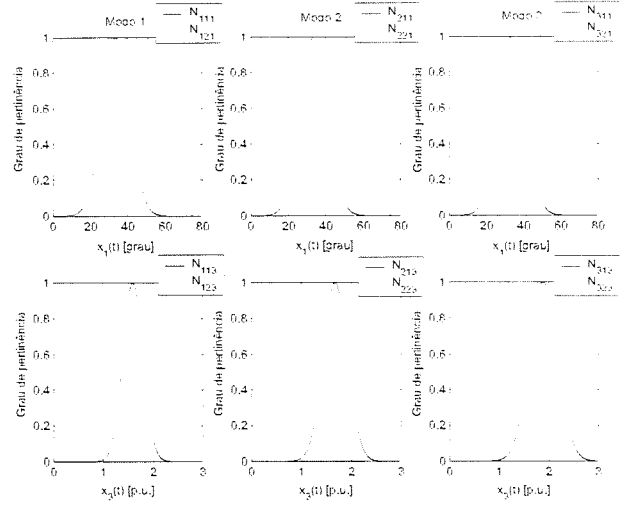


Figura 5: Funções de pertinência adotadas.

$\dot{x} =$

$$\sum_{i=1}^N m_i(r) \left[ \sum_{j=1}^R n_{ij}^2(x) G_{ij} + \sum_{j < k}^R n_{ij}(x) n_{ik}(x) H_{ijk} \right] x \quad (13)$$

com  $G_{ij} = A_{ij} - B_{ij}F_{ij}$  e  $H_{ijk} = A_{ij} - B_{ij}F_{ik} + A_{ik} - B_{ik}F_{ij}$ ,  $i \in \mathbb{S}$ ,  $j, k = 1, 2, \dots, R$ . Em (13), o termo  $\sum_{j < k}^R$  denota, por exemplo para  $R = 3$ ,  $\sum_{j < k}^3 a_{jk} \Leftrightarrow a_{12} + a_{13} + a_{23}$ .

Usando o conceito de estabilidade estocástica e uma função de Lyapunov acoplada candidata do tipo  $V(x, i) = x^T P_i x$ , com  $P_i$  uma matriz simétrica positiva definida de dimensões apropriadas, pode-se construir o seguinte problema convexo usando LMT's para obtenção dos vetores  $F_{ij}$ , para  $i \in \mathbb{S}$  e  $j = 1, 2, \dots, R$ . Neste projeto de controle, incluem-se os seguintes índices de desempenho: taxa de decaimento para reduzir as oscilações da resposta e restrição na estado de controle para garantir as condições de operação do sistema MBI em esquema de co-geração. Mais detalhes deste tipo de projeto podem ser encontrados em Arrifano and Oliveira (2004). Resultados com o uso deste tipo de projeto de controle na estabilização de um sistema de potência em esquema de co-geração com cargas puramente reativas são apresentados em Arrifano et al. (2004).

**Problema 1** Dados  $\alpha_i$  e  $\gamma_i$ ,  $i \in \mathbb{S}$ , encontrar um conjunto de matrizes simétricas positivas definidas  $X_i$  e um conjunto de matrizes  $Y_{ij}$  de dimensões apropriadas satisfazendo as seguintes LMT's  $\forall i \in \mathbb{S}$

$$\begin{bmatrix} T_{ij} & Z_i \\ Z_i^T & -W_i \end{bmatrix} < -2\alpha_i \begin{bmatrix} X_i & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad j = 1, 2, \dots, R \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} U_{ijk} & Z_i \\ Z_i^T & -W_i \end{bmatrix} < -2\alpha_i \begin{bmatrix} X_i & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad j < k; j, k = 1, 2, \dots, R \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_0^T \\ x_0 & X_i \end{bmatrix} \geq 0; \quad (16)$$

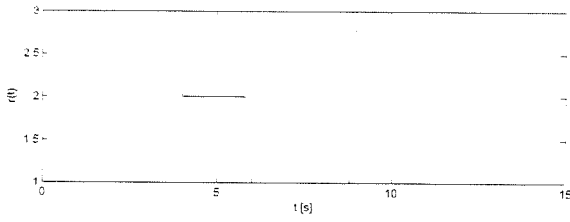


Figura 6: Variação das cargas durante um período de operação do sistema de potência MBI.

$$\begin{bmatrix} X_i & Y_{ij}^T \\ Y_{ij} & \gamma_i I \end{bmatrix} \geq 0; \quad j = 1, 2, \dots, R \quad (17)$$

onde  $T_{ij} := X_i A_{ij}^T + A_{ij} X_i - Y_{ij}^T B_{ij}^T - B_{ij} Y_{ij} - \pi_i X_i$ ,  $U_{ijk} := X_i A_{ij}^T + A_{ij} X_i - Y_{ik}^T B_{ij}^T - B_{ij} Y_{ik} + X_i A_{ik}^T + A_{ik} X_i - Y_{ij}^T B_{ik}^T - B_{ik} Y_{ij} - \pi_i X_i$ ,  $Z_i := \begin{bmatrix} \pi_i^{1/2} X_i & \dots & \pi_{i+1}^{1/2} X_i & \pi_{i+1}^{1/2} X_i & \dots & \pi_N^{1/2} X_i \end{bmatrix}$ ,  $W_i := \text{diag} \{ X_1 \dots X_{i-1} \ X_{i+1} \dots X_N \}$ ,  $X_i := P_i^{-1}$  e  $Y_{ij} := F_{ij} X_i$ .

#### 4 Resultados de Simulação

Visando testar a eficiência do CF usado para a estabilização do sistema de potência MBI em esquema de co-geração, a solução do Problema 1 de projeto de controle foi obtida usando o módulo LMI do Matlab com as seguintes especificações: taxas de decaimento  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0.1$ , restrições na entrada de controle  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 2$  e condições iniciais  $x_0 = [0.7328, -0.001, 1.4420, 2.9903]^T$  e  $r_0 = 3$ . Como antes mencionado, considera-se que as condições de operação nominais do sistema de potência MBI são dadas pelo modo 3:  $\delta = 0.7328$  rad ( $\approx 42^\circ$ ),  $P = 1.0$  p.u. e  $Q = 1.12$  p.u. Com  $\mu$  e  $\Pi$  previamente definidos, usa-se o programa disponível em (Waner and Costenoble, 2002) para simular as transições entre os modos de operação do sistema de potência. A Figura 6 mostra as mudanças de carga durante um período de operação dos sistema. A Tabela 2 apresenta os resultados do projeto de controle. Comparam-se os resultados obtidos com o uso do CF no sistema de potência MBI com os resultados obtidos da utilização de um PSS clássico sintonizado de acordo com Larsen and Swann (1981). Além desta comparação, também são mostrados os resultados do uso do CF no sistema *fuzzy* construído para representar as dinâmicas do sistema de potência MBI. As Figuras 7 e 8 mostram as principais curvas obtidas.

Note que o erro de aproximação  $\epsilon$  é pequeno e pode ainda ser reduzido considerando um número maior de representações lineares locais ou outros tipos de funções de pertinência, como antes mencionado. O uso dos índices de desempenho, taxa de decaimento e restrição na entrada de controle, reduz as oscilações nas variáveis de estado  $x$  e na entrada de controle  $u$ . A vantagem de representar o sistema de potência MBI como um sistema com saltos Markovianos pode ser claramente observada, por exemplo, considera-se uma descrição mais refinada das variações do barramento de cargas do sistema. O uso desta informação produz condições menos conser-

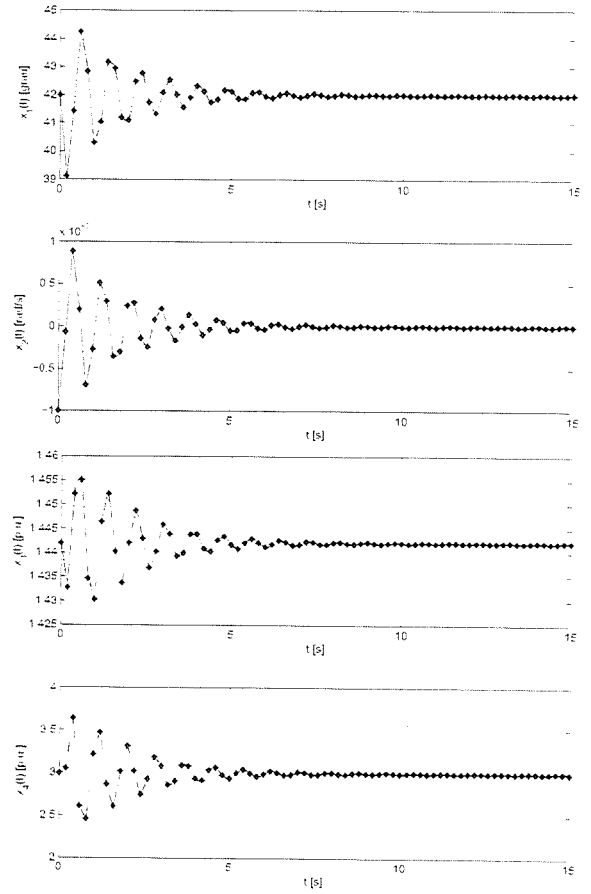


Figura 7: Variáveis de estado: ‘—’ sistema de potência MBI com CF, ‘...’ sistema de potência MBI com PSS clássico e ‘-o-’ sistema *fuzzy* com CF.

vadoras para a estabilidade usando controladores que produzem melhor desempenho no sistema. Um outro aspecto importante desta análise é a respeito da estabilidade do sistema. Usando as técnicas de projeto de controle convencionais, o sistema de potência deve ser estável para todas as variações das condições de operação, enquanto que no sentido da estabilidade estocástica, a estabilidade para todos os modos de operação nem sempre é requerida. Neste caso, a estabilidade em cada modo é dada em termos das matrizes  $(A_{ij}, B_{ij}, \Pi)$ ,  $\forall i \in \mathbb{S}$  e  $j = 1, 2, \dots, R$ , i.e., a estabilidade em cada modo do sistema de potência é verificada sempre que  $\text{Re}\{\lambda[A_{ij} - \frac{1}{2}\pi_i I]\} < 0$ ,  $\pi_i > 0$ , enquanto nas técnicas de projeto de controle convencionais, a estabilidade em cada modo é verificada somente se  $\text{Re}\{\lambda[A_{ij}]\} < 0$ .

Tabela 2: Resultados do projeto de controle.

Modo	Ganhos de realimentação de estado				
1	$F_{11} =$	-0.1555	5.0593	0.2254	0.0051
	$F_{12} =$	-0.1792	3.8680	0.2356	0.0052
2	$F_{21} =$	-0.1567	5.3830	0.2097	0.0049
	$F_{22} =$	-0.1802	4.0214	0.2237	0.0051
3	$F_{31} =$	-0.1734	2.0409	0.4305	0.0086
	$F_{32} =$	-0.1949	0.5386	0.4530	0.0091

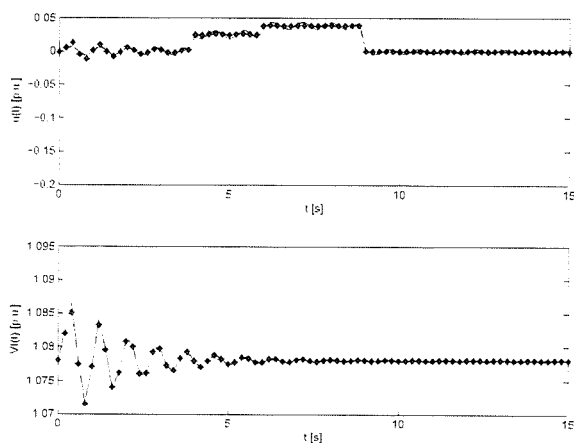


Figura 8: Entrada de controle e tensão terminal: ‘—’ sistema de potência MBI com CF, ‘...’ sistema de potência MBI com PSS clássico e ‘-◇-’ sistema *fuzzy* com CF.

## 5 Conclusão

O CF usado neste trabalho para estabilização do sistema de potência considerado mostra-se muito eficiente no amortecimento das oscilações eletromecânicas. Os resultados de simulação para ambos CF e PSS clássico mostram que a técnica de projeto de CF formulada em termos de LMI’s alcança melhor desempenho em relação ao amortecimento frente a variações abruptas e aleatórias devido a mudanças de carga no sistema. Mais além, o projeto do CF é mais flexível visto que usa conhecimentos da operação do sistema. Futuros trabalhos incluem o desenvolvimento de um CF com realimentação dinâmica para considerar informação incompleta do estado de um sistema.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Eng. Ricardo Vasques de Oliveira pelos resultados de estabilização com o PSS clássico. Este trabalho foi financiado pela Fundação do Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) proc. n° 00/05060-1.

## Referências

Arrifano, N. S. D. and Oliveira, V. A. (2004). State feedback fuzzy-model-based control for Markovian jump nonlinear systems. *SBA - Controle & Automação* **15**(3).

Arrifano, N. S. D., Oliveira, V. A., Ramos, R. A. and Bretas, N. G. (2004). Design and application of fuzzy pss for power systems subject to random abrupt variations of the load. *American Control Conference 2004 Proc.*

Chuanjiang, Z., Khammash, M., Vittal, V. and Qiu, W. (2003). Robust power system stabilizer design using  $H_\infty$  loop shaping approach. *IEEE Trans. Power Systems* **18**(2): 810–818.

Demello, F. P. and Concordia, C. (1969). Concept of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems* **PAS-88**(4): 316–329.

Guo, Y., Hill, D. J. and Wang, Y. (2000). Nonlinear decentralized control of large-scale power systems. *Automatica* **36**: 1275–1289.

Guo, Y., Hill, D. J. and Wang, Y. (2001). Global transient stability and voltage regulation for power systems. *IEEE Trans. Power Systems* **16**(4): 678–688.

Larsen, E. V. and Swann, D. A. (1981). Applying power system stabilizers. P-III. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems* **PAS-100**: 3017–3046.

Lie, T. T., Shrestha, G. B. and Ghosh, A. (1995). Design and application of a fuzzy logic control scheme for transient stability enhancement in power systems. *Electric Power Systems Research* **33**: 17–23.

Malik, O. P., Hope, G. S., Gorski, Y. M., Ushakov, V. A. and Rackevich, A. L. (1986). Experimental studies on adaptive microprocessor stabilizers for synchronous generators. *IFAC Power System and Power Plant Control*, pp. 125–130.

Mamdani, E. H. and Assilan, S. (1975). An experiment in linguistic systems with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man Machine Studies* **7**(1): 1–13.

Mariton, M. (1990). *Jump linear systems in automatic control*. New York: Marcel Dekker.

Othman, H. and Sanchez-Gasca, J. J. (1989). On the design of robust power system stabilizers. *Proc. 28th. Conf. Decision and Control*, pp. 1853–1857.

Rao, P. S. and Sen, I. (1999). Robust tuning of power system stabilizers using QFT. *IEEE Trans. Control System Technology* **7**: 478–486.

Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetic* **15**(1): 116–132.

Tanaka, K. and Wang, H. O. (2001). *Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach*. New York: John Wiley and Sons.

Teixeira, M. C. M. and Žak, S. H. (1999). Stabilizing controller design for uncertain nonlinear systems using fuzzy models. *IEEE Trans. Fuzzy Systems* **15**(1): 116–132.

Waner, S. and Costenoble, S. R. (2002). Markov system simulation. <http://people.hofstra.edu/faculty/StefanWaner/RealWorld/markov/markov>.

Wang, Y., Guo, G. and Hill, D. J. (1997). Robust decentralized nonlinear controller design for multimachine power systems. *Automatica* **33**(9): 1725–1733.

Wang, Y. and Hill, D. J. (1996). Robust nonlinear coordinated control of power systems. *Automatica* **32**(4): 611–618.