

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO E CONTROLE LPV AO AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS EM UM SISTEMA MICROGERADOR

FABRÍCIO G. NOGUEIRA¹, WALTER BARRA JUNIOR², JOSÉ A. L. BARREIROS², JÂNIO J. DE LANA³

1. *Depto de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE*
E-mail: fnoqueira@dee.ufc.br

2. *Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA*
E-mails: walbarra@ufpa.br, barreiro@ufpa.br

3. *Depto. de Eletro-eletrônica, Eletrobrás-Eletronorte, Usina Hidrelétrica de Tucuruí, Tucuruí - PA*
E-mail: janio.lana@eletronorte.gov.br

Abstract— In this paper is presented an experimental investigation of a LPV (linear parameter varying) control strategy applied to the damp of electromechanical oscillations in a 10kVA electric power system, which is configured as a single machine connected to an infinite bus. The coefficients of the LPV damping controller have directly dependency with the values of the terminal active power (P) of the generating unit, which represents the system operating condition of the system. For control ends, the dynamics of the plant was represented by an ARX LPV model, which was estimated from experimental data collected in the plant for a wide range of operating conditions. From the LPV model of the plant, the values of the parameters of the LPV controller were determined via an optimization problem, in the form of a parameterized LMI (PLMI). The LPV PSS was designed to ensure stability and performance for a wide range of operating conditions of the plant, which is generally not possible to obtain with conventional fixed parameter controllers.

Keywords – LPV robust control, LPV system identification, parameterized linear matrix inequalities, power system stabilizer.

Resumo— Neste artigo é apresentada a investigação experimental de uma estratégia de controle LPV (do inglês, *linear parameter varying*) aplicada ao amortecimento de oscilações eletromecânicas em um sistema de potência em escala reduzida de 10kVA, cuja configuração é do tipo máquina interligada a uma barra infinita. Os coeficientes do controlador amortecedor LPV são funções com dependência no valor da potência ativa (P) nos terminais da unidade geradora, variável que representa a condição operacional do sistema. Para fins de projeto, a dinâmica da planta foi representada através de um modelo ARX LPV, o qual foi estimado a partir de dados coletados experimentalmente na planta, para uma ampla faixa de condições operacionais. A partir do modelo LPV da planta, os valores dos parâmetros do ESP LPV foram determinados via um problema de otimização convexa, na forma de uma LMI parametrizada (PLMI). O ESP LPV foi projetado de modo a garantir a estabilidade e o desempenho do sistema para uma ampla faixa de condições operacionais da planta, o que geralmente não é possível de obter com controladores convencionais a parâmetros fixos.

Palavras-chave – Controle Robusto LPV, Identificação de sistemas LPV, LMI parametrizada, estabilizadores de sistemas de potência.

1 Introdução

A perda de sintonia de controladores em sistemas elétricos de potência quando sujeitos a variações dinâmicas é um tema bastante estudado ao longo dos últimos anos. A análise da estabilidade eletromecânica, por exemplo, é uma área na qual este problema vem sendo tratado a partir da aplicação de técnicas de controle robusto, adaptativo, preditivo, dentre outras.

O amortecimento adequado de oscilações eletromecânicas é de vital importância para a operação segura do sistema elétrico. O aumento do amortecimento das oscilações eletromecânicas é geralmente realizado através de controladores amortecedores do tipo estabilizadores de sistemas de potência (ESP), dispositivos que atuam via o sistema de excitação dos geradores a fim de aumentar o componente de torque elétrico de amortecimento da unidade geradora (Kundur, et al., 1994).

O ajuste de ESPs convencionais geralmente é realizado para um ponto de operação em específico, o

que muitas vezes é satisfatório visto que sistemas de potência operam em torno dos valores nominais. Porém, este ajuste não garante a estabilidade e desempenho quando o sistema se afasta do ponto de operação no qual foi projetado.

Normalmente a variação da dinâmica de sistemas de potência está associada a alterações em valores de grandeza e topologia da rede elétrica. Este é o caso da variação da potência ativa suprida por unidades geradoras, e por contingências que levam ao desligamento de linhas de transmissão. Este tipo de desvio sobre o sistema pode ser representado na forma de incertezas estruturadas nos parâmetros do modelo do sistema.

Neste contexto, sistemas lineares com parâmetros variantes (LPV, do inglês, *Linear Parameter-Varying*) é uma abordagem moderna que permite o projeto de controladores de alto desempenho para sistemas com variações paramétricas (Mohammadpour & Scherer, 2012). Sistemas LPV são úteis quando se deseja modelar um sistema não-linear em uma faixa de pontos de operação.

Neste trabalho é apresentada a investigação experimental de um ESP do tipo LPV aplicado ao amortecimento de oscilações eletromecânicas em um sistema de geração em escala reduzida do tipo máquina conectada a um barramento infinito. O ESP LPV deve atender a requisitos de estabilidade e desempenho para uma faixa de valores de condições operacionais, o que é difícil de obter com controladores a parâmetros fixos convencionais.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2, é apresentada a base teórica sobre o método de identificação de modelos LPV que foi utilizada. Na Seção 3 é apresentada a estratégia de controle LPV utilizada para o projeto do ESP LPV. Detalhes sobre o sistema elétrico investigado estão na Seção 4. Os resultados de identificação e controle estão na Seção 5. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção 6.

2 Identificação de Modelos LPV

2.1 Introdução

A modelagem do sistema controlado foi realizada através de uma estratégia de identificação experimental, na qual é possível estimar um modelo LPV a partir de dados coletados na planta.

A principal característica do modelo LPV utilizado nesse trabalho é que a incerteza da planta é representada de forma estruturada, através da dependência entre os coeficientes do modelo LPV e variáveis que podem ser medidas e estão associadas à condição operacional da planta. Essas incertezas paramétricas são delimitadas em um determinado espaço.

Dessa forma, o objetivo é identificar um modelo LPV que capture a dinâmica do sistema para uma faixa de valores, o que não é possível a partir de modelos lineares locais.

2.2 Definição da Estrutura do Modelo Discreto LPV

Considere um modelo discreto LPV com uma entrada (u) e uma saída (y) de acordo com a Equação (1) (Bamieh & Giarré, 2002):

$$A(q^{-1}, \theta)y(k) = B(q^{-1}, \theta)u(k) + e(k), \quad (1)$$

ou na forma de uma função de transferência $G(q^{-1}, \theta) = B(q^{-1}, \theta)/A(q^{-1}, \theta)$, onde q^{-1} é o operador atraso discreto, $e(k)$ é o erro de modelagem e θ é um vetor de variáveis externas, as quais normalmente caracterizam a condição operacional do sistema modelado. Os polinômios $B(q^{-1}, \theta)$ e $A(q^{-1}, \theta)$ do modelo são expressos na forma:

$$\frac{B(q^{-1}, \theta)}{A(q^{-1}, \theta)} = \frac{b_1(\theta)q^{-1} + b_2(\theta)q^{-2} + \dots + b_{n_b}(\theta)q^{-n_b}}{1 + a_1(\theta)q^{-1} + a_2(\theta)q^{-2} + \dots + a_{n_a}(\theta)q^{-n_a}} \quad (2)$$

Os termos $\{b_{nb}\}$ e $\{a_{na}\}$ são funções fixas do vetor de variáveis $\theta = \theta(k)$. Considerando que n_b e n_a são respectivamente os ordens dos polinômios $B(q^{-1}, \theta)$ e $A(q^{-1}, \theta)$, então devem ser definidas $n = n_a + n_b$ funções paramétricas. Dentre as possíveis escolhas para as funções bases, um caso particular é a utilização de funções polinomiais, ou seja, uma dependência polinomial entre as variáveis θ e os coeficientes das funções bases. Considerando que o vetor θ é composto por apenas uma variável, as funções são potências de θ , $f_l(\theta) = \theta^{l-1}$, $l=1, \dots, N$, resultando em polinômios na forma:

$$\begin{aligned} a_i(\theta) &= a_{i1} + a_{i2}\theta + \dots + a_{iN}\theta^{N-1} \\ b_i(\theta) &= b_{i1} + b_{i2}\theta + \dots + b_{iN}\theta^{N-1} \end{aligned}, \quad (3)$$

onde as constantes a_{i1} e b_{i1} são números reais. O objetivo da estratégia de identificação é estimar os valores destas constantes a partir de dados reais medidos no sistema.

Note que quando $N=2$, a função resultante possui uma dependência afim com o parâmetro variável θ . Para o caso de $N=1$, o modelo é equivalente a um modelo linear de estrutura ARX (do inglês, *autoregressive with exogenous input*) clássico.

O modelo LPV descrito na equação (1), juntamente com (2) e (3), podem ser compactados na forma de uma regressão linear. Nesta linha, considere uma matriz Θ de dimensão $n \times N$ que contém todos os coeficientes a serem identificados. Também é definida uma matriz de regressores Ψ , a qual contém os dados de entrada e saída medidos, assim como os valores das funções paramétricas $f_l(\theta)$:

$$\Theta := \begin{bmatrix} a_1^1 & \dots & a_1^N \\ a_2^1 & \dots & a_2^N \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n_a}^1 & \dots & a_{n_a}^N \\ b_1^1 & \dots & b_1^N \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n_b}^1 & \dots & b_{n_b}^N \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Psi(k) &:= \phi(k)\pi(k) \\ &:= \begin{bmatrix} -y(k-1) \\ \vdots \\ -y(k-n_a) \\ u(k-1) \\ \vdots \\ u(k-n_b) \end{bmatrix} [f_1(p(k)) \quad \dots \quad f_N(p(k))] \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 Mínimos Quadrados Não-Recursivo

Os coeficientes que compõem a matriz Θ podem ser determinados através de uma adaptação do algoritmo de mínimos quadrados não recursivo (LMS, do inglês *Least Means Squares*), conforme (Bamieh & Giarré, 2002):

$$\begin{aligned}
P_1: \quad & \Psi(k) = \phi(k)\pi(k) \\
P_2: \quad & \varepsilon(k) = y(k) - \langle \hat{\Theta}(k), \Psi(k) \rangle \\
& = y(k) - \text{traço}(\hat{\Theta}^T(k)\Psi(k)) \\
P_3: \quad & \hat{\Theta}(k+1) = \hat{\Theta}(k) + \alpha\varepsilon(k)\Psi(k)
\end{aligned}$$

Onde o parâmetro α é o tamanho do passo. O algoritmo LMS apresentado necessita que exista uma condição de excitação do sistema identificado a fim de garantir a convergência do algoritmo.

3 Projeto do ESP LPV via LMI

A síntese de controladores LPV pode ser formulada como um problema de otimização convexa (programação semidefinida), com restrições na forma de inequações matriciais lineares (LMI, do inglês, *linear matrix inequalities*) (Boyd, et al., 1994) (Scherer & Weiland, 2005).

3.1 Definição do Problema de Controle

Considere uma estrutura de controle composta por uma função de transferência da planta $G(q^{-1}, \theta)$ e um controlador $K(q^{-1}, \theta) = R(q^{-1}, \theta)/S(q^{-1}, \theta)$, conforme:

$$\frac{R(\theta, q^{-1})}{S(\theta, q^{-1})} = \frac{r_0(\theta) + r_1(\theta)q^{-1} + \dots + r_n(\theta)q^{-n}}{1 + s_1(\theta)q^{-1} + \dots + s_n(\theta)q^{-n}}, \quad (6)$$

onde os termos $\{r_i\}$ e $\{s_j\}$ são funções fixas do vetor de variáveis $\theta = \theta(k)$. Considerando que n_s e n_r são respectivamente os ordens dos polinômios $R(q^{-1}, \theta)$ e $S(q^{-1}, \theta)$ e que o vetor θ é composto por apenas uma variável, as funções são polinômios na forma:

$$\begin{aligned}
r_i(\theta) &= r_{i1} + r_{i2}\theta + \dots + r_{iN}\theta^{N-1} \\
s_j(\theta) &= s_{j1} + s_{j2}\theta + \dots + s_{jN}\theta^{N-1}
\end{aligned}, \quad (7)$$

onde as constantes r_{i1} e s_{j1} são números reais. A medição em tempo real da variável θ permite a adaptação do controlador de acordo com a variação de θ , conforme é ilustrado na Figura 1. A adaptação dos parâmetros do controlador permite garantir a estabilidade e o desempenho do sistema para um domínio maior de condições operacionais, quando comparado a controladores a parâmetros fixos.

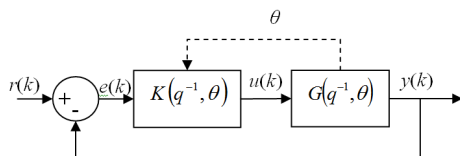


Figura 1 – Diagrama em blocos de um sistema de controle LPV.

Tanto $G(q^{-1}, \theta)$ quanto $K(q^{-1}, \theta)$ são parametrizados no vetor $\theta \in \mathfrak{R}^p$. O vetor θ contém p variáveis

exógenas que podem ser medidas em tempo real, contidas em um conjunto semi-algébrico Θ na forma (Henrion, 2005):

$$\Omega = \{\theta \in \mathfrak{R}^p : g_i(\theta) \geq 0, i = 1, \dots, r\},$$

onde $g_i(\theta)$ são polinômios parametrizados em θ . É considerado que o parâmetro θ depende da condição operacional do sistema em malha-aberta e que pode ser medido em tempo real pelo controlador.

O objetivo de projeto do controlador LPV é encontrar um controlador que dependa explicitamente de θ e que atenda aos requisitos de estabilidade e desempenho para todo $\theta \in \Omega$.

Dado o modelo da planta em malha-aberta $G(q^{-1}, \theta)$, o objetivo do projeto do controlador LPV é encontrar os valores dos parâmetros de $K(q^{-1}, \theta)$ tal que o sistema em malha-fechada $G(q^{-1}, \theta) = N(q^{-1}, \theta)/D(q^{-1}, \theta)$ seja estável e que a norma H_∞ do sistema seja menor que um dado valor γ , para todo $\theta \in \Omega$.

Teorema 1. Dado um polinômio estável $C(q^{-1})$, a função de transferência $N(q^{-1}, \theta)/D(q^{-1}, \theta)$ é estável e atende a restrição de desempenho H_∞ se existir uma matriz simétrica P e um escalar λ tal que (Gilbert, 2010):

$$L(k, \theta) = \begin{bmatrix} C'D(\theta) + D'(\theta)C - F(P) - \lambda C'C & N'(\theta) \\ N(\theta) & \lambda \gamma^2 \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (8)$$

Onde \succeq significa positiva semi-definida, ou seja, todos os autovalores devem ser reais e não negativos. O polinômio $C(q^{-1})$ é denominado polinômio central e está associado à localização dos pólos do sistema em malha-fechada. A função $F(p) = \Pi_1 P \Pi_2 - \Pi_2 P \Pi_1$, onde os termos Π_1 e Π_2 são matrizes:

$$\Pi_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix}, \quad \Pi_2 = \begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Considerando-se que as variáveis de decisão do problema (parâmetros do controlador, matriz P e escalar λ) estão reunidas em um vetor v , o problema resume-se em encontrar v assegurando que as desigualdades matriciais sejam positivas semi-definidas para todo θ em Ω . Este é um problema de LMI parametrizada, um problema de otimização convexa semi-infinito, o qual é geralmente de difícil solução.

Lema 1. Existe v tal que $L(v, \theta) \succ 0$ para todo $\theta \in \Omega$ se e apenas se existirem matrizes polinomiais $M_i(\theta)$ na forma de soma-dos-quadrados (SOS, do

inglês *sum-of-squares*) tal que (Gilbert, 2010) (Scherer, 2006):

$$L(v, \theta) = M_0(\theta) + \sum_{i=1}^{r+1} g_i(\theta) M_i(\theta) \quad (9)$$

Em termos de implementação, para multiplicadores SOS de ordem fixa, a restrição que $L(v, \theta) > 0$ é uma combinação linear de matrizes polinomiais SOS pode ser expressa como uma LMI. As variáveis de decisão são então k e também as matrizes dos multiplicadores SOS. Note que o parâmetro θ não é uma variável de decisão. Aumentando a ordem dos multiplicadores SOS, é obtida uma hierarquia de LMI parametrizadas de tamanho crescente, a partir das quais é garantida que a solução do problema é equivalente, assintoticamente, à solução da LMI parametrizada (5).

O algoritmo de projeto do controlador LPV foi implementado no programa MATLAB versão 7.6.0 (R1008a), em conjunto com duas ferramentas (*toolbox*): YALMIP (Löfberg, 2004) e SeDuMi (Sturm, 1999).

4 Descrição do Sistema Microgerador

4.1 Introdução

O laboratório é composto por um sistema de geração constituído de um motor de corrente contínua (CC) de 9 kW que aciona um gerador síncrono de 10 kVA (Figura 2). Um sub-sistema de acoplamento mecânico no eixo permite a adição de volantes, simulando a grande inércia de rotação normalmente presente em geradores de grandes usinas. Tal planta em escala reduzida foi dimensionada de forma que seus parâmetros mecânicos e elétricos, em valores por unidade (pu), fossem equivalentes, o mais próximo possível, aos parâmetros de um sistema de geração de grande porte.

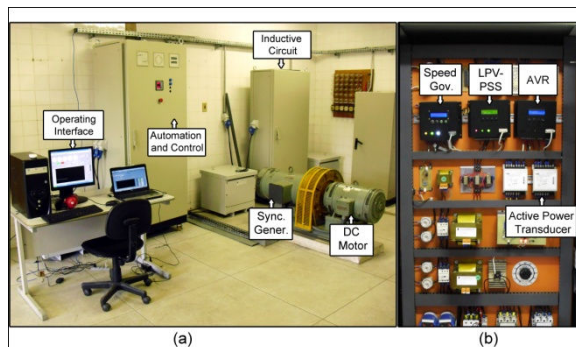


Figura 2 – Sistema de geração em escala reduzida (a) e armário de controle e automação (b).

O diagrama em blocos mostrado na Figura 3 representa o sistema de geração em escala reduzida equipado com o ESP digital desenvolvido neste trabalho. Os sinais de saída do ESP digital ($u(t)$) são aplicados em um ponto do somador principal do regulador automático de tensão (RAT). As oscilações

eletromecânicas do sistema são medidas através do sinal de potência ativa da máquina síncrona ($y(t)$). O valor da potência ativa do gerador foi utilizado como a variável externa do modelo LPV que caracteriza a condição operacional e permite a adaptação dos parâmetros do controlador LPV.

A mudança da condição operacional do sistema é realizada através da atuação na referência de carga (CF) do regulador de velocidade. Os incrementos ou decrementos de carga são comandados por um sinal do tipo rampa. Além deste sinal, também foi implementado um sinal senoidal, com o objetivo de variar a condição operacional do sistema em uma determinada faixa de valores especificada pelo usuário. Este recurso foi útil durante a aquisição de sinais para fins de identificação de modelos LPV, conforme será apresentado na próxima Seção do trabalho.

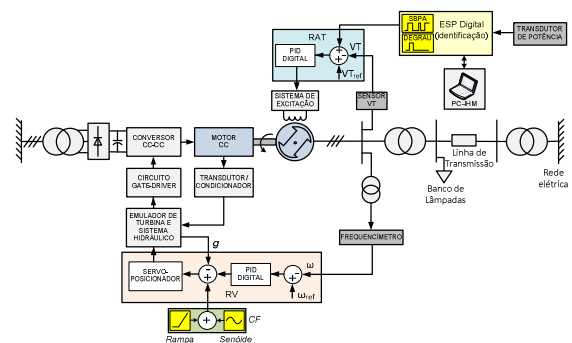


Figura 3 – Sistema de geração em escala reduzida (Nogueira, 2012).

O diagrama em blocos da Figura 4 ilustra a lei de controle do ESP LPV. O sistema de controle possui duas entradas, o sinal de desvio de potência ativa (ΔP), através do qual o ESP LPV mede as oscilações eletromecânicas, e o sinal de potência ativa (P), o qual permite a medição da condição operacional para a adaptação dos parâmetros do controlador LPV. Ambos são normalizados para valores em pu e em seguida são processados por filtros passa-baixas de 1ª ordem digitais (FPB). A amplitude da saída de controle u é limitada em $\pm 0,25$ pu. A saída do controlador LPV é somada a um possível sinal de perturbação do tipo pulso ou sequencia binária pseudoaleatória (SBPA) e em seguida é aplicado ao ponto de soma do RAT.

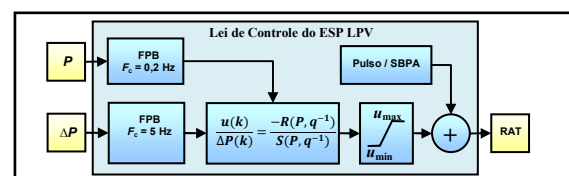


Figura 4 – Diagrama em blocos do ESP LPV desenvolvido.

5 Resultados Experimentais

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com o projeto e testes experimentais do ESP LPV no

sistema de geração em escala reduzida. A primeira etapa apresenta os testes de estimação de modelos LPV utilizando as estratégias de identificação LMS e P-LMS. A fim de avaliar o desempenho do modelo LPV estimado, é realizada uma comparação com modelos lineares ARX identificados em diferentes pontos de operação. A partir dos modelos LPV identificados, os parâmetros do ESP LPV foram determinados através da solução da PLMI. A resposta do sistema com o ESP LPV projetado é comparada com a resposta do sistema com ESPs a parâmetros fixos.

5.2 Resposta ao pulso

A fim de se medir experimentalmente os valores de amortecimento relativo e frequência natural do modo de oscilação eletromecânica dominante, foram realizados ensaios de resposta ao pulso na unidade geradora de 10 kVA conectada à rede elétrica. Os ensaios foram realizados com o sistema em diferentes condições operacionais. Foram escolhidos três pontos de potência ativa (pu na base do gerador), um mínimo em 0,1 pu, um médio em 0,4 pu e um máximo em 0,7 pu. A potência operacional máxima do sistema de geração em escala reduzida é de 0,7 pu. A Figura 5 ilustra o sinal de desvio de potência ativa devido às variações pulso aplicadas na referência do regulador automático de tensão.

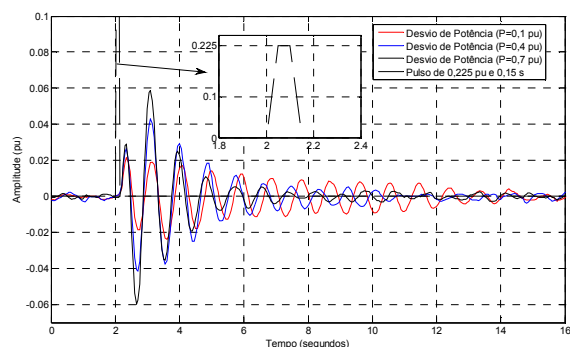


Figura 5 – Resposta ao pulso do sistema em diferentes condições operacionais.

Através deste teste foi possível observar um modo de oscilação eletromecânica com frequência média de 1,1 Hz. Como existe apenas uma unidade geradora no sistema de geração em escala reduzida, e a mesma está conectada a um sistema de grande porte, o sistema se enquadra no caso de um sistema máquina-barramento infinito. Portanto, a oscilação observada é o modo eletromecânico local da unidade geradora (Kundur, et al., 1994).

5.3 Identificação de Modelos lineares ARX

Um passo intermediário realizado entre os ensaios de resposta ao pulso e os testes para a identificação de um modelo LPV, foi a identificação de modelos lineares ARX em diferentes condições operacionais. A partir destes modelos locais é possível, por exemplo, determinar a tendência de deslocamento dos polos do sistema de acordo com a variação da carga

da máquina. Estas informações contribuem para uma melhor interpretação dos resultados obtidos posteriormente com modelos com estrutura LPV.

Foram estimados modelos lineares do tipo ARX através de dados de entrada e saída coletados em três níveis de potência ativa, 0,1 pu (mínimo), 0,4 pu (médio) e 0,7 pu (máximo).

Durante a aquisição de dados para a estimação dos modelos locais, a entrada da planta foi excitada com uma SBPA, projetada para excitar uniformemente uma faixa de frequências em torno da frequência do modo de oscilação eletromecânica observado na resposta ao pulso (valor médio de 1,1 Hz). Dessa forma, a SBPA foi parametrizada com 9 células ($N = 9$), tempo de atualização de 0,12 segundos ($T_b = 0,12$), o que de acordo com as Equações **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** resulta em uma faixa de frequências entre 0,016 Hz e 3,6 Hz.

$$f_{min} = \frac{1}{(2^N - 1)T_b} \quad e \quad f_{max} = \frac{0,44}{T_b} \quad (10)$$

5.4 Identificação de um Modelo ARX LPV

Durante a estimação de modelos lineares locais é necessária a aquisição de dados de entrada e saída em uma condição operacional fixa. Porém, quando o objetivo é a estimação de modelos LPV, para a correta convergência do algoritmo de identificação LMS é necessário que os dados de entrada e saída sejam coletados não apenas para um valor fixo do parâmetro $\theta = P$, e sim para uma faixa de valores especificada pelo projetista. Para atender a esta condição, durante a coleta de dados para a estimação de um modelo LPV, a condição operacional do sistema foi variada entre um valor mínimo P_{min} igual a 0,1 pu e um valor máximo P_{max} igual a 0,7 pu. Ou seja, foram capturados dados de entrada e saída para valores de θ entre 0,1 pu e 0,7 pu.

O valor de potência ativa da unidade geradora é controlado a partir da referência de carga (CF, carga-frequência) do regulador de velocidade do motor CC. Portanto, para a aquisição de dados em uma faixa de valores de potência ativa, foi aplicado um sinal senoidal com frequência de 0,001 Hz na entrada CF do RV.

A frequência do sinal aplicado no CF do RV deve ser menor que a frequência do modo de oscilação de interesse (1,1 Hz), visto que o objetivo deste sinal de excitação é alterar a condição operacional do sistema, para assim os dados coletados possuírem informações sobre a dinâmica entrada-saída do sistema para toda uma região operacional. A excitação da dinâmica do modo de oscilação eletromecânica é realizada por um sinal SBPA aplicado na referência do RAT. A Figura 3**Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra os pontos onde foram aplicadas a SBPA (RAT) e a senóide (RV).

A Figura 6**Figura** ilustra os sinais adquiridos durante o ensaio: potência ativa filtrada (vermelho), desvio de potência ativa (verde) e SBPA (azul). Em um determinado momento próximo a 50 segundos, a

unidade geradora foi conectada a rede elétrica. Após a sincronização, a potência ativa do gerador (P) foi aumentada em rampa (0,005 pu/s) de 0 pu até 0,4 pu. A partir deste ponto, foram aplicados o sinal SBPA (RAT) e o sinal senoidal (RV). Após o sinal senoidal completar um período completo, o ensaio foi concluído, com uma duração aproximada de 22 minutos.

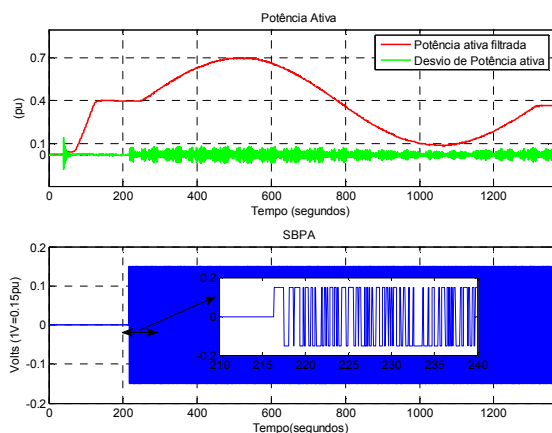


Figura 6 – Dados adquiridos durante a aplicação da senóide na referência do RV.

Os dados processados pelo algoritmo LMS-LPV para a estimação de dois modelos LPV de sexta ordem ($n_a=n_b=6$), mesma ordem dos modelos lineares locais identificados em condições operacionais fixas. Em um dos modelos foram utilizadas funções de dependência em θ de 1ª ordem ($N=2$) e no outro funções de 2ª ordem ($N=3$). Os modelos LPV identificados são representados pela função de transferência pulsada da Equação (1), para $\theta = P$.

Os valores dos parâmetros dos modelos LPV são apresentados em (Nogueira, 2012).

Na Figura 7 é apresentada uma comparação entre os pólos dos modelos locais e os pólos dos modelos LPV para diversos valores de $\theta = [0,1, 0,7]$. Um detalhe nos pólos dominantes mostra que a região composta pelos pólos do modelo LPV com $N=3$ (azul claro) possui um perfil bem próximo aos pólos dos modelos locais. Dessa forma, este modelo foi utilizado como base para o projeto dos controladores deste trabalho.

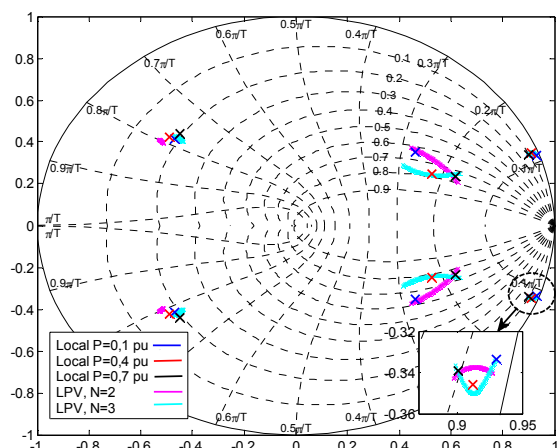


Figura 7 – Pólos dos modelos locais e modelos LPV ($N=2$ e $N=3$).

5.5 Projeto de ESPs a parâmetros fixos

A fim de avaliar o desempenho do ESP LPV, a resposta do mesmo foi comparada com a resposta de controladores a parâmetros fixos (controladores locais) na forma:

$$\frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} = \frac{r_0 + r_1 q^{-1} + \dots + r_{n_r} q^{-n_r}}{1 + s_1 q^{-1} + \dots + s_{n_s} q^{-n_s}}, \quad (11)$$

onde os parâmetros r_i e r_j foram calculados a partir de modelos linearizados em torno de um ponto de operação. É esperado que os controladores locais tenham ótimo desempenho nas respectivas condições operacionais onde foram projetados, porém o desempenho destes controladores deve diminuir assim que a condição operacional se afaste da nominal. O controlador LPV, por sua vez, deve manter o desempenho desejado para toda a região operacional utilizada no projeto.

Os controladores locais foram projetados através do método de deslocamento radial de polos, que é um caso particular do método de posicionamento de polos. O método consiste em deslocar radialmente os pólos dominantes em direção à origem do círculo unitário no plano z , aumentando assim o amortecimento natural (ζ) sem alterar significativamente a frequência natural (ω_n) do respectivo modo Nogueira, et al., 2011) (Nogueira, 2012).

Foram projetados três controladores locais de 5ª ordem ($n_r=n_s=5$), respectivamente nos pontos $P=0,1$ pu, $P=0,4$ pu e $P=0,7$ pu. Para ambos foi especificado um valor de amortecimento relativo desejado $\zeta_d = 0,3$. Os valores dos parâmetros dos três controladores a parâmetros fixos são apresentados em (Nogueira, 2012).

5.6 Projeto do ESP LPV

O projeto do ESP LPV foi realizado nas seguintes etapas:

- I. Leitura do modelo LPV da planta;
- II. Definição da estrutura do controlador LPV e escolha de alguns parâmetros de entrada;
- III. Escolha do polinômio central;
- IV. Montagem da LMI robusta (PLMI);
- V. Relaxação da LMI robusta;
- VI. Solução via um problema de programação semidefinida (SDP);
- VII. Análise dos pólos de malha-fechada com o controlador LPV projetado;

Caso o controlador LPV não apresente o desempenho desejado, é necessário retornar ao passo 2 e escolher outro conjunto de valores para o problema.

O ESP LPV é representado na forma da função de transferência da Equação (6). Foram testadas diversas combinações para n_r , n_s e N , resultando em um melhor desempenho para um controlador LPV de 5ª ordem e $N=3$.

A estratégia adotada neste trabalho para a escolha dos pólos de $C(q^{-1})$ foi utilizar como base os pólos do polinômio característico de malha-fechada $A_{cl}(q^{-1})$ de um sistema composto pelo modelo local ARX da planta identificado no ponto $P_0 = 0,4$ pu (Subseção 5.3) e um ESP a parâmetros fixos (controlador local) projetado no mesmo ponto P_0 (Subseção 5.5). Mais detalhes são encontrados em (Nogueira, 2012).

Até este ponto já são conhecidos: o modelo LPV da planta, a estrutura do controlador, o polinômio central e a constante $\gamma=100$. O próximo passo é a montagem da PLMI (8) **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, para $\theta=P$. São declaradas as variáveis de decisão do problema: os parâmetros do controlador, a matriz P e o escalar λ .

Após a análise do grau da PLMI, é necessário definir as inequações $g_i(\theta) \geq 0$ que definem o conjunto semi-algebrico que delimita os possíveis valores para o parâmetro incerto P . Como a PLMI do projeto do ESP LPV é parametrizada em apenas uma variável, a potência ativa (P), o conjunto é uma reta que conecta o valor mínimo de P , 0,1 pu, ao valor máximo, 0,7 pu. Dessa forma, são definidas as seguintes inequações:

$$\begin{aligned} g_1(\theta_1) &= 0,7 - \theta_1 \geq 0 \\ g_2(\theta_1) &= \theta_1 - 0,1 \geq 0 \end{aligned}$$

A relaxação da PLMI foi realizada com o auxílio do módulo SOS da ferramenta YALMIP. O problema resultante da relaxação é um problema de programação semi-definida, o qual foi solucionado pelo programa SeDuMi. O módulo de programação SOS do YALMIP realiza automaticamente a inicialização do programa SeDuMi. Os parâmetros do ESP LPV projetado estão apresentados em (Nogueira, 2012).

A Figura 8 apresenta uma comparação entre os pólos do sistema em malha-fechada com o controlador LPV (verde) e com os controladores a parâmetros fixos (azul, vermelho, preto). É notável a superioridade de desempenho do controlador LPV quando comparado com os ESPs a parâmetros fixos.

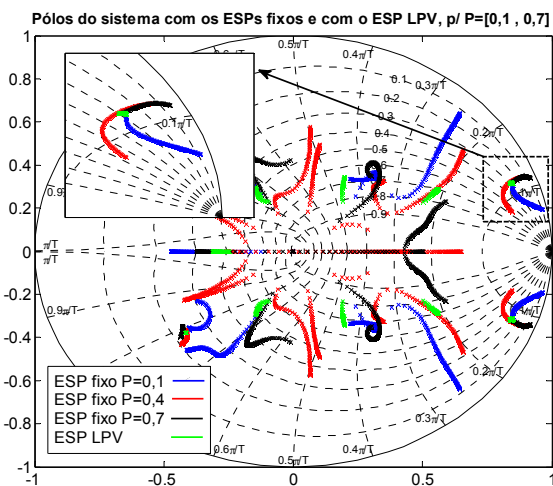


Figura 8 - Comparação entre os pólos de malha-fechada do sistema com o ESP LPV e os ESPs a parâmetros fixos.

Note que os pólos de malha fechada, para o caso do ESP LPV, estão confinados em torno da linha de amortecimento relativo de 0,3, conforme desejado. Portanto, a sistema em malha-fechada com o ESP LPV atende tanto o requisito de estabilidade, quanto os requisitos de desempenho, para todas as condições operacionais consideradas no problema. Por outro lado, os pólos de malha fechada, para o caso do sistema com os ESPs fixos, percorrem regiões que se afastam do pólo especificado no projeto

5.7 Ensaios de controle

A partir de ensaios de resposta ao pulso o desempenho do sistema em malha-fechada foi avaliado tanto com o ESP LPV quanto com o ESP fixo. A Figura 9 ilustra a resposta ao pulso do sistema em uma condição operacional de $P=0,4$ pu. Nota-se que o ESP LPV (curva verde) apresentou um desempenho bem próximo ao desempenho do ESP fixo projetado na mesma condição operacional do ensaio (vermelho), visto que tanto o sinal de desvio de potência ativa, quanto o esforço de controle, são praticamente iguais. Porém, como esperado, o desempenho dos demais ESPs fixos (curvas em azul e preto) foi notavelmente afetado pela variação da condição operacional.

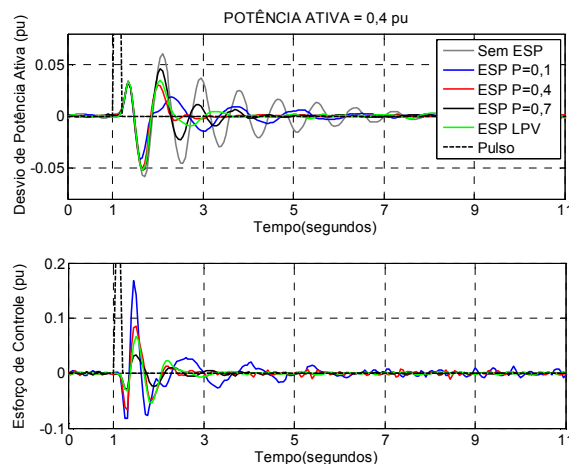


Figura 9 - Resposta ao pulso com o sistema operando em $P = 0,4$ pu.

A resposta ao pulso do sistema na condição operacional máxima ($P = 0,7$ pu) é apresentada na Figura 10. Esse foi o caso mais crítico, visto que o modo de oscilação eletromecânica local se tornou instável quando foi aplicada uma perturbação com o sistema operando com o controlador fixo projetado em $P = 0,1$ pu (curva azul). A resposta do sistema operando com o controlador fixo projetado no ponto de operação médio também não foi satisfatória (curva vermelha), visto que houve um amortecimento exagerado do modo de oscilação eletromecânica dominante. Quanto à resposta do sistema operando com o ESP LPV (curva verde), nota-se que a resposta é praticamente igual à resposta do sistema com o controlador fixo projetado no respectivo ponto de operação do

ensaio (curva preta). Dessa forma, o ESP LPV apresentou um desempenho satisfatório na condição operacional máxima.

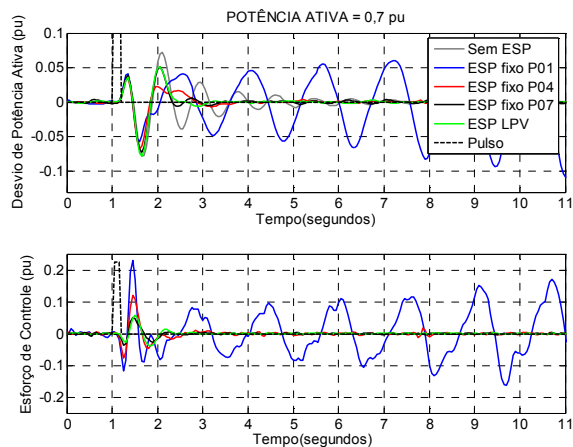


Figura 10 – Resposta ao pulso com o sistema operando em $P = 0,7$ pu.

A partir dos ensaios de resposta ao pulso apresentados ficou evidente o significativo desajuste dos ESPs a parâmetros fixos com a mudança da condição operacional. Por outro lado, o ESP LPV manteve a estabilidade e o desempenho do sistema para todas as condições operacionais consideradas no projeto.

Conclusões

De acordo com os resultados apresentados, conclui-se que o ESP LPV obteve excelente desempenho no amortecimento do modo de oscilação eletromecânica local do sistema de geração em escala reduzida. A aplicação desta estratégia em controle de sistemas elétricos de potência não se restringe ao amortecimento de oscilações eletromecânicas, sendo, por exemplo, útil para o ajuste de reguladores de velocidade e de tensão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido pelo CNPQ.

Referências Bibliográficas

- Bamieh, B. & Giarré, L. (2002). Identification of linear parameter varying models. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 12, pp. 841-853.
- Boyd, S., Ghaoui, L. E., Feron, E. & Balakrishnan, V. (1994). *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. s.l.:SIAM.
- Gilbert, W., Henrion, D., Bernussou, J. & Boyer, D. (2010). Polynomial LPV synthesis applied to turbofan engines. *Control Engineering Practice*, Vol. 18, pp. 1077-1083.

- Henrion, D. & Garulli, A. (2005). *Lecture Notes in Control and Information Sciences - Positive Polynomials in Control*, Springer.
- Kundur, P. S., Balu, N. J. & Lauby, M. G. (1994). *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill Professional.
- Löfberg, J. (2004). *A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB*. Taipei, Taiwan, s.n.
- Mohammadpour, J. & Scherer, C. W. (2012). *Control of linear parameter varying systems with applications*. New York: Springer.
- Nogueira, F. G. et al., (2011). Estabilizador de sistemas de potência digital aplicado a uma unidade geradora da UHE de Tucuruí. *SBA Controle & Automação, Set./Out.*, Vol. 5, pp. 535-544.
- Nogueira, F. G. (2012). *Investigação Experimental de Estratégias de Identificação e Controle LPV Aplicadas ao Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência*. Tese de Doutorado, UFPA, Belém-PA.
- Scherer, C. & Weiland, S. (2005). *Linear Matrix Inequalities in Control*.
- Scherer, C. W. (2006). LMI relaxations in robust control. *European Journal of Control*, Vol. 12(1), pp. 3-29.
- Sturm, J. F. (1999). Using SeDuMi 1.02, a Matlab toolbox for optimization over symmetric cones. *Optimization Methods and Softwares*, 11(12), pp. 625-653.