

Identificação Experimental do Sistema de Controle de Pressão de Óleo Combustível em uma Usina Termelétrica a Carvão

Nickson R. Tomé de Sousa, Adriano R. de Paula,
Fabrício G. Nogueira e Bismark C. Torrico

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil

(e-mails: nickson@alu.ufc.br, rodrigues@dee.ufc.br, bismark@dee.ufc.br, fnogueira@dee.ufc.br).

Abstract: Through a linear parameter varying-systems (LPV) approach, this paper presents an experimental identification study using real data from a fuel oil pressure control loop of a 360 MW coal-fired thermal power plant during its startups. The data collected in a second startup of the same unit were used to validate the model. As a result, the validation curves of a second-order inputs and outputs LPV model with first-order polynomial dependence on the scheduling variable are presented.

Resumo: Por meio de uma abordagem de sistemas lineares com parâmetros variantes (do inglês, *linear parameter varying-systems* – LPV), este trabalho apresenta um estudo de identificação experimental utilizando dados reais de uma malha de controle de pressão de óleo combustível de uma usina termelétrica a carvão de 360 MW durante suas partidas. Para validação do modelo, foram utilizados dados coletados em uma segunda partida da mesma unidade geradora. Como resultado, são apresentadas as curvas de validação de um modelo LPV de entradas e saídas de segunda ordem com dependência polinomial de primeira ordem na variável de ajuste.

Keywords: system identification; LPV system; thermal power plant; fuel oil; pressure control;

Palavras-chaves: identificação de sistema; sistema LPV; termelétrica; óleo combustível; controle de pressão;

1. INTRODUÇÃO

O conceito de economia de baixo carbono, que teve origem em 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, tem como um de seus pilares, a busca pela diminuição das emissões de gases do efeito estufa. Desde então, a busca pelo crescimento econômico sustentável e pela transição da matriz energética para fontes renováveis tem sido prioridade para diversos países, principalmente para os membros da União Europeia. Apesar deste esforço, estima-se que os combustíveis fósseis continuem a dominar a demanda global no curto e médio prazo (Gonzalez-Salazar et al., 2017).

De acordo com a Agência Internacional de Energia – IEA (2021), as fontes de energia eólica e solar foram as que mais cresceram e receberam investimentos nos últimos anos. Embora existam diversas vantagens na utilização destas fontes renováveis, principalmente ambientais, essa transição acelerada traz diversos problemas e desafios a serem superados, pois suas ofertas de energia aos sistemas elétricos dependem diretamente da disponibilidade de suas fontes primárias: vento e sol, respectivamente.

A inconstância no fornecimento e a falta de previsibilidade das fontes renováveis impõem um alto grau de flexibilidade ao parque gerador de fontes convencionais, como hidrelétricas e termelétricas, pois elas precisam modificar a potência

de suas máquinas com mais frequência e velocidade do que o usual para manter o equilíbrio entre oferta e demanda de energia. Além disso, as fontes geradoras eólica e solar, por exemplo, podem causar instabilidades na rede e possuem dificuldade para realizar controle primário de frequência (Fernández-Guillamón et al., 2019).

Dentro deste novo contexto, as usinas térmicas movidas a carvão mineral, originalmente projetadas para operação constante em carga base, precisarão, cada vez mais, operar em cargas reduzidas ou de forma cíclica. Isso significa que elas terão que se adaptar para ligar, desligar, aumentar e diminuir a carga com mais frequência, com mais rapidez e com melhor custo-benefício. Uma termelétrica a carvão pode necessitar de várias horas para concluir seu processo de partida e realizar o sincronismo do gerador. Este tempo depende do período em que a usina permaneceu desligada. Quanto mais quente a planta estiver, mais rápido será seu arranque. Apesar das características desfavoráveis deste tipo de planta para a operação de forma flexível, muitas delas são solicitadas a operar desta maneira (Wang et al., 2017). Dessa forma, para uma melhor adaptação das usinas e diminuição dos custos neste modo de operação, devem ser tomadas medidas para otimizar esses processos.

Segundo Hübel et al. (2017), os critérios mais importantes para a otimização de uma partida de uma planta térmica a carvão são: o tempo, a demanda de combustível e o des-

gaste vitalício de componentes termicamente estressados. Ele também afirma que o desenvolvimento de modelos de simulação dinâmica é considerado uma alternativa eficiente aos testes de campo, proporcionando um ambiente virtual para desenvolver e testar estratégias de otimização.

Levar uma usina de grande porte de seu estado inicial para a condição de sincronismo e operação é um procedimento complexo e altamente automatizado por sistemas de controle robustos. Por exemplo, valores de pressões, temperaturas, vazões e propriedades químicas precisam atingir limites bem definidos para que se consiga avançar com o processo.

Embora exista uma grande quantidade de literatura que trata sobre os processos térmicos em geral, existem poucas publicações que abordam modelagens e simulações de partidas de plantas termelétricas a carvão (Marx-Schubach and Schmitz, 2019), principalmente sobre o tema “fornecimento de óleo combustível”.

Embora o carvão mineral seja o principal combustível, óleo pesado e/ou óleo diesel são utilizados para ignição e aquecimento inicial da caldeira, além de fornecer condições de ignição para a chama de carvão.

O controle de pressão de fornecimento de óleo combustível para a fachada de queimadores é de extrema importância tanto por questões de segurança operacional, quanto por diminuição do consumo de óleo diesel, que tem como consequência direta a redução de impactos ambientais e a economia financeira. Ele atua, principalmente, durante a partida e desligamento da unidade geradora, bem como durante a troca de operação de moinhos.

Neste contexto, durante a partida, dentre outras intervenções, o operador comanda manualmente dois sinais de referência, sendo eles a referência de pressão de óleo e o número de queimadores acesos. Uma relação de compromisso é adotada pelo operador com o objetivo de reduzir o tempo de partida e o consumo de óleo. Contudo, com a definição manual dessas variáveis, obter uma combinação ótima que resulte em uma minimização de consumo e tempo não é facilmente alcançada. Um sistema de controle em cascata, que tenha como saídas as referências de pressão e o consumo de óleo, é desejável para contornar esse problema.

Dessa forma, o objetivo deste artigo é apresentar um estudo preliminar de modelagem da malha de controle de pressão de óleo combustível em uma unidade geradora termelétrica real de 360 MW. O modelo será utilizado em um próximo trabalho para projeto do sistema de controle e automação do processo de injeção de combustível durante a partida da máquina. Dada a grande complexidade do sistema para levantamento de equações fenomenológicas e valores de parâmetros, a abordagem adotada é a de identificação experimental de sistemas. No âmbito de identificação, a abordagem utilizada foi a de sistemas lineares com parâmetros variantes (LPV, linear parameter varying-systems) (Gidon et al., 2021; Tóth, 2010) a fim de obter um modelo dinâmico que permita o projeto de sistema de controle adaptativo que mantenha o desempenho satisfatório para uma grande faixa de condições de operação, devido à dependência explícita em variáveis externas (variáveis de ajuste). Esse desempenho não é possível com modelos

ARX convencionais, os quais possuem desempenho satisfatório apenas em torno do ponto de linearização.

2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

2.1 Óleo Combustível

Em usinas termelétricas a carvão mineral, o óleo pesado e/ou óleo diesel são utilizados como combustíveis de suporte ao carvão pulverizado. O óleo diesel é fundamental para o sistema de ignição da caldeira, pois não é possível acendê-la e partir a unidade geradora somente com alimentação de carvão. Além disso, o óleo combustível é usado em condições transitórias de baixa carga (inferior a 40%), estabilização da chama de carvão e para entrada ou retirada de moinhos de operação em qualquer condição de carga.

A usina referência deste artigo, localizada no estado do Ceará, utiliza apenas diesel como óleo combustível e possui, de forma resumida, as seguintes etapas em seu processo de utilização desse insumo (Fig. 1):

- Descarregamento: recebimento de combustível através de caminhões, passando por filtros e bombas de sucção até a válvula de entrada do tanque de armazenamento;
- Armazenamento e transferência: composto por tanque de armazenamento de óleo, filtros, bombas de transferência, tanques de armazenamento auxiliares para geradores diesel de emergência e sistema de combate a incêndio;
- Fornecimento e recirculação: fornecimento de óleo combustível para a fachada de queimadores através de bombas de pressurização. Possui válvulas para permitir a recirculação do combustível excedente.

De acordo com o código 85 da *National Fire Protection Association – NFPA* (2019), que aborda os riscos para caldeiras e sistemas de combustão, é preciso garantir a disponibilidade do sistema de fornecimento de óleo combustível aos queimadores, caso contrário, por segurança, deve-se apagar imediatamente a caldeira, causando grandes prejuízos financeiros. Na usina referência deste artigo, os valores de pressão, conforme orientação do fabricante da caldeira, devem permanecer sempre entre 3 e 12 bar para que o sistema seja considerado disponível.

Ter um bom sistema de controle de pressão da fachada dos queimadores é fundamental, tanto para segurança quanto para eficiência do processo. Manter a pressão razoavelmente constante também é importante para que cada queimador aceso obtenha aproximadamente a mesma vazão de óleo a ser queimado.

2.2 Controle de Pressão do Óleo Combustível

O óleo diesel é retirado do tanque de armazenamento por 2 (duas) bombas de pressurização que possuem em suas descargas uma válvula de controle que varia automaticamente sua posição para manter a pressão de óleo na saída das bombas constante, direcionando uma parte deste combustível de volta para o tanque de armazenamento.

O controle desta válvula de recirculação é descrito da seguinte forma: o desvio entre o valor de pressão medido na

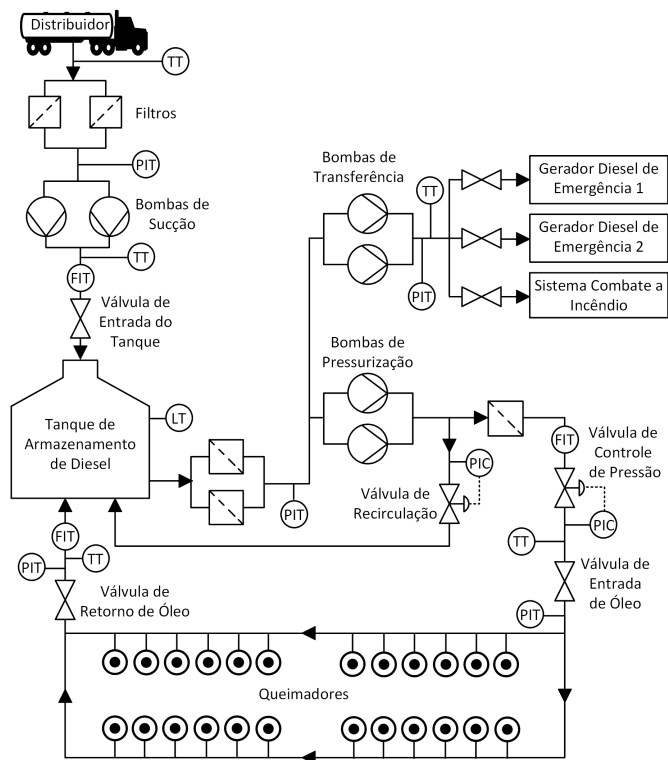


Figura 1. Diagrama geral do processo de fornecimento de óleo combustível.

descarga das bombas e o valor de referência definido pelo operador através do sistema supervisório é usado como entrada de um controlador PI, que possui em sua saída o sinal de demanda de abertura da válvula.



Figura 2. (a) Válvula de controle. (b) Transmissor de pressão.

O combustível que não é recirculado segue por outra linha que possui uma outra válvula de controle (Fig. 2a) responsável por controlar a pressão de óleo na fachada dos queimadores. O controlador PI desta válvula (Fig. 3) tem como entrada o desvio entre o valor de referência definido pelo operador (limitado ao intervalo de 3,5 a 12 bar) e o valor de medição da pressão de entrada da fachada (Fig. 2b). O ganho KP varia (de 0,5 a 0,7) de acordo com

a quantidade de queimadores acesos e tempo TN é fixo em 15s. A saída do controlador é o sinal de demanda de abertura da válvula.

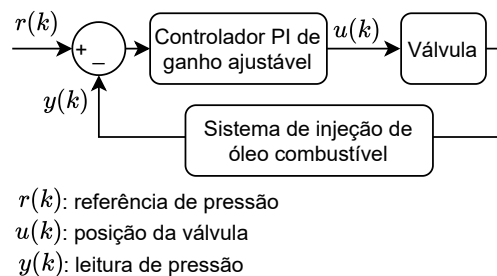


Figura 3. Malha de controle de pressão de óleo combustível.

Por questões de segurança, esta linha possui duas válvulas pneumáticas, uma antes e outra depois da fachada, permitindo assim, a rápida interrupção do fornecimento de combustível caso necessário. O processo também conta com medição de temperatura, pressão e vazão antes e depois da fachada. O consumo instantâneo de combustível é definido pela subtração da vazão de entrada de óleo na fachada com a vazão de saída e retorno ao tanque de armazenamento.

3. MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO

A obtenção de um modelo confiável que represente o sistema real por modelagem física (abordagem fenomenológica) é uma tarefa bastante complexa. Em vista disso, um método de identificação matemático do tipo caixa-preta é utilizado neste trabalho para obter um modelo discreto LPV de dados de entrada e saída.

3.1 Estrutura do Modelo LPV

O modelo selecionado é um modelo autorregressivo dependente de parâmetro em tempo discreto com entrada exógena (ARX), que é normalmente referido na literatura como modelo LPV-ARX. Este modelo pode ser escrito na forma de

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

onde q^{-1} é o operador de atraso, $k \in \mathbb{Z}$ é o tempo discreto, $u(k)$ e $y(k)$ são, respectivamente, os sinais de entrada e saída, d é o tempo de atraso em termos de tempo de amostragem, e $e(k)$ é o erro de modelagem, que é considerado um ruído branco de média zero e incorpora os ruídos de leitura. O parâmetro variante no tempo $\theta(k) := \theta$, definido como variável de ajuste, é um parâmetro medido ou estimado associado à condição de operação da planta. Os polinômios do modelo possuem a seguinte estrutura

$$B(\theta, q^{-1}) = b_1(\theta)q^{-1} + \dots + b_{n_b}(\theta)q^{-n_b}, \quad (2)$$

$$A(\theta, q^{-1}) = 1 + a_1(\theta)q^{-1} + \dots + a_{n_a}(\theta)q^{-n_a}, \quad (3)$$

onde n_a e n_b são os graus dos polinômios e definem a ordem do modelo. As funções dependentes de parâmetros $a_i(\theta)$ e $b_j(\theta)$ são definidas como:

$$a_i(\theta) = a_{i0} + a_{i1}\theta + \dots + a_{iN}\theta^N, \quad i = 1..n_a, \quad (4)$$

$$b_j(\theta) = b_{j0} + b_{j1}\theta + \dots + b_{jN}\theta^N, \quad j = 1..n_b, \quad (5)$$

onde N representa o grau polinomial de dependência entre o modelo e a variável de ajuste. Observe que quando $N = 0$ o modelo resultante se torna um ARX clássico.

Então, a partir de (1), (4), e (5), é possível representar o modelo LPV como uma forma de regressão linear

$$y(k) = \phi(k)^T \psi, \quad (6)$$

$$\phi(k) = \varphi(k) \otimes \eta(k), \quad (7)$$

$$\varphi(k) = [-y(k-1) \cdots -y(k-n_a) \ u(k-1) \cdots u(k-n_b)]^T, \quad (8)$$

$$\eta(k) = [1 \ \theta \ \theta^2 \ \cdots \ \theta^N]^T, \quad (9)$$

onde $\psi \in \mathbb{R}^{n_a+n_b}$ é o vetor de coeficientes a_{ij} , onde $i = 1 \dots n_a, j = 0 \dots N$ concatenado com o vetor de coeficientes b_{ij} , onde $i = 1 \dots n_b, j = 0 \dots N$. A operação \otimes denota o produto de Kronecker entre os operadores $\varphi(k) \in \mathbb{R}^{n_a+n_b}$ e $\eta(k) \in \mathbb{R}^N$ resultando em $\phi(k) \in \mathbb{R}^{N(n_a+n_b)}$.

3.2 Algoritmo de Identificação LPV

O algoritmo de identificação é baseado no modelo LPV descrito na Seção 3.1, onde conjuntos de dados de E/S são coletados juntamente com os valores da variável de ajuste com o sistema operando em diferentes condições de operação.

A representação regressora (6) permite que seja feita uma estimação da saída do modelo $\hat{y}(k)$ para cada instante de tempo k por meio do estimador de quadrados mínimos (Nogueira et al., 2018; Bamieh and Giarre, 2002). Esta estimação da saída permite o cálculo dos coeficientes de A e B presentes em ψ (Gidon et al., 2021)

$$\psi = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y, \quad (10)$$

de forma a minimizar o erro quadrático médio da saída estimada, onde

$$Y = [y(1) \ y(2) \ \cdots \ y(N_d)]^T, \quad (11)$$

$$\Phi = [\phi(1)^T \ \phi(2)^T \ \cdots \ \phi(N_d)^T]^T, \quad (12)$$

com N_d representando o número de amostras coletadas. Deve-se observar que é necessário escolher $N_d \geq N(na + nb)$ para a estimação encontrar uma solução única para o conjunto de coeficientes ψ .

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A planta estudada é o sistema de injeção de óleo combustível. Como ilustrado na Figura 3, o sinal de entrada da planta é a ação de controle $u(k)$ relativa ao comando de abertura da válvula. A saída da planta é a leitura de pressão de óleo combustível que passa pela mesma, sinal $y(k)$.

Para fins de implementação dos estudos deste trabalho foram realizados trabalhos de campo em uma unidade geradora termelétrica de 360MW. Na Figura 4 são apresentados os dados coletados de uma das partidas da unidade, desde o momento em que inicia a injeção de óleo combustível até o momento em que os queimadores a óleo são apagados.

4.1 Identificação do Modelo LPV

A identificação do modelo LPV demanda a escolha de uma variável de ajuste a qual a operação do sistema

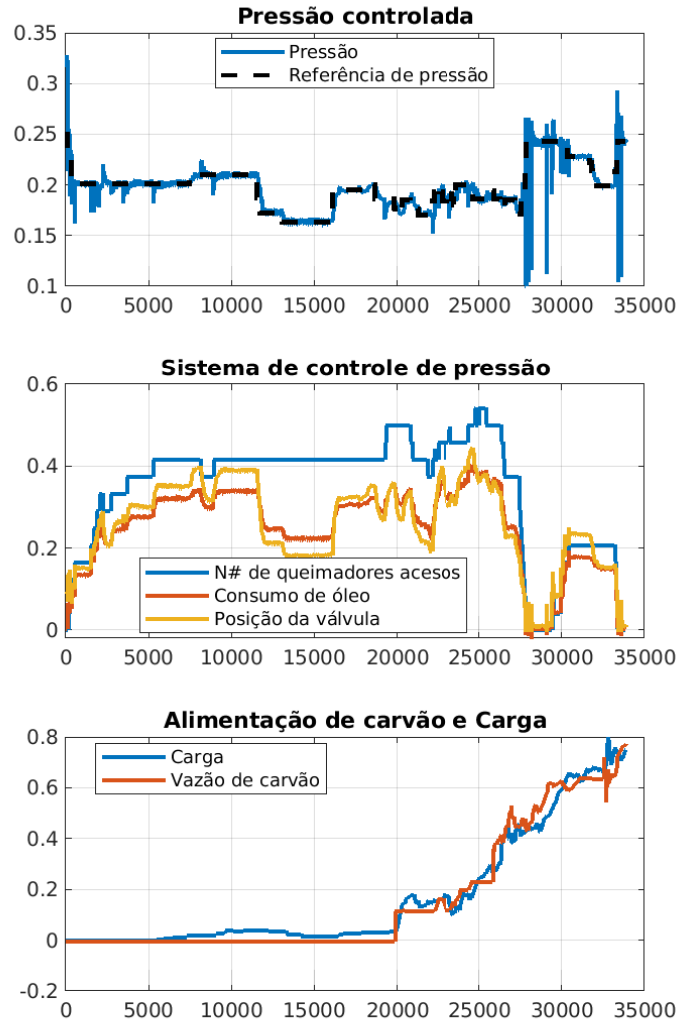


Figura 4. Curvas de uma partida completa. Sinais normalizados em pu.

possua uma dependência. Entende-se que a pressão de óleo varia conforme o número de queimadores é modificado, pois o acendimento de um queimador causaria a queda de pressão do combustível, bem como o desligamento de um queimador teria o efeito contrário. Por sua vez, o consumo de diesel é diretamente associado a esse número de queimadores e, ao mesmo tempo, à pressão controlada, como pode-se observar na Figura 4. Logo, a curva de consumo instantâneo de óleo é escolhida como variável de ajuste θ , uma vez que ela apresenta as qualidades recém descritas.

Os dados obtidos durante uma partida completa da unidade geradora apresentam informações que não são adequadas para fins de identificação. Um exemplo são trechos em que o sistema opera em regime permanente por um longo período de tempo, apresentando pouca informação e correlação entre os dados de entrada e saída. Trechos os quais o sinal de saída está sujeito à elevada influência de distúrbios também podem ser prejudiciais à identificação.

Desta forma, os dados de partida da unidade geradora foram selecionados a fim de gerar o conjunto adequado para ser processado pelo algoritmo de identificação, conforme ilustrado na Figura 5.

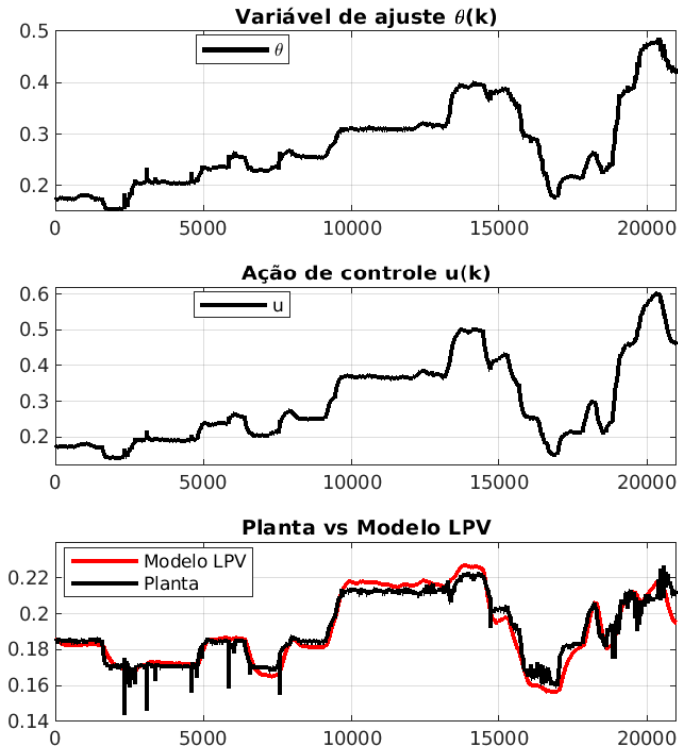


Figura 5. Dados utilizados para a identificação. Sinais normalizados em pu.

Observa-se na Figura 5 que a variável de ajuste situa-se na faixa entre 0,15 e 0,5 pu e que a planta, em malha fechada, é comandada pela ação de controle para diversas condições de operação. Essas condições são favoráveis ao algoritmo de identificação do modelo, pois vários valores das variáveis de interesse são contemplados no ensaio de estimação. É possível notar também algumas quedas repentinas de pressão na planta. Essas quedas não devem ser compreendidas como ruídos, pois estão presentes na dinâmica da planta e são provenientes de perturbações externas. Quando um queimador é acionado, sua respectiva válvula de alimentação de óleo combustível se abre ocasionando a queda de pressão no sistema. Logo o modelo ignora essas dinâmicas, pois são perturbações externas que são observadas em virtude dos dados coletados de uma máquina real em operação.

Foram avaliadas diversas estruturas para o modelo identificado. A configuração que obteve uma melhor relação entre complexidade e erro de predição foi $n_a = 2$, $n_b = 2$, $d = 0$ e $N = 1$, apresentando a topologia

$$A(\theta, q^{-1}) = 1 + a_1(\theta)q^{-1} + a_2(\theta)q^{-2}, \quad (13)$$

$$B(\theta, q^{-1}) = b_1(\theta)q^{-1} + b_2(\theta)q^{-2}, \quad (14)$$

onde cada coeficiente de A e B é uma função de θ de acordo com um polinômio de primeira ordem da forma

$$\begin{aligned} a_1(\theta) &= a_{10} + a_{11}\theta, \\ a_2(\theta) &= a_{20} + a_{21}\theta, \\ b_1(\theta) &= b_{10} + b_{11}\theta, \\ b_2(\theta) &= b_{20} + b_{21}\theta. \end{aligned} \quad (15)$$

Após o processo de identificação, o modelo obtido apresentou os seguintes parâmetros

$$\begin{aligned} a_1(\theta) &= -1.527190 + 0.189532\theta, \\ a_2(\theta) &= 0.527433 - 0.177398\theta, \\ b_1(\theta) &= -0.034924 + 0.136647\theta, \\ b_2(\theta) &= 0.037576 - 0.137577\theta. \end{aligned} \quad (16)$$

A Figura 5 também apresenta a comparação do sinal de saída lido com o sinal de saída estimado pelo modelo durante o processo de identificação. Entretanto, esse modelo deve ser testado em um ensaio com dados diferentes dos utilizados em sua identificação. Essa etapa de validação se faz necessária para verificar a robustez do modelo frente a outros dados de entrada para faixas de operação semelhante.

4.2 Validação

Esta seção apresenta a validação no tempo do modelo dinâmico LPV identificado. Foram coletados novos dados de uma nova partida da unidade geradora para critérios de validação do modelo encontrado na seção 4.1.

O intervalo selecionado contempla uma faixa de operação semelhante à referida no ensaio de identificação, bem como a faixa de valores da variável de ajuste.

A comparação entre a resposta do modelo e a saída real medida é apresentada na Figura 6.

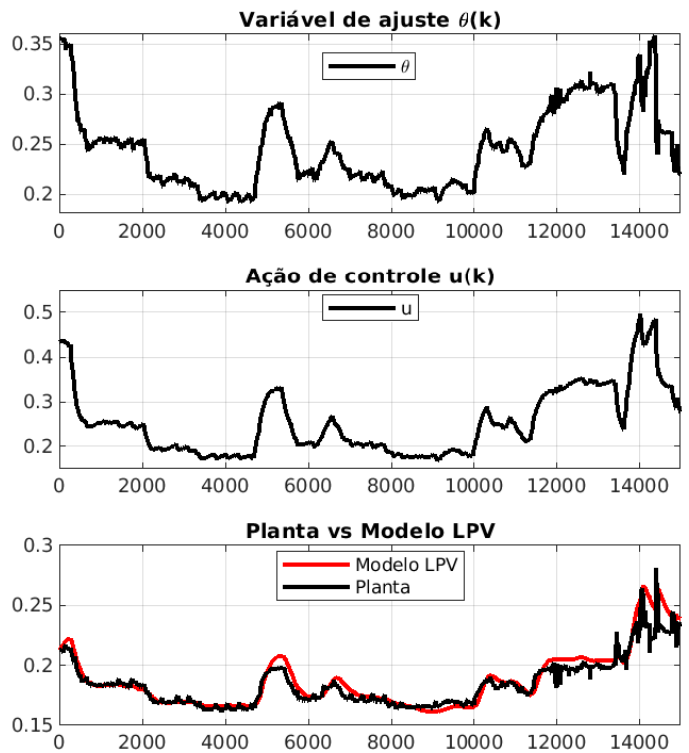


Figura 6. Ensaio de validação do modelo. Sinais normalizados em pu.

Esse modelo é validado com 88,60% de índice de desempenho (Toth et al., 2009)

$$R^2 = 100\% \times \max \left(1 - \frac{\text{var}(y(k) - \hat{y}(k))}{\text{var}(y(k))} \right).$$

Percebe-se pela Figura 6 que o modelo conseguiu capturar os modos dominantes observados para toda a faixa de

condições de operação considerada durante o processo de aquisição de dados.

5. CONCLUSÃO

Apresentou-se um modelo LPV para o sistema de controle de pressão de óleo combustível de uma unidade geradora a carvão com ensaio de validação que realça a qualidade do modelo obtido.

Por meio das técnicas apresentadas, foi possível obter um modelo matemático validado experimentalmente, contornando problemas presentes em outros métodos populares de modelagem, como a modelagem física, que pode possuir grande complexidade matemática e dificuldade na estimação de valores para variáveis do sistema.

A baixa complexidade numérica provinda do modelo de entradas e saídas de segunda ordem, com dependência de primeiro grau em uma variável de ajuste, possibilita que o trabalho desenvolvido possa se estender a aplicações de monitoramento, controle, dentre outras áreas e equipamentos.

Os resultados apresentados neste trabalho são uma primeira etapa para o projeto de um sistema de controle que visa reduzir o consumo de óleo combustível durante a partida da máquina.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Bamieh, B. and Giarre, L. (2002). Identification of linear parameter varying models. *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, 12(9), 841–853. doi:10.1109/CDC.1999.830205.
- Fernández-Guillamón, A., Gómez-Lázaro, E., Muljadic, E., and Ángel Molina-García (2019). Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82. doi:10.1016/j.rser.2019.109369.
- Gidon, D., Abbas, H.S., Bonzanini, A.D., Graves, D.B., Velni, J.M., and Mesbah, A. (2021). Lpv-based power system stabilizer: Identification, control and field tests. *Control Engineering Practice*, 109, 104725. doi:10.1016/j.conengprac.2021.104725.
- Gonzalez-Salazar, M., Kirsten, T., and Prchlik, L. (2017). Review of the operational flexibility and emissions of gas and coal-fired power plants in a future with growing renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 1497–1513. doi:10.1016/j.rser.2017.05.278.
- Hübel, M., Meinke, S., Andrén, M.T., Wedding, C., Nocke, J., Gierow, C., Hassel, E., and Funkquist, J. (2017). Modelling and simulation of a coal-fired power plant for start-up optimisation. *Applied Energy*, 208, 319–331. doi:10.1016/j.apenergy.2017.10.033.
- IEA (ed.) (2021). *World Energy Investment 2021*. International Energy Agency.
- Marx-Schubach, T. and Schmitz, G. (2019). Modeling and simulation of the start-up process of coal fired power plants with post-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 87, 44–57. doi:10.1016/j.ijggc.2019.05.003.
- NFPA (ed.) (2019). *NFPA 85 – Boiler and Combustion Systems Hazards Code*. National Fire Protection Association.
- Nogueira, F.G., Junior, W.B., da Costa Junior, C.T., and Lana, J.J. (2018). Lpv-based power system stabilizer: Identification, control and field tests. *Control Engineering Practice*, 72, 53–67. doi:10.1016/j.conengprac.2017.11.004.
- Toth, R., Lyzell, C., Enqvist, M., Heuberger, P.S.C., and Van den Hof, P.M.J. (2009). Order and structural dependence selection of lpv-arx models using a nonnegative garrote approach. In *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*, 7406–7411. doi:10.1109/CDC.2009.5399551.
- Tóth, R. (2010). *Modeling and identification of linear parameter-varying systems*, volume 403. Springer.
- Wang, C., MingLiu, Li, B., Liu, Y., and JunjieYan (2017). Thermodynamic analysis on the transient cycling of coal-fired power plants: Simulation study of a 660 mw supercritical unit. *Energy*, 122, 505–527. doi:10.1016/j.energy.2017.01.123.