

MODELAGEM DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO PARA O CONTROLE DE VAZÃO POR CONVERSOR DE FREQUÊNCIA BASEADO NA TEORIA DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

DANILO B. CAVALCANTI, JONATHAN J. P. MOURA, JUAN M. M. VILLANUEVA, HEBER P. GOMES

Grupo de Inteligência Computacional Aplicada a Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba

Via Expressa Padre Zé, 643-923 - Conj. Pres. Castelo Branco III, UFPB - Bloco K, 1º andar, LabGICA, João Pessoa, Paraíba, CEP: 58051-900

E-mails: danilo.cavalcanti@cear.ufpb.br, jonathan.moura@cear.ufpb.br, jmauricio@cear.ufpb.br, heberp@uol.com.br

Abstract— The use of control systems is usually associated with efficient and effective models. Water distribution systems still lack definite methods to control their main physical variables: flow rate and pressure. This work uses experiments based on frequency step stimuli of a motor-pump assembly inverter in order to establish a relation with the water flow rate of the main duct in analysis. From these tests and from the system identification theory, we proposed single output and single input autoregressive, transfer function and state-space, first order models to represent the system. The autoregressive model obtained the best results, presenting a fitness factor of above 82% for all validation cases. This model was implemented in a supervisory system and put in operation with the real plant, presenting the same well-succeeded results of the computational validation.

Keywords— System Identification, Hydraulic Systems, Autoregressive Systems, ARMAX

Resumo— A utilização de sistemas de controle costuma estar associada a modelos eficientes e eficazes. Sistemas de distribuição de água ainda carecem de métodos definitivos para controlar suas principais grandezas: vazão e pressão. Este trabalho tem por base experimentos com estímulos do tipo degrau de frequência em um conversor de frequência de um conjunto motor-bomba a fim de estabelecer uma relação desta grandeza com a vazão do duto principal da planta em análise. A partir destes ensaios e da teoria de identificação de sistemas, foram propostos modelos de primeira ordem de entrada única e saída única dos tipos autorregressivo, função de transferência e espaço de estados para representar o sistema. O modelo autorregressivo obteve os melhores resultados, apresentando um fator de ajuste acima de 82% para todos os casos de validação. Esse modelo foi implementado em um supervisor e posto em operação junto à planta real, apresentando os mesmos resultados bem-sucedidos da validação computacional.

Palavras-chave— Identificação de Sistemas, Sistemas Hidráulicos, Modelos Autorregressivos, ARMAX

1 Introdução

Com o advento da tecnologia, sistemas de Automação Inteligente e Controle de Processos vêm utilizando novas metodologias para a elaboração de estratégias na medição, identificação de sistemas, controle de plantas industriais e gerenciamento das informações, baseadas em técnicas de inteligência artificial (lógica *fuzzy* e redes neurais artificiais), modelos estatísticos e análise de grandes volumes de dados (*big-data* e *analytics*) (Bin Xu, 2018), (Sapozhnikova, 2017), (Pereira, 2017).

A sinergia destas novas tecnologias tem repercutido positivamente no setor industrial e de energia, visando principalmente a melhoria na eficiência dos processos. Por exemplo, destacam-se as redes de distribuição de água, cuja eficiência está diretamente associada às perdas (fugas de água), deterioração da rede, consumo da energia elétrica associada ao funcionamento do conjunto motor-bomba, controle de pressão e vazão, principalmente quando há variação da demanda no sistema de distribuição de água. A correta parametrização destas variáveis significa manter os custos baixos de operação (Villagra, 2017), (Valis, 2017).

Particularmente, o controle da vazão e pressão podem ser realizados por meio de válvulas de manobra, *bypasses* ou variadores de velocidade de rotação das bombas. A primeira é feita por meio do acréscimo de perda de carga, deslocando o ponto de operação do sistema progressivamente sob a curva característica do conjunto motor-bomba. A segunda estratégia consiste na instalação de uma tubulação que transporta parte da água bombeada a um reservatório de sucção. Finalmente, a terceira é o procedimento mais eficiente para o controle da vazão e pressão que consiste no controle de velocidade de rotação da bomba. Para esta última escolha, são utilizados conversores de frequência para o controle de rotação das bombas, com frequências de operação de 30 a 60 Hz, garantindo assim um rendimento médio de 80%. Portanto, a escolha dos parâmetros e integração do sistema motor-bomba e conversor de frequência operando a velocidade variável torna-se um tema de interesse para o desenvolvimento de pesquisas associadas à eficiência do sistema (Gomes, 2012), (Carvalho, 2000).

Com a finalidade de realizar estudos associados ao desempenho de uma rede de distribuição de água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (LENHS/UFPB), neste trabalho, foi desenvolvido um procedimento para a identificação de sistemas do

conjunto motor-bomba e conversor de frequência, cuja entrada é dada pela frequência do conversor do conjunto motor-bomba e a saída pela vazão do duto conectado.

2 Descrição do Sistema de Bombeamento de Água

Um sistema de bombeamento de água é composto basicamente de uma tubulação de aspiração, um conjunto motor-bomba e uma tubulação de recalque. Na Figura 1, ilustra-se a instalação de bombeamento utilizada para o bombeamento de água. As bombas hidráulicas convertem a energia mecânica, produzida por um motor, em energia hidráulica, na forma de pressão e energia cinética e/ou potencial. Assim, a bomba fornece um campo de pressões e vazões para as tubulações, que por sua vez são transformadas na forma da energia final desejada (Gomes, 2012).

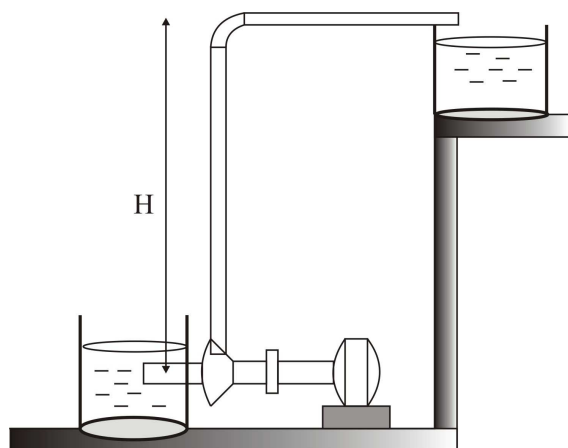


Figura 1. Sistema de bombeamento.

A função da bomba é fornecer a energia ao líquido para que possa ser realizado o trabalho de movê-lo, continuamente, do reservatório inferior até a saída do tubo de recalque, vencendo todas as resistências encontradas no caminho para chegar no ponto final com uma vazão desejada. Para realizar esta operação, o controle da rotação do conjunto motor-bomba pode ser realizado por meio do uso de conversores de frequência, aprimorando, assim, o desempenho operacional hidráulico e elétrico, ocasionando em uma redução dos custos (Gomes, 2012).

Dentre as opções, o uso de conversores de frequência para variar a rotação dos motores apresenta-se como a técnica mais eficiente. Muitas aplicações em bombeamentos que requerem velocidade de rotação variável oferecem grande potencial para economia. As vantagens estão associadas à redução de consumo energético, confiabilidade e vida útil dos equipamentos.

Em sistemas de distribuição de água em que há a necessidade de controlar a vazão e a pressão em função da demanda, o bombeamento de água através de estações elevatórias acionadas com conversores de frequência se apresenta como uma excelente alternativa.

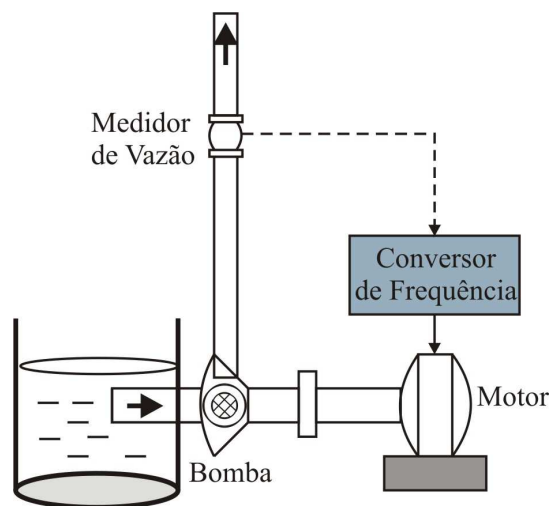


Figura 2. Acionamento do Sistema de bombeamento.

Na Figura 2, apresenta-se o esquema básico da configuração de um sistema de bombeamento com conversor de frequência. É possível associar um controlador, ao conjunto motor-bomba, e um sistema de sensores, às grandezas de interesse. Ao perceber a diminuição da necessidade de vazão na rede, esse sistema associado reduz automaticamente a velocidade de rotação do motor por meio da atuação no conversor de frequência, por exemplo. Quando a vazão requerida é maior que a estabelecida, o conversor aumenta a velocidade de rotação do motor.

Com a finalidade de estabelecer a relação entre a frequência de rotação do motor e a vazão, foram desenvolvidos modelos matemáticos baseados na teoria de identificação de sistemas. Para atingir este objetivo, na sequência, serão apresentados os procedimentos para a realização dos ensaios experimentais em uma rede de distribuição de água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (LENHS/UFPB).

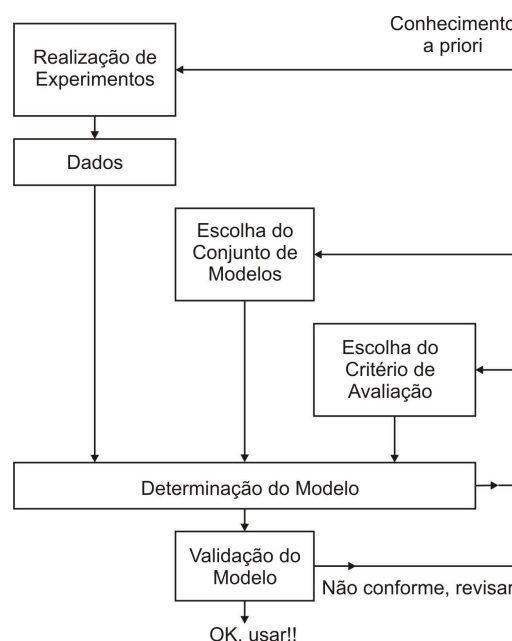


Figura 3. Procedimento para identificação do sistema.

A partir da coleta de dados, foram desenvolvidos os modelos do tipo única entrada e única saída (SISO - *single input/single output*), sendo a entrada a frequência e a saída a vazão. O procedimento seguido neste trabalho para identificação de sistema segue o laço proposto por (Ljung, 1999), (Aguirre, 2015), como ilustrado na Figura 3.

3 Aquisição de Dados da Planta

A planta disponível no LENHS/UFPB possui um conjunto de ferramentas e estruturas que permitem o ensaio de diversas aplicações de dinâmica de fluídos. O sistema possui sensores de pressão e vazão e válvulas manuais e automatizadas para aferir e modificar o transporte de fluídos (tipicamente água do sistema de abastecimento municipal) por suas tubulações. Há um sistema supervisorório que se comunica por meio do protocolo Modbus a todos os dispositivos eletrônicos, incluindo um controlador lógico programável (CLP). O operador adquire algum dado de interesse e atua sob o sistema por meio de um supervisorório feito em LABVIEW. Na Figura 4, ilustra-se o supervisorório da planta e o subsistema utilizado como referência para a identificação do sistema.

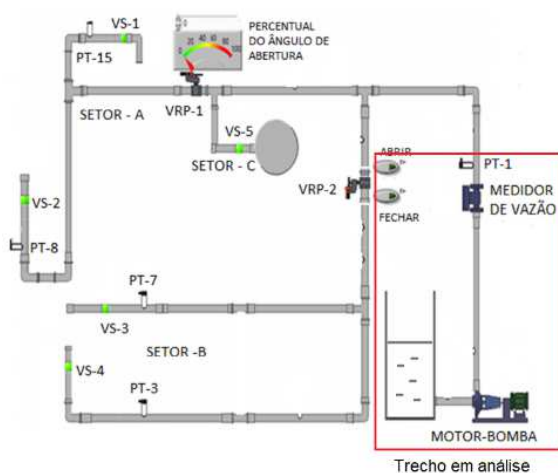


Figura 4. Rede de distribuição de água do LENHS e subsistema para identificação.

3.1 Considerações iniciais

Decidiu-se analisar apenas o trecho inicial da planta, pois ele se mostrou compatível com o tempo e o escopo do projeto de pesquisa da equipe. Este trecho possui um reservatório de água mineral, um conjunto motor-bomba e alguns sensores de vazão e pressão. Este trabalho tem como objetivo estabelecer a relação entre a frequência de entrada do alternador do conjunto motor-bomba e a resposta dinâmica da vazão na saída do trecho destacado.

Primeiramente, foi estudada a natureza do modelo, levando-se em consideração que o sistema seria SISO e com entrada “frequência do alternador do

conjunto motor-bomba”; e saída “vazão na tubulação principal”.

Experimentos preliminares de resposta ao degrau foram feitos para obter a ordem de grandeza do tempo de resposta do sistema. Após ensaios com alguns degraus na zona de operação do conjunto motor-bomba, percebeu-se que o sistema alcançava um patamar estável e não-oscilatório em cerca de 60 segundos. Adotou-se uma taxa de amostragem de 10 amostras/segundo para a medição das grandezas a fim de atender à taxa de mínima de amostragem de Nyquist de amostragem e de possuir um número de pontos suficientemente grande para garantir resolução e a possibilidade de pré-processamento para estudos futuros.

Na Figura 5, apresenta-se um dos trechos de um ensaio. A partir da análise dos dados, confirma-se que a dinâmica do sistema é da ordem de segundos e nunca apresentou *overshoot* para degraus de entrada à exceção de transitórios de partida do motor (descartados para todos os ensaios desconsiderados para a modelagem). Isso levou à proposição de que os modelos adequados seriam provavelmente de ordem 1 e com constante de tempo da ordem de alguns segundos.



Figura 5: Trecho de um dos ensaios utilizados para a identificação do sistema.

Também foi proposto que a medição da vazão possui ruído aleatório cujas contribuições podem ser associadas à natureza turbulenta do transporte e à quantização do sistema de aquisição de dados. Este trabalho adotará o ruído como aditivo, para simplificar a obtenção do modelo. O ruído também será gaussiano (com média nula) e branco para simplificar o controle da potência do ruído durante as simulações.

3.2 Realização de ensaios

Os dados começaram a ser adquiridos considerando operação em regime permanente; ou seja, o conjunto motor-bomba foi ligado previamente à aquisição em

um valor seguro predefinido para, só então, se iniciar o experimento.

Em geral, os ensaios consistiram de 10 minutos de aplicação de um somatório de degraus de entrada arbitrariamente escolhidos entre 27 Hz a 60 Hz, aplicados em intervalos entre 70 s e 120 s. A Equação (1) explicita o sinal de entrada (Fin) em função do tempo. As constantes Kn devem ser escolhidas de tal forma que o conjunto motor-bomba nunca opere fora da zona estipulada. Apresenta-se, na Figura 5, um trecho de ensaio que possui um exemplo do sinal de entrada descrito (frequência) e o correspondente sinal de saída obtido (vazão).

$$F_{in}(t) = K_1 \cdot u(t) + K_2 \cdot u(t - t_0) + K_3 \cdot u(t - t_1) + \dots \quad (1)$$

Isso foi feito para tanto abranger o máximo de pontos de operação, quanto respeitar limites de operação dos equipamentos. O objetivo foi obter a melhor aproximação linear para todo o intervalo.

O conjunto de dados utilizado para a obtenção de parâmetros dos modelos foi um ensaio contendo apenas com degraus crescentes de frequência. Para a validação dos modelos, foram tomados outros dois ensaios com degraus aleatórios em frequência e em duração do estímulo, convencionados como conjuntos de dados A e B.

Os dados foram pré-processados utilizando o *framework* de identificação de sistemas de MATLAB®/Simulink® (Ljung, 2017) para realizar as seguintes operações como subdivisão de experimentos e combinação de intervalos.

4. Modelagem do Sistema de Bombeamento

O conjunto de ferramentas de identificação de sistemas do toolbox de MATLAB® (Ljung, 2017) foi usado para auxiliar com a implementação de algoritmos para a obtenção dos parâmetros de modelos. O universo de modelos adotados para este estudo foi o de modelos paramétricos. A partir dessas condições, foram experimentados algoritmos para representação em equações de espaço de estados, em funções de transferência e em modelos autorregressivos.

Esta etapa foi finalizada com a obtenção dos parâmetros otimizados para modelos de primeira ordem do tipo ARMAX (*AutoRegressive Moving Average model with eXogenous input*), função de transferência e espaço de estados; e suas respectivas métricas erro médio quadrático normalizado (NRMSE) (Hyndmana, 2006) e erro final de predição (FPE) (Ljung, 2017) para serem usadas em comparações de modelos.

A Figura 6 exibe a auto-validação dos modelos com o próprio conjunto de dados utilizado para criá-los. O destaque exibe um detalhe do ensaio completo, para identificar diferenças e semelhanças que são pouco visíveis observando o resultado por completo.

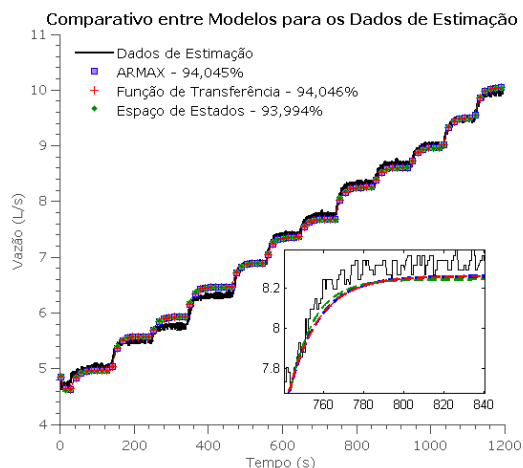


Figura 6: Comparação entre modelos do tipo ARMAX, espaço de estados e função de transferência.

O termo “ajuste” indica o percentual de aproximação do modelo em relação aos valores experimentais tomando, como exibido na Equação (2). Os modelos ARMAX e de função de transferência obtiveram ajuste de 94,05%, enquanto que o modelo de espaço de estados obteve 93,99%. O posterior cálculo do valor FPE resultou em 0,0002074 para os modelos ARMAX e de espaço de estados e 0,008757 para o modelo de função de transferência. A Tabela 1 resume os indicadores de compatibilidade obtidos.

$$\text{Ajuste} = 100 \cdot (1 - \text{NRMSE}) \quad (2)$$

Tabela 1 : Ajuste e FPE para os modelos otimizados.

Modelo	ARMAX	Função de Transferência	Espaço de Estados
Ajuste	94,05%	94,05%	93,99%
FPE	0,0002074	0,008757	0,0002074

Os modelos obtiveram um desempenho de ordem de grandeza semelhante. Quanto maior o ajuste, mais o modelo se aproxima dos dados experimentais. Quanto menor o FPE, mais adequado é o modelo para representar aquele conjunto de dados.

Nesta altura, pode-se escolher o modelo autorregressivo por apresentar os melhores índices combinados de desempenho. Entretanto, como a diferença entre todos foi desprezível, outros fatores como facilidade de implementação, tempo de obtenção do modelo e aplicação podem ser utilizados como critério discriminatório.

O resultado mais promissor foi o do modelo autorregressivo ARMAX de primeira ordem, com atraso unitário nas entradas e saídas que incorpora um termo de ruído aditivo gaussiano. Ele foi escolhido tanto por ter as melhores métricas de desempenho quanto pela facilidade de implementação nos sistemas digitais disponíveis.

O modelo é dado por:

$$y(k) = A \cdot y(k-1) + B \cdot u(k-1) + C \cdot e(k-1) + e(k) \quad (3)$$

em que: k representa a k -ésima amostra sob uma taxa de amostragem f_s de 10 amostras/s. y representa a saída do sistema (vazão), u é a entrada do sistema (frequência) e e o termo de ruído gaussiano aditivo na saída do sistema.

Os coeficientes da equação a diferenças A, B e C são os parâmetros do modelo que estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros obtidos para o sistema ARMAX de primeira ordem adotado.

Parâmetro	Valor
A	0,993080397855229
B	0,001230202578224
C	-0,016912793620212

Como o modelo é ARMAX, é possível utilizá-lo com a presença ou ausência de ruído aditivo. A potência do ruído pode ser estimada previamente ou ajustada durante a operação. As Figuras 7, 8 e 9 exibem os casos em que não há ruído aditivo no modelo; em que há um ruído de -37 dBW, estimado durante a operação; e onde há um ruído de -20 dBW, respectivamente. Observa-se que o modelo com adição de ruídos gaussianos brancos de até -37 dBW apresenta uma dinâmica comparável à do sistema medido; ao mesmo passo que ruídos de potência maior, como o caso de -20 dBW, se distanciam da dinâmica real do sistema, mas não causam divergência numérica. Isso sugere que o modelo possa servir para simular situações fora do funcionamento comum da planta sem danificar nenhum componente real.

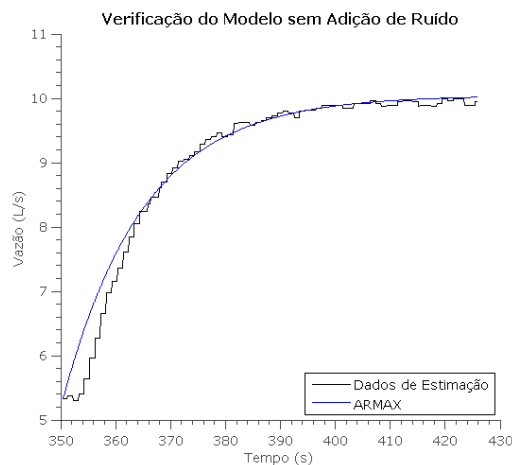


Figura 7: Comparação entre dados e modelo reconstruído sem adição de ruído.

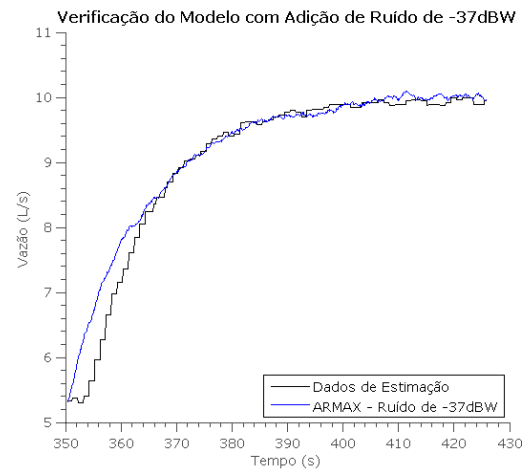


Figura 8: Comparação entre dados e modelo reconstruído com ruído aditivo de potência -37 dBW.

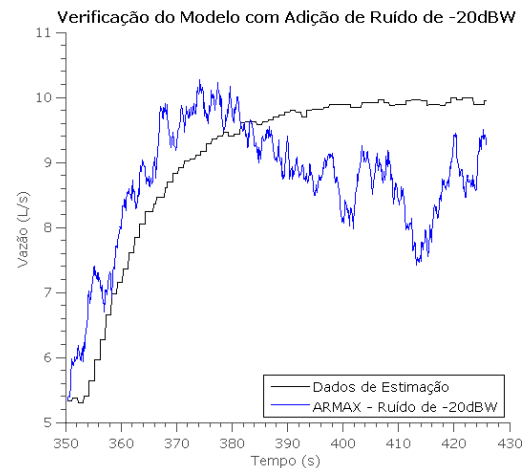


Figura 9: Comparação entre dados e modelo reconstruído com ruído aditivo de potência -20 dBW.

5. Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados de validação do modelo por meio da realização de dois ensaios com características diferentes aos ensaios usados para determinação do modelo. Após a validação do modelo serão apresentados os resultados do modelo inserido no sistema supervisor da rede de distribuição de água do LENHS.

5.1 Validação do Modelo

Com a finalidade de realizar a validação do modelo proposto (ARMAX), foram realizados dois ensaios nos quais o sinal de frequência (entrada do modelo) variasse de acordo à faixa dinâmica de funcionamento do sistema, como ilustrado nas Figuras 10 e 11. Estas variações podem ser estabelecidas pelo operador com a finalidade de controlar a vazão de saída de acordo com a demanda da água.

Nas Figuras 10 e 11 são apresentados os sinais da vazão (saída) do modelo considerando-se os sinais de entrada de frequência dos ensaios A e B. Para ambos os casos pode ser observado um desempenho positivo do modelo determinado, com fatores de ajuste para o modelo ARMAX de 89,416% e 82,508%, respectivamente. O destaque em ambas as Figuras 10 e 11 serve para acentuar as características individuais dos modelos, uma vez que eles aparentam se sobreporem, ao observar o ensaio completo.

Esse resultado sugere que o sistema apresenta uma dinâmica muito próxima ao comportamento exibido pela planta durante sua operação e que seu ponto de operação em regime permanente esteja a, pelo menos, +/- 10% do valor esperado da planta real.

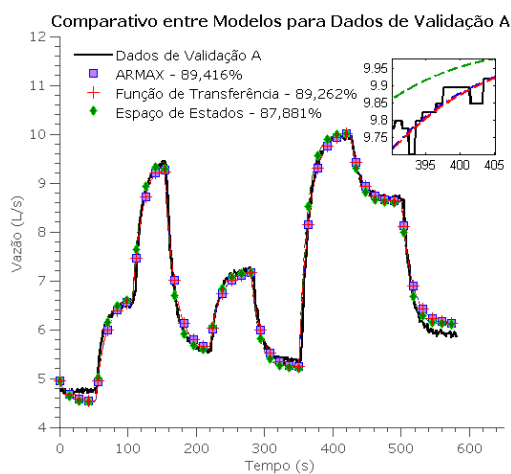


Figura 10: Validação do modelo para o ensaio A.

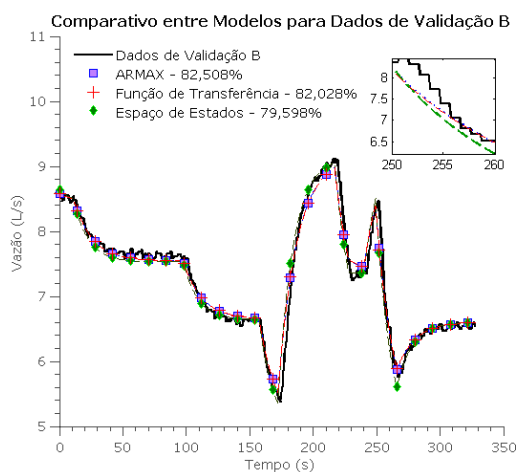


Figura 11: Validação do modelo para o ensaio B.

5.2 Implementação do modelo na rede de distribuição do LENHS

Uma vez determinado o modelo e realizada a validação do mesmo, o modelo encontra-se disponível para ser utilizado em conjunto com a planta, de acordo

com o procedimento metodológico de identificação de sistemas (Ljung, 1999) apresentado na Figura 3.

O sistema ARMAX foi implementado em *software* utilizando a ferramenta computacional LabVIEW® no sistema supervisor existente no LENHS. A implementação calcula a função de recorrência após cada passo de cálculo, definido em 100 ms, considerando valores iniciais nulos.

A Figura 12 apresenta um trecho do painel frontal do supervisor implementado destacando-se os controles de liga e desliga do conjunto motor-bomba e a frequência de operação do conversor. O gráfico desenhado pelo programa exibe a curva tal qual calculada pela resolução das equações do modelo (Equação (3)) e a curva dos pontos obtidos pelo sensor de vazão na tubulação.

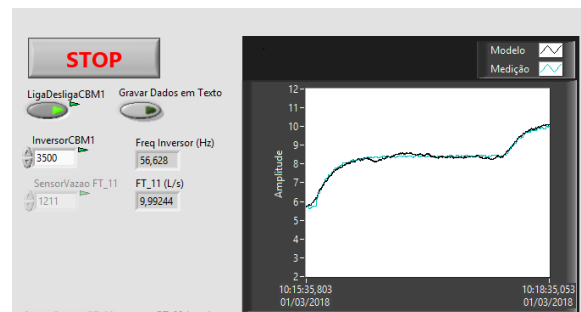


Figura 12: Painel frontal do LabVIEW do sistema supervisor implementado.

As Figuras 13 e 14 exibem capturas de momentos de teste do modelo proposto em conjunto à operação normal do supervisor. Estímulos do tipo sonatórios de degraus, como os apresentados na Equação (1), foram impostos tomando seqüências de frequências aleatórias, na zona típica de operação entre 27 Hz e 60 Hz, e o comportamento de ambas as curvas do modelo e da medição foram observadas.

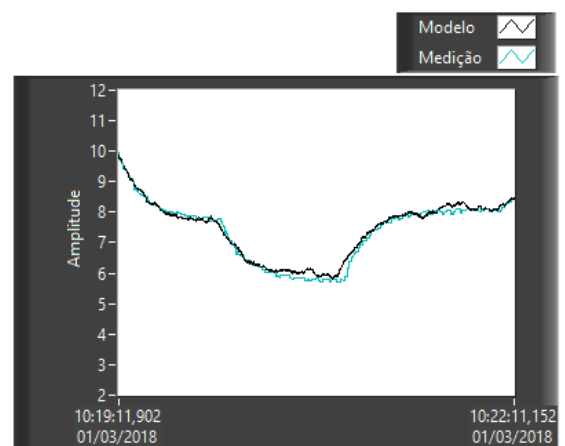


Figura 13: Trecho do funcionamento do supervisor para testar o modelo.

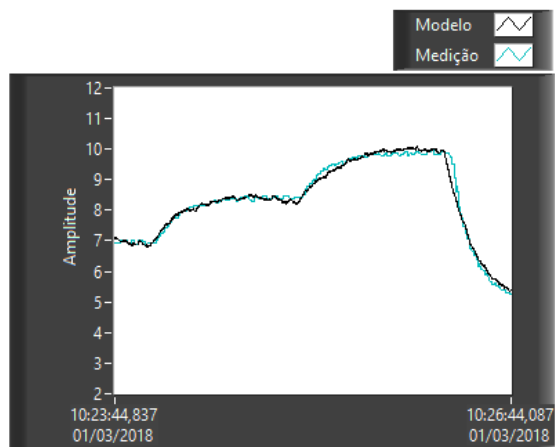


Figura 14: Trecho do funcionamento do supervisor para testar o modelo.

O modelo, operando com ruído aditivo gaussiano de -37 dBW, se comportou tal como analisado durante o processo de validação, com grau de proximidade como apresentado na subseção 5.1.

6 Conclusões

Este trabalho obteve modelos de primeira ordem do tipo ARMAX, função de transferência e espaço de estados para modelar um trecho de um sistema hidráulico como um sistema de única entrada e única saída (SISO): vazão do duto principal em função da frequência do alternador do conjunto motor-bomba.

Ao focar o modelo ARMAX pelo seu melhor desempenho e facilidade de implementação para testes, foram obtidos resultados que concluem que este modelo determinado acompanha o sinal de grandeza da vazão (saída) com um fator de ajuste superior a 82%, para diversas condições de operação do conversor de frequência (entrada).

O sistema digital se mostrou estável mesmo sobre condições exigentes de baixa relação sinal-ruído (alto nível de ruído), sugerindo que o modelo é robusto para elevados níveis de ruído.

A implementação do sistema em *software* e seu funcionamento em conjunto com o sistema supervisor reforçam as análises apresentadas, tomando por base uma aplicação real.

Os resultados atendem aos objetivos de servir de referência para a criação de sistemas de controle para controlar a planta e de prever, com margem de erro conhecida, o comportamento do sistema em função de entradas do tipo degrau. Espera-se como trabalhos futuros a modelagem de trechos maiores e mais complexos de sistemas hidráulicos análogos e a inclusão de dados de pressão em alguns pontos dos dutos como parte do modelo.

Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (LENHS/UFPB) pela estrutura fornecida para a realização de experimentos e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica PPGEE/UFPB por incentivar os estudos na área.

Referências Bibliográficas

- Aguirre L.A. (2015). Introdução à identificação de sistemas -Técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas: Teoria e Aplicação. Universidade Federal de Minas Gerais. 4^o Edição.
- Bin Xu; Yingxin Shou (2018). Composite Learning Control of MIMO Systems with Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Volume: PP, Issue: 99. Pages: 1 - 1.
- Carvalho J.A., Mello C.R., Braga R.A.J., Renato C.H., Santana M.J. (2000). Utilização do Inversor de Frequência em Sistemas de Irrigação para Controle de Vazão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 4, N^o 1, p. 51-56. Campina Grande, PB. DEAg/UFPB.
- Gomes H. P. (2012). Sistemas de Bombeamento Eficiência Energética. 2^o Edição. Editora Universitária - UFPB.
- Hyndman R.J., Koehler A.B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. International Journal of Forecasting. Volume 22, Issue 4, Pages 679-688.
- Leydiana de Sousa Pereira; José Leão e Silva Filho; Danielle Costa Moraes (2017). Identifying maintenance priority criteria in water distribution networks using cognitive maps. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Pages: 3647 - 3652.
- Ljung L. (1999). System Identification: Theory for the User. Prentice Hall.
- Ljung L. (2017). System Identification Toolbox Matlab/Simulink.
- Sapozhnikova M.U., Gayanova M.M., Nikonov A.V. (2017), Nonlinear Filtering Algorithms of Acoustic Signals in Oil Producing Wells. ICIEAM International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing.
- Valis D.; Hasilová K.; Forbelská M.; Pietrucha-Urbanik K. (2017). Modelling water distribution network failures and deterioration. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Pages: 924 - 928.
- Villagra A; Pandolfi D.; Leguizamón G.; Alba E. (2017). Optimization of potable water networks with hybrid metaheuristics. XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC). Pages: 1 - 6.