

PROJETO DE UM COMPENSADOR LEAD-LAG DIGITAL NA MODALIDADE POLE-SHIFTING PARA REDUZIR OSCILAÇÕES EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

MAYSA S. ALVES, ERICK M. ROCHA, WALTER B. JUNIOR, KEVIN L. MARCILLO, MAICKSON P. V. LEÃO, RENAN L. P. DE MEDEIROS

Universidade Federal do Pará

Laboratório de Automação Industrial

Rua Augusto Corrêa, número 1, Bairro Guamá, Belém – PA, CEP 66075-110

E-mails: maysasousaalves@gmail.com, erickmr22@yahoo.com.br, walbarra@ufpa.br, klucasmarcillo@gmail.com, maicksonleao@gmail.com, renanlandau@yahoo.com.br

Abstract— The application of fluid pumping systems in the most varied areas and the concern about its operation and performance, avoiding accidents or malfunction, justifies the environment of auxiliary protection systems just as the application's control techniques that ensure the operation of these systems within their operational limits. In general, the system is based on pumping fluid through a piping using a motor-pump system. Due to this characteristics from own system, was verified that, for different operating conditions (low, medium, high speed) the group motor-pump showed undesired oscillations which were transferred for the others system components (pipes). Thereby, this paper presents an experimental study on the development, implementation, and tests of a design of a Lead-Lag Digital Compensator in the mobility Pole-Shifting, that will can reduce the oscillations in a Pumping System. The control law was boarded in an Arduino Due microcontroller from the ARM 32 family, that by a frequency inverter controls the speed of the motor-pump system, reducing the oscillations observed in open-loop.

Keywords— Digital Lead-Lag Controller, Pole Allocation Technique, Pumping System, Systems Identification.

Resumo— A aplicação de sistemas de bombeamento de fluidos nas mais variadas áreas e a preocupação com sua operação e desempenho, evitando acidentes ou mau funcionamento, justifica o ambiente dos sistemas de proteção auxiliar, assim como a aplicação de técnicas de controle que garantam o funcionamento desses sistemas em seus limites de operação. Em geral, o sistema é baseado no bombeamento de fluido através da tubulação usando um sistema de motor-bomba. Devido as características do próprio sistema, foi verificado que, para diferentes condições de operação (baixa, média, alta velocidade) o conjunto motor-bomba apresentou indesejadas oscilações que foram transferidas para outros componentes do sistema (tubos). Assim, esse trabalho apresenta um estudo experimental no desenvolvimento, implementação e testes de um projeto de um Compensador *Lead-Lag* Digital na modalidade *Pole-Shifting*, que poderá reduzir as oscilações em um Sistema de Bombeamento. A lei de controle foi embarcada em um microcontrolador Arduino *Due* da família ARM 32, que por um inversor de frequência controla a velocidade do sistema motor-bomba, reduzindo as oscilações observadas em malha aberta.

Palavras-chave— Controlador Lead-Lag Digital, Técnica de Alocação de Polos, Sistema de Bombeamento, Identificação de Sistemas.

1 Introdução

Os sistemas de bombeamento de fluidos estão presentes em diversas aplicações industriais, como por exemplo, transporte de fluidos inflamáveis (Braga, 2015), escoamento de minério (Gouvea, 2008; Gava, 2016; Barcelos; Araujo; Alonso, 2015), sistemas de resfriamento (Leite, 2011; Pacco, 2008), além do transporte e distribuição de água potável (Rocha et al, 2017). Para que esse tipo de sistema possa ser operado de forma segura e eficiente, é imprescindível que seja feita a investigação de técnicas de controle que melhorem o desempenho destes sistemas operando em malha fechada. Problemas como vazamento ou obstrução progressiva da tubulação podem ser responsáveis por mudança na dinâmica do sistema, provocando mau funcionamento e comportamentos indesejáveis como o golpe de aríete (Rocha et al, 2017; Chen; Fu, 2010; Chaudhry, 2014). O objetivo é então trabalhar em um projeto de controle que seja tolerante a faltas, permitindo com que a planta opere dentro dos limites de segurança.

Os estudos envolvendo sistemas de bombeamento tem como objetivo principal a proteção da estrutura física do sistema, bem como dos demais subsistemas que dependem direta ou indiretamente de atuadores hidráulicos (Sarica; Panacharoenawad, 2012).

Sistemas industriais baseados em motores necessitam de um monitoramento durante o processo de operações para que haja um funcionamento seguro e eficiente de plantas industriais e de geração de energia. Os sistemas de bombeamento hidráulico não fogem desta realidade.

O progresso vindo da eletrônica de potência trouxe diversos benefícios. Por conta disso, aplicação de motores de indução trifásicos tem sido frequente em funções de alto desempenho dinâmico, como por exemplo, o controle de velocidade em bombas com o intuito de controlar o fluxo do fluido, ou quando o fluido bombeado apresentar variações de viscosidade.

Também é observado nestes sistemas oscilações indesejadas quando ocorrem variações de carga e, em consequência disso, podem acarretar danos ao sistema, que vão desde algumas folgas nas tubulações até o aquecimento do conjunto motor-bomba. Partindo

desse princípio, é necessário o desenvolvimento de um sistema que monitore e faça o controle das condições de operação, tendo em vista a integridade dos componentes e equipamentos que compõem um sistema de bombeamento hidráulico.

Este artigo tem como objetivo projetar um controlador *Lead-Lag* digital na estrutura RST (Landau; Zito, 2006) para amortecer as oscilações eletromecânicas provocadas por variações de velocidade em sistemas de bombeamento hidráulico, no caso deste trabalho, quando o sistema opera em médias velocidades. Todo o trabalho aqui desenvolvido visa garantir a integridade dos equipamentos e do operador, evitando possíveis acidentes e mau funcionamento. Vale ressaltar que a variável a ser controlada nesse trabalho é a velocidade do processo motor-bomba.

Primeiramente, objetiva-se utilizar um Sinal Binário Pseudoaleatório, também chamado de SBPA (ou PRBS – *Pseudo Random Binary Signal*) para que seja feita a identificação de um modelo ARX (*Autoregressive with Exogenous Inputs*) do sistema em estudo. Dando prosseguimento ao trabalho, deseja-se aplicar a técnica conhecida como *Pole-Shifting* baseada em Alocação Polinomial de Polos no projeto do controlador *Lead-Lag* digital na estrutura canônica RST. Após simulações com o auxílio do ambiente *Matlab/Simulink*, para validar a técnica, a validação prática da metodologia foi efetuada no sistema real. Para isso, a lei de controle projetada foi embarcada em um microcontrolador da família ARM 32 bits onde uma série de testes foi realizada no sistema de bombeamento hidráulico, descrito a seguir.

2 Sistema de Bombeamento Hidráulico Real em Laboratório

O Sistema de Bombeamento Hidráulico utilizado é conhecido como Bancada de Bombeamento Hidráulico e pertence ao Laboratório de Automação Industrial da Universidade Federal do Pará. É basicamente composta pelo conjunto motor-bomba, tubos, conexões, válvulas, sensores e reservatório. Essa bancada foi construída com o intuito de simular o comportamento de um sistema hidráulico real. A Figura 1 apresenta um esquema de funcionamento da bancada de bombeamento hidráulico montado no Laboratório de Automação Industrial.

Neste esquema é possível observar velocidade do conjunto motor-bomba sendo regulado por um controlador proporcional-integral (PI) presente no interior de um inversor de frequência. A velocidade de referência, chamada de ω_{ref} é definida pelo operador utilizando um potenciômetro. No entanto, apesar da existência do controlador PI, foi constatado, através de testes em laboratório, que o sistema ainda possui um comportamento oscilatório, sendo assim necessário o projeto do controlador *Lead-Lag* digital para mitigar as oscilações desse sistema.

Na Figura 2 é mostrada a bancada de bombeamento hidráulico real montada em laboratório. Seus componentes são explicitados abaixo.

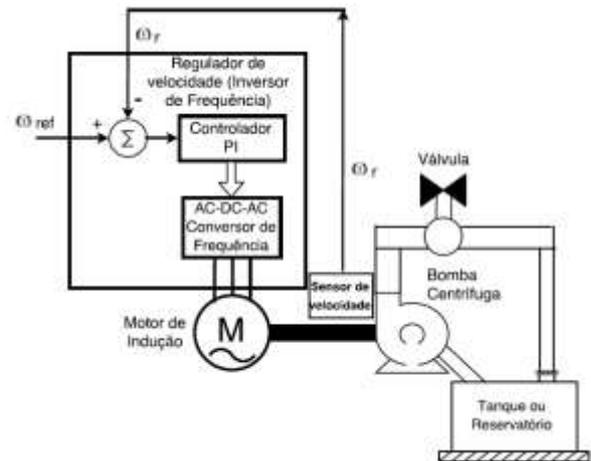


Figura 1. Esquema Funcional do Sistema de Bombeamento Hidráulico.

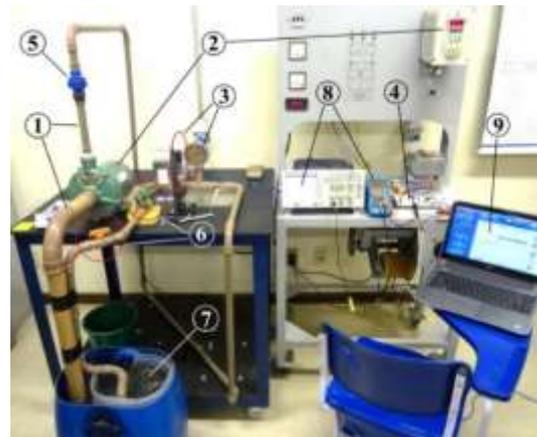


Figura 2. Sistema de Bombeamento Hidráulico (Rocha *et al* 2017).

Onde:

1. Tubulações de sucção e recalque;
2. Subsistemas – inversor e motor bomba;
3. Transdutor de pressão e Manômetro;
4. Controlador *Lead-Lag* Digital;
5. Válvula de retenção – previne o fluxo reverso da água;
6. Válvula proporcional – emula faltas graduais e abruptas;
7. Tanque ou reservatório;
8. Osciloscópio e Multímetro para medição e aquisição de dados;
9. Interface de computador homem – máquina.

3 Estimação Paramétrica e Identificação do Sistema

Quando o sistema está em operação e há variação de carga, aparecem oscilações indesejadas nas baixas e médias velocidades. Uma variação de carga na planta operando em baixas e médias velocidades significa que o sistema terá um tempo maior para amortecer oscilações provocadas por variações de carga.

Para reverter esse problema, um controlador *Lead-Lag* digital na estrutura RST é projetado com o intuito de amortecer essas oscilações. Porém, antes que este controlador seja desenvolvido, é necessário fazer a aplicação do SBPA e analisar como a planta reage a aplicação desse sinal, para que os dados do sistema sejam coletados e assim possa ser realizada a identificação do sistema.

3.1 Projeto do sinal de excitação SBPA

O sinal de excitação SBPA, utilizado nos testes de identificação, é na forma de uma sequência de pulsos retangulares, modulados em largura, de tal modo que seu espectro de frequências se aproxime aquele de um ruído branco, em determinada faixa de frequência de interesse.

O SBPA neste trabalho foi projetado partindo-se do princípio de que a faixa de frequências de interesse a qual contém a frequência natural da oscilação observada no sistema de bombeamento hidráulico real é de 2,88Hz. Assim sendo, é definiu-se uma faixa de interesse cujas frequências mínima e máxima foram as seguintes: $f_{\min} = 0,01\text{Hz}$ e $f_{\max} = 4\text{Hz}$.

Com o estabelecimento da faixa de frequências de interesse, o valor do tempo de atualização das amostras da sequência SBPA, T_{bit} , e número de células que constituirão o registrador de deslocamento do SBPA (N_{cel}) podem ser calculadas utilizando-se as equações (1) e (2) (Horowitz; Hill, 1989):

$$f_{\max} = \frac{0,44}{T_{bit}} \quad (1)$$

$$f_{\min} = \frac{1}{(2^{N_{cel}} - 1) * T_{bit}} \quad (2)$$

onde os valores obtidos foram $T_{bit} = 0,11\text{s}$ e $N_{cel} = 10$ células. Com esses resultados, sabe-se então que o registrador do SBPA apresentará 10 células e o tempo para gerar cada amostra da sequência será de 0,11 s. O passo seguinte foi implementação do registrador do SBPA com as características dos resultados obtidos e a análise de seu comportamento. Assim, para gerar um sinal SBPA com 10 células deve-se ter os *bits* 7 e 10 realimentados via uma porta lógica OU-Exclusivo (XOR) (Aguirre, 2015). A Figura 3 apresenta um diagrama desenvolvido para esse registrador de deslocamento do SBPA.

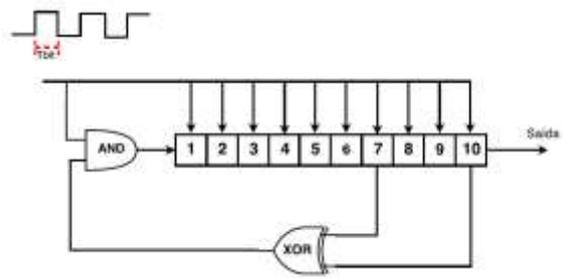


Figura 3. Diagrama do Registrador de Deslocamento do SBPA.

3.2 Testes de Identificação Paramétrica do Sistema de Bombeamento Hidráulico utilizando o Modelo ARX

Inicialmente aplica-se o SBPA, projetado anteriormente, que deve estar embarcado no microcontrolador para que posteriormente seja usado para excitar a planta e assim possa ser realizada a coleta dos dados de entrada.

Para a identificação de um modelo autorregressivo com entradas externas (ARX) foi excitada a velocidade do sistema motor-bomba para diferentes níveis de velocidade, classificadas em baixas (900 à 1000 rpm) e médias (1000 à 1200 rpm) velocidades. Foram coletados sinais com o osciloscópio para médias velocidades, logo, a identificação do sistema foi de um modelo para médias velocidades. O sinal de entrada, definido pelo SBPA ($u1$) e o sinal de saída, representado pela saída da planta ($y1$), podem ser observados na Figura 4.

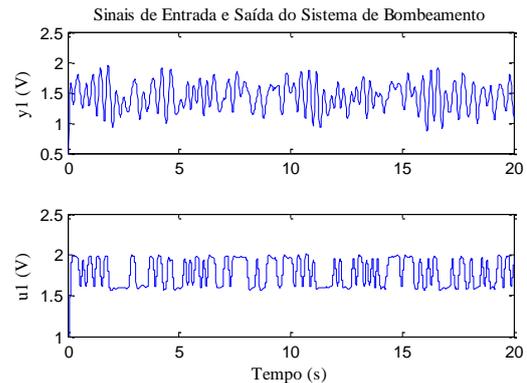


Figura 4. Entrada e saída coletados do sistema.

Depois da aquisição, esses dados foram transferidos para a *Toolbox Ident* do *Software Matlab* para serem tratados e prontos para o processo de identificação. Os sinais filtrados são divididos para que metade fique no bloco *To Workspace* e outra metade vá para o bloco *Validation Data* da *Toolbox Ident*. Dessa forma, é realizada a estimação de um modelo polinomial, denominado ARX [2 2 1], em tempo discreto, apresentando 2 polos, 2 zeros. Após esse processo, é obtido um modelo que apresenta 80% de estimação.

É verificado, na Figura 5, que este modelo foi bem estimado, pois é notável que a saída estimada (em

azul) está bem casada com a saída real (em verde) na figura que mostra a saída real e a saída estimada.

Por intermédio da identificação foram constatados valores de frequência natural $\omega_n = 18,1$ rad/s e constante de amortecimento $\xi = 0,14$, com período de amostragem $T_s = 0,02$ s. A representação desse modelo identificado em tempo discreto pode ser visualizada nas equações (3) e (4).

$$A(z) = 1 - 1,78z^{-1} + 0,902z^{-2} \quad (3)$$

$$B(z) = -0,09797z^{-1} + 0,1836z^{-2} \quad (4)$$

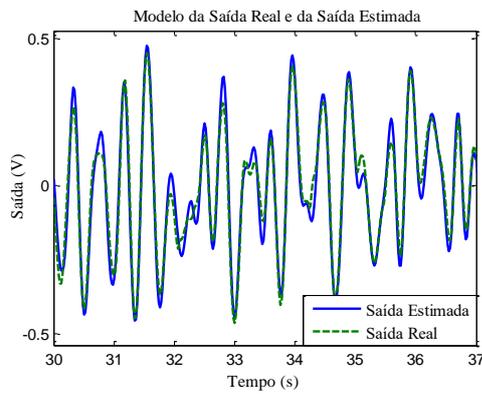


Figura 5. Saída real e saída estimada do modelo do sistema identificado.

Para ratificar a validade do modelo, o gráfico da Figura 6 mostra a correlação e o resíduo e evidencia uma boa estimativa do modelo identificado. Através da análise do resíduo, é observado que o modelo foi capaz de extrair praticamente toda a informação determinística presente nos dados. No gráfico de correlação cruzada da entrada para o resíduo, o objetivo é que fique dentro da faixa de tolerância, ou pelo menos até o retardo, que corresponde a ordem do modelo. Neste caso, é analisado que para o modelo de segunda ordem do sistema em teste, o gráfico de correlação atendeu a essa faixa de tolerância.

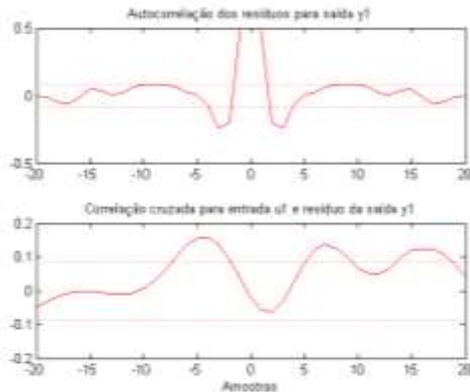


Figura 6. Gráfico de correlação e resíduo do sistema.

3.3 Projeto de um Compensador Lead-Lag Digital utilizando a Técnica de Posicionamento de Polos na Modalidade Pole-Shifting

A Alocação Polinomial de Polos proporciona o projeto de controladores digitais na estrutura RST para sistemas que são estáveis ou instáveis, de fase mínima ou não mínima, sem haver restrição alguma a respeito da ordem da planta e ao atraso de tempo.

Inicialmente é escolhido o modelo da planta discretizada $G(z^{-1})$, definida pela função de transferência (FT) do sistema em malha aberta (MA), exibida na equação (5). Os polinômios A e B são definidos por (6) e (7).

$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (5)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} \quad (6)$$

$$B(z^{-1}) = b_0z^{-1} + b_1z^{-2} \quad (7)$$

Após ter o modelo da planta definido, o modelo do controlador em tempo discreto $C(z^{-1})$ é estabelecido pela equação (8), em que os polinômios R e S são definidos em (9) e (10), respectivamente.

$$C(z^{-1}) = \frac{R(z^{-1})}{S(z^{-1})} \quad (8)$$

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1z^{-1} \quad (9)$$

$$S(z^{-1}) = 1 + s_1z^{-1} \quad (10)$$

O foco no controle projetado neste artigo é ampliar o amortecimento das oscilações. Logo, o polinômio T da forma canônica foi considerado unitário para este projeto. A Figura 7 retrata o diagrama de blocos elaborado para o sistema em malha fechada (Landau; Zito, 2006).

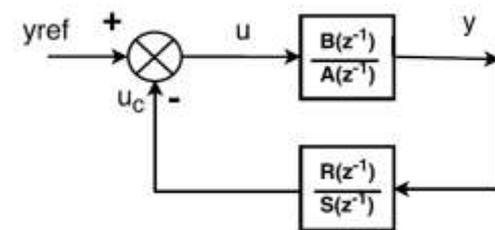


Figura 7. Diagrama de blocos para o Projeto do Controlador RST por Pole-Shifting.

No diagrama de blocos da Figura 7, pode-se observar que:

$$y = \frac{B}{A} u \quad (11)$$

$$u = y_{ref} - u_c \quad (12)$$

onde y_{ref} é o sinal de referência e o sinal de controle é dado por $u = \frac{R}{S} y$. Substituindo (12) em (11), a função de transferência de tempo discreto em malha fechada (MF) do sistema é obtida como:

$$H_{mf} = \frac{y}{y_{ref}} = \frac{BS}{AS + BR} \quad (13)$$

sendo assim, o polinômio característico do sistema em MF é dado na forma:

$$P_{mf}(z^{-1}) = A(z^{-1})S(z^{-1}) + B(z^{-1})R(z^{-1}) \quad (14)$$

$$P_{mf} = z^3 + a_1^{mf} z^2 + a_2^{mf} z + a_3^{mf}$$

Para que seja garantido um comportamento satisfatório, um polinômio característico desejado para o sistema em malha fechada deve ser especificado pelo projetista na forma:

$$P_{des}(z) = z^3 + p_1 z^2 + p_2 z + p_3 \quad (15)$$

igualando-se os polinômios (14) e (15) obtém-se o seguinte sistema linear para o cálculo dos parâmetros r_0 , r_1 e r_2 do controlador:

$$\begin{bmatrix} b_0 & 0 & 1 \\ b_1 & b_0 & a_1 \\ 0 & b_1 & a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\alpha - 1)a_1 \\ (\alpha - 1)^2 a_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

onde α é o fator de deslocamento radial calculado pela equação (17):

$$\alpha = e^{-(\xi_d - \xi)\omega_n T_s} \quad (17)$$

em que ω_0 é a frequência natural da planta em rad/s ; ξ_d é o amortecimento relativo desejado; ξ é o amortecimento relativo da planta; T_s é o intervalo de amostragem do controlador em segundos.

4 Testes Experimentais

Para o cálculo dos ganhos do controlador *Lead-Lag* digital por *Pole-Shifting*, são necessárias as características do sistema. Como dito anteriormente, a planta apresenta frequência natural $\omega_n = \omega_0 = 18,1 rad/s$, período de amostragem $T_s = 0,02s$, amortecimento relativo $\xi = 0,14$ e amortecimento relativo desejado $\xi_d = 0,3$. Deste modo, α pode ser calculado conforme a equação [17], obtendo-se assim $\alpha = 0,945$.

A partir das equações (3) e (4), tem-se que: $a_1 = -1,78$; $a_2 = 0,902$; $b_0 = -0,09797$ e $b_1 = 0,1836$. Substituindo esses valores na matriz representada por

(23), obtém-se como resultado para os parâmetros do controlador: $r_0 = 0,5436$; $r_1 = -0,7433$ e $r_2 = 0,1513$.

Na Figura 8, é possível analisar na simulação feita em ambiente *Matlab*, que a adição do controlador à planta faz com que sejam reduzidas as oscilações no sistema, representado pela resposta ao degrau em malha fechada (cor verde). No entanto, é notado que o controlador modifica o valor em regime permanente da saída do sistema, devido ele atuar em sinais de baixas frequências. Como solução para esse problema, é acrescentado ao sistema um filtro, conhecido como *Washout* [4], que tem como propósito reduzir o erro nas baixas frequências, fazendo com que o valor de regime do sistema não seja alterado.

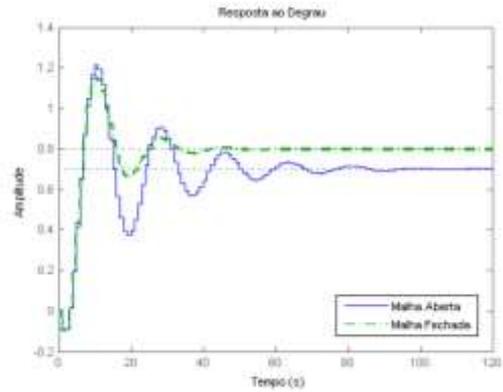


Figura 8. Resposta ao Degrau para o sistema em MA e MF.

Adicionando o filtro *Washout*, o diagrama de blocos do sistema fica na seguinte configuração, representado pela Figura 9.

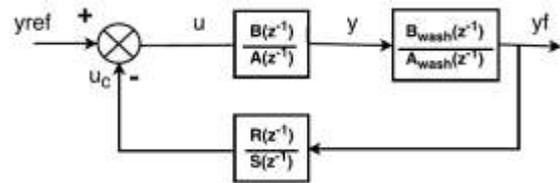


Figura 9. Diagrama de blocos do sistema com a adição do filtro *Washout*.

O filtro *Washout* é um filtro passa-alta de primeira ordem, representado pela equação (19), em que T_w é o inverso da frequência angular de corte do filtro. Para que o filtro funcione de forma apropriada, a relação da equação (19) precisa ser satisfeita:

$$G_{wash} = \frac{T_w}{1 + T_w S} \quad (18)$$

$$\omega_{corte} = \frac{1}{T_w} \ll \omega_n \quad (19)$$

Onde, ω_n é a frequência natural de oscilação da planta, também conhecida como $\omega_0 = 18,1 rad/s$. Para o projeto deste filtro e satisfazendo a equação (19), foi

escolhido um valor $T_w = 1$ s. Fazendo a aplicação deste filtro à planta, tem-se a relação matemática representada pela equação (20):

$$\frac{R'}{S'} = \frac{R(z^{-1}) B_{wash}(z^{-1})}{S(z^{-1}) A_{wash}(z^{-1})} = \frac{r_0' + r_1' z^{-1} + r_2' z^{-2}}{1 + s_1' z^{-1} + s_2' z^{-2}} \quad (20)$$

Logo, os novos parâmetros do controlador passam a ser: $r_0' = -0,1348$; $r_1' = 0,3347$; $s_1' = -1,0213$ e $s_2' = 0,0403$. Ao serem implementados, é possível ver a mudança que o filtro causa na saída do sistema em MF, sem alterar a dinâmica do controlador, corrigindo apenas a saída para que esta não tenha seu valor de regime alterado.

Após o acréscimo do filtro, é observado que a saída do sistema passa a apresentar o comportamento de saída esperado, não tendo seu valor de regime permanentemente modificado, representado pela resposta ao degrau em MF na cor verde, mostrado na Figura 10.

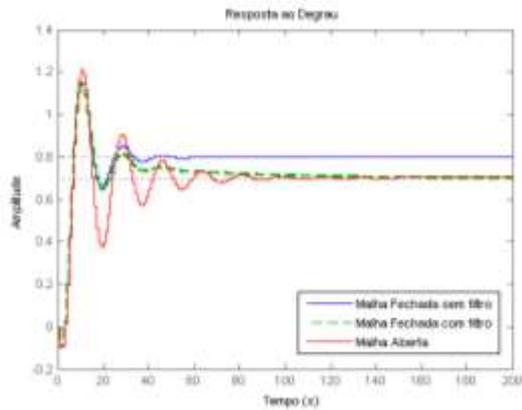


Figura 10. Resposta ao Degrau do sistema com o filtro *Washout*.

A técnica *Pole-Shifting* utilizada neste trabalho, também conhecida como Alocação Radial de Polos (um caso específico da Alocação Polinomial de Polos) tem como objetivo fazer com que os polos complexos do sistema sejam deslocados radialmente em direção à origem do círculo unitário do domínio Z. Como prova de que esta condição foi satisfeita, a Figura 11 mostra a simulação em *Matlab* dos polos complexos em MA (azul escuro) com amortecimento relativo $\xi = 0,14$ e, dos polos complexos em MF (verde escuro) que apresentam amortecimento relativo desejado $\xi_d = 0,3$.

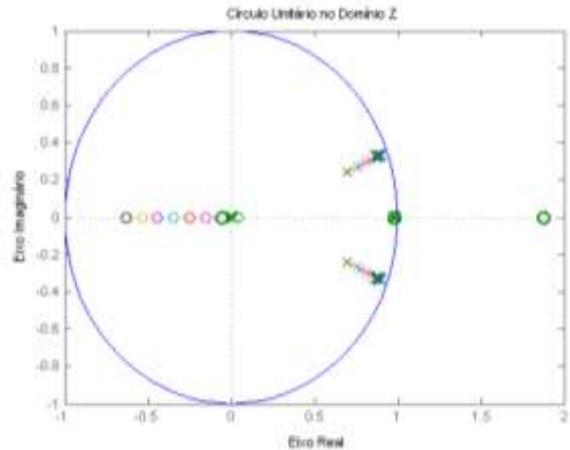


Figura 11. Deslocamento radial dos polos no círculo unitário.

Assim, é visualizado que há deslocamento dos polos de MA para MF. Para exemplificar melhor esse deslocamento radial, foram feitas simulações em malha fechada com diferentes constantes de amortecimento desejada, desse 0,1 até 0,8.

5 Resultados

Após as simulações, testes práticos foram realizados no sistema de bombeamento hidráulico do Laboratório de Automação Industrial. Foi constatado que, apesar do controlador ter sido desenvolvido para médias velocidades, seu desempenho para baixas velocidades também foi satisfatório, permitindo mitigar oscilações em ambas as condições de operação.

A Figura 12 apresenta o resultado obtido para médias velocidades. O sinal na cor vermelha representa a saída do sistema em malha aberta, enquanto que o sinal em azul representa a saída do sistema em malha fechada. Analisando a Figura 12, observa-se que o sistema (planta + compensador *Lead-Lag*) atendeu as especificações de projeto, amortecendo as oscilações observadas em malha aberta.

Na Figura 13 é mostrado que foi possível obter uma boa resposta também para baixas velocidades, justificando a utilização do controlador para uma faixa maior de operação do sistema. Portanto, pode-se dizer que este trabalho obteve êxito ao trabalhar com a velocidade do conjunto motor-bomba, que é a variável controlada da planta de bombeamento hidráulico, mitigando suas oscilações de forma satisfatória.



Figura 12. Teste prático para o sistema operando em médias velocidades.

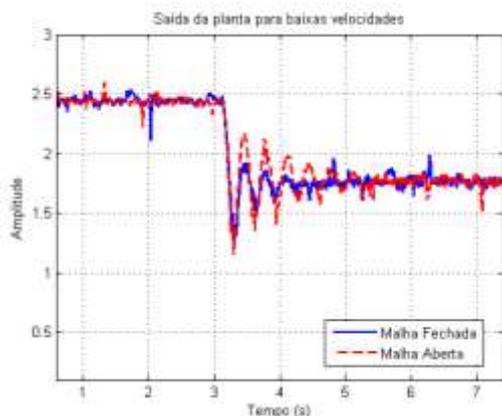


Figura 13. Teste prático para o sistema operando em baixas velocidades.

6 Conclusão

Neste artigo, foi investigada uma técnica de controle digital para amortecimento de oscilações em sistemas de bombeamento hidráulico. O projeto foi baseado na técnica de controle digital *Pole-Shifting* e implementado via microcontrolador. Os testes de validação realizados no sistema de bombeamento real mostraram a efetividade da técnica estudada, o que permitiu a operação segura do sistema, mesmo em condições de baixas velocidades de operação. Dessa forma ganhos operacionais foram obtidos ampliando-se a segurança do sistema.

Agradecimentos

Agradeço ao CNPQ pela bolsa de Iniciação Científica concedida. Também agradeço ao Laboratório de Automação Industrial por abrir espaço para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Aguirre, A. L (2015). Introdução à Identificação de Sistemas. Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Aplicação. Belo Horizonte - MG: UFMG.
- Barcelos Junior, R. P.; Araújo, E. Q.; Alonso, G. V (2015). Análise da Influência das Propriedades do Minério de Ferro no Bombeamento de Polpas de Rejeitos Minerais em Sistemas com Bombas Volumétricas via Simulação e Planejamento de Experimentos. XV CONEMI, IX SEEMI.
- Braga, R. L (2015). Sistemas de Vedações para Soluções de Bombeamento e Desperdício de Água. Trabalho de Conclusão de Curso. USF.
- Chaudhry, H. M (2014). Applied Hydraulic Transients, 3rd ed. New York: Springer.
- Chen, S. & Fu, L. (2010). An optimal washout filter design for a motion platform with senseless and angular scaling maneuvers. American Control Conference.
- Gava, M. C (2016). Análise Energética de Projetos de Sistemas de Bombeamento de Polpas de Minério de Ferro Mediante Simulação Computacional. Dissertação de Mestrado. UFSJ.
- Gouvea, M. M. R (2008). Estudo de Confiabilidade e Bombas Centrífugas. Trabalho de Conclusão de Curso. USF.
- Horowitz, P. & Hill, W. The Art of Electronics. 2.ed. Cambridge University Press.1989.
- Landau, I. D. and Zito, G (2006). Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation. Springer.
- Leite, A. M (2011). Análise Comparativa entre Sistemas de Resfriamento de Injeção de Plástico. Trabalho de Conclusão de Curso. UNESP.
- Pacco, H. C (2008). Desenvolvimento de um Sistema de Bomba de Calor Água/Água para Resfriamento e Secagem de Tomates. Tese de Doutorado. UNICAMP.
- Rocha, E. M.; Barra Junior, W.; Bezerra, A. S. and Barra, H. M. (2017). Preventing Damage in Hydraulic Systems by using a Pressure Control Strategy. IEEE Latin America Transactions, 445-453. 20.
- Sarica, C. and Panacharoensawad, E. (2012). Review of Paraffin Deposition Research under Multiphase Flow Conditions, Energy Fuels, vol. 26, no. 7, pp. 3968-3978.