

Gerenciamento da Pressão Hidráulica Utilizando um Controlador PID Adaptativo

Thommas K. S. Flores* Pedro H. M. de Andrade**
Juan M. Villanueva* Heber P. Gomes*

* *Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mails:
thommas.flores@cear.ufpb.br,
jmauricio@cear.ufpb.br,heberp@uol.com.br)*

** *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, (e-mail:
pedrohmeira@ufrn.edu.br)*

Abstract: Excess pressure in the ducts is the main factor that causes water losses in a water distribution system. The use of pressure reducing valves, water tank level control and pump operation shifts are means used to reduce the pressure in this system, but they are energy inefficient. On the other hand, the use of frequency inverters combined with closed-loop control strategies to control the rotation of the motor-pump assembly presents itself as a viable alternative from the point of view of hydroenergetic efficiency. However, due to the variable characteristics in time and not linear, controllers with static gains may, at a given moment, lead the system to instability. For these reasons, this article proposes the study of the application of an adaptive PID control per reference model for the management of hydraulic pressure in a water supply system. The results obtained showed that the increase in adaptation gain causes oscillation during the transitory regime, the adoption of a second order reference model causes divergence during the transitory regime due to the inherent delay of the studied plant, however during the permanent regime the Average Absolute Percentage Error is always inferior to 1%, even when the system is subject to the desired value change and to disturbances. Another contribution of the controller is the ability to maintain constant pressure regardless of the required demand, consequently reducing possible leaks.

Resumo: O excesso de pressão nos ductos é o principal fator que ocasiona perdas de água em um sistema de distribuição de água. A utilização de válvulas redutoras de pressão, controle do nível do reservatório de água e turnos de operação das bombas são meios empregados com a finalidade de reduzir a pressão neste sistema, porém se mostram energeticamente ineficientes. Em contrapartida, o uso de inversores de frequência unidos a estratégias de controle em malha fechada para o controle da rotação do conjunto motobomba apresenta-se como uma alternativa viável do ponto de vista de eficiência hidroenergética. Todavia, devido as características variantes no tempo e não lineares, os controladores com ganhos estáticos podem, em um dado momento, levarem o sistema a instabilidade. Por estes motivos, este artigo propõe o estudo da aplicação de um controle PID adaptativo por modelo de referência para o gerenciamento da pressão hidráulica em um sistema de abastecimento de água. Os resultados obtidos mostraram que o aumento do ganho de adaptação ocasiona oscilação durante o regime transitório, a adoção de um modelo de referência de segunda ordem ocasiona divergência durante o regime transitório devido ao atraso inerente a planta estudada, porém durante o regime permanente o Erro Percentual Absoluto Médio é sempre inferior a 1%, mesmo quando o sistema é sujeito a mudança de valor desejado e a perturbações. Outra contribuição do controlador é capacidade de manter a pressão constante independente da demanda requerida, consequentemente diminuindo os possíveis vazamentos.

Keywords: Energy efficiency; Hydraulic pressure control; Intelligent control; PID; Pumping system.

Palavras-chaves: Controle da pressão hidráulica; Controle inteligente; Eficiência energética; PID; Sistema de bombeamento.

1. INTRODUÇÃO

O principal estresse hídrico é são as perdas no processo de distribuição de água, desde a captação até o usuário final. De acordo com o Diagnóstico de Serviços de Água e Esgoto (de Saneamento – SNS/MDR, 2019), as perdas são inerentes a qualquer sistema de abastecimento de água. Entretanto, o índice de perdas no Brasil é de 38,5%, ou seja, 38,5% do volume de água disponibilizado não foi contabilizado como utilizado pelos consumidores devido a falhas nos medidores, ligações clandestinas e vazamentos nos dutos, causados por estarem danificados ou por excesso de pressão.

Algumas soluções são propostas para a correção da alta pressão nos dutos como a utilização de válvulas redutoras de pressão para diminuir os vazamentos, porém há perda de carga no sistema de bombeamento forçando-o a trabalhar em velocidade nominal e aumentando o consumo de energia elétrica (Creaco et al., 2017). Segundo Gomes and de Carvalho (2012), as distribuidoras de água apresentam 90% dos gastos com eletricidade para alimentação das bombas em estações elevatórias. Portanto, a solução adotada além de viável deve ser energeticamente eficiente.

Com o objetivo de reduzir o consumo de energia, Luo et al. (2015) desenvolveram uma estratégia para o uso de inversor de frequência em sistemas de bombeamento, aumentando a eficiência, por determinar o ponto ótimo de operação. Enquanto que Fontana et al. (2016) focam no controle para configurar automaticamente a regulação das válvulas ao longo do sistema, com o intuito de garantir uma pressão adequada e maximizar a eficiência energética.

Trabalhos recentes, como (Diniz et al., 2019) e (Flores et al.), encontra-se a utilização de inversores de frequência unidos a controladores baseados em lógica *fuzzy* para o controle da pressão em redes de abastecimento de água. Apesar dos resultados satisfatórios alcançados, como erro de regime permanente iguais a 1,77 % e 0,79%, respectivamente, tempo de estabelecimento e sobressinal em uma faixa suportável pelo sistema, nota-se uma alta dependência do conhecimento da dinâmica da planta por um especialista para a elaboração das regras *fuzzy*.

Diante das limitações encontradas no controle *fuzzy*, o controle adaptativo se apresenta como uma alternativa para o controle da pressão em sistemas de abastecimento de água, pois sua estrutura é capaz de modificar as leis de controle para lidar com as mudanças paramétricas da planta, devido às mudanças nas condições ambientais ou no próprio sistema (Swarnkar et al., 2010).

Sendo assim, os modelos de controle adaptativo são voltados para aplicações em que o controle convencional não é viável, isto é, nos casos que ocorre mudanças drásticas na entrada, possibilidade de falhas imprevisíveis e repentinas, possibilidade de distúrbios frequentes ou imprevistos, limitações em relação à estabilidade ou à faixa de valores da entrada (Xiao et al. (2012)).

Swathi and Ramesh (2017) desenvolveram um controle de velocidade para motores de corrente contínua utilizando Controle Adaptativo por modelo de referência, baseado

em uma variação da regra MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). O controlador fornece resultados razoáveis, mas é muito sensível às mudanças na amplitude da referência. A simulação realizada no trabalho mostra que o sistema adaptativo se torna oscilatório se o valor do ganho de adaptação ou a amplitude do sinal de referência é suficientemente grande.

Portanto, neste trabalho é desenvolvido um Controlador Proporcional, Integral e Derivativo Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC-PID) para o controle da pressão em um sistema de abastecimento de água. Objetiva-se neste estudo analisar a ação do ganhos de adaptação na resposta do sistema controlado; resposta do controlador à mudança do valor desejado e, por fim, a robustez do controlador a perturbações, proveniente da variação da demanda de água.

2. SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

O sistema de abastecimento de água é composto pela fonte provedora (geralmente, um manancial), a captação e a estação elevatória; estação de tratamento; reservatório; rede de distribuição e ligações domiciliares (Gomes and de Carvalho (2012)). O esquema hidráulico, ilustrado na Figura 1, representa um sistema de bombeamento. Dessa forma, a altura manométrica total (H), com unidade de metros de coluna de água (*m.c.a.*), é o carregamento que deve ser superado pela energia fornecida pelo conjunto motobomba (CMB) na forma de pressão e vazão.

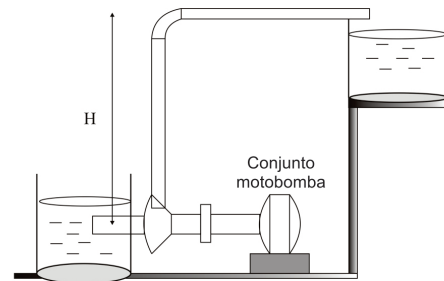


Figura 1. Esquema genérico um sistema de bombeamento.

Na Figura 2 está ilustrada a curva característica do CMB, a qual apresenta suas propriedades hidroenergéticas a partir da variação da demanda de água requerida ao longo do tempo. Portanto, como sistemas de abastecimento de água a demanda é dinâmica, a pressão desse sistema deve ser supervisionada e controlada para evitar que em momentos de baixo consumo não se tenha elevados valores de pressão causando possíveis rompimentos nos dutos e avarias nos dispositivos presentes neste sistema, conseqüentemente perdas de água.

Dessa forma, uma boa prática é o controle da pressão nos ramais do sistema por meio da alteração da velocidade de rotação do conjunto motobomba, isto é, modificando o ponto de operação da bomba em sua curva característica afim de obter o máximo rendimento e a pressão necessária para vencer os obstáculos através dos ductos até atender o consumidor final.

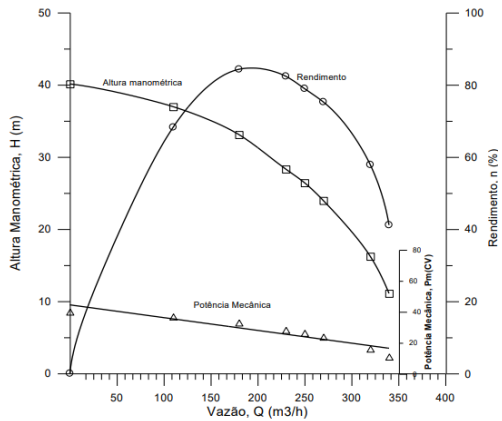


Figura 2. Curva característica da bomba (Gomes and de Carvalho (2012)).

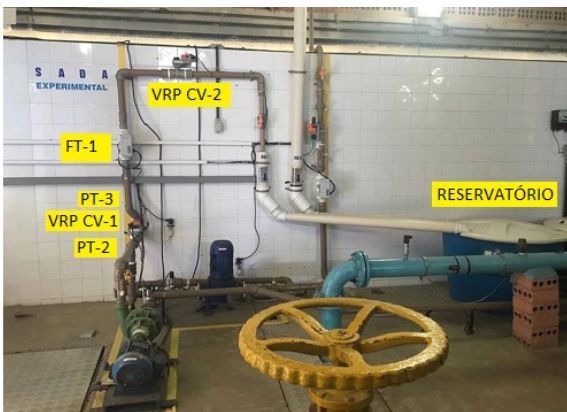


Figura 3. Bancada Experimental.

3. BANCADA EXPERIMENTAL

Os resultados foram coletados a partir de experimentos realizados na bancada do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento na Universidade Federal da Paraíba (LENHS-UFPB), cuja a imagem está ilustrada na Figura 3.

A bancada experimental conta com o conjunto motobomba (CMB) com potência de 3 CV; um *booster* de 3 CV, responsável por fornecer à água energia na forma de pressão afim de atender a demanda de imóveis localizados em regiões mais altas e/ou distantes em relação ao ponto de distribuição; além dos dutos, dois reservatórios, transdutores de pressão do tipo piezoresistivo, transdutores de vazão do tipo eletromagnético e válvulas redutoras de pressão (VRP). As VRPs são dispositivos eletromecânicos que, com a passagem da água, reduzem a pressão através de uma perda de carga.

O estudo de caso deste trabalho focou apenas na zona baixa do sistema experimental. Esta região é compreendida pelo percurso, sem ramificação, desde a saída do CMB, passando pelo sensor de pressão PT-2, da VRP CV-1, do segundo sensor de pressão PT-3, pela segunda VRP CV-2 e finalmente, chegando ao reservatório.

4. CONTROLE PID ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA

O controle adaptativo envolve a modificação da lei de controle para lidar com o fato de que os parâmetros da planta a ser controlada mudam drasticamente devido às mudanças nas condições ambientais ou no próprio sistema (Swarnkar et al., 2010).

A estrutura genérica de um Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC) é ilustrado no diagrama de blocos da Figura 4. Este esquema é composto por 3 blocos principais: mecanismo de adaptação, modelo de referência e controlador.

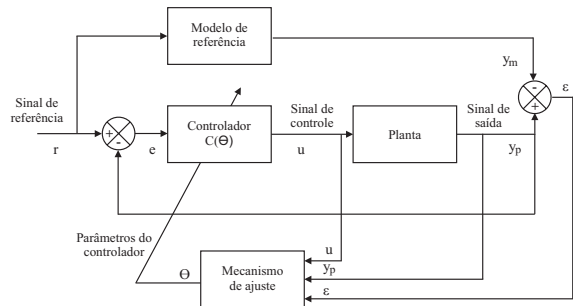


Figura 4. Esquema genérico controlador MRAC-PID.

A técnica de Controle Adaptativo por Modelo de Referência é empregada para conceber um controlador cujo seus parâmetros são ajustados com base nas informações da saída do modelo (y_m), erro entre a saída da planta e da referência ($e(t)$), erro de rastreamento ($\varepsilon(t)$) e referência ($r(t)$) (Åström (1983)).

O mecanismo de adaptação atualiza algum critério para minimização do erro de rastreamento ($\varepsilon(t) = y_m(t) - y_p(t)$), isto é, atualizando os parâmetros do controlador de forma automática, afim de convergir o comportamento da saída do sistema controlado ao do modelo de referência.

Ademais, os parâmetros e estrutura do modelo de referência são especificados com base nos requisitos de projeto, respeitando as limitações do sistema, sendo eles: tempo de subida (t_r), tempo de estabelecimento (t_s), tempo de atraso (t_d), tempo de pico (t_p) e sobrevalor percentual (M_p), conforme ilustrado na resposta ao degrau da Figura 5.

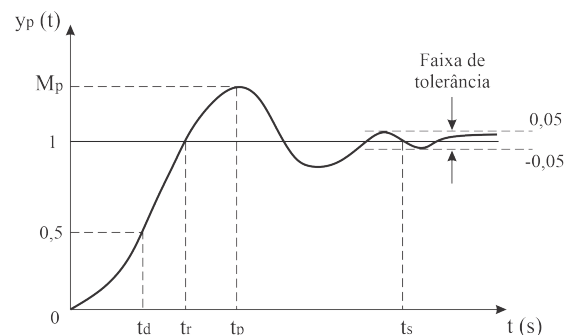


Figura 5. Características temporais da resposta do sistema.

Por fim, o controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID) é a estrutura de controle utilizada neste trabalho. Este algoritmo é uma das abordagens mais populares para

controle de processos industriais, apesar dos contínuos avanços nas teorias de controle. Isso não ocorre apenas porque o algoritmo PID possui uma estrutura simples, conceitualmente fácil de entender e implementar na prática, mas também porque fornece desempenho adequado na grande maioria das aplicações. O modelo matemático deste algoritmo é expresso por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

em que K_p , K_i e K_d são os parâmetros ou ganhos proporcional, integral e derivativo, respectivamente deste algoritmo e $u(t)$ é o sinal de controle.

A escolha do método para determinar os valores dos parâmetros do controlador PID depende dos requisitos de desempenho para o controlador e da dinâmica do processo. Se a dinâmica é constante, pode-se usar o método de Ziegler-Nichols, por exemplo (Franklin et al. (2013)).

Neste trabalho, por se tratar de um processo dinâmico, será utilizado o método de MIT para ajuste automático dos parâmetros do controlador PID. A função custo (J) ou critério de minimização utilizada é o Erro Médio Quadrático, definido por:

$$J(\Theta) = \frac{1}{2} \varepsilon^2(\Theta)$$

em que Θ é o vetor de parâmetros do controlador a serem atualizados.

A regra de MIT define que taxa de atualização dos parâmetros é proporcional ao gradiente negativo de J (Åström (1983)), da seguinte forma:

$$\frac{d\Theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \Theta} = -\gamma \varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial \Theta} \quad (2)$$

A componente $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Theta}$ é a sensibilidade do erro em respeito ao vetor de parâmetros Θ . A constante γ é denominada de "ganho da adaptação".

Para efeitos de cálculos, por se tratar de um método que o conhecimento da função transferência da planta é facultativo, será considerado um função de transferência de primeira ordem $b_p/(s + a_p)$. Logo, a função de transferência de malha direta do diagrama em bloco da Figura 4 é descrita pela Equação 3.

$$Y_p(s) = \frac{s^2 K_d b_p + s K_p b_p + K_i b_p}{s^2 + s a_p} (R(s) - Y_p(s)) \quad (3)$$

Em consequência da ordem da Equação 3, o modelo de referência escolhido é:

$$\frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{b_m}{s^2 + s a_{m1} + a_{m2}} \quad (4)$$

Segundo a regra de MIT os parâmetros do controlador PID K_p , K_i e K_d são determinados por:

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p \frac{\partial J}{\partial K_p} = -\gamma_p \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y_p} \right) \left(\frac{\partial y_p}{\partial K_p} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i \frac{\partial J}{\partial K_i} = -\gamma_i \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y_p} \right) \left(\frac{\partial y_p}{\partial K_i} \right) \quad (6)$$

$$\frac{dK_d}{dt} = -\gamma_d \frac{\partial J}{\partial K_d} = -\gamma_d \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y_p} \right) \left(\frac{\partial y_p}{\partial K_d} \right) \quad (7)$$

em que $\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} = \varepsilon$, $\frac{\partial \varepsilon}{\partial y_p} = 1$, $D = d(\cdot)/dt$ e γ_p , γ_i e γ_d são os ganhos de adaptação das variáveis K_p , K_i e K_d , respectivamente.

Então, dK_p/dt , dK_i/dt e dK_d/dt podem assumir as seguintes expressões:

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p \varepsilon \left(\frac{\left(\frac{b_p}{1+K_i b_p} \right) D}{D^2 + D \left(\frac{a_p + K_p b_p}{1+K_d b_p} \right) + \left(\frac{K_i b_p}{1+K_d b_p} \right)} \right) e(t) \quad (8)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i \varepsilon \left(\frac{\left(\frac{b_p}{1+K_i b_p} \right)}{D^2 + D \left(\frac{a_p + K_p b_p}{1+K_d b_p} \right) + \left(\frac{K_i b_p}{1+K_d b_p} \right)} \right) e(t) \quad (9)$$

$$\frac{dK_d}{dt} = -\gamma_d \varepsilon \left(\frac{\left(\frac{b_p}{1+K_i b_p} \right) D^2}{D^2 + D \left(\frac{a_p + K_p b_p}{1+K_d b_p} \right) + \left(\frac{K_i b_p}{1+K_d b_p} \right)} \right) e(t) \quad (10)$$

Portanto, para que a planta controlada se comporte igual ao modelo de referência é necessário que os valores dos polos e zeros das respectivas funções de transferências sejam iguais, isto é, que as seguintes igualdades sejam satisfeitas:

$$\left(\frac{a_p + K_p b_p}{1 + K_d b_p} \right) = a_{m1} \quad (11)$$

$$\left(\frac{K_i b_p}{1 + K_d b_p} \right) = a_{m2} \quad (12)$$

$$\left(\frac{b_p}{1 + K_d b_p} \right) = b_m \quad (13)$$

Contudo, por se tratar de uma planta cujas constantes (a_p e b_p) são desconhecidas, impossibilita-se a realização das igualdades apresentadas anteriormente. Portanto, considerando que a dinâmica da planta da planta é mais lenta que a taxa de atualização dos parâmetros do controlador e que o sinal de saída da planta converge para o valor do modelo de referência, é razoável aproximar a função de transferência da planta a do modelo de referência, resultando em:

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p \varepsilon(t) \left(\frac{b_m D}{D^2 + D a_{m1} + a_{m2}} \right) e(t) \quad (14)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i \varepsilon(t) \left(\frac{b_m}{D^2 + D a_{m1} + a_{m2}} \right) e(t) \quad (15)$$

$$\frac{dK_d}{dt} = -\gamma_d \varepsilon(t) \left(\frac{b_m D^2}{D^2 + Da_{m1} + a_{m2}} \right) e(t) \quad (16)$$

em que γ_p , γ_i e γ_d são constantes positivas e correspondem a velocidade de adaptação dos seus respectivos parâmetros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos para três grupos de experimentos para avaliação do algoritmo de controle estudado, sendo eles:

- **Experimento I:** Avaliação da resposta ao degrau para diferentes velocidades de adaptação γ_p , γ_i e γ_d .
- **Experimento II:** Resposta do sistema em malha fechada para diferentes valores desejados.
- **Experimento III:** Operação do sistema em malha fechada sobre a ação do controlador proposto sujeito a variação da demanda.

A plataforma computacional utilizada para implementar o controlador é o *software* LabVIEW, através do bloco "script MATLAB". Além disso, o modelo de referência, adotou-se a função de transferência da Equação 17, da qual as características da resposta ao degrau estão presentes na Tabela 2.

$$H_m(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{16}{s^2 + 64s + 16} \quad (17)$$

O uso deste modelo visa proporcionar ao sistema um transitório suave e sem sobrevalor percentual, pois a ausência destas características podem provocar no sistema um efeito denominado de golpe de golpe ariete, o qual pode provocar ruptura nos ductos do sistema.

Para implementação digital da Equação 17 e das demais equações do controle adaptativo, utilizou-se a discretização pelo método diferencial ou "backward", descrito pela Equação 18, em que T é o período de amostragem. Neste trabalho, definiu-se $T = 100ms$, devido ao período de amostragem utilizado na placa de aquisição de dados.

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t) - x(t-h)}{T} = \frac{1-z^{-1}}{T} x(t) \quad (18)$$

Por fim, a métrica para quantificar o erro de rastreamento em regime permanente será o erro médio percentual absoluto (MAPE, do inglês *Mean Absolute Percentage Error*), dada por:

$$MAPE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{P_j - T_j}{T_j} \right| \times 100 \quad (19)$$

Em que,

- N : tamanho do conjunto de validação;
- P_j : saída do modelo de referência;
- T_j : saída da planta controlada.

5.1 Experimento I

No primeiro conjunto de experimentos, são aplicados 5 mudanças nas velocidades de adaptação, γ_p , γ_i e γ_d , para

observar o impacto na performance e robustez do sistema controlado.

Para isto, foram adotadas as seguintes premissas: valor de referência do controlador igual a 10 *mca*, ângulo da válvula redutora proporcional (VRP) igual a 50° e o sistema iniciado a partir do repouso, isto é, com frequência de rotação do conjunto motobomba igual a 0 Hz.

Na Tabela 1 são descritos os valores dos ganhos de adaptação correspondente a cada curva da resposta ao degrau do sistema controlado ilustrado na Figura 6.

Tabela 1. Ganhos de adaptação.

Curva	γ_p	γ_i	γ_d
A	0,0003	0,0006	0,0002
B	0,0006	0,0012	0,0004
C	0,0012	0,0024	0,0008
D	0,0024	0,0048	0,0016
E	0,0048	0,0096	0,0032

Na Figura 6 é ilustrado graficamente o impacto na resposta do sistema controlado devido a alteração dos ganhos de adaptação. Nota-se que quanto maior o ganho, mais rápida é a resposta e maior a oscilação existente durante o regime transitório, sem que haja sobrevalor percentual. Por outro lado, quanto menor o ganho, mais suave é a resposta, conforme as características temporais quantificadas na Tabela 2.

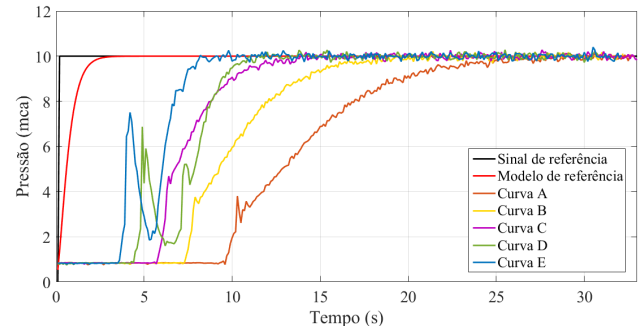


Figura 6. Resposta ao degrau do sistema controlado para diferentes ganhos de adaptação.

Tabela 2. Características temporal do sistema controlado e do modelo de referência.

Curvas	t_r	t_s	t_p	t_d	M_p
Modelo de referência	1,5 s	4 s	-	0,5 s	0 %
A	9,5 s	32 s	-	12,9 s	0 %
B	6,7 s	23 s	-	9,3 s	0 %
C	4,2 s	17 s	-	6,8 s	0 %
D	4,9 s	12 s	-	5 s	0 %
E	3,8 s	9 s	-	4 s	0 %

A evolução dos parâmetros a serem adaptados é ilustrada na Figura 7. Nota-se que os parâmetros K_p e K_d só apresentam valores diferente de zero durante o regime transitório, isto é, eles são adaptados a fim de oferecer ao sistema a resposta desejada. Em contrapartida, o parâmetro K_i cresce e estaciona em um valor fixo para manter o erro em regime estacionário igual a zero.

Portanto, embora o sistema controlado não siga o modelo de referência durante o regime transitório, devido à inércia do fluido no sistema de bombeamento, este preserva o

formato, em grande parte das curvas, deste mesmo modelo. Além disso, deve-se atentar a escolha dos ganhos de adaptação, pois valores demasiadamente grandes causam oscilações no sistema durante o período transitório, podendo levar o sistema a instabilidade.

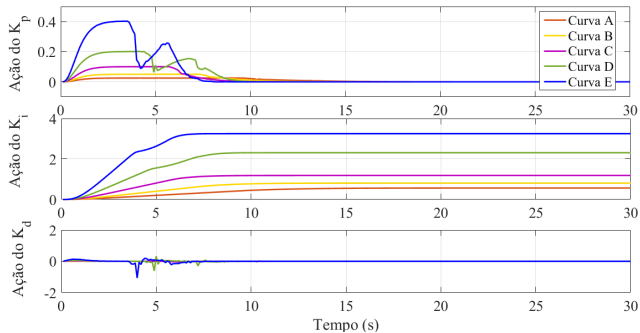


Figura 7. Evolução dos ganhos K_p , K_i e K_d do MRAC-PID.

5.2 Experimento II

Neste experimento será avaliada a ação do controlador para diferentes valores de pressões desejados (7, 10, 13, 16, 13, 10 e 7 mca). Para isto, considerou-se as seguintes premissas: motobomba partido do repouso, isto é, frequência de rotação igual a zero, ângulo da VRP CV-2 igual a 50° e os ganhos de adaptação iguais a $\gamma_p = 0,0012$, $\gamma_i = 0,0024$ e $\gamma_d = 0,008$.

Ao analisar a Figura 8, nota-se que devido a ao atrito estático no conjunto motobomba e à parametrização do conversor de frequência, o sinal de saída da planta controlada não converge ao do modelo durante os 20 primeiros segundos. Após este intervalo de tempo, apesar de uma pequena divergência durante o regime transitório, ocasionada pelo baixo ganho de adaptação γ_p e γ_d , a resposta do sistema controlado converge ao modelo de referência. O índice MAPE médio nos diversos trechos da resposta em regime permanente é igual a 0,84 %.

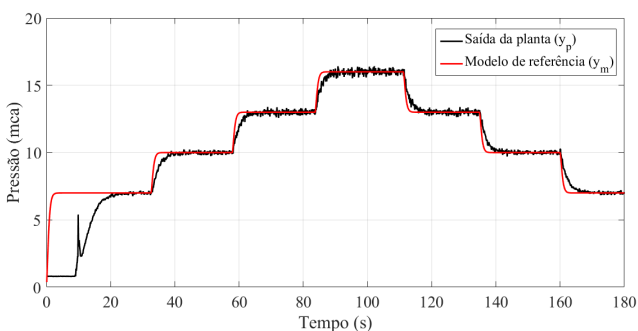


Figura 8. Resposta do sistema controlado para diferentes valores de referência.

Nas Figuras 8 e 9 estão os valores dos parâmetros a serem adaptados e do erro de realimentação e rastreamento, respectivamente. Pode-se constatar que a alteração nos erros faz com que os parâmetros se alterem convergindo o sinal da planta ao modelo de referência. Estas alterações são mais acentuadas nos parâmetros K_p e K_d , os quais são responsáveis pelo regime transitório do sistema. Após o período de adaptação, isto é, na transição de valor

desejado, os parâmetros retornam aos valores que mantêm o erro de rastreamento igual zero.

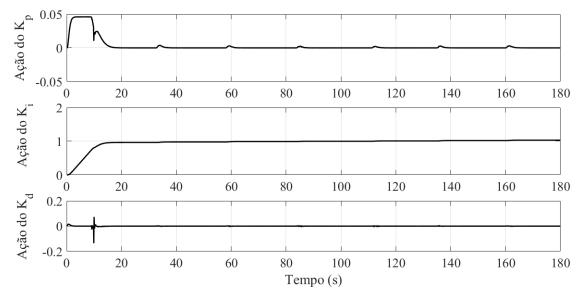


Figura 9. Evolução dos ganhos K_p , K_i e K_d do MRAC-PID para diferentes valores de referência.

5.3 Experimento III

Para emular a perturbação provocada pela variação da demanda de água em um sistema de abastecimento, será considerada a variação do ângulo da válvula reguladora de pressão CV-2 (ver Figura 3), os valores adotados foram: 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 60°, 50°, 40° e 30°. Vale ressaltar que a faixa de operação desta válvula é de 0°, totalmente aberta, a 90°, totalmente fechada.

Neste experimento, o conjunto motobomba parte com velocidade de rotação igual a 0 Hz, o valor desejado mantém-se fixo em 10 mca e os ganhos de adaptação $\gamma_p = 0,0012$, $\gamma_i = 0,0024$ e $\gamma_d = 0,008$.

A Figura 10 ilustra a resposta do sistema controlado submetido às perturbações. Constata-se que o sistema controlado é robusto às perturbações, havendo apenas dois períodos em que o erro de rastreamento é maior que 5%, 50 a 55 segundos e 150 a 155 segundos, devido a não linearidade da ação da CV-2. O índice MAPE da resposta em regime permanente é igual a 1,37%.

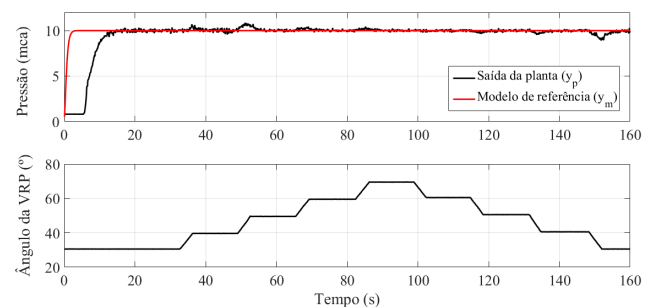


Figura 10. Resposta do sistema controlado quando submetido a perturbações.

Na Figura 11 é ilustrada a evolução dos parâmetros a serem adaptados para o sistema controlado sujeito a perturbações. Nota-se que os parâmetros K_p , K_i e K_d não apresentam alteração significativa após completar o período de adaptação, de 0 a 15. Isto acontece devido a lentidão e amplitude da perturbação imposta, típica de um sistema de abastecimento de água. Logo, ficando evidente que o processo de adaptação é muito mais rápido que a perturbação sofrida, isto garante a estabilidade do sistema.

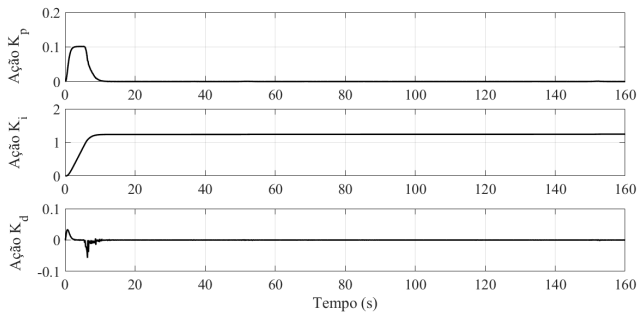


Figura 11. Evolução dos ganhos K_p , K_i e K_d do MRAC-PID para o sistema sob perturbações.

6. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um estudo experimental de um controlador PID adaptativo por modelo de referência em um sistema de abastecimento de água para o controle da pressão. O comportamento dinâmico do sistema foi avaliado para diferentes valores de ganhos de adaptação, mudança de valor desejado e perturbações, isto é, variação na demanda de água requerida.

Concluiu-se que a variação dos ganhos de adaptação alteram a resposta dinâmica do sistema. Ganhos elevados de adaptação ocasionam oscilações na resposta do sistema durante o regime transitório, podendo conduzir o sistema a instabilidade. Porém, apesar das oscilações decorrentes dos ganhos elevados, no estudo em questão, e do atraso inerente a planta, observa-se na Figura 6 que o sistema mantém as características do modelo de referência.

Além disso, o índice MAPE médio do erro de rastreamento para as variações do valor desejado alcançou o valor de 0,84%. Já para o cenário com perturbações, este índice alcançou 1,37% e em dois trechos do experimento III, 55 a 60 segundos e 150 a 155 este índice atingiu o valor máximo de 8%, devido as não linearidades da válvula durante sua abertura.

O estudo de caso mostrou que o MRAC-PID pode ser aplicado em casos práticos. Ressalta-se, por fim, que o algoritmo de controle apresenta vantagens por não necessitar do modelo matemático exato da planta ou de sua dinâmica para ser implementado. Porém, para que o sistema funcione adequadamente, a escolha dos ganhos de adaptação é primordial, isto posto, por ser um processo empírico, torna-se um processo exaustivo de acordo com a complexidade do sistema a ser controlado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) pelo suporte para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Åström, K.J. (1983). Theory and applications of adaptive control—a survey. *Automatica*, 19(5), 471–486.
- Creaco, E., Campisano, A., Franchini, M., and Modica, C. (2017). Unsteady flow modeling of pressure real-time control in water distribution networks. *Journal of*

- Water Resources Planning and Management*, 143. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000821.
- de Saneamento – SNS/MDR, S.N. (2019). 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos. Technical report, Ministério do Desenvolvimento Regional.
- Diniz, M.L., Flores, T.K.S., Villanueva, J.M.M., Gomes, H.P., and de Andrade, P. (2019). Controle inteligente da pressão hidráulica com Ênfase na eficiência energética. *Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Campinas : Galoá. 2020.* doi:10.17648/sbai-2019-111348.
- Flores, T.K., Moreira, H.A., Villanueva, J.M., and Gomes, H.P. (????). Controle inteligente aplicado a sistemas hidráulicos com demanda variável.
- Fontana, N., Giugni, M., Glielmo, L., and Marini, G. (2016). Real time control of a prototype for pressure regulation and energy production in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142, 04016015. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000651.
- Franklin, G.F., Powell, J.D., and Emami-Naeini, A. (2013). *Sistemas de controle para engenharia*. Bookman Editora.
- Gomes, H.P. and de Carvalho, P.S.O. (2012). Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética. Technical report, Editora Universitária – UFPB.
- Luo, Y., Yuan, S., Sun, H., and Guo, Y. (2015). Energy-saving control model of inverter for centrifugal pump systems. *Advances in Mechanical Engineering*, 7. doi:10.1177/1687814015589491.
- Swarnkar, P., Jain, S., and Nema, R. (2010). Effect of adaptation gain on system performance for model reference adaptive control scheme using mit rule. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 46, 620–625.
- Swathi, M. and Ramesh, P. (2017). Modeling and analysis of model reference adaptive control by using mit and modified mit rule for speed control of dc motor. 482–486. doi:10.1109/IACC.2017.0105.
- Xiao, S., Li, Y., and Liu, J. (2012). A model reference adaptive pid control for electromagnetic actuated micro-positioning stage. doi:10.1109/CoASE.2012.6386390.