

Sistema de controle adaptativo aplicado a um sistema de distribuição de água com ênfase na eficiência energética

Adaptive control system applied in water distribution system with emphasis on energy efficiency

Magno José Gomes da Silva¹, Clivaldo Silva de Araújo², Saulo de Tarso Marques Bezerra³, Simplicio Arnaud⁴, Cícero da Rocha Souto⁴, Heber Pimentel Gomes⁵

RESUMO

Esta pesquisa objetivou projetar um sistema de controle adaptativo para o modelamento e controle, em tempo real, de um sistema de distribuição de água. Os controladores atuaram no controle da pressão por meio da variação da velocidade de rotação do sistema de bombeamento e do ângulo de abertura de válvulas de controle. O sistema de controle é do tipo Variância Mínima Generalizado (GMV) autoajustável, cujos parâmetros foram estimados em tempo real pelo método dos mínimos quadrados recursivo (MQR). Os ensaios realizados na bancada experimental apresentaram resultados satisfatórios, com um erro máximo no controle de pressão de 2,12% (0,42 mca) e uma redução de 19,2% no consumo de energia elétrica para o sistema atuando na condição mais desfavorável.

Palavras-chave: sistema de bombeamento; eficiência energética; sistema de controle.

ABSTRACT

This research aimed to design an adaptive control system for modeling and real-time control of a water distribution system. Air traffic controllers acted on pressure control by varying the rotational speed of the pumping system and opening angle control valve. The system of control is of type Generalized Minimum Variance self-tuning, whose parameters were estimated in real time by the recursive least squares method. The tests performed on experimental workbench presented satisfactory results, with a maximum error on pressure control of 2.12% (0.42 mca) and a decrease of 19.2% in the consumption of electrical energy to the system in the most unfavorable condition.

Keywords: pumping system; energy efficiency; control system.

INTRODUÇÃO

Água e energia são dois recursos essenciais e possuem uma histórica interdependência. Há uma forte sinergia existente entre os recursos hídricos e energéticos. Dentre os consumidores desses recursos, o setor de saneamento se destaca entre os usuários com maiores demandas. O setor de saneamento consome de 2 a 10% da energia total de um país (PELLI & HITZ, 2000), sendo que a maior parte é consumida pelos sistemas de bombeamento (WANG *et al.*, 2009). Nos Estados Unidos, segundo Sanders

e Webber (2012), o setor consumiu cerca de 8,4% da energia gerada em 2010. No Brasil, estima-se que o setor de saneamento consome aproximadamente 2,5% do total de energia elétrica (ELETROBRAS, 2008).

O crescimento da população dos centros urbanos tem impulsionado o aumento da demanda por água e energia. Cada vez mais estações de bombeamento e *boosters* têm sido empregados em larga escala para manter o sistema de distribuição de água dentro de níveis de pressão e vazão compatíveis às necessidades. O uso eficiente de água

Trabalho realizado no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) - João Pessoa (PB), Brasil.
¹Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas (IFAL) - Maceió (AL), Brasil.

²Doutor em Engenharia Elétrica pela UFPB. Professor do Centro de Energias Alternativas e Renováveis da UFPB - João Pessoa (PB), Brasil.

³Doutor em Engenharia Mecânica pela UFPB. Professor e Coordenador do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Caruaru (PE), Brasil.

⁴Doutor em Engenharia Mecânica pela UFPB. Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPB - João Pessoa (PB), Brasil.

⁵Doutor em Engenharia Civil pela Universidad Politécnica de Madrid. Professor e Coordenador do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da UFPB - João Pessoa (PB), Brasil.

Endereço para correspondência: Magno José Gomes da Silva - Avenida Silvio Carlos Vianna, 2343, apto. 104 - Ponta Verde - 57035-160 - Maceió (AL), Brasil - E-mail: magno.jose@yahoo.com.br

Recebido: 27/11/12 - **Aceito:** 01/12/14 - **Reg. ABES:** 107226

e energia elétrica deve ser prioridade nas companhias. Globalmente, a energia está entre os três principais itens de custo para os prestadores de serviços de água e esgoto, e em muitos casos representa a segunda despesa, perdendo apenas para os custos com pessoal. Nos países em desenvolvimento, a energia é geralmente o custo mais elevado associado com a fonte de água.

Diante do exposto, torna-se primordial o desenvolvimento de metodologias e técnicas que proporcionem o aumento da eficiência energética dos sistemas de bombeamento e a redução das perdas de água. Esta pesquisa objetivou projetar um sistema de controle adaptativo para o controle, em tempo real, da pressão de sistemas de distribuição de água por meio da atuação na rotação do sistema de bombeamento e na abertura de válvulas.

MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA

As redes de distribuição de água com injeção direta estão sujeitas a variação da demanda ao longo do tempo, fenômeno que ocasiona alterações significativas nas condições de operação dos sistemas de controle. Os métodos clássicos de controle usualmente empregados no setor de saneamento apresentam limitações quando aplicados a processos com características complexas (não linearidades, instabilidade, tempo morto elevado, comportamento não estacionário e acoplamento entre as variáveis, etc.). Desse modo, as técnicas adaptativas foram adotadas porque o tipo de sistema de distribuição de água estudado requer o controle simultâneo de pressão por meio de equipamentos com características e comportamentos diferentes. A literatura apresenta inúmeras referências que evidenciam que os algoritmos adaptativos são uma solução adequada para o controle de sistemas dinâmicos complexos (PURWAR *et al.*, 2008; LIUZZO & TOMEI, 2008).

O princípio básico do funcionamento de um sistema de controle adaptativo é que os parâmetros dos controladores se alteram a cada mudança dos parâmetros da planta. Foram adotados nesta pesquisa controladores de Variância Mínima Generalizada (GMV) autoajustáveis, cujos parâmetros foram estimados em tempo real pelo algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (MQR), visando à atualização do sistema de controle diante das não linearidades apresentadas na operação da rede hidráulica.

O estimador dos mínimos quadrados manipula as medidas de entrada/saída nas formas não iterativa e iterativa por meio de um algoritmo recursivo. Este considera, *a priori*, que a ordem do modelo é conhecida e que as amostras entrada/saída estão disponíveis a cada período de amostragem no universo da experimentação. Diversos modelos de entrada/saída estão disponíveis na literatura, sendo escolhido o modelo linear Autorregressivo com Entradas Exógenas — ARX (*Autoregressive with External Input*) porque este apresenta a vantagem de identificar um sistema MIMO (múltiplas

entradas e múltiplas saídas) tão facilmente como um sistema SISO (uma entrada e uma saída) (HUUSOMA *et al.*, 2012).

O modelo ARX inclui em sua estrutura o erro e por isso é normalmente classificado como pertencendo à classe de modelos de erro na equação. O “erro” é interpretado como ruído e engloba todos os efeitos que não forem explicados nos dados por parte do modelo, tais como não linearidades, imprecisão de medições, incertezas, presenças de perturbações. Para um sistema SISO e com uma perturbação, a equação do modelo ARX é expressa pela Equação 1. A melhor previsão da saída (valor estimado), $\hat{y}(t)$, ocorre quando o erro $E(t)$ for zero. Logo, o estimador foi obtido pela minimização do erro de previsão (Equação 2).

$$y(t) = \varphi_m(t) \times \theta(t) + E(t) \quad (1)$$

$$\min_{\text{erro}} = \min \| |y(t) - \hat{y}(t)| \|^2 \quad (2)$$

onde $y(t)$ é a saída do sistema (observadas e/ou medidas); $\hat{y}(t)$ são as saídas estimadas do modelo; $\varphi_m(t)$ é o vetor de medidas; $\theta(t)$ é o vetor de parâmetros do sistema; $E(t)$ é o erro de modelagem.

A minimização da Equação 2 resulta nas Equações 3 e 4, que representam o estimador dos mínimos quadrados não recursivo. A Equação 4 é a matriz de covariância, $P(t)$, da qual depende a precisão das estimativas.

$$\hat{\theta}(t) = [\varphi_m^T \varphi_m]^{-1} \varphi_m^T y(t) \quad (3)$$

$$P(t) = \varphi_m^T(t) \times \varphi_m(t) \quad (4)$$

O algoritmo estimador dos parâmetros é iterativo, com o modelo do sistema sendo atualizado para cada período de amostragem. Dessa forma, o estimador dos mínimos quadrados não recursivo foi adaptado para resultar no algoritmo MQR, equação 5. No MQR, as estimativas anteriormente calculadas, ao instante de tempo t , são calculadas para obtenção dos parâmetros atualizados $\theta(t)$ (CARVALHO, 2009).

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + P(t) \times \varphi(t) \times \varepsilon(t) \quad (5)$$

A qualidade do modelo estimado depende, em parte, da natureza do sinal de entrada aplicado no sistema. Um sinal *Pseudo Random Binary Sequence* (PRBS) foi aplicado como entrada porque este excita os modos do sistema que correspondem ao conteúdo espectral, prevenindo a ocorrência de um condicionamento numérico ruim e a formação de colunas iguais na matriz de covariância.

Para processos variantes no tempo, é necessário fornecer ao MQR capacidade de adaptação mínima, o que foi considerado por meio da regulação de um elemento chamado de fator λ , que deu maior importância

às novas medidas. Com isso, o MQR assumiu a forma da Equação 6, onde $k(t)$ é o ganho do estimador (Equação 7). O MQR com o fator λ evitou que os elementos da matriz de covariância tendessem para zero, mantendo o estimador em alerta para rastrear dinâmicas variantes.

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + k(t) \times [y(t) - \varphi^T(t) \times \hat{\theta}(t-1)] \quad (6)$$

$$k(t) = \frac{P(t-1) \times \varphi(t)}{\lambda + \varphi^T(t) \times P(t-1) \times \varphi(t)} \quad (7)$$

O tipo de sistema de distribuição de água avaliado possui múltiplas entradas e múltiplas saídas. Reescrevendo a Equação 1 para um sistema MIMO, esta assume a forma dada pelos itens da Equação 8.

$$Y_M(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \ \dots \ y_p(t)]^T = \Theta^T(t) \times \Psi(t) + E_M(t) \quad (8.a)$$

$$U(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_r(t)]^T \quad (8.b)$$

$$E_M(t) = [e_1(t) \ e_2(t) \ \dots \ e_p(t)]^T \quad (8.c)$$

$$\Theta(t) = [A_1 \ A_2 \ \dots \ A_{na} \ B_1 \ B_2 \ \dots \ B_{nb}]^T \quad (8.d)$$

$$\Psi(t) = [-Y_M^T(t-1) \ -Y_M^T(t-2) \ \dots \ -Y_M^T(t-na) \ U^T(t-1) \ U^T(t-2) \ \dots \ U^T(t-nb)]^T \quad (8.e)$$

onde $Y_M(t)$ é a saída do sistema (observadas e/ou medidas); $U(t)$ são as variáveis de entrada; $E_M(t)$ é o erro de modelagem; $\Theta(t)$ é a matriz de parâmetros referente ao sistema MIMO; A e B são conjuntos de matrizes de polinômios com parâmetros a_i e b_j , respectivamente; $\Psi(t)$ é o vetor de medidas de entradas e saídas referentes ao sistema MIMO.

O modelo matemático da bancada experimental foi identificado, em tempo real, a partir dos dados de excitação do inversor de frequência, $u(t)$, e as respostas obtidas nos transdutores de pressão, $y_1(t)$ e $y_2(t)$. Definiu-se, *a priori*, que a estrutura do modelo dos ramais do sistema experimental tinha três polos, dois zeros e não possuía atraso, o que resultou nos itens da Equação 9 para o modelo, sendo a_i e b_j os parâmetros do sistema experimental de distribuição de água.

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -y_1(t-1) \\ -y_2(t-1) \\ -y_1(t-2) \\ -y_2(t-2) \\ -u_1(t-1) \\ -u_2(t-1) \\ -u_1(t-2) \\ -u_2(t-2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} \quad (9.a)$$

$$U(t) = [u_1(t) \ u_2(t)]^T \quad (9.b)$$

$$E_M(t) = [e_1(t) \ e_2(t)]^T \quad (9.c)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 \end{bmatrix}^T \quad (9.d)$$

$$\Psi(t) = [-Y_1(t-1) \ -Y_2(t-1) \ -Y_1(t-2) \ -Y_2(t-2) \ u_1(t-1) \ u_2^T(t-1) \ u_1(t-2) \ u_2^T(t-2)]^T \quad (9.e)$$

De forma análoga a um sistema SISO, a função custo do estimador MIMO, J_{MQ} , foi estimada por meio da equação 10, resultando na matriz de parâmetros estimados $\Theta(t)$ (MQR) e no ganho do estimador $k(t)$, ambos dados pelas Equações 11 e 12, respectivamente. Com a solução destas equações, obtêm-se os parâmetros do sistema experimental de distribuição de água a_i e b_j para cada período de amostragem. As respostas estimadas, $\hat{Y}_M(t)$, e os erros de previsão, $\xi_M(t)$, foram obtidos por meio das equações 13 e 14, respectivamente.

$$J_{MQ} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \|Y_M(t) - \Theta^T(t) \times \Psi_m(t)\|^2 \quad (10)$$

$$\hat{\Theta}(t) = \hat{\Theta}(t-1) + k(t) \times [Y(t) - \Psi_m^T(t) \times \hat{\Theta}(t-1)] \quad (11)$$

$$k(t) = \frac{P(t-1) \times \Psi_m(t)}{\lambda + \Psi_m^T(t) \times P(t-1) \times \Psi_m(t)} \quad (12)$$

$$\hat{Y}_M(t) = [\hat{y}_1(t) \ \hat{y}_2(t)] = \hat{\Theta} \times \Psi^T(t) \quad (13)$$

$$\xi_M(t) = [e_1(t) \ e_2(t)] = Y_M(t) - \hat{Y}_M(t) \quad (14)$$

Para a identificação da bancada experimental em estudo, em tempo real, o MQR foi executado com o auxílio do programa computacional Matlab®, com o tempo de amostragem de 5 ms. Nas excitações impulsivas aplicadas aos dois pontos de medição (um em cada ramal do sistema experimental) foram adicionados sinais PRBS com amplitudes da ordem de 0,5% das respectivas excitações.

CONTROLADOR DE VARIÂNCIA MÍNIMA GENERALIZADA AUTOAJUSTÁVEL

A técnica de controle GMV autoajustável foi desenvolvida na década de 1970 por Clarke e Gawthrop (1975), a partir da generalização do regulador de variância mínima proposto por Åström e Wittenmark (1973). Baseia-se na minimização de uma função custo, a qual é sintetizada em função do processo e da dinâmica desejada para a malha de controle por meio de uma saída generalizada.

O sinal de controle é otimizado de maneira a determinar, pelos parâmetros de projeto, a dinâmica transitória, reduzindo a sobre-elevação e eliminando ou atenuando o erro em regime permanente. Neste caso, optou-se pela liberdade de incluir parâmetros para atender às especificações de projeto, conferindo uma maior flexibilidade à estrutura do controlador. Considerando tal conceito, a função custo a ser minimizada foi composta para possibilitar a ponderação dos sinais de controle, referência e saída do sistema.

O diagrama esquemático do sistema de controle adaptativo supervisionado é mostrado na Figura 1 e a equação que rege tal sistema é escrita de acordo com a Equação 15. Observa-se que esta equação é composta por informações disponíveis no instante k e por informações futuras referentes ao instante k+d. Sendo assim, consideraram-se a identidade polinomial sugerida por Marchi *et al.* (1998) e os processos de cálculos estabelecidos pelo modelo ARX, que resultou nas Equações 16 e 17. A Equação 17 é composta por duas parcelas. A primeira (entre colchetes) é composta por informações disponíveis até o instante k, e a segunda, por informações futuras, no instante k+d.

$$\Phi(k+d) = \frac{P(z^{-1})B(z^{-1}) + A(z^{-1})Q(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) + \frac{P(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(k+d) - R(z^{-1})w(k) \quad (15)$$

$$P(z^{-1}) - z^{-d}G(z^{-1}) \times y(k+d) = B(z^{-1}) \times F(z^{-1}) \times u(k) + F(z^{-1}) \times e(k+d) \quad (16)$$

$$\Phi(k+d) = [((B(z^{-1})F(z^{-1}) + Q(z^{-1})) \times u(k) + G(z^{-1}) \times y(k) - R(z^{-1}) \times w(k))] + F(z^{-1}) \times e(k+d) \quad (17)$$

onde $\Phi(k+d)$ é o sistema generalizado para o instante d passos à frente do instante t; P, Q e R são polinômios de ponderação sobre os respectivos

sinais de saída, controle e referência; A, B, F e G são polinômios discretos de parâmetros; w(k) é a referência para a saída do sistema original no instante de tempo k; e(k+d) é o erro no instante (d+k); z⁻¹ é o operador de atraso, y(k)z⁻¹=y(k-1). Os polinômios P, Q e R foram ajustados de acordo com os critérios de desempenho estabelecidos.

O mínimo da função custo é obtido igualando o termo entre colchetes da Equação 17 a zero. Assim, a lei de controle de GVM é dada pela equação 18. Observa-se que a variável de controle é função dos valores de entrada e saída e da referência a ser seguida, obtidos no instante k, além de ser dependente dos parâmetros do sistema original, os quais são identificados recursivamente (VAZ, 1999). Estruturando o GMV e substituindo as equações encontradas tem-se o diagrama mostrado na Figura 2 para a dinâmica do sistema em malha fechada. Este é descrito pela Equação 19.

$$y(k) = \left(\frac{z^{-d} \times B(z^{-1}) \times R(z^{-1})}{B(z^{-1}) \times P(z^{-1}) + Q(z^{-1}) \times A(z^{-1})} \right) w(k) \left(\frac{B(z^{-1}) \times F(z^{-1}) + Q(z^{-1})}{B(z^{-1}) \times P(z^{-1}) + Q(z^{-1}) \times A(z^{-1})} \right) e(k) \quad (18)$$

$$u(k) = \frac{R(z^{-1}) \times w(k) - G(z^{-1}) \times y(k)}{B(z^{-1}) \times F(z^{-1}) + Q(z^{-1})} \quad (19)$$

Os parâmetros P, Q e R, presentes na equação 19, devem ser selecionados pelo projetista. Neste caso, adotou-se R(z⁻¹) = P(1) e Q(z⁻¹) = q₀(1-z⁻¹), de maneira a garantir um comportamento transitório e de regime permanente adequado ao sistema em malha fechada. O procedimento de projeto do controlador consistiu em calcular o valor da variável de controle, supondo os parâmetros do sistema conhecidos e, em seguida, fazendo a sua substituição pelos valores dos parâmetros estimados, de forma recursiva.

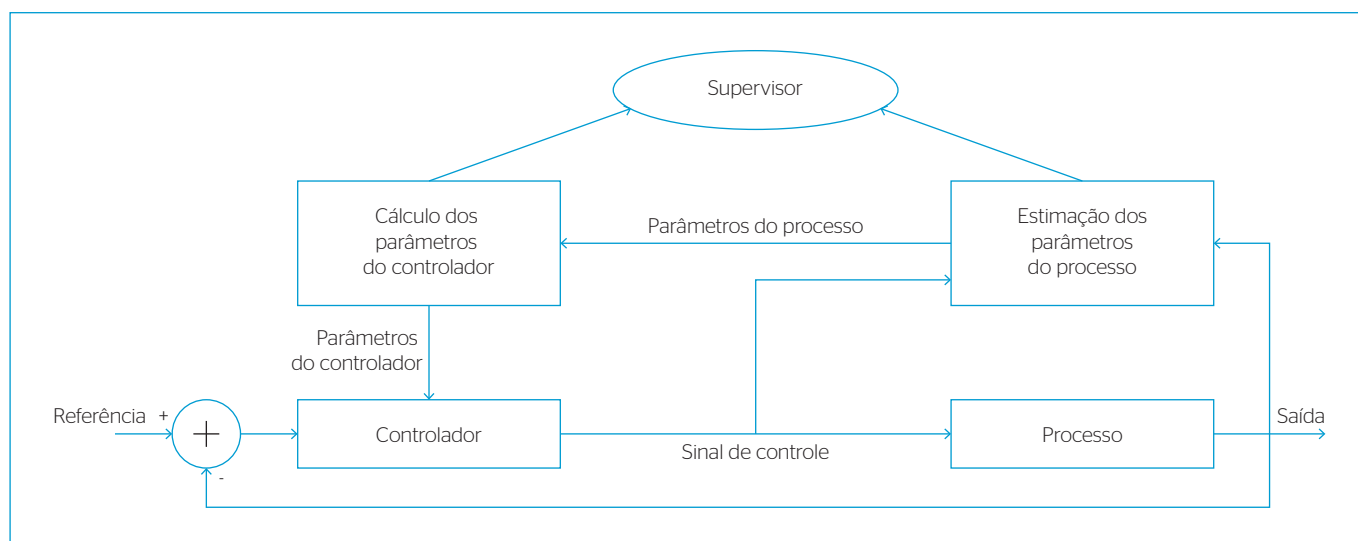


Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema de controle adaptativo.

Os polinômios $A_1(z^{-1})$, $B_1(z^{-1})$, $A_2(z^{-1})$ e $B_2(z^{-1})$ compõem as funções de transferência dos ramos e são dados pelos itens da Equação 20. Os polinômios são compostos pelos parâmetros que representam a dinâmica “própria” de cada ramo. Os polinômios F e G são representados pelas Equações 21 e 22, respectivamente.

$$A_1(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_3 z^{-2} \quad (20.a)$$

$$B_1(z^{-1}) = 1 + b_1 z^{-1} + b_3 z^{-2} \quad (20.b)$$

$$A_2(z^{-1}) = 1 + a_6 z^{-1} + a_8 z^{-2} \quad (20.c)$$

$$B_2(z^{-1}) = 1 + b_8 z^{-1} + b_8 z^{-2} \quad (20.d)$$

$$F_1(z^{-1}) = 1 + f_{0_1} \quad (21.a)$$

$$F_2(z^{-1}) = 1 + f_{0_2} \quad (21.b)$$

$$G_1(z^{-1}) = g_{0_1} + g_{1_1} z^{-1} \quad (22.a)$$

$$G_2(z^{-1}) = g_{0_2} + g_{1_2} z^{-1} \quad (22.b)$$

onde a_n , b_n , f_n e g_n são parâmetros discretos dos polinômios.

Realizando as devidas manipulações nas equações e considerando os parâmetros a_i e b_j estimados para estes modelos, obtêm-se as Equações 23 e 24 representando as leis de controle dos ramos do sistema experimental. Tais equações foram adotadas no controlador GMV autoajustável implementado no ambiente LabVIEW.

$$u_1(k) = \left[\frac{r_1 w_1(k) - g_{0_1} y_1(k) - g_{1_1} y_1(k-1) - (b_3 + b_3 f_{0_1} + q_{1_1}) u_1(k-1)}{(b_1 + b_1 f_{0_1} + q_{0_1})} \right] \quad (23)$$

$$u_2(k) = \left[\frac{r_2 w_2(k) - g_{0_2} y_2(k) - g_{1_2} y_2(k-1) - (b_8 + b_8 f_{0_2} + q_{1_2}) u_2(k-1)}{(b_6 + b_6 f_{0_2} + q_{0_2})} \right] \quad (24)$$

onde $y_i = w_i(k) - E_i(k)$; $w_i(k)$ é a referência preestabelecida para o ramo i ; $e_i(k)$ é o sinal de erro de posicionamento referente ao ramo i .

DESCRIÇÃO DA BANCADA DE TESTES E DOS ENSAIOS

O sistema de controle adaptativo foi implementado e testado em um sistema experimental de distribuição de água (Figura 3) localizado no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e é constituído de um reservatório circular de 7,64 m³, um conjunto motor-bomba (CMB) de 3 cv, um inversor de frequência, duas válvulas de controle (CVc e CVs), dois transdutores de pressão (PT1 e PT2), dois medidores de vazão, fontes de alimentação, manômetros tipo *bourdon*, além das conexões e tubos de PVC (DN 50) da rede hidráulica.

A rede hidráulica contém dois ramos que emulam a alimentação de dois setores em sistemas de distribuição de água reais. A CVs, a jusante do PT1, tem a função de alterar as condições de operação do sistema, proporcionando a variação da vazão demandada. À medida que a CVs fecha, a vazão diminui e, conseqüentemente, a pressão a montante aumenta. O inversor de frequência será responsável por manter a pressão no ponto mais desfavorável igual à pressão desejada (pressão de referência), enquanto a CVc elimina o excesso de pressão no ponto de medição do ramo 1.

Realizaram-se três experimentos para atestar a eficiência do controlador adaptativo e o seu impacto no consumo de energia elétrica e água, cuja diferença entre estes é a abertura da CVs. Os experimentos 1, 2 e 3 foram realizados com a CVs nas posições 22,5°, 45,0° e 67,5°, respectivamente.

Os ensaios experimentais foram realizados com o sistema em malha fechada para uma entrada tipo degrau igual a 20 mca para os dois pontos de monitoramento de pressão. Estes iniciaram com a frequência da tensão de alimentação do motor em 30 Hz e a CVc totalmente fechada. O tempo de duração dos experimentos foi de 5 minutos e a aquisição de dados foi feita a cada 2 segundos, gerando uma massa de 150 amostras por ensaio.

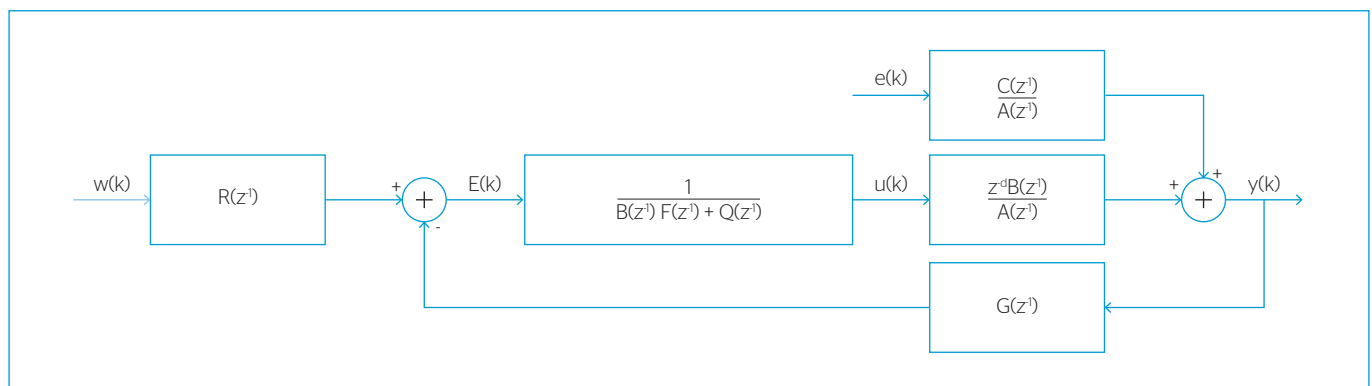


Figura 2 - Diagrama de blocos do controlador de variância mínima generalizada desenvolvido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados diversos testes, em que foi constatado que as respostas seguem, em cada experimento, um mesmo padrão. O inversor de frequência, atuando de maneira isolada, não tem capacidade de otimizar a pressão em mais de um ponto de um sistema de distribuição de água. Desse modo, o inversor foi responsável por manter a pressão no ponto de monitoramento mais desfavorável (maior déficit de pressão) no valor desejado, enquanto a válvula de controle eliminou o excesso de pressão a sua jusante.

O comportamento dos experimentos 1, 2 e 3 é representado nas Figuras 4 a 6, respectivamente. Observa-se que enquanto as pressões do sistema são inferiores à pressão de referência, o controlador atua aumentando a velocidade de rotação do CMB e o ângulo de abertura da válvula CVC, até que a pressão nos ramais atinja o valor da referência (20 mca). Na Tabela 1 é apresentada a sinopse dos resultados dos três experimentos. Os valores dos parâmetros demonstram a aplicabilidade do controlador adaptativo GMV autoajustável no controle de sistemas de distribuição de água.

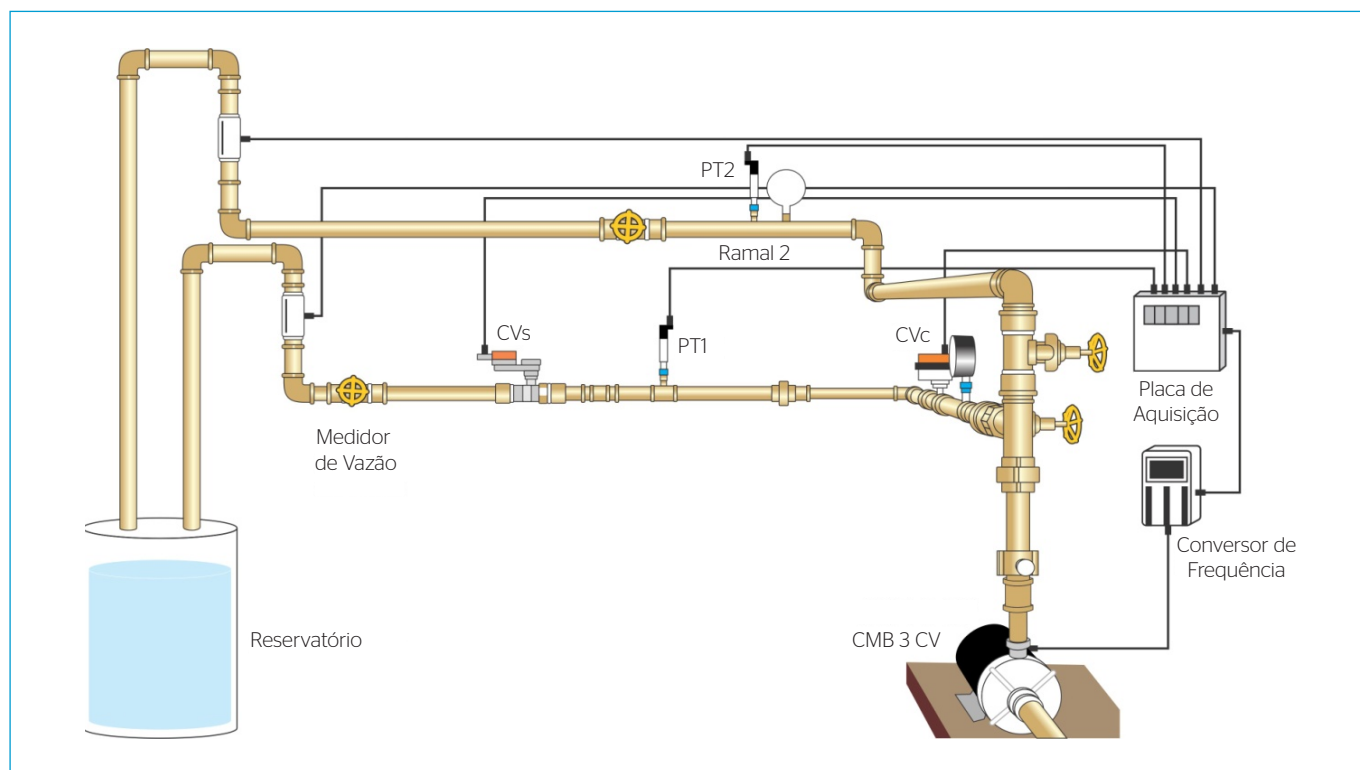


Figura 3 - Diagrama esquemático da bancada experimental de distribuição de água.

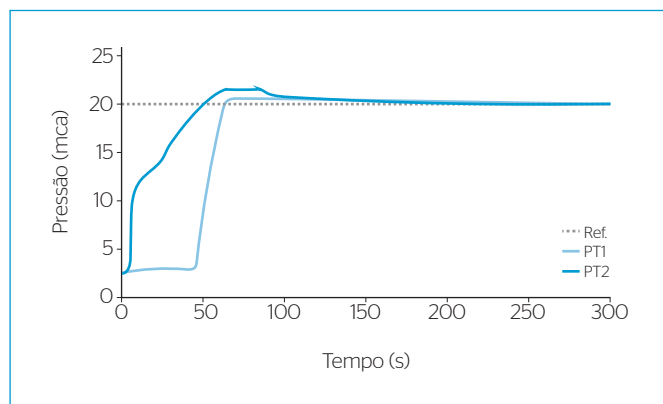


Figura 4 - Curvas de resposta das pressões resultantes no experimento 1 (CVs=22,5°).

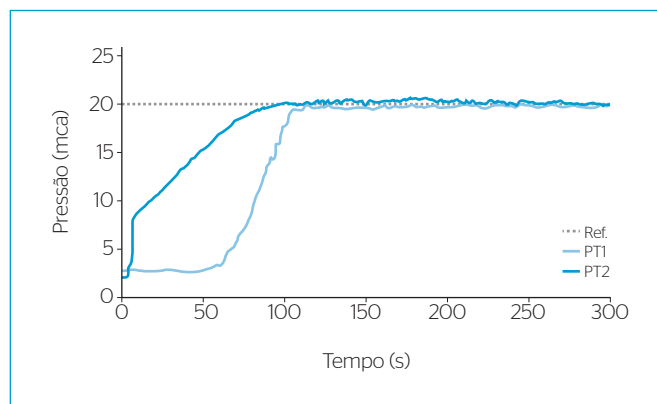


Figura 5 - Curvas de resposta das pressões resultantes no experimento 2 (CVs=45°).

Na prática, variações de pressão inferiores a 2 mca são plenamente aceitas na operação de redes hidráulicas. Nas Figuras 7 e 8 são mostradas, respectivamente, as curvas de resposta da CVC e do inversor de frequência. Nas Figuras 9 a 11 é mostrado o comportamento do erro nos pontos de medição dos experimentos. O erro máximo no regime estacionário dos ensaios foi de 2,12%, que equivale a 0,42 mca.

Após a verificação da aplicabilidade do sistema de controle, analisou-se o comportamento da potência elétrica do motor para a CVCs nas posições 0°, 22,5°, 45°, 67,5° e 90° (Figura 12).

Comparando a energia consumida pelo sistema experimental operando com e sem a atuação do sistema de controle tem-se uma redução de 19,2% na energia consumida e de 16,7% no consumo específico de energia elétrica para a condição mais desfavorável de ganho de energia (vazão máxima). À medida que a CVCs é fechada, a vazão no setor diminui e, conseqüentemente, há uma exigência menor da bomba, resultando na diminuição significativa do consumo de energia elétrica à medida que o ângulo de abertura da CVCs diminui.

O controle da pressão é a principal ação para o controle de perdas reais (físicas) em sistemas de distribuição de água (BEZERRA *et al.*, 2012; BABIĆ *et al.*, 2014). A manutenção da pressão próxima

Tabela 1 - Resultados dos experimentos.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Posição da CVCs	22,5°	45,0°	67,5°
Tempo de assentamento	134 segundos	107 segundos	122 segundos
Sobressinal máximo	8,44% (1,69 mca)	2,99% (0,60 mca)	5,60% (1,12 mca)
Erro médio - PT1	1,72% (0,34 mca)	0,82% (0,16 mca)	2,12% (0,42 mca)
Erro médio - PT2	1,24% (0,25 mca)	1,30% (0,26 mca)	1,00% (0,20 mca)

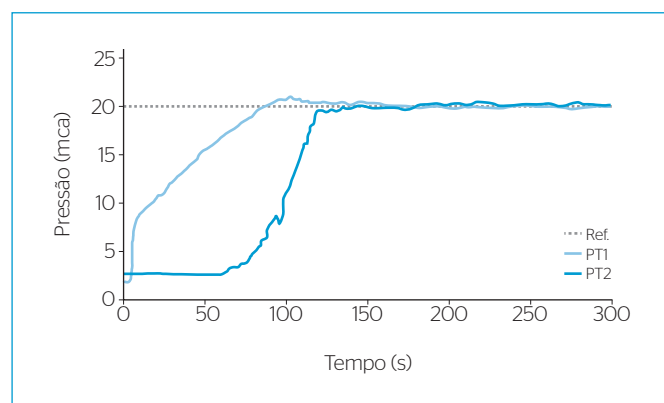


Figura 6 - Curvas de resposta das pressões resultantes no experimento 3 (CVCs=67,5°).

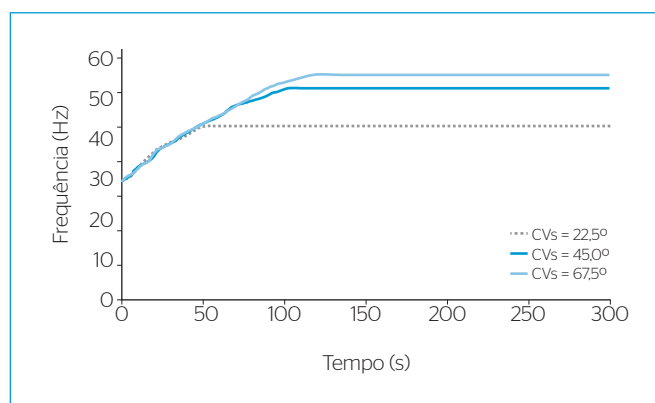


Figura 8 - Comportamento da frequência de acionamento do motor nos experimentos.

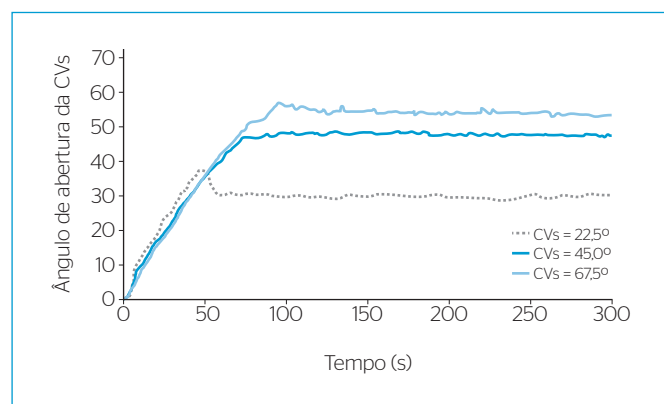


Figura 7 - Comportamento da válvula de controle do sistema nos experimentos.

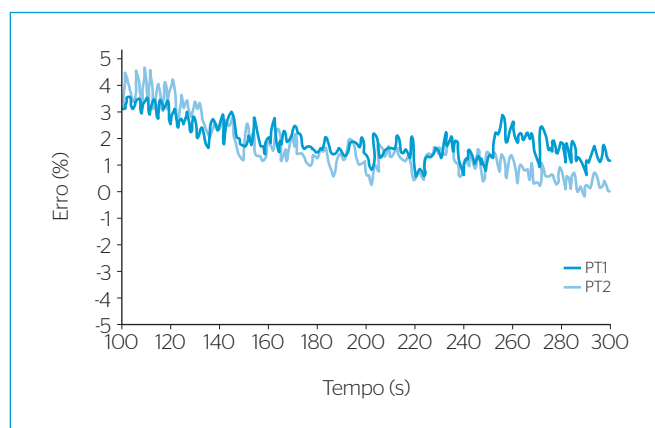


Figura 9 - Comportamento do erro: experimento 1.

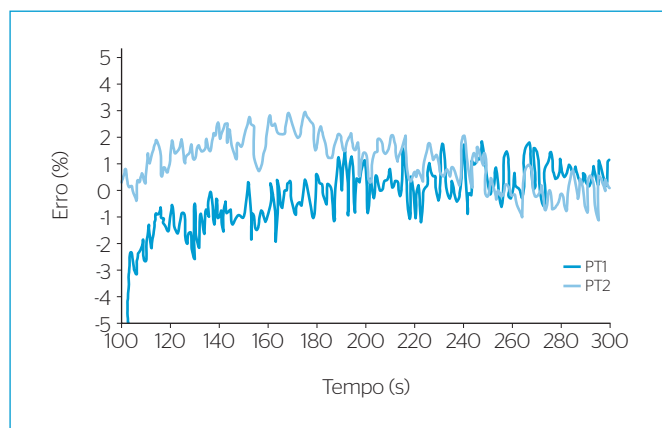


Figura 10 - Comportamento do erro: experimento 2.

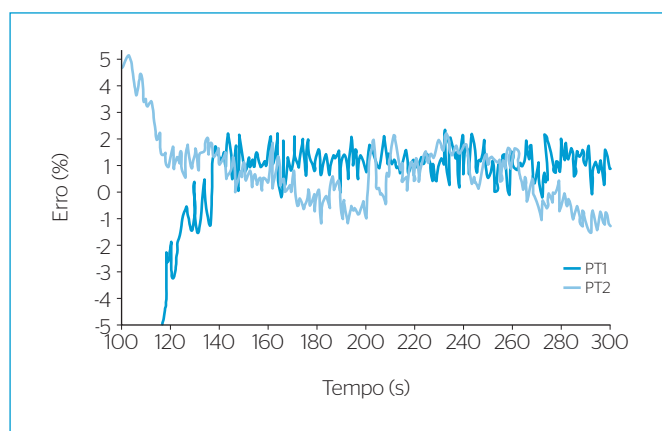


Figura 11 - Comportamento do erro: experimento 3.

a valores predefinidos em redes reais proporciona, também, a redução no volume de água perdido por vazamentos. Segundo Babić *et al.* (2014), uma redução de 10% na pressão do sistema resulta, geralmente, em uma diminuição no volume perdido em vazamentos entre 5 e 15%, podendo atingir, em alguns casos, uma redução de 23%.

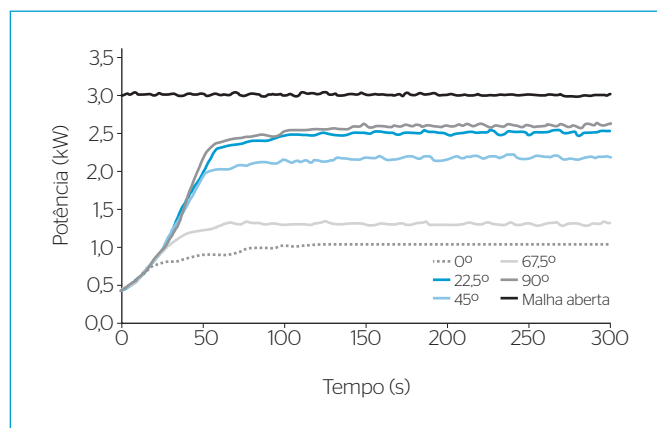


Figura 12 - Curva de resposta da potência elétrica (por fase).

CONCLUSÃO

Conclui-se que o controlador adaptativo GMV autoajustável projetado é estável e robusto, tendo apresentado um bom desempenho no controle da pressão e uma redução satisfatória no consumo de energia elétrica na operação da bancada experimental apresentada. Extrapolando a aplicação para sistemas reais e considerando que uma das principais ações de controle de perdas reais de água é o controle de pressão, a manutenção da pressão próxima a valores predefinidos em redes reais resultaria, também, em uma diminuição significativa no volume de água perdido em vazamentos.

Devido às características adaptativas do sistema desenvolvido, espera-se que este se ajuste satisfatoriamente às condições operacionais impostas em redes hidráulicas reais, que, comumente, possuem múltiplos ramos e derivações, muitas vezes sem setorização. De forma geral, o sistema de controle garante que os valores de pressão nos pontos de medição permaneçam próximos aos valores de referência, porém ressalta-se que, em aplicações reais, o desempenho global do sistema está diretamente relacionado com a definição desses pontos pelo gestor da operação.

REFERÊNCIAS

- ÅSTRÖM, K.J. & WITTENMARK, B. (1973) On self-tuning regulators. *Automatica*, v. 9, n. 2, p. 185-199.
- BABIĆ, B.; DUKIĆ, A.; STANIĆ, M. (2014) Managing water pressure for water savings in developing countries. *Water SA*, v. 40, n. 2, p. 221-232.
- BEZERRA, S.T.M.; SILVA, S.A.; GOMES, H.P. (2012) Operational optimisation of water supply networks using a fuzzy system. *Water SA*, v. 38, n. 4, p. 565-572.
- CARVALHO, J.S.F. (2009) *Controle adaptativo aplicado em um robô manipulador de dois graus de liberdade planar*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- CLARKE, D.W. & GAWTHROP, P.J. (1975) Self-Tuning controller. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, v. 122, n. 9, p. 929-934.
- ELETRORÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (2008). Disponível em: <<http://www.eletronbras.com>>. 2008. Acesso em: 28 out. 2008.

HUUSOMA, J.K.; POULSEN, N.K.; JØRGENSEN, S.B.; JØRGENSEN, J.B. (2012) Tuning SISO offset-free Model Predictive Control based on ARX models. *Journal of Process Control*, v. 22, n. 10, p. 1997-2007.

LIUZZO, S. & TOMEI, P.A. (2008) A global adaptive learning control for robotic manipulators. *Automatica*, v. 44, n. 5, p. 1379-1384.

MARCHI, P.A.; ROCHA, C.R.; VENTURO, C.J.; BOUZON, G.; SIMAS, H. (1998) Aspectos em identificação, projeto e experimentação de algoritmos de controle adaptativo e predito indireto e direto. In: Congresso Brasileiro de Automática, 12, *Anais...*. Uberlândia: CBA.

PELLI, T. & HITZ, H.U. Energy indicators and savings in water supply. (2000) *Journal AWWA*, v. 92, n. 6, p. 55-62.

PURWARA, S.; KARB, I.N.; JHAB, A.N. (2008) Adaptive output feedback tracking control of robot manipulators using position measurements only. *Expert Systems with Applications*, v. 34, n. 4, p. 2789-2798.

SANDERS, K.T. & WEBBER, M.E. (2012) Evaluating the energy consumed for water use in the United States. *Environmental Research Letters*, v. 7, p. 1-11.

VAZ, G.L.F. (1999) *Controladores adaptativos de Variância Mínima e Dahlin: uma revisão e novas concepções de projeto*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

WANG, J.Y.; CHANG, T.P.; CHEN, J.S. (2009) An enhanced genetic algorithm for bi-objective pump scheduling in water supply. *Expert Systems with Applications*, v. 36, p. 249-258.