

CONTROLE PREDITIVO NÃO LINEAR APLICADO À VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO COM ATUAÇÃO DIRETA

CARLOS FELIPE ILHA PEREIRA *, ANDRÉ MURILO*, ANDERSON QUADROS*, WALTER DE BRITTO VIDAL FILHO*

*Departamento de Engenharia Mecânica, FT- UnB, Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF, Brasil

Emails: carlosfelipeilhapereira@gmail.com, andremurilo@unb.br,
anderson@compesa.com.br, wbritto1@gmail.com

Resumo— Water resources have become increasingly limited as a result of climate seasonality, agriculture activities, and others. Moreover, the physical and apparent water losses also contribute to water scarcity. In this context, Pressure Reducing Valves (PRV) are used in water supply networks to keep the the pressure under acceptable values in order to reduce pipe ruptures and leaks. However, such process presents several nonlinearities and physical constraints leading to a highly complex model. In this paper, a parameterized Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) is proposed for the PRV combined with a water network. Simulation results show higher efficiency of the predictive controller when comparing to the existing PID controllers in the literature and show feasibility of embedded implementation

Palavras-chave— parameterized NMPC, pressure reducing valves, water supply systems

Resumo— Os recursos hídricos vêm se tornando escassos em decorrência de sazonalidades climáticas, atividades de agricultura, entre outros. Além disso, as perdas físicas e aparentes contribuem para a escassez da água. Neste contexto, as Válvulas Redutoras de Pressão VRP são utilizadas em redes de distribuição de água para controlar a pressão a jusante da válvula, reduzir oscilações demasiadas de pressão, que contribui para a redução de rupturas da tubulação e de vazamentos. Esse processo contém não linearidades e restrições, o que o conduz a um modelo de complexidade elevada. Neste artigo, é proposto o controle preditivo baseado em modelo não linear (*Nonlinear Model Predictive Control- NMPC*) aplicado ao processo da VRP, representado por um modelo fenomenológico simplificado, combinado a uma rede hidráulica. Os resultados apontam maior eficiência do controlador preditivo em relação a controladores PID existentes na literatura e mostram viabilidade de implementação embarcada.

Palavras-chave— NMPC parametrizado, válvulas redutoras de pressão, controle de pressão em redes hidráulicas

1 Introdução

As perdas físicas de água são representadas pelo volume de água captado que é perdido antes de chegar ao consumidor final e, sobre elas, estão atrelados custos de produção e distribuição do produto. Os vazamentos são as principais ocorrências dessas perdas e suas principais características negativas são o desperdício físico e financeiro do recurso hídrico, e risco de contaminação (ABES, 2013).

Uma das ferramentas mais importantes para reduzir a incidência dos vazamentos é a implementação de controle de pressão por meio de Válvulas Redutoras de Pressão - VRP (Gonçalves e Lima, 2007). A intermitência de fornecimento causa picos de pressão na rede que, por sua vez, causam danos à tubulação em menores intervalos de tempo (Force e Thornton, 2003). Por meio das VRP's pode-se reduzir a ocorrência de fugas de água do sistema sem prejuízo do desempenho hidráulico do sistema (Ramos et al., 2004).

Os controladores para VRP listados na literatura são subdivididos em dois tipos: controlador de ação direta e de ação indireta. Os controladores de ação direta utilizam atuadores on/off posicionados em um circuito auxiliar da VRP e proporcionam a mudança direta da pressão do espaço de controle. Por sua vez, o controle de atuação

indireta é efetuado com o acionamento de uma válvula piloto localizada no circuito de controle, a qual altera dinamicamente a pressão no espaço de controle (Quadros e Murilo, 2013).

Já foram efetuadas pesquisas sobre implementação de controladores Proporcional, Integral e Derivativo (PID) para o problema em questão. Prescott e Ulanicki (2008) desenvolveu um controlador PID de atuação direta em que um modelo comportamental da válvula foi utilizado para simular o processo. Outra contribuição aborda o desenvolvimento de PID de atuação indireta sintonizado por três métodos (Quadros e Murilo, 2013). Nesse artigo obteve-se uma significativa redução da variância da pressão de saída em relação à VRP com controle mecânico e foi proposta a utilização de uma válvula solenóide proporcional linear como atuador, o que possibilita a implementação de controles avançados, tal como não lineares.

A utilização de modelo não linear e restrições operacionais do sistema indica que a utilização de um controle preditivo baseado em modelo não linear - NMPC deve possibilitar melhores resultados de controle. Essa técnica utiliza explicitamente o modelo do sistema para prever o comportamento futuro do processo, minimiza uma função custo para encontrar uma sequência ótima de controle para todo horizonte de predição

N e aplica apenas o primeira ação dessa sequência (Alamir, 2013; Moutinho et al., 2012). Neste artigo, é proposto o NMPC que considera o processo com atuação direta, baseado no modelo fenomenológico simplificado de Prescott e Ulanicki (2008), substituição do atuador, apresentada por Quadros e Murilo (2013), e modificação da forma de atuação, acoplado ao modelo de uma rede hidráulica. Este controlador NMPC tem grande aproximação com o caso real devido a não ser conhecido o comportamento futuro da demanda e os estados serem medidos no modelo da rede. Os resultados contemplam o que seria obtido com um controlador embarcado. Identifica-se estabilidade da pressão de saída da VRP e uma menor incidência de picos na rede hidráulica. Devido a otimização *on-line*, um alto poder de processamento é demandado, assim, isso foi solucionado com a parametrização da variável de controle, técnica que reduz o número de variáveis de decisão sem uma redução significativa de desempenho (Alamir, 2013).

2 Modelos do Processo

A modelagem fenomenológica simplificada apresentada a seguir, foi desenvolvida por Prescott e Ulanicki (2003), com base nos fenômenos dinâmicos que ocorrem no circuito da VRP. No modelo apresentado, foi modificado o atuador, em que uma válvula solenóide proporcional linear possibilita a relação direta entre sinal de controle e abertura da VRP, assim como sugerido por Quadros e Murilo (2013). Além disso, temos um modelo de atuação direta neste artigo. Na figura 1 encontra-se a constituição da válvula para melhor compreensão.

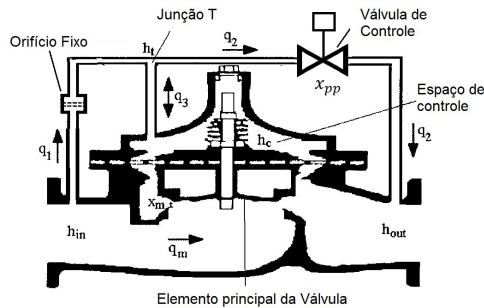


Figura 1: Válvula redutora de pressão. Adaptado de: (Prescott e Ulanicki, 2003).

A modelagem fenomenológica é apresentada nas equações 1 a 7.

$$\dot{x}_m(t) = \frac{q_3(t)}{A_{cs}(x_m, t)} \quad (1)$$

$$\rho g(h_{in}(t)a_1 + h_{out}(t)(a_2 - a_1) - h_c(t)a_2) - m_m g + \frac{\rho q_m^2(t)}{a_1} = 0 \quad (2)$$

$$C_{vpp}(x_{pp}, t) = 1 * 10^{-3} * x_{pp} \quad (3)$$

$$q_m(t) = C_{vm}(x_m, t) \sqrt{h_{in}(t) - h_{out}(t)} \quad (4)$$

$$q_1(t) = C_{vfo} \sqrt{h_{in}(t) - h_t(t)} \quad (5)$$

$$q_2(t) = C_{vpp}(x_{pp}, t) \sqrt{h_t(t) - h_{out}(t)} \quad (6)$$

$$q_3(t) = q_2(t) - q_1(t) \quad (7)$$

onde $x_m(t)$: abertura da VRP; $x_{pp}(t)$: abertura da válvula piloto linear; $\dot{x}_m(t)$: taxa de abertura da VRP; A_{cs} : área da superfície superior do diafragma da VRP; a_1 : área da superfície do elemento principal da VRP; a_2 : área da superfície da tampa da VRP; m_m : massa da VRP; ρ : densidade da água; g : aceleração da gravidade; $h_{in}(t)$: pressão à montante da VRP; $h_{out}(t)$: pressão à jusante da VRP; $h_t(t)$: pressão no T do circuito de controle; $h_c(t)$: pressão na câmara de controle; h_{sp} : pressão de *set - point*; $C_{vpp}(t)$: capacidade da válvula solenóide proporcional linear; $C_{vm}(t)$: capacidade da VRP; C_{vfo} : capacidade do orifício fixo; $q_1(t)$: vazão no orifício fixo; $q_2(t)$: vazão na válvula piloto; $q_3(t)$: vazão de entrada ou saída na câmara de controle; $q_m(t)$: vazão na VRP em função de sua abertura.

Algumas constantes foram obtidas com dados da literatura (Prescott e Ulanicki, 2003): $a_1 = 0,0078m^2$, $a_2 = 0,0218m^2$, $m_m = 8kg$. O coeficiente do orifício fixo foi estabelecido como $C_{vfo} = 1 * 10^{-6}$. A capacidade da válvula principal ($C_{vm}(t)$) e a área da superfície superior do diafragma A_{cs} , são calculadas por meio das equações (8) e (9).

$$C_{vm}(x_m, t) = 0,02107 - 0,02962e^{-51,1322x_m(t)} + 0,0109e^{-261x_m(t)} - 0,00325e^{-683,17x_m(t)} + 0,0009e^{-399,5x_m(t)} \quad (8)$$

$$A_{cs}(x_m, t) = \frac{1}{3700 * (0,02732 - x_m(t))} \quad (9)$$

Quanto à tubulação, temos que a rede hidráulica fica submetida à pequenas perturbações oriundas de variações do consumo, dessa forma, é razoável utilizar o método da coluna rígida (eq. 10) (Prescott e Ulanicki, 2003; Quadros e Murilo, 2013).

$$\dot{q}(t) = \frac{gA}{L}(p_m(t) - p_j(t) - f_{DW} \frac{L}{D} \frac{\nu^2}{2g}) \quad (10)$$

onde: $\dot{q}(t)$ é taxa de variação da vazão no trecho da tubulação, g é aceleração da gravidade, A é área de seção transversal da tubulação, L é comprimento da tubulação, $p_m(t)$ corresponde a pressão à montante da tubulação, $p_j(t)$ a pressão à jusante da tubulação, f_{DW} coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach, D o diâmetro da tubulação e ν a velocidade de escoamento do fluido na tubulação.

A modelagem das válvulas de bloqueio v_1 e v_2 foi baseada na equação de Darcy-Weisbach, conforme equação (11).

$$q = ca \sqrt{2g(p_m(t) - p_j(t))} \quad (11)$$

Dentre as variáveis, q , g , $p_m(t)$ e $p_j(t)$ já foram estabelecidas anteriormente e c é o coeficiente de descarga da válvula, a a área de seção transversal do orifício. Nas simulações tivemos $g = 9.806 \text{ m/s}^2$ e $a = 0.007854 \text{ m}^2$.

2.1 Modelo da Simulação

Por meio do acoplamento da VRP à rede hidráulica e o estabelecimento de realimentação entre variáveis dos dois modelos, obtém-se o processo a ser controlado. Os componentes dessa rede são arranjados em série: uma fonte hidráulica de pressão constante, válvulas de bloqueio (v_1 e v_2), VRP e quatro tubos fecham o circuito, como mostrado na figura 2.

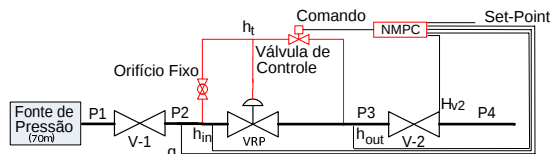


Figura 2: Rede hidráulica representada por modelo na simulação

A válvula v_2 teve seu coeficiente característico variado ao longo do tempo, de forma a caracterizar o perfil de consumo submetido ao processo. Os modelos da VRP e rede são independentes. As variáveis h_{in} , h_{out} , q_m e h_{v2} (pressão a montante do consumidor) são mensurados pela rede, enquanto x_m é obtida do modelo da VRP.

A simulação foi efetuada com o estabelecimento de um perfil de consumidor em (C_{v2}). No controlador, o coeficiente C_{v2} é calculado por meio da leitura da pressão a montante do consumidor (h_{v2} - obtido no modelo da rede) e de uma pressão a jusante de V_2 estabelecida como constante. A pressão na fonte hidráulica ps tem valor de 70 mca .

3 Metodologia de controle

3.1 Definições e Notações

A metodologia de controle preditivo baseado em modelo (*Model Predictive Control* - MPC) faz referência à um grupo de algoritmos de controle que utiliza explicitamente o modelo dinâmico do processo para prever sua evolução futura (Moutinho et al., 2012). A ideia principal do MPC é computar uma sequência ótima de controle em um horizonte de predição (N) a cada instante de amostragem por meio da minimização de uma função custo e aplicar apenas a primeira ação dessa sequência ótima. Tal metodologia é a única que possibilita manipulação sistemática das restrições e proporciona que limites operacionais do processo sejam respeitados (Alamir, 2013; Murilo, 2009).

Essa forma de resolução que utiliza a ação de controle do período de amostragem atual é denominada de resolução *on-line* e essa é a principal

diferença em relação ao controle convencional, que utiliza uma lei de controle preestabelecida. Isso é um ganho que faz com que o MPC seja reconhecido pela habilidade para lidar com problemas em que o cálculo da lei de controle *off-line* é muito difícil ou que não pode ser empregada devido às características de processo (Mayne et al., 2000).

O NMPC (*Nonlinear Model Predictive Control*) aborda o mesmo princípio do MPC, usando modelos não lineares. O problema de controle não linear produz uma função custo não convexa enquanto uma função custo convexa é estabelecida para o problema linear. A não convexidade torna muito mais difícil o problema de controle (Alamir, 2013). Devido à isso, o NMPC é altamente dependente dos recursos computacionais para resolver o problema de otimização *on-line*. Uma das maneiras de resolver este problema é por meio da parametrização da variável controle, técnica que reduz o número de variáveis de decisão sem comprometer o desempenho do controlador (Alamir, 2013; Murilo et al., 2014).

O controle NMPC tem importantes vantagens em relação à metodologias clássicas de controle (Alamir, 2013). Primeiro, a habilidade de lidar com processos onde uma lei de controle *off-line* é difícil de ser obtida devido às características do processo. Segundo, a possibilidade de o NMPC efetuar manipulação sistemática das restrições: processos reais contêm restrições que precisam ser tratadas para reproduzir de forma completa o comportamento do processo. Seu método genérico facilita sua implementação em problemas de controle completamente diferentes. A utilização dessa forma de controle também permite manipulação de modelos com múltiplas variáveis e modelos não lineares. Todas essas características fazem do NMPC uma interessante solução de controle para o problema da VRP.

A formulação matemática do NMPC é iniciada com o estabelecimento do conjunto de equações não lineares que descrevem o modelo: $x(k+1) = f(x(k), u(k))$.

Onde $k \in N$ é o instante atual, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ contém todas variáveis (n variáveis) que descrevem o estado, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^{n_u}$ representa o vetor de controle que possui n_u entradas, determinadas pelo número de atuadores. É assumido que o estado atual $x(k)$ e todos parâmetros do modelo $f(\cdot)$, da VRP e rede, são conhecidos assim como as medições necessárias são efetuadas. A variável de controle da VRP é a abertura da válvula piloto, em metros ($n_u = 1$). A saída do processo da VRP $y \in \mathbf{R}^{n_y}$ é a pressão a jusante e o vetor de saída tem dimensão $n_y = 1$.

Determinada a expressão do estado futuro do processo, o próximo passo é estabelecer um problema de controle para ser resolvido. É necessário realizar o ajuste da válvula piloto de forma com que pressão a jusante da VRP siga o valor de

referência. As restrições da entrada de controle u devem satisfazer o conjunto de restrições para $i \in 1, \dots, N$:

$$u^{min} \leq u(k+i-1) \leq u^{max} \quad (12)$$

$$\delta^{min} \leq u(k+i) - u(k+i-1) \leq \delta^{max} \quad (13)$$

onde $u^{min}=6.4 \times 10^{-5}$ é a abertura mínima da abertura da válvula piloto, $u^{max}=3.2 \times 10^{-3}$ é a abertura máxima da abertura da válvula piloto, $\delta^{min} = -2.5 \times 10^{-4}$ é a taxa mínima de abertura da válvula piloto e $\delta^{max} = 2.5 \times 10^{-4}$ é a taxa máxima de abertura da válvula piloto.

3.2 Parametrização do Controle NMPC

Na formulação clássica do NMPC, o tamanho da variável de decisão é dada pelo produto entre o número de atuadores pelo horizonte de predição ($n_u \cdot N$). Por sua vez, ao parametrizar a variável de comando do NMPC estabelece-se um perfil de controle com menos graus de liberdade dentro do horizonte de predição. Dentre as diversas maneiras de efetuar a parametrização do NMPC, uma possível solução é a parametrização exponencial, estabelecida por Murilo et al. (2014). Essa parametrização para o processo da VRP envolve o controle estacionário u^* e a simples parametrização exponencial para a sequência de controle futuro, como mostrado na equação (14).

$$u(i\tau + t) = Sat_{u_{min}}^{u_{max}}(u^* + \alpha_1 e^{-\lambda \tau i} + \alpha_2 e^{-\lambda q \tau i}) \quad \text{para } t \in [(k-1)\tau, k\tau] \quad (14)$$

Onde τ é o período de amostragem, $i \in 0, \dots, N-1$, $\lambda > 0$ e $q \in N$ são parâmetros de sintonia, α_1 e $\alpha_2 \in R^m$ são coeficientes que serão determinados por meio de alguns procedimentos matemáticos que serão abordados no decorrer deste tópico, e Sat é o mapa de saturação das restrições da variável de comando, que satura essa variável entre os valores máximo e mínimo, como mostrado:

$$Sat_{u_{min}}^{u_{max}}(u) = \begin{cases} u_{min} & \text{se } u_i \leq u_{min} \\ u_{max} & \text{se } u_i \geq u_{max} \\ u & \text{Demais casos} \end{cases} \quad (15)$$

A sequência de controle é contínua no decorrer do tempo, assim, considerando $i=0$ para o primeiro instante e $i=1$ para o segundo instante em (14), obtêm-se as equações:

$$u(k-1) = u^* + \alpha_1 + \alpha_2 \quad (i=0) \quad (16)$$

$$u(k) = u^* + \alpha_1 e^{-\lambda \tau} + \alpha_2 e^{-\lambda q \tau} \quad (i=1) \quad (17)$$

$$u(k) - u(k-1) = \alpha_1 (e^{-\lambda \tau} - 1) + \alpha_2 (e^{-\lambda q \tau} - 1) = p_1 \cdot \Delta u \quad (18)$$

onde $p_1 \in [-1, +1]$ é o parâmetro utilizado para que diferença entre dois sucessivos sinais de controle não exceda os valores de Δu , respeitando a restrição da equação (13). A outra

variável de decisão deve ser estabelecida em relação ao controle estacionário $u^* = p_2$ em que $p_2 \in [u_{min}, u_{max}]$.

Isolando as variáveis α_1 e α_2 em função dos parâmetros citados, obtêm-se o sistema linear a seguir:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1(p) \\ \alpha_2(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda \tau} - 1 & e^{-\lambda q \tau} - 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_1 \Delta u \\ u(k-1) - p_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Em função dessas variáveis, o perfil de comando passa a ser dependente dos parâmetros p_1 e p_2 , como mostrado na equação a seguir:

$$u(i\tau + t, p) = Sat_{u_{min}}^{u_{max}}(p_2 + \alpha_1(p)e^{-\lambda_i \tau_i} + \alpha_2(p)e^{-\lambda_i q \tau_i}) \quad (20)$$

Esse perfil de comando para todo horizonte de predição N , é obtido a partir de uma otimização que encontra valores para o vetor de parâmetros p . Tais parâmetros otimizados p_{opt} são necessários para a obtenção do perfil de comando otimizado u_{opt} . Embora sejam calculados sinais de controle até o horizonte N , apenas o primeiro sinal de controle é aplicado. Nos próximos instantes de amostragem, mensura-se novamente o estado e são repetidas as etapas de predição e otimização.

3.3 Problema de Otimização

Os problemas de otimização de controladores preditivos são estabelecidos para encontrar valores otimizados de uma função custo, que têm o objetivo de seguir um valor de referência à saída futura do processo. No caso do NMPC parametrizado, devem ser encontrados valores otimizados para os parâmetros mencionados anteriormente. Em se tratando do problema da VRP, essa função deve aproximar a pressão à jusante da VRP de seu valor de referência y_{sp} , o que minimiza o erro de saída $y_{sp} - y_{pred}$.

$$p_{opt} = \arg \min_{p \in P} [\rho_x \cdot \|X_f\| + \sum_{i=1}^N \|(y_{sp} - y_{pred})\|_{Q_y}^2] \quad (21)$$

Onde y_{pred} é a saída predita ao longo do horizonte de predição N , X_f é o custo do estado final (relacionado à estabilidade do processo), ρ_x é a ponderação do estado final X_f e Q_y a ponderação do erro de rastreamento da saída y .

4 Resultados de Simulação

Esta seção apresenta resultados de simulação do controle do processo de VRP e rede hidráulica. As rotinas de controle NMPC e modelo do processo foram executadas em funções mex, *Matlab* (R2014A), e utilizadas em uma malha de controle criada em *Simulink*. Tais simulações foram executadas em um computador com *Microsoft Windows*

8, processador *Intel I5* e 8 GB de RAM. Um perfil de consumo que representa consumidores residenciais, com pequenas e constantes oscilações de consumo, foi definido por meio do perfil do coeficiente da válvula de bloqueio v_2 , como mostrado na fig. 3. Este perfil tem como média 0.03 e desvio padrão 0.001.

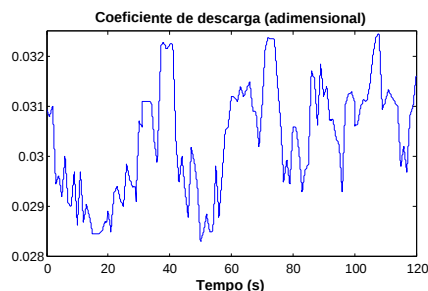


Figura 3: Perfil adotado para C_{v2}

Na simulação, a rede hidráulica teve vazão mínima de $6.05L/s$ e máxima de $6.93L/s$. Os parâmetros da rede hidráulica simulada são apresentados com os dados número do tubo, comprimento [m] e diâmetro [m]: P1, 1.5, 0.05; P2, 4.0, 0.1; P3, 5.0, 0.1; P4, 6.6, 0.1.

Um algoritmo de otimização não linear desenvolvido por Alamir (2013) foi utilizado para a etapa de otimização do controlador. O número de funções avaliadas (N_{ev}) foi de 41, o espaçamento (α) que define a região de interesse inicial foi de 1 para o parâmetro p_1 e 1.5×10^{-3} para o parâmetro p_2 .

Os valores constantes assumidos pelas variáveis do controlador foram: $\lambda = 12$, $q = 3$, $N = 20$, $\rho_x = 0$ e $Q_y = [1]$. A simulação da rede hidráulica teve curso de 120 segundos, e foram avaliados os seguintes critérios de desempenho: tempo de simulação, que representa o tempo computacional despendido na simulação; média, para mensurar a distância média do sinal controlado em relação ao *set-point*; variância, que representa a dispersão dos valores de pressão de saída em relação à média; máximo, que representa o maior valor do sinal controlado; mínimo, que representa o menor valor do sinal controlado; critério ITAE, que representa o custo em que erros grandes são ponderados por um pequeno fator e erros pequenos ponderados por um grande fator; tempo de cálculo, que representa o custo computacional do controlador. O resultado de simulação para o controle da pressão de saída da VRP por meio do NMPC e o comportamento da variável controlada é mostrado na figura 4. O *set-point* de 38.81 (linha verde) foi definido conforme consta da literatura (Quadros e Murilo, 2013; Prescott e Ulanicki, 2003). Observa-se que a saída do processo controlado apresenta oscilação pequena na pressão à jusante da VRP. Todas as variáveis e estados utilizados na realimentação desse controlador NMPC poderiam ser medidos em uma rede hidráulica. Isso faz com que seja possível implementação embarcada do contro-

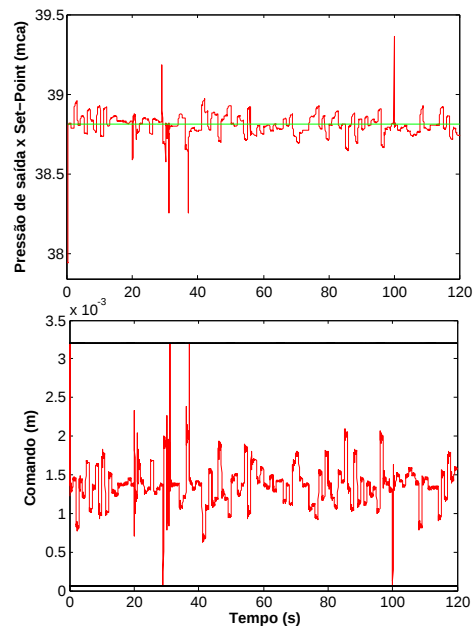


Figura 4: Resultado do sinal controlado pelo NMPC (figura superior) e, perfil comando aplicado pelo controlador e as restrições operacionais de funcionamento da válvula (figura inferior).

lador e representa a situação mais próxima do caso real.

O comando e os parâmetros obtidos pela rotina de otimização respeitam as restrições, conforme modelado. Esses resultados de p_1 e p_2 são mostrados na figura 5, em que as linhas de cor preta representam essas restrições.

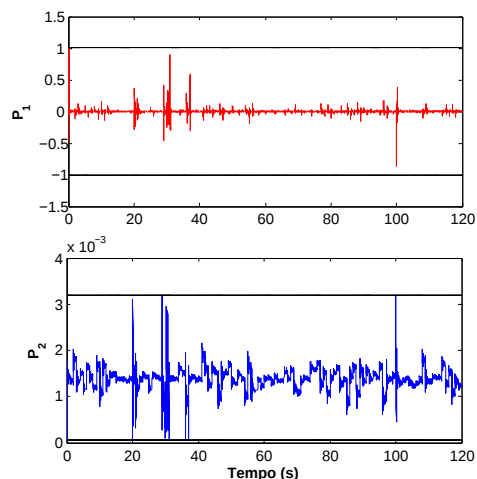


Figura 5: Parâmetros p_1 (superior) e p_2 (inferior).

O primeiro parâmetro é relacionado à diferença entre dois sinais de controle sucessivos e não deve exceder δu . O segundo parâmetro é relacionado à estabilidade do processo, e não pode exceder as restrições u_{min} e u_{max} .

Este controlador NMPC traz um diferencial em relação à metodologia de controle PID abordada na literatura. Para a etapa de sintonia dos Controladores PID é considerado um cenário de consumo hidráulico base e isso prejudica a performance de tal controlador quando é posto em

condição de consumo diferente. Além disso, a sintonia por algoritmos genéticos (AG) efetuada por Quadros e Murilo (2013) estabelece uma população inicial baseada em ganhos máximos e mínimos obtidos pelo método *gain scheduling*. Por sua vez, o NMPC mensura uma maior quantidade de variáveis de estado e a pressão à montante do consumidor para efetuar previsões do processo e aplicar o primeiro sinal da sequência ótima.

Posto isso, para fins de qualificação do desempenho obtido, efetuou-se a comparação entre os resultados do NMPC e os do PID sintonizado por algoritmos genéticos (AG) (Quadros, 2013). Os resultados do NMPC foram: Tempo de simulação 51,9 [s], ITAE $3,298.10^4$ [m.s], Média 38,8069 [m], Variância 0,0042 [m^2], Máximo 39,36 [m] e Mínimo 37,93 [m]. A variância do NMPC teve uma redução de 95% quando comparado à uma VRP com controlador mecânico, contra uma redução de 75,4% quando considerado o PID mostrado na literatura. Os valores de máximo e mínimo foram ligeiramente melhores com a aplicação do controle NMPC. O tempo de cálculo foi de 3,5 [ms], consideravelmente menor que o tempo de amostragem de 10 [ms] utilizado.

O NMPC superou o PID em todos os quesitos, o que representa a robustez do método e que a simplificação do modelo obtido com atuação direta é necessária. Por não ter conhecimento prévio da demanda na rotina de controle, o método é posto sob cenário mais pessimista do que os apresentados na literatura já que não se utiliza uma previsão de consumo na rede hidráulica. Todas essas características somadas a um tempo de cálculo factível para uma implementação real, possibilita um ganho nas pesquisas desta temática.

5 Conclusão e Trabalhos futuros

A estratégia do controle NMPC parametrizado para solucionar o problema de controle de VRP em redes hidráulicas funcionou bem com a utilização de apenas dois parâmetros buscados em uma resolução *on-line*. A metodologia mostrou que as restrições são condicionantes ao processo, e elas precisaram ser restringidas nos momentos de grandes descolamentos em relação ao *set-point*. Os resultados apresentados são excelentes e evidenciam a necessidade de uma metodologia de controle *on-line* para o processo considerado.

Os trabalhos futuros incluem a implementação real do controlador. É necessário o estabelecimento da interface de dados entre um micro controlador (rodando o NMPC) e o *software* que contém o modelo do processo. Promover uma simulação laboratorial para o problema detalhado neste artigo, ampliaria os horizontes de validação da pesquisa acerca de controle preditivo e justificaria a integração entre teoria e prática nas atividades de engenharia.

Referências

- ABES (2013). Perdas em sistemas de abastecimento de água: diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate., Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. URL: 1
- Alamir, M. (2013). *A Pragmatic Story of Model Predictive Control: Self-Contained Algorithms and Case-Studies*, 1 edn, Saint-Martin-d'Herès, France.
- Force, I. W. L. T. e Thornton, J. (2003). Managing leakage by managing pressure: a practical approach, *Water* 21 .
- Gonçalves, E. e Lima, C. V. (2007). Controle de pressões e operação de válvulas redutoras de pressão, Ministério das cidades.
- Mayne, D. Q., Rawlings, J. B., Rao, C. V. e Sockaert, P. O. M. (2000). Constrained model predictive control : Stability and optimality, pp. 788–814.
- Moutinho, M. N., Barreiras, J. A. L., Costa, C. T. e Barra, W. (2012). Técnica de controle preditivo baseado em modelo aplicada ao controle de tensão de um gerador síncrono - resultados experimentais.
- Murilo, A. (2009). *Contributions on Nonlinear Model Predictive Control for Fast Systems*, PhD thesis, Saint-Martin-d'Herès, France.
- Murilo, A., Alamir, M. e Alberer, D. (2014). A general nmpc framework for a diesel engine air path, *International Journal of Control* .
- Prescott, S. L. e Ulanicki, B. (2003). Dynamic modeling of pressure reducing valves, *Journal of hydraulic engineering-ASCE* 129: 804–812.
- Prescott, S. L. e Ulanicki, B. (2008). Improved control of pressure reducing valves in water distribution networks, *Journal of hydraulic engineering-ASCE* 134: 56–65.
- Quadros, A. S. (2013). *Sintonias automática e adaptativa de controladores pid para válvulas redutoras de pressão em sistemas de abastecimento de água*, Master's thesis, Recife, Brazil.
- Quadros, A. S. e Murilo, A. (2013). Automatic and adaptive tuning of pid controllers for pressure reducing valves in water supply systems, 22nd International Congress of Mechanical Engineering.
- Ramos, H., Covas, D. e Araujo, L. (2004). Válvulas redutoras de pressão e produção de energia, 7º Congresso da Água, LNEC, Lisboa.