



21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DE CONTROLADOR NMPC APLICADO À VÁLVULA REDUTORAS DE PRESSÃO EM CENÁRIO REAL

Carlos Felipe Ilha Pereira, carlosfelipeilhapereira@gmail.com¹

André Murilo, andremurilo@unb.br¹

Anderson Quadros, anderson@compesa.com.br¹

Walter de Britto Vidal Filho, wbritto1@gmail.com¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, FT- UnB, Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF, Brasil

Resumo: Os recursos hídricos vêm se tornando escassos em decorrência de sazonalidades climáticas, aumento do consumo de água da população, 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. O NMPC é uma técnica que utiliza explicitamente o modelo do processo, considerando suas não linearidades e restrições, para prever o comportamento futuro do processo em um horizonte de predição e encontrar uma sequência ótima de controle a cada instante de amostragem. Uma técnica de parametrização exponencial foi aplicada a fim de reduzir o número de comandos no problema de otimização on-line, corroborando para um melhor desempenho do controlador. Para as simulações, foram consideradas condições realísticas de operação da rede hidráulica, dessa forma, o controlador conhece o estado e todas variáveis do modelo mas não têm dados sobre a demanda futura de água na rede. Os resultados apontam maior eficiência do controlador preditivo em relação a controladores PID existentes na literatura.

Palavras-chave: NMPC parametrizado, válvulas redutoras de pressão, Controle de pressão em redes hidráulicas

1. INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento populacional no mundo tem conduzido ao aumento da demanda de água, o que vem ocasionando problemas que aumentaram a escassez desse recurso, dada a utilização predatória dos recursos hídricos e da intensificação das atividades de caráter poluidor e contaminação dos corpos de águas superficiais e subterrâneos. A relevância de repensar a questão da água, em suas diversas dimensões, é relacionada à conservação e equilíbrio da biodiversidade e das relações de dependência entre seres vivos e ambientes naturais (Notícias, 2015).

A necessidade de redução dos níveis de perdas hidráulicas decorrem da elevada demanda por água no contexto global (ITB, 2015). Nesse sentido, o seu uso racional é de interesse crescente na sociedade civil e nos órgãos gestores que procuram soluções tecnológicas viáveis para fornecimento de água para a população.

A dificuldade de obtenção de água potável decorrente das sazonalidades climáticas, tanto no Brasil, quanto no mundo, é um problema a ser revolido. Neste sentido, perdas operacionais de água dos sistemas de abastecimento devem ser reduzidas ao máximo para que a utilização do recurso natural seja sustentável a longo prazo (Ramos *et al.*, 2004).

As perdas de águas são subdivididas em perdas físicas e não físicas. As perdas não físicas representam a quantidade de água consumida mas não medida, seja por decorrência de erros de medição, falta de medição ou furtos. 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 de perdas reais 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 and 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 and Thornton, 2003). Por meio das VRPs pode-se reduzir a ocorrência de fugas de água do sistema sem prejuízo do desempenho hidráulico do sistema (Ramos *et al.*, 2004). O princípio dessas válvulas, consiste em acionar um atuador sempre que a pressão a jusante da VRP estiver demasiadamente elevada. O objetivo do controle da VRP é que seja mantida a pressão de saída no valor desejado.

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 o a pressão no espaço de controle (Quadros and Murilo, 2013).

Já foram efetuadas pesquisas sobre implementação de controladores Proporcional, Integral e Derivativo (PID) para o problema em questão. Prescott and Ulanicki (2008) desenvolveu um controlador PID de atuação direta e propôs reduzir os impactos causados por: grandes transientes de pressão - causados por uma mudança abrupta na demanda do sistema- e as pequenas e persistentes flutuações de pressão - causadas por uma ruim resposta da VRP. Em sua pesquisa, um modelo comportamental da válvula foi utilizado para simular o processo.

A literatura também aborda o desenvolvimento de controlador PID de atuação indireta sintonizado pelos métodos de *Gain Scheduling*, Astrom - Hagglung e algoritmos genéticos (Quadros and Murilo, 2013). Esse artigo apresenta importantes resultados: 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, tais como adaptativo, robusto ou não lineares. Uma modelagem fenomenológica simplificada da VRP, proposta por Prescott and Ulanicki (2003), combinada ao modelo de rede hidráulica, representa o processo a ser controlado.

A utilização de modelo não linear e restrições operacionais do sistema indica que a utilização de um controle preditivo baseado em modelo não linear (*Nonlinear Model Predictive Control - 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 não convexa para encontrar uma sequência ótima de controle para todo horizonte de predição N e aplica apenas a primeira ação dessa sequência (Barreiros *et al.*, 2012; Alamir, 2013).

Neste artigo, é proposto um controlador NMPC que utiliza o modelo fenomenológico simplificado de Prescott and Ulanicki (2008), com a substituição do atuador como apresenta Quadros and Murilo (2013), acoplado ao modelo de uma rede hidráulica. A estrutura de controlador real é apresentada para o desenvolvimento do NMPC: não é conhecido o comportamento futuro da vazão da rede e os estados mensuráveis no processo são obtidos da rede em tempo real. Dessa forma, os resultados mostrados contemplam exatamente o que seria obtido com um controlador embarcado.

O controlador preditivo apresentado foi desenvolvido da forma como um controlador real seria implementado, com a leitura de variáveis de estado que em condições práticas são mensuradas na rede. Dessa forma, há uma diferenciação de como o controlador preditivo foi implementado, que causa redução sua performance em relação à forma como abordada na literatura. Como o processo requer uma otimização não linear, um alto poder de processamento é demandado, assim, a fim de reduzir esse problema foi utilizada a parametrização da variável de controle, técnica que reduz o número de variáveis de decisão sem uma redução significativa de desempenho (Alamir, 2013).

A organização do artigo é efetuada como descrito. Na seção 2 o modelo fenomenológico não linear da VRP e o modelo da rede hidráulica é apresentado. Na seção 3 encontra-se a metodologia de controle NMPC parametrizado e o problema de otimização relacionado ao controle da pressão à jusante da VRP. Resultados de simulação são mostrados na seção 4 e, por fim, são apresentadas conclusões e trabalhos futuros.

2. MODELOS DO PROCESSO

Nesta seção são apresentados os modelos e descrição do processo da VRP e da rede hidráulica. O modelo da VRP segue a contribuição de Quadros and Murilo (2013) quanto à utilização de uma válvula solenoide proporcional linear, que possibilita a implementação do controle preditivo. O modelo da rede é composto por duas válvulas de bloqueio, que caracterizaram a alimentação e demanda da rede, e suas tubulações.

2.1 Modelo Fenomenológico Simplificado

A modelagem fenomenológica simplificada apresentada a seguir, foi desenvolvida por Prescott and Ulanicki (2003), com base nos fenômenos dinâmicos que ocorrem no circuito da VRP. No modelo que será apresentado, já encontra-se modificada a equação da capacidade da válvula piloto, a fim de representar a válvula proporcional linear, como sugerido por Quadros and Murilo (2013). Na figura 1 encontra-se a constituição da válvula para melhor compreensão.

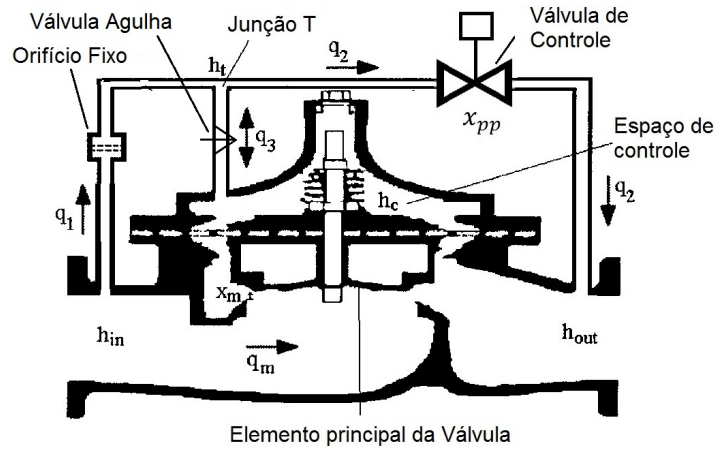


Figura 1: Válvula redutora de pressão Cla-val. As variáveis dinâmicas mostradas são relacionadas ao processo. Prescott and Ulanicki (2003).

A válvula é operada com um circuito de controle que contém válvula piloto e válvula agulha. No momento em que a pressão à jusante é maior que a pressão de *set-point*, a válvula piloto fecha-se, causando aumento da pressão sobre o elemento principal da válvula, a qual fechará, reduzindo a pressão disponível à jusante da VRP. O processo de liberação da válvula principal, para aumento da pressão a jusante, é efetuado com a abertura da válvula piloto e consequentemente redução da pressão sobre a válvula central, o que libera a vazão da água e aumenta a pressão Prescott and Ulanicki (2003).

A modelagem fenomenológica simplificada é apresentada nas equações 1 a 8. A equação 3 representa a capacidade da válvula proporcional da válvula solenoide proporcional linear modelo *Posiflow*, series *G202* fabricado por *ASCO*, como sugerido por Quadros and Murilo (2013).

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

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

$$C_{vpp}(x_{pp}) = 0.2808 * x_{pp} \quad (3)$$

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

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

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

$$q_3 = C_{vnu} \sqrt{|h_c - h_t|} \operatorname{sgn}(h_c - h_t) \quad (7)$$

$$q_1 + q_3 = q_2 \quad (8)$$

onde x_m : Abertura da VRP; x_{pp} : abertura da válvula piloto linear; $\dot{x}_m$: 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} : pressão à montante da VRP; h_{out} : pressão à jusante da VRP; h_t : pressão no tê do circuito de controle; h_c : pressão na câmara de controle; h_{sp} : pressão de *set - point*; C_{vnu} : capacidade da válvula agulha; C_{vpp} : capacidade da válvula solenoide proporcional linear; C_{vp} : capacidade da válvula piloto; C_{vm} : capacidade da VRP; C_{vfo} : capacidade do orifício fixo; q_1 : vazão no orifício fixo; q_2 : vazão na válvula piloto; q_3 : vazão de entrada ou saída na câmara de controle; q_m : vazão na VRP em função de sua abertura.

Prescott and Ulanicki (2003) determinou experimentalmente algumas variáveis: $a_1 = 0,0078m^2$, $a_2 = 0,0218m^2$, $m_m = 8kg$, $C_{vnu} = 2 * 10^{-6}$, $C_{vfo} = 3 * 10^{-5}$. A capacidade da válvula principal (C_{vm}) e a área da superfície superior do diafragma A_{cs} , são calculadas por meio das equações (9) e (10).

$$C_{vm}(x_m) = 0,02107 - 0,02962e^{-51,1322x_m} + 0,0109e^{-261x_m} - 0,00325e^{-683,17x_m} + 0,0009e^{-399,5x_m} \quad (9)$$

$$A_{cs}(x_m) = \frac{1}{3700 * (0,02732 - x_m)} \quad (10)$$

2.2 Modelo da Tubulação e das Válvulas de Bloqueio

A rede hidráulica fica submetida à pequenas perturbações oriundas de variações do consumo, dessa forma, é razoável utilizar o método da coluna rígida (eq. 11) para representar detalhadamente a dinâmica do processo para a simulação do escoamento da rede hidráulica (Prescott and Ulanicki, 2003). Esse método considera a velocidade de propagação da perturbações no sistema como infinita, reagindo instantaneamente à uma perturbação. A partir disso, cada trecho de tubulação é equacionado por meio da equação de oscilação de massa (Quadros and Murilo, 2013).

$$\dot{q} = \frac{gA}{L}(p_m - p_j - f_{DW} \frac{L}{D} \frac{\nu^2}{2g}) \quad (11)$$

onde: $\dot{q}$ 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 corresponde a pressão a montante da tubulação, p_j 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 (12).

$$q = ca\sqrt{2g(p_m - p_j)} \quad (12)$$

Quanto as variáveis listadas, temos g , p_m e p_j já denominadas no modelo da tubulação e q vazão na válvula, c 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 $a = 0.007854 \text{ m}^2$.

2.3 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, o acionamento da válvula principal (main valve) é efetuado pelo próprio fluxo hidráulico do rede que percorre o circuito em vermelho, composto por válvulas de orifício fixo, agulha e de controle e os tubos que os conectam.

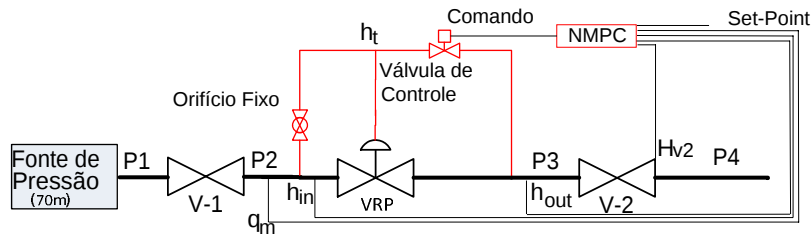


Figura 2: Rede hidráulica representada por modelo na simulação

Enquanto a válvula v_1 assume um valor constante em seu coeficiente característico, a válvula v_2 teve esse coeficiente variado ao longo do tempo, de forma que caracterizasse o perfil de consumo submetido ao processo.

Os modelos da VRP e rede são independentes. O modelo da VRP recebe o sinal de controle (x_{pp}), vazão da rede e pressão a montante da VRP e é utilizado para determinar a abertura do elemento principal da VRP (x_m), que influencia dinamicamente nas pressões e vazão da rede. O modelo da rede recebe a pressão da fonte de pressão constante e a abertura da VRP e é utilizado para determinar a variável controlada H_{out} , h_{in} e Q_m . As duas últimas são variáveis de realimentação para o modelo da VRP.

Em relação ao coeficiente C_{v2} considerado no modelo do processo, é calculado por meio da pressão a montante do consumidor (H_{v2}) para que ocorra o total conhecimento dos estados pelo controlador. Dessa forma, a partir da leitura de H_{v2} e de uma pressão a jusante de v_2 estabelecida como constante, é efetuado o cálculo.

3. METODOLOGIA DE CONTROLE

Esta seção introduz algumas definições e notações sobre o controle preditivo e o controle NMPC parametrizado para o caso da VRP.

3.1 Definições e Notações

A metodologia de controle preditivo baseado em modelo (Model Predictive Control - MPC) faz referência à um grupo especial de algoritmos de controle que utiliza explicitamente o modelo dinâmico do processo para prever sua evolução futura Barreiros *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

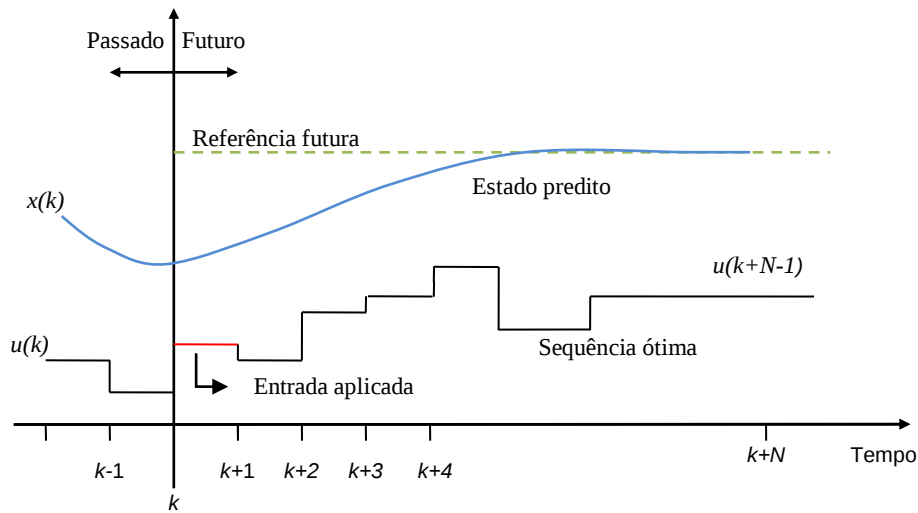


Figura 3: Técnica de controle do MPC. Do processo de otimização obtém-se a sequência ótima para todo horizonte de predição. Aplica-se apenas o primeiro elemento do perfil de controle durante o período de amostragem k . O estado é representado por $x(k)$ e o comando por $u(k)$. Adaptado de Murilo (2009).

que limites operacionais do processo sejam respeitados (Alamir, 2013; Murilo, 2009). Para melhor estabelecer o conceito, a fig. 3 mostra como é efetuado o controle.

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).

Os conceitos de MPC não restringem a utilização de modelo não linear, portanto, as questões de utilização de controle MPC são conceitualmente simples. Dessa forma, o NMPC (Nonlinear Model Predictive Control) aborda o mesmo princípio, usando modelos não lineares. Alguns dos inconvenientes da utilização desses modelos, é que problemas que encontram-se em aberto são decorrentes de falta de técnicas de identificação da modelagem não linear do processo, a complexidade de solucionar o problema de otimização não linear, além de problemas relativos à dificuldade de estabilidade de sistemas não lineares. Alguns problemas de sistemas não lineares são resolvidos pelo uso do controle preditivo, além da obtenção de performances superiores, ocorre aumento da quantidade de pesquisas para essas aplicações (Camacho and Bordons, 1999).

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*, o que onera o custo computacional. 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 às metodologias clássicas de controle (Alamir, 2013). Primeiro, a habilidade de lidar com processos onde uma lei de controle *off-line* é difícil, ou impossível, 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. Além disso, o método genérico, que facilita sua implementação em problemas de controle completamente diferentes sem grande demanda de tempo para elaborar uma nova solução para um novo problema. 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 modelo dinâmico não linear:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \quad (13)$$

Onde $k \in N$ é o instante atual, $x \in \mathbf{R}^n$ contém todas variáveis (n variáveis) que descrevem o estado, $u \in \mathbf{R}^{n_u}$ 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 todas 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 é 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 a abertura ou fechamento da válvula piloto de forma com que pressão a jusante da VRP siga o valor de referência estabelecido. As restrições da entrada de controle u devem satisfazer o conjunto de restrições

para $i \in 1, \dots, N$:

$$u^{min} \leq u(k+i-1) \leq u^{max} \quad (14)$$

$$\delta^{min} \leq u(k+i) - u(k+i-1) \leq \delta^{max} \quad (15)$$

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, $\delta^{min} = -5 \times 10^{-5}$ é a taxa mínima de abertura da válvula piloto e $\delta^{max} = 5 \times 10^{-5}$ é a taxa máxima de abertura da válvula piloto. Na seção seguinte, serão desenvolvidas as formulações do NMPC parametrizado.

3.2 Parametrização do Controle NMPC

A parametrização do controle é uma técnica que proporciona uma redução grande do número de comandos no problema de otimização sem uma redução significativa do desempenho de controle. Embora ocorra uma importante redução no volume de informações a serem processadas, ainda haverá um custo computacional (Alamir, 2013).

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 é mostrado na equação (16).

$$u(i\tau + t) = Sat_{u_{min}}^{u_{max}}(u^* + \alpha_1 e^{-\lambda \tau i} + \alpha_2 e^{-\lambda q \tau i}) \text{ para } t \in [(k-1)\tau, k\tau] \quad (16)$$

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:

$$Sat_{u_{min}}^{u_{max}}(u) = \begin{cases} u_{min} & \text{se } u_i \leq u_{min} \\ u_{max} & \text{se } u_i \geq u_{max} \\ u & \text{Demais casos} \end{cases} \quad (17)$$

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 (16), obtêm-se as equações:

$$u(k-1) = u^* + \alpha_1 + \alpha_2 \quad (i=0) \quad (18)$$

$$u(k) = u^* + \alpha_1 e^{-\lambda \tau} + \alpha_2 e^{-\lambda q \tau} \quad (i=1) \quad (19)$$

$$u(k) - u(k-1) = \alpha_1(e^{-\lambda \tau} - 1) + \alpha_2(e^{-\lambda q \tau} - 1) = p_1 \Delta u \quad (20)$$

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 (15). 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 definido a seguir:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1(p) \\ \alpha_2(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda \tau} - 1 & e^{-\lambda q \tau} - 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_1 \Delta u \\ u(k-1) - p_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

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:

$$u(i\tau + t, p) = Sat_{u_{min}}^{u_{max}}(p_2 + \alpha_1(p)e^{-\lambda_i \tau i} + \alpha_2(p)e^{-\lambda_i q \tau i}) \quad (22)$$

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 igualar 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 $y_{sp} - y_{pred}$.

$$p_{opt} = \arg \min_{p \in P} [\rho_x \cdot \|X_f\| + \sum_{i=1}^N \|(y_{sp} - y_{pred})\|_{Q_y}^2] \quad (23)$$

Onde y_{pred} é a saída predita ao longo do horizonte de predição N , X_f é o custo do estado final (aplicado 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 implementados em código m, *Matlab* (R2012A), e utilizados em uma malha fechada de controle criada em *Simulink*. Tais simulações foram executadas em um computador com *Microsoft Windows* 8 64 bits, processador *Intel I5* 2.3 Ghz e 8 GB de memória RAM.

Um perfil de consumo residencial, com pequenas e constantes oscilações de consumo, foi definido pela variação do coeficiente de capacidade da válvula de bloqueio v_2 , como mostrado na fig. 4.

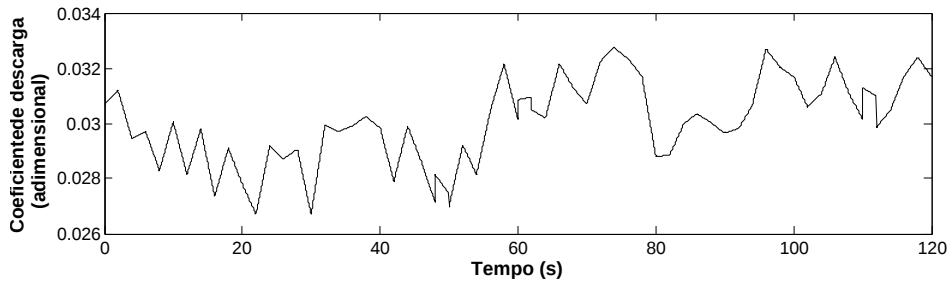


Figura 4: Coeficiente de descarga da válvula de bloqueio v_2 . Este perfil tem média 0.03 e desvio padrão 0.001.

A utilização desse perfil de consumidor faz com que a rede hidráulica tenha uma vazão mínima de $5.7L/s$ e máxima de $6.99L/s$. Os parâmetros da rede hidráulica simulada são mostrados na tab. 1.

Tabela 1: Parâmetros da tubulação utilizados nas simulações.

Tubo	Comprimento [m]	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 multivariável desenvolvido por Alamir (2013) foi utilizado para a etapa de otimização do controlador. O número de funções avaliadas (N_{ev}) foi de 100, o espaçamento (α) que define a região de interesse inicial foi de 10^{-1} para o parâmetro p_1 e 10^{-4} para o parâmetro p_2 . Os valores constantes assumidos pelas variáveis do controlador foram: $\lambda = 15$, $q = 2.4$, $N = 20$, $\rho_x = 0$ e $Q_y \in R^{1 \times 1} = [1]$. Para a simulação da rede, foi considerada operação em um curso de 120 segundos, em que 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 a menor valor do sinal controlado; critério ITAE, que representa a integração do tempo multiplicado pelo do valor absoluto do erro (erros grandes são ponderados por um pequeno fator e erros pequenos ponderados por um grande fator).

Os resultados de simulação para o controle da pressão de saída da VRP por meio do NMPC e PID sintonizado pelo método de Astrom e Hagglung são mostrados na figura 5.

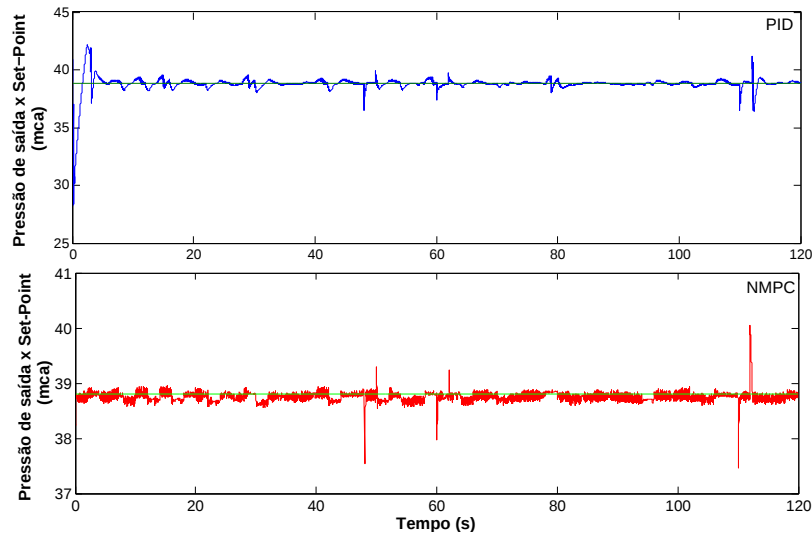


Figura 5: Comportamento da pressão à jusante da VRP quando controlada por PID (figura superior) e por NMPC (figura inferior). Foi estabelecido um set-point de 38.81m, assim como estabelecido por Quadros and Murilo (2013). A pressão apresenta maior estabilidade, e as oscilações mais fortes retornam mais rapidamente para próximo à trajetória com o controle NMPC.

Este gráfico mostra uma oscilação pequena da variável controlada. Com o desenvolvimento de uma estrutura tal como o NMPC seria implementado com a leitura dos estados disponíveis em uma rede convencional, o resultado apresentado têm desempenho superior ao PID. A abordagem padrão do PID, com parâmetros k_p , k_i e k_d fixados para uma condição de processo, tem pouca robustez para ser aplicado à esse processo, visto que, uma mudança no comportamento do consumidor exerce grande influência sobre o comportamento do processo. Para fins de avaliação de desempenho, serão mostrados resultados de um controlador PID sintonizado por Astrom e Hagglund. Nas simulações do PID, foi considerada uma sintonia prévia, como a desenvolvida por Quadros and Murilo (2013), e submetido o processo ao perfil do consumidor (C_{v2}) mostrado na figura 4, que caracteriza uma situação real, em que o perfil utilizado para realização da sintonia não é seguido completamente na execução do processo.

O comando e os parâmetros obtidos pela rotina de otimização respeitam as restrições, conforme modelado. Esses resultados de u , p_1 e p_2 são mostrados na figura 6, em que as linhas de cor preta representam essas restrições.

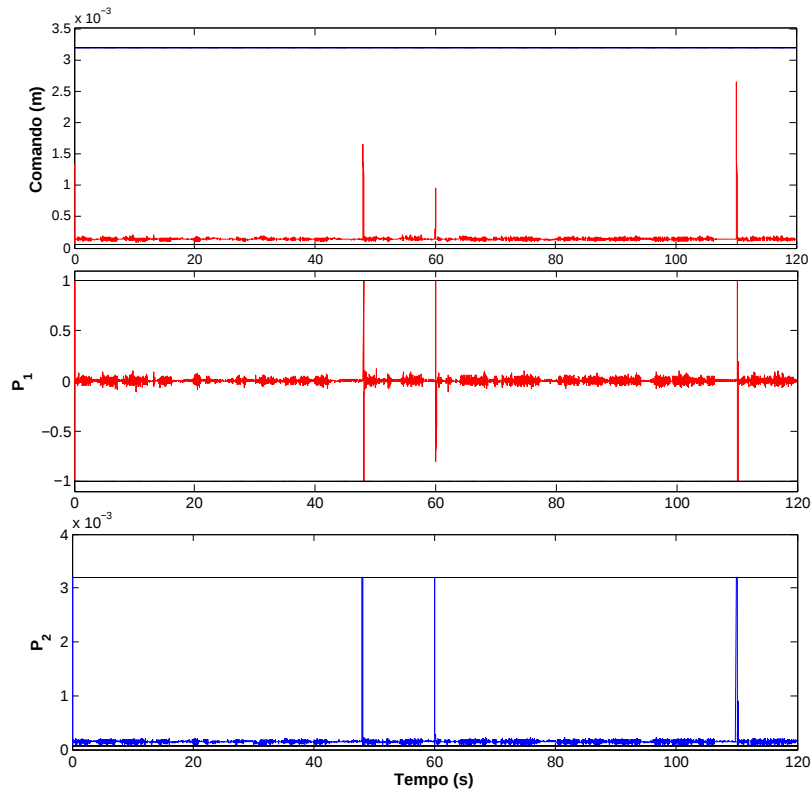


Figura 6: Comando u , parâmetros p_1 (superior) e p_2 (inferior). O sinal de comando é sintetizado conforme a eq. 22. O primeiro parâmetro é relacionado à diferença entre dois sinais de controle sucessivos e não deve exceder δu . O segundo parâmetro é relacionado à estabilidade do processo, e não pode exceder as restrições u_{min} e u_{max} .

Este controlador NMPC traz um diferencial em relação à metodologia de controle PID supracitada. O controle PID clássico precisa considerar algum cenário de consumo hidráulico base para que se obtenha uma calibração e isso agrega maior performance à tal controlador quando ele é validado em condições de consumo semelhantes com as quais foi sintonizado. Por sua vez, o NMPC conhece as variáveis de estado e a pressão à montante do consumidor para efetuar previsões do processo, encontrar um sinal otimizado e aplicar o primeiro sinal de controle no modelo da rede hidráulica e VRP. Ao aplicar um controlador PID com uma sintonia *off-line* à esse processo, o resultado de controle seria onerado devido à sensibilidade do processo da VRP em relação ao comportamento do consumidor.

Posto isso, para fins de qualificação do desempenho obtido, efetuou-se a comparação entre os resultados do NMPC e os do PID sintonizado por Astrom e Hagglund (AH). Os resultados desse PID, cuja sintonia foi efetuada por Quadros (2013), assim como os obtidos pelo NMPC são mostrados na tabela 2. A variância do NMPC teve uma redução de 68,4% quando comparado à uma VRP com válvula piloto (controlador mecânico) submetida à mesma condição operacional.

Tabela 2: Resultados do controlador NMPC e do PID sintonizado por GS Quadros (2013)

Controlador	Tempo de simulação	ITAE	Média	Variância	Máximo	Mínimo
NMPC	2938.12 s	$5.15 \cdot 10^4 m.s$	38.77 m	$0.010 m^2$	40.124 m	37.5648 m
PID (AH)	2.5327 s	$1.12 \cdot 10^5 m.s$	38.78 m	$0.501 m^2$	42.1398 m	28.2424 m

Os resultados apresentados mostram a robustez do NMPC, que obteve melhores resultados de ITAE, variância, máximo e mínimo. O valor médio são muito próximos entre o obtido pelos dois métodos. O tempo de simulação maior que o do PID, decorre da otimização *on-line* aplicada. Os resultados apresentados mostram que a técnica de parametrização exponencial é promissora para aplicação no controle da VRP. Ao ser avaliado com uma simulação tal como poderia ser efetuada em uma rede de testes laboratorial, é dado um grande passo em direção à uma avaliação em tempo real em um controlador embarcado. Algumas questões em aberto são avaliar se o microcontrolador conseguiria realizar a otimização em tempo real, e como seriam tratados os sinais de entrada e saída no microcontrolador.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo foi proposta a estratégia do controle NMPC parametrizado para solucionar o problema de controle de VRP em redes hidráulicas de abastecimento. Os resultados de simulação mostram que o NMPC 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 principalmente nos momentos em que grandes descolamentos em relação ao *set-point* ocorriam. Os resultados apresentados são excelentes e eles evidenciam a necessidade de uma metodologia de controle *on-line* para o processo considerado. Os indicadores de desempenho reportam resultados superiores aos obtidos por controle PID com sintonia *off-line* pelo método de Astrom e Hagglund.

Os trabalhos futuros incluem a verificação do tempo computacional do controlador, para avaliar sua implementabilidade em um hardware dedicado e o estabelecimento da interface de dados para um micro controlador para que se possa implementar o NMPC em um hardware de controle. Além disso, montar uma bancada e executar o processo controlado por este NMPC (implementado em microcontrolador) como detalhado neste artigo, ampliaria os horizontes de validação da pesquisa acerca de controle preditivo e dos modelos envolvidos à processos hidráulicos, e justificaria a integração entre teoria e prática nas atividades de engenharia.

6. 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 www.abes-sp.org.br/arquivos/perdas_resumo.pdf.
- Alamir, M., 2013. *A Pragmatic Story of Model Predictive Control: Self-Contained Algorithms and Case-Studies*. CreateSpace Independent Publishing Platform, Saint-Martin-d'Hères, França.
- Barreiros, J.A.L., Barra Junior, W., Costa Júnior, C.T.d. and Moutinho, M.N., 2012. “Técnica de controle preditivo baseado em modelo aplicada ao controle de tensão de um gerador síncrono-resultados experimentais”.
- Camacho, E.F. and Bordons, C., 1999. “Model predictive control (advanced textbooks in control and signal processing)”.
- Force, I.W.L.T. and Thornton, J., 2003. “Managing leakage by managing pressure: a practical approach”. *Water 21*.
- Gonçalves, E. and Lima, C.V., 2007. “Controle de pressões e operação de válvulas redutoras de pressão”. Ministério das cidades.
- ITB, 2015. “Perda por água desperdiçada chega a R \$ 8 bilhões ao ano”. Instituto Trata Brasil. URL <http://g1.globo.com/economia/crise-da-agua/noticia/2015/03/perda-por-agua-desperdicada-chega-r-8-bilhoes-ao-ano-aponta-estudo.html>.
- Mayne, D.Q., Rawlings, J.B., Rao, C.V. and Sokaert, P.O., 2000. “Constrained model predictive control: Stability and optimality”. *Automatica*, Vol. 36, No. 6, pp. 789–814.
- Murilo, A., 2009. *Contributions on Nonlinear Model Predictive Control for Fast Systems*. Ph.D. thesis, Ph. D. dissertation, University of Grenoble.
- Murilo, A., Alamir, M. and Alberer, D., 2014. “A general nmpe framework for a diesel engine air path”. *International Journal of Control*, Vol. 87, No. 10, pp. 2194–2207.

- Noticias, A., 2015. “Demanda mundial por água deve crescer 55% até 2050”. *Folha de S. Paulo*.
- Prescott, S.L. and Ulanicki, B., 2003. “Dynamic modeling of pressure reducing valves”. Vol. 129, pp. 804–812.
- Prescott, S.L. and Ulanicki, B., 2008. “Improved control of pressure reducing valves in water distribution networks”. Vol. 134, pp. 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. and Murilo, A., 2013. “Automatic and adaptive tuning of pid controllers for pressure reducing valves in water supply systems”.
- Ramos, H., Covas, D. and Araujo, L., 2004. “Válvulas redutoras de pressão e produção de energia”. In *7º Congresso da Água, LNEC, Lisboa*.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ASSESSMENT OF NMPC CONTROLLER APPLIED TO PRESSURE REDUCING VALVE IN REAL SCENARIO

Carlos Felipe Ilha Pereira, carlosfelipeilhapereira@gmail.com¹

André Murilo, andremurilo@unb.br¹

Anderson Quadros, anderson@compesa.com.br¹

Walter de Britto Vidal Filho, wbritto1@gmail.com¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, FT- UnB, Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF, Brasil

Resumo: Water resources have become increasingly limited as a result of climate seasonality, increasing the population's water consumption, 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 . The NMPC is a technique that explicitly uses the process model, considering its nonlinearities and constraints, to predict the future behavior of the process on a prediction horizon and find a great sequence control at each sampling instant. An parameterized approach was applied to reduce the number of degrees of freedom in the on-line optimization problem and contribute to a better controller performance. For the simulations, realistic operating conditions of the hydraulic network were considered, thus, the controller knows the state and all model variables but do not have date for water demand in the network. Simulation results show higher efficiency of the predictive controller when comparing to the existing PID controllers in the literature.

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