

Análise de transitórios hidráulicos decorrentes da operação otimizada de estações elevatórias

Gustavo Meirelles^{a,}, Aloysio Saliba^a, Jorge Tarqui^a, Edna Viana^a, Helena Ramos^b*

^a Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Brasil

^b Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1, Lisboa, Portugal

Resumo

Neste trabalho são avaliados os transitórios hidráulicos decorrentes da operação otimizada de uma estação elevatória de uma rede de distribuição de água e os procedimentos operacionais que podem reduzir este problema para assegurar a confiabilidade do sistema. A operação otimizada é obtida utilizando o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) e simulações em regime permanente, considerando que as bombas estarão operando com sua velocidade de rotação nominal ou desligadas. Em seguida, as manobras de arranque e paragem definidas são utilizadas num modelo em regime transitório para avaliar as variações de pressão decorrentes da operação otimizada. Os resultados obtidos demonstram que as variações de pressão não são elevadas, mas que, a longo prazo, podem ser significativas na redução da vida útil dos equipamentos hidráulicos. Além disso, observou-se que a variação da demanda num modelo transitório pode causar erros significativos, sendo necessária uma modelação cautelosa neste aspeto.

Palavras-Chave: transitórios hidráulicos, operação otimizada, modelação hidráulica, risco e vulnerabilidade

doi: 10.22181/aer.2020.0802

* Autor para correspondência
E-mail: gustavo.meirelles@ehr.ufmg.br

Study of hydraulic transients of optimized operation of pumping stations

Gustavo Meirelles^{a,}, Aloysio Saliba^a, Jorge Tarqui^a, Edna Viana^a,
Helena Ramos^b*

^a Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Brasil

^b Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1, Lisboa, Portugal

Abstract

In this work, the hydraulic transients resulting from the optimized operation of a pumping station in a water distribution network are studied and operational procedures to reduce this problem and ensure the reliability of the system are evaluated. An optimal pumping scheduling is obtained using the Particle Swarm Optimization (PSO) and a steady state model considering pumps operating only at their nominal rotational speed or switched off. Then, the pumps schedules are used in a transient model to evaluate the pressure surges of the optimized operation. The results showed that the pressure variation is not high but can be relevant in the reduction of service life of the hydraulic equipment. In addition, it was observed that the demand pattern in the transient model can cause significant errors, and its modeling has to be carefully handled.

Keywords: hydraulic transients, optimization, hydraulic modelling, risk and vulnerability

doi: 10.22181/aer.2020.0802

* *Corresponding author*
E-mail: gustavo.meirelles@ehr.ufmg.br

1 Introdução

A operação dinâmica das redes de distribuição de água, devido às variações de consumo ao longo do dia e do ano, exige manobras constantes em válvulas e em estações elevatórias para que a demanda seja atendida de acordo com padrões de qualidade de serviço estabelecidos. Em situações extremas, a operação incorreta do sistema pode causar a falta de água em determinados pontos da rede. Esta não é uma situação comum, pois ações de emergência são tomadas antes que esta situação crítica seja atingida.

Por outro lado, as decisões tomadas ao longo do dia podem não resultar na melhor operação do sistema do ponto de vista de consumo de energia e de controle de vazamentos. Esta operação otimizada é complexa e pode beneficiar significativamente do uso de ferramentas computacionais. A utilização de reservatórios nesta operação é fundamental, uma vez que estes podem suprimir o uso de bombas durante um período, em particular durante o horário de ponta, quando a tarifa associada à energia é maior, de acordo com Jowitt e Germanopoulos (1992). Apesar dos custos serem o fator mais importante na operação do sistema, Barán et al. (2005) e Kougias e Theodossiou (2013) ressaltam a importância de outros parâmetros, como o desgaste das bombas com sucessivos arranques e paragens e propõem a utilização da otimização multi-objetivo para determinar a melhor configuração do sistema. Por fim, Brentan et al. (2018) destacam a necessidade do constante ajuste da rotina operacional de acordo com as informações observadas e utiliza Redes Neurais Artificiais para a previsão de demanda acoplada a um algoritmo de otimização para determinar a melhor rotina operacional nas 24 horas seguintes.

Apesar dos trabalhos citados buscarem a melhor operação do sistema, as simulações são feitas em regime permanente e, portanto, os eventos transitórios causados pelas manobras não são normalmente considerados. Segundo Karney e McInnis (1990), os valores extremos de pressão podem ser superiores a três vezes a pressão normal de operação, aumentando os riscos de ruptura das tubulações e aumentando a vulnerabilidade do sistema. Como a onda de pressão observada pode atingir valores negativos, Duan et al. (2010) e Mora-Rodríguez et al. (2012) ressaltam também o risco da intrusão de patógenos em pontos de ruptura das tubulações.

A simulação em regime transitório exige um esforço computacional maior quando comparada à simulação em regime permanente e, portanto, a sua utilização não é adequada em um modelo de otimização de grandes redes de distribuição de água, onde a discretização das tubulações associada ao grande número de simulações necessárias pode inviabilizar o processo. As manobras ótimas obtidas em regime permanente podem ser processadas posteriormente para verificação dos valores extremos de pressão. Este trabalho incide na análise da operação otimizada num horizonte de 24 horas através do algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization), utilizando simulações em regime permanente através do software Epanet (Rossman, 2000). Em seguida, a rotina obtida será inserida num modelo computacional baseado no Método das Características (MOC) para verificar os valores de pressão decorrentes dessas manobras. Os resultados obtidos podem ser utilizados para determinar procedimentos de arranque e paragem de bombas, minimizando os efeitos do regime transitório.

2 Metodologia

2.1 Otimização da operação

A determinação da rotina operacional ótima das estações elevatórias é feita através de uma otimização mono-objetivo baseada apenas no custo associado ao consumo de energia elétrica para bombeamento. Assim, a eq. 1 deverá ser minimizada:

$$FO = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_B} \frac{\gamma \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t}}{\eta_{i,t}} \cdot CE_t \cdot k \right) + \max(Pot_{HP}) \cdot CD_{HP} + \max(Pot_{FP}) \cdot CD_{FP} \quad (\text{eq. 1})$$

onde FO (\$) é a função objetivo a ser minimizada, T é o número de períodos (tempo) de simulação, N_B a quantidade de bombas do sistema, $Q_{i,t}$ (m^3/s) a vazão bombeada pela bomba i no período t , $H_{i,t}$ (m) a altura manométrica da bomba i no período t , $\eta_{i,t}$ o rendimento do conjunto motobomba i no período t , CE_t (\$/kWh) o custo da energia no período t , k (h) o tempo de duração de cada período t , Pot_{HP} (kW) o vetor de potência no horário de ponta, Pot_{FP} (kW) o vetor de potência no horário fora de ponta, CD_{HP} (\$/kW) o custo da demanda no horário de ponta e CD_{FP} (\$/kW) o custo da demanda fora do horário de ponta.

As variáveis da otimização correspondem a velocidade de rotação das bombas em cada intervalo de tempo adotado no período de 24 horas. Entretanto, apenas as condições ligada ou desligada foram consideradas no processo. Desta forma a otimização foi feita de forma discreta, com 1 indicando a bomba em operação com 100 % da rotação nominal, e 0 indicando a bomba desligada, sendo o sistema abastecido apenas pelos reservatórios existentes.

A formulação do problema ainda inclui três restrições operacionais: i) manutenção das pressões dentro de um limite preestabelecido ($p_{t,i}$); ii) os níveis dos reservatórios ao final da simulação deverão ser iguais ou superiores aos níveis iniciais (NA); iii) as bombas só poderão ser desligadas um número máximo de vezes dentro do período de 24 horas (N_{off}). As eqs. 2-4 traduzem as referidas restrições do problema.

$$10 \leq p_{t,i} \leq 50 \quad (\text{eq. 2})$$

$$NA_{final} = NA_{inicial} \quad (\text{eq. 3})$$

$$N_{off} \leq 6 \quad (\text{eq. 4})$$

A otimização deste problema foi feita utilizando a técnica de otimização PSO (Particle Swarm Optimization). Esta técnica é baseada no comportamento de grupos, em que as ações individuais influenciam o comportamento do grupo, da mesma forma que as ações coletivas afetam o comportamento de cada indivíduo (Kennedy e Eberhart, 1995). Matematicamente, isto pode ser representado através da eq. 5, que descreve a velocidade V de uma partícula i no instante (iteração) $t+1$, e da eq. 6, que descreve a nova posição da partícula neste instante:

$$V_i^{t+1} = \omega \cdot V_i^t + c_1 \cdot rand_1 \cdot \frac{(P_i^t - X_i^t)}{\Delta t} + c_2 \cdot rand_2 \cdot \frac{(G - X_i^t)}{\Delta t} \quad (\text{eq. 5})$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \cdot \Delta t \quad (\text{eq. 6})$$

O valor de P indica a melhor posição X já ocupada pela partícula (menor valor da função objetivo), enquanto o valor de G representa a melhor posição já obtida dentro do grupo. Valores aleatórios são adicionados a estas parcelas para garantir a aleatoriedade da busca, enquanto que o coeficiente ω representa a inércia da partícula, e os coeficientes c_1 e c_2 , chamados de coeficientes cognitivo e social, têm o papel de permitir uma busca

ampla no início do processo (alto valor de c_1), e uma busca refinada ao final da otimização, em um local próximo aos melhores valores já encontrados (alto valor de c_2). No início, há uma maior liberdade de busca para as partículas, enquanto que, no final, o grupo se concentra e realiza a busca próximo das melhores soluções já obtidas. Neste trabalho, foram utilizados valores de referência para c_1 , c_2 e ω : 1.49, 1.49 e um valor adaptativo entre 0.1 e 1.1 respectivamente.

2.2 Transitórios Hidráulicos

A representação matemática do escoamento transitório é feita através das equações diferenciais parciais não-lineares (eqs. 7-8) resultantes das leis de conservação de quantidade de movimento e de conservação de massa, respectivamente, desprezando os termos convectivos de aceleração (Wylie et al. 1993):

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (\text{eq. 7})$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{eq. 8})$$

onde H é a carga hidráulica, Q é a vazão, A é a área da seção transversal da tubulação, D é o diâmetro da tubulação, g é a aceleração da gravidade, a é a celeridade de propagação de perturbações, f é o fator de atrito, t é o intervalo de tempo e x é o comprimento do trecho.

A resolução deste sistema de equações é feita através do Método das Características (MOC), onde o sistema de equações às derivadas parciais é transformado num sistema de equações diferenciais ordinárias, utilizando a visão Euleriana, criando uma malha de pontos de observação no tempo e no espaço, conforme se ilustra na Figura 1-a. Nesta figura pode-se observar que as informações do ponto P no instante $t+\Delta t$ podem ser obtidas através das informações de pontos a montante (ponto A) e a jusante (ponto B) no instante anterior. As duas retas características definem a velocidade de propagação desta informação, que é igual à celeridade de propagação de perturbações. Assim, as eqs. 9-10 são obtidas para cálculo da carga e vazão no ponto P:

$$H_p = (H_A + BQ_A) - (B + R|Q_A|)Q_p \quad (\text{eq. 9})$$

$$H_p = (H_B - BQ_B) + (B + R|Q_B|)Q_p \quad (\text{eq. 10})$$

onde H_p é a carga hidráulica no ponto P da malha no instante $t+\Delta t$, H_A e H_B são as cargas hidráulicas nos pontos A e B no instante t , Q_p é a vazão no ponto P da malha no instante $t+\Delta t$, Q_A e Q_B são as vazões nos pontos A e B no instante t , e, B e R são constantes relativas às características físicas do trecho.

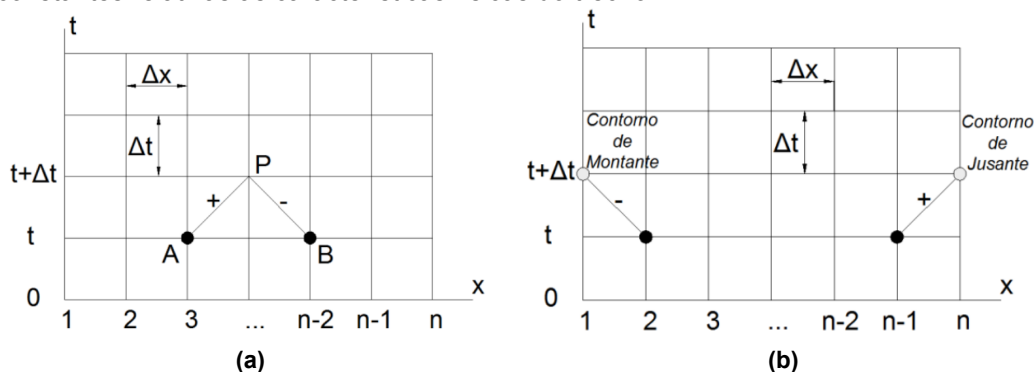


Figura 1. Discretização do MOC: a) Pontos interiores; b) Condições de contorno

Para os pontos extremos da discretização apenas uma reta característica está disponível, conforme ilustra a Figura 1-b. Nestes pontos, equações específicas de cada condição de fronteira (tubulação, bomba, válvula e reservatório) devem ser utilizadas para solucionar o sistema. Neste trabalho foram estudadas redes compostas apenas por tubulações, reservatórios e bombas de rotação fixa. Assim, as eqs. 11-12 são utilizadas para determinar a carga e vazão nas extremidades do trecho discretizado:

$$H_{p_1} = H_{p_2} = H_{Res} \tag{eq. 11}$$

$$H_{p_2} - H_{p_1} = H_M = m_1 Q_M^2 + m_2 Q_M + m_3 \tag{eq. 12}$$

onde H_{Res} é a carga hidráulica do reservatório, H_M a altura manométrica da bomba, Q_M a vazão da bomba e m_1 , m_2 e m_3 os coeficientes da curva característica da bomba. A eq. 11 está associada a um reservatório de nível fixo e a eq. 12 à curva característica $Q-H$ das bombas. Ressalta-se que as bombas operam apenas com velocidade de rotação fixa, sendo a sua paragem súbita modelada através do fechamento instantâneo de sua válvula de retenção.

3 Resultados

O estudo de caso foi realizado na rede de distribuição GoYang (Kim et al., 1994), adicionando-se um reservatório de jusante com nível variável (nó 23) e outras duas bombas à estação elevatória existente, conforme se ilustra na Figura 2. O número de alternativas operacionais é elevado, permitindo a obtenção de uma rotina operacional que prioriza o bombeamento em períodos onde a tarifa de energia é menor, conforme se mostra no Quadro 1. As curvas características altura manométrica-vazão e rendimento-vazão das bombas são apresentadas na Figura 3.

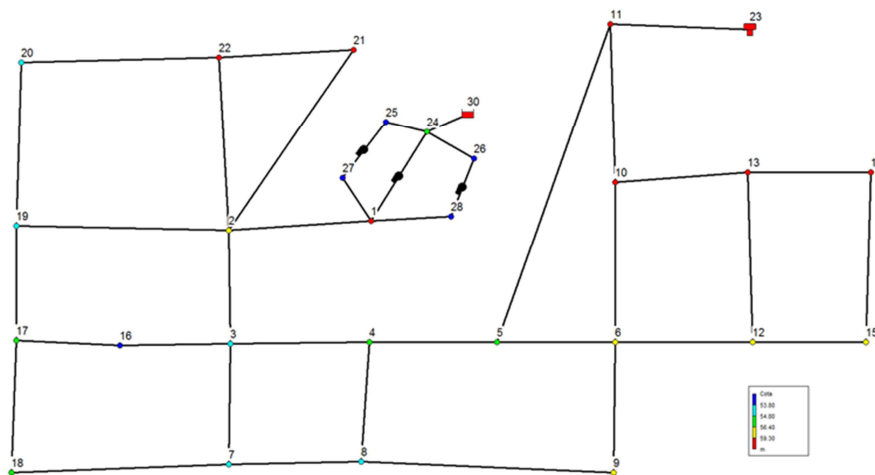


Figura 2. Rede de distribuição GoYang (adaptado de Kim et al. 1994)

Quadro 1. Tarifa de energia utilizada na otimização da operação

Energia [\$/kWh]	Fora de ponta	0.30
	Ponta	1.20
Demanda [\$/kW]	Fora de ponta	20
	Ponta	50

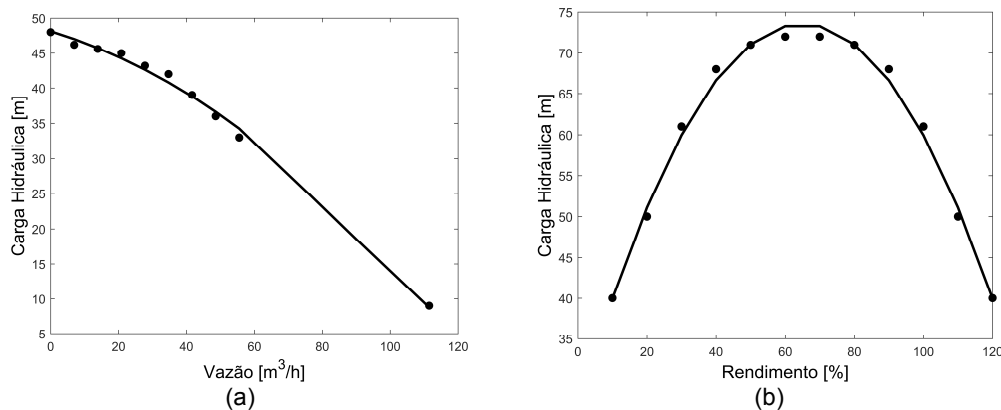


Figura 3. Curvas características das bombas: a) altura manométrica; b) rendimento

Apresentam-se na Figura 4, os resultados de otimização que confirmam a hipótese de que durante o período de maiores tarifas o bombeamento será reduzido. A Figura 4-a mostra que durante o horário de ponta (entre 13 e 16 h) apenas uma bomba permanece ligada por duas horas, sendo desligada no final do período e, em seguida, ligada novamente apenas para recuperar o nível do reservatório. Assim, a estação elevatória pode permanecer fora de serviço durante o período de baixo consumo, sendo o reservatório de jusante o único responsável pelo abastecimento. Observa-se pela Figura 4-b que o nível do reservatório se eleva durante o período de maior tarifa, uma vez que sua carga hidráulica não é suficiente para garantir a pressão mínima de 10 m na rede de distribuição durante este período de consumo máximo.

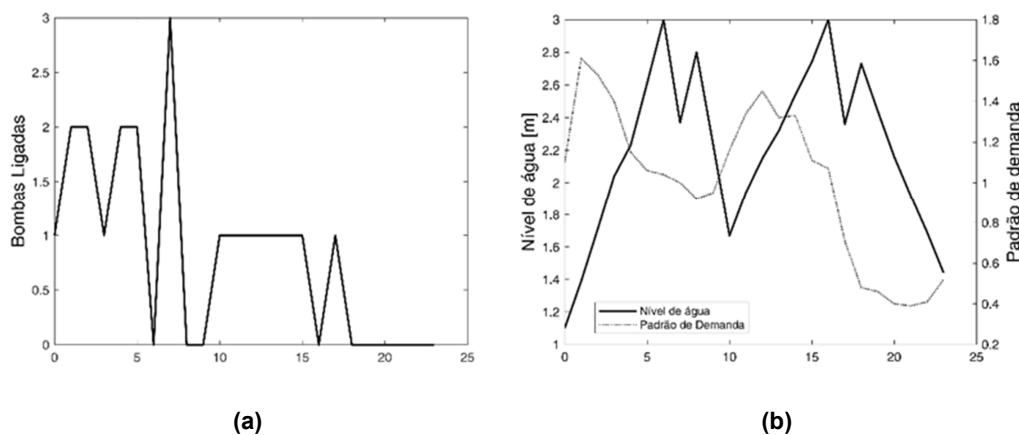


Figura 4. Resultados da otimização da operação da estação elevatória: a) Número de bombas ligadas; b) Nível do reservatório

A Figura 4-a ainda mostra que a otimização gerou um cenário com cinco arranques e cinco paragens de bombas, sendo que num caso duas bombas são desligadas em simultâneo e noutro caso as três bombas são ligadas e desligadas simultaneamente em períodos subsequentes. A Figura 5-a apresenta o perfil da carga hidráulica do nó 1 para o caso crítico, onde as três bombas são ligadas simultaneamente. Observa-se que a variação máxima de pressão é de 18 m, com uma atenuação rápida da onda de pressão gerada, atingindo o regime permanente 50 s após a paragem da manobra. Apesar dos baixos riscos apresentados, a longo prazo, estas constantes variações de pressão tendem a reduzir a vida útil das tubulações e das bombas, sendo recomendável a adoção de uma estratégia operacional com menos arranques e paragens. Outro ponto a ser discutido é sobre a modelagem do padrão de demanda da rede. Caso a alteração seja feita de forma instantânea, esta alteração da demanda assemelha-se a uma rutura de tubulação, com o aparecimento de um vazamento que irá causar uma variação de

pressão. Para o caso oposto, onde a demanda varia linearmente no intervalo da simulação, há uma diferença significativa com relação aos resultados obtidos na simulação em período extensivo, pois, neste caso, as demandas são consideradas constantes no período. Assim, o nível dos reservatórios será afetado e a rotina otimizada obtida para as bombas pode não ser a mais econômica neste cenário. Uma alternativa é realizar a alteração da demanda num intervalo de tempo relativamente curto. A Figura 5-b apresenta a variação de pressão para alteração da demanda em 10 s, utilizando uma variação linear neste período. Este teste foi feito às 20 h, quando o abastecimento é feito exclusivamente pelo reservatório de jusante, ou seja, não há nenhuma manobra na estação elevatória. Observa-se que, apesar da diferença entre o regime permanente inicial e final ser de apenas 1 m, ou seja, apesar da pequena variação da demanda, a variação de pressão causada chegou a 5 m. Caso isto ocorra durante as manobras da estação elevatória, a variação de pressão observada pode ser maior do que a real. Para a rede em estudo, admitiu-se a variação da demanda em 60 s, valor que não causa variação de pressão significativa e também não afeta o nível do reservatório.

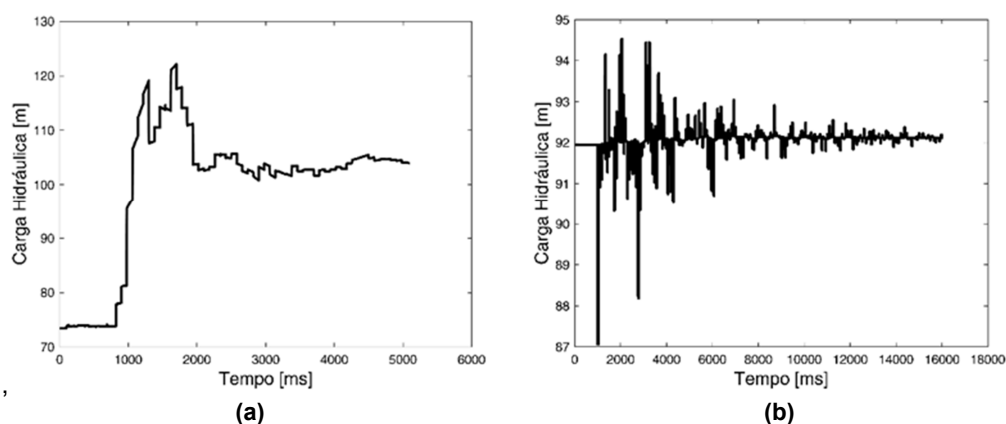


Figura 5. Transitórios hidráulicos decorrentes das manobras da estação elevatória: a) Partida de três bombas simultaneamente; b) Variação do padrão de demanda em 10 s

4 Conclusões

O trabalho apresentou os resultados da otimização da operação de uma estação elevatória e os transitórios hidráulicos decorrentes das manobras de paragem das bombas. A melhor operação encontrada resultou num grande número de arranques e paragens das bombas, o que pode causar um desgaste excessivo dos equipamentos. Com relação às variações de pressão causadas pelos transitórios hidráulicos, o valor máximo encontrado foi de 18 m, com uma atenuação muito rápida, em apenas 50 s. Apesar deste não ser um valor que cause risco de rutura, durante o período de exploração do sistema haverá uma fadiga das tubulações que pode comprometer sua resistência e tornar o sistema menos fiável. Assim, recomenda-se que o número de arranques e paragens de bombas seja limitado e que a operação seja feita através de um inversor de frequência. Ainda assim, a variação da velocidade de rotação deve ser avaliada para que seja criada uma curva de aceleração/desaceleração que não cause surtos de pressão significativos. Por fim, o trabalho mostrou que a modelagem do padrão de demanda deve ser feita com cautela, pois uma alteração rápida pode causar um transiente hidráulico incompatível com a realidade, enquanto uma alteração muito lenta pode invalidar a operação otimizada obtida através da simulação em período estendido.

5 Nomenclatura

α_t	relação entre a rotação de trabalho no instante t e a rotação nominal (-)
$\eta_{i,t}$	rendimento do conjunto motobomba i no período t (-)
ω	inércia da partícula (-)
a	celeridade da água na tubulação (m s^{-1})
A	área da seção transversal da tubulação (m^2)
B	constante da tubulação (s m^{-2})
c_1	coeficiente cognitivo (-)
c_2	coeficiente social (-)
CE_t	custo da energia no período t ($\$/\text{kWh}$)
CD_{FP}	custo da demanda fora do horário de ponta ($\$/\text{kW}$)
CD_{HP}	custo da demanda no horário de ponta ($\$/\text{kW}$)
D	diâmetro da tubulação (m)
f	fator de atrito (-)
FO	função objetivo ($\$$)
g	aceleração da gravidade (m s^{-2})
G	melhor posição já obtida pelo grupo de partículas (m)
H	carga hidráulica (m)
H_A	carga hidráulica no ponto A no instante t (m)
H_B	carga hidráulica no ponto B no instante t (m)
$H_{i,t}$	altura manométrica da bomba i no período t (m)
H_M	altura manométrica da bomba (m)
H_p	carga hidráulica no ponto P da malha no instante $t+\Delta t$
H_{res}	carga hidráulica do reservatório (m)
k	tempo de duração de cada período t (s)
m	coeficientes de ajuste polinomial da curva característica da bomba (-)
NA	nível do reservatório (m)
N_B	a quantidade de bombas do sistema (-)
N_{off}	número de vezes que uma bomba pode ser desligada (-)
$p_{t,i}$	pressão no instante t do nó i (m)
P	melhor posição já ocupada pela partícula (m)
Pot_{FP}	vetor de potência no horário fora de ponta (kW)
Pot_{HP}	vetor de potência no horário de ponta (kW)
Q	vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Q_A	vazão no ponto A no instante t ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Q_B	vazão no ponto B no instante t ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
$Q_{i,t}$	vazão bombeada pela bomba i no período t ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Q_M	vazão da bomba ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Q_p	vazão no ponto P da malha no instante $t+\Delta t$ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
R	fator de resistência da tubulação ($\text{s}^2 \text{m}^{-3}$)
t	intervalo de tempo (s)
T	número de períodos de simulação (-)
V	velocidade de uma partícula (m s^{-1})
x	comprimento do trecho (m)
X	posição da partícula (m)

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências brasileiras ANEEL, CEMIG, ELETROBRAS-FURNAS, SEFAC, FAPEMIG, CNPq, Capes e VALE, e ao projeto REDAWN (Reducing Energy Dependency in Atlantic Area Water Networks) EAPA_198/2016 do INTERREG PROGRAM ATLANTIC 2014-2020 pelo suporte financeiro para a realização desse trabalho.

Referências

- Barán B., Von Lüken C., Sotelo A. (2005). Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies. *Advances in Engineering Software* 36(1) 39-47.
- Brentan B., Meirelles G., Luvizotto Jr, E., Izquierdo J. (2018). Joint Operation of Pressure-Reducing Valves and Pumps for Improving the Efficiency of Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 144.9 04018055.
- Duan H. F., Tung Y. K., Ghidaoui M. S. (2010). Probabilistic analysis of transient design for water supply systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(6) 678-687.
- Jowitt P. W., Germanopoulos, G. (1992). Optimal pump scheduling in water-supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 118(4) 406-422.
- Karney B. W., McInnis D. (1990). Transient analysis of water distribution systems. *Journal-American Water Works Association* 82(7) 62-70.
- Kennedy J., Eberhart R. (1995). PSO optimization. In *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1941-1948). IEEE Service Center, Piscataway, NJ.
- Kim J. H., Kim T. G., Kim J. H., Yoon Y. N. (1994). A study on the pipe network system design using non-linear programming. *J. Korean Water Resour. Assoc* 27(4) 59-67.
- Kougias I. P., Theodossiou N. P. (2013). Multiobjective pump scheduling optimization using harmony search algorithm (HSA) and polyphonic HSA. *Water resources management* 27(5) 1249-1261.
- Mora-Rodríguez J., Amparo López-Jiménez P., Ramos H. M. (2012). Intrusion and leakage in drinking systems induced by pressure variation. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 61(7) 387-402.
- Rossman L. A. (2000). *EPANET 2: users manual*.
- Wylie E. B., Streeter V. L., Suo L. (1993). *Fluid transients in systems* (Vol. 1, p. 464). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.