

RECURSOS HÍDRICOS

EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: UMA DISCUSSÃO TEÓRICA

Layara de Paula Sousa Santos – layara0912@hotmail.com

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Goiás

Alexandre Kepler Soares – aksoares@gmail.com

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Goiás

Sérgio Soares da Silva – sergioamb2000@yahoo.com.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Goiás

Resumo: Grande parte do consumo de energia elétrica dos sistemas de abastecimento de água é proveniente do bombeamento, sendo que as companhias repassam esses gastos ao consumidor a fim de equilibrar as contas. Considerando-se a importância que a eletricidade representa para o saneamento e o quanto as companhias de abastecimento de água gastam com energia elétrica, verifica-se que a melhoria da eficiência beneficia todas as partes envolvidas. Dessa forma é necessário utilizar técnicas de otimização, como modelagem matemática e simuladores hidráulicos, a fim de aumentar a eficiência e reduzir perdas de água. A eficiência global de um sistema depende da capacidade de adequação às necessidades de bombeamento. Para isso, a opção pela solução ideal decorre de análises de funcionamento tanto para situações atuais quanto para situações futuras. Portanto, o projetista deve verificar se será viável ou não utilizar variadores de frequência, escolher diâmetro favorável das tubulações a fim de minimizar vazamentos, analisar o material mais apropriado das tubulações, dimensionar adequadamente os reservatórios e analisar se associação de bombas é favorável para o projeto. A presente pesquisa tem o objetivo de discutir sobre a identificação de fatores que afetam a eficiência hidroenergética no bombeamento, abordar as principais técnicas de otimização, destacar alguns modelos de otimização multiobjetivo e critérios utilizados para seleção adequada.

Palavras-chave: Eficiência energética, Abastecimento de água, Bombeamento, Otimização.

1. INTRODUÇÃO

A economia de água e energia elétrica no setor produtivo é um requisito indispensável para o desenvolvimento econômico e social da sociedade contemporânea. Nesse aspecto, o setor de saneamento merece atenção especial no que tange à possibilidade de economia desses dois insumos por meio da busca da eficiência no dimensionamento de equipamentos e operação eficiente de sistemas de bombeamento. Segundo pesquisas da Agência Americana de Proteção do Meio Ambiente (EPA, 2008), os usuários de água e esgoto consomem cerca de 30 a 60% das contas de energia elétrica de uma cidade.

Os sistemas de abastecimento de água são projetados para proporcionar o fornecimento contínuo de água com qualidade satisfatória e pressão suficiente a todos os consumidores. As bombas são os principais componentes desses sistemas e uma grande parte da energia elétrica produzida é consumida no bombeamento (WU *et al.*, 2014). Em decorrência disso, novas pesquisas têm sido realizadas a fim de melhorar a eficiência do bombeamento em sistemas de distribuição de água. Métodos como programação linear, programação não linear, programação dinâmica, métodos de pesquisas discretos, algoritmos genéticos e algoritmos evolucionários multiobjetivos têm sido utilizados por diversos autores, tais como Mahar & Sing (2013) e Marchi *et al.* (2016). Dentre as soluções obtidas das técnicas de otimização, destacam-se a alteração do diâmetro do impulsor, a instalação de variadores de frequência, a substituição de grupos eletrobomba por outros mais eficientes, ou mesmo a substituição de bombas de rotação constante por bombas de rotação variável (LEITE *et al.*, 2012; COUTINHO, 2015). A instalação de válvulas para redução do diâmetro aumenta a resistência ao escoamento causando redução na vazão. Já a utilização do variador de frequência altera as rotações do motor, modificando a descarga e altura total recalçada pela bomba (TSUTIYA, 2006). O uso de bombas de velocidade constante em sistemas de distribuição de água muitas vezes resulta em situações que a pressão pode ser significativamente mais elevada do que o necessário. Já a utilização de bombas equipadas com unidades de frequência variável normalmente fornece potencial para melhorias na eficiência do funcionamento do sistema, gerando economia de energia e de custos (LINGIREDDY & WOOD, 1998).

Geralmente, os sistemas de distribuição de água exigem grandes quantidades de energia, que variam em função das características da área servida, mas também variam de acordo com o projeto e gestão operacional (LENZI *et al.*, 2013). Compreender essa relação exige uma análise sistemática da influência das estações de bombeamento, da rede e das perdas de água por vazamentos, destacando inconsistências na concepção e gestão do sistema que refletem diretamente no consumo de água e energia (RABADIA, 2015).

Assim, o presente trabalho tem por objetivo discutir sobre a identificação de fatores que afetam a eficiência no bombeamento, abordar as principais técnicas de otimização, destacar alguns modelos de otimização multiobjetivo e critérios utilizados para seleção adequada de bombas. Tais informações são úteis para que profissionais da área de saneamento possam identificar oportunidades de redução de custos e de consumo de energia elétrica referente ao bombeamento de água.

2. METODOLOGIA

Esta pesquisa é caracterizada como de natureza teórica em relação ao tema abordado. Quanto aos seus procedimentos técnicos, classifica-se como um estudo bibliográfico, uma vez que trata de dados e verificações providas diretamente de trabalhos já realizados sobre o assunto pesquisado. Do ponto de vista dos objetivos, classifica-se como

exploratória e descritiva, pois busca informações específicas e características do que está sendo estudado (GIL, 2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Eficiência hidroenergética na distribuição de água

Embora as perdas de água ocorram em todos os sistemas de distribuição, em grande parte deles, as perdas são maiores do que 30 ou 40%, e são atribuíveis ao envelhecimento, deterioração de componentes do sistema e gerenciamento incorreto. Como a maioria dos sistemas de água possui bombeamento, a redução de vazamentos implica na redução de custos com energia elétrica (FONTANA *et al.*, 2012). As perdas são classificadas como *reais*, quando apresentam origens advindas de vazamentos, e *aparentes* decorrentes de ligações clandestinas e fornecimento não faturado (GARCIA *et al.*, 2013). Cabe ressaltar que a redução das perdas aparentes não incide diretamente sobre a redução dos custos com energia elétrica, mas reduz o faturamento do serviço de água considerado (GOMES, 2004).

O emprego de válvulas redutoras de pressão ou a variação da rotação das bombas são as formas mais usuais de controlar as vazões em um sistema de abastecimento. A válvula é inserida após a saída da bomba e tem por finalidade reduzir o diâmetro causando redução na vazão. Já a variação da rotação da bomba pode ser obtida de duas formas: alterando o diâmetro do rotor ou variando a rotação da bomba (DUTRA, 2005). Outro fator que deve ser analisado é o diâmetro das tubulações, visto que este fator influencia diretamente tanto a perda de carga distribuída como a perda de carga localizada. A relação a ser estabelecida é que diâmetros menores correspondem a uma perda de carga maior, implicando na aquisição de bombas maiores e mais caras e incidindo sobre o custo operacional em virtude da potência aplicada para vencer a perda de carga. Quando o diâmetro da tubulação é maior, ocorre o inverso, visto que a perda de carga é menor (MONACHESI *et al.*, 2014). A rugosidade interna das tubulações influencia a perda de carga distribuída na altura manométrica total e, conseqüentemente, na potência elétrica. Quanto maior a rugosidade, maiores são as perdas e o consumo de energia para transportar água.

O dimensionamento dos reservatórios é um dos fatores fundamentais para a economia energética, visto que por meio destes, cargas podem ser moduladas e as estações de bombeamento podem ser utilizadas nos horários mais favoráveis, evitando as horas de pico. Considerando-se a economia de energia, o arranjo correto das zonas de pressão é o fator responsável pela eficiência energética do sistema e depende do volume dos reservatórios e da capacidade das bombas (MONACHESI *et al.*, 2014).

O monitoramento do sistema pode ser realizado por meio da automação de medidas em tempo real, como pressões e vazões e também pode ser obtido com a implementação da modelagem matemática em conjunto com simuladores hidráulicos. Neste sentido, destaca-se o emprego da otimização multiobjetivo para a obtenção de regras operacionais para o bombeamento em sistemas de distribuição de água.

3.2 Modelos de otimização multiobjetivo

A necessidade de otimização multiobjetivo está presente em grande parte dos projetos de engenharia. Quando a otimização destina-se somente a um objetivo, a necessidade do programador é encontrar a melhor solução, denominada ótimo global. Por outro lado, tratando-se de otimização multiobjetivo, existe um conjunto de soluções, geralmente conhecidas como conjunto de soluções ótimas (corretamente chamadas de soluções não-

dominadas) ou frente Pareto (PRASAD & PARK, 2004). É possível constatar que os algoritmos evolucionários obtiveram sucesso na solução dos problemas de otimização referentes à operação de sistemas de distribuição de água. O Quadro 1 apresenta uma compilação de trabalhos que utilizaram algoritmos multiobjetivos. Com relação ao método de otimização utilizado, percebe-se que no caso dos algoritmos evolucionários multiobjetivo, os mais utilizados recentemente foram: *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA), *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) e *Multiple Objective Genetic Algorithm* (MOGA). Os algoritmos genéticos multiobjetivo produzem uma frente de Pareto com as soluções operacionais de melhor compatibilização entre os objetivos pré-definidos e, por isso, é considerada uma técnica moderna e eficiente. Já a rede neural artificial consiste em um modelo matemático empírico, com memória e não-linear (MACHADO, 2005; SOUSA, 2013).

Quadro 1- Pesquisas de otimização multiobjetivo em sistemas de distribuição de água

Referência	Método de Otimização	Número de Funções Objetivo	Tipo das Funções Objetivo
Savic <i>et al.</i> (1996)	Algoritmos genéticos	2	Minimização dos custos com energia elétrica e manutenção das bombas
Kapelan <i>et al.</i> (2003)	Algoritmos genéticos multiobjetivo - MOGA	2	Maximização da precisão do modelo e minimização dos custos
Prasad e Park (2004)	Algoritmos genéticos	2	Minimização de custos da rede e maximização da confiabilidade
Carrijo <i>et al.</i> (2004)	Algoritmos genéticos multiobjetivo	2	Minimização de custos de energia elétrica e maximização da confiabilidade
Farmani <i>et al.</i> (2004)	Algoritmos genéticos multiobjetivo - NSGA-II	2	Minimização dos custos operacionais e maximização da confiabilidade
Barán <i>et al.</i> (2005)	Algoritmos genéticos multiobjetivo	4	Minimização dos custos com energia elétrica e manutenção das bombas, maximização da confiabilidade e minimização dos picos de energia
Fu e Kapelan (2010)	Redes neurais artificiais e algoritmos genéticos	2	Redução do tempo de processamento computacional de problemas multiobjetivo e preservação das soluções obtidas
Wu <i>et al.</i> (2011)	Algoritmos genéticos	2	Minimização dos custos operacionais e redução da emissão de gases efeito estufa
Sousa (2013)	Algoritmos genéticos multiobjetivo - SPEA e NSGA-II	3	Minimização das perdas reais e custos com energia elétrica e maximização da confiabilidade do sistema
Kurek e Ostfeld (2014)	Algoritmos genéticos multiobjetivo - SPEA	3	Minimização dos custos operacionais das bombas, maximização da qualidade da água e maximização da confiabilidade
Rahmani <i>et al.</i> (2015)	Algoritmos genéticos multiobjetivo - NSGA-II	3	Minimização dos custos de reabilitação da infraestrutura, minimização dos custos operacionais e minimização dos custos das válvulas redutoras de pressão
Odan <i>et al.</i> (2015)	Algoritmos genéticos	2	Minimização dos custos com bombeamento e maximização da confiabilidade

3.3 Escolha das bombas e definição do ponto de operação

A escolha da bomba é determinada principalmente pelas condições de operação e manutenção e, ainda, por considerações econômicas. Neste caso, as bombas também podem ser associadas para que seja possível aumentar as descargas ou alturas manométricas para atender as necessidades operacionais. Estas podem estar associadas em série ou paralelo.

Na operação de uma única bomba, o ponto de operação do sistema é determinado pelo cruzamento da curva da bomba com a curva do sistema. Este ponto de operação é variável, pois depende de fatores como nível da água nos reservatórios e perdas de carga. Em sistemas com bombas em paralelo ou em série, o ponto de funcionamento também é definido pela interseção das curvas, conforme Figura 1 e Figura 2. A curva de associação das bombas em paralelo mostra o ponto de funcionamento de um sistema que opera com duas bombas ligadas. Nesse caso, a vazão recalçada é cerca de 27 l/s com cada bomba contribuindo com a metade desse valor. O cruzamento da curva do sistema com a curva da bomba mostra o ponto de funcionamento desse sistema quando somente uma das bombas tiver em operação, com vazão de aproximadamente 17 l/s. A curva da associação de bombas em série é obtida somando-se, para cada vazão, as alturas manométricas de cada bomba individualmente. Se apenas uma bomba estivesse instalada, estaria fornecendo vazão de 150 m³/h contra uma altura manométrica de 50 metros de coluna d'água (m.c.a).

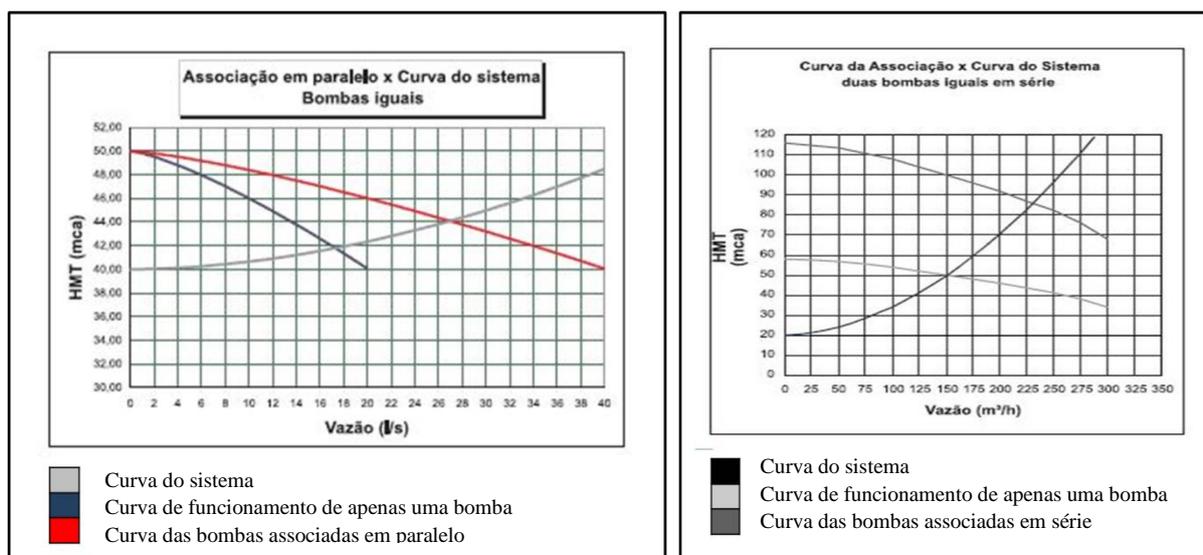


Figura 1- Curva da associação em paralelo x curva do sistema. Figura 2- Curva da associação x curva do sistema para bombas em série

Fonte: Monachesi *et al.* (2014)

Outra forma de melhorar a eficiência energética de sistemas de abastecimento de água consiste da utilização de bombas de rotação variável. São bombas com motores acoplados à inversores de frequência, que são equipamentos capazes de alterar a frequência do sinal elétrico e conseqüentemente da velocidade de rotação da bomba (MARCHI & SIMPSON, 2013). A avaliação da eficiência de bombas de rotação variável normalmente é estimada utilizando-se as leis de semelhança que descrevem a relação matemática entre as variáveis envolvidas no desempenho da bomba. As leis de semelhança estão relacionadas às características das bombas que operam com velocidades diferentes e, no contexto de distribuição de água, geralmente são utilizadas para prever as curvas de bombas de velocidade

variável. No entanto, essa lei contém aproximações porque não considera os fatores que não se ajustam com a velocidade. Neste caso, a aproximação inerente à lei de semelhança que calcula a eficiência e a potência, pode reproduzir resultados errôneos, especialmente para bombas de pequenas dimensões (SIMPSON & MARCHI, 2013). Por isso, o simulador hidráulico EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000), largamente empregado para o cálculo hidráulico de redes de distribuição de água, é impreciso para o cálculo da eficiência desse tipo de bomba (MARCHI & SIMPSON, 2013). Alguns pesquisadores, como Marchi & Simpson (2013) e Coutinho (2015), desenvolveram uma rotina para a correção da eficiência de bombas de rotação variável no EPANET 2.0. Nesse contexto, Marchi *et al.* (2016) modificaram a biblioteca do simulador hidráulico EPANET 2.0 de modo que a operação das bombas pudessem ser otimizadas considerando várias situações de forma simultânea, como a hora do dia e o nível do reservatório. Os resultados mostraram que é possível encontrar soluções de baixo custo com controles simples, visto que o algoritmo utilizado pelos autores desenvolve todo conjunto de regras de controle da bomba.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ainda que o uso de softwares de modelagem hidráulica tenham se tornado ferramentas indispensáveis para verificar qual a melhor alternativa para proporcionar o melhor rendimento hidroenergético em sistemas de bombeamento de água, é importante conhecer alguns critérios que favorecem a economia de energia elétrica. O tipo de bomba utilizada deve se adequar perfeitamente à sua função e, para isso, é preciso se atentar ao ponto de operação e analisar a curva característica da bomba. No caso de bombeamento de água bruta, que propicia desgaste mais rápido dos rotores, deve-se optar por bombas especiais ou limitar a altura manométrica. Desde a fase de projeto, o operador deve proporcionar o melhor planejamento possível, prezando pela qualidade construtiva e dos materiais utilizados, de forma que minimize os vazamentos e impeça bombeamentos desnecessários. Técnicas como utilização de válvulas redutoras de pressão ou variação da rotação das bombas, avaliação do diâmetro, avaliação do material utilizado nas tubulações e dimensionamento adequado dos reservatórios, contribuem para melhorar a eficiência hidroenergética de sistemas de distribuição de água. Apesar da importância e da evolução de técnicas para aumentar a eficiência energética de bombas em sistemas de distribuição de água, esta atividade ainda está em processo de estruturação, sendo uma área que requer bastante exploração e é assunto potencial para os mais diversos estudos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro aos projetos “Análise e Controle de Sistemas de Distribuição de Água via Modelagem Computacional” (Edital MCT/CNPq 14/2010 – Universal) e “Análise e Modelagem de Efeitos Dinâmicos e Cavitação durante Transitórios Hidráulicos em Sistemas de Distribuição de Água” (Chamada Universal MCTI/CNPq 14/2013).

5. REFERÊNCIAS

BARÁN, B.; VONLÜCKEN, C.; SOTELO, A. Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies. **Advances in Engineering Software**, v. 36, p. 39-47, 2005.

- CARRIJO, I; REIS, L.F.R.; WALTERS, G.A.; SAVIC, D. Operational optimization of WDS based on multiobjective genetic algorithms and operational extraction rules using data mining. **Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management**, Salt Lake city, US, 2004.
- COUTINHO, R.S. **Simulação computacional de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET**. Goiânia, 91 p., 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás.
- DUTRA, J.B.A. **Eficiência energética no controle de vazão em sistemas de bombeamento de água: uso de válvula e controle de velocidade**. Paraíba do Sul, 2005. Disponível em <<http://docplayer.com.br/10534820-Eficiencia-energetica-no-controle-da-vazao-em-sistemas-de-bombeamento-de-agua-uso-de-vavula-e-controle-de-velocidade.html>> Acesso em: 07 de abril de 2016.
- EPA (Environmental Protection Agency). **Ensuring a sustainable future: An energy management guidebook for wastewater and water utilities**. 2008.
- FONTANA, N.; GIUGNI, M.; PORTOLANO, D. Losses reduction and energy production in water-distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 3, p. 237-244, 2012.
- FU, G.; KAPELAN, Z. Embedding Neural Networks in Multi Objective Genetic Algorithms for Water Distribution System Design. **Water Distribution Systems Analysis**, p. 888-898, 2010.
- GARCIA, E.H.; LIMA, G.S.; GHISLENI, G.; DARONCO, G.C.; DALMAS, R.R.O. Sistema de abastecimento de água. Estudo de caso: Redentora – RS. In: **II Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Civil**, Florianópolis/ Santa Catarina, 2013.
- GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 184 p.
- GOMES, H.P. **Sistemas de Abastecimento de Água: dimensionamento econômico e operação de redes elevatórias**. 2. Ed., João Pessoa: Editora Universitária –UFPB, 2004.
- KAPELAN, Z.S.; SAVIC, D.A.; WALTERS, G.A. Multiobjective sampling design for water distribution model calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 6, p. 466-479, 2003.
- KUREK, W; OSTFELD, A. Multiobjective water distribution systems control of pumping cost, water quality, and storage-reliability constraints. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 2, p. 184-193, 2014.
- LEITE, P., FERREIRA, F., TENTÚGAL-VALENTE, L., VIVAS, E., (2012), Os variadores de velocidade como instrumentos de otimização energética em estações elevatórias de águas residuais. Vantagens e limitações da sua aplicação. **Anais do 11º Congresso da Água**, APRH, Porto, 2012.
- LENZI, C; BRAGALLIC; BOLOGNESI, A; ARTINA, S. From energy balance to energy efficiency indicators including water losses. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 13, n. 4, p. 889-895, 2013.
- LINGIREDDY, S.; WOOD, D.J. Improved operation of water distribution systems using variable-speed pumps. **Journal of Energy Engineering**, v. 124, n. 3, p. 90-103, 1998.
- MACHADO, F.W. **Modelagem chuva-vazão utilizando redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.
- MAHAR, P.S.; SINGH, R.P. Optimal design of pumping mains considering pump characteristics. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 5, n. 1, 04013010, 2013.
- MARCHI, A.; SIMPSON, A.R. Correction of the EPANET inaccuracy in computing the efficiency of variable speed pumps. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 4, p. 456-459, 2013.

- MARCHI, A.; SIMPSON, A.R.; LAMBERT, M.F. Optimization of Pump Operation Using Rule-Based Controls in EPANET2: New ETTAR Toolkit and Correction of Energy Computation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 04016012, 2016.
- MONACHESI, M.G.; MONTEIRO, M.A.G.; ROCHA, C.R. Eficiência Energética de Bombas: Manual Prático, 2014. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/ManualBombeamento.pdf> Acesso em: 07 de abril de 2016.
- ODAN, F.; REIS, L.F.R.; KAPELAN, Z. Real-Time Multiobjective Optimization of Operation of Water Supply Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 9, 1943-5452.0000515, 2015.
- PRASAD, T.D.; PARK, N.S. Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 1, p. 73-82, 2004.
- RABADIA, C. Energy performance Assesment of pumps and compressed air system in Fluid Catalytic Cracking Unit of an Oil Refinery. **International Journal of Engineering Research**, 2015.
- RAHMANI, F.; BEHZADIAN, K; ARDESHIR, A. Rehabilitation of a Water Distribution System Using Sequential Multiobjective Optimization Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, C4015003, 2015.
- ROSSMAN, L. **EPANET 2 users manual**. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A.; SCHWAB, M. Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply. In: **Evolutionary Computing**. Springer Berlin Heidelberg, p. 227-235, 1996.
- SIMPSON, A.R.; MARCHI, A. Evaluating the approximation of the affinity laws and improving the efficiency estimate for variable speed pumps. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 12, p. 1314-1317, 2013.
- SOUSA, A.S. **Otimização hidroenergética da operação de sistemas de distribuição de água**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Goiás, 2013.
- TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de Água**. 3 ed. São Paulo: EPUSP, 2006. 643 p.
- WU, P.; LAI, Z.; WU, D.; WANG, L. Optimization research of parallel pump system for improving energy efficiency. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 8, p. 04014094, 2014.
- WU, W.; SIMPSON, A.R.; MAIER, H.R.; MARCHI, A. Incorporation of variable-speed pumping in multiobjective genetic algorithm optimization of the design of water transmission systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 5, p. 543-552, 2011.