

## XII ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS

### MODELO PARA OPERAÇÃO OTIMIZADA DE BOMBAS DE ROTAÇÃO VARIÁVEL EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

*Layara de Paula Sousa Santos<sup>1</sup> & Alexandre Kepler Soares<sup>2</sup>*

**RESUMO** – Neste trabalho, um modelo híbrido de otimização/simulação foi desenvolvido tendo como suporte os algoritmos genéticos multiobjetivo e o simulador hidráulico EPANET. O método NSGA II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) foi utilizado para a otimização da operação de bombas de rotação variável, ou seja, as variáveis de decisão do problema foram a rotação das bombas para cada hora ao longo do dia. Uma modificação do simulador hidráulico EPANET original, que não computa corretamente o rendimento de bombas de rotação variável, foi empregada para que as potências de cada bomba e, conseqüentemente o custo da energia elétrica, fossem calculadas corretamente. Conjuntos de soluções não dominadas (Frente Pareto) foram obtidos considerando-se penalidades de pressão negativa nos nós e fechamento/desligamento de tubos e/ou bombas. A metodologia foi aplicada na rede hipotética denominada ANYTOWN e demonstrou ser adequada, visto que os resultados obtidos foram satisfatórios.

**ABSTRACT** – In this work, a hybrid optimization/simulation model was developed based on the multiobjective genetic algorithms and the EPANET hydraulic simulator. The NSGA II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) method was used to optimize the operation of variable rotation pumps, that is, the decision variables of the problem were the rotation of the pumps for each hour throughout the day. A modification of the original EPANET hydraulic simulator, which does not correctly compute the efficiency of variable-speed pumps, was employed so that the power of each pump, and consequently the cost of electric power, was calculated correctly. Non-dominated solution sets (Pareto Front) were obtained considering negative pressure penalty as well as penalty of closure/shutdown of pipes and/or pumps. The methodology was applied in the hypothetical network called ANYTOWN and proved to be adequate, since the results obtained were satisfactory.

**Palavras-Chave** – Otimização multiobjetivo, Bombas de rotação variável, Confiabilidade hidráulica.

---

1) Mestre em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Goiás, layara0912@hotmail.com

2) Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, aksoares@gmail.com

## 1 – INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de atender a demanda de abastecimento de água, torna-se necessário aumentar a oferta por meio da operação eficiente do sistema. Ainda que seja possível ampliar os sistemas de abastecimento público, a realização desta intervenção não é suficiente para garantir o aumento da disponibilidade desse recurso, tendo em vista que a água pode ter as características facilmente alteradas, tornando-se imprópria para o consumo humano. A operação eficiente do sistema deve ser alcançada para proporcionar o aumento da oferta, bem como para eliminar gastos com suprimentos e obras emergenciais (SOUSA, 2013).

Dessa forma, é necessário realizar análises dos componentes principais de uma estação de bombeamento de água, com o objetivo de maximizar a eficiência energética e manutenção dos equipamentos de operação do sistema. Considerando-se a eficiência energética, as estações de bombeamento de água são componentes fundamentais desses sistemas, são formadas por bombas de capacidades diferentes que operam para atender a demanda e são utilizadas para bombear água para um ou mais reservatórios (MONACHESI, 2005).

Devido à complexidade encontrada pelos operadores em definir o melhor estado operacional das bombas e grau de abertura das válvulas, de forma a tornar o sistema mais eficiente em termos energéticos, recorre-se ao auxílio da otimização obtida por meio de rotinas computacionais. A utilização de técnicas de simulação por meio do modelo híbrido multiobjetivo consiste na obtenção de um conjunto de variáveis que satisfaça algumas restrições e otimize uma função constituída por mais de uma função objetivo.

Tradicionalmente, a comunidade científica dedica-se a pesquisas envolvendo a otimização de sistemas de abastecimento de água por meio da operação de bombas com a finalidade de minimizar os custos com energia e maximizar a confiabilidade do sistema. A substituição de bombas de rotação constante por bombas de rotação variável na modelagem hidráulica têm obtido resultados mais fidedignos para redução de custos operacionais sem exigir intervenções onerosas na infraestrutura do sistema (GIUSTOLISI *et al.*, 2013; SIMPSON e MARCHI, 2013).

O desenvolvimento do modelo multiobjetivo proposto por esta pesquisa visa obter uma ferramenta que minimize o custo de energia elétrica nas estações elevatórias e proporcione o aumento da confiabilidade do sistema por meio da utilização de bombas de rotação variável. O modelo escolhido envolve a busca soluções não dominadas utilizando-se algoritmos evolucionários multiobjetivos e o simulador hidráulico EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000).

## 2 – MODELO COMPUTACIONAL

O modelo proposto nesta pesquisa é resolvido interligando um otimizador baseado em algoritmos evolucionários multiobjetivo (NSGA-II), e um simulador hidráulico fundamentado no código original e alterado do EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000). Para avaliar as variáveis de estado, como pressões e vazões do sistema, foi utilizado o simulador proposto por Coutinho e Soares (2017), que contem as modificações necessárias para a correção do cálculo da eficiência de bombas de rotação variável no EPANET 2.0. São consideradas como variáveis de decisão as velocidades de rotação  $w_b$  de cada bomba  $b$ , para cada intervalo de tempo  $t$ , ao longo de um ciclo operacional  $T$  de 24 horas, restritas ao intervalo contínuo  $w_b \in (w_{b\min}; w_{b\max})$ . Para cada bomba pertencente ao conjunto  $B$ , tem-se um vetor  $\Omega$  que representa o seu agendamento operacional.

$$\Omega = \{[w_b(0); \dots; w_b(T)]\} \text{ para } b \in B \quad (1)$$

As duas funções objetivo consideradas na otimização operacional são a minimização do custo da energia consumida pela operação das bombas e a maximização da confiabilidade da rede.

### Eficiência energética

Foi adotada uma tarifa base de energia elétrica  $C$  para todas as estações elevatórias do sistema de abastecimento de água. Entretanto, com o intuito de preservar a característica de diferenciação horária (períodos de ponta e fora de ponta) da estrutura tarifária brasileira, a tarifa base de energia será multiplicada por um fator  $K$  em cada intervalo de tempo do ciclo operacional. Assim, o custo de energia  $J_1$  consumido pelas bombas do sistema pode ser obtido pela Equação 2.

$$J_1 = \sum_{t=0}^T \sum_{b=1}^{nb} (K_t C) \left( \frac{\gamma Q_{t,b} H_{t,b}}{\eta_{t,b}} \right) \quad (2)$$

em que,  $t$  é o número de intervalos de tempo;  $T$  é o número de intervalos de tempo contados a partir de zero do ciclo operacional;  $b$  é o número associado a cada bomba;  $nb$  é o número de bombas existentes no sistema;  $K$  é o fator temporal associado à tarifa base de energia;  $C$  é a tarifa base de energia;  $\gamma$  é o peso específico da água;  $Q$  é a vazão da bomba;  $H$  é a altura manométrica da bomba e  $\eta$  é o rendimento da bomba.

Foi adotado o valor de R\$ 255,88/MWh para a tarifa de energia, correspondente à tarifa média nacional de fornecimento para os serviços públicos de água, esgoto e saneamento (ANEEL, 2014). Já o fator temporal  $K$ , associado à tarifa de energia, assumirá o valor de 1,7 para o período de ponta (intervalo das 18:00 às 21:00h) e 0,9 para o período fora de ponta.

### Confiabilidade hidráulica

A avaliação da confiabilidade foi realizada por meio de uma medida substituta, especificamente o índice de resiliência (IR) de Todini (2000) (Eq. 3). Para um ciclo operacional completo, a função objetivo relacionada à confiabilidade hidráulica do sistema é dada por  $J_2$  (Eq. 4). Ressalta-se que quanto maior o valor de  $J_2$ , maior é a confiabilidade do sistema em fornecer aos consumidores um nível de serviço adequado.

$$IR_t = \frac{\sum_{i \in N}^{nn} Q_{i,t} (H_{i,t} - H_{i,t}^*)}{\sum_{r \in R}^{nr} Q_{r,t} H_{r,t} + \sum_{p \in P}^{np} \frac{P_{p,t}}{\gamma} - \sum_{i \in N}^{nn} Q_{i,t} H_{i,t}^*} \quad (3)$$

$$J_2 = \sum_{t=0}^T IR_t \quad (4)$$

em que  $t$  é o número do intervalo de tempo;  $T$  é o número de intervalos de tempo (contados a partir de zero) do ciclo operacional;  $i$  é o número associado a cada nó;  $N$  é o conjunto de todos os nós do sistema;  $nn$  é o número de nós existentes no sistema;  $Q_i$  é a demanda no nó  $i$ ;  $H_i$  é a pressão disponível no nó  $i$ ;  $H_i^*$  é a pressão requerida no nó  $i$ ;  $r$  é o número associado a cada reservatório que abastece o sistema;  $R$  é o conjunto de todos os reservatórios do sistema;  $nr$  é o número de reservatórios existentes no sistema;  $Q_r$  é a vazão fornecida pelo reservatório  $r$  ao sistema;  $H_r$  é a carga piezométrica no reservatório  $r$ ;  $p$  é o número associado a cada bomba;  $P$  é o conjunto de todas as bombas do sistema;  $np$  é o número de bombas existentes no sistema;  $P_p$  é a energia, em termos de potência, introduzida no sistema pela bomba  $p$  e  $\gamma$  é o peso específico da água.

### Rede de distribuição de água

O modelo de otimização proposto foi aplicado à rede hipotética Anytown, conforme Figura 1 (WALSKI *et al.*, 1987), alterada por Kurek e Ostfeld (2014) e utilizada por Coutinho (2015). A rede foi utilizada por ser considerada como um sistema de referência pela literatura para uso na análise e comparação de diferentes algoritmos de otimização (JOLLY *et al.*, 2014).

As duas bombas do sistema, 35 e 36, operam sob rotação variável e possuem curvas características distintas. Os padrões de rotação da bomba seguem a proposta de Kurek e Ostfeld (2014), apresentados na Figura 2. A velocidade relativa de rotação da bomba é representada por  $N$ , sendo definida como quociente entre determinada velocidade de rotação  $N_2$  e a velocidade nominal de rotação  $N_1$ .

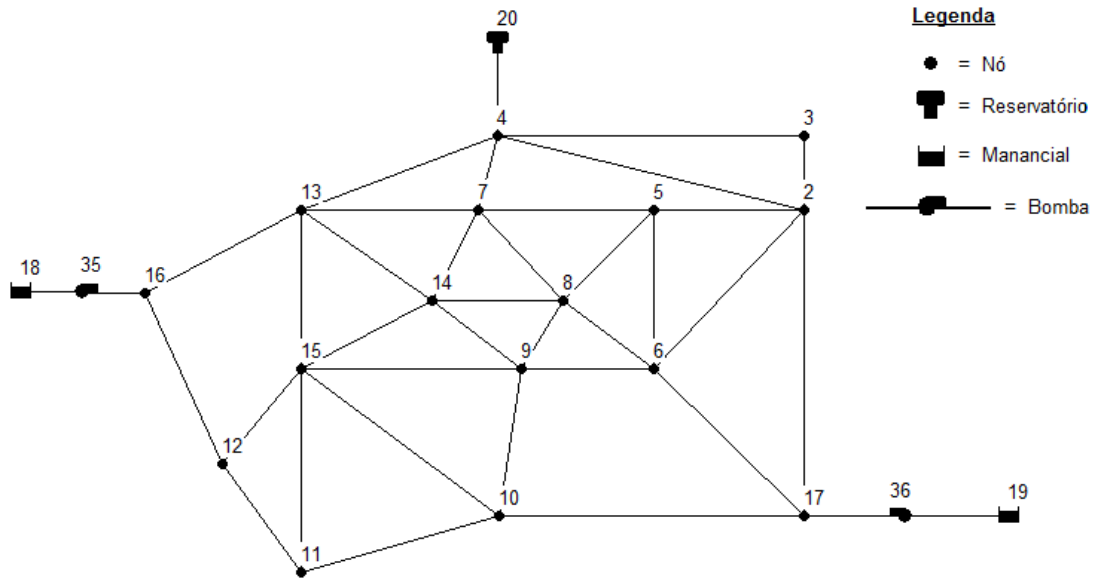


Figura 1 – Rede de distribuição Anytown

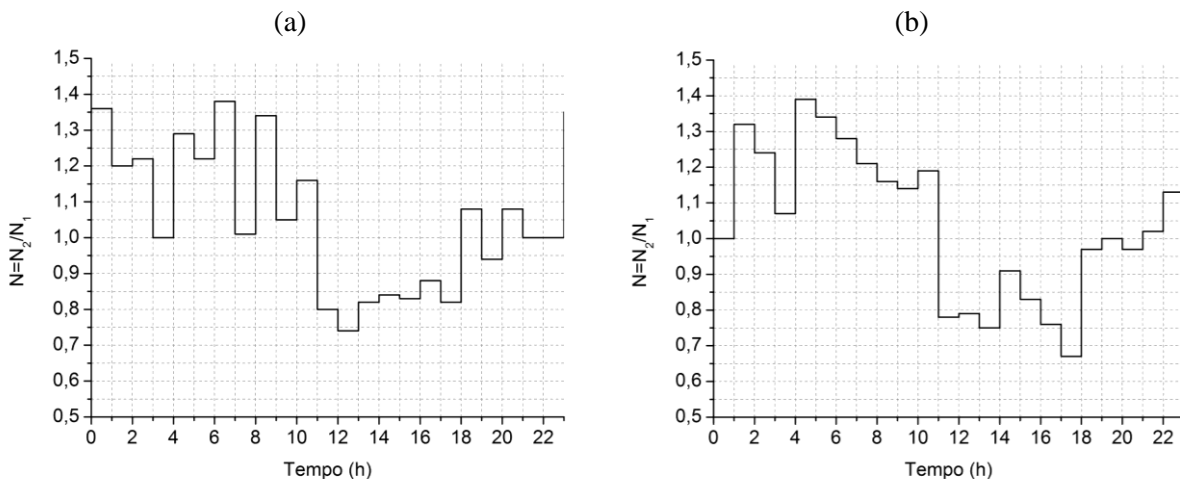


Figura 2 - Padrão de variação da velocidade de rotação: (a) bomba 35 e (b) bomba 36

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca da operação ótima do sistema de distribuição de água, considerando-se a minimização do custo energético e maximização da confiabilidade hidráulica, pode apresentar cenários não factíveis para a operação, como baixas pressões nos nós e desligamentos e acionamentos excessivos das bombas. Assim, foram consideradas penalidades de pressão negativa nos nós da rede e de fechamento ou desligamento de tubos e bombas no sistema de distribuição de água. Foram obtidas 10 Frentes Pareto, apresentadas na Figura 3. A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados obtidos das 10 Frentes de Pareto.

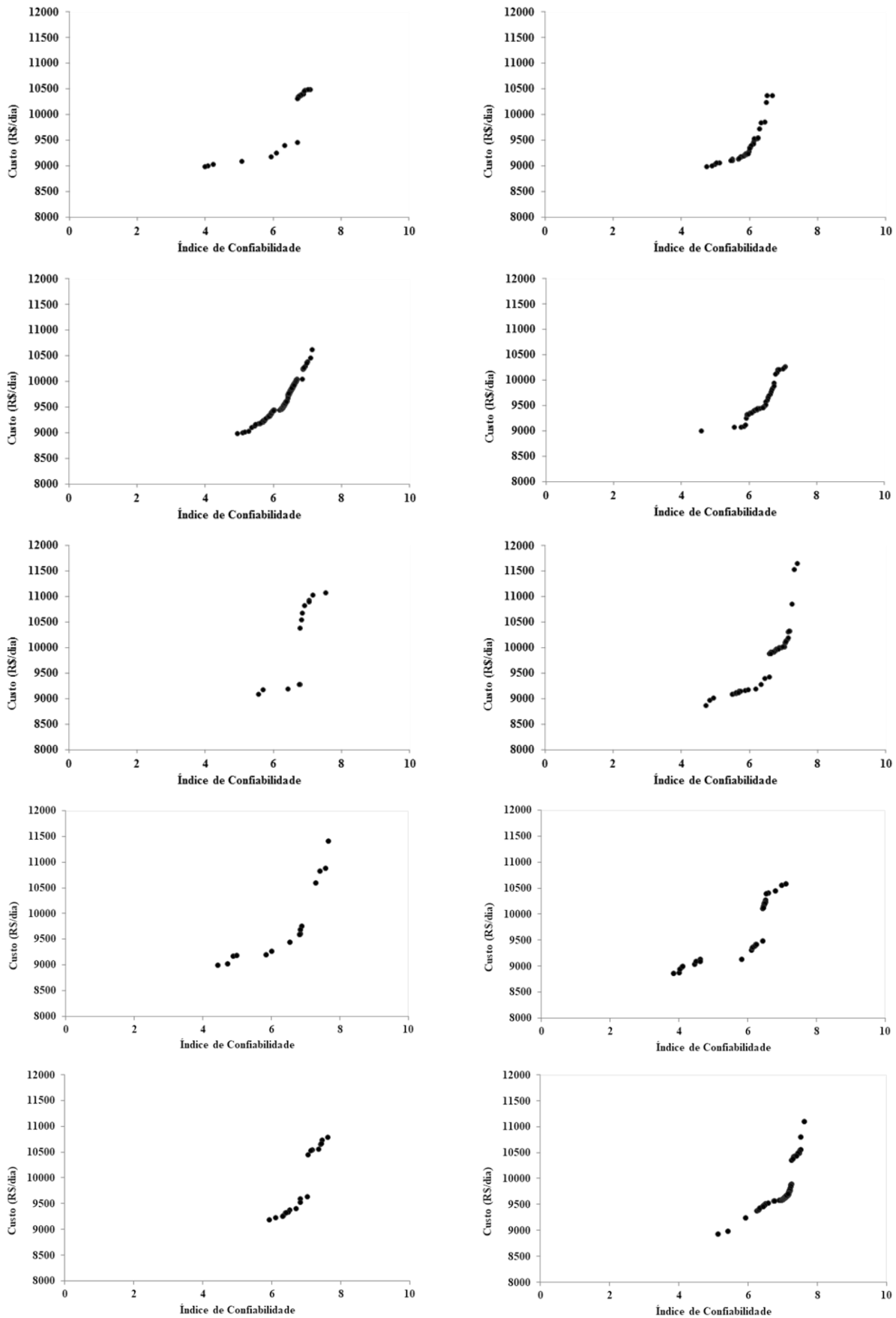


Figura 3 – Soluções não dominadas (Frentes Pareto) – 11 a 20

Tabela 1 – Custos mínimo e máximo referentes às soluções não-dominadas.

	Custo Mínimo	Confiabilidade Mínima	Custo Máximo	Confiabilidade Máxima	Soluções Viáveis
Frente Pareto 11	8990,6	4,00156	10494	7,08799	30
Frente Pareto 12	8984,51	4,74961	10375,5	6,66405	47
Frente Pareto 13	8986,94	4,94375	10620,3	7,14478	401
Frente Pareto 14	9003,26	4,59915	10265,3	7,07423	53
Frente Pareto 15	8864,99	4,72176	10861	7,25652	57
Frente Pareto 16	9081,93	5,56339	11081,1	7,53912	13
Frente Pareto 17	9000,02	4,43312	11416,8	7,65921	16
Frente Pareto 18	8870,2	3,83597	10585,2	7,1113	32
Frente Pareto 19	9186,02	5,92434	10792,6	7,60928	20
Frente Pareto 20	8930,46	5,12633	11109,9	7,61304	154

Os resultados apresentados referem-se à Frente Pareto 11, para a qual os padrões de rotação das bombas são apresentados nas Figuras 4 e 5. As vazões bombeadas são mostradas na Figura 6 e a carga hidráulica e o nível do RNV são mostrados na Figura 7, sempre considerando as duas soluções não-dominadas extremas de mínimo e máximo custos.

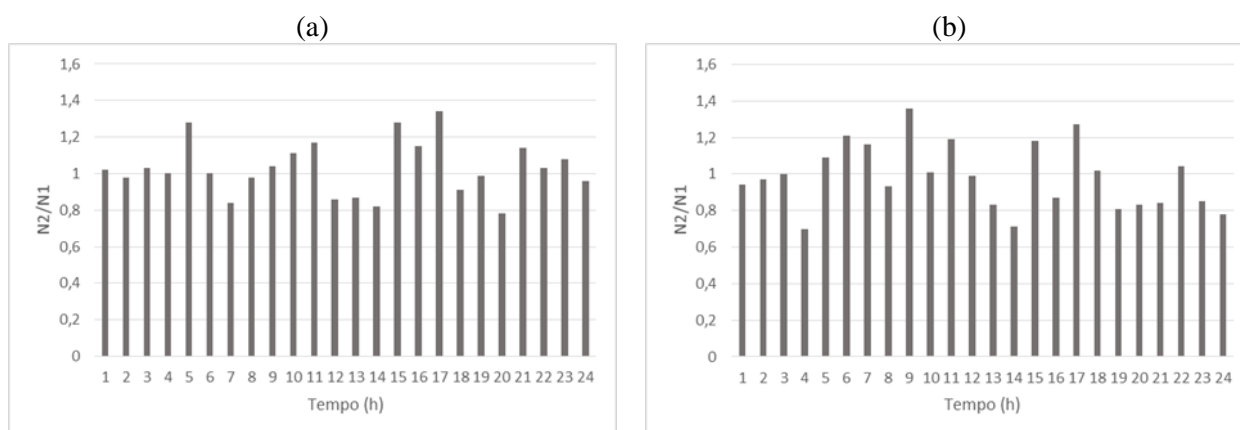


Figura 4 – Padrão de rotação para mínimo custo/confiabilidade da bomba (a) 35 e (b) 36 -Frente Pareto 11

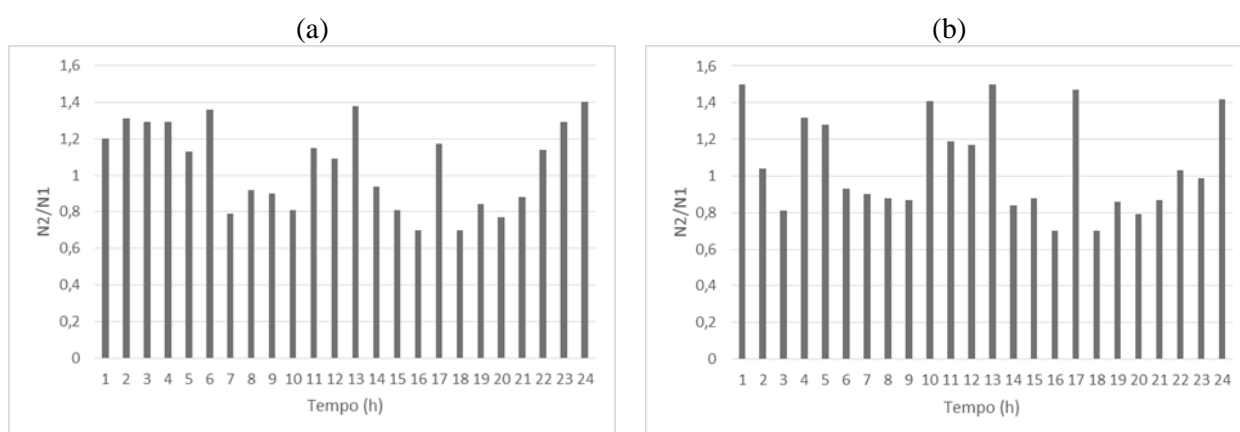


Figura 5 – Padrão de rotação para máximo custo/confiabilidade da bomba (a) 35 e (b) 36 -Frente Pareto 11

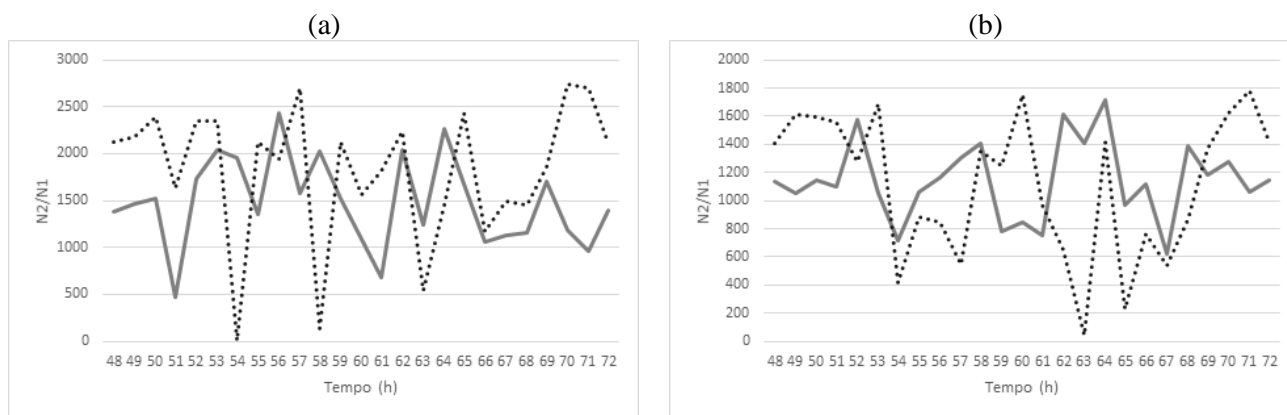


Figura 6 – Vazão da bomba (a) 35 e (b) 36 - Frente Pareto 11 – para solução de máxima confiabilidade (linha tracejada) e de mínima confiabilidade (linha contínua)

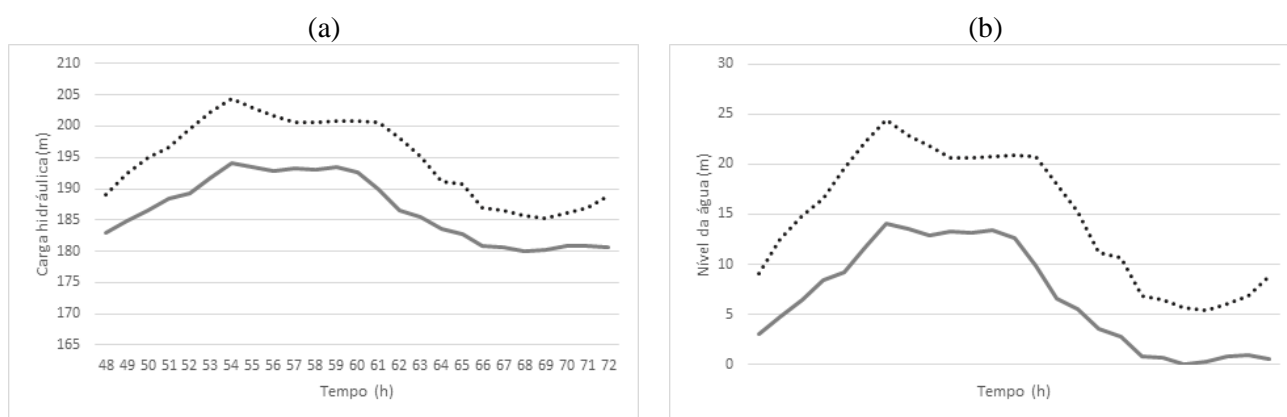


Figura 7– (a) Carga hidráulica e (b) Nível da água do RNV - Frente Pareto 11 – para solução de máxima confiabilidade (linha tracejada) e de mínima confiabilidade (linha contínua)

O nível de água no RNV para as soluções de máxima confiabilidade hidráulica permanecem acima das soluções de mínima confiabilidade e esse fator demonstra que a manutenção do nível mínimo de água no reservatório não aumenta a confiança do sistema e que a otimização hidráulica foi alcançada.

Com relação às rotações obtidas para as bombas pelo modelo de otimização, verifica-se que a variação de rotação é mantida dentro de um intervalo atingindo no máximo 1,5. Qualquer solução encontrada pelo modelo garante economia para a operação do sistema, ainda que a confiabilidade varie de acordo com os custos, sendo observada variação de até 77% entre confiabilidades mínima e máxima.



## 4 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo computacional multiobjetivo aplicado à otimização da operação de sistemas de distribuição de água, a fim de possibilitar a máxima eficiência energética e confiabilidade hidráulica, utilizando-se bombas de rotação variável. Com o objetivo de favorecer soluções não dominadas e, portanto, garantir distribuição de água de maneira adequada, foram utilizadas penalidades que restringiram soluções que apresentassem pressões negativas nos nós ou fechamento/desligamento de tubos e/ou bombas.

O modelo proposto consistiu na integração do algoritmo genético evolucionário multiobjetivo NSGA-II ao simulador hidráulico proposto por Coutinho e Soares (2017), ambos codificados na linguagem C++. A verificação do modelo proposto utilizou a rede hipotética de ANYTOWN, apresentada por Walski *et al.* (1987). A confiabilidade do sistema se mostrou adequada com a aplicação do índice de resiliência modificado de Todini (2000), visto que as regras operacionais definidas pelo modelo obedeceram às restrições impostas nas penalidades, a fim de garantir distribuição de água de forma adequada. As funções objetivo para minimização dos custos de energia elétrica e maximização da confiabilidade, em conjunto com as restrições impostas foram utilizadas de forma a validar o modelo desenvolvido.

Com a aplicação da penalidade que restringia tanto a pressão negativa nos nós quanto o fechamento e desligamento dos tubos e bombas, verificou-se a obtenção de resultados fidedignos para as otimizações propostas. Assim, os resultados demonstraram a validade do modelo proposto para otimização operacional de sistemas de distribuição de água, ficando a cargo do operador a escolha da solução que lhe for conveniente.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2014). *Banco de Informações de Geração*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 08 de agosto de 2017.
- COUTINHO, R.S. (2015). *Simulação computacional de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás.
- COUTINHO, R.S.; SOARES, A.K. “*Simulação de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET*”. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 4, 2017, p. 797-808.

- GIUSTOLISI, O.; LAUCELLI, D.; BERARDI, L. (2013). “Operational optimization: Water losses versus energy costs”. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 139, n. 4, p. 410-423.
- JOLLY, M. D.; LOTHES, A. D.; SEBASTIAN, B. L.; ORMSBEE, L. (2014). “Research database of water distribution system models”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, n. 4, p. 410-416.
- KUREK, W.; OSTFELD, A. (2014). “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.
- MONACHESI, M. G. (2005). *Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento*. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL.
- ROSSMAN, L.A. (2000). *EPANET 2 users manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- SIMPSON, A.R.; MARCHI, A. (2013). “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.
- SOUSA, A.C. (2013). *Otimização hidroenergética da operação de sistemas de distribuição de água*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Goiás.
- TODINI, E. (2000). “Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach”. *Urban water*, v. 2, n. 2, p. 115-122.
- WALSKI, T. M.; BRILL JR, E. D.; GESSLER, J.; GOULTER, I. C.; JEPSON, R. M.; LANSEY, K.; LEE, K. L.; LIEBMAN, J. C.; MAYS, L.; MORGAN, D. R.; ORMSBEE, L. (1987). “Battle of the network models: Epilogue”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 113, n. 2, p. 191-203.