

Modelo para otimização da operação de sistemas de distribuição de água utilizando o algoritmo genético multiobjetivo SPEA

Operational optimization of water distribution systems by using the SPEA multiobjective genetic algorithm

Anselmo Claudino de Sousa

Professor Assistente da Pontifícia Universidade Católica de Goiás - PUC GO.
Goiânia, GO [Brasil]

Alexandre Kepler Soares

Professor Adjunto da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás – UFG.
Goiânia, GO [Brasil]
aksoares@gmail.com

Resumo

A operação ótima de um sistema de distribuição de água consiste na determinação de regras operacionais que forneçam a maior eficiência hidroenergética do sistema. Neste trabalho, foram estudados três objetivos considerados mais promissores para análise dessa eficiência, os quais são representados por funções objetivo: (i) minimização de perdas por vazamentos de água, (ii) redução do custo de energia elétrica do volume bombeado, e (iii) maximização da confiabilidade do sistema em atender aos padrões de demanda. O modelo proposto foi construído mediante integração computacional do algoritmo evolucionário multiobjetivo SPEA e do simulador hidráulico EPANET 2. A aplicação do modelo mostrou-se promissora, pois os resultados obtidos demonstraram que podem ser produzidas estratégias operacionais que reduzem o custo de energia elétrica e a quantidade de vazamentos na rede de distribuição de água, e, ao mesmo tempo, não comprometem a confiabilidade desse sistema hídrico.

Palavras-chave: Algoritmo evolucionário. Eficiência hidroenergética. Otimização multiobjetivo. Rede de distribuição de água.

Abstract

The optimal operation of a water distribution system consists in determining operational rules that provide the highest hydropower efficiency of the system. In this paper we studied three objectives considered as the most promising for analysing this efficiency. They are represented by three objective functions: (i) minimization of leakage, (ii) minimization of pumping energy costs, and (iii) maximization of system reliability to meet demand patterns. The proposed model has been developed by means of computational integration of the SPEA multiobjective evolutionary algorithm and of the EPANET 2 hydraulic simulator. The application of the model to a hypothetical network has proven to be promising as it has yielded operational rules that could reduce energy costs as well as leakage in the water distribution network without compromising reliability.

Key words: Evolutionary algorithm. Hydropower efficiency. Multiobjective optimization. Water distribution network.

1 Introdução

Um sistema de distribuição de água é composto pelo conjunto de tubulações (adutoras, redes primária e secundária), estações elevatórias, reservatórios, válvulas de controle e hidrômetros. A finalidade principal desse sistema é atender as demandas de consumo de água requeridas pelos usuários.

Durante a operação do sistema de distribuição de água, duas preocupações chamam atenção dos operadores e estudiosos do assunto: (i) as perdas de água tratada durante a distribuição, e (ii) o custo de transporte, representado principalmente pelo consumo de energia elétrica.

Estima-se que entre 2% e 3% do consumo de energia elétrica do mundo ocorrem no tratamento e bombeamento de água até as residências urbanas. As estações elevatórias de água são responsáveis pela maior parcela do consumo desta energia. No Brasil, o setor de saneamento representa 3% do consumo total de energia elétrica (GOMES; CARVALHO, 2012). Calcula-se que um quarto dessa energia poderia ser economizado se as redes de abastecimento e os sistemas de bombeamento de água fossem mais eficientes (JAMES et al., 2002).

Apesar de já existir a algum tempo o conhecimento, mesmo que implícito, das relações do aumento do consumo de energia em decorrência dos vazamentos, perdas reais de água, uma contemplação direta da questão é aparentemente recente e escassa. As pesquisas relacionadas com vazamentos, tradicionalmente, têm focado: (i) na quantificação das perdas e na detecção de vazamentos (COLOMBO; KARNEY, 2005); (ii) na redução dos índices de perdas por vazamentos (STERLING; BARGIELA, 1984; GERMANOPOULOS; JOWITT, 1989; PUDAR; LIGGETT, 1992; TUCCIARELLI et al., 1999; MARTINEZ et al., 1999); e (iii) em outros aspectos com a finalidade de promover o uso otimizado de

energia elétrica (WALSKI et al., 1987; MACKLE et al., 1995, SAVIC et al., 1996; RIGHETTO, 2002; CARRIJO, 2004; IBÁÑEZ; LÓPEZ, 2005; MARTINEZ et al., 2007; BARDALES, 2007; MACHADO et al., 2008; ALRHHEH; MAHMOUD, 2009; CUNHA, 2010; COSTA, 2009; MOREIRA; RAMOS, 2013). Entretanto, abordagens que considerem simultaneamente os dois objetivos (reduzir vazamentos de água e consumo de energia) são pouco recorrentes (MONTENEGRO, 2009; CAMBOIM, 2012).

Neste artigo, visou-se a apresentar um modelo multiobjetivo para melhoria da operação de um sistema de distribuição de água com o intuito de alcançar a eficiência hidroenergética a partir da definição de regras operacionais adequadas para o funcionamento do conjunto de bombas existentes no sistema. No processo de otimização, são consideradas três funções objetivo: (i) minimização das perdas reais de vazamento de água; (ii) redução do consumo de energia elétrica; e (iii) maximização da confiabilidade do sistema.

2 Otimização da operação de sistemas de distribuição de água

A estrutura clássica dos modelos de otimização, conforme observado por Ormsbee e Lansey (1994) e descrito detalhadamente por Carrijo (2004), busca maximizar ou minimizar uma ou mais funções objetivo, sempre respeitando as restrições operacionais do sistema.

As funções objetivo representam uma forma de medir o desempenho do sistema e podem ser de minimização, como vazamento, consumo de energia, ou de maximização, como a confiabilidade do sistema. As variáveis de decisão definem de que modo o sistema será operado. Essa estrutura, de maneira geral, pode ser representada da seguinte forma:

- Função objetivo – exemplo: minimizar custos operacionais e vazamentos.
- Sujeito a: restrições hidráulicas do sistema; atendimento às demandas de água; pressões adequadas para atender às demandas de consumo.

Devido à quantidade de energia elétrica consumida pelas estações de bombeamento, os trabalhos de otimização visam a, prioritariamente, definir um plano estratégico do liga e desliga das bombas ao longo do dia (agendamento do bombeamento). Desde a década de 1980, são desenvolvidas pesquisas cujo objetivo é otimizar o consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, reduzir os custos desse insumo (WALSKI et al., 1987; MACKLE et al., 1995, SAVIC et al., 1996; CARRIJO, 2004; RIGHETTO, 2002; IBÁÑEZ-LÓPEZ, 2005; BARDALES, 2007; MACHADO et al., 2008; ALRHHEH; MAHMOUD, 2009; CUNHA, 2010; COSTA, 2009; MOREIRA; RAMOS, 2013).

Observa-se que a busca da operação ótima do sistema de distribuição de água é um problema bastante complexo por incluir um grande número de variáveis de decisão e muitas restrições impostas ao sistema. Para Machado et al. (2008), a complexidade dos problemas de otimização é aumentada pelo número de restrições e pela existência de objetivos conflitantes em toda a rede de distribuição de água. A principal variável de decisão nesse processo de busca da maneira ótima de operar o sistema é o número de bombas operando ao longo de um horizonte de planejamento.

Mackle et al. (1995) sugerem como método de otimização para sistemas que envolvam grande número de variáveis e parâmetros, tais como os de distribuição de água, a aplicação de algoritmos genéticos, pois esse tem diversas vantagens, são elas: eficiência e robustez; aplicação diversificada em problemas de engenharia; restrição às informações

da função objetivo, não necessitando de derivadas ou de outras informações e utilização de regras de transição probabilísticas e não determinísticas na identificação de soluções de alternativas.

Embora os algoritmos genéticos sejam capazes de promover a otimização de um sistema de distribuição de água, verifica-se que esse é um problema de múltiplos objetivos; portanto, requerem ferramentas que considerem tal aspecto.

Em uma abordagem tipo multiobjetivo, Savic et al. (1996) consideram os dois seguintes objetivos: minimizar os custos de energia elétrica e as interrupções das bombas. Para realizar a otimização de um sistema a partir desses objetivos, os autores introduziram os algoritmos evolucionários multiobjetivo, que usam o conceito de “Pareto-ótimo”, conforme sugerido por Goldberg (1989). Esse método consistiu em três etapas: (i) encontrar as soluções não dominadas; (ii) seleção das soluções não dominadas para compor o conjunto “Pareto-ótimo”; e (iii) a remoção das soluções não dominadas para formar o conjunto de soluções do problema. Os pesquisadores concluíram que os métodos multiobjetivos encontram as soluções ótimas com um esforço computacional reduzido.

A partir dos métodos multiobjetivo mencionados por Savic et al. (1996), Sotelo et al. (2001) apresentaram um trabalho utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo para resolver o problema de programação ideal de bombas. Os objetivos do processo de otimização eram diminuir o custo de energia elétrica, o de manutenção das bombas, a potência máxima e a variação do nível do reservatório. Sotelo et al. (2001), pela primeira vez, testaram seis algoritmos evolucionários multiobjetivos distintos e compararam por meio de métricas de desempenho o resultado de cada um dos algoritmos. Para os autores, o algoritmo Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) produziu as melhores soluções para o problema proposto.

Um modelo computacional direcionado ao controle operacional visando a obter custos mínimos de energia elétrica e maximização dos benefícios hidráulicos em sistemas de macro distribuição de água foi desenvolvido por Carrijo (2004). Nesse modelo, aplicado em uma rede em Goiânia, utiliza-se o simulador hidráulico EPANET e um algoritmo de aprendizado de máquina para extração das regras operacionais. Previamente, foram implementados três algoritmos evolucionários multiobjetivo, sendo um não elitista (Nondominate Sorting Genetic Algorithm – NSGA) e dois elitistas (Nondominate Sorting Genetic Algorithm II – NSGA II e Strength Pareto Evolutionary Algorithm – SPEA). A avaliação dos três algoritmos realizada por Carrijo (2004) indica que o SPEA apresenta um conjunto de soluções melhores distribuídas que o NSGA e o NSGA II, ou seja, há um número maior de soluções do SPEA que dominam as soluções dos demais. Outro fator que favorece o uso do SPEA é o tempo de processamento, que foi 30% menor que o gasto para os outros algoritmos testados.

3 Metodologia

Foi elaborado um modelo multiobjetivo para a otimização da operação do sistema de distribuição de água apresentado por Walski et al. (1987) denominado de ANYTOWN. O modelo desenvolvido tem a finalidade de obter regras operacionais adequadas para o funcionamento das bombas existentes no sistema. Tais regras devem promover a eficiência hidroenergética, compreendida como o sinergismo entre a eficiência hidráulica, que consiste na redução das perdas reais de água durante a distribuição; e na eficiência energética, que busca promover a redução do consumo e dos custos de energia elétrica.

Considerando a complexidade do sistema, foi elaborado um simulador hidráulico baseado na Toolkit EPANET2 (ROSSMAN, 2000). A Toolkit é uma biblioteca de vínculo dinâmico (DLL) que contém as funções que permitem o desenvolvimento de tarefas específicas contidas no EPANET. O simulador foi escrito na linguagem computacional C++, a qual permite manipular tais funções e é compilado no *software* Builder 6.

O simulador hidráulico realiza a avaliação do comportamento do sistema de distribuição de água, considerando o regime permanente. Além disso, realiza o cálculo das funções objetivo elencadas para ser otimizadas, o que é realizado via o algoritmo evolucionário multiobjetivo SPEA.

3.1 Algoritmo SPEA

O Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) é um algoritmo evolucionário multiobjetivo desenvolvido por Zitzler e Thiele (1998). Esse algoritmo, além de utilizar o conceito de Pareto-ótimo, usa técnicas elitistas para seleção das melhores soluções. O elitismo é considerado por meio de uma população externa em que são guardadas as soluções não dominadas encontradas ao longo do processo.

Existem várias similaridades entre o SPEA e os demais algoritmos evolucionários multiobjetivo, dentre as quais se destacam: a garantia de manter vetores representantes da frente não dominada entre as soluções consideradas e a utilização do conceito de dominância Pareto para atribuir valores de aptidão baseados nesses conceitos (CHEUNG, 2004; CARRIJO, 2004).

A descrição de cada uma das etapas de implementação do SPEA é descrito conforme Cheung (2004).

Etapa 1: geração da população inicial aleatória P_t considerando o parâmetro de entrada POP (dimensão da população).

Etapa 2: criação da população externa P_{te} vazia de dimensão POPE (dimensão da população externa – parâmetro de entrada).

Etapa 3: cada vetor solução pertence à população inicial P_t e é avaliado de acordo com as funções objetivo consideradas. Essa etapa é denominada avaliação das funções aptidão, considerando objetivos múltiplos.

Etapa 4: identificação das soluções não dominadas encontradas em P_t ; cópia das soluções não dominadas encontradas em P_t para a população P_{te} ; remoção das soluções não dominadas de P_t ; adequação do conjunto externo, conforme dimensão da população externa POPE, por meio do algoritmo de *cluster*. Esse algoritmo reduz a dimensão da população externa corrente ($POP_{corrente}$) para dimensão limite (POPE), fornecida nos dados de entrada (sendo $POP_{corrente} > POPE$). Assume-se inicialmente que cada solução i ($i \in P_t$) pertence a um *cluster* individual; portanto, existem $POP_{corrente}$ *clusters*.

Etapa 5: verificação do critério de convergência. Em geral, adota-se o número máximo de iterações para essa verificação. Se tal critério for satisfeito, o algoritmo segue para a etapa 11, e o processo é finalizado; caso contrário, o algoritmo segue para a etapa 6.

Etapa 6: o módulo de avaliação tem de atribuir valores de aptidão às soluções como forma de preparar para o operador seleção. No SPEA, esse procedimento é realizado em duas etapas, a saber: i) primeiro, todos os vetores solução i pertencentes à população externa (P_{te}) são classificados e recebem um valor de aptidão S_i denominado na literatura internacional de *strength* (força). Esse valor de aptidão,

para um dado vetor de solução i , é proporcional ao número de soluções dominadas pela solução i na população corrente; ii) calculam-se os valores de aptidão (F_j) de todas as soluções j pertencentes à população corrente (P_t). Esse valor de aptidão é calculado como sendo a soma de todos os valores de aptidão S_i das soluções externas i que dominam vetores j da população corrente.

Etapa 7: o SPEA realiza a seleção por torneio. Após todas as soluções, pertencentes aos conjuntos externo e corrente, terem recebido seus respectivos valores de aptidão (F), os conjuntos P_t e P_{te} são unidos para ser aplicado o operador de seleção. A seleção por torneio no SPEA é desenvolvida da seguinte forma: cria-se um conjunto temporário (P_{temp}) de dimensão $n_{população}$; selecionam-se aleatoriamente duas soluções (i e j) pertencentes ao conjunto unificado ($P_t \cup P_{te}$); se $F(i) < F(j)$, então, i é incluído em P_{temp} ; caso contrário, j é incluído em P_{temp} .

Etapa 8: é realizada a recombinação, similar aos algoritmos genéticos clássicos (GOLDBERG, 1989).

Etapa 9: o operador de mutação também faz parte do processo de variação e é responsável pela introdução de diversidade na população, que, muitas vezes, é perdida ao longo das iterações. Em geral, esse operador é aplicado como na estrutura dos algoritmos genéticos clássicos.

Etapa 10: uma nova população é formada devido à aplicação dos operadores de recombinação e mutação. Assim, é necessário que uma nova avaliação seja realizada para cada vetor

solução pertencente a essa nova população; portanto, volta-se à etapa 3.

Etapa 11: o algoritmo apresenta as melhores soluções ou Pareto-ótimo.

Para restringir o aumento exagerado de soluções não dominadas, Zitzler e Thiele (1998) propuseram uma técnica para reduzir as soluções, a qual é denominada *clustering algorithm*, ou algoritmo de agrupamento (*cluster*).

3.2 Funções objetivo

Para obter as regras operacionais ótimas que priorizem a eficiência hidroenergética, foram consideradas como variáveis de decisão o estado, ligado ou desligado, das bombas em cada hora, durante o período de planejamento de 24 horas. Assim, o vetor de uma solução (V_s) para o problema é representado por uma codificação binária (0 ou 1), o zero (0) representa a bomba desligada em um intervalo de tempo, e o um (1) representa a bomba ligada. Desta forma, o número de posições (genes) que um vetor solução contém corresponde ao número de bombas existentes na rede multiplicado pelo número de horas no período de planejamento. Considerou-se o período de planejamento igual a 24 horas. O vetor solução (V_s) é representado pela seguinte estrutura:

$$V_s = [\underbrace{B1_{(0/1)}, B2_{(0/1)}, \dots, Bn_{(0/1)}}_{\text{Hora 0}}, \underbrace{B1_{(0/1)}, B2_{(0/1)}, \dots, Bn_{(0/1)}}_{\text{Hora 1}}; \dots; \underbrace{B1_{(0/1)}, B2_{(0/1)}, \dots, Bn_{(0/1)}}_{\text{Hora 23}}]$$

sendo V_s = vetor solução; B_n = número da bomba; (0/1) = estado da bomba (desligada = 0 e ligada = 1).

Os objetivos para garantir a eficiência hidroenergética são: (i) minimizar o volume de vazamento na rede de distribuição; (ii) reduzir o custo

de energia elétrica durante a operação do sistema; (iii) maximizar a confiabilidade em atender as demandas de vazão e pressão dos usuários.

Para representar os vazamentos nos nós (q_n), adotou-se o a equação implementada no EPANET (ROSSMAN, 2000), em que as perdas reais são modeladas pela equação 1, baseada na equação de orifício, e que considera dois parâmetros: coeficiente emissor (CE) e o expoente de vazamento (α).

$$q_n = CE.H^\alpha \tag{1}$$

sendo q_n = vazamento (L/s) no nó n ; CE = coeficiente emissor; H = carga de pressão (mca); α = expoente de vazamento.

A função objetivo $FO1$ tem o objetivo de alcançar a eficiência hidráulica da rede, buscando o mínimo valor dos vazamentos, os quais são quantificados pela soma das perdas que ocorrem em todos os nós durante as 24 horas de simulações.

$$FO_1 = \min[f_1] \tag{2}$$

$$f_1 = \sum_{t=1}^{24} \sum_1^n q_n(t) \tag{3}$$

sendo n = número de nós e t = tempo (horas).

O custo de energia elétrica depende da potência consumida por cada bomba e do preço da tarifa. No Brasil, foi estabelecida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) uma estrutura tarifária bastante complexa que faz distinção do tipo de consumidor, do período do ano e do dia, dentre outros aspectos para definir a tarifa de energia elétrica. Nesta classificação, os sistemas de abastecimento de água são considerados Serviços Públicos e, normalmente, seguem uma estrutura de tarifa horo-sazonal. Assim, o custo

da energia é calculado em função da demanda de potência contratada e do consumo ao longo do dia. Considerando a estrutura tarifária horo-sazonal, o custo de energia elétrica para operação de 24 horas da rede de distribuição de água é calculada por:

$$C_{FE} = \sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{b=1}^{nb} \frac{\gamma \cdot Q_b \cdot H_b}{\eta_b} \cdot TC_t + \frac{TD \cdot D_C}{30} + TU_t \cdot (D_{max} - D_C) \right) \quad (4)$$

sendo C_{FE} = custo total do fornecimento de energia elétrica (R\$); Q_b = vazão bombeada (m^3/s); H_b = carga hidráulica de bombeamento (mca); η_b = eficiência do conjunto motor bomba; γ = peso específico da água (N/m^3); nb = número de bombas funcionando na estação elevatória; TC_t = tarifa unitária de consumo de energia no período de uma hora (R\$/kWh); TD = tarifa de demanda de potência contratada (R\$/kW); D_C = demanda máxima de potência contratada (kW); TU = tarifa de ultrapassagem da demanda de potência contratada (R\$/kW); D_{max} = demanda máxima de potência consumida (kW).

A função objetivo $FO2$ visa a maximizar a eficiência energética mediante a redução do consumo e dos custos de fornecimento de energia elétrica.

$$FO_2 = \min[f_2] \quad (5)$$

$$f_2 = C_{FE} \quad (6)$$

Para realizar as simulações do custo de energia elétrica, adotou-se uma estrutura tarifária horo-sazonal verde, em que os custos da tarifa são apresentados na Tabela 1. Ressalta-se que cada companhia de energia elétrica define os valores de suas tarifas e, portanto, para aplicação em sis-

temas de abastecimento de água reais, devem-se consultar os valores dessas tarifas.

Tabela 1: Valores de tarifa para uma estrutura horo-sazonal verde

Tarifa horo-sazonal		
Consumo	Fora de pico (R\$/kWh)	Pico (R\$/kWh)
	0,13427	0,65511
Demanda	5,12 (R\$/kW)	
Demanda de ultrapassagem	10,24 (R\$/kW)	

A resiliência foi elencada para representar a confiabilidade da rede, pois, conforme aponta Formiga (2005), a base central desse conceito definido por Todini (2000) é a capacidade do sistema em atender às demandas dos consumidores. Além disso, Cheung (2004) aponta que a formulação da confiabilidade por meio da resiliência possui grande facilidade computacional para o seu cálculo.

$$R_t = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i (H_i - H_{des})}{\sum_{k=1}^{nt} Q_k \cdot H_k - \sum_{i=1}^m Q_i \cdot H_{des}} \quad (7)$$

sendo R_t = índice de confiabilidade (resiliência) para a hora t ; nn = número total de nós; Q_i = demanda abastecida no nó i (L/s); H_i = carga de pressão fornecida ao nó i (mca); H_{des} = carga de pressão desejada para que a demanda seja totalmente abastecida (mca); nt = número de reservatórios; Q_k = vazão abastecida pelo reservatório k (L/s); H_k = carga de pressão fornecida pelo reservatório k (mca).

A função objetivo $FO3$ busca garantir o atendimento das demandas de acordo com as pressões requeridas nos nós de consumo por meio da maximização da resiliência. A resiliência é determinada pelo somatório do valor dessa medida em cada hora de simulação.

$$FO_3 = \max[f_3] \quad (8)$$

$$f_3 = \sum_{t=1}^{24} R_t \quad (9)$$

O modelo computacional desenvolvido com a finalidade de promover a eficiência hidroenergética do sistema de distribuição de água, apresentado neste artigo, consiste na integração dos algoritmos evolucionários multiobjetivos SPEA com o simulador hidráulico EPANET, ambos codificados na linguagem C++. Os parâmetros e operadores genéticos utilizados no módulo de otimização foram: recombinação linear; mutação aleatória; tamanho da população = 100; número de gerações = 1000; probabilidade de recombinação = 0,9; probabilidade de mutação = 0,1.

4 Resultados

Com vistas às análises do modelo proposto, empregou-se a rede hipotética ANYTOWN utilizada na “Batalha dos Modelos de Rede”, evento que consistiu em uma série de sessões realizadas em uma conferência na cidade de Nova Iorque no ano de 1985. Uma das soluções referidas por Walski et al. (1987) foi a mesma apresentada por Gessler (1985) e conta com três reservatórios (*tanks*), 19 nós com demanda, três bombas ligadas em paralelo e 45 tubos (Figura 1). A demanda de consumo de água nos nós, considerada neste trabalho, foi a projetada para o ano de 2005 (WALSKI et al., 1987). Para tornar a rede mais próxima da realidade brasileira, em que a distribuição de água é, geralmente, feita por gravidade, foi adicionado um reservatório a montante da rede de distribuição (*tank* 10). O reservatório de montante fornece toda a água à rede de distribuição. A definição

do volume desse reservatório foi determinada de acordo com a curva de consumo. A capacidade total de reservação, considerando o reservatório de montante e os de posição intermediária, totaliza 20% do volume total distribuído diariamente.

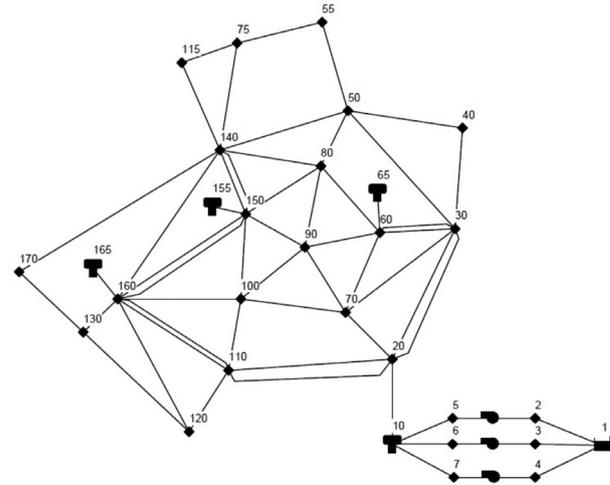


Figura 1: Rede de distribuição de água ANYTOWN

Fonte: Adaptado de Walski et al. (1987).

A rede dispõe de três bombas em paralelo, todas elas com as mesmas características de bombeamento e rendimento, conforme apresentado na Figura 2.

Para realizar as simulações, considerou-se que a rede ANYTOWN tem 10% do vazão total distribuído correspondente a vazamentos, quando é operada na condição em que todas as bombas estão ligadas (extrema). Assim, a perda por vazamento total diária é igual a 1665,36 L/s. O custo de energia elétrica é de R\$ 4.335,16, e a função de confiabilidade igual a 14,9149.

Com a realização das simulações do modelo de otimização, foi gerado um conjunto de soluções (Figura 3). As soluções encontradas podem ser adotadas para a definição de regras operacionais do sistema de distribuição de água.

Cada ponto dos gráficos da Figura 3 representa uma solução não dominada, que pode ser transformada em uma regra operacional para

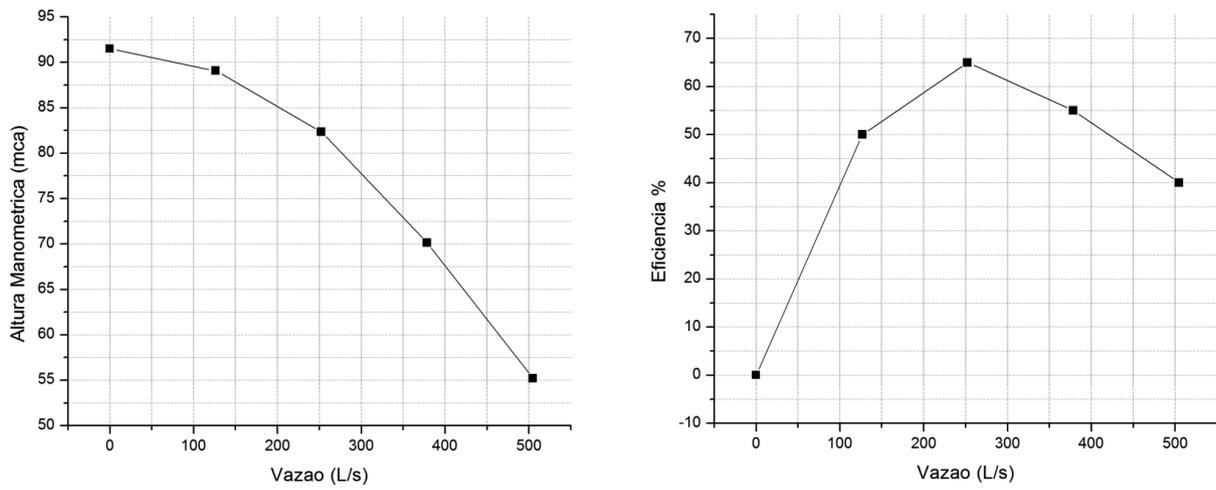


Figura 2: Curvas características das bombas

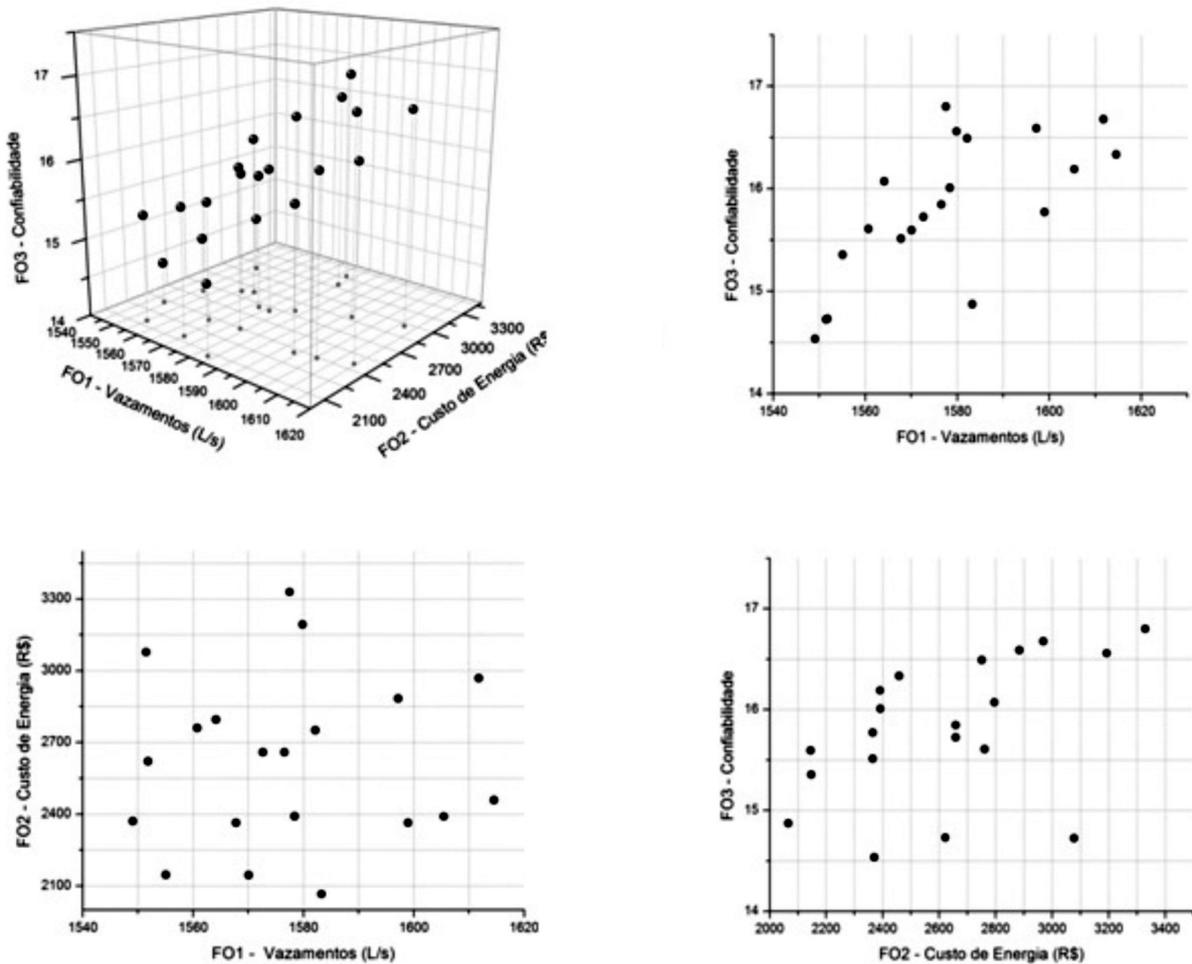


Figura 3: Projeção gráfica do conjunto de soluções não dominadas

operação do sistema durante as 24 horas. As 20 soluções não dominadas permitem que o responsável pela operação do sistema de abastecimento de água possa, de acordo com objetivos pré-estabelecidos, selecionar qual é a melhor estratégia a ser adotada, visando ao atendimento das demandas de água com o menor custo de energia elétrica e de ocorrência de vazamentos.

Para exemplificar uma regra operacional e demonstrar o detalhamento do funcionamento das três bombas (B1, B2, B3) durante 24 horas, foi selecionada a solução que tem maior confiabilidade (Tabela 2), conforme mostrado na Figura 4.

Tabela 2: Valores das funções objetivo para as soluções não dominadas

Soluções Ótimas		
FO1	FO2	FO3
1551,48	3077,53	147,248
1577,50	3329,02	168,014
1576,56	2658,78	158,452
1555,08	2147,25	153,539
1570,07	2145,11	155,958
1567,78	2364,65	155,127
1605,43	2390,95	161,896
1582,16	2750,89	164,897
1579,84	3193,11	165,584
1583,26	2066,41	148,734
1611,76	2968,84	166,772
1597,17	2883,65	165,885
1551,83	2621,86	147,292
1614,55	2458,80	163,317
1549,07	2370,69	145,346
1578,41	2391,83	16,009
1572,64	2658,78	157,247
1564,14	2795,31	160,711
1598,96	2364,34	157,732
1560,73	2760,79	156,079

Verifica-se que essa solução promoveu redução de 5% dos vazamentos, 23,2% dos custos de energia elétrica e aumento de 12% da confiabilidade do sistema em relação à regra operacional, na qual todas as bombas são mantidas ligadas.

5 Conclusão

O modelo de otimização multiobjetivo apresentado tem a finalidade de alcançar a eficiência hidroenergética de um sistema de abastecimento de água por intermédio de três funções objetivo: (i) minimizar os vazamentos na rede de distribuição de água; (ii) minimizar o custo total de energia elétrica; e (iii) maximizar a confiabilidade do sistema. Observa-se que, na literatura, a contemplação desses três objetivos em um único modelo é restrita.

A construção do modelo foi realizada por meio da integração do algoritmo genético multiobjetivo SPEA com um simulador hidráulico elaborado a partir das funções da Toolkit do EPANET2.

Os resultados da aplicação do modelo para rede hipotética ANYTOWN demonstraram a eficiência do modelo ao gerar 20 soluções não dominadas que podem ser adotadas como regras operacionais do sistema. Considerando a maior confiabilidade de abastecimento de água, a melhor solução promoveu redução de 5% nas perdas por vazamento, e 23,2% dos custos de energia elétrica consumida, além do aumento da confiabilidade do sistema em 12%.

	Horas																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
B1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
B2	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1
B3	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0

Figura 4: Regra operacional para solução com maior confiabilidade

Agradecimentos

Os autores agradecem 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).

Referências

- ALRHHEH, M.; MAHMOUD, H. Using genetic algorithms in pump scheduling to reduce the pumping cost. *Damascus University Journal*, v. 25, n. 2, 2009.
- BARDALES, K. L. N. *Otimização da operação de um sistema adutor de água tratada utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo*. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais)–Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul, 2007.
- CAMBOIM, W. L. L. *Aplicações de técnicas de controle Fuzzy em sistemas de abastecimento de água visando melhoria no rendimento energético e hidráulico*. 2012. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)–Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Paraíba, 2012.
- CARRIJO, I. B. *Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina*. 2004. 217 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- CHEUNG, P. B. *Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo*. 2004. 268 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- COLOMBO, A. F.; KARNEY, B. W. Impacts of leaks on energy consumption in pumped systems with storage. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 131, n. 2, 2005.
- COSTA, A. I. F. L. V. *Eficiência econômica na operação de estações elevatórias de abastecimento de água*. 2009. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente)–Universidade de Porto, Portugal, 2009.
- CUNHA, A. A. R. *Otimização energética em tempo real da operação de sistemas de abastecimento de água*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)–Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010.
- FORMIGA, K. T. M. *Otimização multiobjetivo de projetos de redes de distribuição de água*. 2005. 305 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- GERMANOPOULOS, G.; JOWITT, P. W. Leakage Reduction by Excess Pressure Minimization in a Water Supply Network. *Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2* (June), n. 87, p. 195-214, 1989.
- GESSLER, J. *Pipe network optimization by enumeration*. Computer applications in water resources, H. C. Torno, Ed., ASCE, New York, N.Y., p. 572-581, 1985.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Massachusetts: Addison-Wesley, Reading, 1989.
- GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. (Org.). *Manual de sistemas de bombeamento – eficiência energética*. Manual do Usuário. Procel Sanear. João Pessoa: Universitária/UFPB, 2012.
- IBÁÑEZ, M.; LÓPEZ, P. D. P. Multi-objective pump scheduling optimization using evolutionary strategies. In: IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2005. *Anais...* Edinburgh, UK: IEEE, 2005. v. 1, p. 435-442.
- JAMES, K.; CAMPBELL, S. L.; GODLOVE, C. E. *Água e energia: aproveitando as oportunidades de eficiência de água e energia não exploradas nos sistemas municipais*. Alliance – Aliança para Conservação de Energia. Washington, USA, 2002.
- MACHADO, E. C. M. N. et al. Operação multi-objetivo de sistemas de abastecimento de água: algoritmo genético. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA. 8., 2008. Lisboa. *Anais...* Lisboa, Portugal: SEREA, 2008.
- MACKLE, G.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply. In: CONFERENCE PUBLICATION 4/4, 1995, London. *Anais...* London, UK: Institute of Electrical Engineers, 1995. p. 400-405.
- MARTINEZ, F.; CONEJOS, P.; VERCHER, J. Developing an integrated model for water distribution systems considering both distributed leakage and pressure-dependent demands. In: ASCE WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT DIVISION CONFERENCE, 26., 1999 Tempe. *Anais...* Tempe, Arizona: ASCE, 1999.

MARTINEZ, F. et al. Optimizing of the operation of the Valencia water-distribution network. *Journal of Hydroinformatics*, v. 9, n. 1, p. 65-78.2, 2007.

MONTENEGRO, L. L. B. Eficiência Hidráulica e energética da operação do bombeamento para o abastecimento do bairro de Mangabeira em João Pessoa. 2009, 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental)–Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Paraíba, 2009.

MOREIRA, D. F.; RAMOS, H. Energy cost optimization in a water supply system case study. *Hindawi Publishing Corporation, Journal of Energy*, 2013.

ORMSBEE, L. E.; LANSEY, K. E. Optimal control of water supply pumping systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 2, p. 237-252, 1994.

PUDAR, R. S.; LIGGETT, J. A. Optimization of looped water distribution systems. *Journal of the Hydraulic Division*, v. 103, n. HY3, p. 281-294, 1992.

RIGHETTO, A. M. Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água. In: SEMINÁRIO – PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: O ESTADO DA ARTE E QUESTÕES AVANÇADAS, 2002, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa, PB: UFPB, 2002.

ROSSMAN, L. *EPANET 2 users manual*. Cincinnati, Ohio: U. S. Environmental Protection Agency, 2000.

SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A.; SCHWAB, M. *Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply*. Report No 92/02, University of Exeter, 1996.

SOTELO, A. et al. Algoritmos evolutivos multiobjetivos combinados para la optimación de la programación de bombeo em sistemas de suministro de agua. In: JORNADAS DE INFORMÁTICA Y TELECOMUNICACIONES – CONFERENCIA DE INFORMÁTICA Y TECNOLOGÍA APLICADA (JIT-CITA 2001). Asunción-Paraguay: JIT-CITA, 2001.

STERLING, M. J.; BARGIELA, A. Minimum-norm state estimation for computer control of water distribution systems. In: IEEE, 1984. *Anais... IET*, 1984. Part D, v. 131, p. 57-63.

TODINI, E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, v. 2, n. 3, p. 115-122, 2000.

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, 277-285, 1999.

WALSKI, T.M. et al. Battle of networks models: epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.113, n. 2, 1987.

ZITZLER, E.; THIELE, L. *An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the strength Pareto approach*. Technical Report 43. Computer Engineering and Communication Networks Laboratory. Zürich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 1998.

Recebido em 24 set. 2014 / aprovado em 31 out. 2014

Para referenciar este texto

SOUSA, A. C.; SOARES, A. K. Modelo para otimização da operação de sistemas de distribuição de água utilizando o algoritmo genético multiobjetivo SPEA. *Exacta – EP*, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 313-324, 2014.