



XII SIBESA

XII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental  
2014



## XI-021 – OTIMIZAÇÃO HIDROENERGÉTICA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO NSGAII

**Anselmo Cláudio de Sousa<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás e Tecnólogo em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Mestre em Engenharia do Meio Ambiente pela Universidade Federal de Goiás (UFG). Técnico Ambiental do Ministério Público Estadual de Goiás.

**Alexandre Kepler Soares**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua c 175, quadra 422, lote 10, Jardim América - Goiânia - GO - CEP: 74250-290 - Brasil - Tel: (62) 8501-5546 - e-mail: anselmosc@gmail.com

### RESUMO

É imprescindível que os sistemas de abastecimento de água sejam operados de maneira eficaz e com o menor custo. Uma das maneiras para se alcançar a eficiência da operação desses sistemas é por meio da definição de políticas operacionais ótimas. É proposto, neste trabalho, um algoritmo para promover a otimização hidroenergética de sistemas de distribuição de água. Para isso, foram estudados três objetivos considerados mais promissores para análise da eficiência, os quais são representados por funções objetivo de minimização do custo de energia elétrica, da redução do volume de perdas por vazamentos, e da maximização da confiabilidade do sistema em atender aos padrões de demanda e pressão dos usuários. O modelo proposto foi construído mediante integração computacional do algoritmo evolucionário *Nondominate Sorting Genetic Algorithm II* (NSGAII) e do simulador hidráulico EPANET 2. Assim, foi elaborado um modelo computacional capaz de definir políticas operacionais para o funcionamento horário das bombas existentes no sistema. Para validar a aplicação do modelo, foi utilizada a rede hipotética ANYTOWN com adaptações. A aplicação do modelo mostrou-se promissora, uma vez que os resultados apresentados ao final das simulações computacionais demonstraram que podem ser produzidas políticas operacionais que reduzem o custo de energia elétrica, a quantidade de vazamentos na rede de distribuição de água e ao mesmo tempo contribuir para o aumento da confiabilidade do sistema de distribuição de água.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência Hidroenergética, Otimização Multiobjetivo, Algoritmo Evolucionário, Rede de Distribuição de Água.

### INTRODUÇÃO

A operação de um sistema de distribuição de água é muito complexa devido ao grande número de variáveis e restrições incluídas no sistema. Conforme a descrição apresentada por Carrijo (2004), a operação desse sistema consiste da sequência de manobras que devem ser exercidas sobre os elementos ativos do sistema, como válvulas e bombas, sempre visando o atendimento aos requisitos de consumo e demandas ao longo da rede de distribuição de água.

Durante a operação desses sistemas ocorrem perdas de água que potencializam as pressões sobre os recursos hídricos, diminuem a confiabilidade do sistema e aumentam o consumo de energia elétrica. De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS, 2012), o valor médio das perdas na distribuição de água corresponde a 41,6% da água fornecida, sendo que o maior índice de perdas em todo o sistema de abastecimento de água encontra-se concentrado nas redes de distribuição de água.

Em decorrência das perdas existentes durante a distribuição, que podem ser representadas principalmente pelos vazamentos, ocorre o aumento no consumo de energia elétrica, a qual é utilizada para garantir o abastecimento de água em quantidade e pressão conforme demanda nos pontos de consumo.

Devido à quantidade de energia elétrica consumida pelas estações de bombeamento dos sistemas de distribuição de água, os trabalhos de otimização visam prioritariamente definir uma política ótima, ou seja, 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, consequentemente, reduzir os custos desse insumo (WALSKI *et al.*, 1987; MACKLE *et al.*, 1995; SAVIC *et al.*, 1996; CARRIJO, 2004; RIGHETTO, 2002; IBÁÑEZ e LÓPEZ, 2005; BARDALES, 2007; MACHADO *et al.*, 2008; ALRHHEH e MAHMOUD, 2009; CUNHA, 2009; COSTA, 2009; MOREIRA e RAMOS, 2013).

Uma vez que tanto o aumento de custo de produção de água potável, no qual está incluso o consumo de energia elétrica, quanto as perdas de água potável, são diretamente relacionadas aos vazamentos que ocorrem durante a distribuição, faz-se necessário investir na eficiência hidroenergética dos sistemas de distribuição, visando a melhoria do abastecimento de água e a diminuição das pressões socioeconômicas sobre os recursos naturais.

A otimização hidroenergética é representada por políticas operacionais que são capazes de simultaneamente maximizar a conservação de água e de energia elétrica durante a distribuição até os consumidores. A elaboração de modelos de otimização que possam relacionar a conservação de água e a eficiência energética oferece uma nova ferramenta para diminuição dos custos do abastecimento público de água.

Este artigo foca exatamente na otimização hidroenergética por meio da minimização do consumo de energia elétrica, minimização dos vazamentos e maximização da confiabilidade do sistema. Aqui é apresentado um modelo computacional capaz de promover a otimização hidroenergética de rede de distribuição de água a partir da redução do consumo de energia elétrica e controle dos vazamentos existentes durante a distribuição em decorrência da pressão excessiva. O modelo é implementado a partir de uma rotina computacional na linguagem C++, com uma interface entre o simulador hidráulico EPANET 2 (ROSSMAN, 2000) e o algoritmo evolucionário “Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II” – NSGAII.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As técnicas de otimização para operação do sistema de distribuição de água permitem que haja reduções significativas em custos de operação sem fazer alterações físicas nos elementos básicos de um sistema (SAVIC *et al.*, 1996). Muitas técnicas de otimização foram desenvolvidas visando delimitar a operação ótima de determinado sistema de distribuição de água. Verifica-se que os métodos de otimização evoluíram de técnicas matemáticas (programação linear, não linear, dinâmica, dentre outras) para as técnicas heurísticas (algoritmos genéticos, evolucionários, lógica fuzzy, dentre outras). Com o desenvolvimento da informática, inclusive o fácil acesso a hardware e software, atualmente há um predomínio das técnicas heurísticas, com destaque para os algoritmos evolucionários.

Um modelo computacional direcionado ao controle operacional ótimo visando obter custos mínimos de energia elétrica e a maximização dos benefícios hidráulicos em sistemas de macro distribuição de água foi desenvolvido por Carrijo (2004). O modelo utiliza o simulador hidráulico EPANET e um algoritmo de aprendizado de máquina para extração das regras operacionais. O modelo foi aplicado ao sistema macro de distribuição de água de Goiânia. 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). Formiga (2005), lidando com problema multiobjetivo para otimizar projetos de rede de distribuição de água, testou os dois algoritmos elitistas NSGAII e SPEA, e concluiu que o NSGAII apresentou as melhores soluções em detrimento ao SPEA.

Neste trabalho, foi elaborado um modelo multiobjetivo para a otimização da operação de sistemas de distribuição de água. O modelo desenvolvido tem a finalidade de obter políticas operacionais adequadas para o funcionamento das bombas existentes no sistema. Tais comandos operacionais devem promover a eficiência hidroenergética, compreendida como o sinergismo entre a eficiência hidráulica, que consiste da redução das perdas reais de água durante a distribuição, e a 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 EPANET 2* (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 codificado na linguagem computacional C++, onde é possível manipular tais funções e é compilado no software Builder 6. O simulador hidráulico realiza as simulações do comportamento do sistema de distribuição de água considerando o regime permanente. Além disso, realiza o cálculo das funções objetivo elencadas para serem otimizadas. A otimização do problema é realizada via algoritmo evolucionário multiobjetivo NSGAII.

O algoritmo evolucionário multiobjetivo NSGA II foi elaborado por Deb *et al.* (2000). Embora o NSGA II empregue alguns conceitos do método NSGA (SRINIVAS e DEB, 1994), ele emprega o conceito de elitismo, preservando as melhores soluções (frentes não dominadas). O processo do NSGA II inicia através de uma população inicial aleatória P0 de dimensão POP. A partir desse conjunto inicial, obtém-se uma população derivada Q0 de dimensão POP denominada população filha, utilizando operadores de seleção, recombinação e mutação. Esses dois conjuntos são unidos e formam um conjunto R0 de dimensão 2POP. A partir desse passo, inicia-se o processo de classificação não dominada e formação da nova população Pt. Essa nova população é preenchida com soluções de diversas frentes não dominadas, que garante a diversidade da população.

Para obter as políticas operacionais ótimas que priorizem a eficiência hidroenergética, foram consideradas como variáveis de decisão o estado (*status*), ligado ou desligado, das bombas em cada hora, durante o período de planejamento de 24 horas. Assim, o vetor de uma solução (Vs) para o problema é representado por uma codificação binária (0 ou 1). O zero (0) representa a bomba que está desligada em um intervalo de tempo, enquanto que (1) representa a bomba que está ligada. Desta forma, o número de indivíduos que um vetor solução contém corresponde ao número de bombas existentes na rede multiplicado pelo número de horas do período de planejamento. Neste trabalho, considera-se o período de planejamento igual a 24 horas. O vetor solução (Vs) é representado pela seguinte estrutura:

$$V_s = [ B_{1(0/1)}, B_{2(0/1)}, \dots, B_{n(0/1)}; B_{1(0/1)}, B_{2(0/1)}, \dots, B_{n(0/1)}; \dots; B_{1(0/1)}, B_{2(0/1)}, \dots, B_{n(0/1)} ]$$

↓                    ↓                    ↓  
 Hora 0              Hora 1              ...              Hora 23

sendo Vs = vetor solução; B = número de bomba; (0/1) = estado da bomba (desligada/ligada).

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; e (iii) Maximizar a confiabilidade em atender as demandas de vazão e pressão dos usuários.

Para representar os vazamentos nos nós ( $q_n$ ), adotou-se a equação implementada no EPANET 2 (ROSSMAN, 2000), onde as perdas reais são modeladas pela equação de orifícios, que considera dois parâmetros: coeficiente emissor (CE) e o expoente de vazamento ( $\alpha$ ).

$$q_n = CE \times H^\alpha \quad \text{Equação (1)}$$

sendo  $q_n$  = vazamento (L/s); CE = coeficiente emissor; H = carga de pressão (mca);  $\alpha$  = 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 nos nós durante as 24 horas de simulações.

$$FO_1 = \min [f_1] \quad \text{Equação (2)}$$

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

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 que faz distinção do tipo de consumidor, do período do ano e do dia, dentre outros aspectos para definir a tarifa de energia elétrica.

Os sistemas de abastecimento de água são classificados como Serviços Públicos e normalmente seguem uma estrutura de tarifa horo-sazonal. Nesse sistema, o custo da energia é calculado em função da demanda de potência contratada e do consumo ao longo do dia. A demanda de potência corresponde ao valor contratado e é faturada durante o período normal de 30 dias. 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:

$$C_{FE} = \sum_{b=1}^{nb} \frac{Q_b \times H_b \times \gamma}{\eta_b} \times TC_t + \frac{TD \times Dc}{30} + TUt \times (Dmax - Dc)$$

Equação (4)

sendo  $C_{FE}$  = custo total do fornecimento de energia elétrica;  $Q_b$  = vazão bombeada ( $m^3/s$ );  $H_b$  = altura manométrica de bombeamento (m);  $\eta_b$  = eficiência do conjunto motor bomba (%);  $\gamma$  = 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);  $Dc$  = demanda máxima de potência contratada (kW);  $TUt$  = tarifa de ultrapassagem da demanda de potência contratada (R\$/kW);  $Dmax$  = demanda máxima de potência consumida (kW).

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

$$FO_2 = \min [f_2]$$

Equação (5)

$$f_2 = \sum_{t=1}^{24} C_{FE}$$

Equação (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 sistemas de abastecimento de água reais, deve-se consultar os valores dessas tarifas.

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

Horo-sazonal Verde		
Consumo	Fora de Pico (R\$/kWh)	Pico (R\$/kWh)
	0.13427	0,65511
Demandas		5.12 (R\$/KW)
Demandas 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 através da resiliência possui grande facilidade computacional para o seu cálculo.

$$R = \sum_{t=1}^{24} \frac{\sum_{i=1}^{nn} Q_i \times (H_i - H_{des})}{\sum_{t=1}^{nt} Q_t \times H_t - \sum_{i=1}^{nn} Q_i \times H_{des}}$$

Equação (7)

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

$$FO_3 = \min [f_3]$$

Equação (8)

$$f_3 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{24} R$$

Equação (9)

O modelo computacional desenvolvido com a finalidade de promover a eficiência hidroenergética do sistema de distribuição de água, apresentado neste artigo, consiste da integração do algoritmo evolucionário multiobjetivo NSGAII com o simulador hidráulico EPANET, ambos codificados na linguagem C++. Neste trabalho, 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.

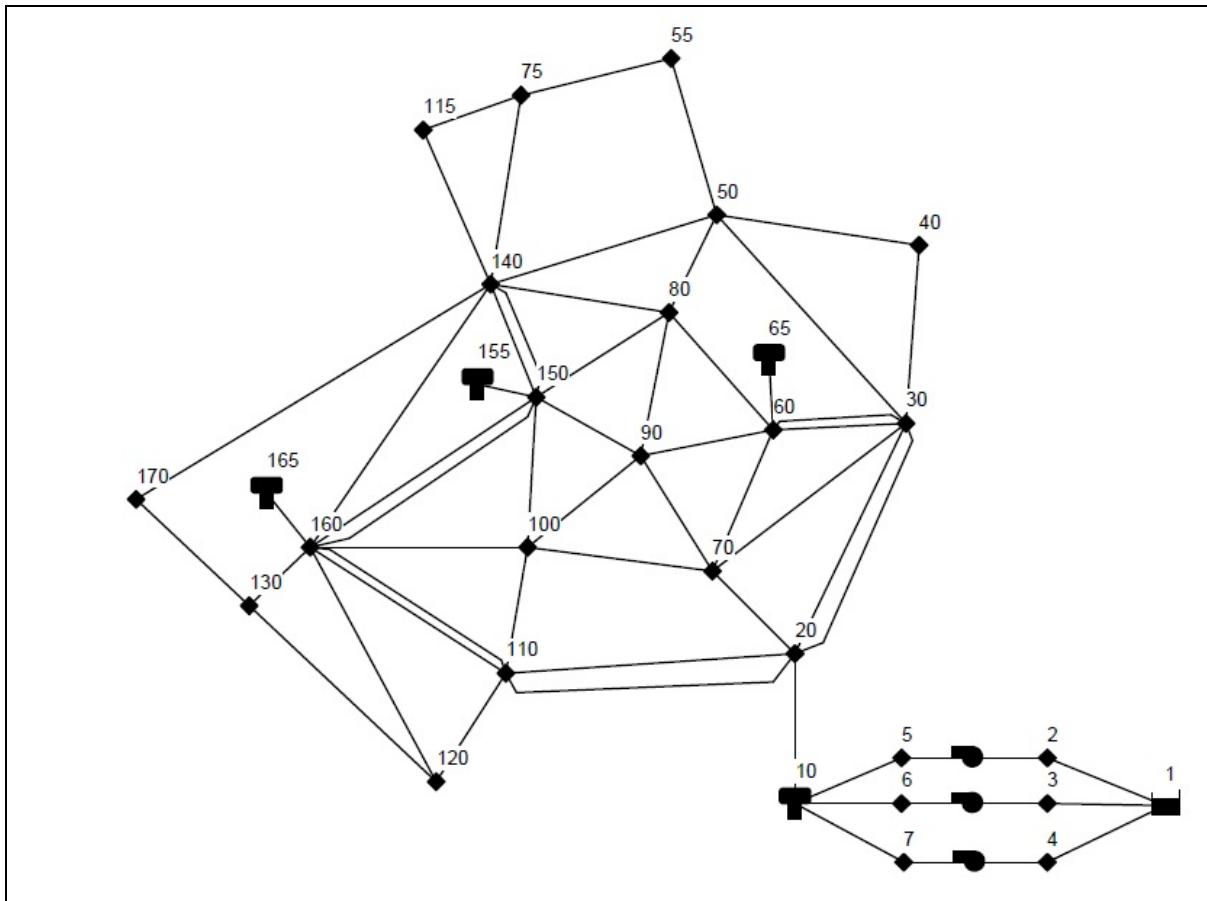
O sistema de distribuição de água utilizado para implementar o modelo é a rede de distribuição apresentada por (WALSKI *et al.*, 1987) (Figura 1). A escolha dessa rede foi em virtude de ser uma rede dimensionada a partir de modelos de otimização de projetos, visando obter o menor custo de implantação e operação. Assim, será possível demonstrar a importância da busca de soluções ótimas durante a operação de um sistema de distribuição de água, mesmo que esse já tenha sido concebido a partir de modelos visando encontrar o menor custo e consumo de energia durante sua operação. Para esta pesquisa, será adotada a topologia da rede definida na “Batalha dos Modelos de Rede” (WALSKI *et al.*, 1987) por meio do modelo de otimização de Gessler (1985). A escolha da solução proposta por Gessler foi determinada pelo fato dessa mesma topologia ter sido adotada por Colombo e Karney (2005), onde os autores demonstram a relação entre vazamentos e consumo de energia.

A rede ANYTOWN é composta por 40 tubulações, a maioria dos tubos é de ferro fundido velho, com coeficiente de rugosidade definido pela fórmula de Hazen-Williams. A rede conta também com três reservatórios (*tanks*), 19 nós com demanda pré definida e ainda com três bombas ligadas em paralelo; a demanda de consumo considerada foi a do ano de 2005 (WALSKI *et al.*, 1987).

Para tornar a rede mais próxima da realidade brasileira, onde a distribuição de água é geralmente realizada 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, conforme apresentado por Tsutiya (2006). A capacidade total de reservação, considerando o reservatório de montante e os de posição intermediária, totaliza 20% do volume total distribuído diariamente. A rede dispõe de três bombas em paralelo, todas elas com as mesmas características de bombeamento e rendimento.

O resultado da otimização com o referido algoritmo é um conjunto de soluções, representado em uma frente Pareto. Para definir as regras operacionais, tais soluções foram avaliadas e ordenadas. Para realizar essa avaliação foi utilizado o método PROMETHEE II (*Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations*). O PROMETHEE foi proposto por Brans e Vincke no ano de 1985, e estabelece uma estrutura de hierarquia ou preferências entre as alternativas, tentando também considerar conceitos que procuram dar alguma interpretação lógica que torne mais fácil o entendimento pelo operador do sistema das soluções definidas pelos algoritmos.

O PROMETHEE II foi aplicado para definir as soluções preferenciais do decisor; o método foi realizado a partir de uma rotina computacional escrita em Visual Basic 6.0, desenvolvida por Jannuzzi (2010), denominada como Programa para Apoio à Tomada de Decisão Baseada em Indicadores – PRADIN (2013).



**Figura 1:** Sistema de distribuição de água ANYTOWN (Walski *et al.*, 1987), com modificações.

## RESULTADOS

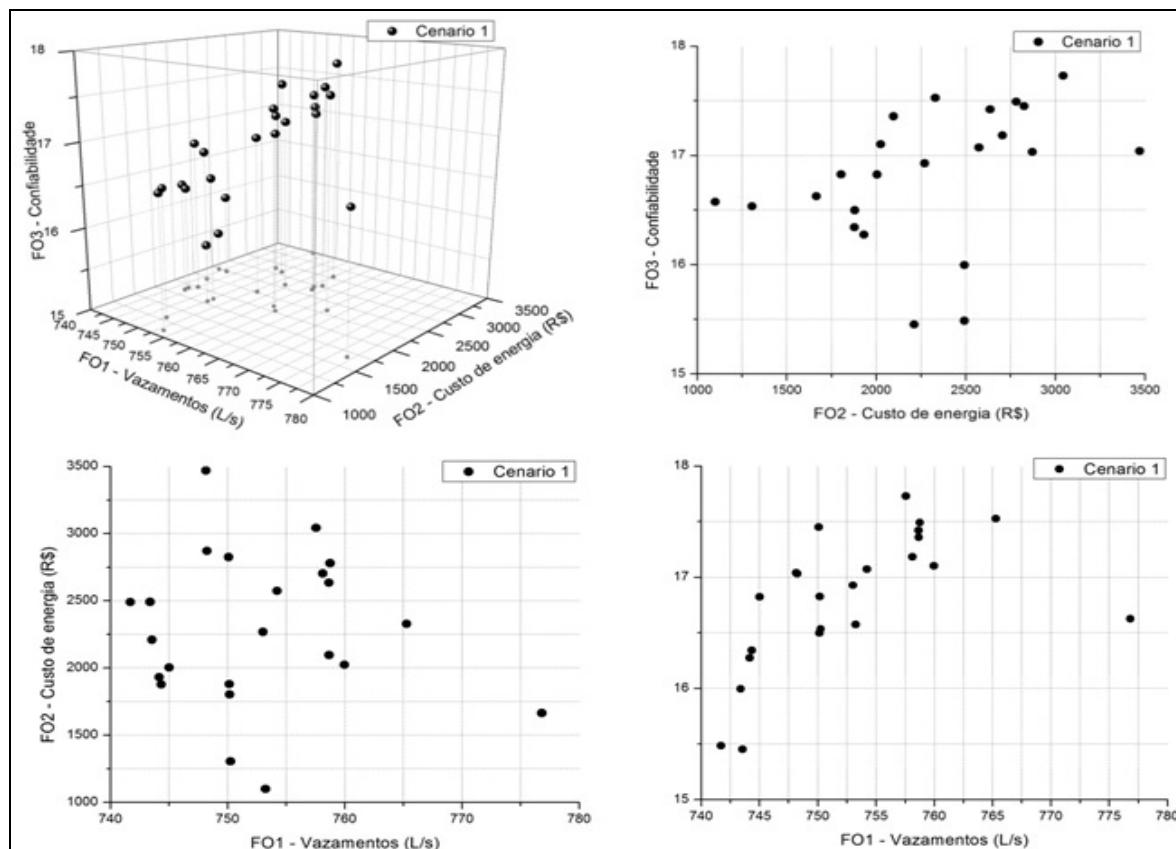
Para realizar as simulações, considerou-se que a rede ANYTOWN possui 10% do volume total distribuído correspondente a vazamentos quando a rede é operada na condição extrema em que todas as bombas estão ligadas. Assim, a perda por vazamento total diária é igual a 1665,36 L/s, o custo de energia elétrica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

Com a realização das simulações do modelo de otimização, foi gerada uma frente Pareto com 23 soluções (Figura 2), as quais constituem nas melhores políticas operacionais obtidas por esse algoritmo para a rede de distribuição ANYTOWN. Os valores das funções objetivo são apresentados na Tabela 2, onde foi atribuído um número para identificar as soluções.

Destaca-se que uma regra operacional ótima consiste da implementação de apenas uma solução. Assim, visando selecionar a melhor solução na frente Pareto gerada pelo NSGAII, foi realizada a ordenação das soluções por meio do método PROMETHEE II, com a utilização do aplicativo PRADIN 3.0. Para ordenação das políticas operacionais, foram atribuídos pesos iguais para cada função objetivo. No PRADIN, as soluções foram comparadas duas a duas em todos os critérios. Os resultados obtidos de Fluxos Positivo e Negativo ( $Flx^+$  e  $Flx^-$ ), o IMC (Índicador Multicritério, equivalente ao Fluxo Líquido) e o posicionamento são apresentados para cada solução. A solução escolhida para ser definida como regra operacional é aquela que possui maior Indicador Multicritério.

A Figura 3 apresenta os valores do IMC e dos fluxos positivo e negativo para cada uma das soluções. A partir da ordenação das soluções por meio do IMC, verifica-se que as melhores soluções para esse critério de peso são as regras de números 1 e 16, com mesmos valores para IMC (0,2424). Uma vez que as soluções 1 e 16 tem o mesmo IMC, optou-se pela solução 16 como a melhor política operacional.

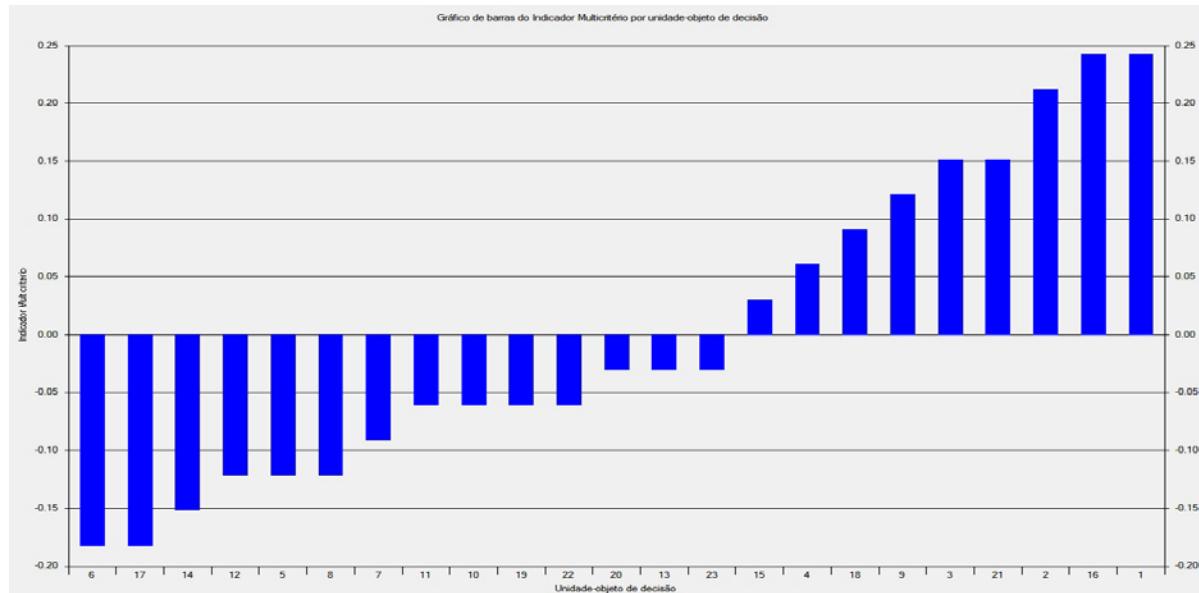
A melhor política operacional corresponde ao estado das três bombas (B1, B2, B3) durante 24 horas, conforme mostrado na Tabela 3. Verifica-se que essa solução promove redução de 5% dos vazamentos, 23,21% dos custos de energia elétrica e aumento de 12% da confiabilidade do sistema em relação à regra operacional onde todas as bombas são mantidas ligadas



**Figura 2: Conjunto de soluções não dominadas obtidas com o NSGAII.**

**Tabela2: Conjunto de soluções não dominadas obtidas com o NSGAII.**

SOLUÇÃO	FO1 (L/s)	FO2 (R\$)	FO3 (-)	SOLUÇÃO	FO1 (L/s)	FO2 (R\$)	FO3 (-)
<b>1</b>	750,174	1803,52	16,8268	<b>13</b>	765,282	2329,19	17,5281
<b>2</b>	744,326	1877,3	16,343	<b>14</b>	776,808	1664,99	16,6267
<b>3</b>	744,16	1930,85	16,2754	<b>15</b>	758,658	2095,74	17,3583
<b>4</b>	750,135	1879,72	16,4986	<b>16</b>	744,998	2004,34	16,8253
<b>5</b>	748,249	2871,5	17,0326	<b>17</b>	758,106	2703,93	17,1835
<b>6</b>	758,75	2780,63	17,4929	<b>18</b>	750,096	2825,23	17,4523
<b>7</b>	757,551	3042,72	17,7301	<b>19</b>	753,005	2269,28	16,9287
<b>8</b>	748,159	3469,78	17,0401	<b>20</b>	743,555	2210,5	15,4525
<b>9</b>	753,236	1100,38	16,5761	<b>21</b>	750,24	1306,05	16,5347
<b>10</b>	752,46	2537,41	17,0743	<b>22</b>	743,388	2491,41	15,9967
<b>11</b>	759,967	2024,3	17,103	<b>23</b>	741,709	2490,96	15,4868
<b>12</b>	758,638	2635,51	17,4218				



**Figura 3: Análise Gráfica do Indicador Multicritério – Promethee II.**

**Tabela 3: Melhor Política Operacional (16) – NSGAII.**

Regra Operacional 16 - NSGAII																								
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	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0
B2	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
B3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0

## **CONCLUSÕES**

São restritos os modelos de otimização que tem como objetivo alcançar a eficiência hidroenergética, ou seja, promover simultaneamente a minimização dos custos de energia elétrica, juntamente com redução dos vazamentos na rede e a maximização da confiabilidade de sistemas de distribuição de água.

O NSGAI<sup>I</sup> demonstrou ser adequado para a busca de soluções ótimas que promovem a eficiência hidroenergética do sistema de distribuição de água avaliado neste trabalho. Através da aplicação do algoritmo de otimização, gerou-se uma frente Pareto com 23 soluções. A média do tempo computacional necessário para convergência do modelo foi de 44,1 minutos. Foram geradas 0,29 soluções por minuto em média para cada simulação.

Usando o método PROMETHEE II, foi realizada a ordenação das políticas operacionais para definição da melhor política. Comparando uma condição de operação extrema da rede ANYTOWN, onde todas as bombas são mantidas ligadas, com a melhor política operacional obtida com o NSGAI, verifica-se que a solução apresentada pelo modelo de otimização promoveu redução de 5% dos vazamentos, redução de 23,21% do custo total de energia elétrica e aumento de 12% da confiabilidade do sistema.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pelo auxílio concedido na forma do Edital Universal 2010, ao doutorando Narumi Abe, pelo suporte na construção do modelo de otimização, e ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) na forma de auxílio à participação no XII SIBESA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALRHHEH, M.; MAHMOUD, H. (2009). Using Genetic Algorithms in Pump Scheduling to Reduce the Pumping Cost. *Damascus University Journal*, v. 25, No (2).
2. BARDALES, K.L.N. (2007). Otimização da Operação de um Sistema Adutor de Água Tratada Utilizando Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.
3. CARRIJO, I.B. (2004). Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
4. CHEUNG, P.B. (2004). Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo. 268 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
5. COLOMBO, A.F., KARNEY, B.W. (2005). Impacts of leaks on energy consumption in pumped systems with storage. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, N°. 2, March 1.
6. COSTA, A.I.F.L.V. (2009). Eficiência Econômica na Operação de Estações Elevatórias de Abastecimento de Água. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Porto, Portugal.
7. CUNHA, A.A.R. (2009). Otimização energética em tempo real da operação de sistemas de abastecimento de água. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
8. DEB, K., AGRAWAL, S., PRATAB, A., MEYARIVAN, T. (2000). A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II. In SCHOENAUER, M., DEB, K., RODOLPH, G. *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conferencia*, p. 849-858.
9. FORMIGA, K.T.M. (2005). Otimização Multiobjetivo de Projetos de Redes de Distribuição de Água. 305 p. Tese (Doutorado) \_ Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
10. GESSLER, J. (1985). Pipe network optimization by enumeration. *Computer applications in water resources*, H. C. Torno, Ed., ASCE, New York, N.Y., 572-581.
11. IBÁÑEZ, M; LÓPEZ, P.D.P. (2005). Multi-objective pump scheduling optimization using evolutionary strategies. In: IEEE Congress on Evolutionary Computation, volume 1, p. 435 – 442, Edinburgh, UK.
12. JANNUZZI, P.M. (2010). Análise Multicritério e a Decisão em Políticas Públicas: Implementação da Técnica no Aplicativo PRADIN e Aplicações. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Rio de Janeiro, RJ.
13. MACHADO, E.C.M.N.; CRUZ, C.A.L.; RÊGO, M.G.; CARVALHO, M.W.A.; LACERDA, I.S.; GALVÃO, C.O. (2008). Operação Multi-Objetivo de Sistemas de Abastecimento de Água: Algoritmo Genético. *Anais do VIII SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. Lisboa – Portugal.
14. MACKLE, G.; SAVIC, D.A.; WALTERS, G.A. (1995). Application of Genetic Algorithms to Pump Scheduling for Water Supply. In: Conference Publication 4/4. London, UK: Institute of Electrical Engineers, 1995. p. 400-405
15. MOREIRA, D.F.; RAMOS, H. (2013). Energy Cost Optimization in a Water Supply System Case Study. Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Energy*, v. 2013.
16. PRADIN – Programa para Apoio à Tomada de Decisão baseada em Indicadores: versão 3.0. Associação Nacional das Instituições de Planejamento, Pesquisa e Estatística – ANIPES. Disponível em: <http://www.anipes.org.br>. Acesso em: 10 de junho 2013.
17. RIGHETTO, A.M. (2002). 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, João Pessoa, PB.
18. ROSSMAN, L. (2000). EPANET 2 users manual. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
19. SAVIC, D.A.; WALTERS, G.A.; SCHWAB, M. (1996). Multiobjective Genetic Algorithms for Pump Scheduling in Water Supply. Report No 92/02, University of Exeter.
20. SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (2012). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2010. Brasília: MCIDADES, SNSA.
21. SRINIVAS, N., DEB, K. (1994). Multiobjective Optimazation Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms Evolutionary Computation, v. 2, p. 221-228.
22. TODINI, E. (2000). Looped Water Distribution Networks Design Using a Resilience Index Based Heuristic Approach. *Urban Water*, v. 2, No 3, p. 115-122.
23. TSUTIYA, M.T. (2006). Abastecimento de Água. 2da. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.



24. WALSKI, T.M. *et al.* (1987). 'Battle of networks models: Epilogue.' *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol.113, No. 2, March.