

## **OPERAÇÃO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: utilização de um novo algoritmo de otimização**

*Luis Henrique Magalhães Costa<sup>1</sup>; Marco Aurélio Holanda de Castro<sup>2</sup>; Helena Ramos<sup>3</sup>; Carlos Roberto Moura Leal Junior<sup>4</sup>*

**Resumo** – Em geral, as regras operacionais dos sistemas de abastecimentos de água visam à garantia da continuidade do abastecimento público, sem a consideração da variação da tarifa energética ao longo do dia. Este fato ocasiona o aumento do custo energético gerado pelos motores das bombas em funcionamento. Entretanto, além da utilização eficiente da tarifa energética, aspectos hidráulicos devem ser considerados como, por exemplo, a variação da demanda e a manutenção dos níveis dos reservatórios dentro de seus limites pré-estabelecidos. Neste trabalho, apresenta-se um algoritmo genético híbrido capaz de determinar estratégias operacionais de estações elevatórias com o custo energético reduzido. A análise do modelo de otimização é feita em um estudo de caso hipotético. O novo modelo reduz consideravelmente o tempo computacional em comparação aos modelos utilizados na literatura.

**Abstract** – In general, operational rules applied to water distribution systems are created to assure continuity of the public water public, without taking into account variations of the energy costs during a day. This causes an elevation of the energy costs due to the pumps. Furthermore besides rational use of energy by pumps, there are other aspects which should be considered, such as the daily variation of the water demand and the requirements regarded minimum and maximum water levels in the tanks. This works proposes a new hybrid genetic algorithm. The main purpose of the code is to determine optimized system operational rules with regard to saving electrical energy consumed by the pumps. The code was tested using one hypothetical water supply system. The results showed considerable decrease in computational time as comparing to other codes available.

**Palavras-Chave** – Algoritmo genético, eficiência energética, sistemas de abastecimento de água.

---

<sup>1</sup> Professor Adjunto da UFBA, ICADS, Rua Professor José Seabra s/n, 47805-100, Barreiras-BA. E-mail: [luis.costa@ufba.br](mailto:luis.costa@ufba.br)

<sup>2</sup> Professor Adjunto da UFC, DEHA, Campus do Pici, 60451-970, Fortaleza-CE. E-mail: [marco@ufc.br](mailto:marco@ufc.br)

<sup>3</sup> Professora do IST, DeCivil, Avenida Rovisco Pais, 1, 1049-001, Lisboa-Portugal. E-mail: [hr@civil.ist.utl.pt](mailto:hr@civil.ist.utl.pt)

<sup>4</sup> Professor da FAT, Av. Presidente Roosevelt, 1200, Serraria, 57045-150, Maceió-Alagoas. E-mail: [carloslealjr@fat-al.edu.br](mailto:carloslealjr@fat-al.edu.br)

## 1-INTRODUÇÃO

Grande parte da população mundial tem seu abastecimento de água realizado por companhias especializadas que acabam por exercerem um papel vital no gerenciamento deste recurso com demanda crescente e de fácil escassez. As limitações dos recursos hídricos e energéticos e as crescentes preocupações ambientais tornam a distribuição de água ainda mais desafiadora.

Entre dois e três por cento do consumo de energia do mundo são usados no bombeamento e tratamento de água para residências urbanas e indústrias. O consumo de energia, na maioria dos sistemas de abastecimento de água em todo o mundo, poderia ser reduzido em pelo menos 25 %, por meio de ações com melhor desempenho em eficiência energética (Watery,2009).

Segundo Tsutiya (2004), mais de 90% dos gastos com energia elétrica das empresas de saneamento devem-se às estações elevatórias de água e esgoto. Pedrosa Filho (2006) afirma que dentre os fatores que contribuem para esse elevado índice de consumo de energia, destacam-se: ausência de medição e monitoramento dos principais parâmetros que regulam o sistema; falta de um melhor compartilhamento dos dados entre várias gerências da companhia; equipamentos antigos e ultrapassados; envelhecimento das tubulações; elevado desperdício de água utilizável; falta de uma política de manutenção e substituição; complexidade das redes de condutos e má política de gerenciamento operacional dos grupos elevatórios e falta de investimentos na área operacional.

Dentre as medidas práticas que podem levar à redução do custo de energia elétrica, a alteração dos procedimentos operacionais de bombeamento demonstra ser bastante eficaz, pois não necessita de pouco investimento e, além disto, a economia, devido a esta redução, ocorre em curto prazo. Entretanto, a determinação de estratégias operacionais que reduzam custos energéticos e que mantenham a qualidade do atendimento aos clientes é uma tarefa complexa. Objetivos distintos estão envolvidos neste processo como, por exemplo, a utilização eficiente da tarifa energética e a manutenção das variáveis hidráulicas dentro dos limites pré-estabelecidos.

Com base nestas informações, foi elaborado neste trabalho um modelo computacional, baseado na técnica dos algoritmos genéticos, capaz de determinar regras operacionais de estações elevatórias de água visando um custo energético reduzido.

Inúmeros trabalhos foram desenvolvidos no Brasil sobre o tema deste estudo, utilizando o algoritmo genético (AG) como ferramenta de otimização (Righetto,2002;Formiga et al.,2003; Carrijo,2004; Pedrosa Filho,2006; Cunha,2009). Tal fato se deve a grande flexibilidade que o AG tem na exploração do espaço de busca em problemas de otimização, além de permitir facilmente sua conectividade com outros modelos de simulação como, no caso dos trabalhos supracitados, modelos de simulação hidráulica.

Uma das principais desvantagens dos AGs é sua incapacidade de trabalhar com problemas restritivos. Para tanto, utiliza-se de métodos auxiliares (e.g. método das penalidades) para contornar

este problema. Entretanto, devido o problema de otimização na operação de Sistema de Abastecimento de Água (SAA) ser considerado um problema complexo, com muitas restrições, resta dúvida quanto à velocidade dos modelos que consideram a junção entre o AG padrão e simuladores hidráulicos na convergência e definição da solução ótima.

Visando reduzir o tempo computacional demandado no encontro de soluções operacionais com o custo energético reduzido, apostou-se na alteração do módulo de otimização, ou seja, no AG padrão. Para tanto, foram criados novos algoritmos que atuam diretamente sobre as soluções factíveis geradas pelo AG na tentativa de torná-las factíveis, desenvolvendo-se, assim, um algoritmo genético híbrido (AGH) (operadores genéticos+algoritmos reparadores). A etapa de simulações hidráulicas é feita pelo software EPANET (Rossman, 2000).

A preocupação com a redução do tempo computacional se deve à aplicabilidade de modelos de otimização energética em tempo real.

O modelo de otimização determina, em intervalos discretos (a cada hora), a melhor programação a ser seguida pelas bombas (ligada/desligada) para um horizonte diário de operação. Dessa forma, as decisões de efetuar manobras passam a ser orientadas a partir da pesquisa de milhares de combinações possíveis, sendo escolhida, por meio de um processo iterativo, a estratégia que apresentar menor valor do custo energético diário.

A aplicação do modelo é feita em um estudo de caso hipotético utilizado por Rao e Salomons(2007). Desta forma, foi possível realizar uma análise comparativa entre os resultados encontrados por estes autores e aqueles obtidos pelo modelo proposto neste trabalho. O uso do modelo de otimização apresentado neste trabalho em um estudo de caso real pode ser encontrado em Costa et. al.(2010).

## **2-FORMULAÇÃO DO MODELO**

A determinação de soluções ótimas na operação de bombas em um SAA é considerado um problema complexo por envolver um grande número de variáveis de decisão e muitas restrições pertinentes a cada sistema. As variáveis de decisão são os estados operacionais das bombas. Para representar essas variáveis em cada passo de tempo, utiliza-se a notação binária. A configuração da bomba é representada por um bit onde 0 e 1 representam os estados desligado e ligado, respectivamente.

### **2.1-Função Objetivo**

O problema de otimização desse trabalho apresenta a estrutura clássica de um problema de otimização em que se procura minimizar uma função objetivo sujeita a um conjunto de restrições

que representam os limites operacionais do sistema. A função objetivo é bem definida e equaciona a minimização dos custos de energia elétrica relativos ao bombeamento de um SAA.

O objetivo principal do modelo é encontrar a configuração de bombas que proceda no menor custo energético possível no horizonte operacional. Sendo assim, a função objetivo pode ser definida como o somatório da energia gerada pelas bombas, em todo horizonte operacional, devido à potência originada com o atendimento aos pontos de consumos e o abastecimento dos reservatórios. Pode ser expressa de acordo com a equação:

$$MinCE = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} C_{nt} E_{nt} (X_{nt}) \quad (1)$$

Onde:

n: bomba selecionada;

t: passo de tempo;

CE: custo energético diário (\$);

Cnt: custo tarifário (\$/kWh);

Ent: energia consumida (kWh);

Xnt: estado de funcionamento da bomba;

N: quantidade de bombas do SAA;

As tarifas energéticas podem variar de acordo com o tipo de consumidor (e.g., residencial, industrial, comercial), valor da potência contratada, período do ano, da semana e da hora do dia.

O estado de funcionamento da bomba ( $X_{nt}$ ) é a variável de decisão da função objetivo (Equação 1). Tal variável se caracteriza por um vetor solução e é representada por um vetor binário (0/1) que determina se a bomba está desligada ou ligada, a cada hora, durante um dia de operação. A equação a seguir expõe mais detalhadamente a representação do vetor ora citado para o caso de um SAA com duas bombas:

$$X_{nt} = (X_{1,1}, X_{2,1}, X_{1,2}, X_{2,2}, X_{1,3}, X_{2,3}, \dots, X_{1,24}, X_{2,24}) \quad (2)$$

Dessa forma, no processo de otimização, os vetores soluções que representam as estratégias operacionais diárias para n bombas deverá ter a dimensão 24 x n, onde, conforme citado anteriormente, n representa o número de bombas.

## 2.2-Restrições

Na formulação do problema de otimização na operação de SAA, as restrições têm a função de introduzir ao modelo limites hidráulicos e operacionais pré-estabelecidos de forma que as soluções que tenham esses limites violados sejam identificadas e descartadas. Tais soluções são inviáveis, pois certamente ocasionariam problemas operacionais caso fossem adotadas. Normalmente, para este tipo de problema, utilizam-se restrições implícitas e explícitas.

A cada avaliação das soluções, a primeira restrição a ser avaliada é a implícita. Essa restrição é constituída pelas equações da continuidade em cada nó e da conservação de energia em cada anel da rede. Essas equações estão implícitas no cálculo da função objetivo e precisam ser resolvidas para que se obtenha o custo energético total da solução a ser analisada. Esses procedimentos são desempenhados pelo simulador hidráulico EPANET.

Após a etapa supracitada, alguns parâmetros são verificados, visando avaliar o desempenho hidráulico da solução analisada. Essa avaliação é feita em cima de limites pré-estabelecidos. As restrições explícitas representam esses limites e são descritas e equacionadas a seguir:

Pressão: para cada hora as pressões em todos os nós restritivos devem estar entre os limites mínimos e máximos.

$$P_{\min_i} \leq P_{it} \leq P_{\max_i} \dots \forall_i, \forall_t \quad (3)$$

Onde  $P_{it}$  representa a pressão no nó  $i$  no passo de tempo  $t$ ;  $P_{\min_i}$  e  $P_{\max_i}$  são as pressões requeridas mínimas e máximas para o nó  $i$ .

Níveis dos reservatórios: Os níveis dos reservatórios devem ficar entre os limites mínimos e máximos para cada intervalo operacional. Além disso, ao fim do horizonte operacional (24h), esses níveis devem ser iguais ou superiores aos níveis do início do horizonte (0h). Esta última restrição garante que os níveis dos reservatórios não diminuam com as repetições dos ciclos operacionais.

$$NR_{\min_j} \leq NR_{jt} \leq NR_{\max_j} \dots \forall_j, \forall_t \quad (4)$$

$$NR_{j,24} \geq NR_{j,0} \dots \forall_j \quad (5)$$

Potência das Bombas: A potência gerada por cada bomba no decorrer do horizonte operacional devem ser inferiores a sua capacidade máxima.

$$PB_{kt} \leq CM_k \dots \forall_k \quad (6)$$

Onde  $PB_{kt}$  representa a potência gerada pela bomba  $k$  no passo de tempo  $t$ ;  $CM_k$ : capacidade máxima da bomba  $k$ .

Acionamento das Bombas: A quantidade de acionamento das bombas da estratégia operacional deve ser inferior a um limite pré-estabelecido. Esta restrição, apresentada por Lansey e Awumah (1994), atua indiretamente na manutenção da bomba, pois quanto mais vezes ela for colocada em ação num mesmo ciclo operacional maior será o seu desgaste.

$$NA_k \leq NA_{\max_k} \dots \forall_k \quad (7)$$

Onde  $NA_k$  e  $NA_{\max_k}$  representam a quantidade máxima de acionamento da bomba  $k$  durante um dia de operação e a quantidade máxima permitida de acionamentos para essa mesma bomba.

### 2.3-Algoritmo Genético Híbrido

A principal diferença do Algoritmo Genético Híbrido (AGH) apresentado neste trabalho em relação ao Algoritmo Genético Simples (AGS) é que, enquanto o AGS faz uso dos métodos das

penalidades, tornando as soluções factíveis em soluções com aptidão reduzida, por meio dos operadores genéticos (cruzamento e mutação - procedimentos fortemente estocásticos), o AGH atua diretamente no passo de tempo em que alguma restrição (Equações: 3,4,5,6 e 7) tenha sido violada na tentativa de corrigir esta solução tornando-a factível.

O procedimento de reparação das soluções inviáveis é formado por um conjunto de cinco algoritmos. Cada algoritmo atua diretamente em um determinado tipo de restrição violada.

A primeira alteração nas soluções inviáveis ocorre quando a restrição responsável pelo número máximo de acionamentos por bombas é violada, objetivando-se reduzir a quantidade de acionamento para um número inferior ao máximo permitido. Esse algoritmo atua apenas uma vez nessas soluções inviáveis. Caso as alterações não reparem esse tipo de problema, finaliza-se o algoritmo como um todo. Esse comportamento ocorre para todas as outras reparações, ou seja, cada tentativa falha de correção de um determinado problema encerra-se o algoritmo de reparação no indivíduo corrente, dando reinício aquele algoritmo para o indivíduo seguinte da população, até que todos os indivíduos sejam avaliados.

O algoritmo reparador utilizado nas soluções que violaram a restrição da quantidade máxima de acionamento por bombas (Equação 7) é o único que não utiliza as rotinas do simulador hidráulico EPANET. Para cada solução com a quantidade de acionamentos superior a quantidade máxima são realizadas pequenas alterações, conforme mostra a figura a seguir.

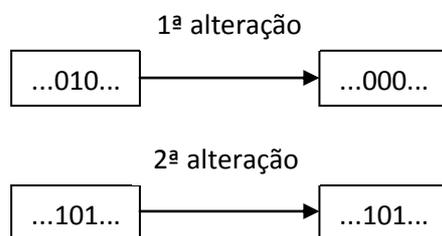


Figura 1 – Fluxograma do algoritmo de reparação – quantidade máxima de acionamentos

O par de genes “01” representa um acionamento. Essa configuração significa que em determinada hora a bomba encontra-se desligada e na hora seguinte ligada, caracterizando um acionamento. Os conjuntos de genes “010” e “101” representam um acionamento e um desligamento repentinos (1h) para uma bomba. Sendo assim, eliminando-se essas situações por meio das alterações apresentadas na Figura 1, reduz-se consideravelmente a quantidade de arranques alterando-se o mínimo possível na configuração original da solução. A Figura 2 exemplifica essas alterações para uma solução contendo uma bomba.

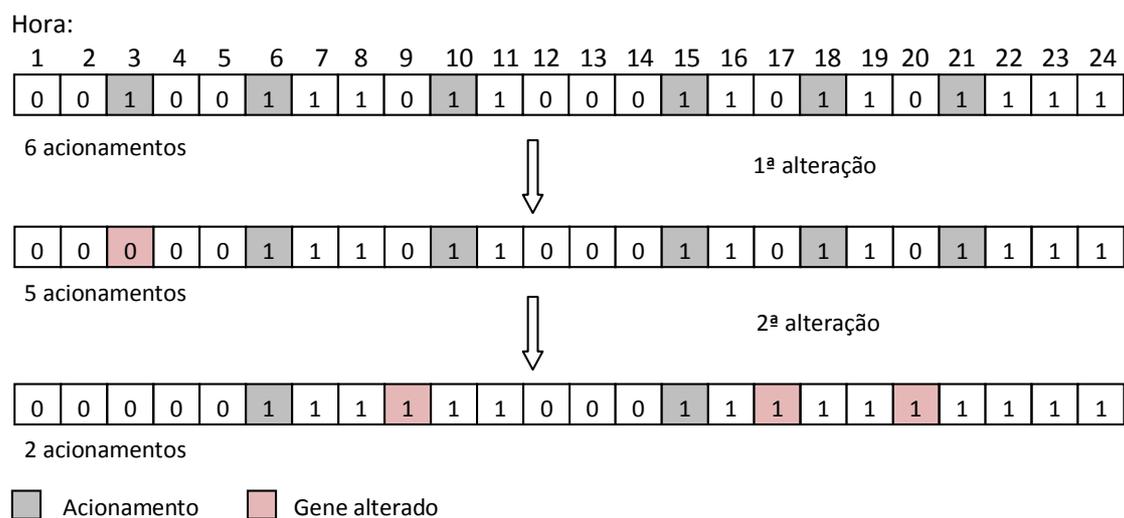


Figura 2 – Exemplo do algoritmo de reparação (número máximo de acionamentos)

No exemplo da Figura 4.16, com apenas quatro alterações, foi possível reduzir de seis para dois, a quantidade de acionamentos da solução. Além da redução considerável da quantidade de acionamentos, também é possível observar uma maior uniformidade dos horários em que a bomba encontra-se ligada. A solução alterada passou a ter apenas dois períodos com a bomba em funcionamento. A utilização da bomba em longos períodos é característica das estratégias comumente utilizadas em sistemas reais, devido à menor intervenção na operação e redução no desgaste das bombas.

As soluções obtidas com o algoritmo de reparação referente ao número máximo de acionamentos servem de guia para as demais reparações que, por sua vez, tentam corrigir essas soluções considerando sempre a número máximo de acionamento, tendo em vista que tais correções podem alterar essa limitação. A figura 3 ilustra esse procedimento para a reparação de uma solução ineficaz devido à violação da restrição de potência das bombas numa estação elevatória com quatro bombas.

No exemplo da figura 3, supõe-se que é permitido até três acionamentos por dia. Na tentativa de corrigir esta solução procura-se ligar outra bomba no mesmo horário (10h) cuja restrição da potência máxima foi violada. Para tanto, procuram-se as bombas com menores quantidades de acionamentos (i.e. bombas 3 e 4) e, dentre essas, primeiramente, liga-se aquela em que uma possível alteração não resultará em um novo acionamento (e.g. bomba 3). Caso o problema não seja resolvido, as outras bombas desse conjunto são ligadas, uma a uma, até solucionar o problema.



## 2.4-Análise de sensibilidade hidráulica

Para tornar os algoritmos reparadores aplicável a SAAs com mais de uma estação elevatória foi necessário o desenvolvimento de um algoritmo que determine a influência de cada bomba sobre os nós restritivos e reservatórios. Para identificar quais reservatórios são abastecidos por cada bomba é realizado o seguinte procedimento: tornam-se nulas as demandas de todos os nós e, em seguida, ligam-se as bombas, uma por uma, verificando os reservatórios que tiverem seus níveis alterados. Aqueles que não tiveram seus níveis alterados não são abastecidos pela bomba que foi ligada.

Já para determinar a influência das bombas nos nós restritivos, primeiramente fecham-se todos os trechos a montante e jusante de todos os reservatórios. Posteriormente, ligam-se as bombas e verificam-se os nós que tiveram pressões acrescidas.

As etapas de ambas as análises descritas, para cada bomba, são ilustradas nos fluxogramas das figuras 5 e 6.

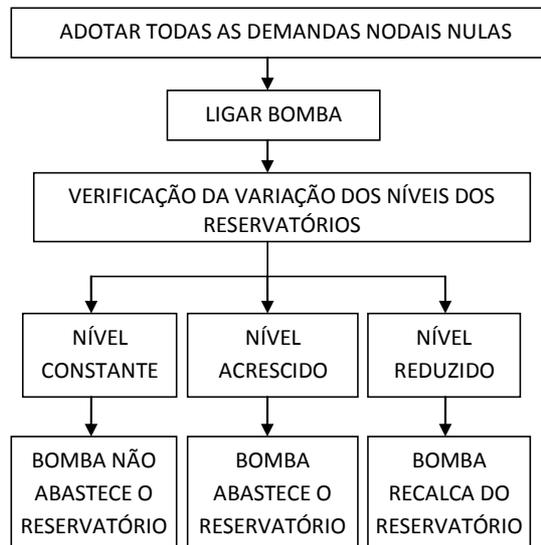


Figura 5 – Fluxograma da determinação das bombas que influenciam cada reservatório

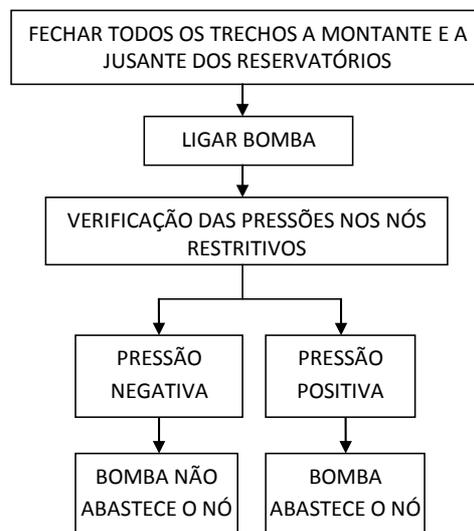


Figura 6 – Fluxograma da determinação das bombas que influenciam cada nó

Essas análises são importantes, pois em situações com mais de uma estação elevatória é necessário identificar qual possível bomba resolveria o problema da violação de restrições de determinado reservatório ou nó.

## **2.5-Considerações finais**

A principal característica dos algoritmos de reparação é que cada alteração genética é motivada por uma falha da solução. Com esses algoritmos, os indivíduos problemáticos recebem tratamentos individuais, isto é, para cada tipo de problema, existe um tipo de tratamento. Ao contrário do que acontece no AGS, onde as alterações genéticas são realizadas sem nenhum critério, tanto em indivíduos problemáticos, como em indivíduos promissores.

Outro aspecto fundamental desses algoritmos é a ausência de ferramentas estocásticas. Portanto, caso um mesmo indivíduo seja submetido a esses algoritmos, sempre sofrerá as mesmas alterações, confirmando um total determinismo no processo de reparação.

Vale ressaltar que as soluções com pressões negativas (descontinuidade do abastecimento) são apenas descartadas, pois, geralmente, essas soluções possuem estratégias bem diferentes daquelas necessárias a viabilização da solução, tornando sua reparação mais complicada e demorada.

## **3- ESTUDO DE CASO**

A rede que servirá de base para a aplicação do modelo proposto foi utilizada por Rao e Salomons (2007) que, por sua vez, também empregaram o AG na otimização da operação dos sistemas de bombeamento, visando à redução do custo energético, e consideraram o mesmo formato (codificação binária) das variáveis de decisão.

Rao e Salomons (2007), atualizando a rede criada por Walski et al (1987), denominaram-na de Any Town (modificada) ou AT(M). Esta é composta por uma fonte de abastecimento, três bombas com velocidades constantes, três reservatórios de armazenamento e três nós com pressões críticas. A figura 7 apresenta um esquemático da rede.

As limitações dos níveis dos reservatórios, das pressões dos nós críticos e das vazões das bombas compõem as restrições do problema. Os níveis máximos e mínimos dos três reservatórios são de 71.53m e 66.53m, respectivamente. As pressões mínimas para os nós críticos são 51m (nó 90), 42m (nó 55) e 30m (nó 170).

A variação da demanda nos nós (figura 8), a curva característica das bombas, as restrições e o custo tarifário (figuras 10 e 11) aplicados na rede são os mesmos utilizados por Rao e Salomons (2007). Desta forma, é possível avaliar o modelo desenvolvido, comparando-se ambos os resultados.

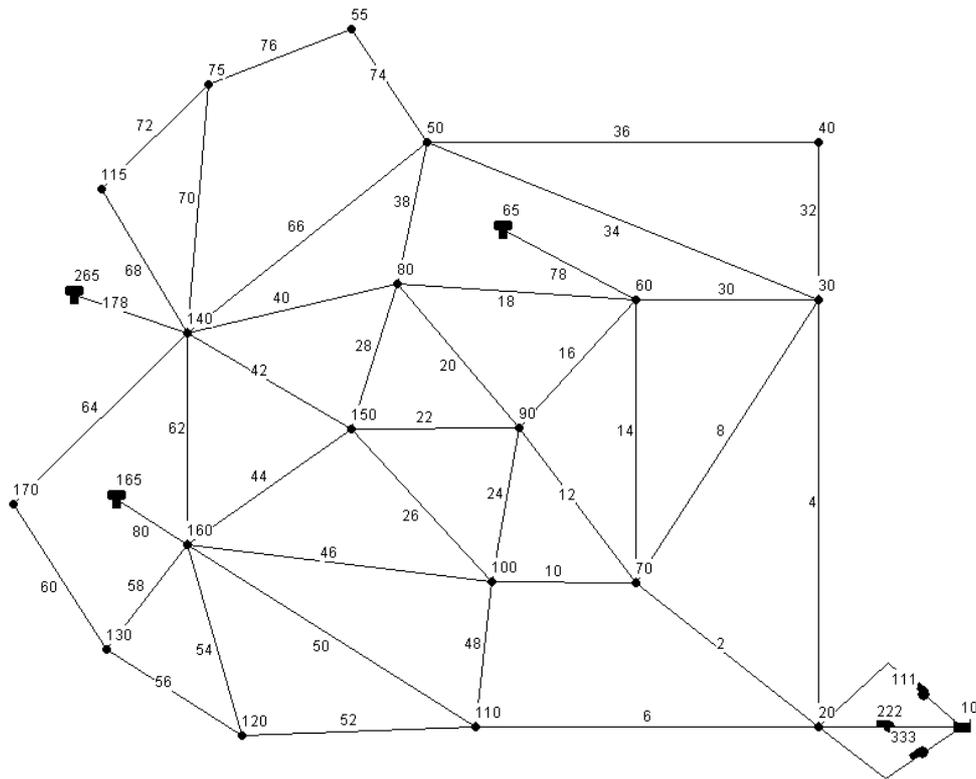


Figura 7 – Topologia da rede AT(M)

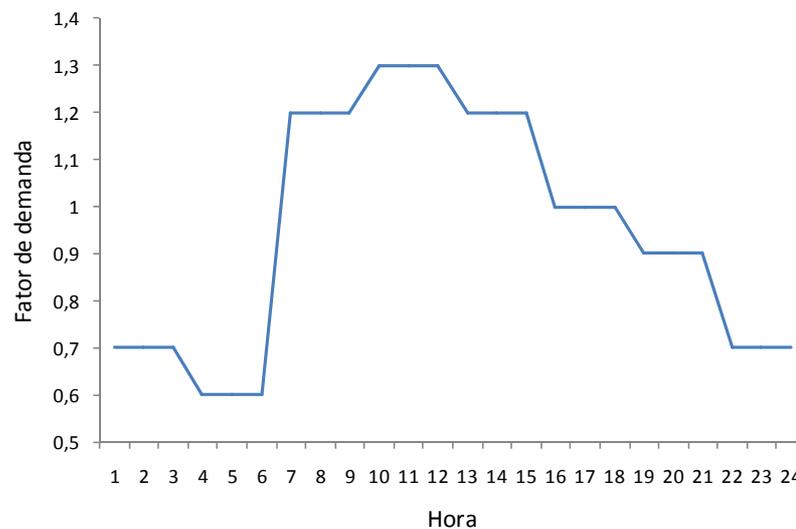


Figura 8 – Variação do fator de demanda

#### 4- ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na avaliação dos dados, além de considerar o resultado encontrado por Rao e Salomons (2007), também se faz uma análise comparativa usando-se o AGS. O método das penalidades é utilizado em ambos os modelos (AGS e AGH). Para um passo de tempo de 1h e um horizonte operacional de 24h, a quantidade de variáveis de decisão é 72, pois para cada hora têm-se três bombas. O número de gerações totalizou 1.000 (AGS) e 150 (AGH). A evolução das melhores soluções de cada geração para ambos os métodos é mostrada na Figura 9.

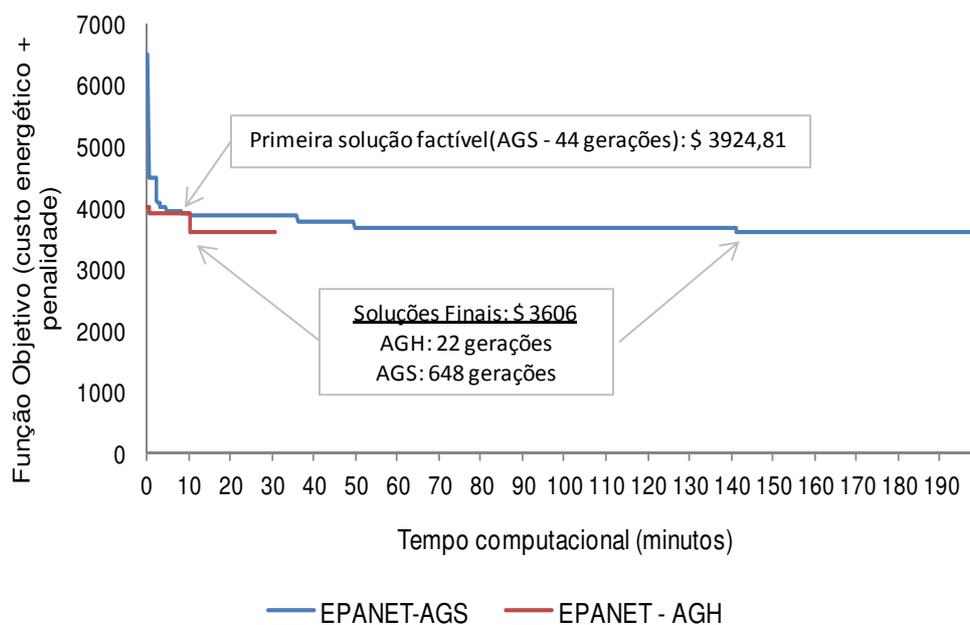


Figura 9 – Evolução do AGH e o AGS

As soluções finais encontradas, no valor de \$ 3.606,18, foram semelhantes para ambos os métodos, isto é, para cada hora tem-se a mesma quantidade de bombas ligadas. No entanto, o tempo computacional gasto pelo AGH (11,23 min) foi menor que aquele demandado pelo AGS (141,77 min). Além disso, a quantidade de soluções viáveis encontrada pelo AGH (1.206 soluções) foi superior aquela encontrada por meio do AGS (173).

No que diz respeito à solução ótima encontrada por Rao e Salomons (2007), tem-se que o custo energético foi o mesmo daquele obtido pelo AGH e AGS. Tal fato ocorreu visto que as pequenas diferenças entre as soluções se sucederam em grupos horários de mesmo custo tarifário. Fazendo-se uma análise nas 24 horas, a quantidade de decisões contendo nenhuma, uma ou duas bombas ligadas, foi a mesma (Figuras 10 e 11).

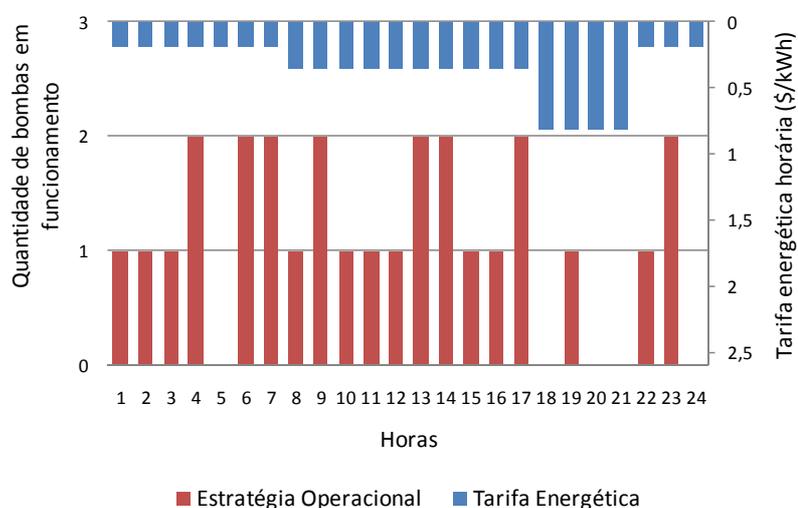


Figura 10 – Solução ótima (Rao e Salomons,2007)

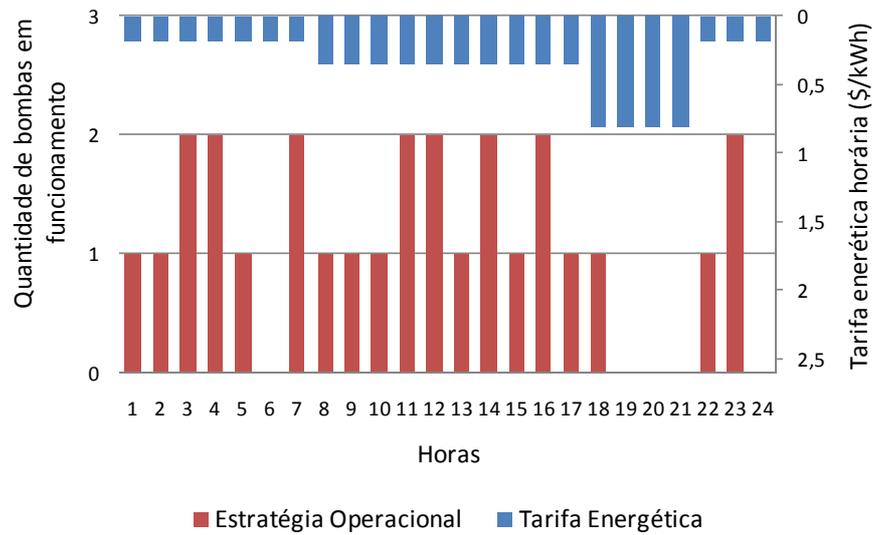


Figura 11 – Solução ótima (AGH e AGS)

A variação dos níveis dos reservatórios e das pressões nos nós críticos pode ser observada nas figuras 12 e 13.

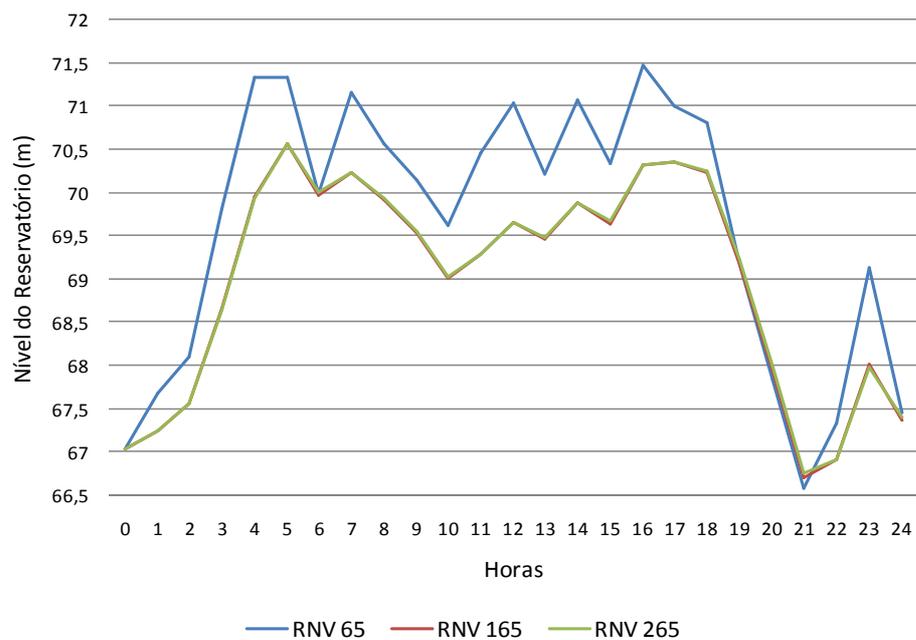


Figura 12 – Variação dos níveis dos reservatórios

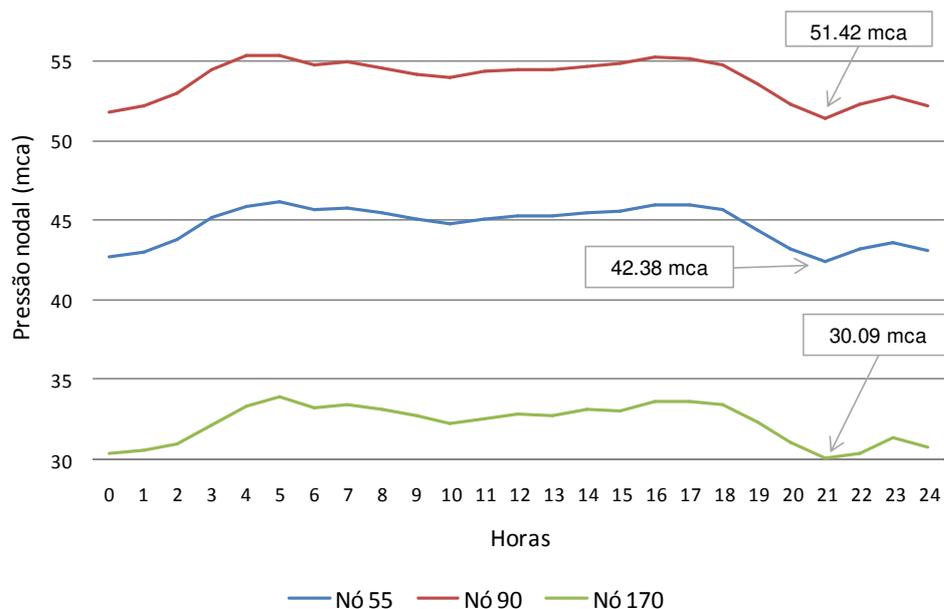


Figura 13 – Variação das pressões nos nós críticos

Em relação às restrições nos nós críticos, apenas no passo de tempo 21h as pressões assumiram valores próximos do limite mínimo, sendo o nó 90 o que mais se aproximou do limite, com 30,09m. Foi também no passo de tempo 21h que os níveis dos reservatórios atingiram valores mínimos. Sendo o reservatório 65 o mais desfavorável, atingindo 66.58m. Esta redução nos níveis dos reservatórios ocorreu devido ao desligamento de todas as bombas nos passos de tempo 19h, 20h e 21h, período em que a tarifa energética está mais cara. Os níveis dos reservatórios ao fim do horizonte operacional se mantiveram superiores aos níveis iniciais.

#### 4.1-Aspectos computacionais

Com a utilização dos algoritmos reparadores pode-se dividir as soluções em três subconjuntos: soluções factíveis, soluções infactíveis irreparáveis e soluções infactíveis passíveis de factibilização (SIPFs). Essas últimas são soluções que, apesar de violar algumas das restrições, estão próximas das regiões factíveis e que, com a aplicação dos algoritmos reparadores, tornar-se-ão soluções factíveis. Além disso, também pode ocorrer que alguma SIPF esteja mais próxima de alguma solução ótima local ou global do que alguma factível encontrada pelo algoritmo genético.

Já com o uso do AGS existem somente dois tipos de soluções: factíveis e infactíveis. As soluções factíveis podem ser mantidas aos longos das gerações por algum operador de substituição (e.g. elitismo). No decorrer das iterações, os indivíduos infactíveis não são reparados, e sim descartados ou depreciados por meio da penalização da função objetivo. A figura a seguir apresenta um esquema contendo um exemplo das alterações feitas em um indivíduo infactível (passível de factibilização) por meio do cruzamento, da mutação e dos algoritmos de reparação.

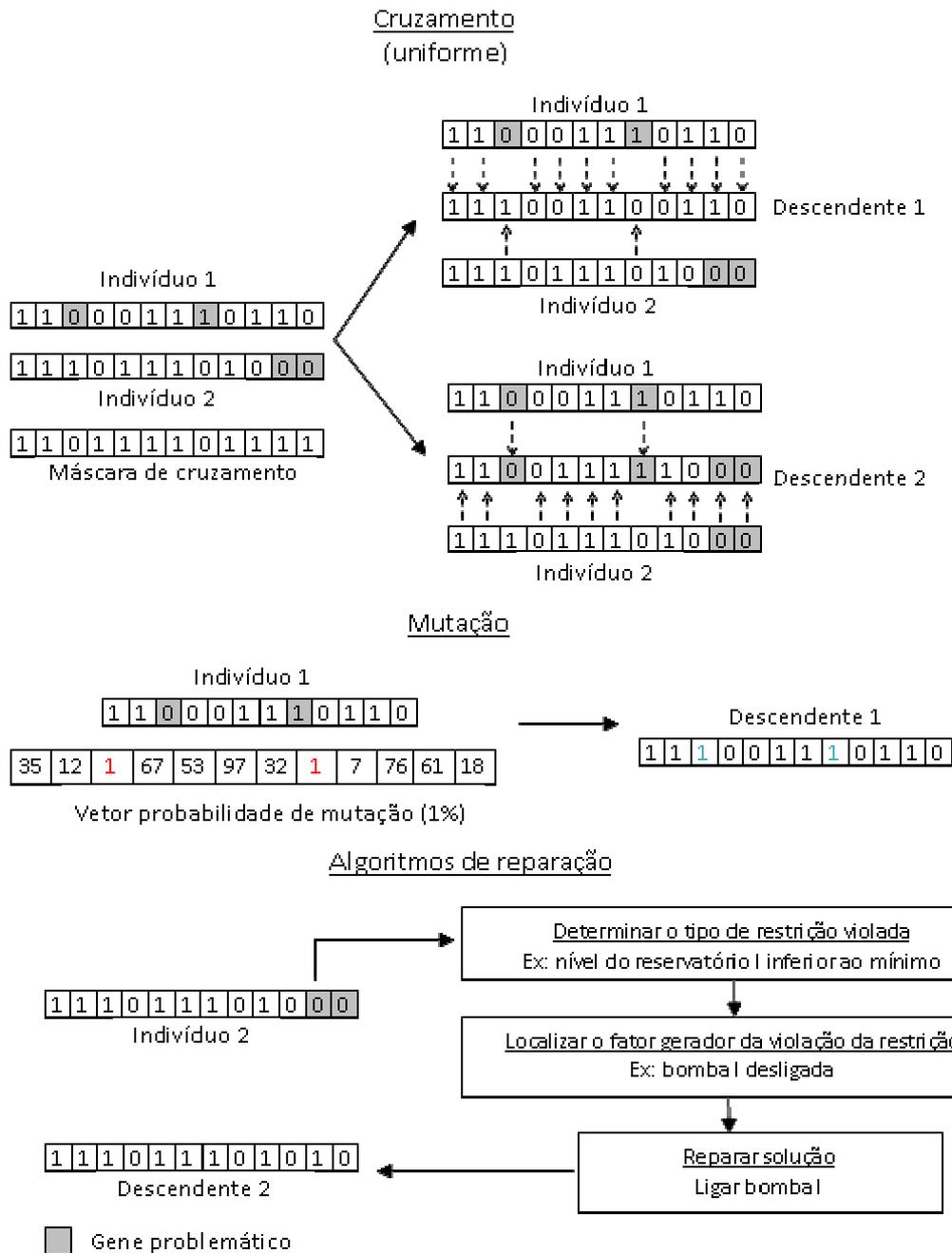


Figura 14 – Alterações feitas em indivíduos infactíveis

A alteração do indivíduo no cruzamento é dependente de dois eventos. O primeiro ocorre na geração aleatória do vetor máscara de cruzamento e o segundo na recepção dos genes pelos descendentes a partir dos indivíduos participantes do cruzamento. No exemplo da Figura 14 ocorre a factibilização do indivíduo 1. Para que esse indivíduo torne-se factível é necessário que a máscara de cruzamento gerada seja a mesma do exemplo apresentado. Além disso, os valores dos genes responsáveis pela reparação do indivíduo 1 estão no indivíduo 2. Portanto, além da necessidade de que a máscara de cruzamento associe que o descendente 1 receba exatamente os genes 3 e 8 do indivíduo 2 (genes 0 – máscara de cruzamento), é necessário que os valores desses genes (3 e 8)

sejam diferentes dos indivíduos 1, pois somente assim a haverá a reparação do indivíduo 1 com a geração do descendente 1. A probabilidade de ocorrer esses dois eventos é bastante remota.

Outra característica do cruzamento uniforme é que, provavelmente, na geração de um descendente reparado ocorra a geração de um descendente infactível. A probabilidade de que os genes problemáticos não herdados ao descendente 1 repare o segundo descendente também é mínima.

Na mutação, as alterações realizadas nos indivíduos é menos intensa quando comparado ao cruzamento. Inicialmente é gerado um número aleatório para cada gene, caso o valor desse número seja inferior a probabilidade de mutação ocorrerá a alteração do gene. Para o exemplo da figura analisada, a probabilidade para que um gene sofra mutação é de 1%. Dessa forma, quando o elemento do vetor probabilidade de mutação assumir valor 1 ocorrerá alteração no respectivo gene do indivíduo. As taxas de mutação utilizadas geralmente são baixas. Para uma taxa de 1%, seria garantido afirmar que somente ocorreria alteração no indivíduo caso esse seja formado por um conjunto de no mínimo 100 genes. Sendo assim, no problema de otimização de bombeamento com até três bombas (3 x 24 genes) ocorrerão indivíduos que não passarão pelo processo de mutação.

Contudo, além da probabilidade que um indivíduo sofra mutação em algum gene, é necessário que o gene escolhido seja o “problemático”, como ocorre no exemplo da Figura 14. Neste caso, para que ocorra uma reparação, todos e somente os genes problemáticos devem ser alterados. A dificuldade de reparação de um indivíduo passível de factibilidade por meio da mutação é inquestionável.

Com as explicações supracitadas é perceptível o quanto os operadores genéticos são estocásticos e desprezados das restrições do problema. Dependendo da configuração adotada na utilização do AG (e.g. taxa de cruzamento, taxa de mutação, tamanho da população e número de gerações) há garantias que uma parte considerável do espaço de busca seja analisada. Entretanto, quanto mais extenso e restritivo for o espaço de busca, menos eficientes serão os operadores genéticos.

Vale ressaltar que, de uma forma geral, os AGs encontram soluções factíveis pelo seu processo de busca aleatória e não pela reparação de SIPFs. Porém, mesmo para um evento raro, não é impossível que os operadores genéticos, apenas com ferramentas estocásticas, evoluam de indivíduos passíveis de factibilização a um indivíduo factível.

Os algoritmos de reparação atuam unicamente nos genes responsáveis pela infactibilização da solução. Dessa forma, não ocorre alteração genética desnecessária. Cada gene “problemático” é avaliado e, em seguida, é verificado o tipo de restrição que foi violada e sua possível reparação. Como a alteração é feita em cada gene “problemático” pode-se colacionar o algoritmo de reparação como uma mutação induzida.

## 5- CONCLUSÕES

A investigação do algoritmo genético híbrido desenvolvido neste trabalho, a partir da comparação com o algoritmo genético simples, apresentou resultados que possibilitaram conclusões interessantes sobre a utilização dos algoritmos de reparação de soluções a partir de sua aplicação em um estudo de caso hipotético.

O AGH se diferencia do algoritmo genético padrão e de outros métodos de busca, pois utiliza as restrições dos problemas para gerar e melhorar suas soluções, de modo que, em cada iteração, uma melhoria é garantida, não ocorrendo somente uma evolução totalmente randômica.

Para o estudo de caso analisado, o modelo AGH-EPANET convergiu doze vezes mais rapidamente quando comparado ao AGS-EPANET. Este valor confirma a eficiência dos algoritmos criados na busca da solução de menor custo energético na operação de um sistema de abastecimento de água. Acredita-se que quanto mais bombas (variáveis de decisão) tiverem o sistema, mais vantajosa será a utilização do modelo criado devido à dificuldade que o AGS tem de encontrar soluções factíveis.

Devido à necessidade de poucas gerações para o encontro de boas soluções por meio do AGH, é interessante realizar uma avaliação sobre a necessidade da utilização dos operadores genéticos (cruzamento e mutação). Provavelmente, se os algoritmos reparadores forem aplicados diretamente a um grande conjunto de soluções geradas aleatoriamente, possivelmente se obteriam ótimos resultados.

Por fim, o rápido tempo de convergência do AGH no encontro de soluções ótimas, confirma a importância do uso do modelo proposto na otimização da operação em sistemas de abastecimento de água em tempo real, podendo seguramente ser utilizado como ferramenta de apoio à tomada de decisões nos setores de operação em empresas de abastecimento de água.

## 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARRIJO, I. B. (2004). *“Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de A.G. multiobjetivo e aprendizado de máquina”*. São Carlos. 234p. Tese(Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos.

COSTA,L.H.M.;RAMOS H.M.;CASTRO,M.A.H.(2010).*“Hybrid genetic algorithm in the optimization of energy costs in water supply networks”*. Water Science & Technology 10.3, pp. 315-326.

CUNHA, A. A. R. (2009). *“Otimização Energética em Tempo Real da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água.”* 174 p. Dissertação Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FORMIGA, K.T.M. et al. “*Optimal design of water distribution system by multiobjective evolutionary methods.*” 2nd Evolutionary multicriterion optimization international conference, Faro, Portugal, 2003.

PEDROSA FILHO, L. A. F. (2006). “*Um Modelo de Operação de Sistemas Adutores de Abastecimento de Água com vistas a Minimização dos Custos Energéticos*”. Campina Grande, PB. 174 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande.

RAO, Z.; SALOMONS, E. “*Development of a real-time, near-optimal control system for water-distribution networks.*” Journal of Hydroinformatics, v. 9, n. 1, p. 25-38, 2007.

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. CD-Rom. 16p.

ROSSMAN, L.A.(2000) “*EPANET User’s Manual.*” Cincinnati: US Environmental Protection Agency, 2000.

TSUTIYA, M. T. (2004) *Abastecimento de Água*. 2a edição. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da USP, 2004.

WATERGY (2009) - <http://www.watergy.net/>. Acessado em: 28/09/2009.