

# OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS MULTI OBJETIVO

Ivaltemir Barros Carrijo<sup>1</sup>; Luisa Fernanda R. Reis<sup>2</sup>; Peter Batista Cheung<sup>3</sup>; Alexandre Kepler Soares<sup>4</sup>; Fernando das Graças Braga da Silva<sup>5</sup>

**Resumo** - O crescimento desordenado das cidades, aliado à falta de financiamentos para o setor de saneamento básico no Brasil, tornaram os sistemas de abastecimento de água complexos e de difícil operacionalidade. Reconhece-se, no entanto, que a operação eficiente desses sistemas é fundamental para que sua vida útil se prolongue o máximo possível, garantindo o atendimento aos consumidores, além de manter os custos de energia elétrica e manutenção dentro de padrões aceitáveis. Assim, um modelo que, reproduzindo o comportamento do sistema de maneira adequada, possibilite a definição de estratégias operacionais ótimas, mostra-se de grande valia à medida que possibilita que decisões sejam tomadas em substituição ao julgamento pessoal de operadores experientes, pautadas em soluções bem sucedidas no passado. Essa sistemática seria mais racional no sentido de possibilitar soluções mais adequadas face às novas conjunturas. Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo computacional direcionado ao controle operacional ótimo de sistemas de macro distribuição de água potável, utilizando o simulador hidráulico EPANET2 e os algoritmos genéticos multiobjetivo como ferramentas para a otimização operacional de um sistema. Realizaram-se estudos sobre o sistema de macro adução da cidade de Goiânia no estado de Goiás - Brasil, por sua complexidade com relação à topologia e às possíveis regras ótimas de operação.

**Abstract** – The disorganized growth of cities, allied to the lack of financing for the basic sanitation sector in Brazil, has rendered water supply systems complex and difficult to operate. The efficient operation of such systems is essential to prolong their service life, ensuring satisfactory service to

---

<sup>1</sup> Engenheiro-Saneamento de Goiás S.A.-SANEAGO, Doutorando em Hidráulica e Saneamento – SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2738267, Fax: 0xx16-2738269, E-mail: [tinil@sc.usp.br](mailto:tinil@sc.usp.br)

<sup>2</sup> Professora Associada - SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2739534, Fax: 0xx16-2739550, E-mail: [fernanda@sc.usp.br](mailto:fernanda@sc.usp.br)

<sup>3</sup> Doutorando em Hidráulica e Saneamento – SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2738267, Fax: 0xx16-2738269, E-mail: [pcheung@bol.com.br](mailto:pcheung@bol.com.br)

<sup>4</sup> Doutorando em Hidráulica e Saneamento – SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2738267, Fax: 0xx16-2738269, E-mail: [aksoares@sc.usp.br](mailto:aksoares@sc.usp.br)

<sup>5</sup> Professor Doutor – SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2738267, Fax: 0xx16-2738269, E-mail: [fernandos2001@bol.com.br](mailto:fernandos2001@bol.com.br)

the consumer, and keeping electric energy and maintenance costs at acceptable levels. Efficient operation requires an in-depth knowledge of these systems, since it is based on this knowledge and the use of tools such as models of hydraulic simulation, optimization and the definition of rules, that the operator can be given rational conditions for the operation of the units of such systems without depending exclusively on his personal experience, thus maintaining the systems' reliability. The main objective of this work is to develop a computational model aimed at the optimal operational control of macro distribution systems of drinking water, using hydraulic simulator EPANET2 and multi-objective genetic algorithms as optimization tools for the system. The studies were conducted on the macro adduction system of the city of Goiânia, in the state of Goiás, Brazil, due to the complexity of the region's topology and the possible optimal operational rules.

**Palavras-Chave:** sistemas de abastecimento de água, otimização operacional, algoritmos genéticos multiobjetivos.

## INTRODUÇÃO

Sistemas de distribuição de água são estruturas que envolvem numerosos fatores inter-relacionados que requerem considerações cuidadosas no desenvolvimento de sua operação.

A operação de um sistema urbano de abastecimento de água em tempo real é uma tarefa muito complexa, que vem recebendo atenção especial por parte de pesquisadores e outros profissionais da área, devido à necessidade de se garantir confiabilidade no atendimento dos serviços, economia de energia elétrica no uso dos equipamentos, atendimento das demandas, com pressões desejadas e, retardamento de investimento para expansão das suas unidades. Além disso, segundo **Taher e Labadie(1996)**, a confiabilidade deve permitir o atendimento ao consumidor em condições anormais ocasionadas por avarias em unidades do sistema.

Segundo **Luvizotto Junior(1995)**, o conceito de operação de sistemas é entendido por leigos como uma mera seqüência de comandos de equipamentos, que têm como objetivo o atendimento da demanda. Entretanto, na realidade, o problema é muito mais amplo, envolvendo aspectos de planejamento, controle e supervisão, serviços de infra-estrutura de apoio e atendimento ao usuário, todos considerados simultaneamente e interdependentes entre si.

Cabe à equipe de planejamento da operação definir as regras(fixas ou variáveis) de controle do sistema. Geralmente as regras são definidas com base em informações e experiências passadas e

no conhecimento do estado atual do mesmo. As regras são transmitidas ao controlador do sistema, que por sua vez, retorna os resultados das operações efetuadas ao planejador, para avaliação do desempenho e para as alterações necessárias.

Na busca de maiores eficiências para os sistemas públicos de abastecimento de água, novas técnicas hidráulicas associadas a algoritmos de otimização têm sido desenvolvidas, buscando uma maior confiabilidade no estabelecimento de regras para operação de sistemas de abastecimento de água.

Para que o planejamento possa definir a melhor regra de operação, é necessário observar quatro condições básicas: a) definição clara dos objetivos a serem alcançados; b) disponibilidade de modelos matemáticos de análises; c) equipamentos para seu processamento; e d) conhecimento do sistema.

Segundo **Righetto(2002)**, sistemas de médio e grande portes são projetados e operados com base numa eficiência global, envolvendo questões como: confiabilidade, distribuição de pressões e demandas, consumo de energia, minimização de perdas, etc. Segundo esta abordagem global, questões relativas à eficiência numérica, associadas à obtenção de respostas às questões operacionais complexas , vêm impulsionando os pesquisadores a desenvolverem técnicas numéricas apropriadas que permitam resolver problemas, específicos ou gerais, de alta complexidade.

Na resolução de problemas relativos à operação de sistemas de distribuição de água, contendo várias elevatórias, adutoras, reservatórios e válvulas reguladoras, vários métodos podem ser utilizados para a simulação hidráulica e otimização do sistema. A interface entre os modelos de simulação hidráulica e de otimização operacional, deve ser cuidadosamente elaborada, no sentido de dar transparência ao processo decisório de operação, de forma a facilitar a introdução de inequações restritivas e facilitar a obtenção dos valores da função objetivo, nos sucessivos passos requeridos pelo otimizador. Com a ampliação dos objetivos de análise de um sistema de distribuição, o algoritmo de otimização deve ser escolhido de forma a facilitar o seu uso e, ao mesmo tempo, permitir a análise de problemas complexos, envolvendo critérios de múltiplos objetivos.

Atualmente, algoritmos baseados em processos estocásticos de busca, vêm sendo utilizados com sucesso, com amplas possibilidades de aplicação em várias áreas de conhecimento, devido à facilidade de implementação e a quase ilimitada condição de aplicabilidade de seus recursos. Os algoritmos genéticos(AGs) são métodos de busca baseados na seleção natural e na genética de

evolução populacional e, especialmente, adequados para tratar problemas complexos como os relativos aos sistemas de distribuição de água. Apresentam vantagens sobre as técnicas de otimização convencionais quanto à possibilidade de analisar diretamente populações de soluções e, através de um aprimoramento de populações sucessivas, chegar a soluções com alta performance quanto aos critérios múltiplos definidos pelo problema. Grande número de aplicações de AGs demonstra a sua adequação quanto à obtenção de soluções, senão ótimas, pelo menos de elevada performance quanto aos critérios multiobjetivos impostos.

Este trabalho apresenta uma metodologia para atingir a operação ótima de sistemas de distribuição de água, aplicado ao sistema macro-adutor(esqueleto) da cidade de Goiânia, composto por adutoras, elevatórias, reservatórios e estruturas de controle com válvulas de controle automático. O problema envolve a determinação de parâmetros operacionais considerando como critérios os custos de operação e a confiabilidade hidráulica do referido sistema.

## **METODOLOGIA**

Na resolução de problemas de engenharia de uma forma geral, procura-se, inicialmente, a representação do sistema real que possibilite o equacionamento matemático de resolução acessível, porém indicativo da solução do problema original. Os recursos atualmente disponíveis mostram que as simplificações, que há algumas décadas eram necessárias para o acesso à resolução de problemas de engenharia, atualmente são dispensáveis, pois as soluções provenientes de modelos matemáticos são, quase sempre, definições da situação real do problema proposto. **Koelle(1996)** ressalta que, para a resolução do modelo matemático, entendido como sendo o conjunto completo e consistente de equações que representam o sistema físico real, é necessária a inserção de parâmetros complementares obtidos, em geral, por via empírica, visando a obtenção de resultados numéricos significativos.

Técnicas de otimização vêm sendo tradicionalmente usadas no dimensionamento de unidades de um sistema de distribuição de água, objetivando menor custo. Segundo **Righetto(2002)**, a interface entre o modelo de simulação hidráulica e o modelo de otimização deve ser cuidadosamente elaborada no sentido de dar transparência ao conjunto, de forma a facilitar o seu uso e, ao mesmo tempo, permitir a análise de problemas complexos, envolvendo múltiplos objetivos. Atualmente, algoritmos baseados em processo estocástico de busca, vêm sendo empregados com sucesso, devido à facilidade de aplicação e praticamente à ilimitada condição de

uso. O AG é um algoritmo de busca baseado na seleção natural e na genética de evolução populacional que possibilita a introdução de regras heurísticas. Tem a vantagem sobre as demais técnicas, por analisar diretamente, uma população de soluções factíveis e, através de um aprimoramento de populações sucessivas, atingir soluções com alta performance quanto aos critérios multiobjetivos definidos pelo problema.

Além da minimização dos custos operacionais, um objetivo importante, quando se pretende otimizar operacionalmente um sistema de abastecimento de água potável, é a maximização de sua confiabilidade. Segundo **Bao e Mays(1990)**, a confiabilidade é a medida da performance(desempenho) do sistema. A performance hidráulica depende das condições ideais que viabilizam fatores como: a) interação entre o sistema de transporte, conservação da capacidade de armazenamento, conservação da capacidade de distribuição e sistema de segurança, como o funcionamento adequado de válvulas reguladoras e bombas; b) confiabilidade dos componentes individuais do sistema; e c) variação espacial e temporal das demandas.

A confiabilidade pode ser descrita considerando-se dois tipos de falhas: mecânicas e hidráulicas. Falhas mecânicas são do tipo: rompimento de tubulações, falhas no bombeamento, falhas no controle de válvulas, perda de potência, entre outras. São consideradas como falhas hidráulicas, as ocorrências de vazões e pressões inadequadas, para um ou mais pontos de demanda do sistema.

A otimização a ser implementada neste trabalho, levará em consideração dois objetivos: a minimização de custos operacionais e a maximização da confiabilidade hidráulica, considerando o índice de atendimento da demanda, os níveis adequados de água nos reservatórios e as pressões mínimas e máximas nos pontos de demanda, para um período de análise de 24 horas.

### **Simulação Hidráulica do Sistema**

A simulação hidráulica avalia as respostas do sistema face às decisões operacionais em termos das suas variáveis de estado: pressão, vazão e níveis nos tanques. É, portanto, uma ferramenta essencial à rotina computacional que quantifica os objetivos estabelecidos. Utilizou-se, neste trabalho, o EPANET2, via Toolkit (**Rossman,2001**) para este fim, pois, além de tratar-se de uma ferramenta de domínio público, é bastante flexível com relação às mudanças de funcionamento, quando necessárias, de dispositivos tais como válvulas, bombas, entre outros.

## Otimização utilizando Algoritmos Genéticos(AGs)

As técnicas de otimização são utilizadas na busca de soluções ótimas para um problema operacional específico. Se o objetivo for, por exemplo, o mínimo custo operacional, a função custo estará associada à tarifa de energia elétrica, ao rendimento das bombas, às perdas de carga nas instalações, etc. Por outro lado, para o atendimento do objetivo de mínimo custo, há restrições impostas pelo próprio sistema, tais como, níveis máximos e mínimos dos reservatórios, limites de pressão e de potência e quantidade de água disponível.

Algumas dificuldades surgem na utilização das técnicas de otimização para a solução do problema de operação e controle de sistemas de água. Conforme relatado por **Ormsbee & Lansey(1994)**, estas dificuldades estão associadas ao grande número de equações a serem resolvidas, à dificuldade de formulação do problema geral, ao tratamento de restrições operacionais não explícitas e à aquisição e manutenção de dados.

AGs são métodos de otimização por busca, inspirados nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos, que se mostram promissores na resolução desse tipo de problema . Um AG processa populações de soluções, em analogia com os “cromossomos” biológicos. Corresponde a uma estrutura de códigos, geralmente vetor ou cadeia de bits que representa uma possível solução do problema a ser otimizado, ou um conjunto de parâmetros utilizáveis na avaliação da função objetivo, a ser maximizada ou minimizada. O conjunto de todas as configurações que as soluções podem assumir constitui o “espaço de busca” do problema. Se a solução representa  $n$  variáveis de decisão, então o espaço de busca é um espaço com  $n$  dimensões.

De acordo com **Vendhuizen(1999)** os AGs são regidos basicamente por três componentes:

- populações de soluções candidatas(cromossomos);
- processo de seleção de soluções candidatas mais adequadas;
- processos de manipulação de variáveis inspirados na genética das populações, geralmente recombinações e mutações.

Fazendo uma analogia com o processo de seleção natural, as soluções candidatas são chamadas de indivíduos(cromossomos), sendo o conjunto dessas soluções chamado de população. No processo de seleção, que pode ser estocástico ou determinístico, os indivíduos de menor adaptabilidade são removidos enquanto os indivíduos mais aptos reproduzem-se gerando descendentes.

A recombinação e a mutação ajudam a gerar novas soluções a partir de variações sobre as soluções existentes. O operador recombinação(*crossover*), geralmente, efetua a criação de duas

novas soluções(filhas) a partir de duas soluções(pais) já existentes, com uma probabilidade de recombinação associada a este operador. O operador mutação(*mutation*) é responsável por modificar eventualmente as soluções através de pequenas variações no seu código, de acordo com uma probabilidade de mutação.

A implementação dos AGs pode ser descrita esquematicamente da seguinte forma:

- escolha da sistemática de representação dos grupos de variáveis de decisão que definem completamente as soluções, cujos valores pretende-se determinar;
- geração de uma população inicial de soluções alternativas geralmente aleatória;
- definição do módulo de avaliação de performance das soluções, chamado de função objetivo ou de aptidão;
- especificação dos operadores genéticos para a realização dos mecanismos de seleção, recombinação e mutação;e
- escolha dos parâmetros dos AGs tais como probabilidades de recombinação e mutação e tamanho da população.

## Otimização Multiobjetivo

Muitos problemas reais envolvem a otimização com base em mais de um critério ou objetivo. Uma abordagem simples para tratar de um conjunto de funções objetivo  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , é formar uma nova função objetivo  $F$ , obtida da soma ponderada das funções objetivo, ou :

$$F = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (1)$$

em que  $w_i$  é o peso atribuído a cada objetivo de maneira que ele assuma maior ou menor importância relativa, na avaliação da qualidade da solução. A minimização de  $F$  minimiza todas as funções  $f_i$ . No entanto, as funções objetivo podem ser conflitantes, no sentido de que otimizar uma função degrada a otimização da outra função.

As abordagens mais gerais para este tipo de problema envolvem a aplicação do conceito de não dominância de Pareto, segundo o qual uma solução  $x_1$  é dita não dominada por uma solução  $x_2$ , quando ela é, no mínimo, tão boa quanto a solução  $x_2$ , de acordo com todas as funções e,  $x_1$  é melhor que  $x_2$ , de acordo com pelo menos uma das funções, ou seja:

$$(\forall_i : f_i(x_1) \geq f_i(x_2))E(\exists_j : f_j(x_1) > f_j(x_2))$$

A meta do AG multiobjetivo é encontrar o conjunto Pareto-ótimo( também chamado de fronteira Pareto-ótimo), que corresponde ao conjunto de todas as soluções não-dominadas do espaço de busca. Seja S o espaço de busca, o conjunto Pareto-ótimo P é dado por:

$$P = \{x_i \in S \mid \nexists x_j \in S : x_i \text{ é do min ado por } x_j\}$$

AGs são naturalmente apropriados à análise da superfície Pareto, pelo fato de trabalharem com populações de solução, retornando como respostas um conjunto de soluções ótimas ao invés de uma única solução.

A partir de 1993, diferentes algoritmos evolucionários foram sugeridos para resolver problemas de otimização multiobjetivo. Fonseca e Fleming(1993) com o *Multi-Objective Genetic Algorithm(MOGA)*, Horn et al.(1994) com o *Niched-Pareto Genetic Algorithm(NPGA)* e Srinivas e Deb(1994) com o *Nondominated Sorting Genetic Algorithm(NSGA)*, foram os precursores desta técnica, cujas características básicas são: avaliação dos membros de uma população com base no conceito de dominância Pareto e preservação da diversidade de soluções. Tais algoritmos mostraram-se eficientes na obtenção de múltiplas soluções não dominadas, para vários problemas de engenharia. No entanto, pesquisadores têm sugerido a introdução do elitismo para melhorar as suas propriedades de convergência. Dentre os algoritmos evolucionários multiobjetivo que consideram o elitismo, destacam-se os algoritmos *SPEA e SPEAII(Strength Pareto Evolutionary Algorithm-Zitzler e Thiele-1998 e Zitzler-2001)*, *PAES(Pareto-Archived-Knowles e Corne,1999)*, AG elitista de Rudolph,1999, *PESA e PESAII( Pareto Envelope-based Selection Algorithm-Corne et al.,2000 e 2001 ) e NSGAII(Nondominated Sorting Genetic Algorithm-Deb et al.,2002)*.

No trabalho desenvolvido por **Zitzler e Thiele(1998)** o elitismo foi introduzido através da manutenção de uma população externa(secundária). Esta população armazena um número fixo de soluções não dominadas previamente encontradas no início da simulação. Em cada geração, novas soluções não dominadas são comparadas com a população externa existente e as soluções não dominadas resultantes são preservadas. Este algoritmo não somente preserva as melhores soluções como também as utiliza para participar das operações genéticas com o objetivo de atingir melhores regiões dentro do espaço de busca.

Este trabalho emprega o método *SPEA*, baseado no elitismo, implementado através do código desenvolvido por Andrzej Jaskiewicz na *Multiobjective Methods Metaheuristic Library(MOMHLib++)* para C++. Observa-se que a referida biblioteca permite que os operadores de recombinação e mutação sejam implementados pelo próprio usuário em conformidade com o problema específico a ser tratado.

## **DESCRIÇÃO DO PROBLEMA**

O propósito deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta flexível e facilmente manuseável por parte dos operadores de sistemas de abastecimento de água, fornecendo claramente um conjunto de regras operacionais, em tempo real, de acordo com as condições de funcionamento de cada unidade do sistema. Para análise e avaliação dos resultados, foi utilizada uma parte do sistema de macro adução de Goiânia, devido a sua grande complexidade. Acredita-se que, atingindo os objetivos para um sistema de grande porte, o modelo poderá ser implementado a outros sistemas. Para melhor entendimento da aplicação proposta, apresenta-se um esquema do sistema estudado(figura 1), com suas características principais, cuja operação pode ser descrita sucintamente da seguinte forma:

- da estação elevatória de água tratada(EE-ETA(2)) instalada na área da estação de tratamento(ETA(0)), a água é bombeada através da adutora de água tratada AAT-ETA/S(3) ao reservatório de nível variável SENAC(4).

- a estação elevatória de água tratada EE-SENAC(5) succiona água do reservatório SENAC e recalca(bombeia) para três grandes reservatórios de jusante, reservatórios PEDRO LUDOVICO(8.1), AMAZONAS(8.2) e ITAPOÃ(8.3).

- os três reservatórios, citados anteriormente, contam atualmente com variações de níveis de água e características de operação diferenciados, dependentes das demandas em cada área específica. Em função destas características, foram previstas estruturas de controle(ECs) na entrada de cada reservatório:ECs PEDRO LUDOVICO(7.1), AMAZONAS(7.2) e ITAPOÃ(7.3). Estas ECs são compostas de válvulas de controle automático(VCA) que têm como objetivo, o controle das vazões nas entradas dos reservatórios em função das variações das demandas ao longo do dia. Por meio de um sistema inteligente, as informações relativas ao funcionamento de cada VCA são transmitidas à EE-SENAC(5). Estas informações nortearão o funcionamento da elevatória. Basicamente, decisões como : número de bombas em funcionamento num intervalo de tempo e

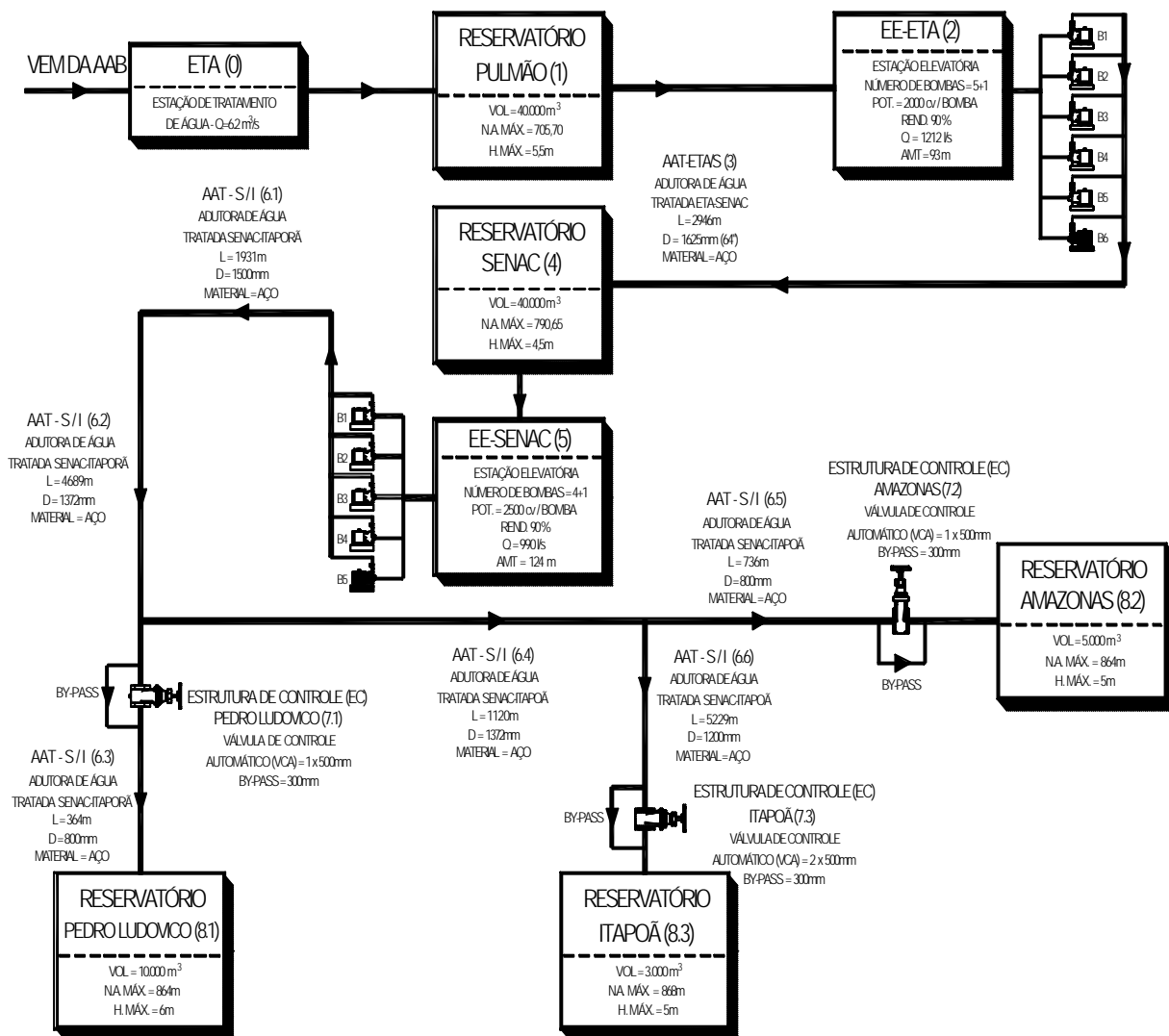


Figura 1 – Esquema de macro-adição de Goiânia

valor da rotação do conjunto motor-bomba, visando a redução do consumo de energia elétrica, devem ser avaliadas e implementadas em função das informações advindas das ECs.

### Definição das Funções Objetivo

Vários objetivos podem ser listados quando avaliamos um sistema real de abastecimento de água, visando a sua operação ótima. Uma das hipóteses é avaliar o custo operacional, incluindo a manutenção e a operação do sistema, levantando dados sobre todos os parâmetros mecânicos e

hidráulicos relevantes para esta avaliação. Vários trabalhos já desenvolvidos, demonstram que, de todos os parâmetros relacionados a esta questão, o mais relevante é o custo relativo ao consumo de energia elétrica nas estações elevatórias de água. Uma outra possibilidade é avaliar a confiabilidade do sistema em atender os consumidores de forma coerente. Neste caso, vários parâmetros podem ser enumerados. De acordo com **Bao e Mays .(1990)** a confiabilidade dos sistemas de abastecimento de água pode ser considerada sob o aspecto hidráulico ou mecânico. O primeiro está relacionado aos parâmetros físicos, mutáveis em função de mudanças operacionais no sistema e, o segundo, às possíveis intervenções sobre os equipamentos. Aspectos relativos à qualidade da água potável também podem ser considerados como atributos da confiabilidade hidráulica.

Este trabalho avalia dois objetivos básicos. Os objetivos econômico e de confiabilidade hidráulica relativos aos sistemas de distribuição de água potável.

No caso do objetivo econômico, pretende-se minimizar os custos relativos ao consumo de energia elétrica nas estações elevatórias de água. Para unidades com fornecimento em média e alta tensão, o custo de energia elétrica é composto de duas parcelas: o consumo em kWh e a demanda máxima mensal em kW.

A demanda máxima mensal é definida como sendo o maior valor registrado para a potência elétrica exigida pelos motores do sistema elétrico,  $\text{php}(\text{rendimento bomba} \times \text{motor})$ . Este valor é integralizado a cada 15(quinze) minutos pelo medidor de energia e registrado o maior no mês(quando a avaliação for mensal). Unidades com demandas maiores que 300kW são compulsoriamente contratadas no regime de tarifas horo-sazonais(tarifas para o período seco e para o úmido) que consideram as tarifas no período de ponta( 18 às 21h) e fora de ponta. Neste caso há dois tipos de cobrança, a azul e a verde. A verde tem tarifa de demanda única. A azul tem tarifas diferentes nos dois horários. No caso do sistema de abastecimento de água de Goiânia, a Saneamento de Goiás S.A.(SANEAGO) adota a seguinte prática: para unidades pequenas(<75kVA) que funcionam pouco, abaixo de 14h/dia, utiliza-se tarifa de baixa tensão. Para unidades que podem parar pelo menos 2(duas) horas no horário de ponta , aplica-se a tarifa verde. Para unidades menores que 300kW que não podem parar no horário de ponta, utiliza-se tarifa convencional( valor constante durante as 24 horas do dia). Para unidades maiores que 300kW, que não podem parar no horário de ponta, utiliza-se tarifa azul, considerada neste trabalho.

O consumo de energia é o valor efetivamente medido, totalizado durante o período de faturamento, expresso em kWh.

O custo diário para cada bomba de uma estação elevatória é dado pela soma do custo do fator de demanda máxima mais o custo do consumo medido.

Considerando-se como função objetivo os custos de energia elétrica relativos à operação das estações elevatórias, tem-se a seguinte expressão:

$$FO_{-1} = \text{Mín} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} Cu(t) * \frac{Q(t,i) * H(t,i) * g}{h(t,i)} + D * Tarifa \quad (2)$$

onde :

$t$  = número de estações elevatórias;

$i$  = hora do dia;

$Cu(t)$  = custo unitário da tarifa(R\$/ h);

$Q(i,t)$  = vazão bombeada( $m^3 / s$ );

$H(i,t)$  = carga hidráulica (m);

$h(i,t)$  = rendimento do conjunto(%);

$D$  = fator de demanda máxima(kW);

$Tarifa$  = tarifa do fator de demanda máxima(R\$/ kW).

Como atributos de confiabilidade, três parâmetros hidráulicos do sistema foram avaliados: níveis de atendimento às pressões nos nós de demanda, níveis mínimos nos reservatórios de distribuição e níveis de atendimento às demandas. Neste trabalho não foram consideradas a qualidade da água assim como a confiabilidade mecânica , apesar do conhecimento de suas importâncias na otimização operacional do sistema.

Optou-se por atribuir valor binário(0 ou 1) para os objetivos, caso esses fossem alcançados ou não. Desta forma, tem-se o seguinte equacionamento, modificado de **Righetto(2002)**, para o objetivo de confiabilidade relativo ao atendimento às pressões nos nós de demandas:

$$O_{-1} = \sum_{j=1}^M \left[ \sum_{t=1}^{24} e(j,t) \right] \quad (3)$$

$e(j,t) = 1$  se  $P_{\text{mín}}(j) < P(j) < P_{\text{máx}}(j)$

$e(j,t) = 0$  se  $P(j) < P_{\text{mín}}(j)$  ou  $P(j) > P_{\text{máx}}(j)$

onde :

$P(j)$  = pressão no nó de consumo;

$P_{\text{mín}}(j)$  = pressão mínima admissível no nó  $j$ ;

$P_{\text{máx}}(j)$  = pressão máxima admissível no nó  $j$ .

Para o caso dos níveis mínimos nos reservatórios, tem-se:

$$O_{-2} = \sum_{z=1}^x \sum_{t=1}^{24} e_r(z,t) \quad (4)$$

onde :

$$e_r(z,t) = 1, \quad \text{quando : } \begin{cases} Q_r(z,t) \leq 0 (\text{esvaziando}) \text{ e } \sum_{j=1}^m Q(j,t) > \bar{Q} \\ Q_r(z,t) > 0 (\text{enchendo}) \text{ e } \sum_{j=1}^m Q(j,t) < \bar{Q} \\ H_r(z,t) = H_{M\acute{a}x}(z) \end{cases}$$

$$e_r(z,t) = -1, \quad \text{quando } H_r(z,t) = H_{M\acute{i}n}(z)$$

$$e_r(z,t) = 0, \quad \text{quando outra situa\c{c}\~{a}o ocorrer}$$

Para o caso das demandas tem-se:

$$O_{-3} = \sum_{j=1}^m \left[ \sum_{t=1}^{24} \frac{Q_f(j,t)}{Q_r(j,t)} \right] \quad (5)$$

onde :

$$Q_f = \text{vaz\~{a}o fornecida};$$

$$Q_r = \text{vaz\~{a}o requerida}.$$

Dessa forma a fun\c{c}\~{a}o objetivo relativa \~{a} confiabilidade hidr\~{a}ulica ser\~{a}:

$$FO_{-2} = M\acute{a}x\{O_{-1} + O_{-2} + O_{-3}\} \quad (6)$$

Em geral \~{e} dif\acute{i}cil encontrar uma solu\c{c}\~{a}o simples que atenda aos dois objetivos(m\acute{i}nimo custo e m\acute{a}xima confiabilidade). Ao inv\~{e}s disso, objetiva-se identificar o conjunto de solu\c{c}\~{o}es n\~{a}o dominadas chamado frente Pareto utilizando algoritmos gen\~{e}ticos multiobjetivos.

### Representa\c{c}\~{a}o das Solu\c{c}\~{o}es

Cada vetor representativo de uma possível  $S_1$  para a estratégia operacional do sistema tem a seguinte característica:

$$S_1 = \left[ \left( \underbrace{B_{(0,1)}, B_{(0,2)}, B_{(0,3)}, V_{(0,4)}, V_{(0,5)}, V_{(0,6)}, V_{(0,7)}}_{\text{Hora 0}} \right) \dots \left( \underbrace{B_{(23,1)}, B_{(23,2)}, B_{(23,3)}, V_{(23,4)}, V_{(23,5)}, V_{(23,6)}, V_{(23,7)}}_{\text{Hora 23}} \right) \right] \quad (7)$$

Onde :

$S_1$  = vetor solução;

$B$  e  $V$  = variáveis de decisão;

$B_{(0,1)}$  = funcionamento da bomba número1 na hora zero(0/1 – desligada / ligada);

$V_{(0,1)}$  = válvula número1 na hora zero(0/1 – fechada / aberta).

## MODELO COMPUTACIONAL PROPOSTO

Um modelo computacional foi implementado compreendendo basicamente três módulos: primeiro o de avaliação hidráulica, utilizando códigos da *Toolkit-Epanet2*, um de implementação de AGs multiobjetivos, utilizando códigos da biblioteca *MOMHLib* e um último de avaliação dos objetivos do problema. Os parâmetros utilizados no módulo de otimização foram:

- recombinação linear;
- mutação aleatória;
- população – 300;
- gerações – 50;
- probabilidade de recombinação – 0,87;
- probabilidade de mutação – 0,006.

## RESULTADOS

O modelo foi aplicado a uma parte do macro sistema de Goiânia, apresentado na figura 1, cujos dados básicos constam das tabelas 1 e 2. Estes dados foram fornecidos para o EPANET através do arquivo J.Leite411.inp.. As figuras 2 e 3 mostram as frentes Pareto produzidas após a aplicação do modelo.

## NÓS

Número	Cota(m)	Demanda(l/s)	Hora	Multipl.
2	788	0	1	0.3
3	788	0	2	0.2
4	788	0	3	0.15
5	788	0	4	0.2
6	788	0	5	0.45
7	788	0	6	0.43
8	801	0	7	0.55
9	823	0	8	0.6
10	845	0	9	0.8
11	840	0	10	0.9
12	845	0	11	1
13	845	0	12	0.9
15	849	313	13	0.8
16	848	0	14	0.7
17	850	0	15	0.65
18	850	0	16	0.65
20	851	248	17	0.6
21	852	0	18	0.6
22	832	0	19	0.63
23	832	0	20	0.68
25	825	22	21	0.65
26	850	0	22	0.6
27	850	0	23	0.3
28	850	0	24	0.3
30	850	271		
1	Reservatório Senac			
14	Reservatório P. Ludovico			
19	Reservatório Amazonas			
24	Reservatório Atlântico(*)			
29	Reservatório Itapoã			

Tabela 1 – Dados dos nós – macro Goiânia

(\*)- Não consta na figura 1 – ao lado do Itapoã

## TUBULAÇÕES

Número	Nó Inicial	Nó Final	Comp(m)	Diam(mm)	Coef.(HW)
1	1	2	50	1500	100
2	2	3	5	1200	100
3	2	6	5	1200	100
4	4	5	5	1200	100
5	5	7	5	1200	100
6	5	8	2050	1500	100
7	8	9	2840	600	100
8	9	10	3990	800	100
9	10	12	200	800	100
10	8	11	4725	1372	100
11	11	10	120	800	100
12	13	14	50	800	100
13	14	15	10	800	100
14	11	16	1050	1372	100
15	16	21	5368	1200	100
16	21	22	441	800	100
17	23	24	50	800	100
18	24	25	10	800	100
19	21	26	2070	800	100
20	26	27	50	1000	100
21	28	29	50	1000	100
22	29	30	10	1000	100
23	16	17	473	800	100
24	18	19	50	800	100
25	19	20	10	800	100
26	Estação Elevatória Senac-Bomba 1				
27	Estação Elevatória Senac-Bomba 2				
28	Estação Elevatória Senac-Bomba 3				
29	Estrutura Controle P. Ludovico				
30	Estrutura de Controle Amazonas				
31	Estrutura de Controle Itapoã				
32	Estrutura de Controle Atlântico				

Tabela 2 – Dados dos trechos – macro Goiânia

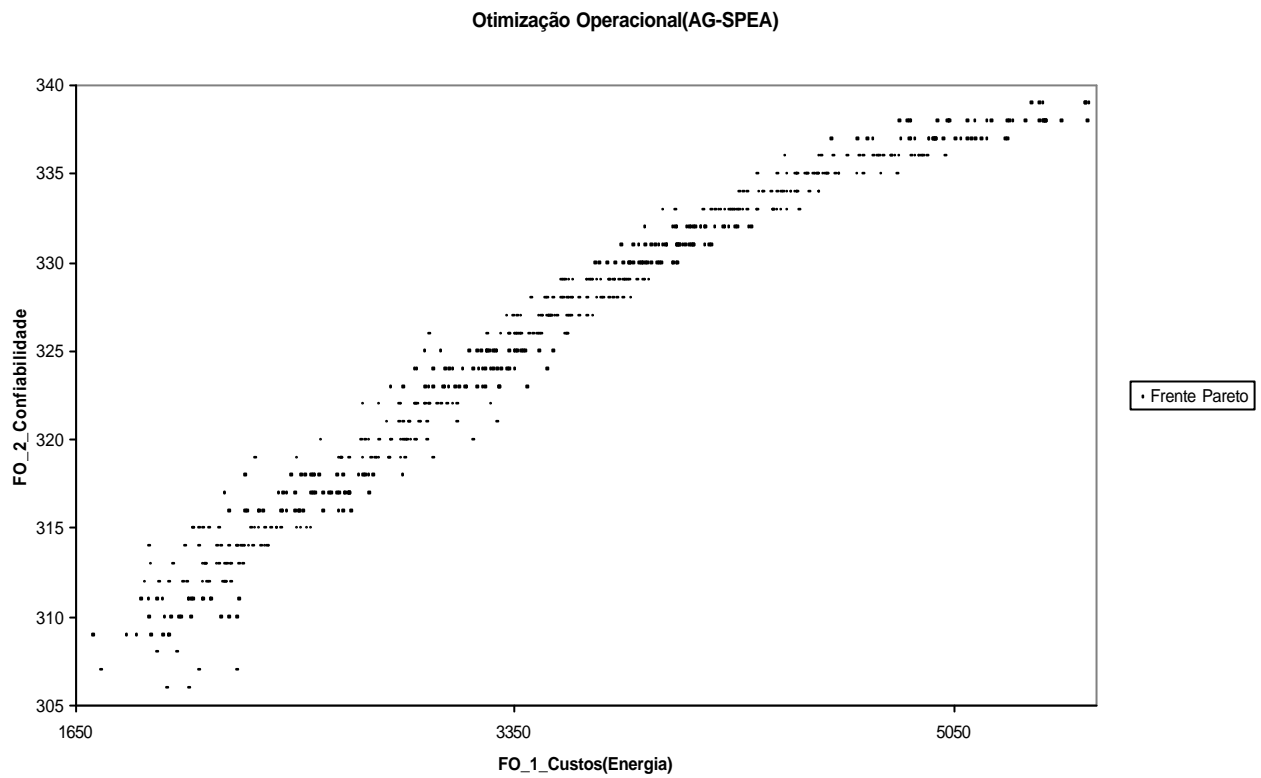


Figura 2 – Frentes Pareto – aplicação AG-SPEA - Goiânia

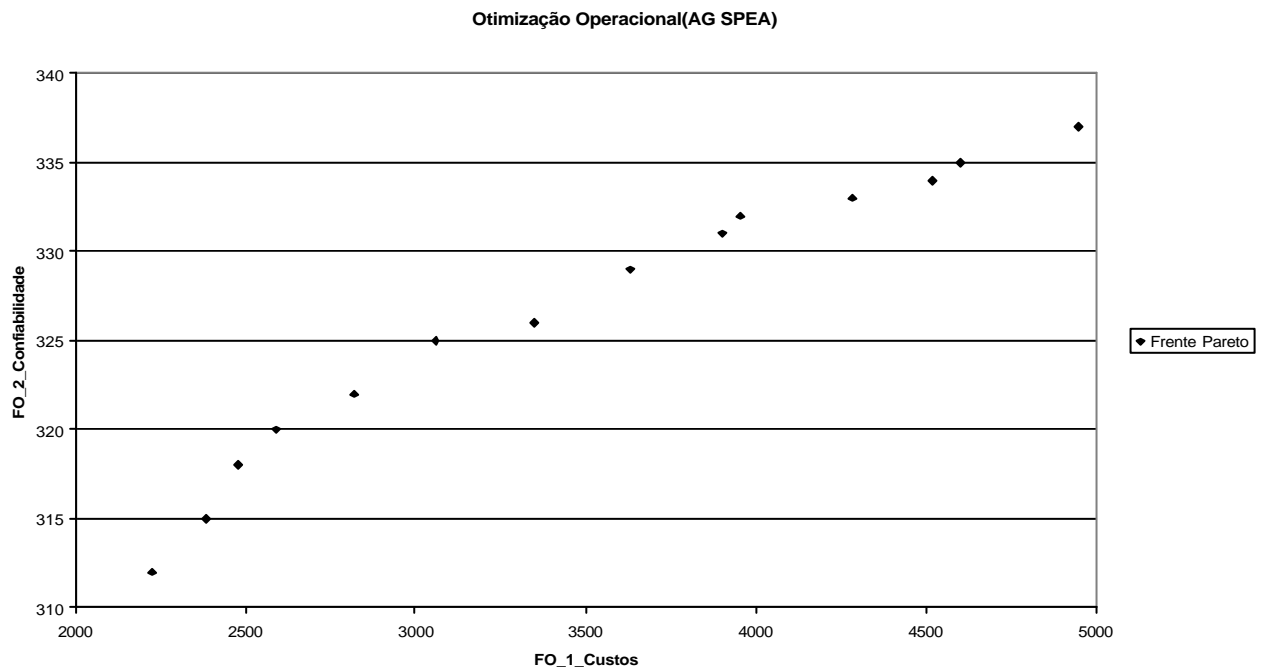


Figura 3 – Frente Pareto final com 16 estratégias operacionais ótimas

O gráfico da figura 2 reúne as frentes Pareto obtidas a partir de 300 populações iniciais aleatórias de soluções distintas. Tais resultados foram utilizados para a obtenção de uma única frente Pareto, através da aplicação direta do conceito de não-dominância. A frente resultante é apresentada na figura 3, onde são apresentadas 16 possíveis estratégias operacionais ótimas que atendem aos objetivos previamente traçados, quais sejam, minimização dos custos com energia elétrica nas estações de bombeamento e maximização da confiabilidade hidráulica.

Cada ponto dos gráficos apresentados anteriormente, representa uma solução(estratégia) operacional ótima para o sistema ao longo de 24 horas de funcionamento. Avaliando o gráfico da figura 3 percebe-se que há uma certa flexibilidade em termos de valores dos critérios(FO\_1 e FO\_2), fornecendo opções para que o responsável pela operação do sistema possa, de acordo com a estratégia adotada, favorecer o nível de atendimento ao usuário do sistema ou reduzir os custos com energia elétrica, convicto de que, independente da opção, a estratégia no global atende a todos os objetivos pré-estabelecidos.

As duas soluções(pontos) extremas do gráfico da figura 3 são detalhadas na tabela 3. Observa-se que elas correspondem às soluções de valores ótimos para FO-1 e FO\_2 da frente Pareto.

Solução	B	B	B	V	V	V	V	.	B	B	B	V	V	V	V	Função Objetivo 1 (FO_1)	Função Objetivo 2 (FO_2)
	0	0	0	0	0	0	0	.	2	2	2	2	2	2	2		
	1	2	3	1	2	3	4	.	3	3	3	3	3	3	3		
								.	1	2	3	1	2	3	4		
<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2222,79</b>	<b>312</b>
<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>4946,03</b>	<b>337</b>

Tabela 3 - Detalhamento das soluções extremas– B01(Bomba 1,hora 0) e V01(Válvula 1, hora 0),

## CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo de otimização operacional para sistemas de abastecimento de água utilizando como simulador hidráulico o EPANET2 e como otimizador o algoritmo genético multiobjetivo elitista denominado *Strength Pareto Evolutionary Algorithm-SPEA*.

O objetivo principal foi o de desenvolver uma ferramenta útil e bastante flexível para utilização por parte do operador de sistemas de abastecimento de água. Este objetivo ainda não foi plenamente alcançado, mas os resultados já obtidos são bastante animadores.

A intenção de apresentar estratégias operacionais alternativas ao operador do sistema, é dar flexibilidade para que ele possa decidir, com base em aspectos não mensuráveis e tão comuns no dia-a-dia da operação, a melhor delas.

Trabalhos futuros orientam para introdução de outros atributos na avaliação da confiabilidade do sistema, como, por exemplo, parâmetro de qualidade da água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Bao, Y.; Mays, L.W. (1990).** *Model for Water Distribution System Reliability.* Journal of Hydraulic Engineering, v.116, n.9, p.1119-1137.

**Deb, K. (2001).** *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms.* John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, England, 491p.

**Fonseca, C.M.; Fleming, P.J. (1993).** *Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization.* In: Fifth International Conference, San Mateo, CA. 8p.

**Galvão et. al (1999).** *Sistemas Inteligentes-Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais.* Editora da Universidade. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 246p.

**Jaszkiewicz, A.** *MOMHLib++: Multiple Objective Metaheuristics Library in C++.* <http://www.idss.cs.put.poznan.pl/~jaszkiewicz/MOMHLib>

**Ko, S.K. et. al. (1997).** *Multiobjective Analysis of Service-Water-Transmission Systems.* Journal of Water Resources Planning and Management, v.123, n.2, march, p.79-83.

**Koelle, E. et. al. (1996)** – *Personality Investigation of Hydraulic Networks using the MOC-Method of Characteristics.* In: 7<sup>th</sup> International Conference on Pipelines and Open Channels. Harrogate, U.K.. Proceedings, v.1, p -123-138.

**Luvizotto Júnior, E. (1995).** *Controle Operacional de Redes de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador.* São Paulo. 143p. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**Ormsbee, L.E.; Lansey, K.E. (1994).** *Optimal Control of Water Supply Pumping Systems.* Journal of Water Resources Planning and Management, v.120, n.2, march, p.237-252.

**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.16pgs.

**Rossman,L.A.(2001).** *EPANET 2 - Programmer's Toolkit : User's Manual.* U.S. Environmental Protection Agency.

**Taher,S.A.;Labadie,J.W.(1996).***Optimal Design of Water-Distribution Networks with GIS.* Journal of Water Resources Planning and Management,v.122,n.4,july,p.301-311.

**Veldhuizen,D.A. Van.(1999).***Multiobjective Evolutionary Algorithm: Classifications, Analyses and New Inovations.* PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering. Graduate School of Engineering. Air Force Institute Tchnology, Wright-Patterson AFB, Ohio, 270p.

**Zitzler,E.;Thiele,L.(1998).***An Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization:The Strength Pareto Approach.* Technical Report 43,Computer Engineering and Networks Laboratory(TIK),Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.