

Como utilizar

Windows

- 1 - Insira o CR-ROM no leitor de CD
- 2 - Aguarde a abertura da tela do navegador
- 3 - Navegue normalmente no CD

Requisitos mínimos do sistema

PC Pentium 100
Leitor de CD 4x
16 MB de RAM
Navegador da Internet

Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água:
O Estado da Arte e Questões Avançadas
Anais do Seminário Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água, 10 a 13 de junho de 2002, João Pessoa - PB: UFPB, 2002.
Disponível em CD-ROM.

Elaboração: Saulo de Társio Marques Bezerra
Gustavo Arruda Ráthiel Lima

Universidade Federal da Paraíba
Laboratório de Recursos Hídricos - DTCC/CT

SEMINÁRIO

**PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE
REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA
O ESTADO DA ARTE E QUESTÕES AVANÇADAS**

10 a 13 de junho de 2002

Hotel Litoral - João Pessoa - Paraíba - Brasil

| Realização | Apoio Institucional |
|---|--|
|  UFPB  ABRI  ABES  CAPES |  CNPq  SEDU/PR PMSS  CREA-PB  Prefeitura Municipal de João Pessoa - PB  MECO Esporto  Scientec |

UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTIOBJETIVOS NO DIMENSIONAMENTO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Klebber Teodomiro Martins Formiga ¹; Fazal Hussain Chaudhry ²

F225u

Resumo— O dimensionamento de redes de abastecimento é apresentado como o principal problema a determinação dos diâmetros das tubulações. Vários pesquisadores têm buscado nas últimas décadas uma metodologia capaz de dimensionar essas redes considerando diversos aspectos e incertezas características desse tipo de projeto. O objetivo deste trabalho é o emprego de um método multiobjetivo baseado em algoritmos evolucionários para a geração de uma série de soluções não-dominadas. As funções objetivas avaliadas foram: o custo de implantação do sistema, as perdas por vazamento na rede e a capacidade de atendimento das vazões. Para a determinação da fronteira de Pareto, utilizou-se o toolbox de domínio público MOEA desenvolvido para o MATLAB acoplado a um simulador hidráulico híbrido baseado no método de Nielsen. A metodologia mostra-se promissora, visto que é possível determinar a região não-dominada em um número relativamente pequeno de iterações.

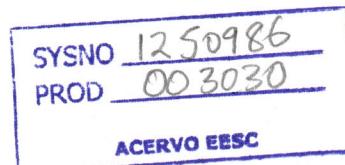
Abstract— The critical problem in design of water supply networks relates to determination of pipe diameters. Several authors have focused on the methods capable of sizing the network considering uncertainty and other important aspects. This study presents an application of multiobjective decision making using evolutionary algorithms to generate a series of nondominated solutions. The three objectives considered herein include investment costs, leakage losses and system demand supply ratio. In order to determine the Pareto frontier the public domain toolbox MOEA deve loped to MATLAB coupled with a hybrid hydraulic simulator based on the method of Nielsen. This technique is found to be quite promising, the non-dominated region being identified in reasonably small number of iterations.

Palavras Chave: otimização multiobjetivo, projeto de redes, algoritmos evolucionários.

1250986
290702

¹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo—Escola de Engenharia de São Carlos—São Carlos - SP CEP: 13.560-250 Fone: 0xx16-3376-4386 Fax: 0xx16-273-9550 e-mail: klebberformiga@uol.com.br

² Professor Titular do Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo—Escola de Engenharia de São Carlos—São Carlos - SP CEP: 13.560-250 Fone: 0xx16-273-9534 Fax: 0xx16-273-9550 e-mail: fazal@sc.usp.br.



INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios que o pesquisador responde é o dimensionamento das redes de abastecimento, que têm enfrentado é a definição de uma metodologia que possa ser realmente aplicada de modo a gerar resultados numéricos confiáveis sob o ponto de vista do atendimento das demandas sob diferentes situações. Na busca por essa resposta, diversos métodos foram propostos, porém, tais métodos apresentam inconvenientes, seja pela dificuldade ou inviabilidade de serem implementados numericamente, seja pela geração de resultados não satisfatórios sob o ponto de vista prático do funcionamento das redes.

Os primeiros métodos de dimensionamento de redes, considerando técnicas de pesquisa operacional, buscavam obter o máximo rendimento econômico das mesmas. Esses métodos, como o proposto por Alperovitz e Shamir (1977), surgiram em meados da década de 1970 e propunham o dimensionamento da rede considerando aspectos econômicos de implantação e operação. Tais metodologias eram baseadas inicialmente em programação linear (Alperovitz e Shamir, 1977; Quidry et al., 1981), posteriormente foram utilizadas diferentes técnicas de programação não-linear (Morgane Gouter, 1985; Fujiwara et al., 1987; Formiga, 1997), além de algoritmos genéticos (Savic e Walters, 1997). Verificou-se, entretanto, que à medida que as redes ficavam mais econômicas, a sua viabilidade do ponto de vista operacional era comprometida, já que o projeto, que era para ser um malhado, tendia a se tornar uma rede ramificada, uma vez que esta é mais econômica do que a primeira, e o método matemático de otimização tenderá a encontrar-se imprevisível e de menor custo.

Devido a essa situação, procurou-se desenvolver uma metodologia para o dimensionamento dos sistemas de distribuição de água que considerasse a sua capacidade de atender as demandas sob condições adversas ou sob diferentes condições de vazão. A primeira dificuldade deste processo diz respeito à definição e escolha da medida de falha. Tradicionalmente, considera-se que o sistema falhou quando, em um determinado tempo, a pressão em um nó qualquer da rede é menor que a pressão mínima requerida. Modelos de simulação como o EPANET 2 (Rossman, 2000), utilizados para a avaliação hidráulica da rede, assumem que a demanda é totalmente satisfeita. Ou seja, em situações de falha, não atendimentodapressãomínima,não há diferença se a carga não foi de 99% ou 1% da mínima exigida.

Com a finalidade de contornar esse problema, advindo da definição tradicional de falha, foram desenvolvidos métodos que incorporam a verdadeira falha ao modelo. Conceitos de capacidade de atendimento que consideram as demandas como sendo dependentes da carga hidráulica no nó têm sido muito utilizado (Bhave, 1981; Jowitt e Xu, 1993; Fujiwara e Li, 1998; Tanyimboh et al., 2001)). Tais métodos, embora apresentem diferentes funções para relacionar as demandas nodais com as pressões possuem em geral a mesma finalidade: determinar o percentual de restrição da demanda proveniente do atendimento de uma carga mínima exigida.

A utilização de uma forma de medir a capacidade de atendimento também incorpora um conceito muito comum nos dias atuais que é o de se dimensionar um projeto, esperando que o mesmo possa vir a falhar em algumas situações. Para os casos de rede, isso é decorrente da necessidade de implantação de novos projetos contando-s e com uma escassez acentuada de recursos, principalmente do poder público.

Além dos aspectos de falha, uma questão que têm sido tratada é a diminuição da pressão nos nós, especialmente nos períodos de consumo de água reduzido, como durante a madrugada. A redução dessa pressão temporal é a principal diminuição das perdas por vazamentos. Embora essas perdas sejam difíceis de se prever ainda na fase de projeto, elas certamente ocorrerão, pois, ainda que a execução dos projetos de construção possa obedecer as mais rigorosas normas de estanqueidade, a implantação das conexões domiciliares não são tão

rigorosas assim, e tais ligações são responsáveis por quase 80% das perdas por vazamento em cidades brasileiras (Silva, 1998).

Os métodos de otimização comuns trabalham tentando encontrar uma única solução ótima. No entanto, trabalhar com apenas uma perspectiva de projeto pode não ser a melhor escolha, particularmente quando essa alterna tiva é ótima com relação a apenas algum aspecto. Por exemplo, quando se faz a otimização do sistema de abastecimento, encontra-se uma configuração otimizada de modo a apresentar um custo um pouco maior, mas que apresenta uma menor perda por vazamento, dessa forma, obter resultados mais vantajosos. Sendo assim, é conveniente a obtenção de um conjunto de soluções otimizadas para então se decidir qual seria a mais adequada.

A partir dessa perspectiva, toma-se por bem a adoção de um método de dimensionamento que leve em consideração diversos objetivos do projeto, podendo ainda ter influência direta da pessoa responsável pela viabilização da obra ou seu financiamento. Este trabalho visa a implementação de uma técnica multiobjetivo baseada em algoritmos evolucionários para a determinação de conjunto de soluções ditas "não dominadas". Os objetivos tratados serão: minimizar os custos de implementação do sistema, maximizar a capacidade de atender as demandas e minimizar as perdas devido a vazamentos.

ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

A seguir serão mostrados os princípios da Optimização Multiobjetivo e algumas estratégias para a utilização dos algoritmos genéticos em problemas multiobjetivo.

Problemas Multiobjetivo

Nos problemas de otimização multiobjetivo deseja-se maximizar ou minimizar um certo número M , de funções objetivas. Sendo o vetor \mathbf{x} , chamado de variáveis de decisão, o problema pode ser expresso como:

$$\text{Maximizar ou Minimizar } \mathbf{Z}(\mathbf{x}) = [Z_1(\mathbf{x}), Z_2(\mathbf{x}), Z_3(\mathbf{x}), \dots, Z_M(\mathbf{x})] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito a: } g_j(\mathbf{x}) &= 0 & \forall j = 1, 2, \dots, J \\ h_k(\mathbf{x}) &\geq 0 & \forall k = 1, 2, \dots, K \\ x_i^{(U)} \geq x_i &\geq x_i^{(L)} & \forall i = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

onde $x_i^{(U)}$ e $x_i^{(L)}$ os limites superiores e inferiores das variáveis de decisão, e $g(x)$ e $h(x)$ são funções de restrição. O local dentro do espaço das variáveis de decisão limitado pelo conjunto de restrições de igualdade e desigualdade é denominado região factível (X_f).

Em problemas de otimização simples todos os componentes da região factível podem ser completamente ordenados segundo a função objetivo f da seguinte forma: sejam $\mathbf{x}^{(1)}$ e $\mathbf{x}^{(2)}$ duas soluções pertencentes a X_f , então uma das seguintes expressões é verdadeira:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}^{(1)}) &> f(\mathbf{x}^{(2)}); \\ f(\mathbf{x}^{(1)}) &< f(\mathbf{x}^{(2)}); \\ f(\mathbf{x}^{(1)}) &= f(\mathbf{x}^{(2)}). \end{aligned}$$

No entanto, quando se lida com mais de um objetivo, a região factível não pode ser completamente ordenada, mas parcialmente ordenada. (Pareto, 1896 apud Zitzler 1999).

Amajor parte das técnicas multiobjetivo para delimitação da região Pareto utilizam o conceito de *dominância*. Segundo esse conceito, todas as soluções são comparadas duas a duas sendo verificada a dominância ou não de uma sobre a outra.

Segundo Deb (2001), o conceito de dominância pode ser escrito da seguinte forma: uma solução $\mathbf{x}^{(1)}$ domina uma solução $\mathbf{x}^{(2)}$, se ambas as verificações forem verdadeiras:

- 1) a solução $\mathbf{x}^{(1)}$ não é menor que a solução $\mathbf{x}^{(2)}$ em todos os M objetivos;
- 2) a solução $\mathbf{x}^{(1)}$ é estritamente melhor que a solução $\mathbf{x}^{(2)}$ em pelo menos um objetivo.

A partir desse conceito pode-se dizer que existem três possibilidades de dominância entre duas soluções $\mathbf{x}^{(1)}$ e $\mathbf{x}^{(2)}$:

$$\begin{array}{ll}
 x^{(1)} > x^{(2)} & x^{(1)} \text{dominax}^{(2)} \\
 x^{(1)} < x^{(2)} & x^{(2)} \text{dominax}^{(1)} \\
 x^{(1)} \sim x^{(2)} & x^{(1)} \text{ex}^{(2)} \text{são indiferentes.}
 \end{array}$$

Seja uma série de soluções P , o *conjunto de soluções não-dominadas* P' , é composto por todas as soluções que não são dominadas por nenhum elemento de P . Quando a série P , é representada por toda a região factível, o conjunto não-dominado resultante P' , é chamado de *conjunto Pareto ótimo* (Deb, 2001).

Os Algoritmos Genéticos

As bases teóricas para os Algoritmos Evolucionários (AE) foram propostas por John Holland na década de 1960. Desde então diversas técnicas evolucionárias vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas, dentre elas os Algoritmos Genéticos (AGs). Esses métodos operam com conjuntos de candidatos que são constantemente mudados utilizando dois princípios básicos da evolução natural das espécies: *seleção* e *variação*. Esses princípios tentam representar a competição onde os indivíduos mais aptos continuam vivos e reproduzem-se passando adiante o seu código genético (Deb, 2001).

Devido a sua forma de trabalhar com uma gama de soluções a cada geração, os AGs são capazes de encontrar várias soluções não dominadas ao longo do processo de otimização. Essa propriedade aliada a sua adaptabilidade a diferentes tipos de problemas, torna os AGs importantes ferramentas de otimização multiobjetivo.

Os AGs são regidos basicamente por três componentes (Vendhuizen, 1999):

- populações de candidatos;
- processos de seleção dos candidatos mais aptos;
- processos de manipulação genética, geralmente recombinação e mutações.

Fazendo analogia com os processos de seleção natural, a solução é chamada de *indivíduos*, sendo o conjunto dessas seleções chamado de *população*. No processo de seleção, que pode ser estocástico ou determinístico, os indivíduos de menor adaptabilidade são removidos enquanto que os indivíduos mais aptos se reproduzem gerando descendentes.

A recombinação e a mutação ajudam a gerar novos indivíduos a partir da variações dos indivíduos existentes. O *operador de recombinação (crossover)*, geralmente, efetua a criação de dois novos indivíduos (filhos) a partir de um casal (pais) já existente, utilizando, para simular a natureza estocástica da evolução, uma *probabilidade de recombinação* associada a esse operador. O *operador de mutação* é responsável por modificar o indivíduo através de pequenas variações no seu código genético de acordo com uma *probabilidade de mutação*.

Baseados nos conceitos acima, a evolução dos indivíduos é simulada por um método iterativo que será descrito a seguir. Primeiramente, uma população inicial é gerada aleatoriamente, sendo esta população o ponto inicial da evolução. A seguir, procede-se uma sequência repetitiva de processos que consistem em avaliar, selecionar, recombinar e mutar os indivíduos, gerando, assim, novas populações. Esses processos são efetuados com base na *aptidão* de cada solução, em que indivíduos com melhores aptidões terão uma maior probabilidade de serem selecionados para o processo de recombinação, passando assim parte de seus genes à futuras populações. Cada iteração desse processo recebe o nome de *geração*. O número máximo de gerações é usualmente adotado como o critério de parada, porém, existem outras condições tais como: estagnação da população; existência de um indivíduo com qualidade suficientemente satisfatória; entre outras.

A solução procurada será o melhor indivíduo, ou seja, aquele que têm a maior aptidão da população final, ou seja, uma população dentro do processo.

Implementação dos AGs para Problemas Multiobjetivos

Dependendo do tipo de estratégia adotada, os AGs multiobjetivos (MOGA) podem ser classificados em:

- *métodos que consideram os objetivos separadamente*: estes métodos levam em conta no processo evolutivo, um objetivo de cada vez, ou seja, a cada tempo, a escolha do indivíduo para reprodução é feita considerando um objetivo diferente;
- *métodos que utilizam técnicas de agregação dos objetivos*: essas técnicas se baseiam no método dos pesos tradicionais, em que o problema multiobjetivo é substituído por uma função simples, no entanto, os pesos dessas funções são variados aleatoriamente a cada geração;
- *métodos baseados no conceito de dominância Pareto*: estes métodos utilizam o conceito de dominância Pareto proposto por Goldberg (1989), que procura separar os indivíduos através de uma ordenação ou ranking. Os indivíduos não dominados correspondem ao rank 1, sendo então temporariamente retirados da população. Os indivíduos não dominados restantes terão então rank 2, e assim por diante. A aptidão de cada indivíduo será então baseada no seu ranking, sendo que os indivíduos de ranking menor serão os mais aptos.

Neste estudo, o método utilizado é baseado no conceito de dominância Pareto, já que esta classe de métodos mostrou ser mais eficiente que as outras.

As duas maiores dificuldades enfrentadas para a aplicação dos AGs a problemas multiobjetivos são (Zitzler, 1999):

- acoplar a adaptabilidade aos processos de seleção de modo que a busca a região Pareto ótima;
- manter a diversidade da população evitando uma convergência prematura e manter uma boa distribuição das soluções ao longo da fronteira não dominada.

As técnicas para alcançar esses dois objetivos serão abordadas a seguir.

Aptidão e Processos de Seleção

Ao contrário dos problemas de otimizações simples, em que as funções objetivo e de aptidão são geralmente iguais, nos problemas multiobjetivos o cálculo da aptidão e o processo de seleção dos indivíduos, devem considerar os múltiplos objetivos do problema. Foram desenvolvidas várias estratégias, baseadas em técnicas utilizadas para encontrar ótimos em funções multi-modais, para a solução desse problema.

Para encontrar a região Pareto ótima utilizando técnicas evolucionárias é necessário introduzir uma forma de busca onde soluções distintas dentro dessa zona possam ser encontradas. Para isso é necessário manter a diversidade da população fundamental para que o processo de otimização multiobjetivo obtenha sucesso. Os algoritmos genéticos tradicionais tendem a convergir para uma única solução à medida que o processo avança, não sendo assim capazes de achar de forma adequada à região não dominada. Para superar essa deficiência, foram desenvolvidas várias técnicas sendo que as mais utilizadas são descritas a seguir.

- Divisão da aptidão

Baseia-se no princípio que indivíduos pertencentes à mesma região têm que dividir os recursos daquele local, permitindo a manutenção da estabilidade das subpopulações (níveis).

Segundo essa ideia, os indivíduos localizados na vizinhança de outro irão dividir com ele sua aptidão. A vizinhança nesse caso, é definida em termos da distância entre dois indivíduos $d(i,j)$, e sujeita a uma influência denominada $r_{i,j}$ (σ_{nicho}).

Matematicamente, a aptidão, $F'(i)$, de um indivíduo i será uma aptidão original, $F(i)$, dividida por um fator de nicho. Dessa forma:

$$F'(i) = \frac{F(i)}{\sum s} \quad (2)$$

onde s é um fator de divisão dos recursos entre o indivíduo e seus vizinhos, que é calculado por:

$$s(d(i, j)) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d(i, j)}{\sigma_{nicho}} \right)^c & \text{se } d(i, j) > \sigma_{nicho} \\ 0 & \text{se } d(i, j) \leq \sigma_{nicho} \end{cases} \quad (3)$$

-Restrição de recombinação

A recombinação é possível entre dois indivíduos quando os dois pertencem a uma mesma região, que é limitada por um parâmetro de distância σ_{mate} . Este método minimiza o aparecimento dos chamados indivíduos natos, ou seja, indivíduos que apresentam condições de aptidão inferior a seus pais, e melhora também a performance do processo de otimização.

FUNÇÕES OBJETIVO

O três objetivos tratados nesse trabalho serão descritos a seguir.

Minimização dos Custos

A função custo deve incorporar os gastos com os principais componentes presentes nos sistemas de distribuição de água. Esses gastos são divididos em: *custos de implantação* e *custos de operação*. Os custos de implantação são formados pelos gastos com compras e instalação de equipamentos como tubos e bombas, bem como com a construção de instalações como reservatórios. O gasto com tubos está relacionado diretamente ao diâmetro e classe de pressão do mesmo, como está se lidando com redes de abastecimento, em que as pressões são, por norma, limitadas superiormente a 50mca, embora em alguns casos possa ultrapassar os 100mca. A classe dos tubos não terá a mesma relevância de que se compara, por exemplo, a projetos de adutoras, dessa forma, o fator que irá influenciar no custo do tubo, neste trabalho, será o diâmetro. O custo do conjunto motor-bomba é diretamente ligado à vazão bombeada e altura de adução. No entanto, a escolha específica das bombas e motores se dará apenas na fase final de projeto. Sendo assim, a adoção do custo do conjunto motor-bomba será feita considerando o custo da potência instalada. O custo do reservatório é definido pela altura e capacidade do reservatório. Como a capacidade é definida através de norma, este custo será então função da altura. Os gastos referentes à operação podem ser expressos como função da energia consumida pelo conjunto motor-bomba. Esses gastos ocorrem ao longo da vida útil do projeto, fazendo-se necessário a utilização de um coeficiente de atualização dos custos.

O custos de implementação e operação dos sistemas de abastecimento podem ser escritos da seguinte forma:

$$Custo = \sum_{i=1}^{NT} CT(D)_i L_i + \sum_{j=1}^{NR} CR(HR)_j HR_j + \sum_{k=1}^{NB} CB(Pot)_k Pot_k + a_k \sum_{k=1}^{NB} CE_k Pot_k nh_k \quad (4)$$

sendo:

Custo - o custo total de implantação e operação do sistema;

CT(D)_i - o custo referente ao diâmetro D_i utilizado no trecho i ;

L_i - o comprimento do trecho i ;

NT - o número de trechos da rede;

CR(H)_j - o custo do reservatório relacionado com a elevação HR_j , doméstico;

HR_j - a elevação do reservatório j ;

NR - número de reservatórios do sistema;

CB(Pot)_k - custo do conjunto motor-bomba com potência Pot_k ;

Pot_k - potência do conjunto motor-bomba k ;

NB - número de conjuntos motor-bomba;

a_k - taxa de atualização do custo de operação;

CE_k - custo da energia referente ao conjunto k ;

nh_k -númeromédiodehorasdeutilizaçãooanualdoconjunto k ;

Essa é a formulação mais geral do problema, podendo em alguns casos não constar em um ou maiores termos.

Maximização da capacidade de atendimento

O montante de água fornecido em um determinado nó será função da pressão no mesmo. Para se fazer a correspondência entre a carga no nó e a sua demanda é preciso determinar uma função que relate essas duas variáveis.

Diversos trabalhos (Tucciareli et al. 1999; Fujiwara e Ganesharajah, 1993) desenvolveram fórmulas para esse fim, entretanto, a maioria dessas fórmulas — apesar de uma certa elegância matemática, pois apresentam continuidade tanto de 1ª quanto de 2ª ordem — são baseadas em critérios puramente empíricos. Uma relação hidráulicamente mais racional, que considera o nó como sendo um orifício, foi proposta por Chandapillai (1991). Segundo esse trabalho a carga em um determinado nó pode ser expressa assim:

$$Dem_j = \left(\frac{H_j - H_j^{\min}}{K_j} \right)^{\frac{1}{n_j}} \quad (5)$$

em que:

Dem_j — é a demanda no nó j ;

H_j — é a carga hidráulica no nó j ;

H_j^{\min} — é a carga hidráulica mínima necessária aocorrência da demanda;

K_j — é um coeficiente associado ao nó;

n_j — expoente associado à carga no nó tomado geralmente como sendo 2;

Segundo Tanyimboh et al. (2001), quando $Dem_j = Dem_j^{req}$ (demanda requerida) e $H_j = H_j^{req}$ (carga hidráulica desejável no nó). Para que a demanda seja atendida plenamente, é necessário que a carga no nó seja no mínimo de H_j^{req} . Sendo assim:

$$K_j = \left(\frac{H_j^{req} - H_j^{\min}}{(Dem_j^{req})^{n_j}} \right)^{\frac{1}{n_j}} \quad (6)$$

Dessa forma substituindo (6) em (5) obtém-se a seguinte relação:

$$Dem_j = 0 \quad \text{se} \quad H_j \leq 0$$

$$Dem_j = Dem_j^{req} \left(\frac{H_j - H_j^{\min}}{H_j^{req} - H_j^{\min}} \right)^{\frac{1}{n_j}} \quad \text{se} \quad H_j \leq H_j^{req} \quad (7)$$

$$Dem_j = Dem_j^{req} \quad \text{se} \quad H_j > H_j^{req}$$

Com base na vazão atendida no nó, pode-se estabelecer então a função que determine a falha no sistema. Fujiwara e Li (1998) propuseram maximizar a menor taxa de atendimento da demanda na rede, o que é:

$$\max \left[\min \left(\frac{Dem_j}{Dem_j^{req}} \right) \right] \quad \forall \quad j = 1..NN$$

sendo NN o número de nódos da rede.

(8)

Minimização das perdas por vazamentos

A finalidade deseja introduzir as perdas por vazamentos na função objetivo é tentar computar os efeitos nocivos decorrentes das altas pressões no sistema. As primeiras tentativas de minimizar os vazamentos em projetos de sistemas de distribuição de água buscavam minimizar o excesso de pressão na rede (Bargiela 1984, Miyaoka e Funabashi 1984). Entretanto, a incorporação de uma formulação que considerasse diretamente as perdas como dependentes da pressão só foi feita por Germanopoulos e Jowitt (1989).

Recentemente, Tucciarelli et al. (1999) propuseram uma formulação que relaciona diretamente o vazamento com os nós, ao invés dos trechos como no trabalho de Germano e Jowitt (1989). Essa nova formulação apresenta duas vantagens: uma grande do ponto de vista computacional, já que é maior o número de modelos desse tipo; a outra é que não se considera o diâmetro do tubo como uma variável, melhorando a determinação do coeficiente de perdas. A relação entre carga hidráulica e vazamento proposta por Tucciarelli et al. (1999) é dada por:

$$Vaz_j = (H_j - z_j)^{\alpha_j} \sum_{i=1}^{M_j} \theta_{ji} \frac{\pi}{2} D_{ji} L_{ji} \quad (9)$$

onde:

Vaz - é a vazão operativa por vazaamento no nó j ;

z_j - é a cota do terreno no nó j ;

θ_{ji} - é o coeficiente de perda do trecho i ligado ao nó j ;

α_j - é o expoente de perdas associado ao nó j ;

M_j - é o número de trechos adjacentes ao nó j .

Quando a demanda é variável no tempo, a fuga de água é calculada com base na média das vazões ao longo do tempo. Assim, a função objetiva para redução das perdas será:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^{NN} Vaz_j \quad (10)$$

ESTUDO DE CASO

O modelo de otimização proposto neste trabalho foi aplicado a uma rede composta por 9 trechos e 8 nós (Figura 1), proposta por Alperovitz e Shamir (1977). O sistema possui ainda dois reservatórios, sendo que um deles serve como reservatório de sobre.

O sistema de distribuição foi submetido a duas situações de carga. Na primeira, os nós podem ser abastecidos pelos dois reservatórios na segunda ou reservatório situado no nó 1, enche o reservatório do nó 8. Os dados das demandas, cotas e pressões mínimas requeridas nos nós são mostrados na Tabela 1. Os comprimentos dos trechos e coeficientes de perdas de carga são mostrados na Tabela 2. Os preços dos tubos por metro de comprimento são apresentados na Tabela 3.

Além dos diâmetros dos trechos, serão encontradas também as alturas dos reservatórios. O custo por unidade de elevação de cada reservatório é de 2.000 UMT/m.

Os dados referentes às possíveis perdas de água por vazamentos no sistema foram arbitrados levando-se em conta valores médios obtidos na literatura. Para o coeficiente de vazamento θ foi considerado como sendo $10^{-7} m^{-0.18} s^{-1}$ para todos os trechos, enquanto que o expoente α foi considerado como sendo 1,18.

Tabela 1 - Dados referentes aos nós da rede

| Nó | Cota (m) | Pressão Requerida (mca) | Demandas (l/s) | |
|----|----------|-------------------------|----------------|---------|
| | | | Cond. 1 | Cond. 2 |
| 1 | 210 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 150 | 30 | 27.8 | 0 |
| 3 | 160 | 30 | 27.8 | 0 |
| 4 | 155 | 30 | 33.3 | 0 |
| 5 | 150 | 30 | 75.0 | 0 |
| 6 | 165 | 30 | 91.6 | 0 |
| 7 | 160 | 30 | 55.6 | 0 |
| 8 | -195.5 | 0 | 0 | 83.3 |

Tabela 2 - Dados referentes aos trechos da rede

| Trecho | Comprimento (m) | f |
|--------|-----------------|------|
| 1 | 1000 | 0.02 |
| 2 | 1000 | 0.02 |
| 3 | 1000 | 0.02 |
| 4 | 1000 | 0.02 |
| 5 | 1000 | 0.02 |
| 6 | 1000 | 0.02 |
| 7 | 1000 | 0.02 |
| 8 | 1000 | 0.02 |
| 9 | 100 | 0.02 |

Tabela3-Custounitáriodatubulação

| Diametro (mm) | Custo (UMT/m) | Diametro (mm) | Custo (UMT/m) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 50 | 5 | 300 | 50 |
| 75 | 8 | 350 | 60 |
| 100 | 11 | 400 | 90 |
| 150 | 16 | 450 | 130 |
| 200 | 24 | 500 | 170 |
| 250 | 32 | - | - |

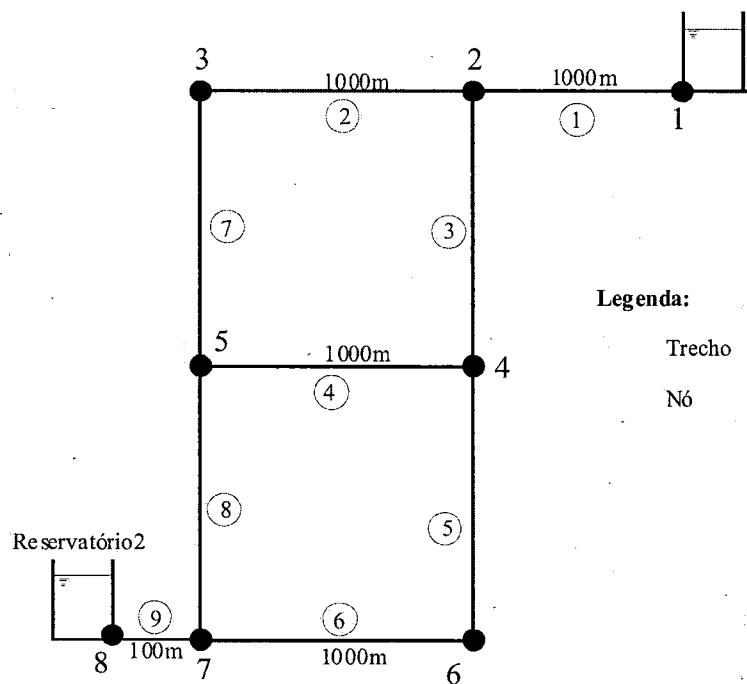


Figura1-Layoutdarede

Para simulação hidráulica utilizou-se um modelo híbrido baseado nos métodos da Teoria Lineare Newton-Raphson. Esse modelo mostrou-se muito eficiente na resolução de sistemas sendo capaz de convergir em poucas iterações (Nielsen 1989; Souza 1994). A idéia principal desse esquema está na capacidade de utilizar as vantagens de cada um dos métodos. O método de Newton-Raphson apresenta uma taxa de convergência pequena, não tendendo a nenhuma solução em alguns casos, quando a solução inicial não se encontra nas proximidades da solução final. Para se contornar esse problema, implementa-se, geralmente, sub-rotinas para a determinação da solução inicial. O método da Teoria Linear apresenta uma taxa de convergência inicial melhor do que o método Newton-Raphson não precisando de valores iniciais tão bons. No entanto, tal método tende a ficar oscilando em torno das soluções finais, apresentando dificuldades de convergência para sistemas complexos. O método proposto por Nielsen (1989) faz inicialmente algumas iterações com o método da Teoria Linear, obtendo-se uma boa aproximação das vazões e cargas hidráulicas nos nós. Essa aproximação é a solução inicial do método Newton-Raphson, que, apartir dessa solução, tende a convergir num número muito pequeno de iterações.

O simulador hidráulico foi implementado no MATLAB 6.1 sendo capaz de fazer operações de bombas, reservatórios, válvulas comuns e redutoras de pressão, bem como trabalhar com vazamentos e demandas dependentes da pressão.

A determinação da região não-dominada foi feita utilizando o Toolbox do MATLAB MOEA (Tan et al., 2001). Essa ferramenta utiliza algoritmos genéticos e técnicas evolucionárias com divisão da aptidão e restrição de casalamento para determinar a região Pareto ótima.

Neste trabalho, os seguintes parâmetros do algoritmo genético foram utilizados:

- método de seleção: Torneio de 2 indivíduos;
- probabilidade de mutação: 0.1;
- probabilidade de recombinação: 0.7;
- número de pontos de recombinação: 2.

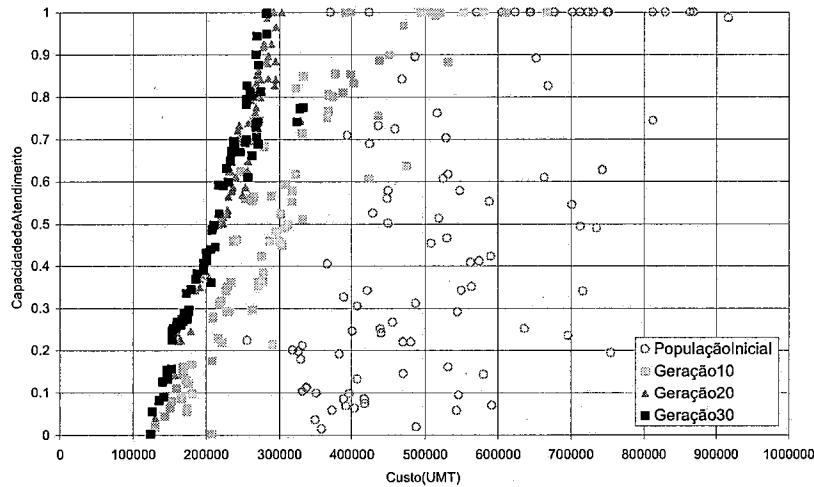


Figura2-Capacidade de atendimento versus custo para população inicial e primeiras gerações

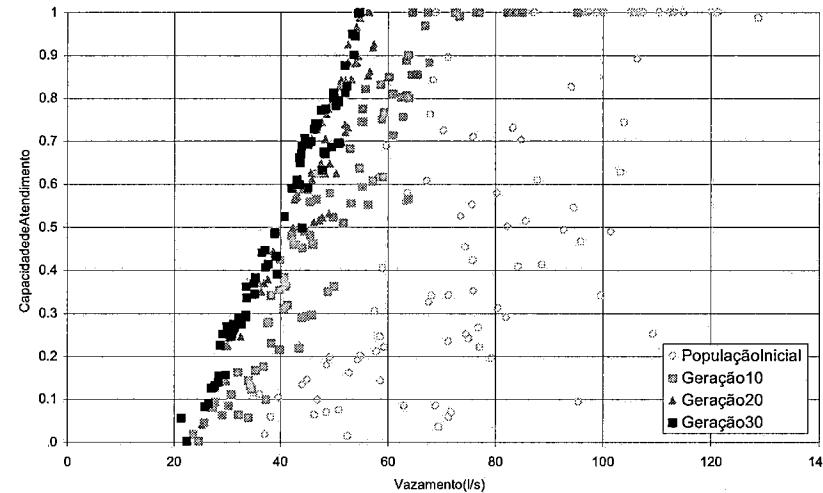


Figura3-Capacidade de atendimento versus vazamento para população inicial e primeiras gerações

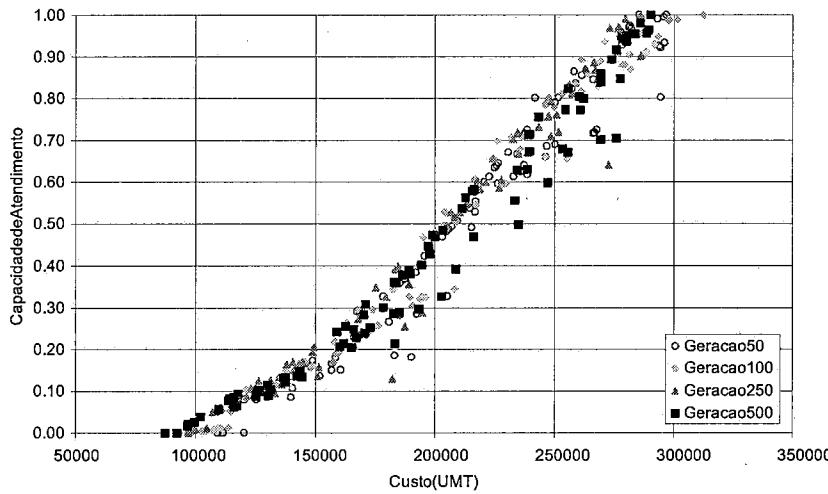


Figura4-Capacidade de atendimento versus custo para diversas gerações

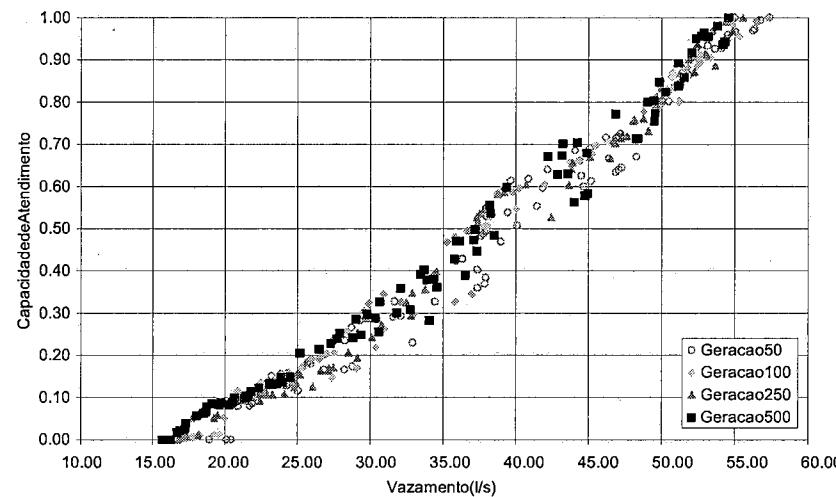


Figura5-Capacidade de atendimento versus vazamento para diversas gerações

Tabela4-Resultadosdealgumassoluçõesda500^ageração

| Trecho Individuo | Diámetro(mm) | | | | | | | | | Altura(m) | | Custo (UMT) | Vaz (l/s) | Cap.de Atend. |
|---------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|---|----------------|--------------|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 1 | 8 | | | |
| 11 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 0.05 | 0.20 | 0.25 | 17.98 | 0 | 290310 | 54.6 | 1.000 |
| 21 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 17.98 | 0 | 289360 | 52.9 | 0.965 |
| 37 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 0.05 | 0.15 | 0.35 | 17.37 | 0 | 285860 | 53.8 | 0.981 |
| 47 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 0.05 | 0.15 | 0.25 | 17.98 | 0 | 283770 | 53.2 | 0.955 |
| 60 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 0.05 | 0.15 | 0.25 | 16.16 | 0 | 280140 | 52.3 | 0.951 |
| 65 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.25 | 0.15 | 0.15 | 0.35 | 16.16 | 0 | 279720 | 54.2 | 0.937 |
| 75 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.25 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 17.98 | 0 | 275680 | 52.0 | 0.917 |
| 49 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 0.05 | 0.15 | 0.35 | 11.31 | 0 | 273740 | 51.1 | 0.893 |
| 22 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.10 | 0.30 | 0.25 | 0.10 | 0.20 | 0.20 | 17.98 | 0 | 269040 | 51.5 | 0.859 |
| 41 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.10 | 0.30 | 0.25 | 0.15 | 0.20 | 0.20 | 11.92 | 0 | 261950 | 49.0 | 0.800 |
| 82 | 0.30 | 0.15 | 0.25 | 0.10 | 0.30 | 0.25 | 0.15 | 0.20 | 0.20 | 17.98 | 0 | 260390 | 49.5 | 0.804 |
| 98 | 0.25 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.25 | 0.05 | 0.15 | 0.20 | 17.98 | 0 | 255460 | 42.2 | 0.672 |
| 40 | 0.25 | 0.15 | 0.30 | 0.05 | 0.25 | 0.30 | 0.15 | 0.15 | 0.35 | 17.98 | 0 | 253170 | 44.9 | 0.680 |
| 2 | 0.25 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 0.05 | 0.05 | 0.20 | 11.92 | 0 | 247050 | 39.4 | 0.599 |
| 12 | 0.30 | 0.15 | 0.30 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 17.98 | 0 | 243160 | 49.5 | 0.756 |
| 78 | 0.30 | 0.15 | 0.25 | 0.05 | 0.25 | 0.25 | 0.15 | 0.15 | 0.35 | 17.78 | 0 | 239070 | 48.3 | 0.714 |
| 91 | 0.25 | 0.15 | 0.30 | 0.05 | 0.25 | 0.30 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 11.31 | 0 | 234930 | 37.2 | 0.498 |
| 97 | 0.25 | 0.15 | 0.30 | 0.05 | 0.25 | 0.25 | 0.10 | 0.15 | 0.35 | 17.98 | 0 | 234440 | 42.8 | 0.629 |
| 16 | 0.25 | 0.15 | 0.30 | 0.05 | 0.25 | 0.25 | 0.10 | 0.15 | 0.15 | 11.31 | 0 | 216210 | 35.9 | 0.470 |
| 17 | 0.30 | 0.15 | 0.25 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 17.58 | 0 | 215590 | 44.8 | 0.578 |
| 19 | 0.25 | 0.15 | 0.25 | 0.05 | 0.25 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 17.58 | 0 | 211320 | 38.3 | 0.536 |
| 13 | 0.25 | 0.10 | 0.25 | 0.05 | 0.25 | 0.30 | 0.05 | 0.20 | 0.15 | 9.29 | 0 | 208730 | 33.5 | 0.392 |
| 55 | 0.25 | 0.15 | 0.25 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.35 | 16.16 | 0 | 203320 | 38.5 | 0.484 |
| 94 | 0.25 | 0.15 | 0.25 | 0.05 | 0.25 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 11.92 | 0 | 200010 | 36.2 | 0.470 |
| 93 | 0.25 | 0.15 | 0.25 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 16.16 | 0 | 199080 | 37.1 | 0.473 |
| 89 | 0.25 | 0.15 | 0.20 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.35 | 17.78 | 0 | 197140 | 37.3 | 0.446 |
| 42 | 0.25 | 0.15 | 0.25 | 0.05 | 0.25 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 9.49 | 0 | 194510 | 33.7 | 0.402 |
| 50 | 0.25 | 0.15 | 0.20 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.25 | 17.98 | 0 | 189200 | 36.5 | 0.389 |
| 76 | 0.25 | 0.15 | 0.20 | 0.05 | 0.25 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.20 | 9.90 | 0 | 186550 | 33.9 | 0.379 |
| 81 | 0.25 | 0.10 | 0.25 | 0.05 | 0.25 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.15 | 9.29 | 0 | 184020 | 32.1 | 0.358 |
| 15 | 0.25 | 0.15 | 0.20 | 0.05 | 0.25 | 0.20 | 0.10 | 0.10 | 0.15 | 11.31 | 0 | 178650 | 31.8 | 0.301 |
| 26 | 0.25 | 0.15 | 0.20 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.05 | 0.20 | 11.92 | 0 | 171200 | 32.8 | 0.309 |
| 33 | 0.30 | 0.15 | 0.25 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.05 | 0.20 | 0.00 | 0 | 170470 | 34.1 | 0.284 |
| 63 | 0.25 | 0.15 | 0.25 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.00 | 0 | 166100 | 29.4 | 0.249 |
| 46 | 0.25 | 0.15 | 0.20 | 0.05 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.10 | 0.15 | 11.31 | 0 | 162700 | 30.6 | 0.256 |
| 53 | 0.20 | 0.15 | 0.20 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | 11.52 | 0 | 160320 | 25.2 | 0.206 |
| 59 | 0.25 | 0.15 | 0.25 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | 1.41 | 0 | 158960 | 28.8 | 0.243 |
| 87 | 0.20 | 0.15 | 0.20 | 0.05 | 0.15 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.15 | 11.92 | 0 | 143020 | 23.9 | 0.147 |
| 27 | 0.20 | 0.10 | 0.20 | 0.05 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.05 | 0.20 | 1.82 | 0 | 136540 | 23.3 | 0.131 |
| 44 | 0.20 | 0.10 | 0.20 | 0.05 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.05 | 0.20 | 1.82 | 0 | 130010 | 21.8 | 0.114 |
| 31 | 0.20 | 0.10 | 0.20 | 0.05 | 0.20 | 0.15 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | 0.00 | 0 | 125720 | 20.6 | 0.098 |
| 52 | 0.20 | 0.10 | 0.20 | 0.05 | 0.15 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.20 | 1.41 | 0 | 117630 | 20.7 | 0.093 |
| 72 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.10 | 1.21 | 0 | 116070 | 18.5 | 0.063 |
| 51 | 0.20 | 0.10 | 0.20 | 0.05 | 0.15 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.10 | 0.00 | 0 | 113640 | 18.7 | 0.078 |
| 7 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 0.10 | 1.21 | 0 | 109530 | 18.0 | 0.057 |
| 1 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.10 | 0.00 | 0 | 102070 | 17.3 | 0.039 |
| 3 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.10 | 1.21 | 0 | 99452 | 17.2 | 0.025 |
| 8 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.05 | 0.00 | 0 | 96535 | 16.7 | 0.017 |
| 9 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.10 | 0.00 | 0 | 92203 | 16.2 | 0.000 |
| 4 | 0.20 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | 0.10 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.10 | 0.00 | 0 | 87163 | 15.7 | 0.000 |

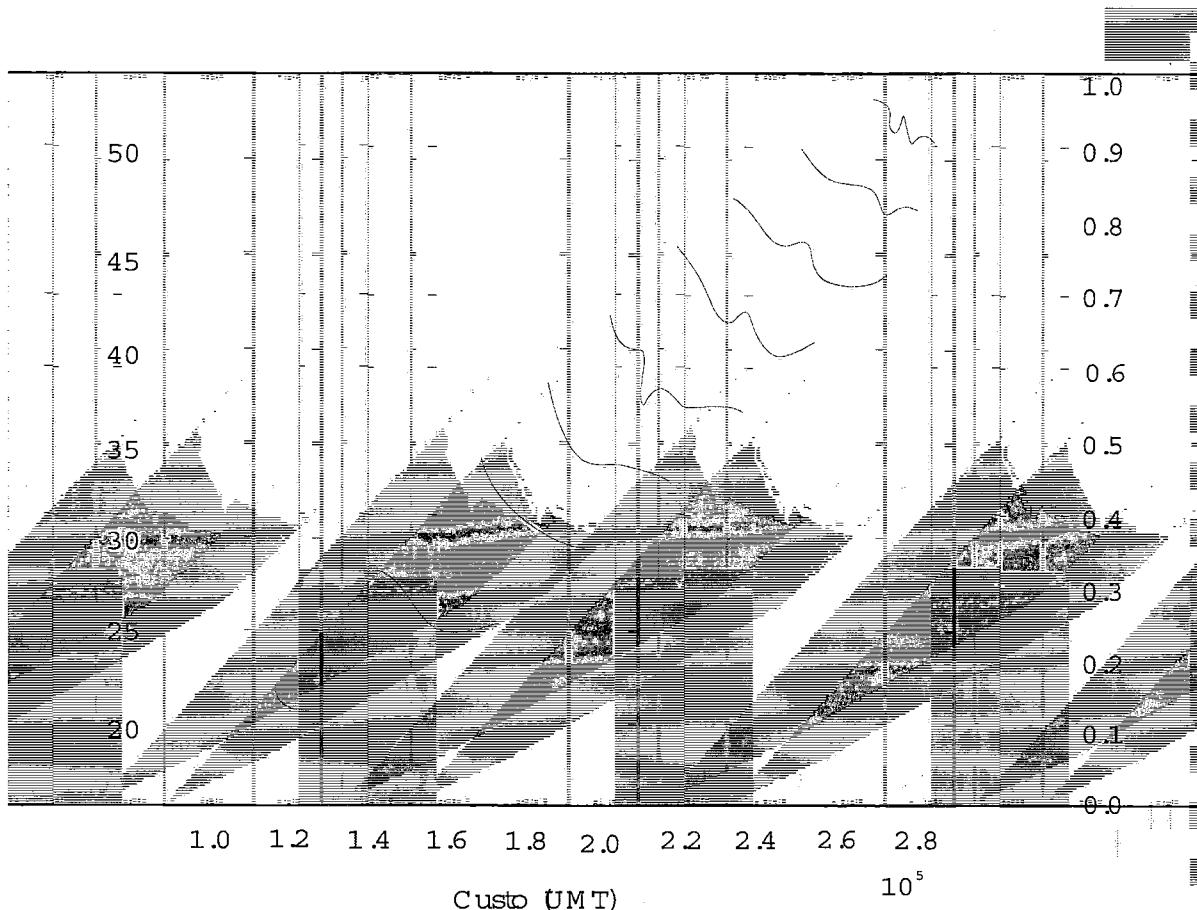


Figura 6-Superfície não dominada para após 500 gerações

O procedimento de otimização foi aplicado mencionadas, para essas redefinições já

considerando as três funções objetivo já

$$FO1: \min \left[\sum_{i=1}^9 CT(D_i)L_i + \sum_{j=1}^2 CR(HR_j)HR_j \right] \quad (11)$$

$$FO2: \max \left[\min \left(\frac{Dem_{jt}}{Dem_{jt}^{req}} \right) \right] \quad \forall \quad j = 1, \dots, 8, \quad t = 1 \text{ e } 2 \quad (12)$$

$$FO3: \min \sum_{t=1}^2 \sum_{i=1}^9 \frac{Vaz_{it}}{2} \quad (13)$$

Foram simuladas duas situações: na primeira, diâmetros (D_i) dos 9 trechos na segunda alémdos diâmetros dos 2 reservatórios.

Os resultados encontrados são mostrados nas Figuras 2 a 6 e na Tabela 4. Pode-se verificar que nas 20 primeiras iterações, as soluções encontradas pelos procedimentos propostos ficaram próximas do que seria a fronteira não dominada (Figuras 2 e 3). Observa-se também que a partir da 100ª geração não houve mudanças significativas na região não dominada, permanecendo praticamente inalterada até a 500ª geração, que foi a última obtida (Figura 4 e 5).

Observa-se que os custos apresentam uma variação de 87.000 a 290.000 UMT e que estes são diretamente proporcionais às perdas por vazamentos (Figura 6). Os vazamentos tiveram uma variação de aproximadamente 15 a 55 l/s. Esse último valor corresponde a aproximadamente 28% de perdas por vazamentos, que representa uma faixa de valores verificados na prática.

A capacidade de atendimento apresenta uma variação potencial proporcional aos custos, enquanto que, quando comparada com a evolução dos vazamentos, mostra uma tendência linear.

Essas relações se justificam, tendo em vista que, ao se aumentar os diámetros das tubulações, os seus custos, haverá uma diminuição da perda de carga, e consequentemente, um aumento da pressão nos nós, o que eleva a capacidade deendimento e também as perdas por vazamentos.

Apesar de ser possível delimitar a região Pareto ótima, o método MOEA apresenta perda de alguns "bons" indivíduos, o que tende a tornar a sua convergência mais lenta. Para sanar essa dificuldade, torna-se interessante a adoção de um método evolucionário multiobjetivo elitista, que seja capaz de manter um "bom" conjunto de soluções não dominadas, ou seja, soluções que sejam capazes de decobrir mais uniformemente a fronteira ótima, a longo das gerações.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi aplicado um método evolucionário multiobjetivo para a determinação de uma região não dominada considerando como objetivos a minimização dos custos, a maximização da capacidade deendimento e a minimização das perdas por vazamentos.

O modelo proposto foi aplicado a uma rede exempla, composta de 9 trechos e 8 nós e abastecida por dois reservatórios. Utilizou-se uma ferramenta multiobjetivo evolucionária de domínio público (MOEA) para MATLAB, aliado a um simulador hidráulico híbrido baseado no método proposto por Nielsen.

O resultado encontrados indicam que o método MOEA foi capaz de convergir à região não dominada em um número relativamente pequeno de iterações.

Embora tenha mostrado ser capaz de encontrar a região não-dominada a metodologia multiobjetivo evolucionária utilizada perdeu, a longo das suas gerações, alguns "bons" indivíduos. Verifica-se, assim, a necessidade do emprego de técnicas elitistas de modo a conservar as melhores soluções a longo do processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP como agência financiadora do projeto RECOPE-REHIDRO, cuja infra-estrutura foi utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho. Essa pesquisa contou também com o apoio da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que forneceu suporte financeiro ao primeiro autor do trabalho na forma de bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPEROVITS, E. e SHAMIR, U.; *Design of optimal water distribution systems* Water Resources Research. AGU. Vol.13, Nº 6, New York, NY, USA, 1977, p.885-900.
- BARGIELA, A. *On-line monitoring of water distribution systems*. Doctorial Thesis. University of Durham.(1984).
- BHAVE, P.R.; Node Flow analysis of water distribution systems. Journal of Transport Engineering, ASCE, Vol. 107 Nº 4, New York, NY, USA. 1981. p.457-467.
- Chandapillai, J.; *Realistic Simulation of Water Distribution System*. Journal of Transportation Engineering, Vol.117 Nº 2. 1991. p.258-263.
- DEB, K. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, Chichester, Engl and, 2001. 498p.
- FORMIGA, K. T. M.; *Otimização de redes malhadas utilizando a programação não linear*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, PB, 1999.
- FUJIWARA, O.; JENCHAIMAHAKOON, B.; EDIRISINGHE, N. C. P.. *A Modified Linear Programming Gradient Method for Optimal Design of Looped Water Distribution Networks*. Water Resources Research. AGU. Vol.23, Nº 6, New York, NY, USA, 1987. p. 977-982.
- FUJIWARA, O. e LI, J.; *Reliability analysis of water distribution networks in consideration of equity, redistribution, and pressure dependent demand*. Water Resources Research. AGU. Vol.34, Nº 7, New York, NY, USA, 1998, p.1843-1850.

- FUJIWARA, O. e GANESHARAJAH, T.; *Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks*. Water Resources Research, AGU, Vol. 29, Nº 8, New York, NY, USA, 1993, p. 2917-2924.
- GERMANOPOULOS, G. e JOWITT, P. W.; *Leakage reduction by excessive pressure minimization in a water supply network*. Proc. Institution. Civil Engineers, Part 2, 87 (June), 1989, p. 195-214.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1989.
- JOWITT, P. W. e XU, C.; *Predicting pipe failure effects in water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 119 Nº 1, New York, NY, USA, 1993, p. 18-31.
- MORGAN, D. R. e GOULTER, I. C.; *Optimal urban water distribution design*. Water Resources Research, AGU, Vol. 21, Nº 5, New York, NY, USA, 1985, p. 642-652.
- MIYAKO, S. e FU NABASHI, M.; *Optimal control of water distribution system by network flow theory*. IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 29 Nº 4, 1984, p. 303-311.
- NIELSEN, H. B.; *Methods for Analyzing Pipe Networks*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125 Nº 2, New York, NY, USA, 1989, p. 139-157.
- PARETO, V. *Cours d'Economie Politique*, Volume 1. Lausanne: F. Rouge, 1986.
- QUINDRY, G., BRILL, E. D., e LIEBMAN, J. C.; *Optimization of looped distribution systems*. Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 107 Nº 4, New York, NY, USA, 1981, p. 665-679.
- ROSSMAN, L. A.; *EPANET 2: User's Manual*, U.S. Environmental Protection Agency, 2000. 200p.
- SAVIC, D. A. e WALTERS, G. A.; *Genetic algorithms for least-cost of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 123 Nº 2, New York, NY, USA, 1997, p. 67-77.
- SILVA, R. T.; *Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água*. Programa Nacional para o Controle do Desperdício de Água, Ministério do Planejamento e Orçamento, Secretaria de Política Urbana, Brasília-DF, 1998. 70p.
- SOUZA, R. S.; *Aspectos computacionais da análise de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos em regime permanente*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 1994. 236p.
- TAN, K. C., LEE, T. H., KHOO, D. e KHOR, E. F.; "A multi-objective evolutionary algorithm toolbox for computer-aided multi-objective optimization" in IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part B (Cybernetics), Vol. 31, nº 4, 2001, p. 537-556.
- TANYIMBOH, T. T., TABESH, M. e BURROWS, R.; *Appraisal of source head methods for calculating reliability of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 127 Nº 4, New York, NY, USA, 2001, p. 206-213.
- TUCCIARELLI, T., CRIMINISI, A. e TERMINI, D.; *Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125 Nº 3, New York, NY, USA, 1989, p. 277-285.
- VELDHUIZEN, D. A. Van. *Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analyses, and New Innovations*. PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, 1999. 270p.
- ZITZLER, E. *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland, 1999. 120p.