

Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água Utilizando Modelo de Simulação Hidráulica Dirigido pela Pressão (MSHDP) e Método Híbrido AG-Simplex

Alexandre Kepler Soares, Luisa Fernanda Ribeiro Reis

Departamento de Hidráulica e Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-Carlense, 400. Caixa Postal 359, São Carlos, SP - aksoures@sc.usp.br, fernanda@sc.usp.br

Recebido: 30/03/04 - revisado: 04/05/04 - aceito: 18/06/04

RESUMO

No Brasil, são comuns sistemas de distribuição de água para abastecimento com elevados índices de perdas, nos quais parcela significativa das denominadas perdas físicas é devida às perdas por vazamento. Dessa maneira, o controle efetivo das perdas por vazamento e do comportamento do sistema sob as mais diversas condições operacionais é de fundamental importância, não só do ponto de vista financeiro, no que diz respeito ao desperdício da água bombeada e quimicamente tratada, mas principalmente da preservação deste recurso natural. Com o objetivo de se ter um maior conhecimento do comportamento real de uma rede de distribuição de água, técnicas de calibração, incluindo modelos para avaliação de perdas por vazamentos, vêm sendo propostas. Tais modelos devem considerar a relação pressão x vazamento, bem como a dependência pressão x demanda, face aos diferentes níveis de pressão atuantes em um sistema de distribuição de água. O presente estudo visa o desenvolvimento de uma rotina computacional que considere as perdas por vazamento e a dependência das demandas com a pressão, acoplada ao simulador hidráulico EPANET 2 (Rossman, 2000), utilizando dados de rede hipotética com vistas à calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo de vazamentos. Para tanto, utilizam-se modelos inversos resolvidos com o suporte da tecnologia dos Algoritmos Genéticos (AGs) e procedimento híbrido (AGs e Método Simplex – Nelder e Mead, 1965). São realizadas comparações entre os dois modelos de otimização, demonstrando as vantagens da hibridização em termos do tempo de processamento computacional e refinamento da solução final.

Palavras-chave: calibração; redes de distribuição de água; vazamentos; demandas dependentes da pressão; método híbrido.

INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de água devido ao aumento do contingente populacional das cidades, há uma urgente necessidade de um gerenciamento eficiente dos recursos hídricos, particularmente quando a exploração de novas fontes hídricas mostra-se dispendiosa e os recursos naturais cada vez mais escassos. A distribuição de água através de redes hidráulicas, prática antiga e comum, pode ser considerada o primeiro passo importante na obtenção de um sistema de abastecimento eficiente. Com isso, as redes de distribuição de água para abastecimento devem levar em consideração elementos essenciais ao desenvolvimento urbano sustentável, uma vez que são responsáveis pelo transporte e distribuição de um bem cada vez mais escasso e precioso: a água potável.

Levando-se em consideração que há um déficit entre a quantidade total de água produzida e a quantidade de água efetivamente entregue aos consumidores, um

estudo mais detalhado da eficiência hidráulica (razão entre a água efetivamente entregue e a água produzida) das redes de distribuição de água deve ser realizado (Martínez et al., 1999). Esta diferença é causada por diversos fatores, tais como vazamentos em tubulações e conexões, medidas inferiores às reais em hidrômetros, consumo público não-registrado ou conexões ilegais.

Considerando que, em uma rede de distribuição de água, os vazamentos dependem das pressões e que estas variam ao longo do dia e que, além disso, as demandas também dependem das pressões, a eficiência hidráulica pode não ser a mesma em períodos diurnos, sob demandas elevadas e pressões baixas, e em períodos noturnos, sob demandas baixas e pressões elevadas. Reconhece-se, portanto, a necessidade da previsão do comportamento das redes sob as mais diversas condições operacionais, que incluem níveis dos reservatórios, demandas, condições de funcionamento de componentes como válvulas, bombas e outros. Tais previsões só podem ser realizadas a contento com o suporte de modelos matemáticos que descrevam

adequadamente as leis físicas que regem o escoamento no interior dos condutos, bem como demandas e vazamentos, especialmente se a parcela relativa a estes últimos for expressiva.

Os modelos de previsão de comportamento produzem resultados mais consistentes na medida em que valores para os parâmetros de campo são conhecidos. Dentre os parâmetros de campo decisivos na reprodução do comportamento hidráulico das redes pode-se mencionar: as rugosidades absolutas das tubulações, bem como os coeficientes de perdas por vazamento. No entanto, observa-se que os *softwares* disponíveis no mercado (EPANET, WaterCAD e outros) não consideram os parâmetros de vazamento nas suas avaliações hidráulicas. Além disso, não levam em consideração a dependência das demandas com a pressão, pois estes consideram nas análises hidráulicas o atendimento integral dos consumos nos nós (demanda potencial) independentemente da pressão atuante. Sendo, assim, eles são denominados Modelos de Simulação Hidráulica Dirigidos pela Demanda (MSHDD).

As simulações hidráulicas realizadas neste trabalho utilizaram um procedimento iterativo, no qual tanto as perdas por vazamentos quanto a dependência das demandas com a pressão são considerados simultaneamente (Modelos de Simulação Hidráulica Dirigidos pela Pressão – MSHDP). A técnica proposta utiliza o simulador EPANET 2 (Rossman, 2000) como módulo auxiliar nas avaliações hidráulicas.

Assim, este estudo propõe a determinação de valores para as rugosidades absolutas e parâmetros do modelo de vazamentos através de modelo inverso, empregando os Algoritmos Genéticos (AGs) e procedimento híbrido (AGs e Método Simplex – Nelder e Mead, 1965) como ferramentas.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CALIBRAÇÃO

O modelo inverso implementado minimiza os desvios entre os parâmetros (pressão e vazão) observados e aqueles obtidos pela rotina computacional produzida, que utiliza o simulador hidráulico EPANET 2 como módulo de avaliação auxiliar. Convém salientar que, neste trabalho, os parâmetros observados (pressão e vazão) não são valores reais e sim valores extraídos via simulação hidráulica, dada à utilização de rede hipotética.

A resolução do problema de calibração de modelos de redes de distribuição de água prevê as seguintes etapas: preparação dos dados de entrada do modelo, definição dos parâmetros dos modelos de otimização a serem determinados e dos parâmetros de avaliação hidráulica da rede, e aplicação do modelo de otimização.

Os dados de entrada do modelo são compostos pelos dados de observações de pressões em alguns nós e

de vazões em certos trechos da rede, usualmente na saída dos reservatórios, dos níveis dos reservatórios, e da vazão abastecida total na rede, para os diversos padrões de demanda observados. Neste trabalho, o número de padrões de demanda será três, correspondentes às condições de vazão abastecida máxima (horas do dia em que o consumo é maior, portanto com menores níveis de vazamentos e maiores restrições na vazão abastecida devido às menores pressões na rede), média e mínima (horas do dia em que o consumo é menor ou quase nulo, com maiores índices de vazamentos e menor ou nenhuma restrição na vazão abastecida devido aos maiores níveis de pressão). Também fazem parte dos dados de entrada do modelo, os dados da rede propriamente dita, como comprimento, diâmetro e rugosidade absoluta das tubulações, cota topográfica e demanda média nos nós, os setores homogêneos em termos das rugosidades e coeficientes (θ) e expoentes (β) do modelo de vazamento (ver equação 22, adiante).

Podem ser variáveis de decisão no modelo, as rugosidades absolutas (ε) e diâmetros das tubulações ou setores de tubulações, as demandas e cotas topográficas dos nós ou setores de nós, os parâmetros do modelo pressão x vazamento, coeficiente (θ) e expoente (β) para tubulações ou setores de tubulações, e as tubulações que possam ter registros com o respectivo valor de perda de carga localizada. Para a representação das variáveis de decisão do problema optou-se pela representação real, com limites máximo e mínimo definidos como dados de entrada do modelo.

Assim, o problema de calibração resolvido foi expresso através da minimização dos desvios entre os valores de pressão e vazão, observados e simulados hidráulicamente, por:

$$\min_Z FO = \sum_{t=1}^{n^{PD}} \left[\sum_{j=1}^{n_t^P} \frac{(P_{t,j} - P_{t,j}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_t^P} P_{t,i}^* / n_t^P \right)^2} + \sum_{j=1}^{n_t^Q} \frac{(Q_{t,j} - Q_{t,j}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_t^Q} Q_{t,i}^* / n_t^Q \right)^2} \right] \quad (1)$$

sendo n^{PD} o número de padrões de demanda considerados, n_t^P o número de observações de pressões realizadas para o padrão t , n_t^Q o número de observações de vazões realizadas para o padrão t , P as pressões simuladas, P^* as pressões observadas, Q as vazões simuladas, Q^* as vazões observadas e Z o conjunto de variáveis de decisão do problema, dado por:

$$Z = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{n_\varepsilon}, \theta_1, \dots, \theta_{n_\theta}, \beta_1, \dots, \beta_{n_\beta}) \quad (2)$$

sendo ε a rugosidade absoluta, θ o coeficiente de perda do modelo de vazamento, β o expoente de perda do modelo

de vazamentos, e n_e, n_0 e n_β o número de tubulações ou setores com rugosidade absoluta, coeficiente e expoente de vazamento homogêneos, respectivamente. A consideração de setores com variáveis de decisão homogêneas é uma sistemática que visa a redução do grau de parametrização do problema e, por consequência, do grau de indeterminação da solução. Assim, ao invés de determinarmos parâmetros para cada tubulação e nó, consideramos setores com valores homogêneos dos parâmetros a serem estimados.

MODELO PARA ANÁLISE HIDRÁULICA

A equação (1) prevê que os valores das variáveis de estado simulados (pressões e vazões) sejam confrontados com os respectivos valores observados. Tais valores são obtidos através do modelo de análise hidráulica aqui descrito, que envolve basicamente as equações da continuidade e da conservação da energia, que caracterizam as condições de equilíbrio hidráulico da rede num dado instante. Ele pode ser resolvido através de um Método Híbrido Nô-Malha que Todini e Pilati (1988) optaram denominar “Método Gradiente”. Esse método foi utilizado na implementação do simulador hidráulico EPANET 2, utilizado no desenvolvimento deste trabalho como módulo auxiliar na avaliação hidráulica da rede de distribuição de água que considera vazamentos e demandas dirigidas pela pressão.

Considerando uma rede com N nós e NF nós com carga hidráulica fixa, a relação perda de carga x vazão em uma tubulação entre os nós i e j pode ser representada pela seguinte expressão em cada iteração k :

$$H_i^{(k)} - H_j^{(k)} = h_{ij}^{(k)} = r \cdot Q_{ij}^n(k) + K \cdot Q_{ij}^2(k) \quad (3)$$

sendo H a carga hidráulica no nó, h a perda de carga total, r o termo de perda de carga que depende da formulação utilizada, Q a vazão na tubulação, n o expoente da formulação perda de carga x vazão e K o coeficiente de perda de carga localizada.

A conservação de massa nos nós é especificada pela expressão:

$$\sum_{j \in J_i} Q_{ij}(k) - C_i = 0 \quad \text{para } i = 1, \dots, N \quad (4)$$

em que C é o consumo no nó i e J_i são todos os nós conectados ao nó i . Assim, conhecendo a carga hidráulica nos NF nós, obtém-se os valores de pressão e vazão na rede que satisfazem as equações (3) e (4).

Arbitrada uma solução inicial para as vazões nas tubulações, novas cargas hidráulicas nos nós são obtidas

em cada iteração do Método Gradiente, resolvendo o seguinte sistema linear:

$$A \cdot H = F \quad (5)$$

em que A é a matriz Jacobiana ($N \times N$), H o vetor de incógnitas em termos das cargas hidráulicas e F o vetor contendo as constantes das equações de balanço de massa, mais um fator de correção da vazão.

Os elementos da diagonal da matriz Jacobiana são dados por:

$$A_{ii} = \sum_{j \in J_i} x_{ij} \quad (6)$$

enquanto os elementos não nulos fora da diagonal são dados por:

$$A_{ij} = -x_{ij} \quad (7)$$

em que x_{ij} é o inverso da derivada da perda de carga total na tubulação entre os nós i e j , dado por:

$$x_{ij} = \frac{1}{n \cdot r \cdot |Q_{ij}(k)|^{n-1} + 2 \cdot K \cdot |Q_{ij}(k)|} \quad (8)$$

O vetor F é composto pela parcela do balanço de massa no nó adicionada de um fator de correção da vazão, como:

$$F_i = \left(\sum_{j \in J_i} Q_{ij}(k) - C_i \right) + \sum_{j \in J_i} y_{ij} + \sum_{f \in J_f} x_{if} \cdot H_f \quad (9)$$

sendo o último termo aplicável a qualquer tubulação ligando o nó i a um nó f de carga hidráulica constante, J_f o conjunto de nós com carga hidráulica constante ligados ao nó i , e y o fator de correção da vazão, dado pela seguinte expressão:

$$y_{ij} = x_{ij} \left(r |Q_{ij}(k)|^n + K |Q_{ij}(k)|^2 \right) \text{sgn}(Q_{ij}(k)) \quad (10)$$

em que $\text{sgn}(x)$ é 1 se $x > 0$ e -1 caso contrário.

Após terem sido calculadas as cargas hidráulicas nos nós, os novos valores das vazões nas tubulações são obtidos de acordo com a seguinte expressão:

$$Q_{ij}(k+1) = Q_{ij}(k) - \left(y_{ij} - x_{ij} (H_i^{(k)} - H_j^{(k)}) \right) \quad (11)$$

Se a soma de todas as variações de vazão (em valor absoluto) relativas à vazão total em todas as tubulações

for superior à tolerância especificada, as equações (5) e (11) são resolvidas novamente.

Uma das dificuldades inerentes à problemática dos vazamentos é a avaliação da parcela da vazão abastecida total que corresponde aos vazamentos. Assim, é necessária uma suposição quanto à composição da vazão abastecida. Embora, na prática, haja a possibilidade de usos não autorizados da água e erros na micromedida admitiu-se que a vazão total abastecida (TS) possa ser subdividida em demanda total efetivamente abastecida (TD) e vazamentos (V). Assim, o balanço de massa correspondente pode ser escrito como:

$$TS = TD + V \quad (12)$$

Supondo-se, ainda, que a distribuição espacial da demanda total seja conhecida e obedeça a um mesmo padrão de variação temporal, refletido no fator multiplicador (FT) da demanda total de referência (TS*), geralmente estabelecida com base nos consumos mensais, a demanda potencial total (TDP) pode ser expressa como:

$$TDP = FT \cdot TS^* \quad (13)$$

Assim, a demanda potencial total corresponde à demanda efetivamente abastecida total mais aquela parcela que deixa de ser atendida (PNA), devido às limitações impostas por insuficiência de pressão (modelo pressão x demanda):

$$TD = TDP - PNA \quad (14)$$

Substituindo-se as equações (13) e (14) em (12), tem-se:

$$TS = FT \cdot TS^* - PNA + V \quad (15)$$

Dessa maneira, o fator temporal (FT) pode ser obtido a partir dos valores estimados iniciais para PNA e V como:

$$FT = \frac{TS + PNA - V}{TS^*} \quad (16)$$

sendo $PNA = (FT \cdot TS^* - TD)_{\text{inicial}}$; para V_{inicial} .

Assim, o novo fator multiplicador (FT₂) no procedimento iterativo será:

$$FT_2 = \frac{TS + FT_1 \cdot TS^* - TD_1 - V_1}{TS^*} \quad (17)$$

sendo FT₁, TD₁ e V₁ os valores da estimativa anterior para o fator multiplicador, a demanda total efetivamente abaste-

cida e o vazamento total, respectivamente, conforme indicação da Figura 1, onde:

Δ_1 = máximo desvio entre as pressões anteriores e presentes calculadas para cada nó.

$$TS^* = \sum d_i^* \quad (18)$$

em que d_i^* é a demanda de referência no nó i.

$$TD = FT_1 \sum_{i \in N} d_i^* \cdot \rho_i \quad (19)$$

$$V = \sum_{i \in N} v_i \quad (20)$$

N = número de nós.

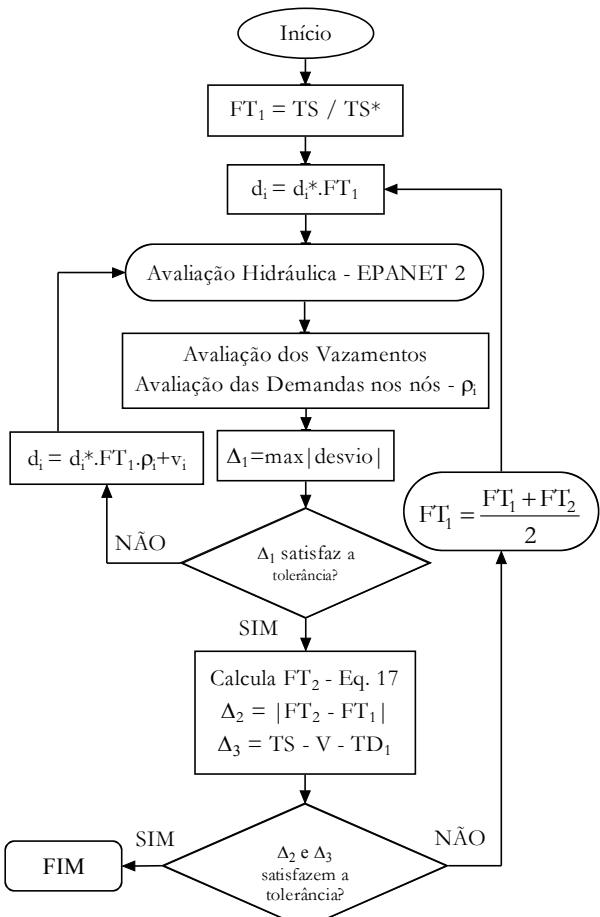


Figura 1 - Fluxograma do processo iterativo proposto para avaliação hidráulica e determinação do fator de consumo para cada padrão de demanda

ρ_i é a relação entre a demanda efetivamente abastecida e a demanda potencial no nó i, tomado de acordo com o modelo pressão x demanda proposto por Tucciarelli et al. (1999):

$$\rho_i = 1 \quad \text{se } P_i \geq P_i^{\text{des}} \\ \rho_i = \text{sen}^2 \left(\frac{P_i}{2 \cdot P_i^{\text{des}}} \pi \right) \quad \text{se } P_i^{\text{min}} \leq P_i \leq P_i^{\text{des}}$$

$$\rho_i = 0 \quad \text{se} \quad P_i \leq P_i^{\min} \quad (21)$$

sendo P_i^{des} a pressão desejada para suprimento total da demanda potencial, P_i^{\min} a pressão mínima abaixo da qual não há abastecimento. Neste trabalho, foi adotado $P^{\min} = 0$ e $P^{\text{des}} = 15$ m. No entanto, a adoção das pressões mínima e desejável deve ser objeto de estudos mais detalhados.

A utilização do modelo pressão x demanda proposto por Tucciarelli et al. (1999) deve-se ao fato de que Soares et al. (2002) realizaram uma investigação de diferentes metodologias presentes na literatura (Fujiwara e Li, 1998; Tucciarelli et al., 1999; Tabesh e Karimzadeh, 2000) em termos do esforço computacional e de convergência. Os autores concluíram que a relação pressão x demanda proposta por Tucciarelli et al. (1999) mostrou-se numericamente mais vantajosa do que as outras, para as análises realizadas.

Para avaliação das perdas por vazamento distribuído ao longo da rede, é utilizada a formulação proposta por Tucciarelli et al. (1999), segundo a qual as tubulações de cada setor apresentam valores constantes de vazamento por unidade de superfície de tubo, de acordo com a seguinte equação:

$$v_i = (H_i - z_i)^{\beta} \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} D_{ij} \theta_{ij} L_{ij} \quad (22)$$

sendo H_i a carga hidráulica no nó i , z_i a cota topográfica, β o expoente de perda, M_i o número de tubulações conectadas ao nó i , D_{ij} o diâmetro da tubulação ligando os nós i e j , L_{ij} o comprimento da tubulação e θ_{ij} o coeficiente de perda por unidade de superfície do tubo ligando os nós i e j .

O processo descrito no fluxograma da Figura 1 tem início com o conhecimento prévio da vazão abastecida total (TS, que pode ser feito através do controle das vazões efluentes dos reservatórios) para certa condição operacional do sistema e da distribuição espacial fixa do consumo potencial. Além da vazão total abastecida, também são dados de entrada para o modelo a vazão de abastecimento de referência (TS^*), geralmente determinada com base no consumo médio mensal, as rugosidades e coeficientes de perdas por vazamento θ para cada tubulação ou setor, o expoente de perda β para cada nó ou setor, além das características da rede, como diâmetros e comprimentos das tubulações, níveis dos reservatórios, topografia e componentes hidráulicos.

A principal vantagem do procedimento iterativo apresentado é que ele sempre satisfaz o balanço de massa no sistema. Dada uma certa condição operacional, ou seja, fornecida a vazão abastecida (vazão total que sai dos reservatórios) e as demandas nodais potenciais, o avaliador hidráulico determina o fator temporal, além das perdas por vazamentos, e ajusta, espacialmente, as demandas para as

condições de pressão. Além das energias nos reservatórios (nós de carga conhecida), o procedimento iterativo proposto considera também a vazão injetada de cada um deles como condição de contorno para a avaliação hidráulica da rede. Observa-se que o controle dos níveis dos reservatórios e da vazão abastecida é uma prática comum das companhias de abastecimento de água.

ALGORITMOS GENÉTICOS

Para a resolução do problema inverso definido pela Eq. 1, diferentes métodos de busca direta (Gradiente, Newton-Raphson e outros) têm sido utilizados. No entanto, para a resolução do problema de calibração de modelos de redes de distribuição, é cada vez maior o emprego dos Algoritmos Genéticos (AGs), por serem técnicas mais gerais e de maior habilidade no tratamento de problemas com funções complexas, inclusive descontínuas, e de numerosas variáveis de decisão.

Diversos trabalhos (Goldberg, 1989; Reis e Akutsu, 2002) comentam sobre os Algoritmos Genéticos (origem, vantagens, terminologia, operadores e outros) e, além disso, apresentam diversos tipos de AGs, mas o presente trabalho utiliza apenas o geracional elitista, com o emprego da biblioteca GAlib C++ (Wall, 1996), de distribuição livre, para a realização da calibração.

MÉTODO HÍBRIDO AG-SIMPLEX

Apesar das inúmeras vantagens, os AGs são lentos, pois são eficazes na avaliação do espaço de soluções, mas oscilam em torno da solução ótima. Assim, a fim de melhorar o tempo computacional e a eficiência do modelo de otimização, um método híbrido é proposto.

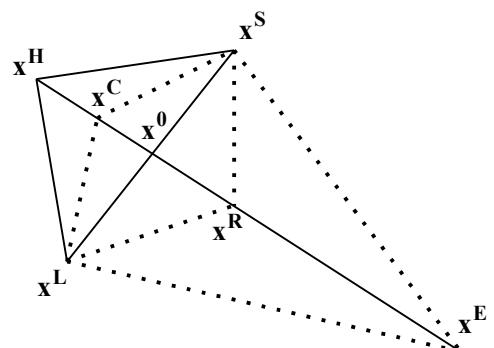


Figura 2 – Vértices em uma *Simplex* geral

A idéia do método híbrido é utilizar os AGs como ponto de partida e por um número determinado de gerações para que o espaço de busca seja “varrido” e, então, utilizar o método Simplex (Nelder e Mead, 1965) para a parte final do processo, poupando tempo computacional.

No entanto, o processo iterativo proposto apresenta restrições quanto aos valores máximo e mínimo das variáveis de decisão. Assim, o método Simplex deverá conter restrições no processo de otimização, fato este explorado no trabalho de Subrahmanyam (1989), que apresenta algumas modificações no método.

O método Simplex é baseado na comparação dos valores da função objetivo de $n+1$ vértices de uma *Simplex geral* (região no espaço onde os vértices não são eqüidistantes – Figura 2) e “mover” estes pontos para o ponto ótimo. Este processo é alcançado pela aplicação dos operadores: reflexão, contração, expansão e encurtamento.

A seguinte notação é utilizada para os vértices: x^H é o vértice correspondente ao maior valor da função objetivo; x^L é o vértice com o menor valor de M.

x^S é o vértice com o segundo maior valor de M. x^E é o vértice com o menor valor de M. x^0 é o centróide de todos os pontos, exceto x^H , dado por:

$$x^0 = \frac{1}{n} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq H}}^{n+1} x^i \quad (24)$$

Os quatro operadores do método (reflexão, contração, expansão e encurtamento) são aplicados da seguinte maneira:

Reflexão: x^H é substituído por:

$$x^R = (1 + \mu)x^0 - \mu x^H, \quad \mu > 0 \quad (25)$$

Expansão: x^R é expandido na direção cuja melhora é esperada dada por:

$$x^E = \omega x^R + (1 - \omega)x^0, \quad \omega > 1 \quad (26)$$

Contração:

$$x^C = \psi x^H + (1 - \psi)x^0, \quad 0 < \psi < 1 \quad (27)$$

Encurtamento: todos os valores de x^i são substituídos por:

$$x^i = \frac{(x^i + x^L)}{2}, \quad i = 1, \dots, n+1 \quad (28)$$

Subrahmanyam (1989) sugere valores para os coeficientes:

$$\mu = 0,95, \omega = 2 \text{ e } \psi = 0,5.$$

Dada uma estimativa inicial do valor mínimo $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, uma região é formada usando um vetor auxiliar δ e um vetor \mathbf{e} unitário na direção \mathbf{x} :

Assim, os $n+1$ vértices da região são dados por:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^1 &= (1 - \delta_1)\mathbf{x} \\ \mathbf{x}^i &= \mathbf{x} + \mathbf{e}_{i-1} \cdot \delta_{i-1} \cdot x_{i-1}, \quad i = 2, \dots, n+1 \end{aligned} \quad (29)$$

Caso algum vértice esteja fora da região factível, o vetor δ é modificado, aumentando seu valor se o limite inferior da variável seja violado, ou diminuindo se limite superior da variável é ultrapassado.

O procedimento do método segue os seguintes passos:

- 1- os vértices x^H, x^S, x^L e o centróide x^0 são determinados, e um teste de convergência é aplicado.
- 2- x^H sofre o processo de reflexão e o valor de M (x^R) é calculado.
- 3- se $M(x^L) \leq M(x^R) \leq M(x^S)$, então x^H é substituído por x^R e o processo volta ao passo 1.
- 4- se $M(x^R) < M(x^L)$, expandimos a região na direção $x^R - x^0$. A expansão é bem sucedida se $M(x^E) < M(x^L)$ e, neste caso, x^H é substituído por x^E . No caso de falha na expansão, x^H é substituído por x^R . Volta-se ao passo 1.
- 5- se a reflexão (passo 2) produz x^R tal que $M(x^S) < M(x^R) < M(x^H)$, substitui-se x^H por x^R e o processo de contração é aplicado. A contração é também aplicada se $M(x^R) \geq M(x^H)$.
- 6- se $M(x^H) > M(x^C)$, então x^H é substituído por x^C e o processo retorna ao passo 1. Se $M(x^H) \leq M(x^C)$, substitui-se os valores de x^i pela aplicação do operador de encurtamento e retorna-se ao passo 1.

Para critério de convergência, pode-se comparar o desvio padrão da função nos $n+1$ vértices com uma tolerância. Assim:

$$\left\{ \sum_{i=1}^{n+1} \frac{[M(x^i) - M(x^0)]^2}{n} \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \text{tolerância} \quad (30)$$

Em redes de distribuição de água, o método Simplex foi aplicado por Luvizotto Jr et al. (2000) para a detecção de vazamentos. Os autores compararam o método Simplex com outros três métodos de busca: Gradiente, Levenberg-Marquardt e Algoritmos Genéticos. Todos os métodos conseguiram detectar os vazamentos impostos para alguns nós de uma rede hipotética. Notou-se uma

convergência mais rápida nos métodos diferenciais (Gradiente e Levenberg-Marquardt), embora o método Gradiente tenha utilizado um número elevado de soluções do problema hidráulico, em decorrência do passo de busca aleatório. Dentre os métodos diretos, o método Simplex mostrou-se mais eficiente para a solução do problema proposto que os algoritmos genéticos. De maneira geral, o método Simplex foi o que obteve melhores resultados quanto à solução final.

Kapelan et al. (2000) propuseram um método híbrido para a calibração e detecção de vazamentos em modelos de redes de distribuição de água operando no regime transiente. O método de otimização alia a capacidade dos AGs (global) de “varrer” o espaço de busca de maneira eficiente, mas que oscila em torno da solução ótima, com um método de busca local (Levenberg-Marquardt), que apresenta dependência da convergência em relação à solução inicial adotada (pode convergir para um ótimo local), mas não oscila em torno da solução ótima, quando a solução inicial está nas proximidades do ótimo global. Neste trabalho, os autores empregam uma busca em dois passos, primeiro utilizando os AGs durante um certo número de iterações e, depois, empregando o método Levenberg-Marquardt para as demais, tendo como solução inicial a melhor solução apresentada pelos AGs. A metodologia empregada resultou em menor tempo de processamento computacional quando comparado ao uso dos AGs soamente, e melhorou a solução final das variáveis de decisão. Uma dificuldade desta metodologia é a adoção do número de iterações nos AGs. Visando sanar este problema, Kapelan et al. (2002) utilizaram uma outra forma do método híbrido para o mesmo problema de calibração. Neste tipo de hibridização, a cada número de gerações pré-estabelecido (no caso, duas), um ou dois elementos são selecionados e empregados como solução inicial no método Levenberg-Marquardt, aplicado em apenas uma ou duas iterações. As soluções resultantes da aplicação deste último método retornam à população anterior e, novamente os AGs são aplicados em mais duas gerações e o método de busca local em mais duas iterações, até que um critério de convergência seja alcançado.

Van Zyl et al. (2004) também investigaram dois tipos de métodos de busca direta para uma hibridização com os AGs: métodos de Hooke and Jeeves e Fibonacci. Uma rede hipotética foi utilizada para a comparação dos dois métodos, tendo o de Hooke and Jeeves atingido melhores resultados. Assim, o método híbrido proposto inicia com os AGs por um certo número de iterações e, a seguir, a melhor solução determinada pelos AGs é empregada na evolução do método de Hooke and Jeeves. A solução determinada pelo método Hooke and Jeeves é repassada, novamente, para os AGs, até que haja melhora na solução encontrada pelo método de Hooke and Jeeves. Se a solução for melhorada pelos AGs, o processo retorna para o

método de busca local e, em seguida, para os AGs. Caso não haja uma melhora na solução determinada pelo método de Hooke and Jeeves, o procedimento termina com um certo número de iterações máximo imposto como critério de convergência.

No presente trabalho, a metodologia empregada por Kapelan et al. (2000) é utilizada, que consiste de um método híbrido de dois passos, de acordo com o fluxograma da Figura 3. A diferença do método de otimização proposto neste trabalho é que o método Levenberg-Marquardt é substituído pelo método Simplex, que não utiliza derivadas, além de ser mais geral, uma vez que a função objetivo empregada é bastante complexa.

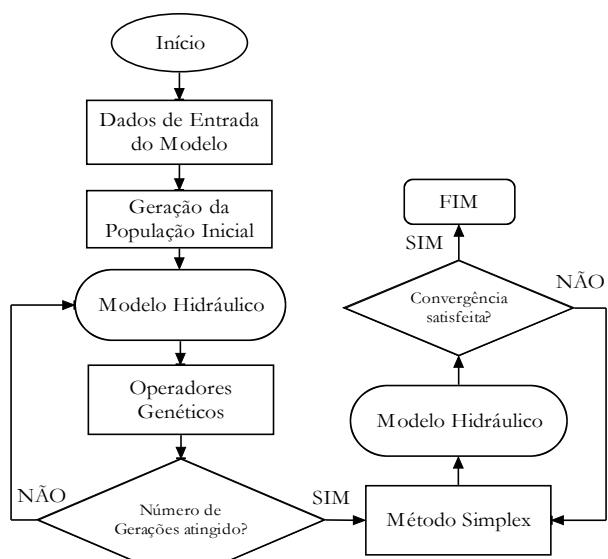


Figura 3 – Fluxograma do processo de calibração com o método híbrido AG-Simplex

REDE EXEMPLO

Com vistas às análises através do algoritmo proposto, empregou-se a rede estudada por Tucciarelli et al. (1999), mostrada na Figura 4, cujos dados constam das Tabelas 1 e 2.

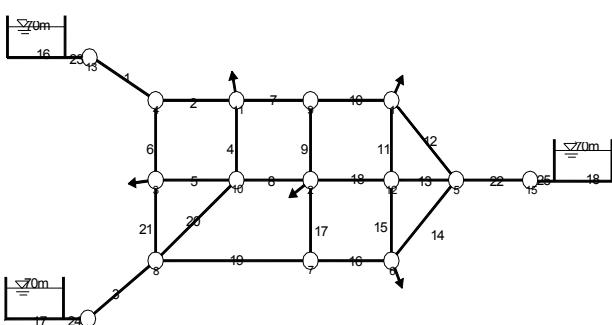


Figura 4 – Rede hipotética utilizada nas simulações

É utilizado um fator de distribuição espacial das demandas igual a 0,20, já que apenas cinco nós da rede possuem demandas (1, 2, 3, 6 e 11).

A rede analisada possui três setores homogêneos em termos do parâmetro θ do modelo de vazamento e um único setor para o expoente de vazamento β e a rugosidade absoluta ϵ , conforme Tabela 3.

Tabela 1 – Dados das tubulações e diferentes zonas homogêneas em termos dos vazamentos

Tubulação	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Zona (θ)
1	1000,0	500,0	3
2	500,0	250,0	1
3	1000,0	500,0	3
4	500,0	150,0	1
5	500,0	150,0	1
6	500,0	250,0	1
7	500,0	250,0	1
8	500,0	150,0	1
9	500,0	150,0	2
10	500,0	250,0	2
11	500,0	150,0	2
12	560,0	250,0	2
13	250,0	250,0	2
14	560,0	250,0	2
15	500,0	150,0	2
16	500,0	250,0	2
17	500,0	150,0	2
18	500,0	150,0	2
19	500,0	250,0	2
20	700,0	150,0	2
21	500,0	250,0	2
22	500,0	500,0	3
23	1,0	500,0	3
24	1,0	500,0	3
25	1,0	500,0	3

Neste trabalho, foram admitidas três condições operacionais (padrões de demanda) diferentes definidas através dos níveis d'água nos três reservatórios que abastecem a rede, cuja simulação hidráulica produziu valores para as variáveis de estado apresentados nas Tabelas 4 e 5. Nas simulações foram adotadas pressão mínima (P_{\min}) igual a zero (cota do terreno) e pressão requerida para abastecimento total da demanda (P_{des}) igual a 15 m.

As pressões nos nós de consumo (Tabela 5) e as vazões abastecidas (Tabela 4) foram adotadas como valores “observados” no cômputo da função objetivo relativa a cada solução. Embora a determinação da rede de amostragem ótima de dados de pressão e/ou vazão na rede deva

preceder a calibração, tal análise está além do escopo deste trabalho.

Tabela 2 – Cotas dos nós

Nó	Cota (m)
1	25,0
2	20,0
3	22,0
4	27,0
5	30,0
6	27,0
7	22,0
8	25,0
9	25,0
10	20,0
11	22,0
12	27,0
13	25,0
14	25,0
15	30,0

Tabela 3 – Dados da rede empregados nas simulações

Expoente de perda (β)	1,253
Demanda de Referência (L/s)	180,0
Rugosidade absoluta (mm)	3,153
Coef. de perda θ_1	7,504E-08
Coef. de perda θ_2	1,909E-07
Coef. de perda θ_3	0,0

Tabela 4 – Níveis dos reservatórios e demanda abastecida para os padrões de consumo considerados

Padrão de consumo	Nível dos reservatórios (m)	Vazão abastecida (L/s)		
		16	17	18
1	65,0	49,25	54,80	83,12
2	55,0	76,37	75,73	115,14
3	45,0	103,77	97,00	146,67

Tabela 5 – Pressão nos nós de consumo para os padrões de consumo considerados

Padrão de consumo	Pressão nos nós (m)				
	1	2	3	6	11
1	38,15	42,26	42,31	36,83	41,20
2	25,60	28,14	31,17	25,55	28,60
3	12,16	12,65	19,38	13,73	14,98

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a comparação do método híbrido AG-Simplex com o AG simples, foram realizadas três simulações a partir de diferentes populações aleatórias iniciais de 100 soluções, representadas por codificação real. Os operadores utilizados foram recombinação aritmética uniforme (probabilidade de 70%), mutação gaussiana (probabilidade de 1%), taxa de elitismo de 30%, além do esquema de seleção *Stochastic Remainder Sampling* (SRS). O número de gerações utilizado como critério de convergência foi de 500 para o AG geracional elitista e, no caso do método híbrido, foi realizada uma análise do número de gerações, antes que o método Simplex seja utilizado. Foram adotados os valores de 1, 5, 10, 30 e 50 gerações e avaliados os resultados obtidos nas simulações, visando a calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo de vazamentos (coeficiente θ e expoente β), para a rede da Figura 4. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização de 10 gerações de AG, tanto na comparação entre valores simulados e “observados” de pressão e vazão quanto na solução final das variáveis de decisão.

Foi adotado nas simulações apenas o AG geracional elitista, pois a principal vantagem dos AGs no método híbrido é a “varredura” do espaço de busca, feita de maneira mais eficiente quando um procedimento híbrido é utilizado. Além disso, os operadores genéticos são aplicados em maior número de soluções, preservando as melhores através do elitismo.

Tabela 6 – Comparação entre valores de pressão simulados e “observados” (AG geracional elitista)

Padrão	Nó	Pressão simulada (m)			Pressão obs. (m)			Erro Absoluto (m)			Erro relativo (%)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	37,88	38,07	38,18	38,15	0,27	0,08	0,03					
	2	41,68	42,00	42,17	42,26	0,58	0,26	0,09					
	3	42,18	42,28	42,31	42,31	0,13	0,03	0,00					
	6	36,70	36,74	36,82	36,83	0,13	0,09	0,01					
	11	40,96	41,18	41,28	41,20	0,24	0,02	0,08					
2	1	25,27	25,54	25,83	25,60	0,33	0,06	0,23					
	2	27,49	27,92	28,40	28,14	0,65	0,22	0,26					
	3	31,04	31,16	31,28	31,17	0,13	0,01	0,11					
	6	25,39	25,47	25,64	25,55	0,16	0,08	0,09					
	11	28,31	28,59	28,87	28,60	0,29	0,01	0,27					
3	1	11,89	12,17	12,64	12,16	0,27	0,01	0,48					
	2	12,27	12,62	13,26	12,65	0,38	0,03	0,61					
	3	19,25	19,41	19,70	19,38	0,13	0,03	0,32					
	6	13,57	13,72	14,01	13,73	0,16	0,01	0,28					
	11	14,71	15,01	15,53	14,98	0,27	0,03	0,55					

Os resultados obtidos são apresentados a seguir, para as diferentes populações aleatórias iniciais, considerando como critério de análise a comparação entre valores simulados e “observados” de pressões e vazões (Tabelas 6 a 9), e os valores ajustados das variáveis de decisão (Tabela 10).

Nas Tabelas 6 e 7 são mostrados os valores simulados e observados de pressão para os nós e vazão nas tubulações monitoradas, respectivamente, utilizando o AG somente.

Tabela 7 – Comparação entre valores de vazão simulados e “observados” (AG geracional elitista)

Padrão	Tubula-	Vazão Simulada (L/s)			Vazão obs. (L/s)	Erro relativo (%)		
		1	2	3		1	2	3
1	1	50,06	48,00	48,33	49,25	1,6	-2,5	-1,9
	3	53,86	54,89	54,69	54,80	-1,7	0,2	-0,2
	22	83,24	84,30	84,16	83,12	0,1	1,4	1,3
2	1	76,62	75,62	75,66	76,37	0,3	-1,0	-0,9
	3	74,83	75,53	75,43	75,73	-1,2	-0,3	-0,4
	22	115,79	116,09	116,15	115,14	0,6	0,8	0,9
3	1	103,73	103,38	103,08	103,77	0,0	-0,4	-0,7
	3	96,59	96,76	96,57	97,00	-0,4	-0,2	-0,4
	22	147,09	147,25	147,80	146,67	0,3	0,4	0,8

Como visto nas Tabelas 6 e 7, o erro máximo nos valores de pressões simuladas é de 0,65 m na simulação 1, nó 2 e padrão de consumo 2 (Tabela 6). Quando comparados os valores das vazões simuladas e “observadas”, o erro máximo encontrado foi de -2,5% para o trecho 1, padrão de consumo 1 e simulação 2 (Tabela 7).

Nas Tabelas 8 e 9 são mostrados, respectivamente, os valores simulados e observados de pressão para os nós e vazão nas tubulações de observação para a utilização do método híbrido AG-Simplex.

Para o caso da utilização do método AG-Simplex na calibração, os valores de pressão e vazão simuladas se aproximam muito dos valores “observados”, com um erro absoluto máximo de 0,02 m nas pressões e um erro relativo máximo de -0,1% nas vazões.

Quanto aos valores da função objetivo, o método AG-Simplex produziu valores de pressão e vazão melhores do que aqueles alcançados com a utilização do AG somente.

No caso da solução final e do tempo de processamento computacional, a Tabela 10 mostra que o método AG-Simplex produziu resultados pouco melhores do que os do AG geracional elitista, mas com um tempo computacional 20 vezes menor. A Tabela 10 mostra, também, a faixa de valores que as variáveis de decisão podem assumir

e os valores ótimos obtidos, bem como os reais valores de cada variável de decisão.

Tabela 8 – Comparação entre valores de pressão simulados e “observados” (AG-Simplex)

Padrão	Nó	Pressão simulada (m)			Pressão obs. (m)			Erro Absoluto (m)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	38,15	38,16	38,15	38,15	0,00	0,01	0,00		
	2	42,26	42,28	42,27	42,26	0,00	0,02	0,01		
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00		
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00		
	11	41,19	41,20	41,20	41,20	0,01	0,00	0,00		
2	1	25,60	25,61	25,60	25,60	0,00	0,01	0,00		
	2	28,14	28,15	28,14	28,14	0,00	0,01	0,00		
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00		
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00		
	11	28,60	28,61	28,61	28,60	0,00	0,01	0,01		
3	1	12,16	12,16	12,16	12,16	0,00	0,00	0,00		
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00		
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00		
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00		
	11	14,97	14,98	14,98	14,98	0,01	0,00	0,00		

Tabela 9 – Comparação entre valores de vazão simulados e “observados” (AG-Simplex)

Padrão	Tubula-	ção	Vazão Simulada (L/s)			Vazão obs. (L/s)	Erro relativo (%)		
			1	2	3		1	2	3
1	1	49,26	49,21	49,21	49,25	49,25	0,0	-0,1	-0,1
	3	54,77	54,83	54,82	54,80	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,14	83,15	83,14	83,12	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,31	76,33	76,35	76,37	76,37	-0,1	-0,1	0,0
	3	75,74	75,76	75,75	75,73	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,19	115,13	115,13	115,14	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,69	103,75	103,77	103,77	103,77	-0,1	0,0	0,0
	3	97,04	97,03	97,01	97,00	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,69	146,66	146,66	146,67	146,67	0,0	0,0	0,0

O número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex e o valor final da função objetivo são mostrados na Tabela 11.

Os dados da Tabela 11 permitem que se conclua que o número de avaliações da função objetivo é elevado devido às restrições impostas quanto aos valores máximo e mínimo das variáveis de decisão.

A proposição do modelo híbrido foi vantajosa, pois permitiu que melhor precisão fosse atingida em termos dos valores da função objetivo e das variáveis de

decisão, além de requerer menor esforço computacional nas simulações.

Tabela 10 – Valores ajustados e reais

Variável de Decisão	Valores na busca			Valor Real	Valor ótimo AG	Valor ótimo AG-Simplex
	Min	Max	AG			
ϵ (mm)	0,010	5,000	3,153	3,153	3,162	
θ_1 (x10e-7)	0,050	3,000	0,750	0,648	0,792	
θ_2 (x10e-7)	0,050	3,000	1,909	1,971	1,993	
β	0,100	1,300	1,253	1,218	1,244	
Tempo				12,6 min	38 seg	

Tabela 11 – Valores ajustados e reais

Simulação	Iterações	Avaliações da Função Objetivo		Valor da FO
		1	2	
1	78	1221	1,82E-06	
2	59	764	2,46E-06	
3	66	659	9,77E-07	

CONCLUSÕES

Um estudo da calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento hipotético, considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão foi realizado no presente trabalho. O algoritmo apresentou bons resultados, determinando parâmetros de diferentes naturezas simultaneamente, embora a rede de amostragem não fosse otimizada e o problema indeterminado por natureza. O algoritmo para análise hidráulica utiliza o simulador hidráulico EPANET 2 como módulo auxiliar. Eliminou-se, assim, a necessidade de intervenção direta sobre o código fonte do software, embora tal procedimento eleve o tempo de processamento computacional das simulações.

Os AGs revelaram dificuldades quanto à precisão dos valores das variáveis de decisão em termos da solução final, principalmente à medida que o número de variáveis de decisão era ampliado. Neste caso, a solução foi uma hibridização do modelo de otimização, combinando um método de busca global (Algoritmos Genéticos) com um método de busca local (Simplex – Nelder e Mead, 1965). Devido à limitação dos valores máximos das variáveis de decisão, uma variante do método proposta por Subrahmanyam (1989), que incorpora restrições na formulação original, foi utilizada, aumentando o esforço computacional das simulações quando o valor limite das variáveis de decisão era excedido. Os Algoritmos Genéticos foram utilizados nas primeiras iterações do problema e depois, para poupar esforço computacional e refinar a solução final, era aplicado o método Simplex no término do pro-

cesso de otimização. Um estudo do número ótimo de iterações de AGs foi realizado, mostrando que um número reduzido de iterações é suficiente. No entanto, este número de iterações mostrou-se dependente do número de variáveis de decisão do problema, sendo necessárias mais iterações à medida que a complexidade da calibração aumentava, ou seja, um número maior de variáveis de decisão e de naturezas distintas eleva o número de iterações necessárias de AGs.

A utilização do método híbrido AG-Simplex mostrou-se vantajosa, por poupar esforço computacional e refinar a solução final em termos da função objetivo e das variáveis de decisão em relação à solução final obtida pelos AGs somente.

As avaliações reportadas neste trabalho tomaram por base uma rede hipotética da literatura, embora, na prática, as redes reais sejam os alvos naturais desse tipo de investigação.

AGRADECIMENTOS

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida ao primeiro autor, ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido ao Projeto (CT-HIDRO 01/2001) “Instrumentos do Uso Racional e Otimizado da Água em Meio Urbano”, do qual este trabalho é parte integrante, e aos revisores anônimos pelas correções e sugestões apresentadas.

REFERÊNCIAS

- FUJIWARA, O.; LI, J. (1998). *Reliability Analysis of Water Distribution Networks in Consideration of Equity, Redistribution, and Pressure-Dependent Demand*. Water Resources Research, v. 34, n. 7, p. 1843-1850, July.
- GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass.
- KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (2000). Inverse Transient Analysis in Pipe Networks for Leakage Detection and Roughness Calibration. In: SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (eds.): *Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, p. 143-159, Sept.
- KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (2002). *Hybrid GA for Calibration of Water Distribution Hydraulic Models*. Proceedings of the 2002 Conference on Water Resources Planning and Management, Roanoke, Virginia, USA.
- LUVIZOTTO JR, E.; SOLIANI, R.; PIZZO, H. S.; JAQUIÉ, L. C. L. (2000). *Análise de Técnicas de Busca para um Modelo de Detecção de Fugas*. In: Anais do XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina.
- MARTÍNEZ, F.; CONEJOS, P.; VERCHER, J. (1999). *Developing an Integrated Model for Water Distribution Systems Considering both Distributed Leakage and Pressure-Dependent Demands*. Proceedings of the 26th ASCE Water Resources Planning and Management Division Conference, Tempe, Arizona, USA.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. (1965). *A Simplex Method for Function Minimization*. The Computer Journal, v. 7, n. 4, p. 308-313.
- REIS, L. F. R.; AKUTSU, J. (2002). *Estratégias Operacionais para Sistemas de Reservatórios via Algoritmos Genéticos (AGs)*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, n. 3, p. 5-17, Set.
- ROSSMAN, L. A. (2000). *EPANET 2 users manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- SOARES, A. K.; REIS, L. F. R.; SILVA, F. G. B. (2002). *Modelos de Simulação Hidráulica Dirigidos pela Pressão (MSHDP) com o Suporte do EPANET*. Anais do Seminário Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento, o Estado da Arte e Questões Avançadas, João Pessoa, PB.
- SUBRAHMANYAM, M. B. (1989). *An Extension of the Simplex Method to Constrained Nonlinear Optimization*. Journal of Optimization Theory and Applications, v. 62, n. 2, p. 311-319, Aug.
- TABESH, T.; KARIMZADEH, D. (2000). Optimum Design of Reliable Distribution Systems Considering Pressure Dependency of Outflows. In: SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (eds.): *Water Network Modeling for Optimal Design and Management*, p. 211-220.
- TODINI, E.; PILATI, S. (1988). A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks. In: COULBECK, B.; ORR, C. H. (eds.): *Computer Applications in Water Supply – System Analysis and Simulation*, vol. 1, p. 1-20.
- TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. (1999). *Leak Analysis in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 125, n. 3, p. 277-285, Mar.
- VAN ZYL, J. E.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (2004). *Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 130, n. 2, p. 160-170, Mar/Apr.
- WALL, M. (1996). *GAlib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components*. Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology.

**Water Distribution Network Calibration Models
Using Head-Driven Simulation Model (HDSM)
and Hybrid GA-Simplex Method**

ABSTRACT

Brazil's water distribution systems usually present a high percentage of so-called physical losses, of which a significant portion is caused by leakage. Therefore, it is of fundamental importance, not only from a financial standpoint – in terms of the pumped and chemically treated water – but also particularly from that of the preservation of this natural resource, to effectively control leakage and the systems' behavior under several operational conditions.

In order to gain a better understanding of the real behavior of a water distribution network, several calibration techniques, including models to evaluate leakage, have been proposed. Those models normally consider the correlation between pressure and leakage, as well as the interdependence of pressure and demand in response to the varying levels of pressure in a water distribution system.

The present study seeks to extend these models through the development of a computational routine based on leakage and on pressure-dependent demand, in conjunction with the hydraulic simulator EPANET 2 (Rossman, 2000), using the data from a hypothetical network to calibrate the absolute roughness and parameters of the leakage model. To this end, inverse models are used based on the technology of Genetic Algorithms (GAs) and the hybrid procedure (GAs and Simplex Method - Nelder and Mead, 1965). Comparisons between both two optimization models have been performed, demonstrating hybridization advantages in terms of computational processing time and improved solutions.

Key words: calibration; water distribution networks; leakage; head-driven demands; hybrid method