

APLICAÇÃO DO MÉTODO HÍBRIDO AG-SIMPLEX NA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO DE DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO

Alexandre Kepler Soares

Departamento de Hidráulica e Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo – São Carlos – SP, Brasil

alexandrekepler@yahoo.com.br

Luisa Fernanda Ribeiro Reis

Departamento de Hidráulica e Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo – São Carlos – SP, Brasil

fernanda@sc.usp.br

Fernando das Graças Braga da Silva

Departamento de Hidráulica e Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo – São Carlos – SP, Brasil

fernandos2001@bol.com.br

***Resumo.** Os Algoritmos Genéticos (AGs) são técnicas de busca baseadas na seleção natural e nos mecanismos da genética populacional. A idéia dos AGs tem origem no processo biológico de adaptação e sobrevivência dos indivíduos mais capazes. O resultado é um algoritmo eficiente para a busca em espaços complexos tais como o espaço de busca de problemas de calibração de modelos de redes de distribuição de água. Os AGs têm sido apontados como promissores na resolução desse tipo de problema mas, apesar das suas inúmeras vantagens, não se mostram tão eficientes em refinar as soluções nas proximidades do ótimo. Assim, a fim de reduzir o tempo de processamento computacional e a eficiência do modelo de otimização quanto ao refinamento da solução final, um método híbrido é proposto, utilizando os AGs como ponto de partida, por um número determinado de gerações e, então, empregando um método de busca local para refinamento das soluções. Trata-se do método Simplex (Nelder & Mead, 1965), um dos mais populares esquemas de busca que não fazem uso de derivadas. Uma rede hipotética da literatura é utilizada e são realizadas comparações do método híbrido AG-Simplex com os AGs simples, demonstrando as vantagens do primeiro sobre o segundo.*

Palavras-chave: Algoritmos genéticos, Nelder-Mead, Modelo inverso, Redes de distribuição de água.

1. INTRODUÇÃO

A calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento constitui uma etapa decisiva à reprodução realística do comportamento de tais sistemas. No entanto, os modelos geralmente não consideram o vazamento distribuído ao longo da rede, bem como a dependência das demandas com os diferentes níveis de pressão atuantes em um sistema de distribuição de água.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo que considere as perdas por vazamento e a dependência das demandas com a pressão, com o suporte do simulador hidráulico EPANET (Rossman, 2000). Uma rede hipotética da literatura é utilizada com vistas à calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo de vazamentos, simultaneamente. No entanto, as diferentes características das variáveis de decisão e o número reduzido de informações coletadas da rede de distribuição de água tornam o problema da calibração indeterminado. Assim, no presente trabalho é utilizado um procedimento híbrido (AG-Simplex) para a resolução do modelo inverso, aliando a tecnologia de um método de busca global, Algoritmos Genéticos (AGs), com um método de busca local, Simplex (Nelder & Mead, 1965). A idéia do método híbrido é utilizar a melhor característica de cada método: a capacidade de busca em espaços complexos e com descontinuidades, no caso dos AGs, e o refinamento das soluções próximas do ótimo para aceleração da convergência, no caso do método Simplex.

Uma comparação entre o AG-Simplex e a otimização com o uso dos AGs somente é realizada e as vantagens do primeiro sobre o segundo são reportadas, em termos do refinamento das soluções e da redução do tempo de processamento computacional.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Diversos métodos de calibração têm sido propostos na literatura e estes podem ser classificados em três categorias: os métodos que empregam procedimentos *ad hoc*, métodos explícitos e métodos implícitos.

O primeiro grupo (Walski, 1983; Bhave, 1988) é composto pelos métodos baseados na resolução de sistemas de equações analíticas. Em tese, os parâmetros desconhecidos são avaliados a cada iteração utilizando dados de pressões e/ou vazões obtidas pela resolução hidráulica da rede.

Os métodos explícitos (Ormsbee & Wood, 1986; Boulos & Wood, 1990; Ferreri et al., 1994) trabalham com a resolução de sistemas de n equações não-lineares e n parâmetros desconhecidos. O conjunto de equações é, geralmente, resolvido através do método Newton-Raphson.

Recentemente, os problemas de calibração têm sido formulados e resolvidos como problemas de otimização, utilizando métodos de busca local ou global. Assim, o terceiro grupo (implícitos) utiliza métodos de busca (Algoritmos Genéticos, Gradiente e outros) na resolução do problema inverso, que consiste em minimizar uma função objetivo, usualmente a soma dos quadrados das diferenças entre os valores das variáveis de estado medidas e calculadas (pressões e/ou vazões).

2.1 Métodos de Busca Local

O primeiro trabalho de calibração de modelos de redes de distribuição de água que utilizou um método de busca direta foi proposto por Ormsbee (1989). O autor empregou uma versão melhorada do método Complex de Box (1965), que não necessita do cálculo de derivadas da função. Em geral, a minimização da função é feita utilizando-se um polígono n

dimensional conhecido como *complex*, em que cada vértice do polígono corresponde a um conjunto distinto de n variáveis de decisão.

Geralmente, são utilizados nos procedimentos implícitos de calibração métodos que se baseiam no gradiente da função a ser otimizada. Lansey & Basnet (1991) utilizaram o método do gradiente reduzido generalizado (GRG2) na resolução do procedimento de calibração. Este método requer o cálculo do gradiente da função objetivo mas não necessita da avaliação das matrizes Jacobiana (derivadas de 1ª ordem) ou Hessiana (derivadas de 2ª ordem).

Reddy et al. (1996) utilizaram o método Gauss-Newton, que, ao contrário do método GRG2, necessita do cálculo dos elementos das matrizes Jacobiana e Hessiana, fazendo com que ele seja mais “caro” computacionalmente, embora utilize menos iterações durante o processo de otimização.

Pudar & Liggett (1992) e Liggett & Chen (1994) empregaram uma modificação do método Gauss-Newton, o método Levenberg-Marquardt, para a calibração e detecção de vazamentos em modelos de redes de distribuição de água em regime permanente e transiente, respectivamente. O método Levenberg-Marquardt também utiliza as matrizes Jacobiana e Hessiana na busca e necessita de uma boa estimativa inicial para não falhar na convergência ou mesmo convergir para um ótimo local.

Pacotes computacionais para otimização são utilizados no trabalho proposto por Greco & Del Giudice (1999) para a resolução do problema de programação quadrática. As rotinas de programação linear LINDO (*Linear Interactive Discrete Optimizer*) baseada no algoritmo Simplex (não confundir com o método Simplex de Nelder-Mead) e de programação não-linear GINO (*Gradient Interactive Optimizer*) que emprega o método Gradiente são utilizadas no procedimento de calibração.

Luvizotto Jr. et al. (2000) avaliou quatro métodos de busca direta para a detecção de vazamentos em redes de distribuição de água: Levenberg-Marquardt, Gradiente, Simplex de Nelder & Mead (1965) e Algoritmos Genéticos (método de busca global). O método Gradiente necessita do cálculo da derivada de 1ª ordem da função e o processo de busca resume-se em correções sucessivas do vetor de soluções inicialmente estimado até que a função objetivo tenha atingido um valor mínimo estipulado. 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 equidistantes) e no deslocamento desses pontos para o ponto ótimo. O ótimo é alcançado pela aplicação dos operadores reflexão, contração, expansão e encurtamento, e, portanto, sem a necessidade do cálculo de derivadas da função. Dentre os métodos utilizados pelos autores, o método Simplex mostrou-se mais eficiente na resolução do exemplo proposto.

A principal vantagem dos métodos de busca local é a eficiência computacional, embora diversos autores notem que os métodos que se baseiam na avaliação tanto da função quanto das derivadas desta função possam falhar na convergência ou mesmo serem aprisionados em pontos de ótimo local, dependendo da solução inicial adotada (Greco & Del Giudice, 1999; Kaplan et al., 2002).

2.2 Métodos de Busca Global

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são os tipos de métodos de busca global mais utilizados no procedimento de calibração de modelos de redes de distribuição de água. Os primeiros autores a utilizar os AGs no processo de calibração foram Savic & Walters (1995), evidenciando que a técnica é eficiente na avaliação de problemas com espaço de busca complexo e de elevada dimensão, não necessitam de conhecimento matemático complexo, além da facilidade de incorporação de variáveis de decisão de diferentes naturezas.

Diversos autores (Tang et al., 1999; de Schaetzen et al., 2000; Vítkovský et al., 2000; Lingireddy & Ormsbee, 2002; Silva, 2003) propõem o uso dos AGs na calibração, comentando sobre suas vantagens como a possibilidade da realização da busca a partir de uma população de soluções e não de apenas um ponto.

Tucciarelli et al. (1999) utilizaram o método Quasi-Newton em conjunto com a técnica *Simulated Annealing* no procedimento de determinação das aberturas ótimas de válvulas redutoras de pressão além das rugosidades absolutas das tubulações e dos parâmetros do modelo de vazamento. *Simulated Annealing* é um método que se baseia na avaliação de todas as possíveis combinações de um número finito de valores de resistência, de acordo com uma probabilidade calculada em função da temperatura (parâmetro de controle do método).

No entanto, o elevado esforço computacional consumido e a falta de refinamento das soluções na proximidade do ótimo são apontados como deficiências dos métodos de busca global. Assim, Kapelan et al. (2000 e 2002) propõem a hibridização do modelo de otimização adotado. Nestes trabalhos, os autores utilizam os AGs em conjunto com o método Levenberg-Marquardt, aproveitando as melhores características de cada tipo, o primeiro como ponto de partida para uma melhor avaliação do espaço de busca e o segundo na busca local como forma de refinamento da solução final. Além disso, o esforço computacional requerido é muito menor do que aquele utilizado nas avaliações somente com o método de busca global.

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE CALIBRAÇÃO

O modelo inverso implementado no desenvolvimento do presente trabalho minimiza os desvios entre as variáveis de estado (pressão e vazão) observadas e aquelas obtidas via simulação computacional, que utiliza o simulador hidráulico EPANET (Rossman, 2000) como módulo de avaliação auxiliar. Convém salientar que, no caso, as variáveis de estado “observadas” (pressão e vazão) foram produzidas via simulação hidráulica da rede hipotética em estudo.

Os dados de entrada do modelo são compostos pelos dados “observados” de pressões em alguns nós e de vazões em certos trechos da rede, dos níveis dos reservatórios, e da vazão abastecida total na rede, para os diversos padrões (cenários) de demanda observados. Neste trabalho, foram considerados três padrões de demanda, 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 de atendimento da demanda potencial devido às menores pressões na rede), média e mínima (horas do dia em que o consumo é menor ou quase nulo, respectivamente, com maiores índices de vazamentos e menor ou nenhuma restrição na vazão de atendimento da demanda potencial devido aos maiores níveis de pressão).

A função a ser minimizada se baseia na soma dos quadrados das diferenças entre os valores simulados e “observados” de pressões e vazões adimensionalizados, de acordo com:

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

sendo n^{PD} o número de padrões de demanda observados, 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 da tubulações, θ o coeficiente de perda do modelo de vazamentos, β o expoente de perda do modelo de vazamentos, n_ε o número de tubulações ou setores de tubulações com rugosidades absolutas homogêneas, e n_θ e n_β o número de tubulações ou setores com coeficiente e expoente de vazamento homogêneos. A consideração de setores com variáveis de decisão homogêneas é uma sistemática que visa a diminuição do grau de parametrização do problema, reduzindo, por consequência, o seu grau de indeterminação. Assim, ao invés de determinarmos parâmetros para cada tubulação e nó, consideramos setores com valores homogêneos dos parâmetros a serem calibrados.

4. MODELO HIDRÁULICO

As equações da continuidade e da conservação da energia (relação entre a perda de carga e a vazão), que caracterizam as condições de equilíbrio hidráulico da rede num dado instante, podem ser resolvidas através de um Método Híbrido Nó-Malha. Todini & Pilati (1988) optaram por designá-lo como sendo o “Método Gradiente”, método utilizado no simulador hidráulico EPANET para obtenção dos valores de pressão e vazão na rede.

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:

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

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 m o coeficiente de perda de carga localizada.

A conservação de massa nos nós é especificada pela expressão:

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

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 satisfaçam as equações (3) e (4).

Neste trabalho, o simulador hidráulico EPANET será um módulo auxiliar na avaliação hidráulica da rede de distribuição de água, que será avaliada de maneira iterativa para considerar vazamentos e demandas dirigidas pela pressão.

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 micromedição admitiu-se que a vazão total abastecida (TS) possa ser subdividida em demanda total efetivamente abastecida (TD) e vazamentos (V), e o balanço de massa correspondente passa ser escrito como:

$$TS = TD + V \quad (5)$$

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:

$$TDP = FT \cdot TS^* \quad (6)$$

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

$$TD = TDP - PNA \quad (7)$$

Substituindo-se as equações (6) e (7) em (5), tem-se:

$$TS = FT \cdot TS^* - PNA + V \quad (8)$$

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

$$FT = \frac{TS + PNA - V}{TS^*} \quad (9)$$

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

Assim, o novo fator multiplicador (FT_2) no procedimento iterativo será:

$$FT_2 = \frac{TS + FT_1 \cdot TS^* - TD_1 - V_1}{TS^*} \quad (10)$$

sendo FT_1 , TD_1 e V_1 os valores na estimativa anterior para o fator multiplicador, a demanda total efetivamente abastecida e o vazamento total, respectivamente.

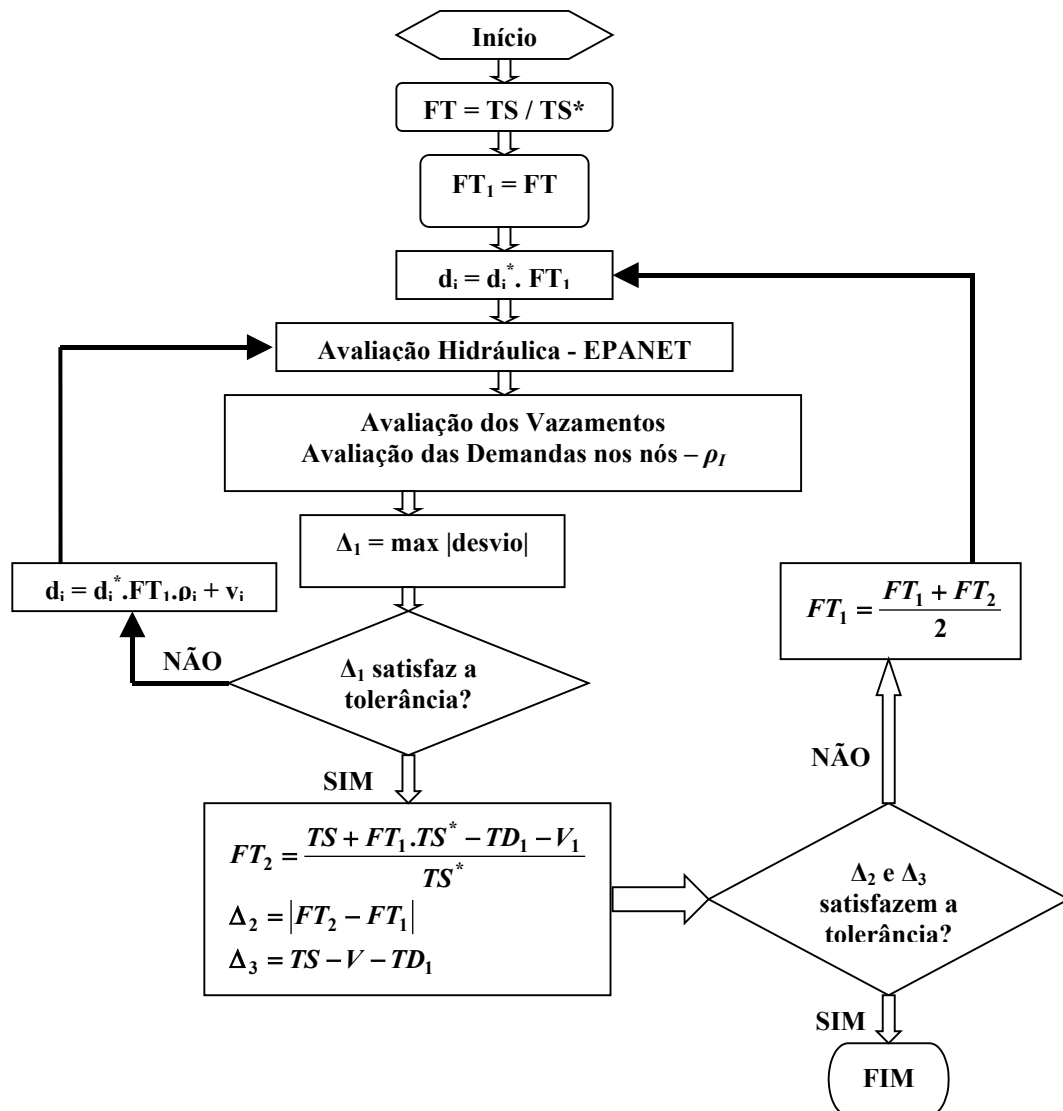


Figura 1 - Fluxograma do processo iterativo proposto para avaliação hidráulica e determinação do fator de consumo para cada padrão de demanda

Na Figura 1:

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

$$TS^* = \sum_{i \in N} d_i^* \quad (11)$$

$$TD = FT_1 \sum_{i \in N} d_i^* \cdot \rho_i \quad (12)$$

$$V = \sum_{i \in N} v_i \quad (13)$$

N = número de nós.

ρ_i é a relação entre a demanda efetivamente abastecida e a demanda potencial no nó i .

Um estudo da convergência dos modelos pressão x demanda descritos na literatura (Fujiwara & Li, 1998; Tucciarelli et al., 1999; e Tabesh & Karimzadeh, 2000) foi realizado por Soares (2003), concluindo que o modelo de Tucciarelli et al. (1999) consumiu o menor número de iterações nas simulações. Além disso, não houve diferença significativa nos valores de ρ_i para os diferentes modelos. Portanto, o fator de distribuição espacial ρ_i é tomado como:

$$\rho_i = 1 \quad \text{para} \quad P_i \geq P_i^{des}$$

$$\rho_i = \sin^2 \left(\frac{P_i}{2 \cdot P_i^{des}} \pi \right) \quad \text{para} \quad P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{des} \quad (14)$$

$\rho_i = 0$ para $P_i \leq P_i^{min}$
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.

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

$$v_i = (H_i - z_i)^\beta \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} D_{ij} \theta_{ij} L_{ij} \quad (15)$$

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 área 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 geralmente pode ser avaliada através do somatório das vazões de alimentação da rede através 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 no modelo a vazão de abastecimento de referência (TS^*), geralmente determinada com base no consumo médio mensal, as rugosidades absolutas ε 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.

5. MÉTODO HÍBRIDO AG-SIMPLEX

Para a resolução do problema inverso (eq. 1), diferentes métodos de busca direta (Gradiente, Levenberg-Marquardt 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 ou descontínuas.

Os AGs foram inventados por Holland nos anos 60 e desenvolvidos por ele, seus alunos e colegas, na “Universidade de Michigan”, nos anos 60 e 70. Em contraste com outras técnicas evolutivas, a grande idéia de Holland foi não desenvolver algoritmos para solucionar problemas específicos, mas sim estudar o fenômeno da adaptação como ele ocorre na natureza

e desenvolver caminhos através dos quais os mecanismos da adaptação natural pudessem ser importados para os sistemas computacionais (Goldberg, 1989).

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

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 & Mead, 1965) para a parte final do processo, poupando tempo computacional e refinando a solução final. 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.

Neste trabalho, a biblioteca *Galib C++* (Wall, 1996) é utilizada para a implementação dos AGs.

Assim, o processo de calibração é realizado conforme a Figura 2.

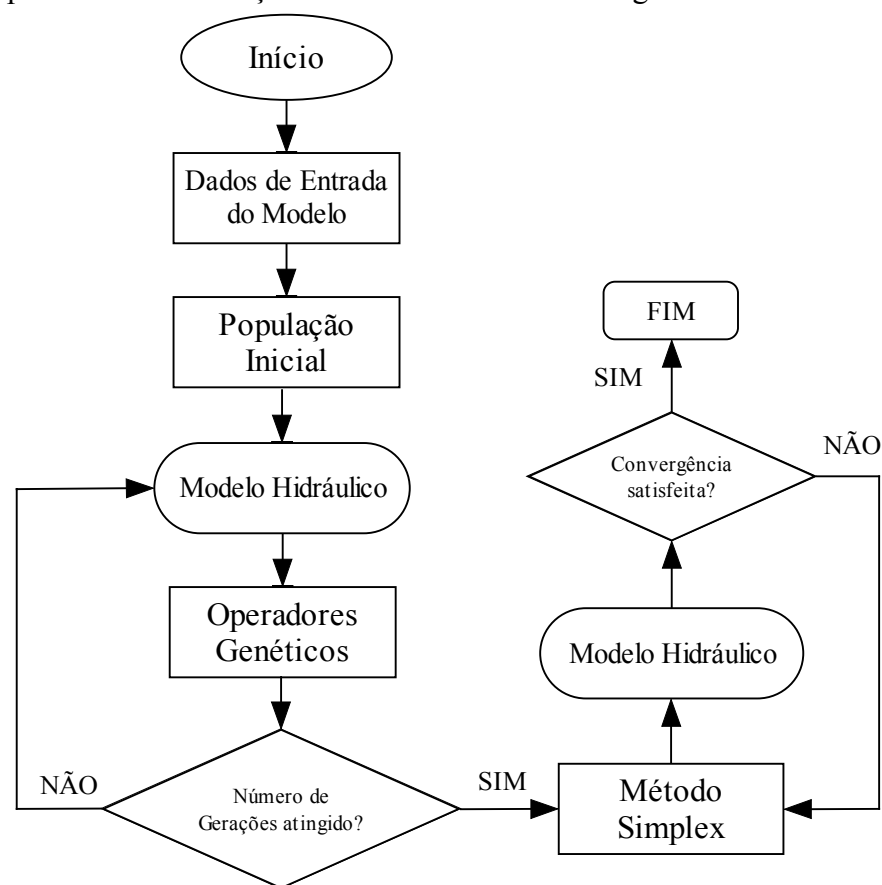


Figura 2 – Fluxograma do Processo de Calibração com o Método AG-Simplex

6. ESTUDO DE CASO

Com vistas às análises através do algoritmo proposto, empregou-se a rede estudada por Tucciarelli et al. (1999), mostrada na Figura 3, cujos dados constam das Tabelas 1 e 2.

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).

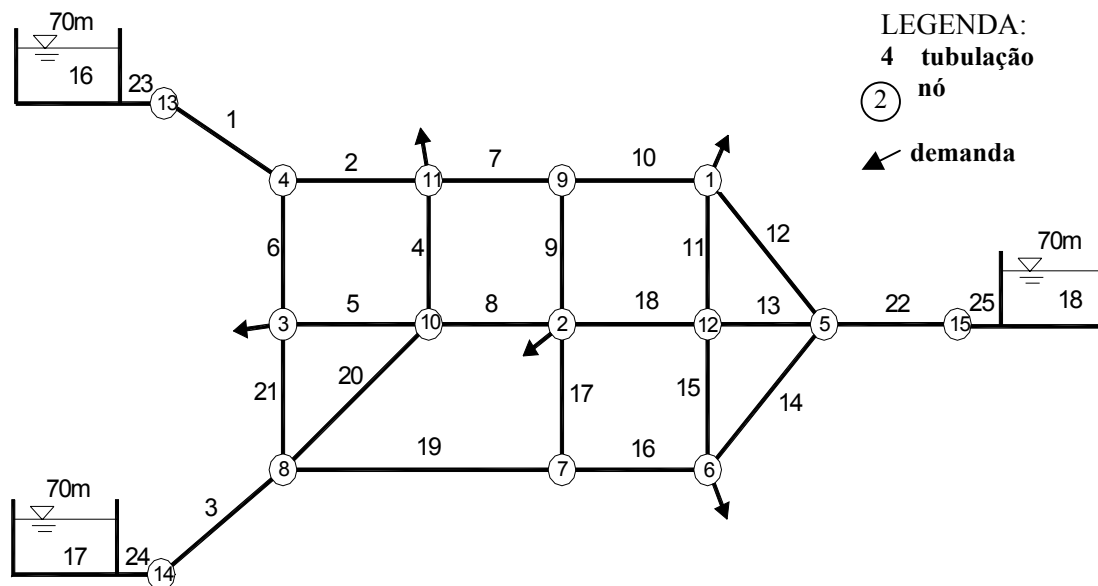


Figura 3 - Rede hipotética utilizada para a verificação do algoritmo

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

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

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 3 - Dados da rede empregados nas simulações (Tucciarelli et al., 1999)

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

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.

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)		
		Reservatório 16	Reservatório 17	Reservatório 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 (m)				
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 6	Nó 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

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.

7. 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, além da utilização de escalonamento linear no esquema de seleção *Stochastic Remainder Sampling*, recombinação aritmética uniforme (probabilidade de 70%), mutação gaussiana (probabilidade de 1%), taxa de elitismo de 30%. 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. Adotamos os valores de 1, 5, 10, 30 e 50 gerações e avaliamos 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 3. 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 neste tipo, pois, além de aplicar os operadores genéticos em maior número de soluções, preserva as melhores soluções através do elitismo.

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 Tabela 6 e 7 são mostrados, respectivamente, os valores simulados e observados de pressão para os nós e vazão nas tubulações de observação para a utilização do AG somente.

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

Padrão	Nó	Pressão simulada (m)			Pressão observada (m)	Erro Absoluto (m)		
		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

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

Padrão	Tubulação	Vazão Simulada (l/s)			Vazão observada (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 Tabela 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.

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

Padrão	Nó	Pressão simulada (m)			Pressão observada (m)	Erro Absoluto (m)		
		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	Tubulação	Vazão Simulada (l/s)			Vazão observada (l/s)	Erro relativo (%)		
		1	2	3		1	2	3
1	1	49,26	49,21	49,21	49,25	0,0	-0,1	-0,1
	3	54,77	54,83	54,82	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,14	83,15	83,14	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,31	76,33	76,35	76,37	-0,1	-0,1	0,0
	3	75,74	75,76	75,75	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,19	115,13	115,13	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,69	103,75	103,77	103,77	-0,1	0,0	0,0
	3	97,04	97,03	97,01	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,69	146,66	146,66	146,67	0,0	0,0	0,0

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 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 10 – Valores calibrados e reais

Variável de Decisão	Valores na busca		Valor Real	Valor ótimo AG	Valor ótimo AG-Simplex
	Min	Max			
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 minutos	38 segundos

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

Tabela 11 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex

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

Nota-se, na Tabela 11, 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.

8. 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 fosse indeterminado por natureza.

O avaliador hidráulico proposto utiliza o simulador EPANET como módulo auxiliar, eliminando, 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 & 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 processo 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 modelo híbrido 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.

O emprego do algoritmo para a calibração de modelos de redes reais deve ser investigado em trabalhos futuros.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bhave, P. R., 1988, Calibrating Water Distribution Network Models, *Journal of Environmental Engineering*, v. 114, n. 1, p. 120-136, Feb.
- Boulos, P. F. & Wood, D. J., 1990, Explicit Calculation of Pipe-Network Parameters, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, Nov.
- Box, R., 1965, A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with other Methods, *The Computer Journal*, v. 8, p. 45-52.
- de Schaetzen, W., Savic, D. A., Walters, G. A. e Rousseau, M., 2000, Analysis of the Sensitivity of the Calibration Optimization Problem, in *Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, eds. Savic, D. A. e Walters, G. A., p. 43-54, Sept.
- Ferreri, G. B., Napoli, E. e Tumbiolo, A., 1994, Calibration of Roughness in Water Distribution Networks, in *2nd International Conference on Water Pipeline Systems*, ed. Miller, D. S., BHR Group Conference Series, p. 379-396, Edinburgh, Scotland.
- 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.
- Greco, M. & Del Giudice, G., 1999, New Approach to Water Distribution Network Calibration, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 8, p. 849-854, Aug.
- Kapelan, Z. S., Savic, D. A. e Walters, G. A., 2000, Inverse Transient Analysis in Pipe Networks for Leakage Detection and Roughness Calibration, in *Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, eds. Savic, D. A. e Walters, G. A., p. 143-159, Sept.
- Kapelan, Z. S., Savic, D. A. e 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.
- Lansley, K. E. & Basnet, C., 1991, Parameter Estimation for Water Distribution Networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 117, n. 1, p. 126-144, Jan/Feb.
- Liggett, J. A. & Chen, L., 1994, Inverse Transient Analysis in Pipe Networks, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 120, n. 8, p. 934-955, Aug.
- Lingireddy, S. & Ormsbee, L. E., 2002, Hydraulic Network Calibration Using Genetic Optimization, *Civil Engineering and Environmental Systems*, v. 19, n. 1, p. 13-39.

- Luvizotto Jr., E., Soliani, R., Pizzo, H. S. e Jaquiê, L. C. L., 2000, Análise de Técnicas de Busca para um Modelo de Detecção de Fugas, in Anais do XIX Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina.
- Nelder, J. A. & Mead, R., 1965, A Simplex Method for Function Minimization, *The Computer Journal*, v. 7, n. 4, p. 308-313.
- Ormsbee, L. E., 1989, Implicit Network Calibration, *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 115, n. 2, p. 243-257, Mar.
- Ormsbee, L. E. & Wood, D. J., 1986, Explicit Pipe Network Calibration, *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 112, n. 2, p. 166-182, Apr.
- Pudar, R. S. & Liggett, J. A., 1992, Leaks in Pipe Networks, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 118, n. 7, p. 1031-1046, July.
- Reddy, P. V. N., Sridharan, K. e Rao, P. V., 1996, WLS Method for Parameter Estimation in Water Distribution Networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 122, n. 3, p. 157-164, May/June.
- Rossman, L. A., 2000, EPANET 2 users manual, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Savic, D. A. & Walters, G. A., 1995, Genetic Algorithm Techniques for Calibrating Network Models, Report No. 95/12, Centre for Systems and Control Engineering, University of Exeter, p. 41.
- Silva, F. G. B., 2003, Estudos de Calibração de Redes de Distribuição de Água através de Algoritmos Genéticos, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Soares, A. K., 2003, Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demandas Dirigidas pela Pressão, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 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, M. & Karimzadeh, A., 2000, Optimum Design of Reliable Distribution Systems Considering Pressure Dependency of Outflows, in *Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, eds. Savic, D. A. e Walters, G. A., p. 211-220, Sept.
- Tang, K., Karney, B. W., Pendlebury, M. e Zhang, F., 1999, Inverse Transient Calibration of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms, in *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, eds. Savic, D. A. e Walters, G. A., vol. 1, p. 317-326.
- Todini, E. & Pilati, S., 1988, A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks, in *Computer Applications in Water Supply – System Analysis and Simulation*, eds. Coulbeck, B. e Orr, C. H., vol. 1, p. 1-20.
- Tucciarelli, T., Criminisi, A. e 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.
- Vítkovský, J. P., Simpson, A. R. e Lambert, M. F., 2000, Leak Detection and Calibration Using Transients and Genetic Algorithms, *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 4, p. 262-265, July/Aug.
- Wall, M., 1996, GAlib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components, Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology.
- Walski, T. M., 1983, Technique for Calibrating Network Models, *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 109, n. 4, p. 360-372, Oct.