

## APLICAÇÃO DE MODELO DIRIGIDO PELA PRESSÃO NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Alexandre Kepler Soares<sup>1</sup>; Luisa Fernanda R. Reis<sup>2</sup>; Klebber T. M. Formiga<sup>3</sup>; Fernando G. Braga da Silva<sup>4</sup>; Ivaltemir Barros Carrijo<sup>5</sup>

**Resumo** – 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. Para tanto, utiliza-se um modelo inverso resolvido com o suporte da tecnologia dos Algoritmos Genéticos (AGs). Dois diferentes tipos de AGs (geracional elitista e *Steady-State*) foram implementados para esse propósito específico e as vantagens advindas do uso de cada qual são apresentadas aqui.

**Abstract** – Water distribution network calibration is a decisive stage in the reproduction of its hydraulic behavior. However, they normally do not consider leakage, as well as the dependence of demand in response to the varying levels of pressure in the water distribution system. In this paper, we seek to extend these models through the development of a model based on leakage and on pressure-dependent demand, with support of the hydraulic simulator EPANET (Rossman, 2000). A hypothetical network was used to calibrate the model in terms of the absolute roughness and the parameters of the leakage model, simultaneously. An inverse model is used based on the technology of Genetic Algorithms (GAs). Two different types of GAs (generational elitist and *Steady-State*) were implemented to calibration procedure, and their advantages were presented here.

---

<sup>1</sup> Doutorando em Hidráulica e Saneamento – SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2739534, Fax: 0xx16-2739550, E-mail: [aksoares@sc.usp.br](mailto:aksoares@sc.usp.br)

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

<sup>3</sup> Doutorando em Hidráulica e Saneamento – SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2739534, Fax: 0xx16-2739550, E-mail: [klebberformiga@uol.com.br](mailto:klebberformiga@uol.com.br)

<sup>4</sup> Professor Doutor – SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2739534, Fax: 0xx16-2739550, E-mail: [fernandos2001@bol.com.br](mailto:fernandos2001@bol.com.br)

<sup>5</sup> Engenheiro da SANEAGO e doutorando – SHS/EESC/USP - São Carlos - SP CEP: 13.560-250, Fone: 0xx16-2739534, Fax: 0xx16-2739550, E-mail: [tini@sc.usp.br](mailto:tini@sc.usp.br)

**Palavras-Chave:** redes de distribuição de água, calibração, vazamentos, demandas dirigidas pela pressão, algoritmos genéticos.

## INTRODUÇÃO

A aplicabilidade dos modelos para análise e reabilitação de redes de distribuição de água depende da precisão dos dados de entrada. Assim, os modelos de simulação requerem que os parâmetros relevantes do ponto de vista hidráulico sejam identificados com vistas à reprodução (previsão) realística de comportamento dos respectivos sistemas sob as mais diversas condições operacionais. Tal requisito faz da calibração uma etapa imprescindível na construção de modelos de redes de distribuição de água.

Diversos métodos de calibração têm sido propostos na literatura como os métodos que empregam procedimentos *ad hoc* (Walski, 1983; Bhave, 1988) baseados em algoritmos apoiados em equações analíticas, os métodos explícitos (Ormsbee e Wood, 1986; Boulos e Wood, 1990), também conhecidos como analíticos ou diretos, que trabalham com a resolução de sistemas de  $n$  equações não-lineares e  $n$  parâmetros desconhecidos, e os métodos implícitos (Ormsbee, 1989; Lansey e Basnet, 1991) que, partindo de algumas informações de pressões e/ou vazões, recorrem ao uso de uma função objetivo para a aproximação do problema inverso, que consiste em minimizar essa função objetivo, usualmente a soma dos quadrados das diferenças entre os valores das variáveis de estado medidas e calculadas. No entanto, os métodos para calibração de modelos de redes de distribuição de água citados tratam apenas da estimativa das rugosidades e demandas, sem considerar as perdas por vazamentos existentes nessas redes.

Considerando que não existem sistemas estanques e que a perda de água nestes sistemas possa ser elevada, o levantamento do volume total perdido, bem como o caráter local destas perdas, tem sido alvo de investigações que visam a inclusão de modelos pressão x vazamento nas análises das redes de distribuição de água.

Além disso, os modelos de simulação hidráulica dirigidos pelas demandas (MSHDD) mostram-se irrealistas na reprodução do comportamento de sistemas de distribuição de águas para abastecimento. Assim, o seu uso pode ter implicações diretas sobre a confiabilidade de sistemas projetados ou operados com base nos prognósticos por eles realizados, à medida que consideram demandas abastecidas integralmente, independentemente dos níveis de pressão atuantes na rede. Da mesma forma que as demandas efetivas apresentam relações de dependência com a pressão (Modelos de Simulação Hidráulica Dirigidos pela Pressão – MSHDP - Tabesh e Karimzadeh, 2000), modelos de simulação de redes sujeitas a índices de vazamento expressivos devem considerá-los.

A literatura atual oferece duas possibilidades de avaliação das perdas por vazamento: explícita ou iterativa. A avaliação explícita é realizada introduzindo-se os modelos (equacionamentos) envolvidos diretamente na simulação hidráulica das redes. Isso é possível implementando-se um código específico ou utilizando-se um código computacional que possa sofrer intervenção direta. Caso contrário, deve-se usar um procedimento de avaliação iterativo. O presente trabalho propõe um procedimento iterativo de avaliação de perdas por vazamento e demandas dependentes da pressão, uma vez que utiliza um *software* já existente e testado, o simulador hidráulico EPANET (Rossman, 2000). Os Algoritmos Genéticos (AGs) são utilizados para a resolução do problema inverso, que consiste na determinação das rugosidades absolutas e dos parâmetros do modelo de vazamentos, simultaneamente. Uma comparação dos AGs geracional elitista e *Steady-State* é realizada com base em dados extraídos via simulação de uma rede hipotética da literatura.

## FORMULAÇÃO DO PROBLEMA INVERSO

O modelo inverso implementado minimiza os desvios entre as variáveis de estado (pressão e vazão) observadas e aquelas obtidas via simulação computacional, que utiliza o simulador hidráulico EPANET como módulo de avaliação auxiliar. Convém salientar que, neste trabalho, 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, 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:

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

sendo  $n^{PD}$  o número de padrões de demanda 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  $\varepsilon$  a rugosidade da tubulações,  $\theta$  o coeficiente de perda do modelo de vazamentos,  $\beta$  o expoente de perda do modelo de vazamentos,  $n_\varepsilon$  o número de tubulações ou setores de tubulações com rugosidades absolutas homogêneas, e  $n_\theta$  e  $n_\beta$  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 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 calibrados.

## MODELO HIDRÁULICO

As equações da continuidade e da conservação da energia e a 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 e Pilati (1987) 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 considera 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  $PNA = (FT \cdot TS^* - TD)_{\text{inicial}}$ ; para  $V_{\text{inicial}}$ .

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.

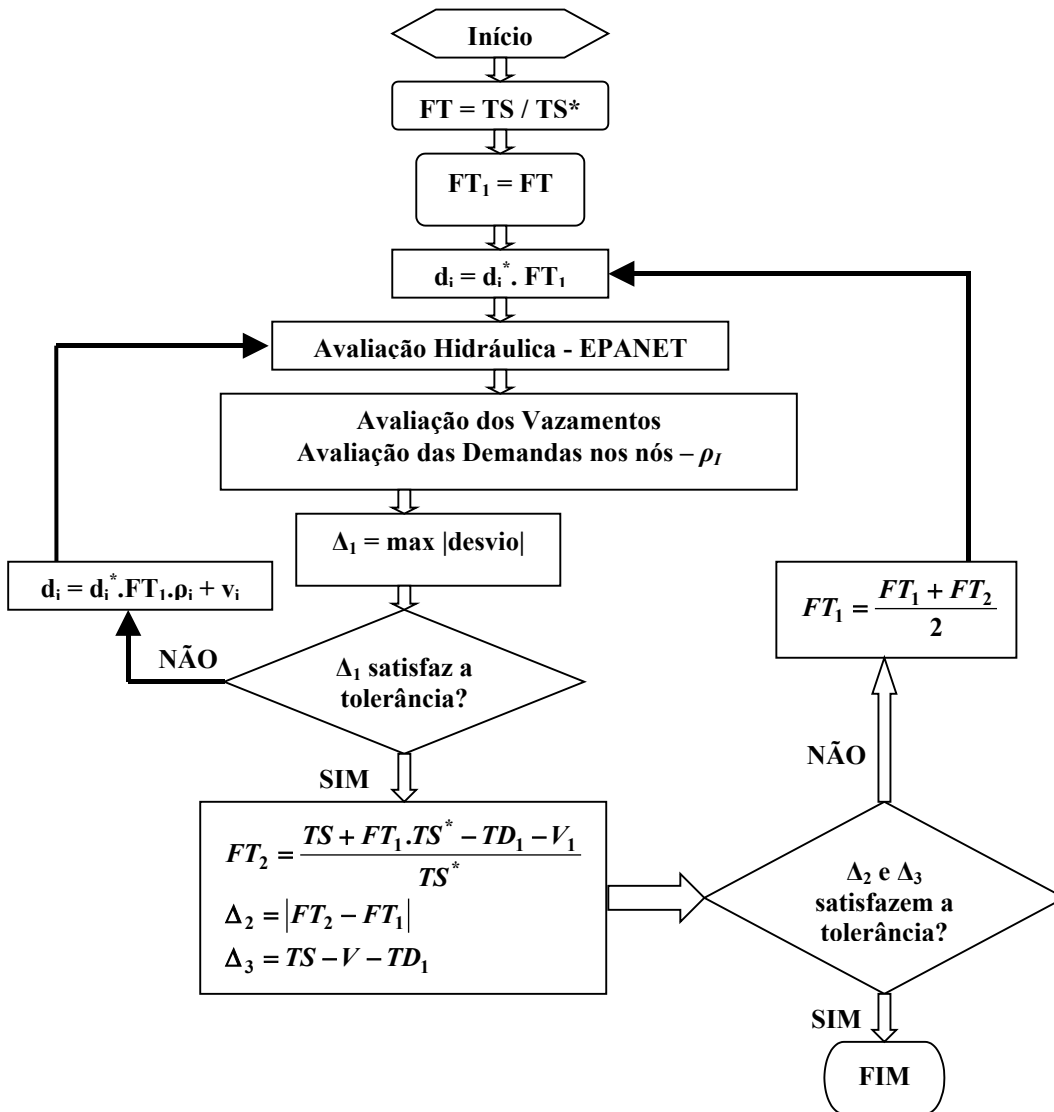


Figura 1 - Fluxograma do processo iterativo proposto para avaliação hidráulica e determinação do fator de consumo para cada padrão (cenário) de demanda.

Na Figura 1:

$\Delta_1$  = 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.

$\rho_i$  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 e Li, 1998; Tucciarelli et al., 1999; e Tabesh e 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  $\rho_i$  para os diferentes modelos. Portanto, o fator de distribuição espacial  $\rho_i$  é tomado como:

$$\begin{aligned} \rho_i &= 1 && \text{para} && P_i \geq P_i^{des} \\ \rho_i &= \text{sen}^2\left(\frac{P_i}{2.P^{des}}\pi\right) && \text{para} && P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{des} \\ \rho_i &= 0 && \text{para} && P_i \leq P_i^{min} \end{aligned} \quad (14)$$

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,  $\beta$  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  $\theta_{ij}$  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 pode ser feito através do controle das vazões que saem 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  $\varepsilon$  e coeficientes de perdas por vazamento  $\theta$  para cada tubulação ou setor, o expoente de perda  $\beta$  para cada nó ou setor, além das características da rede, como diâmetros e comprimentos das tubulações, níveis dos reservatórios, topografia e componentes hidráulicos.

## ALGORITMOS GENÉTICOS (AGs)

Para a resolução do problema inverso (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 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).

De acordo com a terminologia dos AGs, cada “cromossomo” representa uma possível solução para o problema, sendo que uma população de “cromossomos” representa um conjunto de possíveis soluções. O primeiro passo na implementação de um AG é a geração de uma população inicial de soluções. Durante o processo de otimização, a população é avaliada e cada solução recebe um valor, denominado de aptidão. Os AGs geralmente compreendem três operadores inspirados na genética: seleção, recombinação e mutação, os quais são aplicados repetidamente em busca de soluções eficientes para o problema em questão. A seleção é o mecanismo através do qual as soluções são copiadas para a próxima geração, resultando na sobrevivência das soluções mais aptas, ou seja, que resultem em valores mais eficientes na função objetivo. A recombinação promove a combinação de características correspondentes entre duas soluções pais, gerando duas novas soluções. E a mutação é uma degeneração casual dos valores, permitindo a introdução de novas características genéticas às populações. Nos AGs, a mutação é considerada mais um método para recuperar material genético perdido do que de procura de uma solução melhor.

Dentre as vantagens dos AGs sobre os métodos de busca direta convencionais pode-se citar o fato de que eles trabalham com o código dos parâmetros e não com os parâmetros propriamente ditos; buscam, a partir de uma população de pontos e não de um único ponto; usam informações da função objetivo apenas, não necessitando de derivadas ou de outras informações; não é necessário conhecimento matemático complexo, sendo de fácil implementação; são capazes de otimizar um número grande de variáveis, trabalhando com funções objetivo com superfícies complexas, reduzindo a incidência de mínimos ou máximos locais; adaptam-se bem a técnicas de computação paralela; fornecem uma gama de parâmetros ótimos e não uma simples solução; usam regras de transição probabilísticas e não determinísticas; são também facilmente hibridizados com outras técnicas. Sobretudo, os AGs apresentam a propriedade de “varrer” o espaço de soluções de maneira eficaz quando o número de variáveis de decisão do problema é grande.

Existem dois tipos básicos de AGs: geracional, com ou sem elitismo, e *Steady-State*. No AG geracional sem elitismo, toda a população é substituída em cada geração, ou seja, são criados  $n$  filhos para substituir  $n$  pais. Caso o elitismo seja utilizado, os  $p$  melhores pais nunca são substituídos por filhos piores. Recomenda-se um valor baixo para  $p$ , caso contrário, aumenta-se o risco da convergência prematura do algoritmo.

De acordo com a sistemática do AG *Steady-State*, são criados  $n$  filhos para substituírem os  $n$  piores pais da população em cada geração. Em geral, a probabilidade de recombinação é maior ( $\approx 1,0$ ) no AG *Steady-State* do que no AG geracional.

Há outros tipos de AGs na literatura, mas o presente trabalho investiga apenas os citados acima, com o emprego da biblioteca *GAlib C++* (Wall, 1996), de distribuição livre, para a realização da calibração.

A integração entre o modelo hidráulico e os AGs pode ser visto no fluxograma apresentado na Figura 2.

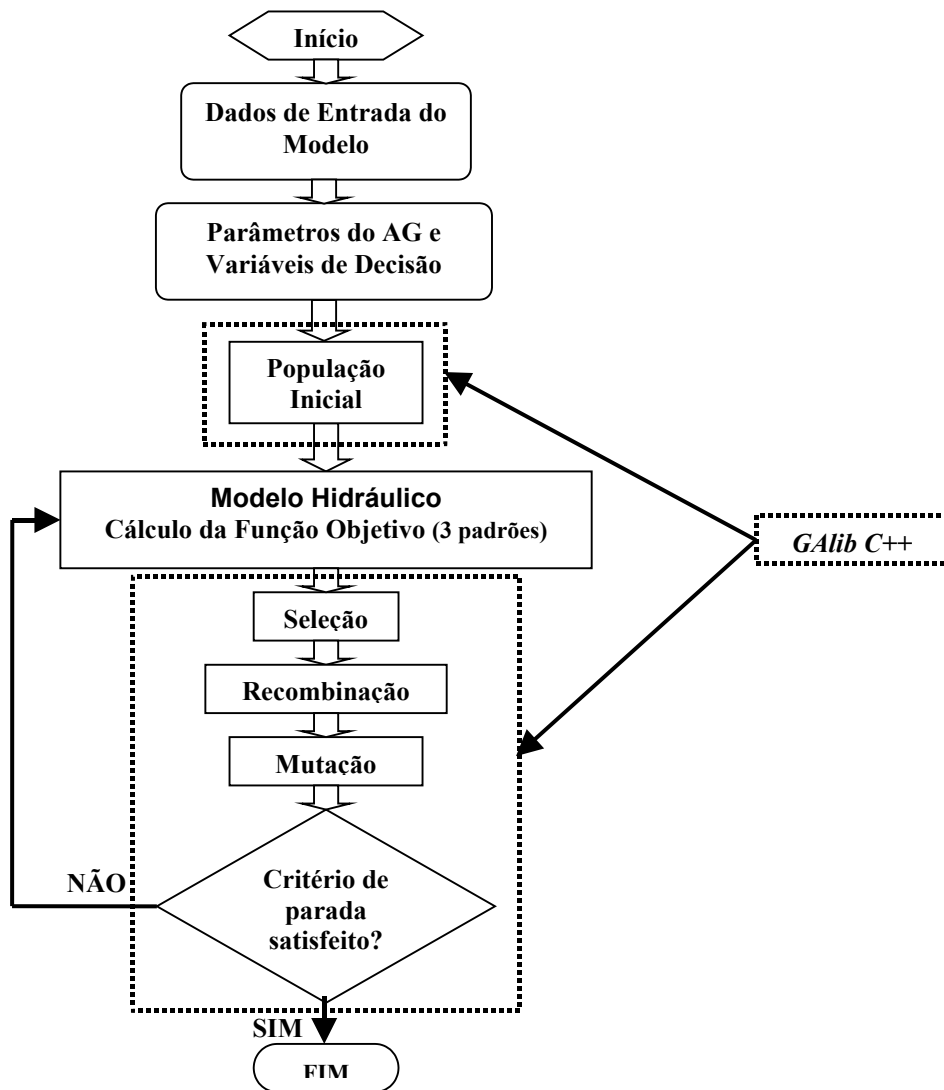


Figura 2 – Fluxograma do Processo de Calibração com os AGs.

Savic e Walters (1995) foram os pioneiros na utilização dos AGs no processo de calibração de modelos de redes de distribuição de água. Seguiram-se diversos trabalhos, conforme pode ser visto na Tabela 1, os quais evidenciam a habilidade dos AGs em avaliar o espaço de busca, produzindo diversas soluções próximas do ótimo global.

Tabela 1 – Aplicação de AGs na Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água.

<b>Trabalho</b>	<b>Tipo(s) de AG</b>	<b>Parâmetros estimados</b>	<b>Regime de escoamento</b>
Savic e Walters (1995)	GE	RUG	Permanente
Savic e Walters (1997)	GE	RUG	Permanente
Walters et al. (1998)	GE	RUG	Permanente
Tang et al. (1999)	GE	RUG, DE	Transiente
de Schaetzen et al. (2000)	GE	RUG, DI, DE	Permanente
Gambale (2000)	GE	RUG	Permanente
Kapelan et al. (2000)	GE, HIB1	RUG, DV	Transiente
Luvizotto Jr. et al. (2000)	GE	DV	Permanente
Simpson et al. (2000)	GE	RUG	Transiente
Tang et al. (2000)	GE	DV	Transiente
Vítkovský et al. (2000)	GE	RUG, DV	Transiente
Righetto (2001)	GE	RUG, DI, DE	Permanente
Caliman (2002)	GE	PMV	Permanente
Kapelan et al. (2002)	GE, HIB1	RUG, DV	Transiente
Lingireddy e Ormsbee (2002)	GE	RUG, DE	Permanente
Araújo (2003)	GE	RUG, DI, DV	Transiente
Silva (2003)	GE, SS	RUG, PMV, LS	Permanente
Soares (2003)	GE, SS, HIB2	RUG, PMV, DI, DE, CO, LS	Permanente

Abreviações: GE – geracional, SS – *Steady-State*, HIB1 – híbrido (geracional e método de Levenberg-Marquardt), HIB2 – híbrido (geracional e método Simplex de Nelder-Mead), RUG – rugosidades, DI – diâmetros, DE – demandas, CO – cotas topográficas, DV – detecção de vazamentos, PMV – parâmetros do modelo de vazamentos, LS – localização de singularidades (registros, tubulações com incrustações e outras fontes de perdas localizadas)

## **REDE EXEMPLO**

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

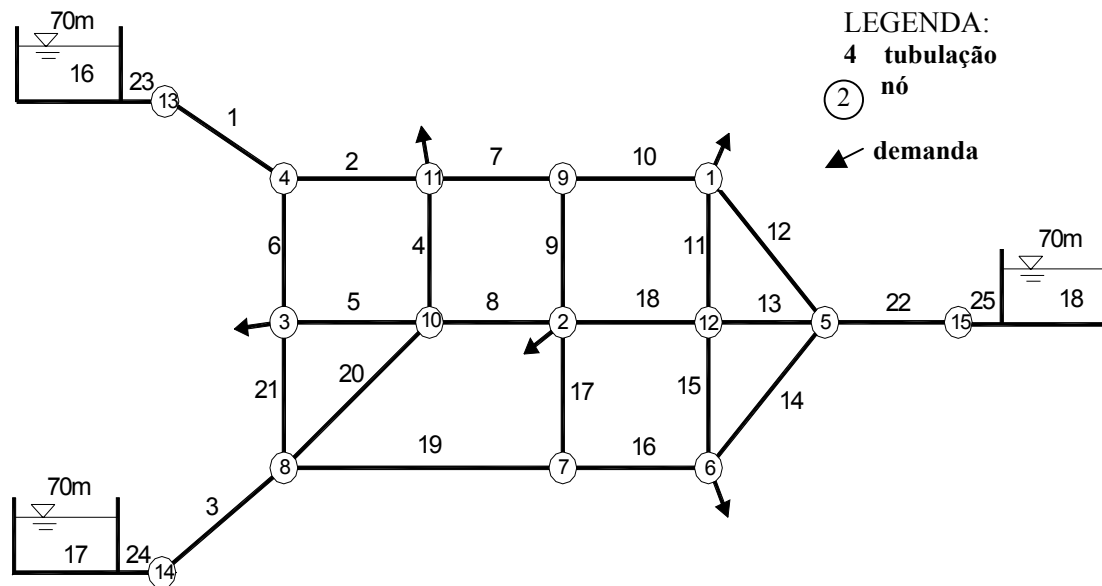


Figura 3 - Rede hipotética utilizada para a verificação do algoritmo.

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).

Tabela 2 - Dados das tubulações e diferentes zonas homogêneas em termos dos vazamentos.

Tubulação	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Zona ( $\theta$ )
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 3 - 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  $\theta$  do modelo de vazamento e um único setor para o expoente de vazamento  $\beta$  e a rugosidade absoluta  $\varepsilon$ , conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Dados da rede empregados nas simulações (Tucciarelli et al., 1999).

Expoente de perda ( $\beta$ )	Demanda de Referência (l/s)	Rugosidade absoluta (mm)	Coeficiente de perda		
			$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
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 5 e 6. 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.c.a.

Tabela 5 - Níveis dos reservatórios e demanda abastecida para os padrões de consumo.

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 6 - Pressão nos nós de consumo para os padrões de consumo.

Padrão de consumo	Pressão (m.c.a.)				
	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 6) e as vazões abastecidas (Tabela 5) 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.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a comparação dos AGs geracional elitista e *Steady-State*, foram realizadas três simulações para cada tipo de AG, a partir de diferentes sementes aleatórias, população com 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%). Para o caso do AG geracional, foi utilizada uma taxa de elitismo de 30%. O número de gerações utilizado como critério de convergência foi de 500 para o AG geracional elitista e 40 para o AG *Steady-State*, com substituição de 4 soluções em cada geração.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir, para as diferentes sementes aleatórias, considerando como critério de análise a evolução do valor da função de aptidão (Figuras 4 e 5), a comparação entre valores simulados e “observados” de pressões e vazões (Tabelas 7 a 10), e os valores ajustados das variáveis de decisão (Tabelas 11 e 12).

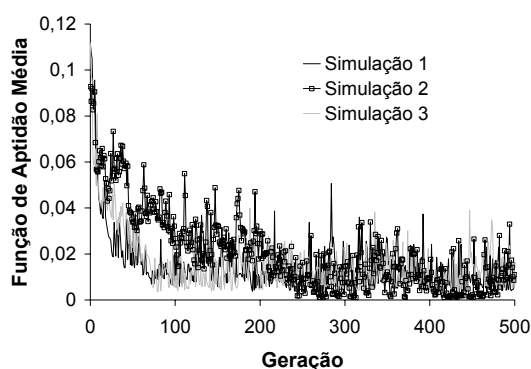


Figura 4 - Função de aptidão (geracional elitista).

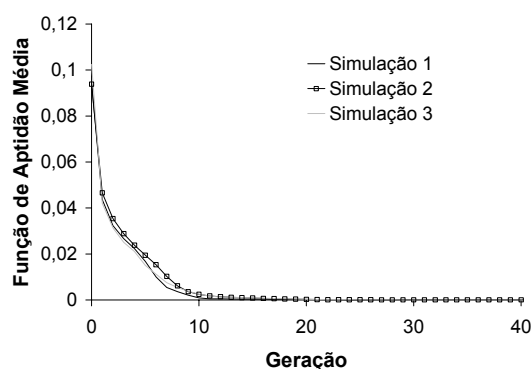


Figura 5 - Função de aptidão (*Steady-State*).

O comportamento da função de aptidão para os dois tipos de AG foi praticamente o mesmo para as diferentes simulações, como reportado nas Figuras 4 e 5. Nota-se a rápida convergência do AG *Steady-State*, com menos de 20 gerações consumidas, e a oscilação da função de aptidão para o AG geracional elitista. Em termos do número de gerações, o AG *Steady-State* consome bem menos gerações que o AG geracional elitista, o que reflete diretamente no tempo computacional, com média de 12,6 minutos para o AG geracional elitista e 1 minuto para o AG *Steady-State* em um microcomputador Athlon AMD 1,8 GHz, com 512 Mb de memória RAM. Considerando o tamanho da rede analisada neste trabalho, redes reais, normalmente em proporções maiores, irão exigir tempo de processamento muito superior.

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

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 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 8 - Comparação entre valores de vazão simulados e “observados” (geracional elitista).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 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 7 e 8, para o AG geracional elitista, não há uma diferença significativa entre os valores simulados e “observados”. Nota-se que o erro máximo nos valores de pressões simuladas é de 0,65 m.c.a. na simulação 1, nó 2 e padrão de consumo 2 (Tabela 7). 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 8).

Tabela 9 - Comparação entre valores de pressão simulados e “observados” (Steady-State).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,18	38,13	38,15	38,15	0,03	0,02	0,00
	2	42,36	42,23	42,27	42,26	0,10	0,03	0,01
	3	42,33	42,30	42,31	42,31	0,02	0,01	0,00
	6	36,86	36,82	36,84	36,83	0,03	0,01	0,01
	11	41,21	41,18	41,19	41,20	0,01	0,02	0,01
2	1	25,63	25,57	25,59	25,60	0,03	0,03	0,01
	2	28,22	28,09	28,14	28,14	0,08	0,05	0,00
	3	31,18	31,16	31,16	31,17	0,01	0,01	0,01
	6	25,57	25,54	25,55	25,55	0,02	0,01	0,00
	11	28,62	28,58	28,59	28,60	0,02	0,02	0,01
3	1	12,17	12,13	12,14	12,16	0,01	0,03	0,02
	2	12,66	12,61	12,63	12,65	0,01	0,04	0,02
	3	19,37	19,36	19,36	19,38	0,01	0,02	0,02
	6	13,74	13,72	13,72	13,73	0,01	0,01	0,01
	11	14,97	14,94	14,95	14,98	0,01	0,04	0,03

Tabela 10 - Comparação entre valores de vazão simulados e “observados” (*Steady-State*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,41	49,40	49,43	49,25	0,3	0,3	0,4
	3	54,82	54,72	54,76	54,80	0,0	-0,1	-0,1
	22	82,97	83,06	82,99	83,12	-0,2	-0,1	-0,2
2	1	76,44	76,41	76,48	76,37	0,1	0,1	0,1
	3	75,88	75,67	75,73	75,73	0,2	-0,1	0,0
	22	114,92	115,14	115,01	115,14	-0,2	0,0	-0,1
3	1	103,81	103,76	103,84	103,77	0,0	0,0	0,1
	3	97,11	97,00	97,01	97,00	0,1	0,0	0,0
	22	146,49	146,67	146,58	146,67	-0,1	0,0	-0,1

Os resultados de pressões e vazões para o uso do AG *Steady-State* foram melhores que os resultados alcançados para o AG geracional elitista. Os erros máximos foram de 0,10 m.c.a. para os valores de pressão e 0,4% para os valores de vazão.

Nas Tabelas 11 e 12, são apresentados os resultados em termos das variáveis de decisão do problema para cada simulação. Os limites do espaço de busca são também especificados através dos valores mínimo e máximo para cada variável de decisão. Uma média dos valores encontrados nas três simulações é feita para a comparação com o respectivo valor real.

Tabela 11 - Valores calibrados e reais (geracional elitista).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
$\varepsilon$ (mm)	0,01	5,00	3,331	3,021	3,108	3,153	3,153	0,000	0,0
$\theta_1$ ( $\times 10e-7$ )	0,05	3,00	0,798	0,587	0,560	0,648	0,750	-0,102	-13,6
$\theta_2$ ( $\times 10e-7$ )	0,05	3,00	2,240	1,633	2,039	1,971	1,909	0,062	3,2
$\beta$	0,1	1,3	1,215	1,256	1,183	1,218	1,253	-0,035	-2,8

Na solução final em termos das variáveis de decisão alcançada pelo AG geracional elitista (Tabela 11), apenas um parâmetro (coeficiente de perda  $\theta_2$ ) apresentou um erro considerável de -13,6%. Os demais parâmetros foram considerados ajustados.

Tabela 12 - Valores calibrados e reais (*Steady-State*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
$\varepsilon$ (mm)	0,01	5,00	3,200	3,199	3,188	3,196	3,153	0,043	1,4
$\theta_1$ ( $\times 10e-7$ )	0,05	3,00	0,93	0,839	0,801	0,857	0,750	0,107	14,2
$\theta_2$ ( $\times 10e-7$ )	0,05	3,00	1,957	2,121	1,88	1,986	1,909	0,077	4,0
$\beta$	0,1	1,3	1,265	1,219	1,26	1,248	1,253	-0,005	-0,4

Os AGs *Steady-State* (Tabela 12) produziram praticamente os mesmos resultados obtidos via AG geracional elitista. Uma pequena diferença, a favor do AG geracional elitista, é encontrada nos valores ajustados das rugosidades e coeficientes de perda  $\theta$ , se compararmos os erros relativos. No entanto, para o expoente de perda  $\beta$ , o AG *Steady-State* garantiu uma pequena vantagem.

Se considerarmos o tempo computacional requerido, o AG *Steady-State* produziu praticamente os mesmos resultados do AG geracional elitista, mas em um tempo muito menor.

A dificuldade encontrada nas simulações diz respeito ao valor máximo do expoente de perda  $\beta$ , fixado em 1,3, como visto nas Tabelas 11 e 12. Para valores superiores a 1,3 e/ou uma combinação de valores elevados dos parâmetros de vazamento não há convergência no algoritmo iterativo de avaliação hidráulica, mais especificamente no *loop* interno do avaliador.

## CONCLUSÕES

Um estudo da calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão foi realizado no presente trabalho.

O algoritmo de avaliação hidráulica proposto utiliza o simulador hidráulico EPANET 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.

Dois tipos de AGs foram testados na calibração do modelo de uma rede hipotética da literatura. O AG geracional elitista consumiu maior tempo de processamento computacional nas simulações quando comparado com o tempo de processamento do AG *Steady-State*, que requereu poucas gerações para que a convergência fosse atingida. Os melhores valores da função objetivo foram encontrados pelo AG *Steady-State*, o que, não necessariamente, implicou em uma melhor solução final em termos das variáveis de decisão, cujos valores foram identificados com uma precisão ligeiramente maior pelo AG geracional elitista.

De maneira geral, o algoritmo de calibração apresentou bons resultados, determinando parâmetros de diferentes naturezas simultaneamente, embora a rede de amostragem não fosse otimizada e o problema seja indeterminado por natureza.

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.

Recomenda-se, portanto, o emprego do algoritmo para a calibração de modelos de redes reais 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

- Araújo, J. K. (2003). *Calibração de Redes de Distribuição de Água pelo Método Inverso aplicado a Escoamento Transiente*. São Carlos. 166 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 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.
- Caliman, R. O. (2002). *Determinação dos Parâmetros do Modelo Pressão x Vazamento para Sub-setores da Rede de Distribuição de Água de São Carlos - SP*. São Carlos. 110 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- de Schaetzen, W.; Savic, D. A.; Walters, G. A.; Rousseau, M. (2000). Analysis of the Sensitivity of the Calibration Optimization Problem. In: Savic, D. A. (ed.); Walters, G. A. (ed.): *Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, p. 43-54, Sept.
- 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.
- Gambale, S. R. (2000). *Aplicação de Algoritmo Genético na Calibração de Redes de Água*. São Paulo. 266 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil.
- 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. (ed.); Walters, G. A. (ed.): *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.
- 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.
- 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.; 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.
- 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.
- Righetto, A. M. (2001). Calibração de Modelo Hidráulico de Rede de Distribuição de Água. *Revista ABRH*, v. 6, n. 3, p. 33-44, Set.
- 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.
- Savic, D. A.; Walters, G. A. (1997). Evolving Sustainable Water Networks. *Hydrological Sciences Journal*, v. 42, n. 4, p. 549-564, Aug.
- Silva, F. G. B. (2003). *Estudos de Calibração de Redes de Distribuição de Água através de Algoritmos Genéticos*. São Carlos. 234 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Simpson, A. R.; Vítkovský, J. P.; Lambert, M. F. (2000). Transients for Calibration of Pipe Roughnesses Using Genetic Algorithms. In: *VIII INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRESSURE SURGES: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems*, The Hague, The Netherlands. BHR Group 2000 Pressure Surges, Publications n. 39, p. 587-597.
- Soares, A. K. (2003). *Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demandas Dirigidas pela Pressão*. São Carlos, 2003. 152 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Tabesh, M.; Karimzadeh, A. (2000). Optimum Design of Reliable Distribution Systems Considering Pressure Dependency of Outflows. In: Savic, D. A. (ed.); Walters, G. A. (ed.): *Water Network Modeling for Optimal Design and Management*, p. 211-220, Sept.
- Tang, K. W.; Brunone, B.; Karney, B. W.; Rossetti, A. (2000). Role and Characterization of Leaks Under Transient Conditions. *Proceedings of the Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management*, Minneapolis, MN.

- Tang, K.; Karney, B. W.; Pendlebury, M.; Zhang, F. (1999). Inverse Transient Calibration of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms. In: Savic, D. A. (ed.); Walters, G. A. (ed.): *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, vol. 1, p. 317-326.
- Todini, E.; Pilati, S. (1987). A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks. In: Coulbeck, B. (ed.); Orr, C. H. (ed.): *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.
- Vítkovský, J. P.; Simpson, A. R.; 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.
- Walters, G. A.; Savic, D. A.; Morley, M.; de Schaetzen, W.; Atkinson, R. (1998). Calibration of Water Distribution Network Models Using Genetic Algorithms. In: Blain, W. R. (ed.): *Hydraulic Engineering Software VII*, p. 131-140.