

ESTUDO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE VAZAMENTOS DE UM SETOR DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE PIRACICABA-SP

Alexandre Kepler Soares¹; Luisa Fernanda Ribeiro Reis²

Resumo - O presente estudo visa avaliar as perdas por vazamento para um setor da rede de distribuição de água da cidade de Piracicaba, SP, Brasil. Para tanto, utiliza-se um procedimento iterativo de avaliação hidráulica que considera as perdas por vazamento e a dependência das demandas com a pressão, acoplado ao simulador hidráulico EPANET 2 (Rossman, 2000), com vistas à calibração em termos dos parâmetros do modelo de vazamentos, bem como das rugosidades absolutas das tubulações. Para a resolução do problema inverso correspondente são utilizados os Algoritmos Genéticos (AGs), produzindo um modelo capaz de avaliar o comportamento do sistema face às condições operacionais mais diversas potencialmente útil à operação, expansão e reabilitação do mesmo.

Abstract – The present study seeks to evaluate the leakage of a water distribution network sector in the city of Piracicaba, SP, Brazil. Moreover, an iterative procedure for hydraulic analysis based both on leakage and on pressure-dependent demand has been used in conjunction with the hydraulic simulator EPANET 2 (Rossman, 2000), for calibration in terms of the parameters of the leakage model, as well as the pipe roughness. Genetic Algorithms (GAs) are used to solve the corresponding inverse problem, producing a model, which is able to analyze the system's behavior under several operational conditions potentially useful to the operation, expansion and rehabilitation of the system.

Palavras-chave: perdas por vazamento, calibração, redes de distribuição de água reais.

INTRODUÇÃO

Há um déficit entre a quantidade total de água disponibilizada e a quantidade de água efetivamente consumida pelos usuários dos sistemas de abastecimento causada por diversos fatores,

¹ Doutorando em Hidráulica e Saneamento - Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - São Carlos – SP. Caixa Postal 359, Fone: 0xx16-2739534, Fax: 0xx16-2739550, e-mail: aksoares@sc.usp.br

² Professora Associada - Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - São Carlos – SP. E-mail: fernanda@sc.usp.br

tais como perdas por vazamento em tubulações e conexões, submedição dos hidrômetros, consumo público não-registrado ou conexões não autorizadas.

No Brasil, são comuns sistemas de distribuição de água para abastecimento com elevados índices de perdas, nos quais parcela significativa 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.

A quantificação dos vazamentos pode ser feita através da inclusão de modelos pressão x vazamento nas análises hidráulicas. Entretanto, para que esses modelos possam realizar estimativas confiáveis, é necessário, primeiramente, que seus parâmetros sejam conhecidos.

Sendo assim, técnicas de calibração, incluindo modelos para avaliação de perdas por vazamento, 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.

No presente trabalho, são identificados os parâmetros do modelo pressão x vazamento para um setor da rede de distribuição de água da cidade de Piracicaba, SP. Para tanto, utilizam-se modelos inversos resolvidos com o suporte da tecnologia dos Algoritmos Genéticos (AGs), alimentados por dados obtidos em campo. Os dados de pressão em alguns nós da rede e da vazão abastecida fazem-se necessários para a determinação dos parâmetros do modelo pressão x vazamento.

As simulações hidráulicas realizadas neste trabalho utilizam o procedimento iterativo proposto por Soares et al. (2002), segundo o qual tanto as perdas por vazamento 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.

ANÁLISE HIDRÁULICA CONSIDERANDO MODELOS PRESSÃO X VAZAMENTO

Partindo do princípio de que os vazamentos dependem das pressões, os modelos de vazamentos podem ser subdivididos em métodos que se prestam a avaliações globais ou detalhadas da rede. Dentre os modelos de caráter mais globais destacam-se aqueles propostos por National Water Council (1980), Lambert e Hirner (2000), todos eles fazendo uso da pressão média por zona. Burrows et al. (2000) fazem uso da pressão média por zona para o cálculo das perdas por

vazamento, mas comentam que a principal deficiência do método é a impossibilidade de sua incorporação nas simulações hidráulicas, admitindo as perdas dirigidas pela pressão.

Dentre os modelos detalhados, diretamente utilizáveis nas simulações hidráulicas, a literatura oferece basicamente duas alternativas quanto à maneira de incorporá-los na avaliação hidráulica das redes. Uma possibilidade é a introdução dos vazamentos explicitamente no modelo de simulação hidráulica da rede (Germanopoulos e Jowitt, 1989; Jowitt e Xu, 1990; Salgado et al., 1993; Tucciarelli et al., 1999; Martínez et al., 1999; Cheung et al., 2004). A outra alternativa consiste em supor que as perdas, função das pressões nos nós da rede, possam ser avaliadas iterativamente, sem que sejam explicitadas relações pressão x vazamento internamente ao modelo (Hernández et al., 1999; Soares, 2003; Manzi, 2004). Observa-se que essa última alternativa possibilita o acoplamento do problema de calibração com pacotes computacionais que não incorporam explicitamente os vazamentos no modelo, implicando, porém, em um tempo de processamento computacional superior, dada a natureza iterativa do procedimento. Apresentam-se a seguir as possíveis formulações de maneira a explicitar os vazamentos como componentes dos modelos de simulação hidráulica.

Germanopoulos e Jowitt (1989) incorporam as perdas por vazamento explicitamente no modelo a partir de relações pré-estabelecidas dos parâmetros pressão x vazamento nas equações de continuidade dos nós, na forma:

$$q_{ij} = c_l L_{ij} (P_{ij}^{av})^{1,18} \quad (1)$$

sendo q_{ij} o vazamento na tubulação entre os nós i e j , c_l uma constante que depende das características da rede, L_{ij} o comprimento da tubulação entre os nós i e j e P_{ij}^{av} a média entre as pressões no início e no final da tubulação.

O sistema não-linear resultante é resolvido utilizando-se o método da teoria linear.

Tucciarelli et al. (1999) desenvolvem uma metodologia de calibração com a possibilidade de estimar as perdas por vazamento em diferentes áreas de uma rede de distribuição de água por meio de um processo iterativo de dois passos. O primeiro passo consiste da estimativa dos parâmetros da rede propriamente dita e dos parâmetros do modelo de vazamentos. Os parâmetros estimados incluem o coeficiente e o expoente de perda, que correspondem à perda de água para cada área da rede (chamadas zonas). O segundo passo consiste da determinação das aberturas otimizadas das válvulas situadas na rede, tendo como restrições as pressões mínimas e a equação da continuidade nos nós.

O vazamento q_i é calculado assumindo que nas tubulações em cada zona há valores constantes de vazamento por área de superfície de tubo. Assim:

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

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 , e θ_{ij} o coeficiente de perda por unidade de superfície do tubo ligando os nós i e j .

Martínez et al. (1999) calibram um modelo de simulação hidráulica para a cidade de Valência, Espanha, tendo como base o *software* EPANET. O *software* construído possui modelos de qualidade da água e de relação pressão x vazamento, bem como a dependência pressão x demanda. Quanto ao modelo de vazamentos, estes são diferenciados na rede de distribuição de água em vazamentos nas partes modelada e não-modelada do sistema. A parte modelada da rede constitui das linhas principais de distribuição de água (esqueleto), enquanto que os setores com tubulações de menor diâmetro e, portanto, consumos inferiores, são representados pela demanda total deste setor localizada em um ou mais nós das linhas principais, sendo que esta fração da rede constitui a parte não-modelada.

A taxa de vazamento na rede modelada, q_L , é dada por:

$$q_{L,ij} = c_L^s L_{ij} \cdot (P_{ij}^{av})^{1,18} \quad (3)$$

sendo c_L^s uma constante dependente das características particulares da rede ou do setor s .

Uma formulação mais complexa para o cálculo da taxa de vazamento na rede modelada é baseada no fato de que as perdas por vazamentos podem ser consideradas proporcionais ao número de defeitos:

$$n_b = k \cdot L \cdot D^d \cdot e^{a\tau} \quad (4)$$

sendo n_b o número de quebras ocorridas durante o intervalo $[0, \tau]$, k um coeficiente que depende do tipo e qualidade do material e da instalação, L o comprimento da tubulação, D o diâmetro, d um expoente cujo valor é 1 para diâmetros pequenos (menores que 125 mm) e -1 para diâmetros maiores, a um parâmetro de ajuste da evolução temporal do número de quebras e τ a idade da tubulação. Portanto, a eq. (3) pode ser escrita da seguinte forma:

$$q_{L,ij} = c \cdot L_{ij} \cdot D_{ij}^d \cdot e^{a\tau} (P_{ij}^{av})^{1,18} \quad (5)$$

para um grupo de tubulações de igual material e idade.

Uma expressão similar é proposta para o cálculo da taxa de vazamento na rede não-modelada para cada nó i e intervalo de tempo k :

$$q_{2,i} = K_i \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T [H_i(k)]^\beta \quad (6)$$

sendo T o número total de intervalos considerados na simulação, β o expoente de perda (diferente

para cada setor) e K_i o coeficiente de descarga do orifício que depende do tipo e da forma deste e é dado por:

$$K_i = c_2^s \left[\sum_{k=1}^T Q_{c,i}(k) \right] \quad (7)$$

sendo c_2^s o coeficiente de vazamento do setor e $Q_{c,i}$ a vazão total de abastecimento do nó i .

Também utilizando como base o simulador hidráulico EPANET, Hernández et al. (1999) propõem um modelo iterativo de simulação baseado no Método Gradiente (Todini e Pilati, 1988). O *software* produzido utiliza técnica de computação paralela para diminuir o tempo computacional das simulações, além de um processo iterativo para a integração do modelo pressão x vazamento. O processo possui os seguintes passos:

- 1- As perdas por vazamento são assumidas iguais a zero em cada nó;
- 2- As pressões em cada nó são calculadas através do modelo de simulação;
- 3- Uma aproximação do vazamento em cada nó i é obtida da seguinte formulação:

$$q_i = K_i \cdot P_i^{1,1} \quad (8)$$

sendo K_i um coeficiente para cada nó, suposto constante para longos períodos do dia;

- 4- Soma-se a perda por vazamento à demanda real em cada nó, e um novo valor global de consumo é obtido;
- 5- Volta-se ao passo 2. O processo termina quando os valores de vazamentos em cada nó atingem valores estáveis para uma certa tolerância.

Com a utilização de válvulas redutoras de pressão, um modelo de minimização de perdas por vazamento também é proposto, sendo o problema de otimização resolvido por uma técnica de programação quadrática seqüencial. Os autores evidenciam o menor tempo computacional atingido e os aspectos matemáticos da computação paralela.

Utilizando a mesma metodologia de Hernández et al. (1999), Alonso et al. (2000) modificaram o expoente de perda da equação (8), adotando a seguinte formulação:

$$q_i = K_i \cdot P_i^{1,18} \quad (9)$$

Ainola et al. (2000) desenvolvem uma metodologia para a calibração de modelos de redes de distribuição de água que consiste em dois passos: o primeiro diz respeito à quantificação e distribuição das perdas por vazamento, e o segundo à calibração propriamente dita. Quanto ao modelo de vazamentos empregado, os autores empregam a seguinte formulação para o cálculo do vazamento entre os nós i e j :

$$q_{ij} = \pi \cdot \alpha_{ij} \cdot L_{ij} \cdot (P_{ij}^{av})^\beta \quad (10)$$

sendo π um coeficiente de proporcionalidade de vazamentos para a rede ou setor da rede e α_{ij} um coeficiente que é função do diâmetro, idade e material da tubulação.

Assim, o volume total de vazamentos para cada nó i será:

$$q_i = \pi \cdot q_i^* \quad (11)$$

sendo

$$q_i^* = \sum_{j=1}^{M_i} (0,5)^\beta \cdot \alpha_{ij} \cdot L_{ij} \cdot P_i \cdot (P_i + P_j)^{\beta-1} \quad (12)$$

O coeficiente de proporcionalidade π pode ser determinado como:

$$\pi = \frac{q}{\sum_{i=1}^{J_d} q_i^*} \quad (13)$$

sendo q o volume total de vazamento e J_d o número total de nós da rede.

Utilizando o modelo de vazamentos proposto por Jowitt e Xu (1990) e um método de busca direta univariada, Santos (2000) faz um estudo das perdas por vazamentos em um setor da rede de abastecimento da cidade de São Carlos, SP, Brasil. Estudo também feito por Caliman (2002) e Silva (2003), nos quais os autores utilizam como método de busca os Algoritmos Genéticos. Caliman (2002) também realiza estudos de zoneamento em três setores da rede de distribuição de água de São Carlos, baseando-se na idade, diâmetro e tipo das tubulações, bem como nos níveis de pressão atuantes. O autor considera o resultado do levantamento dos parâmetros de vazamento como satisfatório, mas conclui que estes parâmetros devem ser estimados conjuntamente com os parâmetros da rede propriamente dita (rugosidades e diâmetros).

Utilizando um algoritmo de dois passos, Silva (2003) propõe um método iterativo para calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo pressão x vazamento de setores da rede de distribuição de água da cidade de São Carlos, SP, Brasil. O primeiro passo consiste em determinar as rugosidades absolutas das tubulações e o segundo os parâmetros de vazamentos, utilizando a rotina computacional desenvolvida por Caliman (2002). Os dados de campo foram obtidos com base em testes noturnos, ideais em áreas com elevada ocorrência de vazamentos. Os autores também propõem um estudo sobre a existência e posição de válvulas na rede, visto que, na prática, as incertezas quanto à localização e *status* do funcionamento de tais componentes podem comprometer a operação do sistema. A ferramenta de busca utilizada é apoiada na tecnologia dos Algoritmos Genéticos, sendo alvo de estudo os diferentes tipos de AGs e operadores inerentes à técnica.

Manzi (2004) avalia os parâmetros do modelo pressão x vazamento por meio de calibração para dois setores de distribuição de água das cidades de Piracicaba-SP (Setor Alvorada, o mesmo avaliado neste trabalho) e São Carlos-SP (Setor São Carlos III) com o auxílio do *software* EPANET 2. Para a resolução do modelo inverso, é utilizada a busca direta univariada considerando padrões hidráulicos distintos, sob hipótese de consumo noturno nulo (vazão mínima noturna), descargas de

rede, patamares de pressão e consumo diurno dirigido pela pressão através de curvas encontradas na literatura e também propostas. Estudos acerca do parque de hidrômetros e seus desvios de indicação também são realizados, em conjunto com uma análise das vazões típicas de abastecimento residencial, que apontam para fortes erros de medição em razão do uso de reservatórios domiciliares.

MODELO INVERSO

O problema de calibração resolvido é expresso através da minimização dos desvios entre os valores de pressão e vazão, observados e simulados hidraulicamente, por:

$$\min_Z FO = \sum_{t=1}^{n^{PD}} \left[\frac{\sum_{j=1}^{n_t^P} (P_{t,j} - P_{t,j}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_t^P} P_{t,i}^* / n_t^P \right)^2} + \frac{\sum_{j=1}^{n_t^Q} (Q_{t,j} - Q_{t,j}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_t^Q} Q_{t,i}^* / n_t^Q \right)^2} \right] \quad (14)$$

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:

$$Z = (\varepsilon, \theta, \beta) \quad (15)$$

sendo ε a rugosidade absoluta das tubulações, θ o coeficiente de perda do modelo de vazamentos e β o expoente de perda do modelo de vazamentos.

MODELO PARA ANÁLISE HIDRÁULICA

A equação (14) prevê que os valores simulados das variáveis de estado (pressões e vazões) sejam confrontados com os respectivos valores observados. Os valores simulados são obtidos através do modelo hidráulico 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 Nó-Malha que Todini e Pilati (1988) optaram por denominar “Método Gradiente”. Esse método é utilizado na implementação do simulador hidráulico EPANET 2, utilizado no desenvolvimento deste trabalho como suporte nas avaliações hidráulicas da rede de distribuição de água.

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 de difícil quantificação, 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:

$$TS = TD + V \quad (16)$$

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:

$$TDP = FT \cdot TS^* \quad (17)$$

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):

$$TD = TDP - PNA \quad (18)$$

Substituindo-se as equações (17) e (18) em (16), tem-se:

$$TS = FT \cdot TS^* - PNA + V \quad (19)$$

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

$$FT = \frac{TS + PNA - V}{TS^*} \quad (20)$$

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

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

$$FT_2 = \frac{TS + FT_1 \cdot TS^* - TD_1 - V_1}{TS^*} \quad (21)$$

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, conforme indicação da Figura 1:

Na Figura 1:

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

$$TS^* = \sum_{i \in N} d_i^* \quad (22)$$

$$TD = FT_1 \sum_{i \in N} d_i^* \cdot \rho_i \quad (23)$$

$$V = \sum_{i \in N} v_i \quad (24)$$

N = número de nós.

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):

$$\begin{aligned} \rho_i &= 1 & \text{se } P_i &\geq P_i^{des} \\ \rho_i &= \sin^2\left(\frac{P_i}{2 \cdot P^{des}} \pi\right) & \text{se } P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{des} \\ \rho_i &= 0 & \text{se } P_i &\leq P_i^{min} \end{aligned} \quad (25)$$

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, foram adotados $P^{min} = 0$ e $P^{des} = 5$ m. No entanto, a adoção das pressões mínima e desejável deve ser objeto de estudos mais detalhados.

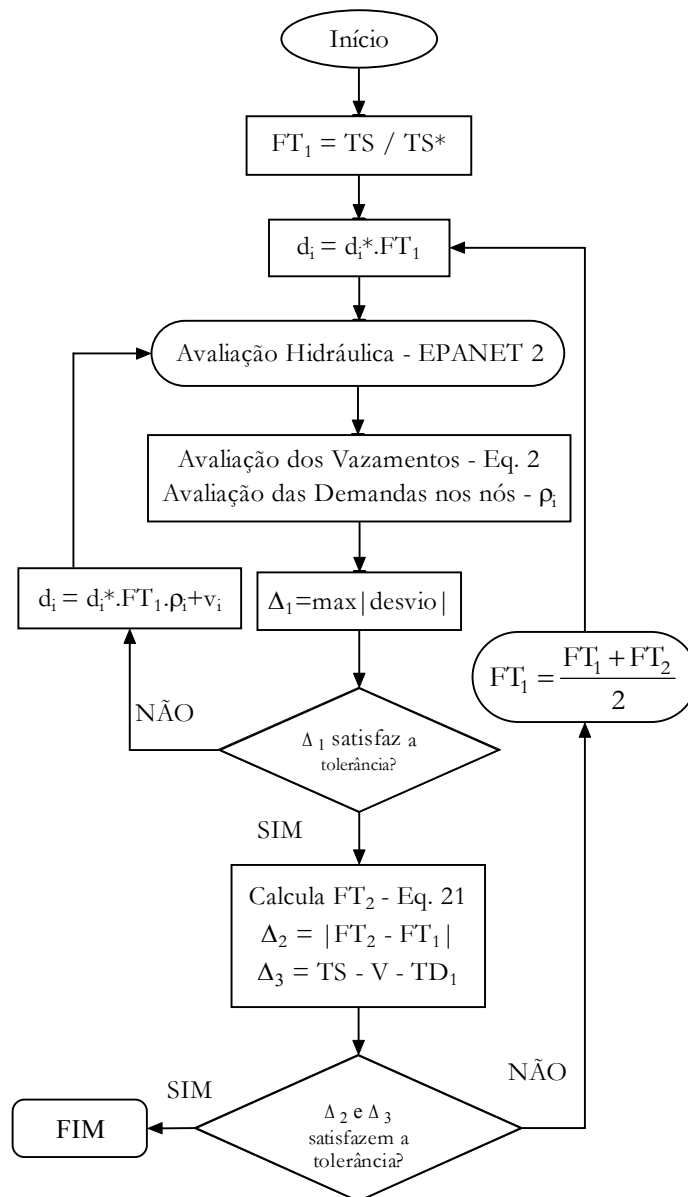


Figura 1 – Fluxograma do processo iterativo proposto para avaliação hidráulica e determinação do fator de consumo para cada padrão de demanda

Para o cômputo dos 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 unidade de superfície de tubo, expressa pela equação (2).

O processo descrito no fluxograma da Figura 1 tem como ponto de partida o conhecimento prévio da vazão abastecida total (TS), que corresponde à soma das vazões efluentes dos reservatórios para certa condição operacional do sistema. Além da vazão total abastecida, também são dados de entrada para o modelo a vazão de abastecimento de referência (TS^*) e sua distribuição espacial, 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 a distribuição espacial da demanda de referência, a avaliação hidráulica determina o fator temporal e as perdas por vazamento que ocorrem para aquela condição de operação. Além das energias nos reservatórios (nós de carga conhecida), o procedimento iterativo proposto considera também a vazão injetada na rede a partir 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.

INTEGRAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA E DE OTIMIZAÇÃO

Para a resolução do problema inverso definido pela equação (14), 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 de água, é cada vez maior o emprego dos Algoritmos Genéticos (AGs), dadas as suas características que incluem a maior habilidade no tratamento de problemas com funções complexas, inclusive descontínuas e de numerosas variáveis de decisão.

Assim, para os estudos sobre a calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo de vazamentos, uma rotina computacional foi implementada em linguagem C++, utilizando o simulador hidráulico EPANET 2 como módulo auxiliar no processo iterativo proposto

e a biblioteca *GAlib* C++ (Wall, 1996) para desenvolvimento dos Algoritmos Genéticos, conforme fluxograma da Figura 2.

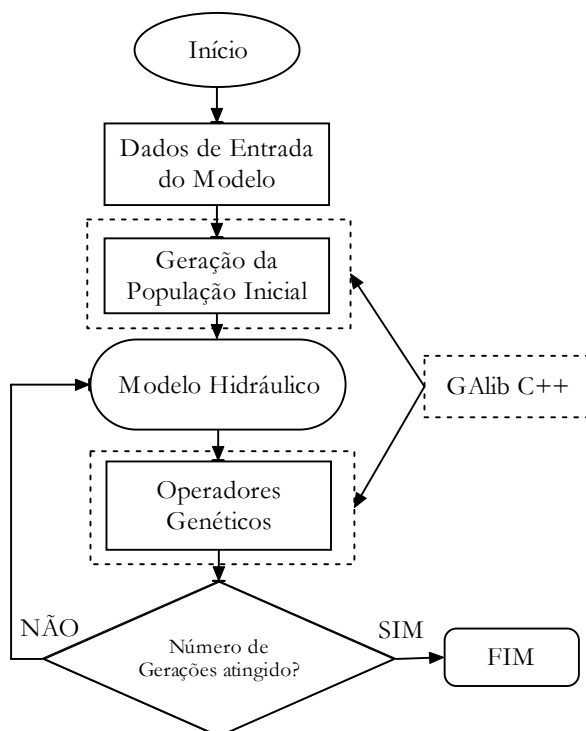


Figura 2 - Fluxograma do processo de calibração com os AGs

ESTUDO DE CASO

O Setor Alvorada, alvo dos estudos deste trabalho, integra o sistema de abastecimento da cidade de Piracicaba, SP. Possui 108 nós, 140 trechos e conta com 1631 ligações distribuídas ao longo de 11.500 metros de tubulações, das quais mais de 90% em tubos plásticos (Figura 3). O padrão de consumo é exclusivamente residencial, por tratar-se de conjunto habitacional com idades de aproximadamente 10 a 15 anos (Manzi, 2004).

A coleta de dados consistiu do monitoramento de pressões em quatro pontos de referência do Setor Alvorada (07, 41, 69, 87), além da pressão e da vazão na entrada do setor, por um período de onze dias (5 a 17 de maio de 2003). Foram executadas manobras na válvula redutora de pressão de entrada para promoção de patamares de redução de pressão, em instantes sempre próximos da vazão mínima noturna.

As demandas de referência nos nós (d_i^*) durante ocorrência da vazão mínima noturna foram consideradas nulas, sendo o sistema solicitado tão somente pelos vazamentos.

No entanto, para as simulações no período diurno, Manzi (2004) estima as demandas de consumo a partir de dois modelos: (1) consumo médio global corrigido e (2) média do somatório dos consumos em cada nó, também corrigido pelos erros de micromedição.

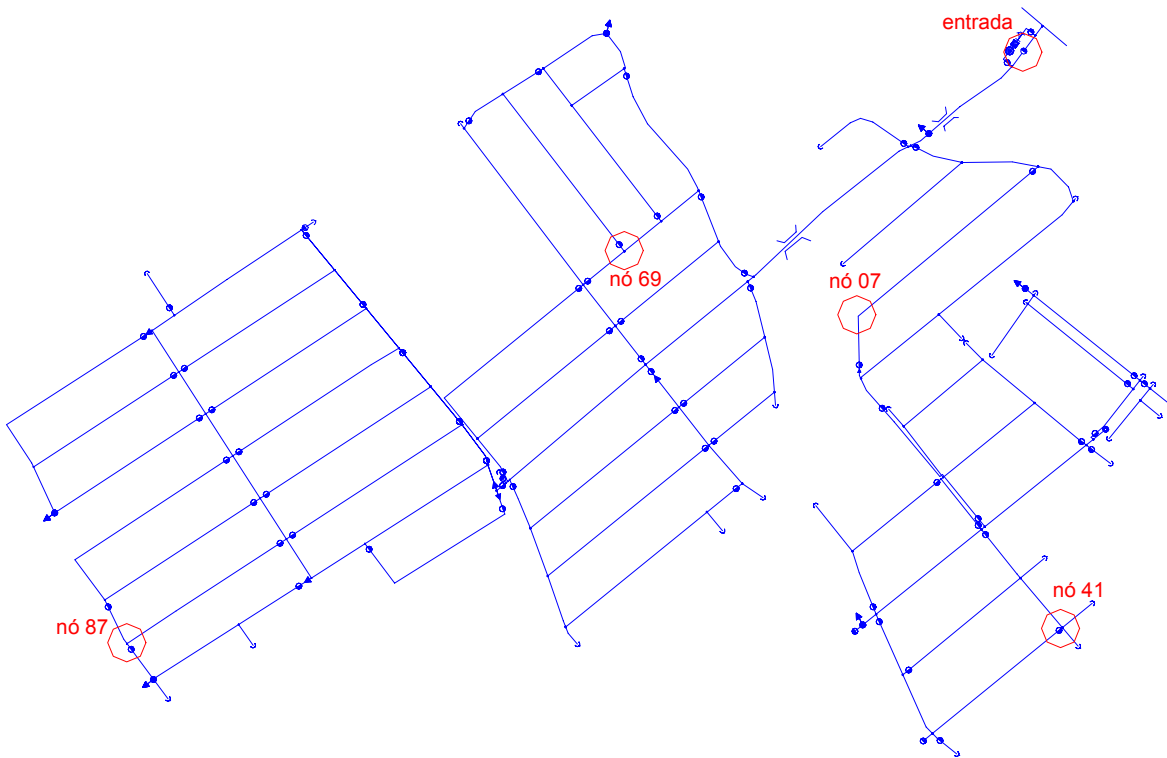


Figura 3 – Setor Alvorada e pontos de amostragem de pressão (07, 41, 69, 87 e entrada) e vazão (entrada)

Fonte: Manzi (2004)

No primeiro caso (aqui denominado Dem1), a demanda de referência em determinado nó i é resultado do produto do consumo total corrigido pelo índice de submedição do setor pela parcela da área de influência do mesmo nó i :

$$d_i = \frac{\sum m \delta m}{2592} \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (26)$$

sendo d_i a demanda de referência no nó i , em L/s, $\sum m$ o somatório global da micromedição, em $m^3/mês$, δm o desvio da micromedição, A_i a área de influência do nó i e; n o número de nós.

Já no segundo caso (Dem2), a demanda de consumo de referência em cada nó i é calculada a partir do somatório do consumo, corrigido pelo índice de submedição, dentro da área de influência de cada nó:

$$d_i = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \delta m}{2592} \quad (27)$$

Neste trabalho, são considerados três padrões de demanda, correspondentes às condições de vazão abastecida das 08, 12 e 16 horas, e quatro patamares de pressão promovidos durante manobras realizadas no período noturno.

A Tabela 1 mostra os valores obtidos de vazão e carga piezométrica na entrada do setor, bem como a demanda de referência total para cada padrão de demanda (08:00, 12:00 e 16:00 horas) e patamar de redução de pressão (Pat.1, Pat. 2, Pat. 3 e Pat. 4).

Tabela 1 – Demanda de referência e vazão e carga piezométrica na entrada do setor

Vazão na Entrada (L/s)
Carga Piezométrica na Entrada (m)
Demanda de Referência (L/s)

Pat. 1
14,41
603,88
10,51

Pat. 2
13,93
600,12
10,51

Pat. 3
13,34
594,81
10,51

Pat. 4
12,53
588,47
10,51

08:00h
23,78
604,95
10,51

12:00h
28,85
598,41
10,51

16:00h
25,01
603,89
10,51

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises são realizadas empregando o algoritmo de calibração mostrado no fluxograma da Figura 2. Os parâmetros de entrada do modelo de calibração, referente ao módulo de otimização (AGs), são: dois tipos de AG (geracional elitista com taxa de 30% de elitismo e *Steady-State*), dimensão da população igual a 50, número de gerações igual a 100 (AG geracional elitista) e 50 (AG *Steady-State*), seleção tipo *Stochastic Remainder Sampling* (SRS), recombinação aritmética com probabilidade 0,80 (AG geracional elitista) e 1,0 (AG *Steady-State*), mutação tipo Gaussiana com probabilidade 0,01 e troca de 4 soluções no caso do AG *Steady-State*.

Assim, o processo de calibração tem como objetivo determinar as rugosidades absolutas das tubulações e os parâmetros de vazamentos globais (coeficiente de vazamento θ e expoente de vazamento β) a partir de dez populações iniciais distintas para cada tipo de AG e modelo de demanda de consumo de referência (Dem1 e Dem2). Os valores das rugosidades absolutas e do coeficiente e expoente de vazamento são considerados homogêneos para todo o setor.

Os valores de pressões referentes aos pontos monitorados e de vazão na entrada do setor para cada padrão de demanda e patamar de pressão são agrupados nas Figuras 4 a 11, quando empregados o AG geracional elitista e o modelo Dem1 (denominado GE-Dem1).

Os maiores desvios entre valores simulados e observados de pressão são encontrados nos pontos 69 para o padrão de demanda 12:00 horas (3,03 m) e 7 para o padrão 16:00 horas (-3,45 m). Os outros pontos apresentam valores simulados muito próximos dos observados e o valor médio da função objetivo resultou em 0,05945. Além disso, não há uma variação excessiva nos valores simulados para as diferentes populações iniciais de solução.

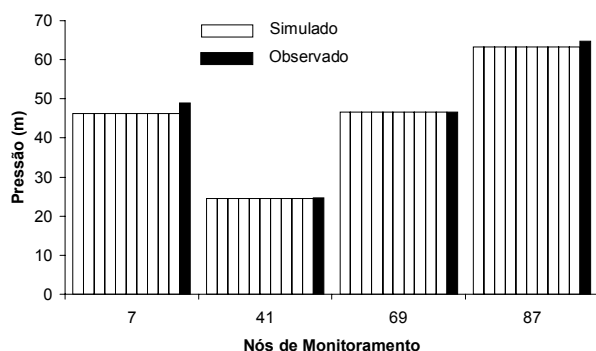


Figura 4 – Pressões para Patamar 1

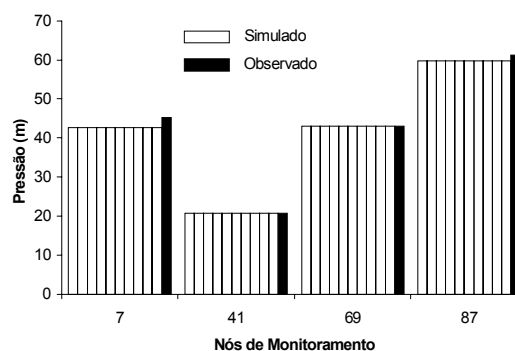


Figura 5 – Pressões para Patamar 2

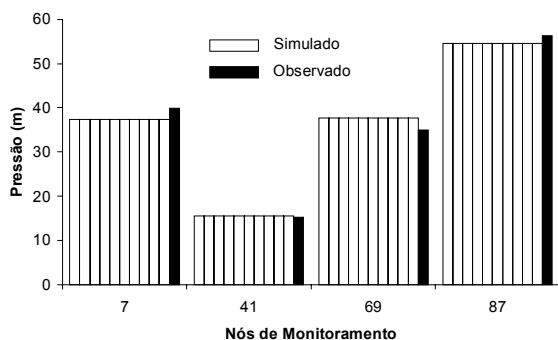


Figura 6 – Pressões para Patamar 3

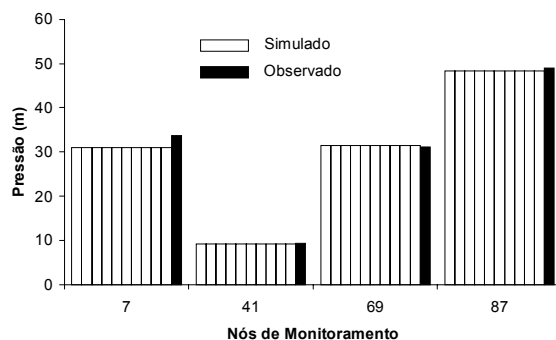


Figura 7 – Pressões para Patamar 4

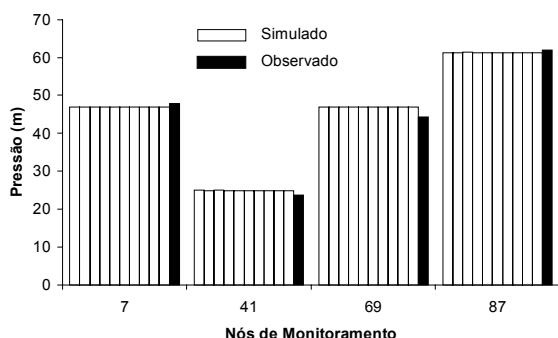


Figura 8 – Pressões para Padrão 08:00 horas

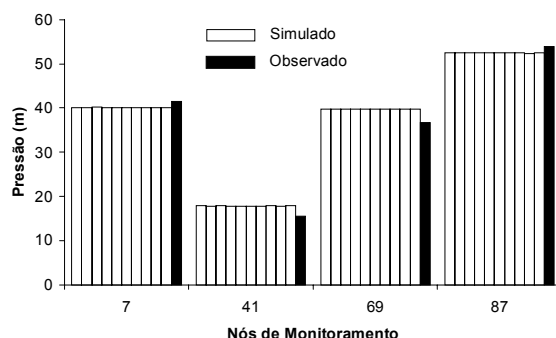


Figura 9 – Pressões para Padrão 12:00 horas

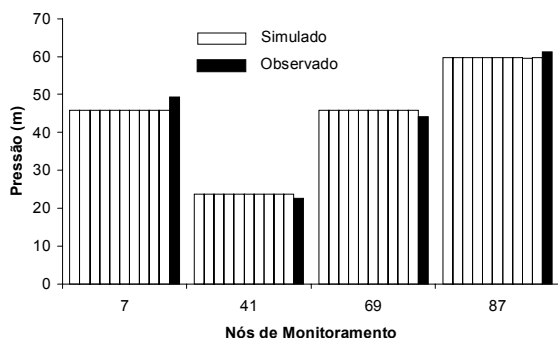


Figura 10 – Pressões para Padrão 16:00 horas

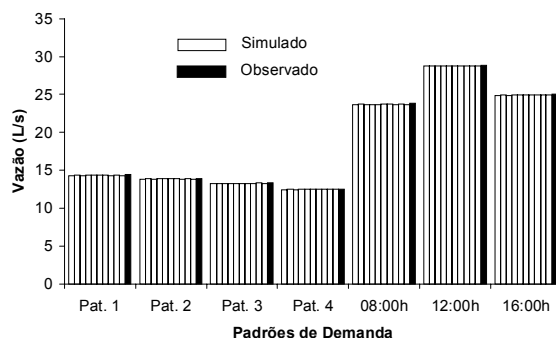


Figura 11 – Vazão abastecida para cada padrão

Os valores de pressões referentes aos pontos monitorados e de vazão na entrada do setor para cada padrão de demanda e patamar de pressão são agrupados nas Figuras 12 a 19, quando empregados o AG *Steady-State* e o modelo Dem1 (denominado SS-Dem1).

Mais uma vez os maiores desvios ocorrem nos pontos 69 para o padrão 12:00 horas e 7 para o padrão 16:00 horas. Nos demais casos, o ajuste dos valores de pressão é considerado satisfatório e o valor médio da função objetivo igual a 0,05944, praticamente o mesmo valor obtido na caso do uso do AG geracional elitista. Evidenciam-se os baixos valores dos desvios entre vazões simuladas e observadas.

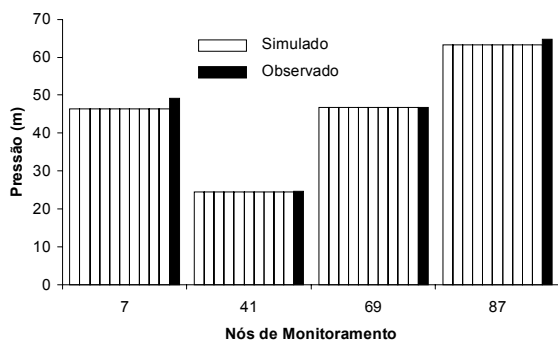


Figura 12 – Pressões para Patamar 1

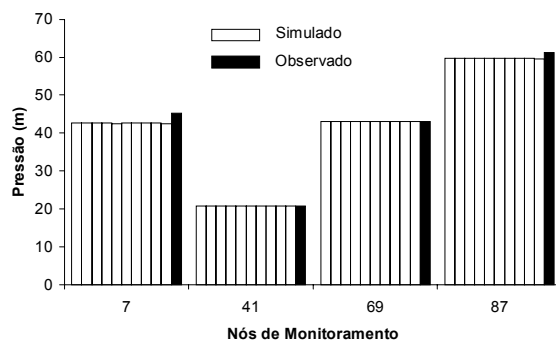


Figura 13 – Pressões para Patamar 2

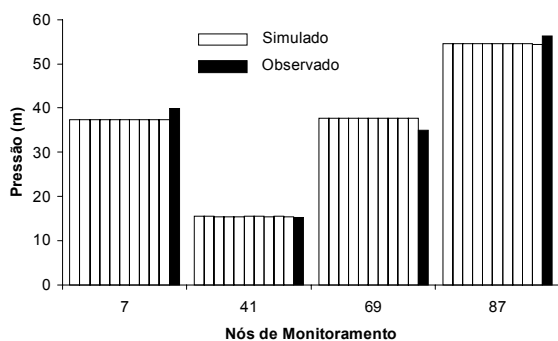


Figura 14 – Pressões para Patamar 3

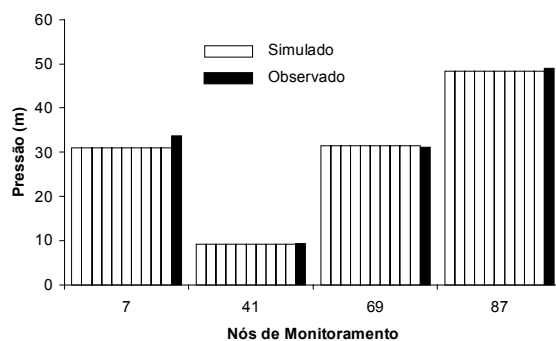


Figura 15 – Pressões para Patamar 4

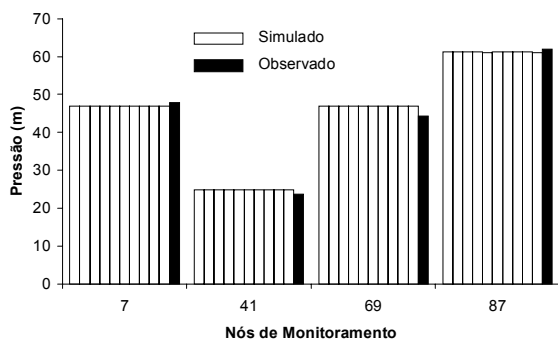


Figura 16 – Pressões para Padrão 08:00 horas

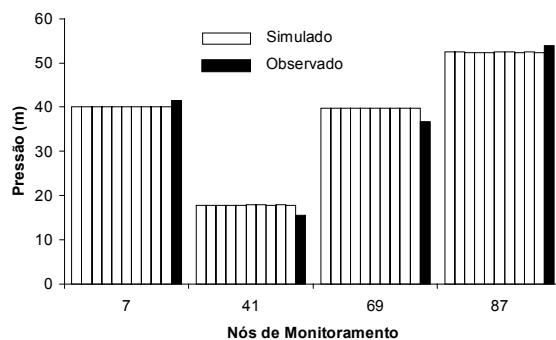


Figura 17 – Pressões para Padrão 12:00 horas

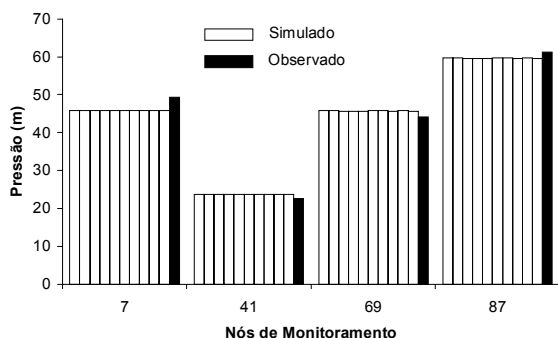


Figura 18 – Pressões para Padrão 16:00 horas

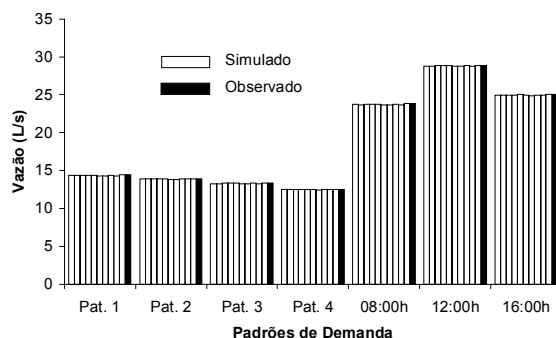


Figura 19 – Vazão abastecida para cada padrão

Os valores de pressões referentes aos pontos monitorados e de vazão na entrada do setor para cada padrão de demanda e patamar de pressão são agrupados nas Figuras 20 a 27, quando empregados o AG geracional elitista e o modelo Dem2 (denominado GE-Dem2).

A consideração do modelo Dem2 em conjunto com o AG geracional elitista produz piores resultados do que a consideração do modelo Dem1 e os AGs geracional elitista e *Steady-State*, principalmente no tocante ao valor médio da função objetivo, 0,06508, cerca de 9,5% maior. Além disso, uma variação nos valores de pressão no ponto 87 em cada população inicial de soluções é observada em praticamente todos os padrões e patamares.

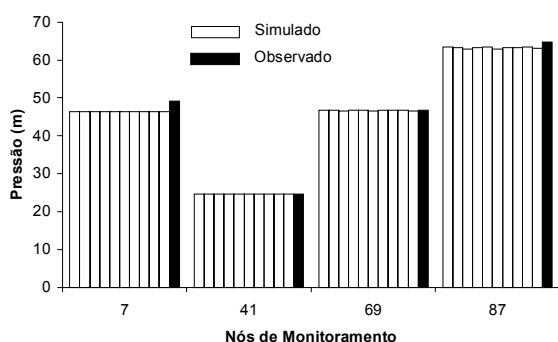


Figura 20 – Pressões para Patamar 1

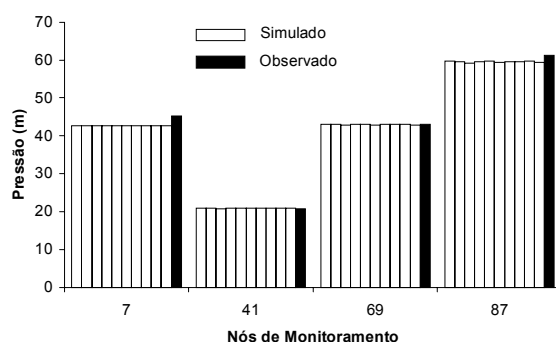


Figura 21 – Pressões para Patamar 2

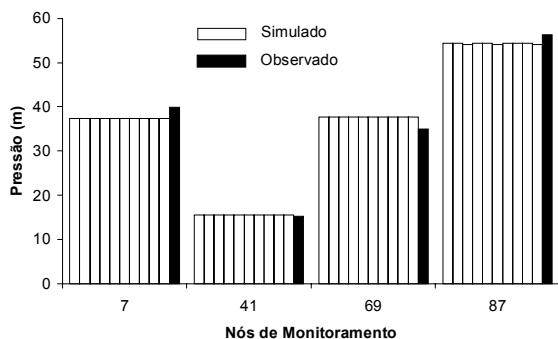


Figura 22 – Pressões para Patamar 3

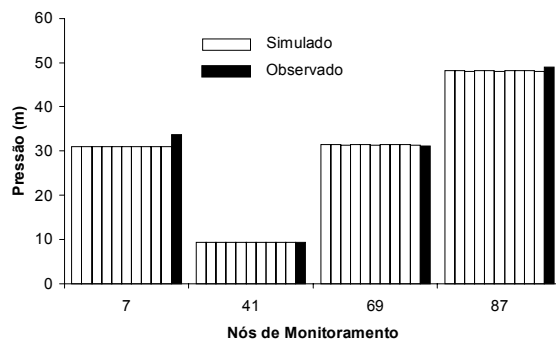


Figura 23 – Pressões para Patamar 4

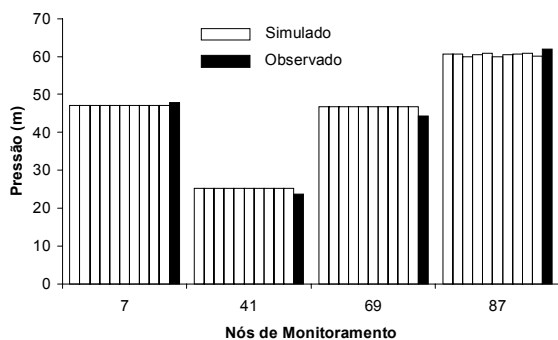


Figura 24 – Pressões para Padrão 08:00 horas

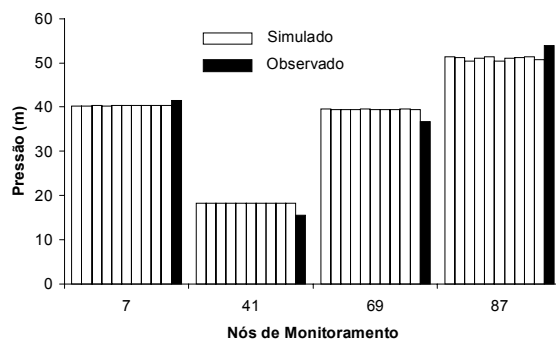


Figura 25 – Pressões para Padrão 12:00 horas

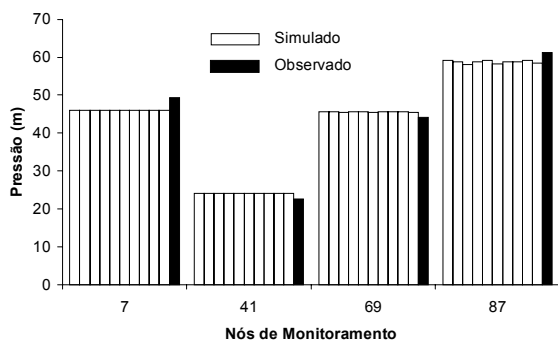


Figura 26 – Pressões para Padrão 16:00 horas

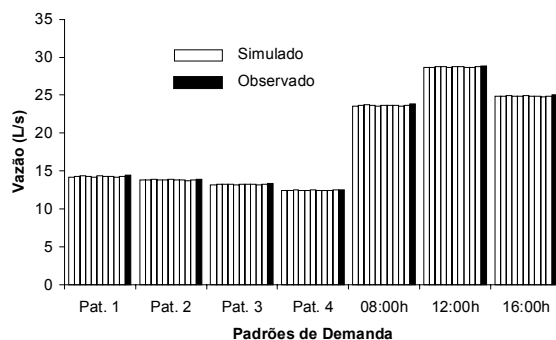


Figura 27 – Vazão abastecida para cada padrão

Os valores de pressões referentes aos pontos monitorados e de vazão na entrada do setor para cada padrão de demanda e patamar de pressão são agrupados nas Figuras 28 a 35, quando empregados o AG *Steady-State* e o modelo Dem2 (denominado SS-Dem2).

Neste caso, a função objetivo também apresenta valores maiores (média de 0,06450) do que aqueles obtidos com a utilização do modelo Dem1. No entanto, o ajuste dos valores de pressão e vazão é, ainda, muito satisfatório. Assim, a distribuição espacial das demandas de referência apresenta-se melhor quando utilizado o modelo Dem1.

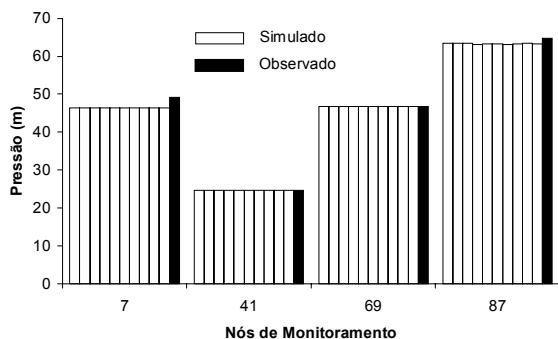


Figura 28 – Pressões para Patamar 1

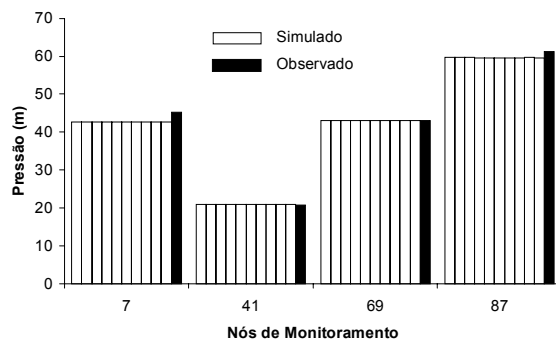


Figura 29 – Pressões para Patamar 2

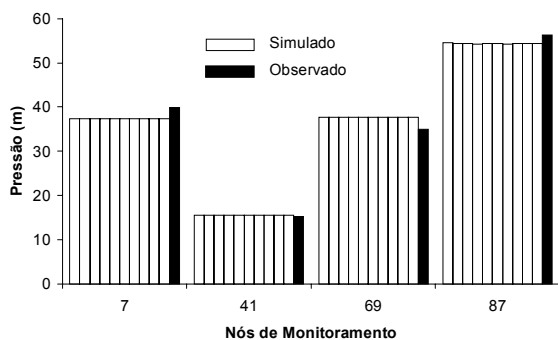


Figura 30 – Pressões para Patamar 3

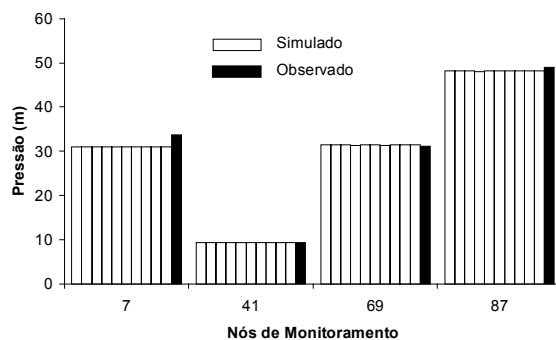


Figura 31 – Pressões para Patamar 4

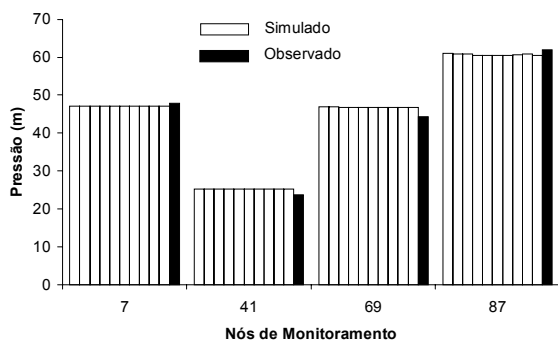


Figura 32 – Pressões para Padrão 08:00 horas

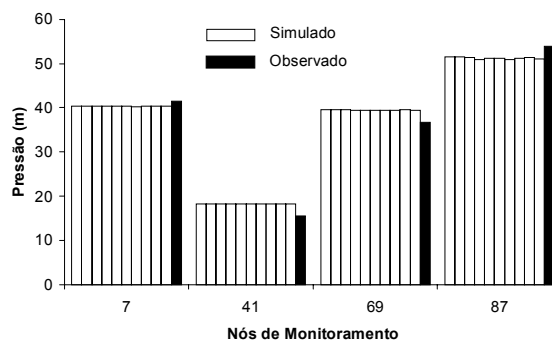


Figura 33 – Pressões para Padrão 12:00 horas

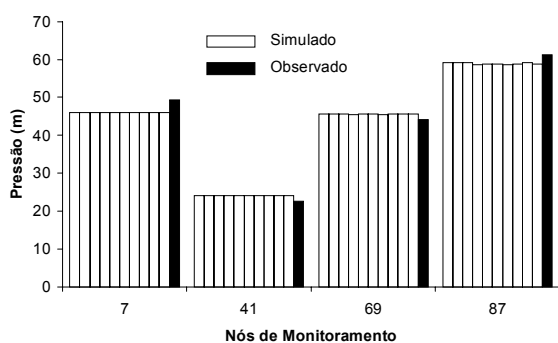


Figura 34 – Pressões para Padrão 16:00 horas

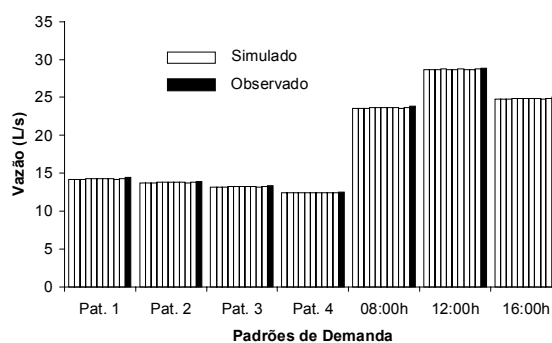


Figura 35 – Vazão abastecida para cada padrão

Os valores dos parâmetros do modelo pressão x vazamento para as simulações envolvendo os AGs geracional elitista e *Steady-State* e os dois modelos de demanda de referência são apresentados nas Figuras 36 e 37. A faixa de variação foi imposta em $0,1 \times 10^{-7}$ a $1,2 \times 10^{-7}$ para o coeficiente θ e 0,1 a 1,0 para o expoente β .

Pode ser observado nas Figuras 36 e 37 que a utilização do modelo Dem2 resulta em valores médios maiores tanto para o coeficiente quanto para o expoente do modelo pressão x vazamento. No caso do modelo Dem1, os valores médios do coeficiente de vazamento θ resultam em torno de $0,96 \times 10^{-7}$. Já no caso do modelo Dem2, este valor aumenta para $1,03 \times 10^{-7}$. Para o expoente do modelo de vazamento β , os valores ajustados são iguais a aproximadamente 0,76 para o modelo Dem1 e 0,95 para o modelo Dem2.

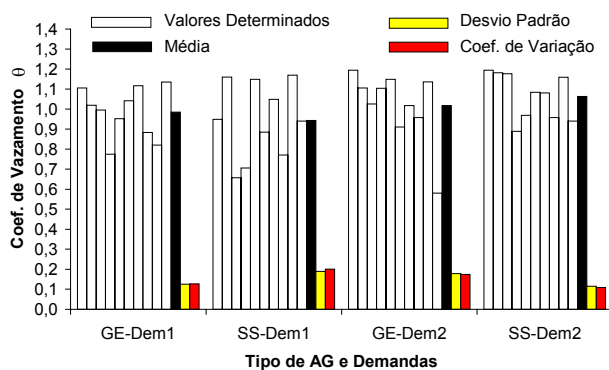


Figura 36 – Coeficiente de Vazamento

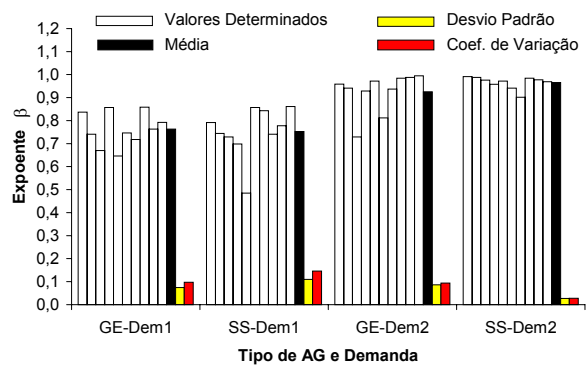


Figura 37 – Expoente de vazamento

Uma menor variação nas simulações é observada quando utilizados o AG *Steady-State* e modelo Dem2 tanto para o coeficiente quanto para o expoente de vazamento.

Utilizando os parâmetros estimados do modelo pressão x vazamento, foram realizadas simulações para os três padrões de consumo diurnos, no intuito de estimar as perdas por vazamentos no setor através do simulador hidráulico iterativo da Figura 1.

Tabela 2 – Perdas por vazamento, demanda real e fator temporal para cada padrão de demanda, AG e modelo de demanda de referência

Vazamento (L/s)
Demanda Real (L/s)
FT
Perda por Vazamento (%)

GE-Dem1

08:00h

10,99

12,80

1,22

46,2

12:00h

9,07

19,79

1,88

31,4

16:00h

10,66

14,36

1,37

42,6

SS-Dem1

08:00h

9,02

14,76

1,40

37,9

12:00h

7,50

21,35

2,03

26,0

16:00h

8,76

16,25

1,55

35,0

GE-Dem2

08:00h

12,84

10,95

1,04

54,0

12:00h

10,44

18,41

1,75

36,2

16:00h

12,43

12,59

1,20

49,7

SS-Dem2

08:00h

13,81

9,98

0,95

58,1

12:00h

11,20

17,65

1,68

38,8

16:00h

13,36

11,66

1,11

53,4

Observa-se na Tabela 2 que há uma variação significativa nas perdas por vazamento estimadas em cada tipo de AG e modelo de demanda. O mesmo fato ocorrendo com o fator temporal FT. Para o padrão de demanda das 08:00 horas, por exemplo, as perdas por vazamentos variam de 37,9% até 58,1%. Em valores absolutos, as perdas variam de 9,02 a 13,81 L/s. Se considerarmos que o modelo Dem1 possui a melhor distribuição espacial das demandas de referência, esses valores variam de 9,02 a 10,99 L/s, com média igual a aproximadamente 10 L/s, cerca de 42 % da vazão fornecida ao setor às 08:00 horas.

Para os períodos das 12:00 e 16:00 horas, as perdas por vazamento resultam em cerca de 29% e 39%, respectivamente, da vazão abastecida total no setor.

Para as simulações apresentadas até aqui neste trabalho, o tempo de processamento computacional para cada uma delas é mostrado na Figura 38.

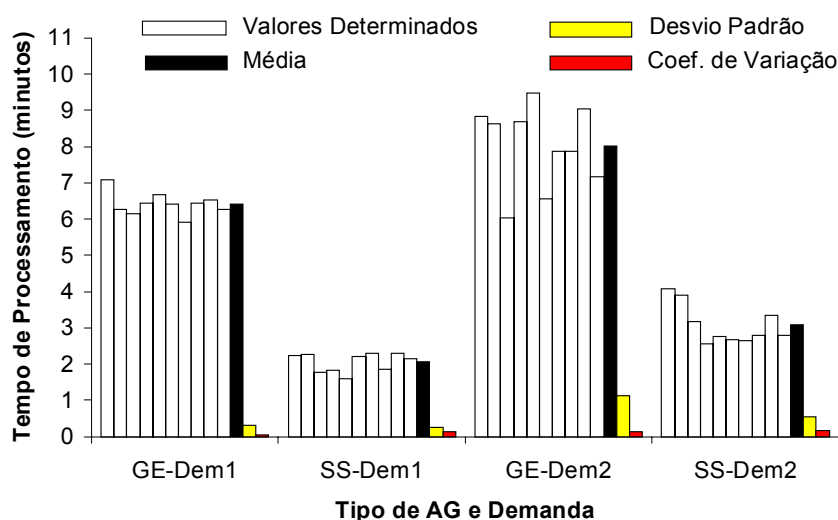


Figura 38 – Tempo de processamento

Em todas as simulações, as rugosidades absolutas das tubulações são avaliadas conjuntamente com os parâmetros do modelo pressão x vazamento, com uma faixa de variação de 0,001 a 1,0 mm. Em todos os casos, o valor da rugosidade absoluta tende a 0,001 mm. Isto se deve ao fato de que, durante a coleta de dados, não foram promovidas descargas em pontos específicos do setor durante o período diurno. Assim, as velocidades nas tubulações resultam sempre em valores baixos, não sendo, portanto, representativas para a avaliação a contento das rugosidades. Outro fato é que o sistema apresenta um superdimensionamento das tubulações, o que também acarreta em valores baixos de velocidades.

Enfim, possíveis fontes de incerteza podem ser mencionadas tais como, por exemplo, os erros de leitura dos equipamentos (medidores de pressão e vazão), erros nas estimativas de demandas nodais, rugosidade das tubulações e singularidades desconhecidas.

CONCLUSÕES

Um estudo das perdas por vazamento de um setor da rede de abastecimento de água da cidade de Piracicaba, SP, é realizado no presente trabalho. Para tanto, é utilizado um procedimento de calibração apoiado em um procedimento iterativo para avaliação hidráulica que considera vazamentos distribuídos e demandas dirigidas pela pressão, simultaneamente. O algoritmo para análise hidráulica utiliza o simulador hidráulico EPANET 2 como módulo auxiliar.

Diferentes padrões de demanda e patamares de pressão são considerados nas simulações e as perdas por vazamento são determinadas considerando os dados de pressão em alguns nós da rede e da vazão fornecida ao setor.

Para a resolução do problema de calibração, são utilizados dois tipos de AG (geracional elitista e *Steady-State*) e dois modelos de distribuição espacial das demandas de referência, que determinaram as soluções ótimas para os parâmetros do modelo de vazamentos.

As investigações revelam a necessidade de uma investigação maior das rugosidades das tubulações por meio de descargas no período diurno.

Considerando a complexidade e incertezas inerentes a todo modelo de sistema de distribuição de água, os resultados apresentados neste trabalho mostram-se muito satisfatórios e evidenciam a necessidade das companhias de saneamento em utilizar ferramentas computacionais que representem as condições de campo com um nível de realismo maior.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela bolsa de estudos concedida ao primeiro autor, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (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 ao Engenheiro Daniel Manzi do Serviço Municipal de Água e Esgoto de Piracicaba (SEMAE), pela atenção e dados do setor Alvorada fornecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AINOLA, L.; KOPPEL, T.; TIITER, K.; VASSILJEV, A., 2000. “*Water Network Model Calibration Based on Grouping Pipes with Similar Leakage and Roughness Estimates*”.

Proceedings of the Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, Minneapolis, MN.

ALONSO, J. M.; ALVARRUIZ, F.; GUERRERO, D.; HERNÁNDEZ, V.; RUIZ, P. A.; VIDAL, A. M.; MARTÍNEZ, F.; VERCHER, J.; ULANICKI, B., 2000. “*Parallel Computing in Water Network Analysis and Leakage Minimization*”. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 126, n. 4, p. 251-260, July/Aug.

BURROWS, R.; TANYIMBOH, T. T.; TABESH, M., 2000. “*Some Reflections on the Building and Calibration of Useful Network Models*”. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): Water Network Modeling for Optimal Design and Management, p. 33-42, Sept.

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, Brasil.

CHEUNG, P. B.; REIS, L. F. R.; VAN ZYL, J. E., 2004. “*Incorporação Explícita de Vazamentos e Demanda Variável com a Pressão no Método Gradiente (EPANET 2)*”. Anais do Seminário Hispano-Brasileiro sobre Planificación, Proyecto y Operación de Redes de Abastecimiento de Agua, Valência, Espanha.

GERMANOPOULOS, G.; JOWITT, P. W., 1989. “*Leakage Reduction by Excess Pressure Minimization in a Water Supply Network*”. Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2 (June), p. 195-214.

HERNÁNDEZ, V.; MARTÍNEZ, F.; VIDAL, A. M.; ALONSO, J. M.; ALVARRUIZ, F.; GUERRERO, D.; RUIZ, P. A.; VERCHER, J., 1999. “*HIPERWATER: A High Performance Computing EPANET – Based Demonstrator for Water Network Simulation and Leakage Minimization*”. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): Water Industry Systems: Modeling and Optimization Applications, vol. 1, p. 141-153.

JOWITT, P. W.; XU, C., 1990. “*Optimal Valve Control in Water Distribution Networks*”. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 116, n. 4, p. 455-472, July/Aug.

LAMBERT, A. O.; HIRNER, W. H., 2000. “*Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures*”. IWA Blue Pages.

MANZI, D., 2004. “*Determinação de parâmetros do modelo pressão-vazamento para setor de distribuição de água da cidade de Piracicaba, SP*”. São Carlos, 2004, 92p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

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.
- ROSSMAN, L. A., 2000. "*EPANET 2 users manual*." U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- SALGADO, R.; ROJO, J.; ZEPEDA, S., 1993. "*Extended Gradient Method for Fully Non-linear Head and Flow Analysis in Pipe Networks*". In: COULBECK, B. (ed.): Integrated Computer Applications in Water Supply. Methods and Procedures for Systems Simulation and Control, vol. 1, p. 49-60.
- SANTOS, A., 2000. "*Estudo das Perdas por Vazamento Aplicado a um Setor da Rede de Abastecimento de Água de São Carlos – SP*". São Carlos. 114 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- SILVA, F. G. B., 2003. "*Estudos de Calibração de Redes de Distribuição de Água Através de Algoritmos Genéticos*". São Carlos, 2003. 234 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 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.
- SOARES, A. K., 2003. "*Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demandas Dirigidas pela Pressão*". São Carlos. 152 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 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.
- WALL, M., 1996. GALib: "*A C++ Library of Genetic Algorithm Components*". Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology.
- WRC plc TECHNICAL WORKING GROUP ON WASTE OF WATER, 1980. "*Leakage Control, Policy and Practice*." National Water Council Standing Technical Committee, Report n° 26, WRC plc, Swindon, UK.