

**XI SILUBESA*****Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental***

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

I-034 – ESTIMATIVA DE FUGAS E CONSUMOS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA PRESSÃO

Luiz S. Araujo⁽¹⁾

Prof. Adjunto da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil – Graduado em Engenharia Sanitária (UFBa – 1985) – Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental (UFPb – 1991) – Estudante de Doutorado em Hidráulica e Recursos Hídricos (IST/Lisboa/Portugal). Desenvolve actividades de ensino e pesquisa no domínio da Engenharia Sanitária e Ambiental.

Endereço⁽¹⁾: Tv. do Giestal, 40 – 2º/E – Lisboa – Portugal – CP: 1300-278 - Tel.: (+ 351) 21.361.1293

 araujols@ufc.br ou araujols@civil.ist.utl.pt

Sérgio Teixeira Coelho

Investigador Principal, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal) – Licenciado em Eng. Civil (IST – 1984) – Mestre em Eng. Recursos Hídricos (Newcastle, Reino Unido - 1988) – Doutorado em Eng. Civil (Edimburgo, Reino Unido – 1996). Desenvolve pesquisa no domínio da engenharia de abastecimento de água.

Helena Ramos

Prof. Auxiliar do Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal – Licenciada em Engenharia Civil (IST - 1983) – Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos (IST - 1987) – Doutorado em Eng. Civil (IST - 1995). Desenvolve actividade profissional no domínio da Hidráulica, Regimes transitórios, Aproveitamentos Hidroeléctricos e Detecção de fugas em sistemas hidráulicos no I.S.T.

RESUMO

O estudo desenvolvido propõe um método para estimar a fuga associada a cada nó e define a demanda ou consumo mais adequado para a simulação do comportamento hidráulico de um sistema de distribuição de água. Como as fugas dependem pressões, na sua avaliação podem considerar-se aspectos de carácter geral ou, incorporar componentes específicas típicas de alguns modelos hidráulicos. O método proposto, faz, primeiramente, uso de uma avaliação global com base em caudais de zonas de medição e controlo para estimar a distribuição de caudais na rede, para a situação de caudal mínimo. As fugas são, então, estimadas e distribuídas uniformemente, para condições hidráulicas de consumo dependente da pressão, ao longo das condutas da rede e posteriormente concentradas entre os nós iniciais e finais, quando da sua modelação. Adoptou-se a técnica de optimização com base nos algoritmos genéticos e as rotinas disponibilizadas do EPANET 2.0, a fim de criar um programa geral de análise hidráulica da rede.

PALAVRAS-CHAVE: algoritmos genéticos, consumos de fugas, estimativa de consumos, simulação de redes de abastecimento.

INTRODUÇÃO

Os modelos matemáticos que tentam retractor o comportamento hidráulico de um sistema de distribuição de água, vêm, constantemente sendo mais utilizados devido às facilidades computacionais disponíveis. Estes modelos comportam dois tipos de parâmetros; os que não são modificados no processo de modelação e os que sofrem variações por forma a permitirem a calibração do modelo. A fuga é, sem dúvida, um parâmetro de difícil controlo neste processo de simulação e a sua inclusão em modelos hidráulicos, quase sempre ocorre de maneira implícita, devido às dificuldades, não da sua explicitação matemática, mas da sua distribuição pelos nós da rede.

Para a modelação de redes reais de distribuição, é necessária a caracterização física da rede, através do caudal que a

alimenta e da estimativa da distribuição espacial da demanda, ou consumo, ao longo da rede. Em certos casos, a posição dos nós de consumo são conhecidos, mas o caudal total que alimenta a rede pode somente ser estimado – quando existe medição doméstica muito raramente, é utilizada directamente para esta finalidade.

Hidraulicamente, as perdas em redes de distribuição de água devem-se, em geral, a pequenas aberturas (orifícios, fissuras, defeitos nas juntas, entre outros,) que surgem nas condutas e que vão aumentando, em quantidade e dimensão, ao longo do tempo, devido à própria idade da conduta, material, tipo de assentamento, características do solo e principalmente às grandes variações de pressão a que estão submetidas. Matematicamente, as fugas são tratadas como orifícios e, como tal, o seu caudal pode ser expresso pela seguinte equação geral (1) aplicável a orifício:

$$q = c(p_i - p_o)^\beta \quad \text{equação (1)}$$

onde q representa o caudal através do orifício; c é o coeficiente de vazão do orifício cujo, valor depende da forma e diâmetro do orifício; p_i e p_o a pressão na entrada e saída do orifício e β é um expoente cujo valor, segundo experiências em laboratório, é da ordem de 0,5.

Na prática, os investigadores modificaram esta equação no sentido de melhor caracterizar os vazamentos (fugas) como se pode observar em:

- **Jowitt & Xu (1990) e Vairavamoorthy & Lumbers (1998):**

$$q_{ij} = c_i L_{ij} \left(\frac{h_i - h_j}{2} \right)^{1,18} \quad \text{equação (2)}$$

onde q_{ij} é o vazamento no troço de conduta entre os nós i e j ; c_i é um coeficiente de vazão relativamente às fugas por unidade de comprimento para a pressão de serviço, e que depende das características da rede, como idade, deterioração das condutas e propriedades do solo; L_{ij} é o comprimento do troço; h_i e h_j as pressões nos nós i e j respectivamente. Para Jowitt & Xu (1990), o valor de c_i pode ser estimado através do caudal nocturno, enquanto que Vairavamoorthy & Lumbers (1998) estimam-no através da correspondente pressão média da zona.

- **Tucciarelli et al. (1999):**

$$Q_i = (H_i - z_i)^\alpha \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} D_{ij} \theta_{ij} L_{ij} \quad \text{equação (3)}$$

onde Q_i vazamento por unidade de tempo; H_i a carga total no nó i ; z_i cota topográfica; α o expoente de perda; M_i o número total de conduta ligadas no nó i ; D_{ij} o diâmetro da conduta no troço entre o nó i e j ; θ_{ij} a taxa de vazamento por unidade de superfície da conduta entre o nó i e j ; e L_{ij} o comprimento do troço entre i e j . Não é claro o procedimento a adoptar para se estimar o valor de θ_{ij} .

- **Martinez et al. (1999)** usam a equação (2) para expressar a parte do vazamento correspondente às condutas fisicamente representadas na rede modelada e a equação (4) para as condutas suprimidas e cujos consumos estão concentrados nos nós da rede:

$$q_{2,i} = c_2^s \left[\sum_{t=1}^T Q_{c,i} \right] p_i^\beta \quad \text{equação (4)}$$

onde c_2^s tem o mesmo significado que c_i para um determinado sector da rede; T o total de períodos simulados; $Q_{c,i}$ consumo total no nó i ; p_i é a pressão nos nós; β o expoente da pressão cujo valor mais usual é de 1,18. Estes autores descrevem um procedimento para determinar o valor de c_2^s e, posteriormente, o valor do coeficiente de fuga K_j usando-se a equação 5.

- **Alonso et al. (2000):**

$$q_j = K_j p_j^{1,18} \quad \text{equação (5)}$$

onde q_j equivale ao caudal de fuga no nó j ; p_j é a pressão associada à fuga do nó j ; K_j corresponde ao coeficiente de fuga determinado para cada nó e que permanece constante para todo o período simulado e o seu valor é estimado como descrito em Martinez *et al.* (1999).

- **Ainola *et al.* (2000) e Ainola *et al.* (2001)** generalizaram as equações (2) e (3), rescrevendo-as conforme equação (6), e, assim, formularam uma nova proposta:

$$q_{ij} = c \alpha_{ij} L_{ij} (p_{ij})^\beta \quad \text{equação (6)}$$

onde q_{ij} ; L_{ij} e β , têm o mesmo significado anteriormente descritos; c é um coeficiente de vazão para toda a rede; α_{ij} é um coeficiente que é função do diâmetro, idade e material do troço de conduta e propriedades do solo; p_{ij} refere-se às pressões médias ao longo do troço de conduta. Nesta conformidade rescreveram a equação (6), tendo obtido:

$$q_{ij} = (0,5)^\beta c \alpha_{ij} L_{ij} (p_i + p_j)^\beta \quad \text{equação (7)}$$

considerando que a distribuição das fugas sejam localizadas nos nós terminais sendo o volume total de fugas no nó i é dado por:

$$Q_i = c Q_i^* \quad \text{equação (8)}$$

onde:

$$Q_i^* = \sum_{j=1}^{N_i} (0,5)^\beta \alpha_{ij} L_{ij} p_i (p_i + p_j)^{\beta-1} \quad \text{equação (9)}$$

sendo N_i o número total de troços ligados ao nó i . O coeficiente α_{ij} pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$\alpha_{ij} = \theta_{ij} \gamma_{ij} (1 + \delta_{ij} \lambda_{ij}) D_{ij} \quad \text{equação (10)}$$

onde θ_{ij} é um coeficiente de localização do troço; γ_{ij} é o coeficiente de material do troço; δ_{ij} coeficiente de estado da conduta; λ_{ij} a idade da conduta.

Por último, estabeleceram uma relação de proporcionalidade para c , como se apresenta em seguida:

$$c = \frac{k}{\sum_{i=1}^M Q_i^*} \quad \text{equação (11)}$$

onde k equivale ao volume total de fugas e M ao número total de nós existente na rede.

O simulador EPANET (Rossman, 2000) disponibiliza uma rotina capaz de modelar as fugas no sistema de distribuição e que utiliza uma equação semelhante à equação (5), tendo sido usada por Araujo *et al.* (2002^a e 2002^b). Nesse trabalho, os autores consideram que o consumo corrente resultante em cada nó, como sendo o consumo no nó e o caudal escoado através de um dispositivo emissor e nomeiam K_j como o coeficiente de vazão do emissor. Os dispositivos do tipo emissor nos nós são modelados através de uma tubagem fictícia que liga o nó a um reservatório fictício. A carga hidráulica no reservatório fictício corresponde à cota no nó. O caudal obtido através da tubagem fictícia corresponde ao caudal associado ao dispositivo emissor. Estes podem ser utilizados para estimar as fugas por vazamento em tubagens desde que se conheça o coeficiente de vazão do dispositivo emissor (K_j) e o expoente da pressão (β).

METODOLOGIA

O método aqui proposto parte de uma avaliação global dos volumes de fugas a partir da análise dos caudais nocturnos registados para a rede em estudo. A rede é então simulada para a situação de caudal mínimo, e o volume de fugas assim estimado é atribuído como se tratasse de um consumo dependente da pressão, uniformemente distribuído ao longo do comprimento das condutas (e concentrado nos respectivos nós de extremidade para efeitos de modelação). O restante em relação ao caudal medido é concentrado nos nós de consumo real, de acordo com a alocação clássica.

O processo iterativo utiliza um algoritmo genético (AG) para estabelecer uma solução de pressão-consumo (uma determinada solução hidráulica irá gerar o correspondente consumo, função da pressão disponível, o que, por sua vez, irá forçar uma alteração da distribuição de pressões, e assim sucessivamente). Após o coeficiente de vazão dos orifícios de fuga nas condutas ter sido estimado desta forma, será considerado fixo para a análise subsequente.

A rede é então simulada para um período alargado, especificado a partir dos mesmos registos de caudal. A rede é carregada com 2 tipos de consumos: um consumo que representa as fugas nas condutas, concentrado em todos os nós, e que é dependente da pressão; e o consumo real, com a distribuição pelos nós de consumo que seria feita numa modelação clássica. Para cada hora da simulação, o padrão de consumo utilizado para o consumo real é recalculado por forma a ajustar o caudal total horário consumido na rede ao caudal registado para o mesmo momento. Uma vez mais, um AG é utilizado para o processo iterativo.

O modelo é implementado em Visual Basic, usando o EPANET 2.0 para a simulação hidráulica, conforme referido anteriormente.

Assume-se, como pressupostos de base para o desenvolvimento desta metodologia, o seguinte:

- Conhecem-se apenas os caudais de entrada (medição de caudal no ponto de entrada da rede) de uma zona de medição e controlo.
- Os consumos nos nós são desconhecidos, e a sua distribuição espacial é feita com base em informação qualitativa – não há conhecimento quantitativo dos consumos nos nós – ou seja, apenas pode dizer-se que o consumo no nó i é de $x\%$ do total.
- As fugas são exclusivamente uma função crescente da pressão.
- O coeficiente de vazão (c) é o mesmo para todas as tubagens da rede (é expresso por unidade de comprimento, e é independente do diâmetro).
- Na hora de menor caudal medido, o caudal total divide-se numa percentagem exclusivamente devida a fugas, e o restante é considerado consumo efectivo.

O método consiste na seguinte sequência de passos:

1 - Procurar a hora de menor consumo.

2 - Nessa hora, o caudal total medido é $Q_{T,min}$ e o caudal de fuga é igual a uma percentagem fixa desse caudal, por exemplo 70%:

$$Q_{F,t_{min}} = \%F * Q_{T,t_{min}} = 0,70 * Q_{T,t_{min}} \quad \text{equação (12)}$$

3 - O programa optimiza o valor de c (que permanece fixo para toda a restante simulação) de forma a cumprir a seguinte relação:

$$Q_{F,t_{min}} = \sum_{i=1}^N q_{f,i} = \sum_{i=1}^N (P_i^{1,18} * c * \sum_{j=1}^M 0,5 * L_{ji}) = 0,30 * Q_{T,t_{min}} \quad \text{equação (13)}$$

sendo $q_{f,i}$ o caudal de fuga no nó i para t_{min} ; N o número total de nós; M o conjunto dos troços que contribuem para cada nó i ; L_{ji} o comprimento do troço que liga o nó j ao nó i ; P_i a pressão no nó i no instante t_{min} .

4 - Depois de conhecido o valor para c , o programa de optimização terá de redistribuir os consumos na rede, uma vez que a percentagem referente a fugas (70% neste caso) é distribuída igualmente por todas as tubagens da rede, e apenas a percentagem referente a consumo (30% neste caso) permanece como estava (ou sejam, os consumos nos nós são multiplicados por 30%, e é-lhes adicionado o valor das fugas).

5 - Para cada hora do período considerado, verificam-se as equações (14), (15) e (16), sendo $Q_{T,t}$ o caudal total que é consumido no instante t (medido à entrada da rede); $Q_{Te,t}$ o consumo total efectivo nos nós da rede no instante t ; q_{bi} o consumo-base no nó i ; $f_{c,t}$ o factor de consumo para a hora t ; K_f o coeficiente de fugas (i.e., *emissor*):

$$Q_{T,t} = Q_{Te,t} + Q_{F,t} \quad \text{equação (14)}$$

$$K_{f,i} = c * \sum_{j=1}^M \theta_{j,i} * S * L_{ji} \quad \text{equação (15)}$$

$$Q_{T,t} = \sum_{i=1}^N (q_{bi,t} * f_{c,t}) + \sum_{i=1}^N (K_{f,i} * P_{i,t}^{I,IG}) \quad \text{equação (16)}$$

6 – O programa optimiza um novo padrão - diferente - em cada nó de consumo (ou seja, um novo valor de $f_{c,t}$ para cada nó em cada hora t , que permite a convergência do algoritmo genético e, em cada hora, grava os valores de $f_{c,t}$).

Nesta conformidade e com base nas equações (13) e (16), definem-se as seguintes funções de aptidão:

- Para a primeira fase: optimização do valor de c :

$$\text{Min} \quad f(\Delta Q_F)_{t_{\min}} = (\%F * Q_{T,t_{\min}} - Q_{F,t_{\min},Mod}) / \%F * Q_{T,t_{\min}} \quad \text{equação (17)}$$

- Para a segunda fase: optimização dos factores de consumo ($f_{c,t}$) por forma a redistribuir os caudais restantes pelos nós de consumo efectivos:

$$\text{Min} \quad f(\Delta Q_{T,t})_{t_{\min}}^{H \rightarrow t_{\min}} = (Q_{T,t} - Q_{T,t,Mod})^2 / Q_{T,t} \Big|_{t=1}^{H \rightarrow t_{\min}} \quad \text{equação (18)}$$

onde o índice (*Mod*) indica o valor encontrado pelo modelo

A investigação apresentada neste artigo fez uso de um AG convencional geracional (figura 1) - desta forma, toda a população é substituída por novos elementos gerados pelo processo de selecção e aplicação de operadores: mutação e cruzamento. Como não existe convivência entre "pais" e "filhos"; estes substituem totalmente os pais, havendo a possibilidade de perdas de bons indivíduos. Este inconveniente é superado pela aplicação do elitismo, ou seja, preserva-se o melhor elemento de uma geração passando, directamente, uma cópia para a próxima geração. Para manter um bom nível de competição e evitar uma convergência prematura durante a execução do AG, adoptou-se a técnica do escalonamento linear.

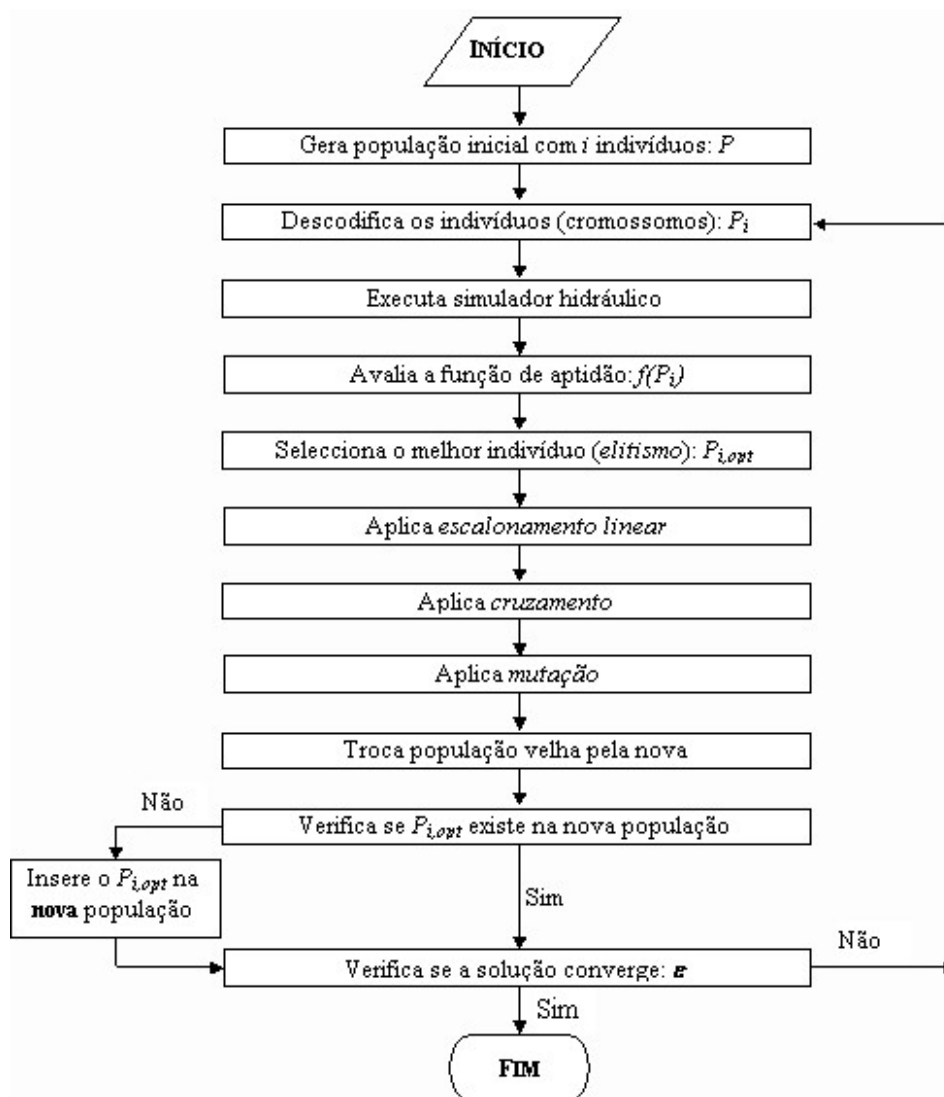


Figura 1 – Esquema sintético do algoritmo genético utilizado na otimização

VALIDAÇÃO DO MODELO

Tendo por objectivo a validação do modelo proposto, primeiramente, construiu-se uma rede hipotética onde se tenha o controlo sobre todas as variáveis envolvidas. Posteriormente, testou-se o modelo numa rede amplamente divulgada na literatura, nomeadamente a rede utilizada por Jowitt & Xu (1990) e Reis *et al.* (1997) e por Vairavamoorthy & Lumbers (1998).

A hipótese formulada, para validar o modelo proposto, é constituída por duas partes: na primeira, estabelece-se um valor para a variável de decisão, coeficiente de vazão dos orifícios de fuga (c), que será igual para todas as redes e terá um valor de 5×10^{-5} ; na segunda, o modelo estabelece um coeficiente de vazão (c) e novos factores de consumo ($f_{c,t}$), por forma a considerar a condição pré-estabelecida. Em seguida, descreve-se o procedimento adoptado:

Primeira parte

- Estabelece-se um valor para o coeficiente de vazão ($c = 5 \times 10^{-5}$) fixo para todas as condutas da rede;
- Calculam-se os valores dos coeficientes de fuga K_f (*i.e.*, emissor) para cada nó da rede, como se apresenta em seguida:

$$K_f = c * \sum_{j=1}^{M_i} \theta_{j,i} * L_{ji} \quad \text{equação (19)}$$

sendo M o número de condutas ligadas ao nó i ;

c) Determina-se um consumo base (q_{bi}), pré estabelecido, para cada nó;

d) Associa-se, para cada nó, um factor de consumo ($f_{c,i}$) para a hora H e um respectivo consumo base (q_{bi});

e) Simula-se a rede, no caso estudado com o programa EPANET, para uma condição hidráulica de regime estático na primeira simulação e dinâmica (ou regime alargado) para a restante;

f) Determina-se, com os resultados gerados na simulação, um padrão horário de consumo total (*i.e.*, consumo efectivo e perdas). Os resultados dos caudais gerados são posteriormente utilizados para simular uma leitura de caudais na entrada da rede;

g) Calcula-se a percentagem de perdas (ou fugas) para a hora que corresponde ao menor consumo.

Segunda parte

Nesta parte do procedimento, percorre-se o caminho inverso. Desta forma, se o modelo for válido tem-se como resultado uma rede com consumos em cada nó, semelhante à rede inicial. O procedimento consiste no seguinte:

a) Com base no padrão horário de consumo total, anteriormente calculado em (f), determina-se um novo consumo base (*i.e.*, redistribui-se o novo consumo, assim estabelecido, pelos nós de consumo efectivo);

b) Estabelece-se como dado de entrada para o modelo proposto uma percentagem de perdas (fuga) igual à calculada em (g) na primeira parte;

c) Executa-se o modelo proposto e analisam-se os resultados.

Caso de estudo: rede hipotética

A aplicação a este caso pressupõe a construção de uma rede simplificada, de acordo com a figura 2. Num processo normal de simulação/calibração, o caudal total que entra na rede seria distribuído, proporcionalmente, entre os nós 2 e 3.

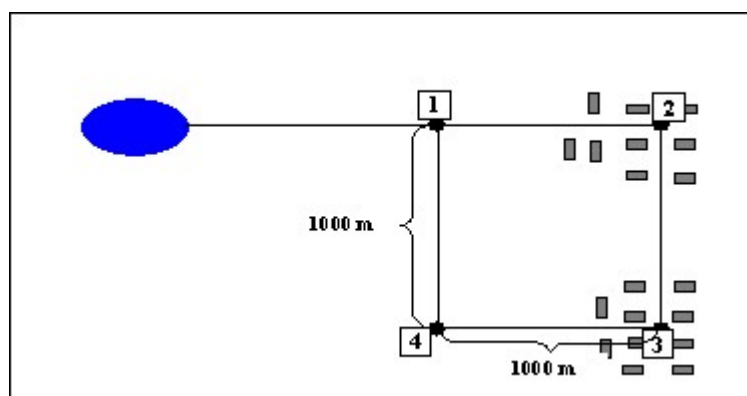


Figura 2 – Rede hipotética a ser usada nos testes de validação

Simulação estática: $P_{1,2,3 \text{ e } 4} = 60 \text{ m c.a. e } f_{c,i} = 1.0$

A figura 3 mostra a rede hipotética sem fugas sendo os caudais de consumo efectivo concentrados nos nós 2 e 3 e iguais a 20 l/s, em cada um. Os caudais de fugas, concentrados em cada nó, foram calculados conforme se demonstra em seguida:

$$k_1 = 5 \times 10^{-5} \times 0,5 \times (1000 + 1000) \Rightarrow k_1 = 0,05 \text{ tem-se: } q_{f1} = 0,05 \times 60^{1,18} \Rightarrow q_{f1} = 6,27$$

$$k_2 = 5 \times 10^{-5} \times 0,5 \times (1000 + 1000) \Rightarrow k_2 = 0,05 \text{ tem-se: } q_{f2} = 0,05 \times 60^{1,18} \Rightarrow q_{f2} = 6,27$$

$$k_3 = 5 \times 10^{-5} \times 0,5 \times (1000 + 1000) \Rightarrow k_3 = 0,05 \text{ tem-se: } q_{f3} = 0,05 \times 60^{1,18} \Rightarrow q_{f3} = 6,27$$

$$k_4 = 5 \times 10^{-5} \times 0,5 \times (1000 + 1000) \Rightarrow k_4 = 0,05 \text{ tem-se: } q_{f4} = 0,05 \times 60^{1,18} \Rightarrow q_{f4} = 6,27$$

A rede fica com as características hidráulicas conforme se mostrada na figura 4:

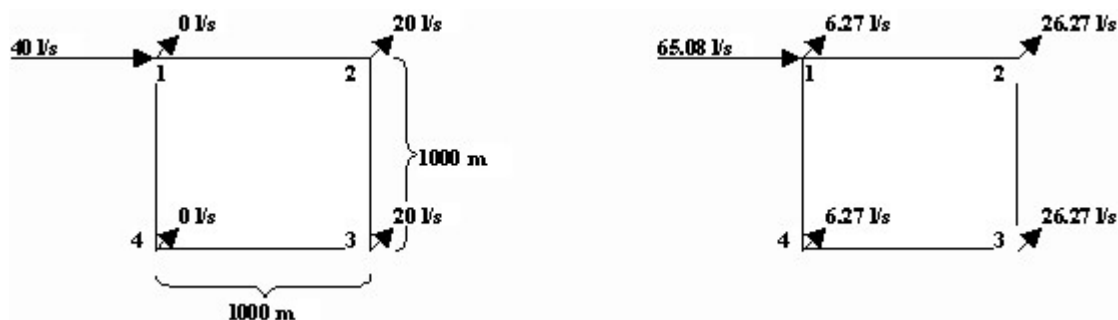


Figura 3 – Rede hipotética sem fugas Figura 4 – Rede com fugas

Calculando-se a percentagem de fugas com base nas figuras 3 e 4 para o caudal que alimenta a rede obtém-se:

$$\%F = \frac{65,08 - 40,0}{65,08} \times 100 \Rightarrow \%F = 38,53$$

Para configurar a rede por forma a testar o modelo proposto pelos autores, redistribuiu-se o consumo de 65,08 l/s, igualmente, entre os nós 2 e 3 – nós de consumo efectivo. Desta forma, a rede assumiu a configuração mostrada na figura 5. Chama-se a atenção para o facto de que é nesta condição que a rede é normalmente simulada/calibrada em modelos como EPANET, WaterCard, Piccollo, entre outros. Deste modo as fugas são normalmente incorporadas ao consumo efectivo de cada nó. O modelo proposto divide o consumo total em consumo efectivo e consumo de fugas, redistribuindo o caudal total consumido por todos os nós da rede, levando em consideração as pressões a que estão submetidos. Para esta finalidade é necessário e tão somente apenas conhecer a percentagem de fugas na hora de menor consumo (*i.e.*, obtém-se o caudal de fugas, fazendo-se o balanço de caudais para esta hora, numa zona de medição e controlo). Neste caso específico as fugas equivalem a 38,53%, conforme obtido anteriormente.

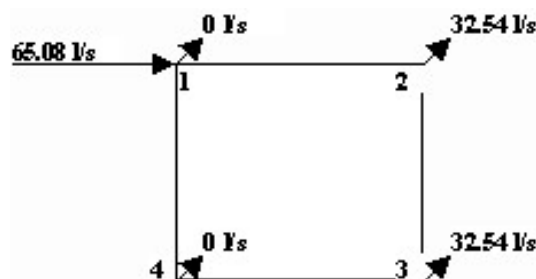


Figura 5 – Rede hipotética com fuga e caudal total consumido distribuído entre os nós 2 e 3

Resultados da simulação estática

Como resultado da simulação, o modelo obteve o valor de $4,99 \times 10^{-5}$ para o coeficiente de vazão (c), quando se impôs à partida 5×10^{-5} . O novo factor de consumo estimado pelo modelo foi de 0,615. Nesta conformidade, a distribuição dos caudais totais é mostrada na figura 6 e é igual à obtida no passo de cálculo manual (figura 3) e, na figura 7 vê-se a distribuição dos caudais se as fugas fossem retiradas (*i.e.*, fazendo os $K_f = 0$) que é igual à distribuição da figura 3 do passo de cálculo manual.

Analizando somente os caudais de fugas (ou perdas), verifica-se que são iguais em ambas as situações (6,27 l/s em cada nó) comprovando-se a validade do modelo proposto.

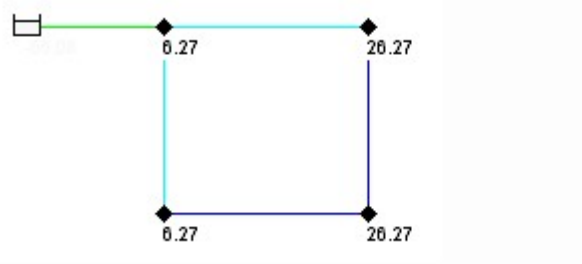


Figura 6 – Caudais nos nós: com fugas

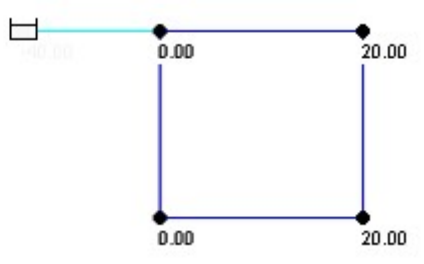


Figura 7 – Caudais nos nós: sem fugas

Simulação estendida

Neste caso, estabeleceu-se um padrão de consumo horário, que seria medido à entrada da rede, e cujo consumo base em cada nó é calculado sobre o valor do consumo médio total ($\overline{Q_T}$) dividido, equitativamente, pelos dois nós de consumo efectivo (q_{b2} e q_{b3}), conforme mostrado na tabela 1 e figura 8. O consumo horário mínimo medido situa-se em $t_{min} = 3$. Na tabela 2, apresenta-se o cenário de distribuição dos caudais, para um coeficiente de vazão, $c = 0,00005$, pré-estabelecido manualmente.

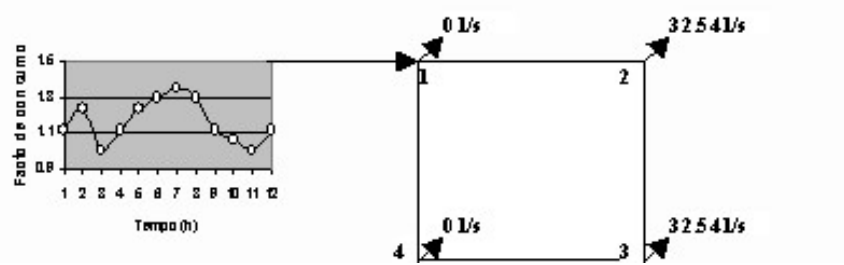


Figura 8 – Rede hipotética assumindo um padrão de consumo para 12 horas

Tabela 1 – Consumos medidos e factores de consumo calculados, para um cenário a simular de 12 horas

Time (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Q_{T,t}$ Medido	72,8	80,6	65,1	72,8	80,6	84,5	88,3	84,5	72,8	69,0	65,1	72,8
$f_{c,t}$ Calculado	1,12	1,24	1,00	1,12	1,24	1,30	1,36	1,30	1,12	1,06	1,00	1,12

Tabela 2 – Consumo total em cada nó para $c = 0.00005$ calculado manualmente

ID Nó	Méd.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1
1	0,00	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,
2	32,5	30,2	34,08	26,27	30,18	34,08	36,03	37,97	36,03	30,18	28,23	26,27	30
3	0,00	6,22	6,16	6,27	6,22	6,16	6,13	6,1	6,13	6,22	6,24	6,27	6,
4	32,5	30,18	34,07	26,27	30,18	34,07	36,02	37,96	36,02	30,18	28,22	26,27	30
QTotal	63,0	-72,8	-80,6	-65,1	-72,8	-80,6	-84,5	-88,3	-84,5	-72,8	-69,0	-65,1	-7,

Resultados da simulação estendida

Simulou-se o modelo para um nível de fugas de 38.53% e com base nos dados hidráulicos disponibilizados nas tabelas 1 e 2 e obtiveram-se os seguintes resultados: o coeficiente de vazão ($c = 0,0000500$) e o novo factor de consumo unitário (f_c) conformem apresentados na tabela 3. Na figura 9, apresentam-se os caudais de fugas calculados manualmente e pelo modelo. Nas tabelas 4 e 5 podem observar-se os valores das pressões em cada nó estabelecidas manualmente e pelo modelo. Mais uma vez, pode constatar-se, a validação da proposta apresentada.

Tabela 3 – Consumo total em cada nó estabelecido pelo modelo, para ($\%F = 38.53$ e $t_{min} = 3$) e novos factores de consumo unitário (f_c)

ID do Nó	Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,00	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27	6,27
2	32,54	30,17	34,01	26,27	30,16	34,01	35,98	37,99	36,04	30,16	28,24	26,30	30,16
3	0,00	6,22	6,16	6,27	6,22	6,16	6,13	6,10	6,13	6,22	6,24	6,27	6,27
4	32,54	30,16	34,00	26,27	30,16	34,00	35,97	37,98	36,03	30,16	28,24	26,30	30,16
Q_T mod.		-72,8	-80,5	-65,1	-72,8	-80,5	-84,4	-88,3	-84,5	-72,8	-69,9	-65,1	-72,8
Novo f_c		0,737	0,858	0,615	0,737	0,858	0,92	0,984	0,922	0,737	0,677	0,615	0,737

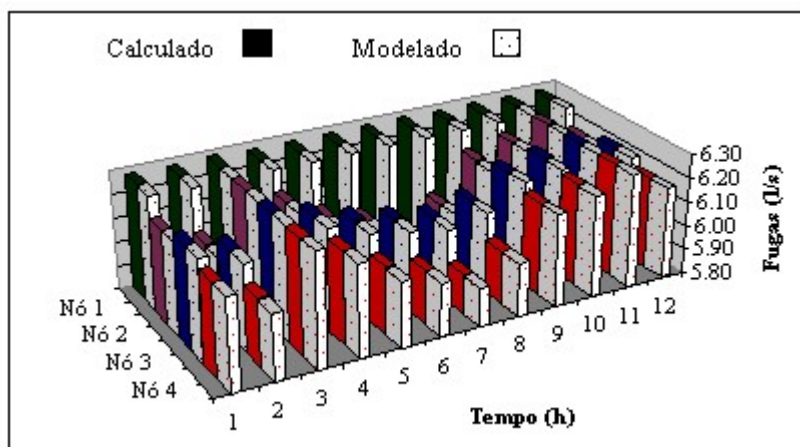


Figura 9 – Caudais de fuga em cada nó, calculado manualmente e determinado pelo modelo

Tabela 4 – Pressões em cada nó para $c = 0.00005$ calculadas manualmente

ID N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	59,99	59,99	59,99	60,00	60,00	60,00	60,00
2	59,28	58,47	60,00	59,28	58,47	58,04	57,60	58,04	59,28	59,65	60,00	59,28
3	59,59	59,13	60,00	59,59	59,13	58,89	58,64	58,89	59,59	59,80	60,00	59,59
4	59,25	58,42	60,00	59,25	58,42	57,97	57,51	57,97	59,25	59,64	60,00	59,25

Tabela 5 – Pressões em cada nó, para $c = 0.0000500$ estabelecido pelo modelo

ID N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	59,99	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
2	59,28	58,49	60,00	59,28	58,49	58,06	57,59	58,04	59,28	59,65	60,00	59,29
3	59,59	59,14	60,00	59,59	59,14	58,90	58,64	58,89	59,59	59,80	60,00	59,59
4	59,25	58,44	60,00	59,26	58,44	57,99	57,51	57,97	59,25	59,63	60,00	59,26

Caso de estudo: exemplo retirado da literatura da especialidade

A rede que se apresenta na figura 10 foi usada por Jowitt & Xu (1990) a fim de ilustrar uma aplicação da estimativa de fugas, considerando $c = 0,000010$ e $\beta = 1,18$. Os caudais totais consumidos são apresentados na figura 11 e os caudais de fugas estimados conforme dados apresentados no artigo citado e que constam da figura 12. A mesma rede foi também utilizada por outros autores, inclusivamente por Araujo *et al.* (2002^a e 2002^b). A tabela 6 apresenta os níveis médios de água para os reservatórios 23, 24 e 25, respectivamente. Os padrões de consumo nos nós e de variação nos reservatórios, estão representados na tabela 7. Os dados com as características físicas da rede, bem como, os consumos de base, constam da tabela 8.

Tabela 6- Dados dos níveis médios de água para os reservatórios da rede da figura 10

Identificação do reservatório	Nível médio de água (m)
Nó 23	54,66
Nó 24	54,60
Nó 25	54,50

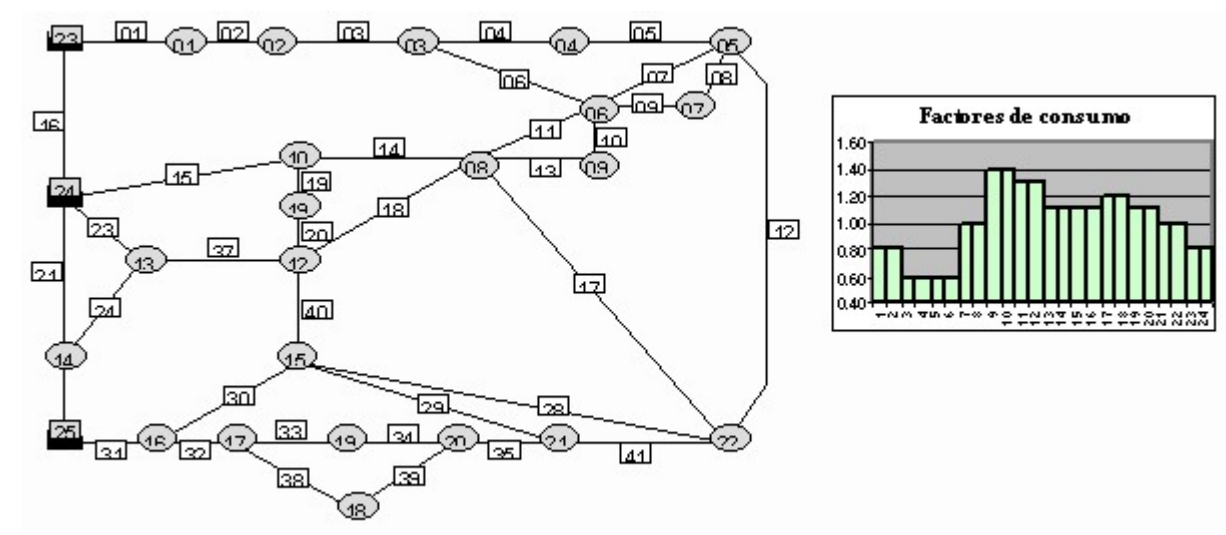


Figura 10 – Rede apresentada em Jowitt & Xu (1990) e respectivo padrão de consumo unitário

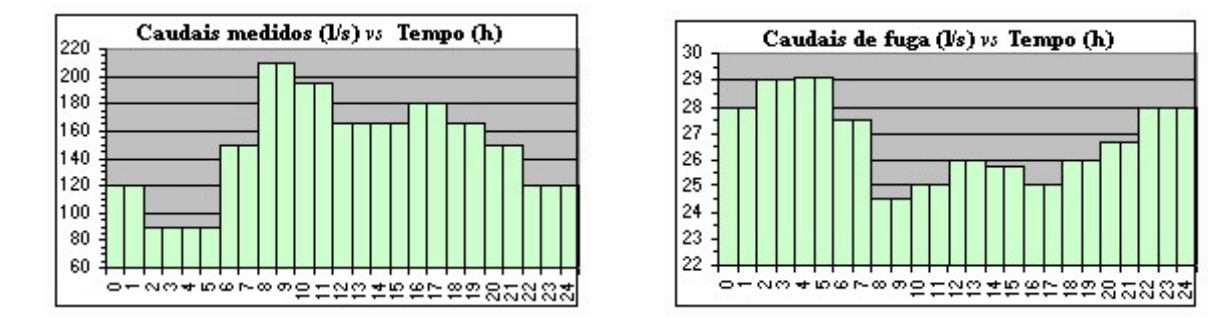


Figura 11 – Caudais totais consumidos na rede

Figura 12 – Fuga originalmente determinada

Tabela 7- Dados para os padrões nós de consumo (Identificação 1) e dos níveis nos reservatórios (Identificação 2, 3 e 4), representados na figura 10 como Nó 23, Nó 24 e Nó 25 respectivamente

Identificação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,800	0,800	0,600	0,600	0,600	0,600	1,000	1,000	1,400	1,400	1,300	1,300
2	1,010	1,010	1,012	1,012	1,019	1,019	1,021	1,021	1,025	1,025	1,014	1,014
3	1,007	1,007	1,011	1,011	1,013	1,013	1,015	1,015	1,016	1,016	1,009	1,009
4	1,007	1,007	1,011	1,011	1,015	1,015	1,017	1,017	1,018	1,018	1,009	1,009
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1,100	1,100	1,100	1,100	1,200	1,200	1,100	1,100	1,000	1,000	0,800	0,800
2	1,008	1,010	1,003	1,003	0,999	0,999	0,997	0,997	1,001	1,001	1,004	1,004
3	1,004	1,004	1,002	1,002	1,000	1,000	0,998	0,998	1,002	1,002	1,004	1,004
4	0,998	0,998	0,994	0,994	0,991	0,991	0,996	0,996	1,002	1,002	1,007	1,007

Tabela 8- Dados das características físicas e hidráulicas para rede da figura 10

ID do Troço	Comprimento	Diâmetro	Rugosidade	ID do Nó	Cota Top.	Cons. Base
	m	mm			m	l/s
T_01	606	457	110	N_01	18,0	5,0
T_02	1930	457	110	N_02	18,0	10,0
T_03	5150	305	10	N_03	14,0	0,0
T_04	326	152	100	N_04	12,0	5,0
T_05	844	229	110	N_05	14,0	30,0
T_06	1274	152	100	N_06	15,0	10,0
T_07	1115	229	90	N_07	14,5	0,0
T_08	500	381	110	N_08	14,0	20,0
T_09	615	381	110	N_09	14,0	0,0
T_10	300	299	90	N_10	15,0	5,0
T_11	743	381	110	N_11	12,0	10,0
T_12	1408	152	100	N_12	15,0	0,0
T_13	443	229	90	N_13	23,0	0,0
T_14	249	305	105	N_14	20,0	5,0
T_15	3382	305	100	N_15	8,0	20,0
T_16	454	457	110	N_16	10,0	0,0
T_17	931	229	125	N_17	7,0	0,0
T_18	1600	457	110	N_18	8,0	5,0
T_19	542	229	90	N_19	10,0	5,0
T_20	777	229	90	N_20	7,0	0,0
T_21	2782	229	105	N_21	10,0	0,0
T_24	1014	381	135	N_22	15,0	20,0
T_28	2334	229	100			
T_29	832	152	90			
T_30	914	229	125			
T_31	1097	381	6			
T_32	822	305	140			
T_33	1072	229	135			
T_34	864	152	90			
T_35	711	152	90			
T_37	762	457	110			
T_38	411	152	100			
T_39	701	229	110			
T_40	1996	229	95			
T_41	2689	152	100			
T_23	1767	475	110			
T_36	304	381	135			

Resultados da simulação estendida

Executou-se o modelo proposto para um nível de fugas de 32.44% (estabelecido com base no consumo mínimo nocturno: $t_{min} = 4h$ de $Q_T = 90$ l/s (figura 11) e com base no diagrama de variação horária das fugas determinado por Jowitt e Xu (1990) (figura 12) e deduziu-se para a hora de menor consumo o valor de 29,2 l/s).

Obteve-se o coeficiente de vazão ($c = 0.00000951$), que aplicando-se à equação (19), resulta nos coeficientes de fuga (i.e., emissor), em cada nó, apresentados na tabela 9. Os novos factores de consumo unitários (f_c) são mostrados na figura 13 comparativamente aos valores originalmente calculados. Na figura 14, têm-se os caudais de fugas originais comparados aos estabelecidos pelo modelo. Observam-se diferenças mais acentuadas nas horas 8, 9, 10, 11 e 14, 15, 16 e 17 que compreendem a faixa de menor consumo, justificadas pela diferença de metodologias utilizadas. Nas figuras 15 e 16, pode observar-se a distribuição espacial dos caudais de fugas para as horas de menor e maior consumo, respectivamente. Na figura 17 apresentam-se os valores de caudais originalmente medidos à entrada da rede, comparativamente aos caudais totais consumidos nos nós, estabelecidos pelo modelo. Da comparação destes resultados pode constatar-se a validação do modelo desenvolvido.

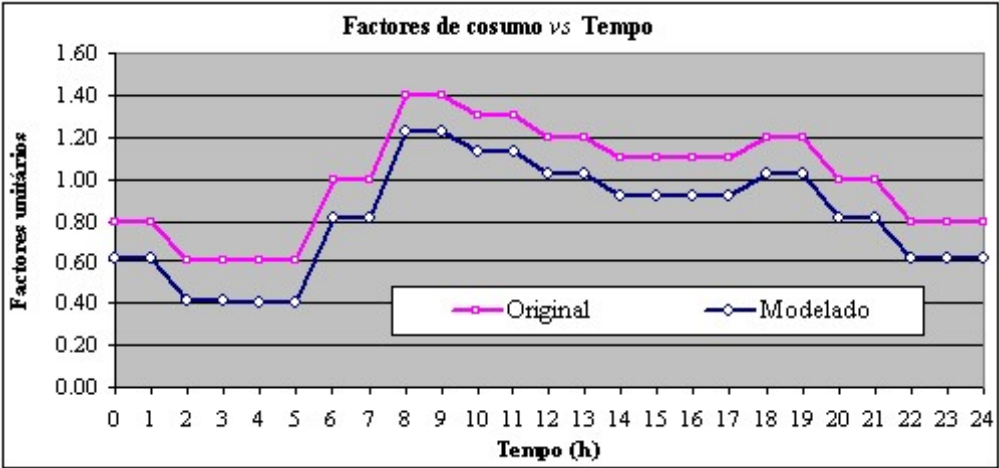


Figura 13 – Comparação entre factores de consumos original e modelado

Tabela 9 – Coeficientes de fugas (f_c) ou emissores (EPANET) para cada nó de consumo da rede

ID do Nó	Emissor	ID do Nó	Emissor	ID do Nó	Emissor	ID do Nó	Emissor
1	0,012	7	0,005	15	0,029	19	0,009
2	0,034	8	0,019	13	0,017	20	0,011
3	0,032	9	0,004	14	0,019	21	0,002
4	0,006	10	0,002	16	0,013	22	0,035
5	0,018	11	0,006	17	0,011		
6	0,019	12	0,024	18	0,005		

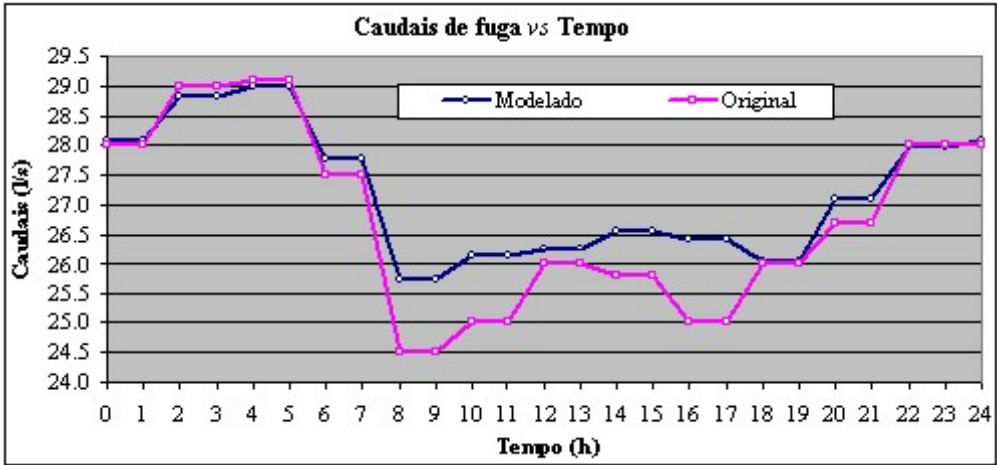


Figura 14 –Valores de fuga originais e determinados pelo modelo

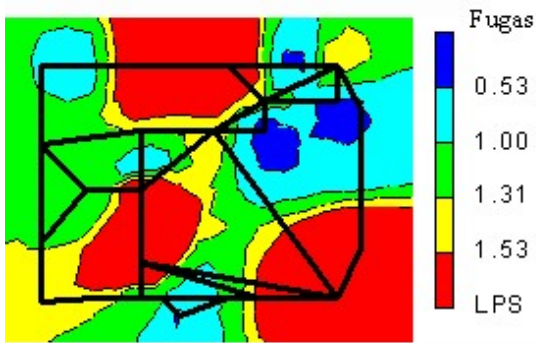


Figura 15 – Distribuição das fugas para t = 4h, que corresponde a hora de menor consumo

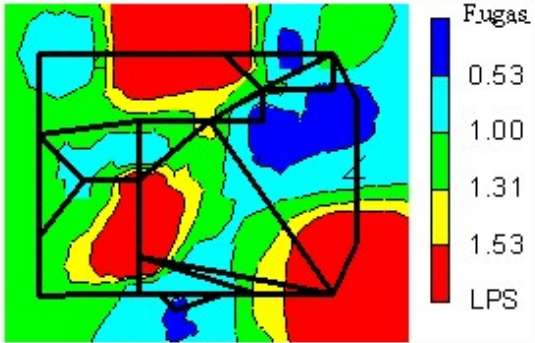


Figura 16 –Distribuição das fugas para t = 8h que corresponde a hora de maior consumo

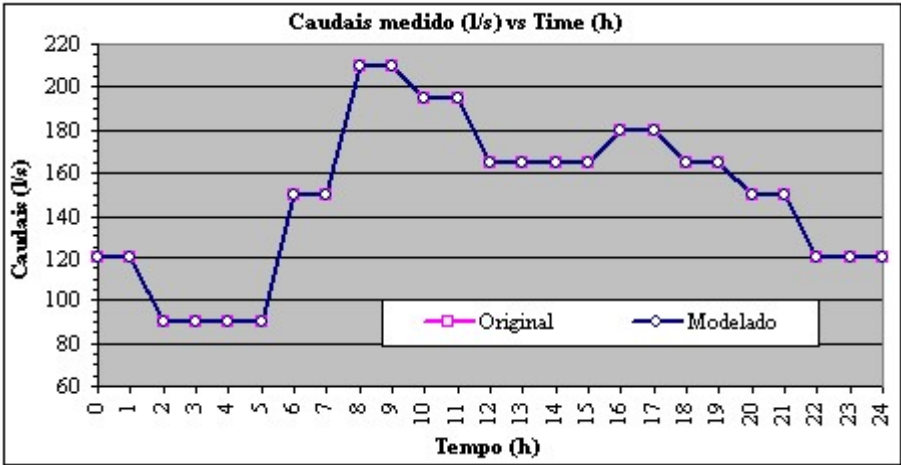


Figura 17 – Comparação entre os caudais medidos à entrada da rede (Original) e totais consumidos nos nós e obtidos pelo modelo (Modelado)

CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido mostra ser uma ferramenta para auxílio aos gestores de sistemas de abastecimento de água, quando se pretende modelar uma rede de distribuição para fugas incluídas no cômputo geral dos consumos, e dependentes das pressões.

O modelo consegue estabelecer de forma relativamente simples –conhecendo apenas os caudais de fugas para a hora de menor consumo global, através de uma zona de medição e controlo (ZMC) – o coeficiente de vazão do orifício (c) e os respectivos coeficientes de fugas (K_f) para cada nó de consumo da rede.

O modelo também é capaz de estabelecer uma nova relação para cada nó de consumo, por forma a que os caudais totais consumidos, em cada hora, estejam de acordo com os caudais medidos à entrada da ZMC.

No que diz respeito à utilização da técnica do Algoritmo Genético (AG), os resultados foram obtidos num tempo relativamente curto, situando-se na faixa de uma hora de simulação total numa média de 100 iterações para cada intervalo de tempo. O programa foi executado num computador com processador de 1 Gz e 512 KB de memória RAM. O AG foi executado para uma população de 50 indivíduos; probabilidade de cruzamento de 0,95; probabilidade de mutação de 0,005; escalonamento linear de 1,25 e aplicou-se a seleção do melhor indivíduo através da aplicação do elitismo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia – Portugal – pela atribuição da bolsa de doutoramento (SFRH/BD/1148/2000), à Universidade Federal do Ceará – Brasil – pelo apoio financeiro em forma de salários, e ao DECivil do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa - Portugal pelo apoio em equipamento e instalações disponibilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ainola, L.; Koppel, T. & Vassiljev, A. (2000) – Complex Approach to the Water Network Model Calibration and the Leakage Distribution – Hydraulic Engineering Software VIII, Eds. W. R. Blain & C. A. Brebbia, WIT Press, Southampton, Boston, pp. 91 – 100
2. Ainola, L.; Koppel, T.; Kändler, N. & Vassiljev, A. (2001) – *Principle of locality and its Application to Eater Network Model Calibration* - Water Software Systems: Theory and Applications, Volume 1, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England, pp. 111 – 120
3. Alonso, J.M., Fernando, A., Guerrero, D., Hernández, V., Ruiz, P.A., Vidal, A.M., Martinez, F., Vercher, J. & Ulanicki, B., 2000. Parallel Computing in Water Network Analysis and Leakage Minimization. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, July/August, pp. 251-260.
4. Araujo, L.S., Ramos, H.M. & Coelho, S.T., 2002^a. Gestão Integrada de Sistemas de Distribuição de Água para um Melhor Controlo de Perdas. 6º Congresso da Água, 12/22 de março de 2002. Porto, Portugal.
5. Araujo, L.S., Ramos, H.M. & Coelho, S.T., 2002^b. Optimização da Localização de Válvulas numa Rede de Distribuição para a Minimização de Fugas", 10º ENASB/SILUBESA, 16/19 de setembro de 2002. Braga, Portugal.
6. Araujo, L. S, Ramos, H. M. & Coelho, S. T. 2003. Estimation of Distributed Pressure-Dependent Leakage and Consumer Demand in Water Supply Networks. Advance in Water Supply Management. Imperial College London, UK, 15 – 17 September 2003.
7. Araujo, L. S, Coelho, S. T. & Ramos, H. M 2004. Maximização do Desempenho de Redes de Distribuição de Água Através da Inserção e Ajuste de Válvulas. XI SILUBESA: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28 de março a 02 de abril de 2004. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.
8. Goldberg, D.E. 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, USA.
9. Goldberg, D.E., 1994. Genetic and Evolutionary Algorithms Come of Age. Communications of the ACM, Vol. 37, nº 3, pp. 113-119.
10. 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 Minimisation. Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications, Vol. 1, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England. pp.141-153.
11. Jowitt, P.W. & Xu, C., 1990. Optimal Valve Control in Water Distribution Networks. Journal of Water Resources planning and Management, ASCE, July/August, pp. 455-472.

12. Kalanithy, V. & Lumbers, J., 1998. Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, November. pp 1146-1154.
13. Lambert, A., Mayers, S. & Trow, S., 1998. Managing Water Leakage: economic and technical issues. *Financial Times Energy*. <http://www.ftenergy.com>.
14. 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*. July. Tempe, Arizona.
15. National Water Council Standing Technical Committee Report 26, 1980. Leakage Control Policy and Practice. Technical Working Group on Waste of Water. ISBN 0 904561 95 X.
16. Reis, F.R. & Chaudhry, F.H., 1999. Hydraulic Characteristics of Pressure Reducing Valves for Maximum Reduction of Leakage in Water Supply Networks. *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, Vol. 1, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England. pp 259-267.
17. Reis, F.R., Porto, R.M. & Chaudhry, F.H., 1997. Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithm". *Journal of Water Resources Planning and Management*, November/December. pp 317-326.
18. Rossman, L.A., 2002. EPANET 2 Users Manual. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH 45268, September, 2000 (traduzido para português por D. Loureiro e S.T. Coelho, LNEC 2002 – www.dh.lnec.pt/Nes/epane).
19. Tucciarelli, T., Criminisi, A. & Termini, D., 1999. Leak Analysis Systems by Means of Optimal Valve Regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, March. pp 277-285.
20. Vairavamoorthy, K. & Lumbers, J., 1998. Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, November, pp 1146-1154.
21. Viana, G.V.R., 1998. Meta-heurísticas e Programação Paralela em Otimização Combinatória. Edições UFC, Fortaleza. 250 p.