MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PERDAS REAIS DE ÁGUA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
Numerical Modelling of Real Losses in Water Distribution Systems

MANUEL MARIA PACHECO FIGUEIREDO

Professor Auxiliar, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, mpfiguei@fe.up.pt

Resumo

A modelação das perdas de água é importante, se não mesmo indispensável, na construção de um modelo numérico de uma rede de distribuição de água. Os simuladores hidráulicos, como é o caso do EPANET, permitem a configuração dos nós das redes como dispositivos emissores – pequenos orifícios através dos quais a água, sob pressão, se escoa para o exterior. A lei de vazão destes dispositivos é caracterizada por parâmetros que devem ser adequadamente quantificados de modo a que as perdas de água nos nós do modelo reproduzam as que ocorrem nas condutas a que estão ligados. Neste artigo apresenta-se uma metodologia para a configuração dos nós com base no conhecimento (medição) do caudal total entregue à rede de distribuição e numa estimativa do consumo efectivo (doméstico, grandes consumidores, etc.) no período nocturno. Os procedimentos iterativos necessários à configuração dos nós emissores são efectuados com um programa, desenvolvido em ambiente MATLAB, que controla externamente o simulador EPANET utilizado na modelação e na resolução hidráulica da rede de distribuição. O potencial de perdas das condutas, em idênticas condições de pressão, é estimado com uma fórmula de cálculo inspirada na quantificação das perdas reais inevitáveis (mínimas) presente na definição do indicador de desempenho da International Water Association (IWA) para serviços de abastecimento de água designado por *índice infra-estrutural de fugas* (Op29).

Palavras-chave: Redes de distribuição de água, perdas reais, modelação, EPANET, MATLAB.

Abstract

Modelling water losses is important, if not indispensable, when building a numerical model of a water distribution system. Hydraulic simulators, like EPANET, allow junctions to be figured as having emitter devices – small orifices that discharge under pressure water to the atmosphere. Their discharge law is characterised by parameters whose values must assure that water losses through the model junctions equal those happening along the pipes to which they are linked. This paper presents a methodology to configure the junctions which is based on the knowledge (measurement) of the water distribution system total inflow and on an estimation of the effective consumption (household, big consumers, etc.) during the night. Iterative procedures to reach the right configuration of the emitter junctions are done with a program, developed in a MATLAB environment, which controls externally the EPANET simulator used to model and solve the water distribution network. Pipe potential for water loss, under the same pressure conditions, is estimated with a formula based on the quantification of unavoidable (minimum) real losses that can be find in the definition of the International Water Association (IWA) performance indicator for water distribution services named *infrastructure leakage index* (Op29).

Keywords: Water distribution systems, real losses, modelling, EPANET, MATLAB.

1. Introdução

A modelação de uma rede de distribuição de água requer o conhecimento da rede em causa (traçado, diâmetro e rugosidade equivalente das paredes interiores das condutas, localização e regulação dos órgãos acessórios de manobra, etc.) e dos consumos que a solicitam (distribuição espacial e variação temporal). A perda de água constitui um "consumo" não desejado, que não deve ser ignorado porque, frequentemente, é responsável por uma parcela significativa dos caudais escoados nas condutas e, também, porque a modelação da rede, e em particular das pressões, pode ser um instrumento útil no estudo de soluções que atenuem as perdas (p.e., o estabelecimento de patamares de pressão).

As perdas reais de água têm diversas causas. Excluindo os episódios de rupturas de condutas com forte evidência superficial, que são rapidamente reparadas, e de extravasamentos ou perdas em reservatórios, a perda de água com um carácter mais permanente, e cujo comportamento se pretende modelar, é consequência de falhas localizadas de estanquidade nas condutas (nas juntas entre tubagens, nas ligações aos diversos acessórios, etc.), nos ramais de ligação (nas ligações às condutas distribuidoras, ao longo do próprio ramal, etc.) e, também, de pequenas rupturas que permanecem por detectar e reparar.

As falhas localizadas de estanquidade e as pequenas rupturas comportam-se como pequenos orifícios através dos quais a água, sob pressão, se escoa para o exterior da rede. Os simuladores hidráulicos, em particular o EPANET (Rossman, 2000), permitem configurar os nós das redes como dispositivos emissores cuja lei de vazão, semelhante à dos orifícios, deve ser adequadamente definida de modo a que o modelo da rede aproxime o comportamento desta no que respeita às perdas de água. Em particular, pretende-se que o modelo reproduza o caudal total de perdas e a respectiva distribuição espacial, os caudais nas condutas induzidos pela perda de água e, ainda, a variabilidade desta com a pressão, a qual, por sua vez, depende do consumo.

Neste artigo apresenta-se uma metodologia para a configuração dos nós do modelo da rede como dispositivos emissores, com base no conhecimento (medição) do caudal total entregue à rede de distribuição e numa estimativa do consumo efectivo (doméstico, grandes consumidores, etc.) no período nocturno. Os procedimentos iterativos necessários à configuração dos nós emissores são efectuados com um programa, desenvolvido em ambiente MATLAB, que controla externamente o simulador EPANET utilizado na modelação e resolução hidráulica da rede de distribuição.

2. Nós Emissores

Os simuladores hidráulicos, em particular o EPANET, permitem configurar os nós das redes como dispositivos emissores cuja lei de vazão, semelhante à dos orifícios, pode ser expressa pela seguinte equação

$$Q_i = C_i p_i^{\beta} \qquad [1]$$

em que Q_i representa o caudal perdido através do "orifício" do nó i [L^3T^{-1}], C_i significa o coeficiente de vazão do "orifício" [$L^3T^{-1}L^{-\beta}$] e β é o expoente a que é elevada a pressão (altura piezométrica) p_i [L] no nó calculada pelo simulador.

No caso das perdas de água é habitual a adopção de um expoente com um valor próximo ou até um pouco superior à unidade, frequentemente 1.15 (Farley e Trow, 2003).

À semelhança do que acontece com o consumo nas condutas distribuidoras, as perdas de água que ocorrem ao longo das condutas da rede são atribuídas aos nós dos modelos numéricos, ou seja, pretende-se que o caudal perdido em cada nó corresponda ao que na realidade se perde nos semi-comprimentos das condutas que para ele concorrem, Figura 1.

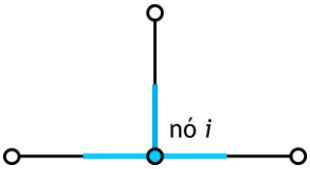

Figura 1. Contribuição dos semi-comprimentos para o caudal perdido pelo nó.

Assim, na quantificação do coeficiente de vazão de cada nó é necessário ter em conta, relativamente a cada conduta a que está ligado, os seguintes aspectos: (*i*) o semi-comprimento; (*ii*) e a maior ou menor propensão da conduta para perder água em idênticas condições de pressão. Estes aspectos são reflectidos na expressão seguinte,

$$C_i = c \sum_{j=1}^{M_i} 0.5\ cpp_j\ L_{j,i} \qquad [2]$$

em que o parâmetro cpp_j representa o *coeficiente de ponderação de perdas* da conduta j, $L_{j,i}$ o comprimento da conduta j ligada ao nó i, M_i o número total de condutas ligadas ao nó i e c o *coeficiente de vazão de perdas unitário* (i.e., por unidade de comprimento de conduta) tomado como referência para toda a rede. De acordo com esta expressão, o coeficiente de vazão de um dado nó é obtido pelo produto do coeficiente de vazão de perdas unitário da rede pelo somatório dos semi-comprimentos ponderados dos tubos concorrentes nesse nó.

Para a compreensão desta expressão, considere-se o coeficiente de vazão de perdas unitário, c [$L^3T^{-1}L^{-\beta}L^{-1}$], como uma abstracção teórica correspondente à existência de um orifício contínuo ao longo (de uma geratriz) das condutas. O produto deste coeficiente unitário, comum a todas as condutas da rede, pelo coeficiente de ponderação de perdas de uma dada conduta, cpp_j, define o coeficiente de vazão por unidade de comprimento dessa conduta que, multiplicado pelo respectivo semi-comprimento, estabelece a contribuição da conduta para o coeficiente de vazão do nó (emissor) a que está ligada. Adicionando as contribuições de todas as condutas que concorrem para o nó, e colocando em evidência o coeficiente c, obtém-se a Eq.[2].

Para a determinação de c são estabelecidos os conceitos de coeficiente de vazão global da rede, C_{rede}, comprimento total ponderado da rede, $L_{\text{pond,rede}}$, e pressão (altura piezométrica) média ponderada da rede, $\langle p_{\text{rede}} \rangle$. O coeficiente de vazão global da rede, C_{rede}, corresponde à adição dos coeficientes de vazão de todos os NN nós emissores da rede, ou seja,

$$C_{\text{rede}} = \sum_{i=1}^{NN} C_i \qquad [3]$$

Uma vez introduzida nesta expressão a Eq. [2] e a definição de comprimento total ponderado da rede, $L_{\text{pond,rede}}$, como sendo igual ao somatório dos comprimentos ponderados das M_T condutas da rede,

$$L_{\text{pond, rede}} = \sum_{i=1}^{NN} \sum_{j=1}^{M_i} 0.5\ cpp_j\ L_{j,i} = \sum_{j=1}^{M_T} cpp_j\ L_j \qquad [4]$$

obtém-se uma relação entre o coeficiente de vazão global, C_{rede}, o coeficiente de vazão de perdas unitário, c, e o comprimento total ponderado, $L_{\text{pond,rede}}$,

$$C_{\text{rede}} = \sum_{i=1}^{NN} C_i = c \sum_{i=1}^{NN} \sum_{j=1}^{M_i} 0.5\ cpp_j\ L_{j,i} = c \sum_{j=1}^{M_T} cpp_j\ L_j = \\ = c\ L_{\text{pond, rede}} \qquad [5]$$

O caudal total de perdas da rede, Q_{perdas}, é igual ao somatório de todos os caudais perdidos pelos nós, ou seja,

$$Q_{\text{perdas}} = \sum_{i=1}^{NN} C_i\ p_i^{\beta} = C_{\text{rede}} \langle p_{\text{rede}} \rangle^{\beta} = c\ L_{\text{pond,rede}} \langle p_{\text{rede}} \rangle^{\beta} \qquad [6]$$

que também pode ser definido como o caudal que é perdido por um "orifício global", com o coeficiente de vazão igual a C_{rede} e sujeito à pressão média ponderada da rede, $\langle p_{\text{rede}} \rangle$.

Uma vez conhecidos os comprimentos reais das condutas e quantificados os respectivos *cpp*'s, o cerne da modelação numérica das perdas reais de água reside na determinação do valor de c que produz o caudal total de perdas fixado para um dado cenário de exploração da rede.

A determinação de c é realizada iterativamente com recurso à Eq. [6] resolvida alternadamente em ordem a c e a $\langle p_{\text{rede}} \rangle$. Na primeira iteração, c_1 é calculado para o caudal de perdas fixado, Q_{perdas}, e uma estimativa inicial (arbitrada) da pressão média ponderada da rede, ou seja,

$$c_1 = \frac{Q_{\text{perdas}}}{L_{\text{pond,rede}} \langle p_{\text{rede}} \rangle^{\beta}} \qquad [7]$$

Com este valor são quantificados os coeficientes de vazão dos nós *NN* emissores ($C_{i,1}$, i=1,…,*NN*) a introduzir no modelo numérico do simulador EPANET (Eq. [2]).

Realizada a primeira simulação, apura-se o caudal de perdas, $Q_{\text{perdas},1}$, por diferença entre o caudal total entregue à rede pelo reservatório e o caudal efectivamente consumido no cenário para o qual se fixou o caudal de perdas.

Nas iterações subsequentes (k=2,…), a pressão média ponderada na rede é estimada com o caudal de perdas apurado na iteração anterior,

$$\langle p_{\text{rede},k} \rangle = \left(\frac{Q_{\text{perdas},k-1}}{c_{k-1}\, L_{\text{pond, rede}}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \qquad [8]$$

o coeficiente de vazão de perdas unitário é recalculado para a nova iteração k com o valor fixado para o caudal de perdas, Q_{perdas},

$$c_k = \frac{Q_{\text{perdas}}}{L_{\text{pond,rede}} \langle p_{\text{rede},k} \rangle^{\beta}} \qquad [9]$$

os coeficientes de vazão dos nós emissores novamente quantificados ($C_{i,k}$) e o caudal de perdas ($Q_{\text{perdas},k}$) recalculado.

O procedimento iterativo termina quando este caudal converge, a menos de um erro pré-determinado, para o valor pretendido

$$\left| Q_{\text{perdas},k} - Q_{\text{perdas}} \right| < \delta \qquad [10]$$

Obtida a convergência, os nós emissores do modelo estão configurados para simular o comportamento da rede de distribuição para todos os cenários de exploração – variações do consumo de água induzem modificações nas pressões da rede e, por consequência, variações das perdas de água.

Os procedimentos iterativos anteriormente descritos de forma sumária são realizados por um programa escrito em linguagem MATLAB que controla externamente o simulador EPANET na resolução hidráulica da rede. Em particular, o simulador é utilizado no cálculo do caudal total aduzido à rede, Q_T, de cada vez que os coeficientes de vazão dos nós são reformulados, passo que precede a determinação do caudal de perdas, $Q_{\text{perdas},k}$, por diferença daquele (Q_T) para o consumo efectivo estimado.

O controlo externo do EPANET é efectuado com o auxílio de uma *toolbox* de funções escritas em MATLAB (Vieira, 2007) que comunica com o *toolkit* de funções externas do EPANET.

3. Ponderação das Perdas nas Condutas

Exposta a metodologia numérica, resta a quantificação dos coeficientes de ponderação de perdas das M_T condutas (cpp_j, j=1,…,M_T), os quais procuram medir a maior ou menor propensão de cada conduta para perder água, por unidade de comprimento e em idênticas condições de pressão.

Na ausência de melhor informação, sugere-se a adopção de uma fórmula de cálculo inspirada na que é preconizada para a quantificação do volume das perdas reais mínimas inevitáveis na definição do indicador de desempenho da International Water Association (IWA) para serviços de abastecimento de água (Alegre *et al.*, 2004) designado por *índice infra-estrutural de fugas* (Op29),

$$cpp_j = 18 + 0.7\, d_{\text{ramal},j} + 25\, d_{\text{ramal},j} \langle L_{\text{ramal},j} \rangle\,, \quad j = 1, \ldots, M_T \qquad [11]$$

em que $d_{\text{ramal},j}$ representa a densidade de ramais da conduta j (ramal/km), $\langle L_{\text{ramal},j} \rangle$ o comprimento médio dos ramais de ligação da conduta j (km) e M_T o número total de condutas da rede de distribuição.

Nos termos da Eq. [11], quanto maior a densidade de ramais, ou o respectivo comprimento médio, maior a propensão para a perda de água por unidade de comprimento e por unidade de pressão.

Questões como o tipo de material da conduta, idade e estado de conservação, frequência de rupturas (como indício do estado de conservação), etc., não encontram reflexo nesta expressão pelo que deve ser considerada como uma primeira aproximação à modelação das perdas reais de água.

4. Exemplo de Aplicação

Considere-se, a título exemplificativo, a rede de distribuição representada na Figura 2 (Pereira, 2012). Esta rede constitui uma *zona de medição e controlo* (ZMC) de uma rede maior e, à entrada, é instalada uma válvula redutora de pressão (VRP) regulada para uma dada pressão (neste exemplo, 27 mca). O consumo total de água, medido à entrada da ZMC num determinado dia, é o representado na Figura 3 e corresponde à soma do consumo doméstico (a estimar), do consumo (medido) dos *grandes consumidores* (Q_{GC}; Figura 4) e das perdas reais de água (a estimar).

O período de menor consumo total da ZMC, entre as 5:00 e as 6:00, corresponde simultaneamente ao período de menor consumo dos clientes da rede (domésticos e grandes consumidores), de maior pressão e, por consequência, de maior perda real de água.

Estimando o consumo doméstico neste período – é frequentemente sugerido o valor de 2 L/h/contador – e conhecido (medido) o caudal médio horário fornecido aos grandes consumidores, obtém-se o caudal de perdas reais por subtracção destes consumos ao caudal total entregue à ZMC.

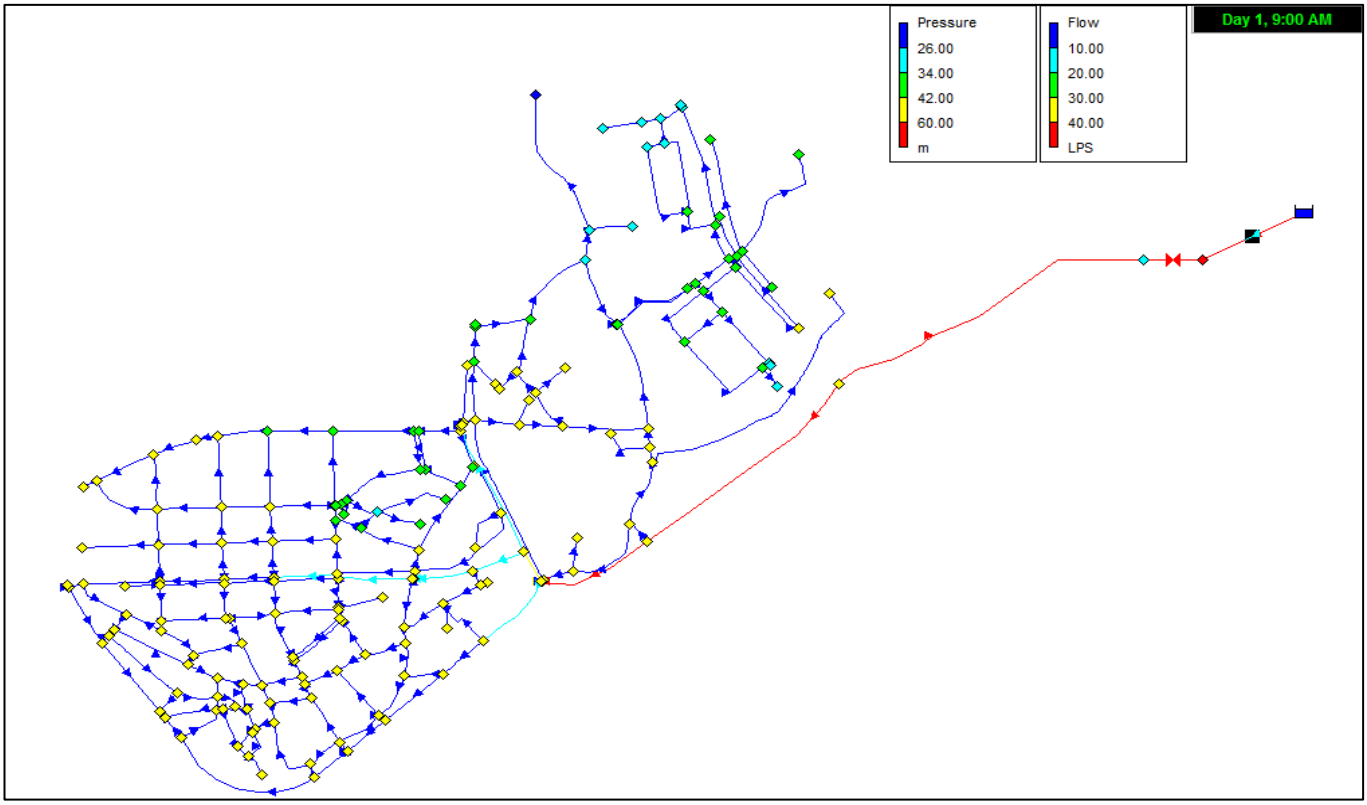

Figura 2. Modelo EPANET da zona de medição e controlo (ZMC).

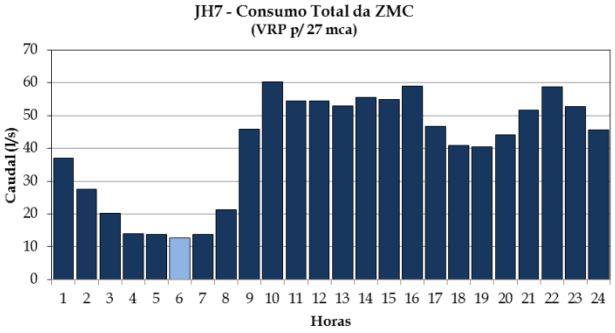

Figura 3. Caudal médio horário total aduzido à ZMC.

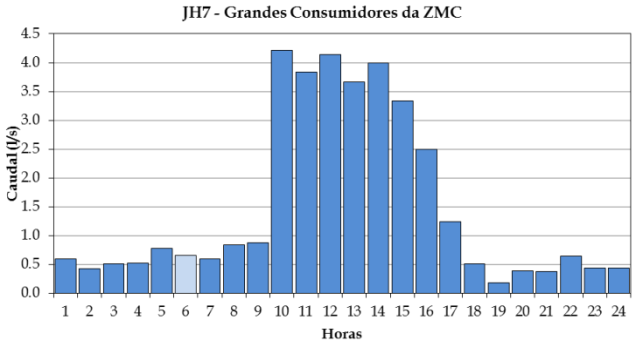

Figura 4. Medição do caudal médio horário fornecido aos grandes consumidores.

Aplicando esta abordagem ao exemplo figurado (Eq. [12]), i.e., tomando para os 8122 contadores um consumo médio de 2 L/h/contador ($Q_{D,min}$ = 4.51 L/s) e sendo conhecido, para este período, o caudal fornecido aos grandes consumidores (Q_{GC} = 0.65 L/s) e o caudal total aduzido à ZMC (Q_T = 12.69 L/s) obtém-se o caudal de perdas (máximo), $Q_{P,max}$ = 7.53 L/s, ou seja,

$$Q_{P,\,max} = Q_T - Q_{D,min} - Q_{GC} = \\ = 12.69 - \frac{8122 \times 2}{3600} - 0.65 = 7.53 \text{ L/s} \quad [12]$$

Estando, no modelo EPANET da ZMC, a distribuição espacial do consumo doméstico próxima da real (recorreu-se ao cadastro dos clientes servidos e aos respectivos consumos anuais facturados); sendo, no período em análise (5:00 às 6:00), o seu valor global o acima estimado ($Q_{D,min}$ = 4.51 L/s, correspondente a um factor horário $f_{h_D,6}$ = 0.141); tendo os coeficientes de ponderação de perdas sido calculados com base nos dados cadastrais (número de ramais de ligação por conduta) e numa estimativa do comprimento médio dos ramais; e tendo os grandes consumos medidos sido atribuídos aos correspondentes nós do modelo, executou-se o programa de configuração dos nós emissores.

Após 3 iterações o caudal de perdas calculado com auxílio do EPANET convergiu para o valor pretendido, $Q_{P,max}$ = 7.53 L/s, para uma pressão (média ponderada) máxima da rede $\langle p_{rede,max} \rangle$ = 47.61 mca.

Com o modelo calibrado para este cenário (5:00 às 6:00) procedeu-se, por tentativa e erro, ao cálculo dos restantes 23 factores horários do consumo doméstico ($f_{h_D,i}$), arbitrando os caudais de perdas ($Q_{P,i}$), de modo a que os caudais totais aduzidos à rede igualem os medidos (Figura 3).

Na Figura 5 apresentam-se estes caudais médios horários e as componentes já mencionadas.

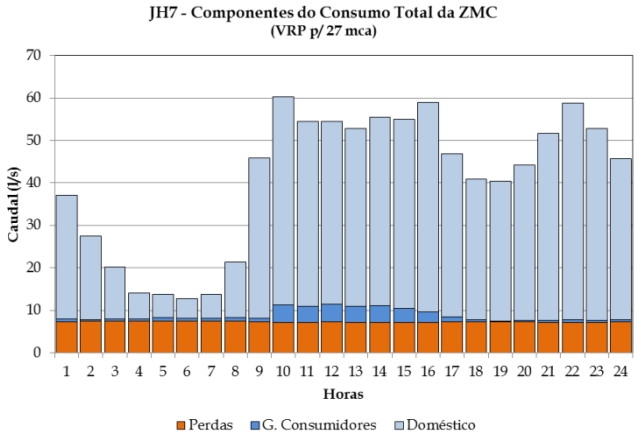

Figura 5. Componentes do consumo total da ZMC.

Uma vez determinados os caudais médios horários das perdas reais ($Q_{P,i}$, i=1,…,24), sendo conhecidos os caudais totais médios horários ($Q_{T,i}$, i=1, …,24) fornecidos à ZMC e admitindo que o dia estudado é representativo do comportamento médio anual da ZMC, é possível calcular os indicadores de desempenho WR1 e Op29 da IWA (Alegre *et al.*, 2004).

Assim, assumindo como caudal médio anual entregue à ZMC o valor de 40.79 L/s e estimado o caudal médio anual de perdas em 7.32 L/s, o indicador de *ineficiência na utilização dos recursos hídricos*, WR1, será igual a

$$\mathrm{WR1} = \frac{V_{\mathrm{perdas}}}{V_{\mathrm{entrado}}} \equiv \frac{\langle Q_{\mathrm{perdas}} \rangle}{\langle Q_{\mathrm{entrado}} \rangle} = \frac{7.32}{40.79} (\times 100\%) = 17.9\% \qquad [13]$$

Conhecidos o coeficiente de vazão de perdas unitário, c, o comprimento total ponderado das condutas da ZMC, $L_{\mathrm{pond,rede}}$, e o caudal médio anual de perdas, $\langle Q_{\mathrm{perdas}} \rangle$, obtém-se com a Eq. [6] o valor médio anual da pressão média ponderada da rede $\langle p_{\mathrm{rede,med}} \rangle$ = 46.43 mca. Com este valor e o comprimento total das condutas da ZMC, L_{rede} = 20.36 km, o caudal médio anual de perdas mínimas inevitáveis é, de acordo com Alegre *et al*. (2004),

$$\langle Q_{\mathrm{perdas,inev}} \rangle =$$

$$= \frac{(18 + 0.7 d_{\mathrm{ramais}} + 25 d_{\mathrm{ramais}} \langle L_{\mathrm{ramais}} \rangle) \langle p_{\mathrm{rede,med}} \rangle^{\beta} L_{\mathrm{rede}}}{24 \times 3600} \qquad [14]$$

$$= 1{,}71 \text{ L/s}$$

e o *índice infra-estrutural de fugas*, Op29, toma o valor de,

$$\mathrm{Op29} = \frac{\langle Q_{\mathrm{perdas}} \rangle}{\langle Q_{\mathrm{perdas,inev}} \rangle} = \frac{7.32}{1.71} = 4.3 \qquad [15]$$

Com estes indicadores conclui-se que, para uma VRP à entrada da ZMC regulada para 27 mca, as perdas reais são aproximadamente 18% do volume total de água aduzido e cerca de quatro vezes superiores às que se consideram inevitáveis nestas condições de pressão.

Para se avaliar o efeito de uma variação de pressão na perda de água basta repetir, para os mesmos consumos e com a VRP regulada para outro valor, a simulação do comportamento do modelo da rede e, de seguida, o cálculo dos indicadores de desempenho.

A título exemplificativo, para uma pressão à entrada de 21 mca, o valor do WR1 diminui para 16.1%; em contrapartida, o indicador Op29 mantém-se inalterado porque a redução de pressão diminui as perdas do modelo e as perdas mínimas inevitáveis em idênticas proporções.

5. Conclusões

A modelação das perdas reais de água é uma contribuição importante para a construção de um modelo numérico de uma rede de distribuição de água que constitua uma boa aproximação ao comportamento desta, em particular no que respeita aos caudais escoados nas condutas e às pressões a que está sujeita; é mesmo indispensável quando se pretende utilizar o modelo para o estudo (simulação) de patamares de pressão que atenuem as perdas.

A metodologia exposta tem duas vulnerabilidades importantes: a caracterização do potencial de perdas das condutas pelos respectivos coeficientes de ponderação; e a estimação do consumo mínimo nocturno dos clientes domésticos.

A caracterização do potencial de perdas das condutas pela expressão inspirada na formulação das perdas mínimas inevitáveis tem como pressuposto que a rede, do ponto de vista operacional e no que respeita às perdas de água, é gerida do modo mais eficiente possível. Não sendo essa a realidade na generalidade dos casos, recomenda-se a procura de uma melhor quantificação e arrumação espacial das perdas através, por exemplo, da sectorização da rede e da análise dos respectivos balanços hídricos.

Caso se pretenda uma estimativa mais imediata - um balanço hídrico deve ser anual –, sugere-se, por exemplo, a realização de cortes de água sectoriais nos períodos nocturnos de menor consumo para a estimação das perdas reais nas diversas zonas em que for possível dividir a rede maior em estudo. A diferença entre a diminuição observada no caudal (médio) entregue à rede, durante esse período, e a redução esperada, atendendo ao número de clientes atingidos pelo corte, corresponderá às perdas reais do sector. A estimação zonal das perdas permitirá aquilatar da eventual necessidade de uma correcção sectorial dos *cpp*'s das condutas e, se for o caso, dar o suporte quantitativo a essa correcção; mas está igualmente sujeita à incerteza da estimação do consumo nocturno.

A metodologia apresentada depende em grande medida do acerto da estimativa do consumo mínimo nocturno dos clientes domésticos da ZMC – no exemplo de aplicação, o caudal fornecido aos grandes consumidores é continuamente medido e registado. Em particular, o valor de 2 L/h/contador adoptado, embora frequentemente tido como adequado, não é mais do que uma mera estimativa.

Não sendo viável a medição contínua dos consumos domésticos de todos os clientes ou de uma amostra representativa - por razões económicas ou de outra ordem (quem já observou registos de medição contínua percebe o grau de intromissão na vida privada que acarreta…) -, dever-se-á cruzar a estimativa das perdas reais que esta metodologia produz com a que é efectuada na elaboração do balanço hídrico da rede ou ZMC.

Este procedimento é efetuado subtraindo à água não facturada as estimativas dos consumos autorizados não facturados e das perdas aparentes - e, caso se justifique, proceder à correcção da estimativa inicial do consumo mínimo nocturno. A abordagem oposta também é possível, ou seja, a utilização desta metodologia para a validação, ou afinação, da estimativa das perdas reais de água do balanço hídrico.

Referências

Alegre, H., Hirner, W.; Baptista, J.M. e Parena, R. (2004). *Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água*, Guia Técnico 01, IRAR/ERSAR.

Farley, M. e Trow, S. (2003). *Losses in Water Distribution Networks: A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control*, IWA Publishing.

Figueiredo, Manuel M. P. (2007). *Apontamentos de Sistemas de Abastecimento de Água*, FEUP/DEC/SHRHA.

Pereira, M. (2012). *Implementação e Monitorização de uma Zona de Medição e Controlo no Sistema de Abastecimento de Matosinhos*, Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente da FEUP.

Rossman, L.A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*, U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA).

Vieira, A. (2007). *MATLAB/EPANET DLL LINK - Manual de Sintaxe*, FEUP/DEC/SHRHA.