

MODELAÇÃO MATEMÁTICA PARA LOCALIZAÇÃO APROXIMADA DE FUGAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Luísa Ribeiro^{1,5}; Joaquim SOUSA^{2,5}; João MURANHO^{3,5}; Alfeu Sá MARQUES^{4,5}

RESUMO

Um dos vetores de atuação no âmbito do controlo de perdas de água em redes de distribuição de água (RDA) é a adoção de políticas de controlo ativo de perdas, as quais habitualmente incluem a realização de campanhas no terreno para localização de fugas não reportadas recorrendo a equipamentos acústicos. Porém, estas atividades exigem equipamentos e recursos humanos especializados. Além disso, a extensão das redes faz com que sejam atividades morosas e, em determinadas circunstâncias de ruído ambiente, apenas realizáveis durante a noite.

Nesta comunicação apresenta-se uma metodologia para localização aproximada de fugas de água não reportadas suportada por modelos de simulação de RDA e medições de algumas grandezas hidráulicas. A metodologia consiste em tirar proveito das medições efetuadas no período noturno, no qual os consumos domésticos são insignificantes e os não domésticos significativos podem ser monitorizados. Os resultados desta metodologia são as condutas com maior probabilidade de terem fugas e estimativas dos respetivos caudais.

A utilização desta metodologia pretende aumentar a eficiência do trabalho das equipas que realizam as inspeções acústicas, reduzindo o esforço despendido, pois, perante os resultados, podem ser conduzidas para partes específicas da RDA onde se espera que efetivamente existam fugas (pelo menos as de maior dimensão).

Palavras-chave: redes de distribuição de água, perdas de água, localização de fugas, otimização.

1 - Prof. Adjunto no Departamento de Engenharia Civil, ISEC do IPC, lurenco@isec.pt

2 - Prof. Adjunto no Departamento de Engenharia Civil, ISEC do IPC, jjoseng@isec.pt

3 - Prof. Auxiliar no Departamento de Informática, UBI, jmuranho@ubi.pt

4 - Prof. Auxiliar no Departamento de Engenharia Civil, FCT da UC, jasm@dec.uc.pt

5 - MARE - Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, FCT da Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

Um dos vetores de atuação no âmbito do controlo de perdas de água em redes de distribuição de água (RDA) é a adoção de políticas de controlo ativo de perdas, as quais habitualmente incluem a realização de campanhas no terreno para localização de fugas não reportadas recorrendo a equipamentos acústicos. Porém, estas atividades exigem equipamentos específicos e recursos humanos especializados. Acresce ainda o facto de o funcionamento destes equipamentos ser afetado pelo meio ambiente (por exemplo o material das condutas, instalações elétricas, a atenuação do sinal, o vento e o ruído do meio), o que favorece a realização das campanhas durante a noite quando tudo está mais calmo, HUNAIDI e CHU (1999). Além disso, a extensão das redes e a velocidade a que se consegue realizar a inspeção acústica faz com que sejam atividades morosas, monótonas e propiciem a perda de concentração dos operadores.

As perdas de água podem ser aparentes ou reais. As perdas reais de água representam a totalidade do volume perdido através de todas as fugas, roturas e extravasamentos. As fugas não reportadas são a parcela mais relevante das perdas reais, em particular devido à sua longa duração, já que a sua localização é desconhecida.

Vários autores investigaram a possibilidade de modelar computacionalmente as perdas reais de água. ALMANDOZ *et al.* (2005) desenvolveram uma metodologia para a análise do comportamento da RDA ao longo do dia, visando quantificar as perdas reais. GIUSTOLISI *et al.* (2008) apresentaram um modelo de simulação do comportamento hidráulico onde os consumos e os caudais das fugas eram condicionados pela pressão na rede. WU e SAGE (2006) investigaram a possibilidade de calibrar os vários parâmetros do modelo de simulação do comportamento hidráulico de uma RDA incluindo a presença de fugas. Estes autores utilizaram algoritmos genéticos para localizar as fugas e admitiram que estas se encontravam localizadas nos nós. WU *et al.* (2010) complementaram a investigação anterior sujeitando as solicitações à pressão disponível na RDA. RIBEIRO *et al.* (2015) utilizando o recozimento simulado e admitindo que as fugas se encontravam localizadas nas condutas investigaram a localização de fugas numa RDA.

A monitorização do Caudal Mínimo Noturno (CMN) é uma atividade expedita para estimar o caudal associado às fugas não reportadas. O CMN é o resultado dos consumos e das várias fugas existentes na rede, mas durante este período os consumos tendem a ser residuais e as fugas debitam um caudal próximo do valor máximo devido ao aumento da pressão em toda a RDA, LAMBERT *et al.* (1999).

Numa RDA, conhecidas as solicitações (consumos e fugas), o equilíbrio hidráulico permite estimar a pressão observada nos nós e o caudal escoado nas condutas. Mas, do ponto de vista matemático, o equilíbrio hidráulico pode ser colocado de forma inversa, isto é, conhecidas as pressões, estimar as solicitações e os caudais. Só que este problema inverso é indeterminado, PUDAR e LIGGETT (1992), pelo que se torna necessário recorrer a uma técnica de otimização para o resolver, tendo-se no presente trabalho usado o método do recozimento simulado, KIRKPATRICK, *et al.* (1983).

Com esta metodologia é possível estimar a localização aproximada das fugas, bem como os seus caudais, o que permite aumentar a eficiência do trabalho das equipas que realizam campanhas de inspeção acústica no terreno como, reduzindo o esforço despendido nesta tarefa. Esta metodologia já havia sido testada numa RDA real, praticamente sem fugas (o caudal mínimo noturno era próximo de zero), na qual foram criadas fugas artificialmente através da abertura de bocas de incêndio durante a noite, RIBEIRO (2016). Como os resultados foram encorajadores, nesta comunicação apresentam-se os resultados obtidos em outra RDA real, desta vez para localizar fugas reais.

Os resultados da metodologia identificam as partes específicas da RDA afetadas com as fugas e quantificam, de modo aproximado, o caudal associado às mesmas. Como facilmente se compreende, os resultados obtidos tendem a identificar com maior rigor as fugas com maior caudal. A realização das campanhas dirigidas para partes específicas da RDA reduz o esforço das equipas de inspeção e reduz também o tempo de utilização dos equipamentos. Como à partida há uma forte suspeita de existência de fugas, a inspeção a realizar tende a ser mais cuidadosa para confirmar e posicionar na conduta a localização precisa da fuga caso se confirme a sua existência.

O estudo de caso desta comunicação refere-se a uma RDA abastecida por um reservatório, com 150 nós de junção e 160 condutas. O comprimento das condutas totaliza cerca de 20 km. Em resultado de uma inspeção prévia realizada numa parte da RDA já eram conhecidas as localizações de 4 fugas de água, achando-se, porém, que estas apenas deveriam explicar parte do caudal mínimo noturno.

A aplicação a esta RDA da metodologia desenvolvida teve por objetivo confirmar se ela era capaz de localizar (pelo menos de forma aproximada) não só as fugas previamente conhecidas mas também outras que eventualmente existam nas partes não inspecionadas previamente.

Das duas aplicações da metodologia, os resultados obtidos foram bastante convincentes, apontando para as condutas com fugas conhecidas e outras condutas nas suas imediações, bem como a indicação de novas condutas com eventuais fugas de água. Numa das condutas identificadas e não inspecionadas previamente, numa inspeção realizada posteriormente confirmou-se a existência de outra fuga até então desconhecida.

Esta comunicação apresenta o trabalho desenvolvido, a metodologia e detalhes da implementação. Na secção seguinte apresenta-se a metodologia proposta, a qual foi aplicada em duas situações diferentes para a mesma RDA real: primeiro usando exclusivamente os dados recolhidos nas medições *in-situ* e depois complementando estes dados com informação da inspeção prévia sobre algumas fugas conhecidas. Os detalhes do estudo de caso e os resultados obtidos com o uso exclusivo dos dados recolhidos são apresentados na secção 3. Os detalhes da utilização da metodologia com informação sobre algumas fugas conhecidas, além dos dados conhecidos, são apresentados na secção 4. As conclusões mais relevantes fecham a comunicação.

2. METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE CONDUTAS COM FUGAS NÃO REPORTADAS

Nesta secção apresenta-se um resumo da metodologia proposta e utilizada para a identificação de condutas com fugas não reportadas.

A metodologia fundamenta-se numa aplicação computacional, resultante da troca de informação entre um modelo de otimização e um modelo matemático de simulação do comportamento hidráulico da RDA, associado a um bom conhecimento cadastral e a um rigoroso levantamento topográfico, RIBEIRO (2016). A procura da solução do modelo de otimização é efetuada com o método do recozimento simulado. A simulação do comportamento hidráulico da RDA é realizada em regime quase-permanente, SOUSA (2006).

Primeiro, para a utilização da metodologia é necessário efetuar uma campanha de medição de algumas grandezas hidráulicas, focada no caudal cedido pelo reservatório abastecedor e respetiva cota da superfície livre, e na monitorização das pressões de alguns nós da RDA.

Nas primeiras horas do dia os consumos domésticos e o caudal cedido pelo reservatório diminuem gradualmente e apresentam um valor mínimo. Depois estes caudais aumentam progressivamente

até a um valor máximo diário. Da campanha de medição do caudal cedido pelo reservatório é relevante a observação do período de CMN, associando-o à cota da superfície livre e à pressão nos vários nós da rede monitorizados.

A metodologia proposta tem por objetivo identificar as condutas da RDA com maior probabilidade de apresentarem fugas. Quanto maior for o caudal da fuga maior será o seu efeito na pressão da RDA. Logo, as soluções apresentadas pela metodologia tendem a modelar corretamente as condutas com maior caudal de fuga.

A função objetivo do modelo de otimização consiste na minimização da diferença entre as pressões medidas nos nós monitorizados e as pressões estimadas para esses mesmos nós, quando a localização das fugas apresenta uma dada distribuição espacial, SOUSA *et al.* (2015). A função a minimizar é a seguinte:

$$F(x) = \sum_{n=1}^{NÓs_{monitorizados}} \left| \left(\frac{p}{\gamma} \right)_n^{medida} - \left(\frac{p}{\gamma} \right)_n^{estimada} \right| \quad (1)$$

em que:

$\left(\frac{p}{\gamma} \right)_n^{medida}$ - pressão medida no nó n (m c.a.)

$\left(\frac{p}{\gamma} \right)_n^{estimada}$ - pressão estimada pelo simulador para o nó n (mc.a.)

$NÓs_{monitorizados}$ - conjunto de nós da rede com a pressão monitorizada

O método do recozimento simulado foi a ferramenta utilizada para a procura da solução deste problema. A execução deste método heurístico carece da definição de um conjunto de critérios como, por exemplo, a definição da solução inicial e da temperatura inicial, as iterações a serem efetuadas a cada temperatura (comprimento da cadeia de Markov), o espaço das soluções candidatas alternativas à solução atual, a temperatura inicial, o número de iterações efetuadas a cada temperatura, o esquema de decaimento da temperatura e o seu critério de paragem do algoritmo. Os detalhes da implementação do recozimento simulado podem ser examinados no Quadro 1.

Quadro 1 – Resumo da implementação do recozimento simulado

Critérios	Opção Definida
Solução inicial (x_0)	O caudal total das fugas é dividido em dez frações. As dez frações são atribuídas a condutas selecionadas aleatoriamente
Temperatura inicial	$Tqt_{inicial} = 0,1 * \frac{F(x_0)}{\text{Log}(0,5)}$ (2)
Estratégia de arrefecimento	Se $Pa > 80\%$ $Tqt = 0.60 * Tqt$ IA=40 Se $Pa > 50\%$ $Tqt = 0.75 * Tqt$ IA=60 Se $Pa > 20\%$ $Tqt = 0.90 * Tqt$ IA=80 Se $Pa \leq 20\%$ $Tqt = 0.95 * Tqt$ IA=100 (Pa representa a percentagem de soluções aceites a cada valor de temperatura Tqt)
Número de iterações	IA * Número de troços
Paragem	$Pa < 5\%$ e 2 temperaturas sem melhorar a solução

A metodologia foi executada com recurso a vinte testes com diferentes números aleatórios.

Para os nós monitorizados, os valores associados às pressões estimadas resultam da aplicação do modelo matemático de simulação do comportamento hidráulico da RDA, admitindo uma distribuição espacial das fugas de água.

O simulador hidráulico utiliza a formulação dos nós e aplica o método de Newton-Raphson com controlo otimizado do passo para a resolução do sistema de equações não-lineares. Para estimar as perdas de carga nas condutas recorre-se à fórmula de Hazen-Williams:

$$\Delta H_{ij} = 10.674 \cdot \frac{L_{ij} \cdot Q_{ij}^{1,852}}{C_{HW_{ij}}^{1,852} \cdot D_{ij}^{4,87}} \quad (3)$$

em que:

ΔH_{ij} - perda de carga que ocorre na conduta que liga os nós i e j (m)

L_{ij} - comprimento da conduta que liga os nós i e j (m)

Q_{ij} - caudal escoado na conduta que liga os nós i e j (m)

D_{ij} - diâmetro da conduta que liga os nós i e j (m)

$C_{HW_{ij}}$ - coeficiente de Hazen-Williams característico do material da conduta que liga os nós i e j

3. ESTUDO DE CASO – RDA REAL COM FUGAS NÃO REPORTADAS

Nesta secção apresenta-se o estudo de caso com aplicação da metodologia proposta. A RDA é abastecida por um único reservatório à cota 65.3m que apresenta, aproximadamente, um caudal mínimo de 2.2 L/s e um caudal máximo de 13.65 L/s no período em análise. Esta rede apresenta 150 nós de junção e 160 condutas. A RDA tem uma extensão total aproximadamente igual a 20 Km, com nós de junção cujas cotas topográficas variam entre 45.5 m e 3.9 m. Na Figura 1 apresenta-se o esquema da RDA bem como a localização dos quatro transdutores de pressão instalados durante a campanha de medições realizada.

Como previamente mencionado, a implementação da metodologia requer uma campanha de medição visando a caracterização detalhada do funcionamento do reservatório abastecedor e a recolha da pressão nalguns nós da rede. A caracterização do funcionamento do reservatório abrange a monitorização do caudal cedido pelo mesmo e a evolução da cota da superfície livre.

Na presente rede nem todos os nós da rede reuniam condições para a instalação de equipamento para a monitorização da pressão nas devidas condições e em segurança. Assim, nos quatro nós disponíveis foram instalados os transdutores de pressão tal como está representado na Figura 1.

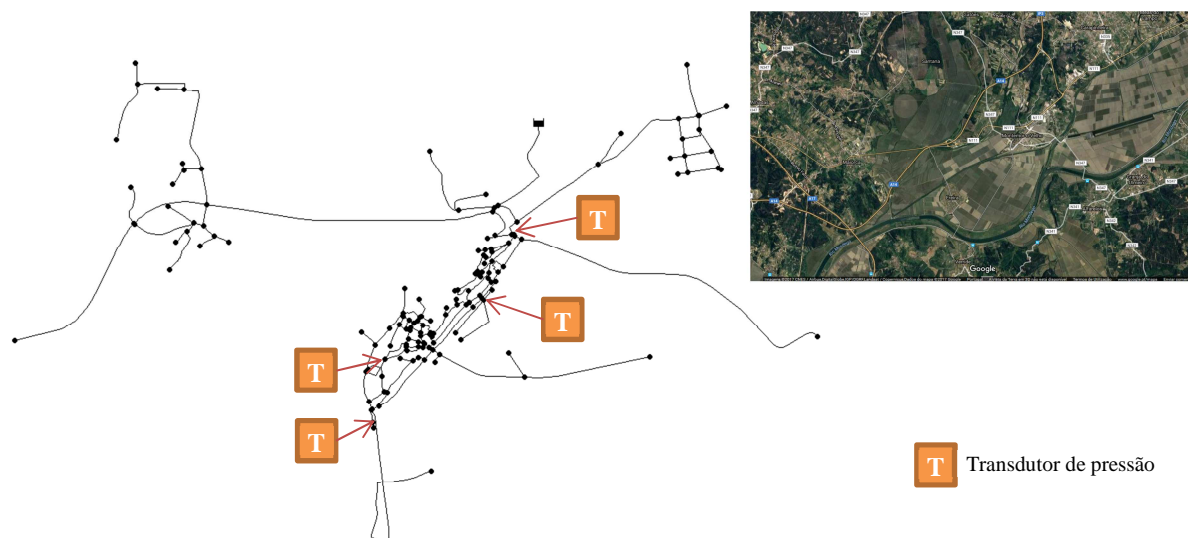


Figura 1 – Planta da RDA do estudo de caso com o posicionamento dos 4 transdutores de pressão e respetiva imagem de satélite.

Após a recolha dos dados foi necessário o respetivo tratamento para identificar o CMN e as correspondentes pressões nos nós monitorizados. Durante o período de monitorização (entre 26 e 31 de Maio), o valor do CMN oscilou entre 2.2 L/s (dia 26 de Maio às 4:30) e 3.233 L/s (dia 27 de Maio às 4:40). O menor destes valores é uma boa aproximação ao caudal total das fugas existente na RDA (Figura 2).

3.1. Primeira análise

Uma vez que é desconhecido o número de fugas existente na RDA, nesta primeira análise admitiu-se inicialmente que o caudal total de fuga poderia estar repartido em dez frações iguais, deixando-se para o algoritmo de otimização a procura pelo número efetivo de fugas e respetivos caudais.

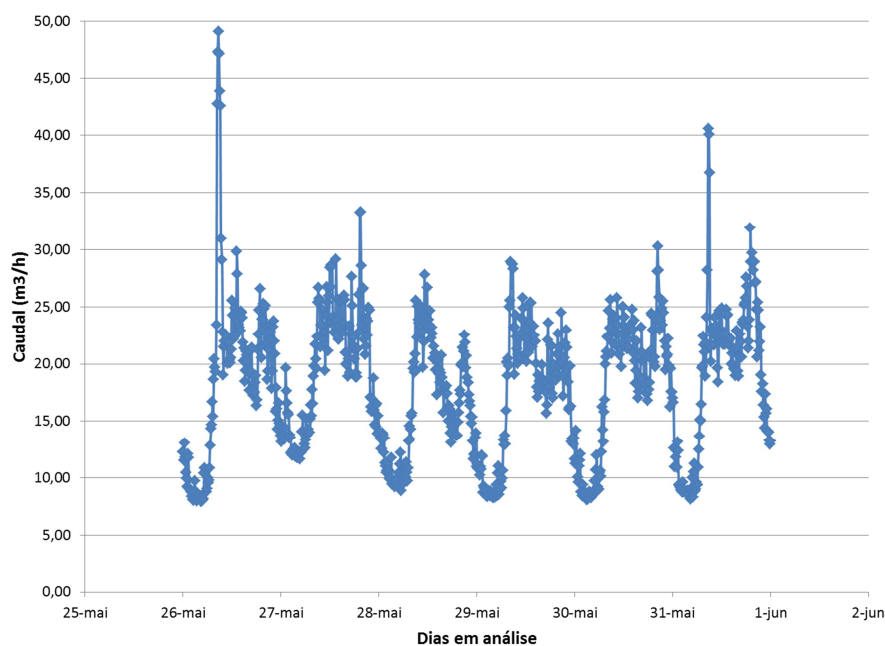


Figura 2 – Evolução das solicitações ao reservatório durante o período de monitorização.

Com base no valor mínimo observado em cada noite (26, 30 e 31 de maio) a metodologia identificou um conjunto de condutas com potenciais fugas não reportadas. Algumas condutas eram repetidamente identificadas nas três noites com elevada percentagem do caudal total de fuga. Outras condutas eram identificadas de modo mais esporádico e associadas a reduzidos caudais de fuga. Na globalidade, as soluções obtidas através da metodologia indicaram a concentração das fugas na rede numa pequena parte da uma das zonas residenciais da RDA.

Na Figura 3 está identificada com uma circunferência a zona considerada mais problemática. Esta zona corresponde a uma das zonas residenciais do aglomerado.

Na Figura 4, que representa um detalhe da Figura 3, estão identificadas as condutas identificadas como tendo fugas. As condutas identificadas na Figura 4 coincidem com condutas efetivamente com fugas ativas ou são condutas que partilham nós de junção com condutas com fugas ativas previamente identificadas (Figura 5).

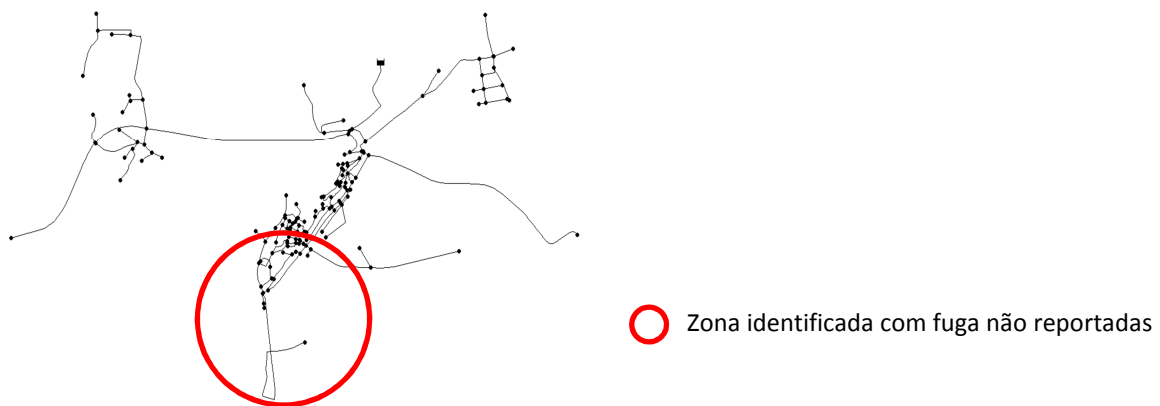


Figura 3 – Planta da RDA com identificação da zona mais problemática.

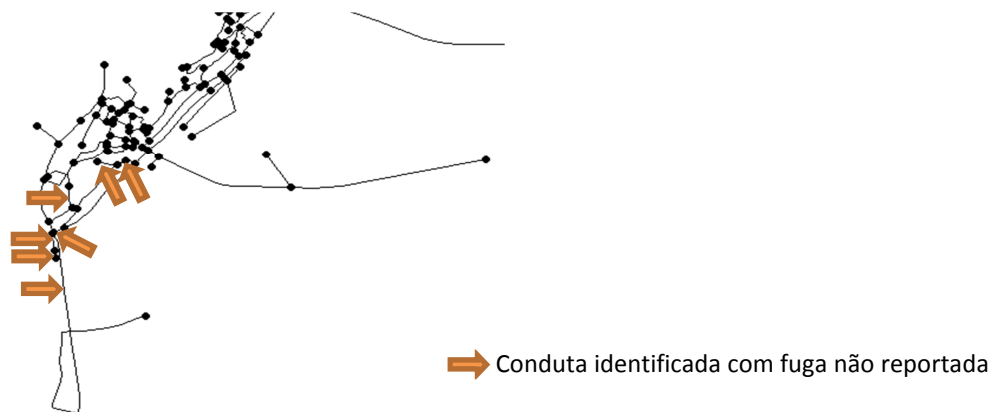


Figura 4 – Detalhe da zona mais problemática com indicação das condutas com fugas.

De facto, era do conhecimento da entidade gestora, devido a uma inspeção prévia da RDA, a existência de fugas em quatro condutas (Figura 5). Com o uso exclusivo dos dados recolhidos durante a campanha de monitorização, as condutas identificadas com a metodologia proposta coincidem com as condutas conhecidas e com registo de roturas e fugas ou estão adjacentes às mesmas. As soluções apresentadas pela metodologia complementam a caracterização destas fugas com estimativas para os caudais associados a cada uma delas.

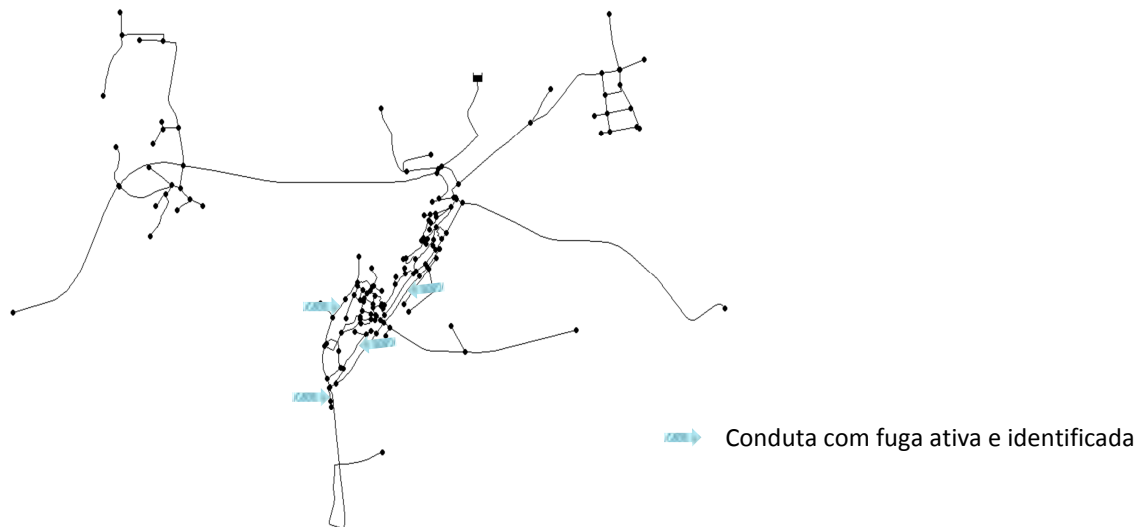


Figura 5 – Conduatas com fugas ativas e identificadas durante uma inspeção prévia à RDA.

3.2. Segunda análise

Numa segunda análise e com os mesmos dados da campanha de monitorização implementou-se a mesma metodologia. Devido à primeira análise da metodologia proposta, à confirmação *in-situ* da existência de fugas nas condutas e à aplicação dos equipamentos acústicos, existia uma estimativa para o valor do caudal de cada uma das fugas conhecidas. Contudo a soma dos caudais destas quatro fugas era muito inferior ao caudal cedido pelo reservatório no CMN do dia 27 (3.233 L/s).

Assim, assumiu-se o conhecimento da existência de quatro condutas com fugas, identificadas na inspeção acústica realizada previamente e representadas na Figura 5. Novamente, recorreu-se à metodologia para averiguar se existiriam mais fugas não reportadas na rede e respetiva posição.

Nesta segunda análise utilizaram-se as localizações e os valores estimados das fugas conhecidas (2.0 L/s) como dados para iniciar o processo de pesquisa. A metodologia proposta foi aplicada ao caudal de fuga remanescente (1.233 L/s), procurando a identificação de mais condutas com fugas não reportadas. Na Figura 6 estão identificados os resultados da aplicação da metodologia a um caudal total de fuga igual a 1.233 L/s, com a identificação das localizações das potenciais novas condutas com fugas não reportadas.

As soluções obtidas nesta segunda aplicação da metodologia indicaram somente quatro condutas com potencialidade de terem fugas. Uma das condutas identificadas já constava da solução apresentada com a primeira implementação e indicia que o valor do caudal estimado para a fuga (0.6 L/s) é inferior ao valor efetivo da mesma. Esta informação só poderá ser validada com a reparação da fuga.

Foram ainda identificadas mais três condutas com fugas. Uma delas, sendo que a conduta de ligação do reservatório ao primeiro nó de junção, é regularmente analisada e há a garantia de não ter fugas.

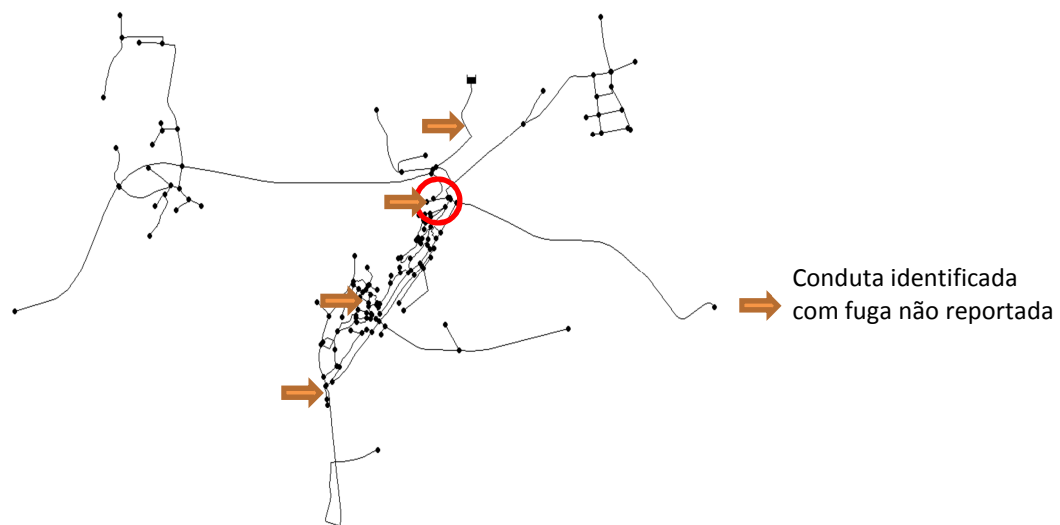


Figura 6 – Planta da RDA com indicação das novas condutas identificadas com tendo fugas não reportadas

Estes resultados, complementados com uma inspeção realizada com equipamento acústico às últimas duas condutas identificadas, permitiram confirmar a existência de uma fuga numa delas (trata-se de uma pequena conduta, com extensão de 103 m, identificada na Figura 6 dentro de uma circunferência vermelha).

4. CONCLUSÕES

Com o presente estudo de caso procurou-se ilustrar a utilidade e a eficácia da aplicação computacional desenvolvida para localizar fugas não reportadas em RDA recorrendo à análise do CMN. Primeiro, a monitorização do CMN demonstrou ser um método muito expedito na deteção de fugas na RDA. Depois, este CMN demonstrou ser uma boa aproximação ao valor do caudal total das perdas reais de água da RDA, sendo muito útil e eficaz. No período de monitorização, as várias análises ao CMN com a metodologia proposta demonstraram a potencialidade da ferramenta em identificar as zonas com as condutas com fugas não reportadas e quantificar os respetivos caudais.

As soluções obtidas demonstraram elevada robustez, não obstante o carácter estocástico do método de otimização utilizado. Tanto na primeira fase, como na segunda fase, com a inclusão de alguma informação conhecida ou estimada, a metodologia propôs soluções que demonstraram representar adequadamente a realidade e com elevada qualidade. Assim, as soluções tendem a identificar a zona de localização das fugas com estimativas para o seu caudal.

Os benefícios obtidos com a metodologia são encorajadores e os resultados foram obtidos com tempos de cálculo aceitáveis. Na primeira análise a metodologia confirmou a localização de uma das fugas ativas que tinham sido identificadas durante uma inspeção prévia à RDA. Duas das condutas identificadas como potenciais condutas com fugas eram condutas adjacentes a outras duas condutas com fugas ativas e identificadas durante a inspeção prévia.

No estudo de caso identificaram-se os caudais das fugas nas condutas corretas ou nas suas vizinhanças, o que poderá permitir orientar a pesquisa de fugas não reportadas para um reduzido número de condutas. Esta orientação permite implementar programas de controlo ativo de perdas para a pesquisa das fugas não reportadas em zonas com elevada probabilidade de existirem, onde o

volume de água perdido é elevado ou onde o tempo, o esforço e os recursos associados à utilização dos equipamentos de pesquisa de fugas são largamente recompensados.

A principal desvantagem desta metodologia é a necessidade de um modelo de simulação do comportamento hidráulico da rede, para o que é necessário possuir um bom conhecimento cadastral e uma boa cartografia da RDA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) atribuído ao MARE, através do projeto estratégico com a referência UID/MAR/04292/2013, bem como à Câmara Municipal de Montemor-o-Velho pelo apoio prestado na realização deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

ALMANDOZ, J.; CABRERA, E.JR.; CABRERA, E.; ARREGUI, F.; COBACHO, R. – “Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation.”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131, 6, 2005, pp. 458–66.

GIUSTOLISI, O.; SAVIC, D.; KAPELAN, K.. 2008. . – “Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks.”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, 5, 2008, pp. 626–35.

HUNAIDI, O.; CHU, W. – “Acoustical Characteristics of Leak Signals in Plastic Water Distribution Pipes”, *Applied Acoustics*, 58, 3, 1999, pp. 235–54.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C.; VECCHI, M. – “Optimization by Simulated Annealing”, *Science*, 220, 4598, 1983, pp. 671–80.

LAMBERT A, BROWN T., TAKIZAWA M. WEIMER D. - “A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems”, *AQUA*, 48, 6, IWA Publishing. 1999.

PUDAR, R.; LIGGETT, J. – “Leaks in Pipe Networks”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118, 7, 1992, pp. 1031–46.

RIBEIRO, L. – *Modelação Matemática Como Apoio À Localização Aproximada de Fugas Em Redes de Distribuição de Água*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Coimbra, Universidade de Coimbra, 2016.

RIBEIRO, L.; SOUSA, J.; SÁ MARQUES, A.; NE. SIMÕES. – “Locating Leaks with TrustRank Algorithm Support.”, *Water*, 7, 4, 2015, pp. 1378–1401.

SOUSA, J. – *Métodos de Apoio À Decisão Para O Dimensionamento E a Operação de Sistemas de Abastecimento de Água*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Coimbra, Universidade de Coimbra, 2006.

SOUSA, J.; RIBEIRO, L.; MURANHO, J.; SÁ MARQUES, A. – “Locating Leaks in Water Distribution Networks with Simulated Annealing and Graph Theory”, in *13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015*, 2 a 4 Setembro, Leicester, Reino Unido, 2015.

WU, Z.; SAGE, P.; TURTLE, D. – “Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136, 1, 2010, pp. 116–28.

WU, Z.; SAGE, P. – “Water Loss Detection via Genetic Algorithm Optimization-Based Model Calibration.”, in *ASCE 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis*, Ohio, Agosto 27-30, 2006