

COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS PARA A LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE ROTURAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Bruno FERREIRA¹; Nelson CARRIÇO²; Dídia COVAS³

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo a comparação de duas técnicas diferentes para a localização automática de roturas em redes de distribuição de água, baseadas em modelação hidráulica. A primeira assenta no cálculo da sensibilidade da pressão nos nós e a segunda resolve um problema de otimização para a calibração do modelo hidráulico. São gerados vários cenários de ocorrência de uma rotura recorrendo a modelação matemática, para os quais se mantem a localização da rotura e se varia a sua dimensão e o nível de ruído dos sinais de pressão e de caudal. Para cada cenário foi produzido um conjunto artificial de medições de caudal e de pressão recorrendo a simulações dinâmicas de 24h de duração no EPANET. Esta abordagem é aplicada a um caso de estudo real e os resultados são promissores dado que ambas as técnicas permitem estimar a localização aproximada e a dimensão da rotura na rede.

Palavras chave: Localização de roturas, Modelação hidráulica, Otimização.

¹ Mestre em Engenharia Civil, INCITE – Centro de Inovação em Ciência e Tecnologia, Instituto Politécnico de Setúbal, bruno.s.ferreira@estbarreiro.ips.pt

² Doutorada em Engenharia Civil, INCITE – Centro de Inovação em Ciência e Tecnologia, Instituto Politécnico de Setúbal, nelson.carrico@estbarreiro.ips.pt

³ Doutorada em Engenharia Civil, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, didia.covas@tecnico.ulisboa.pt

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações das entidades gestoras é a redução das perdas de água nas redes de distribuição. As perdas reais de água podem dar-se devido a fugas e roturas, podendo ser visíveis ou não visíveis. Geralmente, nas situações em que a ocorrência é visível, a entidade gestora tem uma abordagem reativa (i.e., intervindo simplesmente aquando da sua ocorrência). Contudo, nas situações em que a rotura ou a fuga não é visível, a entidade gestora deve ter uma abordagem proativa para a deteção e localização das mesmas.

A abordagem proativa pode ser implementada com recurso a diversas técnicas, nomeadamente, baseadas na análise de transitórios hidráulicos, em técnicas de análise de dados ou com recurso a modelos de simulação hidráulica. As técnicas baseadas em transitórios hidráulicos analisam sinais de pressão para determinar a localização da rotura (Colombo et al., 2009; Covas & Ramos, 2010; Soares et al., 2011). No entanto, estas técnicas exigem formulações matemáticas complexas do fenómeno, recorrendo a sensores de elevada frequência de aquisição de dados que, na maioria das situações, apresentam um custo elevado (Hu et al., 2021). Neste sentido, a maioria destas técnicas não pode ser utilizada em situações reais de redes de distribuição de água (Adedeji et al., 2017). Nas técnicas baseadas em análise de dados (Y. Wu & Liu, 2017), as roturas são localizadas através da aplicação de técnicas de processamento de sinal, análise estatística (Loureiro et al., 2016) e/ou classificação (Capelo et al., 2021; Zhou et al., 2019). Estas técnicas têm a vantagem de não necessitarem de um profundo conhecimento sobre o funcionamento hidráulico da rede de distribuição de água (e.g., características das tubagens ou consumos). No entanto, exigem uma grande quantidade de dados históricos de caudal e pressão, tanto sobre o comportamento base como sob o efeito de roturas (assim como certas informações sobre as próprias ordens de serviço). Devido à falta de capacidade técnica, financeira e de recursos humanos, não é muitas vezes possível gerar (através das rotinas diárias) a informação necessária de forma organizada e sistemática (Carriço et al., 2020), podendo comprometer em última instância o desempenho deste tipo de técnicas. A utilização de modelos de simulação hidráulica para a gestão operacional de redes de distribuição de água em tempo quase real está a tornar-se uma prática comum em certas entidades gestoras (Dias et al., 2014; Vieira et al., 2018). Adicionalmente, os níveis de monitorização hidráulica dos sistemas têm aumentado de forma significativa, muito devido à evolução da tecnologia dos sensores e à conseqüente redução do custo de instalação e manutenção destes equipamentos de medição. Desta forma, diversas metodologias têm sido desenvolvidas com recurso a modelos de simulação hidráulica do sistema, nomeadamente, para resolver o problema de análise inversa (Sophocleous et al., 2018; Z. Y. Wu et al., 2010), baseado nas sensibilidades do modelo (Casillas Ponce et al., 2014), ou baseado em técnicas de *model falsification* (Goulet et al., 2013; Moser et al., 2018).

O presente artigo tem como objetivo comparar os resultados obtidos por duas técnicas distintas para a localização automática de roturas em redes de distribuição de água, ambas baseadas em modelação hidráulica. A primeira técnica é baseada nos trabalhos de Casillas e Ponce et al. (2014), sendo baseada na matriz de sensibilidade das pressões nodais da rede face à existência de roturas nas diversas localizações. A localização da rotura é determinada através da minimização das diferenças entre as sensibilidades estimadas e reais. A segunda técnica é baseada na formulação de um problema de otimização (Sophocleous et al., 2019), que consiste em resolver o problema de análise inversa, ou seja, a partir de um certo número de medições do terreno (pressão e caudal), pretende-se chegar às condições hidráulicas que lhe deram origem (localização e dimensão da rotura). Estas técnicas são aplicadas a um caso de estudo real, uma rede de distribuição de água, para a qual existe modelo hidráulico calibrado que descreve o seu comportamento. São apresentadas as principais conclusões e discutidas as limitações de cada técnica.

2. MÉTODOS

2.1 Abordagem geral

A presente secção descreve as duas técnicas utilizadas para a localização de roturas na rede de distribuição de água. No presente estudo assume-se que a rotura já foi detetada, procedendo-se à sua localização através de diferentes técnicas. Assim, e uma vez detetada a rotura, são obtidos dados de pressão através de um certo número de N_p sensores de pressão instalados na rede de distribuição de água conforme:

$$\mathbf{P}^{real}(\mathbf{k}) = [P_{sensor\ 1}^{real}(k) \quad \dots \quad P_{sensor\ N_p}^{real}(k)] \quad (1)$$

em que $\mathbf{P}^{real}(\mathbf{k})$ consiste no conjunto de medições de pressão para N_p sensores e associado tempo k ; $P_{sensor\ 1}^{real}(k)$ corresponde à medição real de pressão obtida através do sensor 1 para o tempo k ; $P_{sensor\ N_p}^{real}(k)$ é a medição real de pressão obtida através do sensor N_p para o tempo k . Adicionalmente, assume-se que os dados de pressão obtidos pelos diversos sensores não têm valores anómalos, à exceção do ruído introduzido artificialmente conforme descrito nas secções seguintes.

De forma similar, são obtidos registos de caudal através de um certo número de N_q sensores de caudal instalados nas entradas da rede de distribuição de água conforme:

$$\mathbf{Q}^{real}(\mathbf{k}) = [Q_{sensor\ 1}^{real}(k) \quad \dots \quad Q_{sensor\ N_q}^{real}(k)] \quad (2)$$

em que $\mathbf{Q}^{real}(\mathbf{k})$ consiste no conjunto de medições de caudal para N_q sensores e associado tempo k ; $Q_{sensor\ 1}^{real}(k)$ corresponde à medição real de caudal obtida através do sensor 1 para o tempo k ; $Q_{sensor\ N_q}^{real}(k)$ é a medição real de caudal obtida através do sensor N_q para o tempo k . Tal como os valores de pressão, assume-se que os dados de caudal obtidos pelos diversos caudalímetros não têm valores anómalos.

Ambas as técnicas utilizam modelação hidráulica para simular roturas com diversas localizações e magnitudes. Estas roturas são modeladas com recurso à utilização de um coeficiente emissor nos nós, assumindo roturas de dimensão fixa, cujo caudal é descrito pela seguinte expressão:

$$Q = CP^\alpha \quad (3)$$

onde Q representa o caudal de rotura, C é o coeficiente emissor que representa a área do orifício de descarga, P é a pressão e α é o expoente da pressão.

De seguida apresentam-se as duas técnicas utilizadas para localização automática de roturas numa rede de distribuição de água.

2.2. Técnica baseada na sensibilidade das pressões nodais

A primeira técnica é baseada nos trabalhos de Casillas e Ponce et al. (2014). A localização das roturas é efetuada através da avaliação do efeito de roturas (com dimensão constante) em todas as localizações possíveis, e tendo em consideração o conjunto de sensores de pressão instalado na rede.

O primeiro passo consiste no cálculo do vetor dos resíduos, $R(k)$. Estes resíduos consistem na diferença entre os valores reais de pressão nos diversos sensores, $P^{real}(k)$, e a sua estimativa sem rotura obtida com recurso a simulação hidráulica, $P^{sim}(k)$. Cada elemento $r_s(k)$ do vetor $R(k)$ pode ser obtidos conforme:

$$r_s(k) = P_{sensor\ s}^{real}(k) - P_{sensor\ s}^{simul}(k) \quad (4)$$

em que r_s representa os resíduos no sensor s e no tempo k , $P_{sensor\ s}^{simul}(k)$ é a pressão no sensor s e no tempo k obtida com recurso a simulação hidráulica e sem situação de rotura. $P_{sensor\ s}^{real}(k)$ é a pressão real no sensor s e no tempo k assumindo a existência de uma rotura na rede (com localização e magnitude desconhecidas). Para um total de N_p sensores de pressão, o vetor assume a seguinte forma para o tempo k :

$$\mathbf{R}(k) = \begin{bmatrix} P_{sensor\ 1}^{real}(k) - P_{sensor\ 1}^{simul}(k) \\ \dots \\ P_{sensor\ N_s}^{real}(k) - P_{sensor\ N_s}^{simul}(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

O segundo passo consiste no cálculo da matriz de sensibilidade $S(k)$ da pressão nodal face à existência de roturas nas diversas localizações (nós) e num determinado tempo k . Estas roturas são simuladas através de um coeficiente emissor conforme apresentado na Equação (3). A matriz de sensibilidade $S(k)$ pode ser assim calculada com recurso a simulação hidráulica e ao método das diferenças finitas (de Schaezen et al., 2000). A matriz $S(k)$ tem como dimensão o $N_n \times N_s$ (i.e., número de nós \times o número de sensores). Cada elemento $S_{i,j}(k)$ diz respeito à variação de pressão no sensor j face à existência de uma rotura no nó i para o tempo k . Para um total de N_n nós e N_s sensores, a matriz $S(k)$ assume a seguinte forma:

$$\mathbf{S}(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{sensor\ 1}(k)}{\partial C_{nó\ 1}} & \dots & \frac{\partial P_{sensor\ N_s}(k)}{\partial C_{nó\ 1}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_{sensor\ 1}(k)}{\partial C_{nó\ N_n}} & \dots & \frac{\partial P_{sensor\ N_s}(k)}{\partial C_{nó\ N_n}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

em que $\frac{\partial P_{sensor\ 1}(k)}{\partial C_{nó\ 1}}$ corresponde à variação de pressão no sensor 1 para o tempo k quando considerando uma variação $\partial C_{nó\ 1}$ no valor do coeficiente emissor do nó 1.

O terceiro passo consiste no cálculo do vetor dos ângulos entre as sensibilidades teóricas e os resíduos. O ângulo α_n entre cada linha n da matriz $S(k)$ (que traduz o efeito caso a rotura se localizasse no nó n) e o vetor $R(k)$ (que traduz o efeito real da rotura em localização desconhecida) pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\alpha_n(k) = \arccos\left(\frac{R(k) \cdot S_{n,-}(k)}{|R(k)| \cdot |S_{n,-}(k)|}\right) \quad (7)$$

em que $\alpha_n(k)$ é o ângulo formado entre as sensibilidades da linha n e de todas as colunas da matriz $S(k)$, $S_{n,-}(k)$, e os resíduos $R(k)$ caso a rotura estivesse localizada no nó n e para o tempo k . Para um total de N_n nós, o vetor de ângulos $A(k)$ assume a seguinte forma:

$$\mathbf{A}(k) = [\alpha_1(k) \quad \dots \quad \alpha_{N_n}(k)] \quad (8)$$

em que $\alpha_1(k)$ é o ângulo formado pela primeira linha da matriz de sensibilidade $S(k)$ e o vetor dos resíduos $R(k)$ para o tempo k . $\alpha_{N_n}(k)$ é o ângulo formado pela última linha da matriz de sensibilidade, $S_{N_n,-}(k)$, e o vetor dos resíduos $R(k)$. As dinâmicas da rede de distribuição podem ser consideradas através do cálculo do vetor \bar{A} contendo o ângulo médio para um número T de tempos e para todas as N_n possíveis localizações. Cada elemento do vetor \bar{A} associado a um determinado nó n pode ser calculado conforme:

$$\hat{\alpha}_n = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \alpha_n(k) \quad (9)$$

Para um total de N_n nós, o vetor de ângulos \bar{A} assume a seguinte forma:

$$\bar{A} = [\hat{\alpha}_1 \quad \dots \quad \hat{\alpha}_{N_n}] \quad (10)$$

A localização da rotura pode ser determinada a partir do vetor \bar{A} como o nó n que apresenta menor ângulo $\hat{\alpha}_n$.

Por fim, a dimensão (ou magnitude) da rotura pode ser estimada com recurso ao vetor de resíduos $R(k)$ e utilizando a linha da matriz de sensibilidade $S(k)$ correspondente ao nó n identificado. Para tal, pretende-se determinar o valor do emissor coeficiente C ao qual corresponde a menor diferença entre os resíduos reais $R(k)$ e os resíduos calculados a partir das sensibilidades teóricas. Este passo pode ser resolvido com recurso ao método dos mínimos quadrados resolvendo-se o seguinte problema de otimização:

$$\min_C \sum_{k=1}^T |R(k) - S_{n,-}(k) \times C|^2 \quad (11)$$

onde $S_{n,-}$ traduz a linha n e todas as colunas da matriz de sensibilidade $S(k)$.

A magnitude da rotura pode ser estimada a partir do coeficiente C e com recurso à Equação (3).

2.3. Técnica baseada na calibração do modelo hidráulico

A segunda técnica é baseada nos trabalhos de Pudar e Liggett (1992), Sophocleous et al. (2019) e Z. Y. Wu et al. (2010) e tem como objetivo resolver o problema de análise inversa, ou seja, a partir de um certo número de medições reais de pressão e caudal sob efeito de rotura pretende-se chegar às condições hidráulicas que lhe deram origem. Pretende-se determinar a localização e o coeficiente emissor que permitem, através de simulação hidráulica, recriar as medições reais em termos de pressão e de caudal, $P^{real}(k)$ e $Q^{real}(k)$.

O primeiro passo consiste em reduzir o espaço de decisão relativo à potencial localização da rotura, eliminando da análise todos os nós que estejam associados a válvulas, bombas e reservatórios (i.e., deixam apenas de ser considerados como possíveis localizações das roturas, mantendo-se no modelo hidráulico). Desta forma, é obtido o vetor \mathbf{M} contendo os índices dos nós potenciais onde pode estar localizadas as roturas:

$$\mathbf{M} = [m_1 \quad \dots \quad m_g] \quad (12)$$

em que m_1 e m_g representam o índice do primeiro e do último nó apenas associado a condutas.

Para cada um dos nós do vetor \mathbf{M} , é calculado o valor mínimo de coeficiente emissor C a partir do qual a rotura deixa de ser sentida por qualquer um dos sensores (tendo em consideração a sensibilidade dos sensores). O processo de cálculo do valor mínimo de C para uma certa localização l pode ser realizado conforme se apresenta: (1) estimar valor de C associado a um consumo de, por exemplo, 50% do consumo total da rede; (2) associar valor de C à localização l e calcular resíduos para todos os sensores (entre a situação com e sem rotura) para os diversos tempos k ; (3) se algum resíduo for superior à sensibilidade dos sensores de pressão, deve reduzir-se o valor de C em 5% do valor original calculado em (1) e repetir a partir do passo (2), caso contrário, o valor de C foi encontrado e pode

repetir-se a análise a partir de (1) para a próxima localização de M . Desta forma, obtém-se o vetor C_{min} , contendo os valores mínimos de coeficiente emissor para cada possível localização M .

De seguida, formula-se um problema de otimização com o objetivo de resolver o problema de análise inversa. São consideradas duas variáveis de decisão: a localização da rotura (definida de forma discreta através das diversas localizações possíveis M) e a magnitude da rotura (definida através do valor do coeficiente emissor). Consideram-se dois tipos de restrições, nomeadamente, as restrições associadas às equações de sistemas hidráulicos (e garantidas pelo software de cálculo hidráulico), e um conjunto de restrições aplicadas a cada uma das variáveis de decisão. Assim, pode formular-se o seguinte problema de otimização:

$$\text{Procurar por: } X = (L_i, C_i); L_i \in M \quad (13)$$

$$\text{Minimizar: } F(X)$$

$$\text{Sujeito a: } C_{min,i} < C_i$$

$$P_i > 0$$

em que L_i e C_i traduzem, respetivamente, o índice do nó e o valor do coeficiente emissor para uma rotura na localização i , M traduz todas as localizações possíveis, $C_{min,i}$ traduz o valor mínimo de coeficiente emissor associado à localização i , e P_i traduz a pressão (após introdução da rotura) na localização i .

A função objetivo $F(X)$ é definida de forma a minimizar a soma das diferenças quadráticas entre os valores reais de pressão e caudal e os valores simulados (na localização L_i e com magnitude c_i):

$$\text{Minimizar: } F(X) = \sum_{k=1}^T \left[\sum_{s=1}^{N_p} \frac{\left(\frac{P_{sensor\ s}^{real}(k) - P_{sensor\ s}^{sim}(k)}{P_{pnt}} \right)^2}{N_s} + \sum_{q=1}^{N_q} \frac{\left(\frac{Q_{sensor\ q}^{real}(k) - Q_{sensor\ q}^{sim}(k)}{Q_{pnt}} \right)^2}{N_q} \right] \quad (14)$$

em que N_p e N_q são, respetivamente, o número de sensores de pressão e de caudal. $P_{sensor\ s}^{real}(k)$ e $P_{sensor\ s}^{sim}(k)$ são as pressões reais e simuladas (com rotura na localização L_i e magnitude c_i) no sensor s e no tempo k . De forma similar, $Q_{sensor\ q}^{real}(k)$ e $Q_{sensor\ q}^{sim}(k)$ são os valores de caudal reais e simulados no sensor q e no tempo k . P_{pnt} e Q_{pnt} são calculados com base no erros associados à medição e são utilizados na conversão de unidades de pressão e caudal para valores adimensionais. Podem ser calculados da seguinte forma:

$$P_{pnt} = P^{med} \times precisão_P \quad (15)$$

$$Q_{pnt} = Q^{med} \times precisão_Q \quad (16)$$

em que P^{med} corresponde à pressão média real observada por todos os sensores e em todos os tempos T , enquanto que Q^{med} corresponde ao caudal global médio de entrada na rede em todos os tempos T . Os parâmetros $precisão_P$ e $precisão_Q$ correspondem às percentagens de erro dos sensores de pressão e caudal, respetivamente, e são geralmente fornecidas pelo fabricante.

O resultado desta técnica é uma localização exata (índice do nó) e o valor do coeficiente emissor que traduz a magnitude da rotura.

3. APLICAÇÃO A CASO DE ESTUDO

3.1. Estudo piloto

O estudo piloto tem como objetivo testar a robustez das duas técnicas previamente apresentadas na Secção 2 para localização de roturas. São considerados diferentes cenários de ocorrência de rotura, para os quais se mantém a localização da rotura e se varia a sua dimensão e o nível de ruído dos sinais de pressão e de caudal. É gerado para cada cenário um conjunto artificial de medições de caudal e de pressão com base na simulação matemática do comportamento do sistema. Considera-se que existe um certo número de nós como localização dos sensores de pressão e à entrada da rede existe um sensor de caudal. As simulações hidráulicas foram realizadas utilizando o EPANET (Rossman, 2000) em ambiente Python com recurso à biblioteca *Water Network Tool for Resilience* (WNTR) (Klise et al., 2017). O problema de otimização da técnica baseada na calibração do modelo hidráulico foi resolvido com recurso à técnica de algoritmos genéticos (Goldberg, 1988) em ambiente *Python* e utilizando a biblioteca Pymoo (Blank & Deb, 2020).

3.2. Apresentação do caso de estudo

O caso de estudo analisado consiste numa rede de distribuição localizada na área metropolitana de Lisboa. O modelo de simulação hidráulica foi desenvolvido em EPANET, apresentando um reservatório, 1.261 nós e 967 troços de tubagem com uma extensão total de aproximadamente 36 km. Para a situação de operação normal (i.e., sem rotura), a altura piezométrica média e o caudal de entrada médio na rede são iguais a 37,5 m c.a. e 30 L/s, respetivamente. As medições artificiais de pressão são geradas em oito nós da rede (assumidos como tendo sensores de pressão). Estas localizações foram obtidas conforme apresentado em Ferreira et al. (2021) e com base na resolução de um problema de otimização multiobjectivo. Os dados de caudal são obtidos através do caudal entrado na rede a partir do reservatório. Estas medições artificiais de pressão e caudal são geradas a partir da simulação dinâmica do sistema considerando um período total de 24 horas e um passo de cálculo de uma hora, resultando em 24 valores para cada um dos nove sensores. A localização da rotura foi escolhida numa zona altamente emalhada da rede de distribuição de água e de forma a dispor de sensores de pressão tanto a jusante como a montante da rotura. A representação espacial da rede de distribuição, dos oito sensores de pressão (em triângulos verdes), do sensor de caudal (num quadrado azul) e da rotura introduzida (triângulo vermelho) é apresentada na Figura 1.

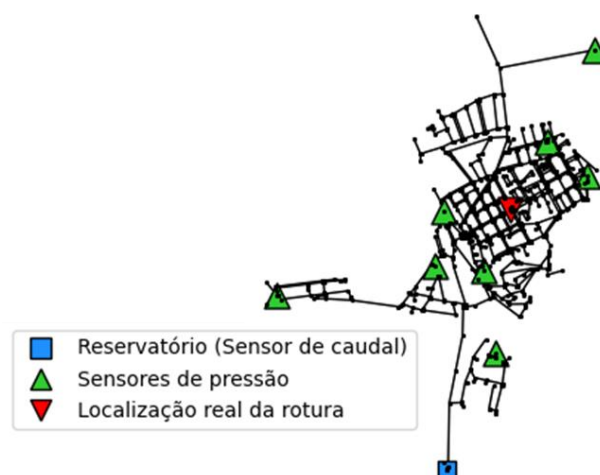


Figura 1 – Imagem ilustrativa da rede de distribuição com localização dos sensores e da rotura introduzida.

3.2. Efeito da magnitude e do nível de ruído

Para análise das duas técnicas face ao efeito da magnitude das roturas considerou-se três magnitudes possíveis de rotura, associadas a 5%, 20%, e 33% do caudal total de entrada na rede (e equivalente a 1,5 L/s, 6 L/s e 10 L/s). Para cada uma destas magnitudes de rotura considerou-se três níveis distintos de ruído associado às medições de pressão e de caudal; o ruído foi gerado considerando uma distribuição uniforme de $\pm 1\%$ e $\pm 5\%$ do valor da medição. Analisou-se também a situação de inexistência de ruído. Desta forma, são considerados um total de $3 \times 3 = 9$ cenários de rotura para a localização apresentada na Figura 1.

Na Figura 2 apresentam-se os dados de pressão e de caudal gerados artificialmente para a situação de uma rotura de magnitude média (6 L/s) e para um nível de ruído baixo (1%). Representa-se a traço contínuo a situação base (sem rotura) e em traço descontínuo a situação com rotura e ruído. É possível observar-se a redução generalizada da pressão nos diversos sensores de pressão, associada a um aumento das perdas de carga decorrentes do aumento do caudal.

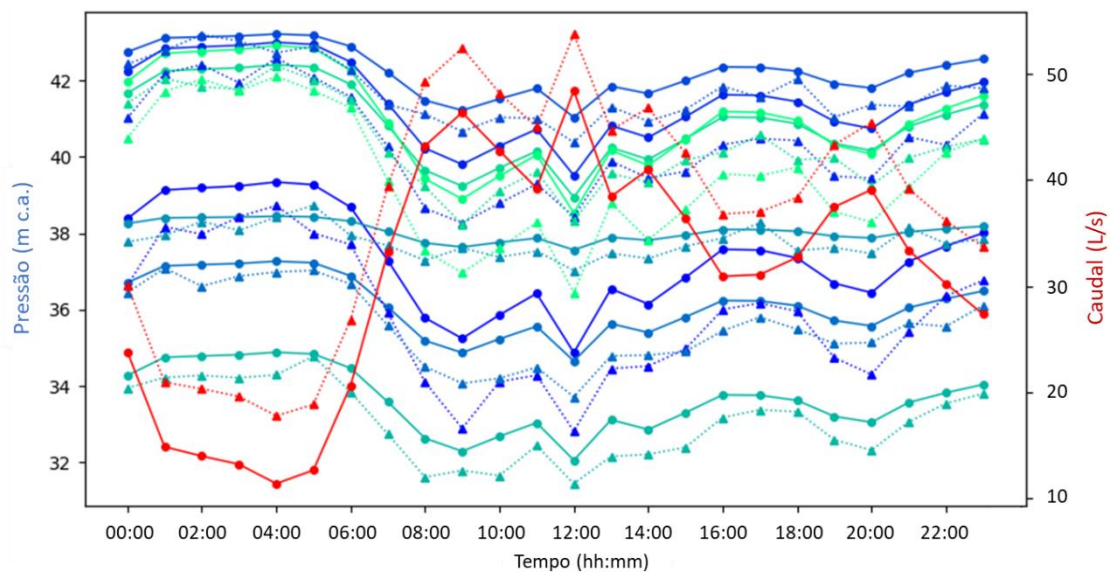


Figura 2 – Dados artificiais de pressão (a cor verde e azul) e caudal (a cor vermelha). A traço contínuo representam-se os dados para a situação base, enquanto que a traço descontínuo se representam os dados considerando a rotura e o ruído.

Para considerar a aleatoriedade do ruído introduzido e do funcionamento dos algoritmos genéticos, cada cenário foi gerado 10 vezes; a localização e magnitude da rotura foram avaliadas utilizando as duas técnicas referidas e foram calculadas a distância geográfica média e magnitude média de cada cenário (para cada técnica). Os problemas foram resolvidos utilizando um processador Intel Core i5-8250U de 1,80 GHz com 8 GB de memória; a técnica 1 demorou, em média, 300 s para encontrar a rotura enquanto que a técnica 2 demorou, em média, 1 800 s (i.e., 1 000 s associados ao processo de redução do espaço de decisão e 800 s no processo de otimização).

Na Tabela 1 apresentam-se os valores médios da magnitude e das distâncias à rotura real identificados pela técnica 1 (para os nove cenários). É possível concluir que a técnica 1 não é capaz de encontrar a localização exata da rotura, mesmo nas situações com ausência de ruído. Isto deve-se ao facto de a matriz de sensibilidade ser calculada considerando um coeficiente emissor (equivalente a uma rotura média de 3 L/s) diferente daquele utilizado para caracterizar as roturas a identificar (e que traduzem uma rotura de 1,5 L/s, 6 L/s e 10 L/s). É também possível observar que a magnitude da rotura a identificar e o nível de ruído têm uma influência direta na capacidade da técnica; roturas de maior

dimensão (10 L/s e 6 L/s) são naturalmente mais fáceis de identificar, conforme refletido nas distâncias à rotura original (e em igualdade de níveis de ruído). De forma similar, o nível de ruído tem uma grande influência na capacidade de localização, nomeadamente, na situação de nível de ruído baixo (1%) e roturas de pequena dimensão (1,5 L/s), assim como na situação de nível de ruído elevado (5%) e roturas de pequena e média magnitude (1,5 L/s e 6 L/s). A magnitude da rotura é estimada corretamente para todos os cenários, com exceção do cenário de rotura de pequena magnitude (1,5 L/s) e nível de ruído elevado (5%).

Tabela 1 – Resultados para a técnica baseada nas sensibilidades: valor médio da magnitude (em L/s) e da distância geográfica (em metros) e entre a rotura real e identificada.

Dimensão da rotura original	Distância à rotura real (magnitude da rotura encontrada)		
	0% de ruído	1% de ruído	5% de ruído
Rotura de 33% (10 L/s)	97,4 m (9,16 L/s)	108,6 m (9,21 L/s)	97,9 m (9,08 L/s)
Rotura de 20% (6 L/s)	124,4 m (5,64 L/s)	124,4 m (5,62 L/s)	194,5 m (5,60 L/s)
Rotura de 5% (1,5 L/s)	124,0 m (1,28 L/s)	218,2 m (1,26 L/s)	659,4 m (0,89 L/s)

Na Tabela 2 apresentam-se os valores médios da magnitude e das distâncias à rotura real identificados pela técnica 2. Esta técnica, e ao contrário da técnica 1, tem a capacidade de identificar corretamente a localização e a magnitude da rotura. No entanto, esta capacidade é significativamente influenciada pelo nível de ruído e pela magnitude da rotura a identificar; note-se que, sem ruído, as roturas de média e grande magnitude são corretamente identificadas. A rotura de pequena dimensão (5%), no entanto, não é corretamente identificada (sendo a distância de 52,5 m inferior aos 124 m encontrados pela técnica 1). Para níveis de ruído baixo (1%) e alto (5%) observa-se um aumento da distância à rotura real, transversal a todas as dimensões da rotura. No entanto, note-se que as localizações obtidas pela técnica 2 (e em igualdade de magnitude e de nível de ruído) apresentam menores distâncias à rotura real face aquelas obtidas utilizando a técnica 1. Relativamente à magnitude da rotura, esta é corretamente identificada para todos os cenários considerados.

Tabela 2 – Resultados para a técnica baseada na calibração do modelo: valor médio da magnitude (em L/s) e da distância geográfica (em metros) e entre a rotura real e identificada.

Dimensão da rotura original	Distância à rotura real (magnitude da rotura encontrada)		
	0% de ruído	1% de ruído	5% de ruído
Rotura de 33% (10 L/s)	0 m (10,04 L/s)	32,3 m (10,07 L/s)	81,1 m (10,20 L/s)
Rotura de 20% (6 L/s)	0 m (6,03 L/s)	66,9 m (6,05 L/s)	200,2 m (6,26 L/s)
Rotura de 5% (1,5 L/s)	52,5 m (1,54 L/s)	143,3 m (1,54 L/s)	498,1 m (1,54 L/s)

Na Figura 3(a) apresenta-se a localização espacial da rotura identificada pela técnica 1 (a laranja) e pela técnica 2 (a roxo) para o cenário de uma rotura de média magnitude (6 L/s) e nível de ruído baixo (1%). Na Figura 3(b) apresentam-se as localizações para a situação mais desfavorável para localização de roturas, isto é, o cenário de rotura de pequena magnitude (1,5 L/s) e nível de ruído elevado (5%). Note-se que as distâncias na Figura 3 (a) correspondem a 124,4 m e 66,9 m, respetivamente, para a técnica 1 (a laranja) e técnica 2 (a roxo). Na Figura 3(b), estas distâncias correspondem respetivamente a 659,4 m e 498,1 m. Atendendo à dimensão da rede, considera-se que: distâncias até aproximadamente 80 m correspondem à localização da rotura (ao nível do arruamento); distâncias até cerca de 200 m correspondem uma localização aproximada da rotura (ao nível da zona da rede); e para distâncias superiores considera-se que a rotura não foi localizada. Desta forma, pode concluir-se que ambas as técnicas apresentam um bom desempenho em termos de identificação da zona da rede onde a rotura

deve estar localizada (com exceção do cenário de nível de ruído alto e magnitude da rotura baixa). A técnica 2 destaca-se por apresentar resultados ligeiramente superiores aos obtidos pela técnica 1, e por identificar corretamente a magnitude da rotura em todos os cenários. Este último ponto prende-se com o facto de utilizar dados de pressão e caudal, enquanto que na técnica 1 apenas utiliza dados de pressão. Assim, e apesar do nível de complexidade mais elevado, recomenda-se a utilização da técnica 2.

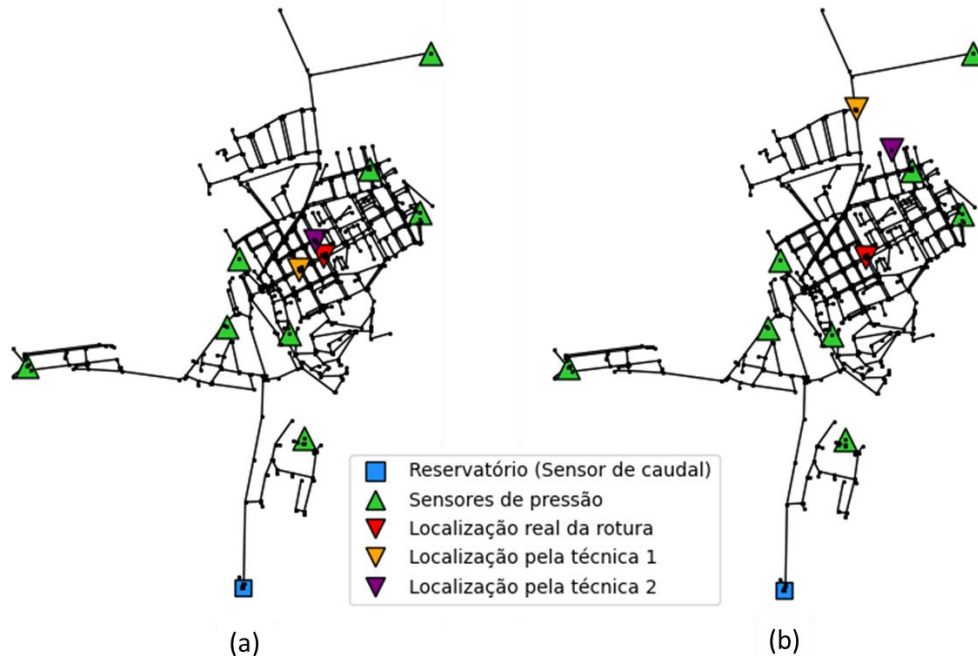


Figura 3 – Localização da rotura identificada por cada uma das técnicas para o cenário de:
(a) rotura de média magnitude (6 L/s) e nível de ruído baixo (1%);
(b) rotura de pequena magnitude (1,5 L/s) e nível de ruído alto (5%).

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Na presente comunicação apresentou-se a aplicação de duas técnicas distintas baseadas em simulação hidráulica para a localização automática de roturas em redes de distribuição de água. O estudo piloto incluiu diferentes cenários de rotura, para uma mesma localização, mas com magnitudes e níveis de ruído diferentes. Foi artificialmente gerado um conjunto artificial de medições de caudal e de pressão para cada cenário através da simulação dinâmica do comportamento hidráulico da rede utilizando o EPANET. Os resultados obtidos mostram que a técnica baseada nas sensibilidades (com um nível de complexidade e tempo de cálculo mais reduzido) apresenta resultados satisfatórios, permitindo a obtenção da magnitude e localização aproximada da rotura (ao nível da zona da rede) para todos os cenários analisados, à exceção dos de roturas de pequena magnitude com um nível de ruído elevado. Por outro lado, a técnica baseada na calibração do modelo hidráulico (que apresenta um nível de complexidade e tempo de cálculo mais elevado) apresenta resultados promissores, permitindo a determinação correta da magnitude e da localização da rotura (ao nível do arruamento) num grande número de cenários (sendo que nos restantes cenários a rotura é localizada ao nível da zona da rede). No entanto, também esta técnica falha em localizar as roturas no cenário de rotura de pequena magnitude e considerando um nível de ruído elevado. Isto prende-se com o facto de que roturas de pequena dimensão provocarem variações de pressão equivalentes, ou mesmo inferiores, ao nível de ruído introduzido; por outras palavras, as variações de pressão tornam-se indistinguíveis do ruído. Assim, esta comunicação demonstra que a adoção de uma abordagem ativa para a localização de roturas ou fugas não visíveis é essencial para garantir um ponto de partida adequado para a localização exata no terreno e a reparação das roturas. No entanto, a adoção destas técnicas exige um modelo hidráulico da rede de distribuição calibrado, assim como um conjunto de sensores de pressão em

número suficiente e instalados em nós da rede cuidadosamente selecionados. Este conjunto de sensores permite adquirir dados e produzir informação útil para, de forma periódica, se possa calibrar o modelo hidráulico e, perante a ocorrência de uma rotura, se apliquem técnicas avançadas de localização de roturas como as apresentadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento da investigação através do projeto WISDom (referência n.º DSAIPA/DS/0089/2018) e da bolsa de doutoramento do Bruno Ferreira (referência n.º SFRH/BD/149392/2019).

BIBLIOGRAFIA

- Adedeji, K. B., Hamam, Y., Abe, B. T., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017). Towards Achieving a Reliable Leakage Detection and Localization Algorithm for Application in Water Piping Networks: An Overview. *IEEE Access*, 5, 20272–20285. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2752802>
- Blank, J., & Deb, K. (2020). Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python. *IEEE Access*, 8, 89497–89509. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990567>
- Capelo, M., Brentan, B., Monteiro, L., & Covas, D. (2021). Near-real time burst location and sizing in water distribution systems using artificial neural networks. *Water (Switzerland)*, 13(13), 1–23. <https://doi.org/10.3390/w13131841>
- Carriço, N., Ferreira, B., Barreira, R., Antunes, A., Grueau, C., Mendes, A., Covas, D., Monteiro, L., Santos, J., & Brito, I. S. (2020). Data integration for infrastructure asset management in small to medium-sized water utilities. *Water Science and Technology*, 82(12), 2737–2744. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.377>
- Casillas Ponce, M. V., Garza Castañón, L. E., & Cayuela, V. P. (2014). Model-based leak detection and location in water distribution networks considering an extended-horizon analysis of pressure sensitivities. *Journal of Hydroinformatics*, 16(3), 649–670. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.019>
- Colombo, A. F., Lee, P., & Karney, B. W. (2009). A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2(4), 212–227. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2009.02.003>
- Covas, D., & Ramos, H. (2010). Case Studies of Leak Detection and Location in Water Pipe Systems by Inverse Transient Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 248–257. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2010\)136:2\(248\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:2(248))
- de Schaetzen, W. B. ., Walters, G. ., & Savic, D. . (2000). Optimal sampling design for model calibration using shortest path, genetic and entropy algorithms. *Urban Water*, 2(2), 141–152. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00052-2](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00052-2)
- Dias, N., Ferreira, N., & Donnelly, A. (2014). Integration of Modelling and Monitoring to Optimize Network Control: Two Case Studies from Lisbon. *Procedia Engineering*, 70, 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.061>
- Ferreira, B., Carriço, N., & Covas, D. (2021). Optimal Number of Pressure Sensors for Real-Time Monitoring of Distribution Networks by Using the Hypervolume Indicator. *Water*, 13(16), 2235. <https://doi.org/10.3390/w13162235>
- Goldberg, D. (1988). Genetic algorithms in optimization, search and machine learning. In *Addison Wesley*.
- Goulet, J.-A., Coutu, S., & Smith, I. F. C. (2013). Model falsification diagnosis and sensor placement for leak detection in pressurized pipe networks. *Advanced Engineering Informatics*, 27(2), 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2013.01.001>
- Hu, Z., Chen, B., Chen, W., Tan, D., & Shen, D. (2021). Review of model-based and data-driven

- approaches for leak detection and location in water distribution systems. *Water Supply*, 1–25. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.101>
- Klise, K. A., Bynum, M., Moriarty, D., & Murray, R. (2017). A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study. *Environmental Modelling & Software*, 95, 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.022>
- Loureiro, D., Amado, C., Martins, A., Vitorino, D., Mamade, A., & Coelho, S. T. (2016). Water distribution systems flow monitoring and anomalous event detection: A practical approach. *Urban Water Journal*, 13(3), 242–252. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.988733>
- Moser, G., Paal, S. G., & Smith, I. F. C. (2018). Leak Detection of Water Supply Networks Using Error-Domain Model Falsification. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 32(2), 04017077. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000729](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000729)
- Pudar, R. S., & Liggett, J. A. (1992). Leaks in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(7), 1031–1046. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:7\(1031\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:7(1031))
- Rossman, L. (2000). *EPANET 2 user's manual* (Issue September). United States Environmental Protection Agency.
- Soares, A. K., Covas, D. I. C., & Reis, L. F. R. (2011). Leak detection by inverse transient analysis in an experimental PVC pipe system. *Journal of Hydroinformatics*, 13(2), 153–166. <https://doi.org/10.2166/hydro.2010.012>
- Sophocleous, S., Savić, D., & Kapelan, Z. (2018). Leak Localization in a Real Water Distribution Network Based on Search-Space Reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(7), 04019024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001079](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001079)
- Sophocleous, S., Savić, D., & Kapelan, Z. (2019). Leak Localization in a Real Water Distribution Network Based on Search-Space Reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(7), 04019024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001079](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001079)
- Vieira, P., Costa, F., Cunha, R., Marques, R., & Fernandes, M. (2018). Plataforma tecnológica do ciclo urbano de água. Da conceção à concretização. *18.º ENASB/18.º SILUBESA, Porto, 2018*.
- Wu, Y., & Liu, S. (2017). A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems. *Urban Water Journal*. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1279191>
- Wu, Z. Y., Sage, P., & Turtle, D. (2010). Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1), 116–128. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2010\)136:1\(116\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:1(116))
- Zhou, X., Tang, Z., Xu, W., Meng, F., Chu, X., Xin, K., & Fu, G. (2019). Deep learning identifies accurate burst locations in water distribution networks. *Water Research*, 166, 115058. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115058>