



DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Débora Alves^{*1, 2}, Joaquim Blesa^{1,3} e Eric Duviella²

¹Supervision, Safety and Automatic Control Research Center (CS2AC) of the Universitat Politècnica de Catalunya, Terrassa, Spain

²Informatics and Automatics Department, IMT Lille Douai, Lille, France

³Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (CSIC-UPC), Barcelona, Spain

Resumo - A detecção de vazamento em redes de distribuição de água é de suma importância para a manutenção do sistema garantido um melhor funcionamento e economia de água. Esse artigo aborda a proposta de um método de detecção de vazamento baseado na análise de demanda de água. É utilizados dados históricos sem vazamentos para obter os valores mínimos, máximos e e distribuições estatísticas de diferenças (erros) entre o fluxo de demanda. O método proposto se beneficia das bases de sensor fusion para desenvolver uma análise capaz de analisar o fluxo em todas as horas do dia, não apenas durante a noite. É utilizado uma janela de tempo móvel para aumentar a precisão do método. O método é avaliado com dados reais de Distrito de Medição e Controle (DMC) de Barcelona e dados simulados de uma rede hipotética que apresenta a singularidade de 89% do sistema possuir AMRs (Automatic meter reading).

Palavras-Chave- Análise de fluxo, Distrito de Medição e Controle, Detecção de vazamento.

DETECTION OF LEAKS IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS

Abstract - Leak detection in water distribution networks is of paramount importance for the maintenance of the system, guaranteeing a better functioning and water saving. This article presents the proposal for a leak detection method based on water demand analysis. Historical data without leaks is used to obtain the minimum, maximum and statistical distributions of differences (errors) between the demand flow. The proposed method takes advantage of the fusion sensor bases to develop an analysis capable of analyzing the flow at all hours of the day, not just at night. A moving time window is used to increase the accuracy of the method. The method is evaluated with real data from Barcelona's District Metered Areas (DMAs) and simulated data from a hypothetical network that presents the uniqueness of 89% of the system to have AMRs (Automatic meter reading).

Keywords - Water Distribution Networks, Flow Analysis, Leak Detection.

*adeboracris@gmail.com

I. INTRODUÇÃO

O bom gerenciamento de distribuição de água é de extrema importância para a sociedade. A recomendação da WHO [4] é que a população deve ter acesso ao fornecimento da água tratada de forma ampla e irrestrita, englobando parte do serviço de saneamento básico, no intuito de prover qualidade de vida por meio da promoção à saúde. Entretanto pesquisas recentes [6] indicam que em 2025 pode ocorrer a escassez de água que afetará metade da população mundial, que não terão acesso seguro e acessível à água para suas necessidades básicas.

Em face a esse cenário o recurso hídrico assume papel prioritário, um dos aspectos observados são as perdas de água no setor de saneamento, que pode ocorrer em todo o processo operacionais do sistema de abastecimento de água. No entanto, na prática, essa infra-estrutura não tem um desempenho satisfatório e pode ter uma perda estimada de água denominada Non-Revenue Water (NRW) de até 70% em algumas cidades, segundo o Fórum [10] de Networks of Intelligent Water. Já no Brasil, de acordo com [7], o índice de perdas nacional na distribuição de água de aproximadamente 38,3%.

Como é de se esperar, o estudo de localização de vazamento não é um assunto novo na literatura, possuindo um vasto número de pesquisas propostas nas últimas duas décadas [2]. Entre os vários métodos propostos as companhias de água tem uma preferência para os métodos baseados em coleta de dados. Geralmente as redes de distribuição de água são equipadas com sensores de vazão e pressão no nó de entrada da rede. A vazão de água possui um comportamento periódico tendo maior vazão nos horários de pico, de manhã e à noite, e tendo a demanda mínima de madrugada, entre 2 AM a 4 AM, possuindo uma variação pequena no fluxo durante vários dias. Essa característica é a base das abordagens de detecção de vazamentos de Fluxo Mínimo Noturno (Minimum Night Flow-MNF) [5] que analisa a variação do MNF ao longo dos dias.

Neste artigo, apresentamos uma metodologia para detecção de vazamentos em DMC baseada na análise das demandas de água. Não só é considerado o fluxo de entrada durante a noite, mas em outras horas, quando a demanda de água pode ser prevista com precisão razoável.

II. MÉTODO

A previsão de demanda em DCM está fora do escopo deste artigo, mas assume-se que um método de previsão de demanda é calibrado utilizando dados históricos dos DMCs[3] está disponível, ele fornecerá uma boa aproximação do fluxo de entrada atual $y(k)$ no instante k :

$$y(k) = \hat{y}(k) + e(k) \quad (1)$$

Onde:

- $y(k)$ - Previsão da demanda.
- $\hat{y}(k)$ - Modelo de estimação da demanda.
- $e(k)$ - Erro.

onde $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ expressando o tempo discreto correspondente ao tempo $0, T_s, 2T_s, 3T_s, \dots$, sendo T_s o tempo de amostragem do modelo de previsão de demanda, considera-se que o $(e(k))$ é considerado ajustado para distribuição normal (Gaussian) [8], lembrando que a demanda de entrada é mais precisa em alguns períodos dos dias, portanto uma variação periódica no tempo T será considerada:

$$e(k) \sim N(0, \sigma_T^2) \quad \text{with} \quad \sigma_T^2 = \sigma^2(k+T) = \sigma^2(k) \quad (2)$$

Onde:

- σ^2 - Variância.
- T - Variação periódica no tempo .

A equação (3) representa quando à presença de vazamento no sistema:

$$y(k) = \hat{y}(k) + e(k) + l(k) \quad (3)$$

Onde:

- $l(k) > 0$ - magnitude do vazamento.

portanto, uma aproximação do tamanho do vazamento $\hat{l}(k)$ pode ser dada pela diferença entre o fluxo de entrada real e o estimado, com um erro de estimativa de vazamento igual ao erro de previsão de demanda.

$$\hat{l}(k) = y(k) - \hat{y}(k) = l(k) + e(k) \quad (4)$$

É possível gerar diferentes estimativas de vazamento usando uma janela de tempo, W , levando em consideração o valor do fluxo de entrada atual e os valores anteriores usando as seguintes equações:

$$\begin{aligned} \hat{l}(k) &= y(k) - \hat{y}(k) \\ \dots \\ \hat{l}(k-W+1) &= y(k-W+1) - \hat{y}(k-W+1) \end{aligned} \quad (5)$$

Observe que as estimativas de vazamento $\hat{l}(k-i)$ $i = 0, \dots, W-1$ têm erros gaussianos de média zero com variância $\sigma^2(k-i)$. Considerando a variação lenta de vazamento na janela de tempo W , podemos reescrever a equação (5) pela seguinte equação:

$$l(k) \approx \bar{l}(k) = \sum_{i=0}^{W-1} \frac{l(k-i)}{W} \quad (6)$$

uma estimativa de vazamento média $\hat{l}(k)$ pode ser calculada no instante k aplicando o método de estimativa de máxima verossimilhança (maximum-likelihood estimation) à distribuição de probabilidade conjunta das estimativas W fundidas em $\bar{l}(k)$. Esta função de distribuição de probabilidade conjunta será denotada como $p(\hat{l}(k), \dots, \hat{l}(k-W+1) | \bar{l}(k), \sigma_W^2)$ e pode ser expresso como:

$$p(\hat{l}(k), \dots, \hat{l}(k-W+1) | \bar{l}(k), \sigma_W^2) = \prod_{i=0}^{W-1} \frac{1}{\sigma(k-i)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\hat{l}(k-i) - \bar{l}(k))^2}{2\sigma^2(k-i)}} \quad (7)$$

Onde:

- σ_W^2 - Variância da fusão do valor $\bar{l}(k)$.

A função de verossimilhança L é definida como o logaritmo de $p(\hat{l}(k), \dots, \hat{l}(k-W+1) | \bar{l}(k), \sigma_W^2)$, dado por:

$$L(\hat{l}(k), \dots, \hat{l}(k-W+1) | \bar{l}(k), \sigma_W^2) = -\frac{W}{2} \log(2\pi) - W \sum_{i=0}^{W-1} \log \sigma(k-i) - \sum_{i=0}^{W-1} \frac{(\hat{l}(k-i) - \bar{l}(k))^2}{2\sigma^2(k-i)} \quad (8)$$

Maximizando o valor $L(\hat{l}_1, \hat{l}_2, \dots, \hat{l}_W | \bar{l}(k), \sigma_W^2)$, e igualando a equação da derivada de $p(\hat{l}_1, \hat{l}_2, \dots, \hat{l}_W | \bar{l}(k), \sigma_W^2)$ em relação a $\bar{l}(k)$, obtém a estimativa de magnitude de vazamento fundida $\hat{\bar{l}}(k)$:

$$\hat{\bar{l}}(k) = \frac{\sum_{i=0}^{W-1} \frac{\hat{l}(k-i)}{\sigma^2(k-i)}}{\sum_{i=0}^{W-1} \frac{1}{\sigma^2(k-i)}} \quad (9)$$

que apresenta um erro de estimativa de média zero:

$$e_w(k) = \bar{l}(k) - \hat{\bar{l}}(k) \quad (10)$$

com a variância:

$$\hat{\sigma}_W^2 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{W-1} \frac{1}{\sigma^2(k-i)}} \quad (11)$$

Em um cenário sem vazamento, $\hat{\bar{l}}(k)$ terá valores diferentes de zero devido a erros de estimativa de demanda, e em um cenário de vazamento seu valor aumentará. Assim, o problema de detecção de vazamento pode ser formulado como um problema de detecção de estado, que pode ser resolvido por meio do cálculo de um limite Δ_W que determinará o valor de $\hat{\bar{l}}(k)$ acima do qual podemos assumir que um vazamento está presente no sistema. Este limite pode ser calculado aplicando a Equação (9) aos dados históricos sem vazamento, considerando que o pior cenário Δ_W será igual ao valor máximo de $\hat{\bar{l}}(k)$ calculado para todos os dados históricos sem vazamento.

Dado Δ_W , a fim de reduzir o número de falsos alarmes, um valor n_d pode ser estipulado, que será o número de estimativas de vazamento em seqüência maiores do que o limite necessário para acionar a detecção de vazamento que pode ser calculada por:

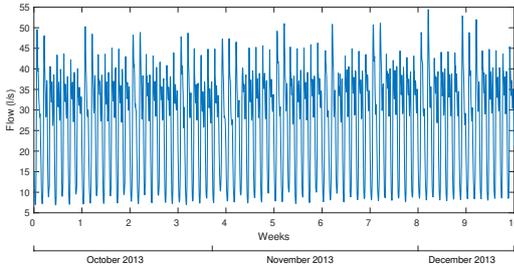
$$\begin{cases} \hat{l}(k-i) > \Delta_W & \Rightarrow \text{Leak} \\ \text{Otherwise} & \Rightarrow \text{No Leak} \end{cases}, \quad \forall i=1, \dots, n_d \quad (12)$$

III. ESTUDO DE CASO

Foram utilizados duas demandas de água diferentes para o estudo de caso. A primeira demanda estudada é um rede de distribuição de água real de Barcelona, onde foram fornecidos três meses de dados de demanda sem vazamento do ano de 2013 [Figura 1]. O segundo estudo de caso de uma rede hipotética criada para a Battle of the Leakage Detection and Isolation Methods 2020 (BattLeDIM) [1] onde será analisado somente uma sub-rede do sistema que possui a particularidade de possuir o sistema de leitura automática de medidores (Automatic meter reading - AMR) em 87% dos nós.

A. Rede - Barcelona

Figura 1: Curva de magnetização em função do campo aplicado.



Para a primeira análise de detecção de vazamentos, diferentes cenários de vazamentos foram criados considerando constante o tamanho dos vazamentos. Em todas as análises, o tempo de amostra, T_s , é de uma hora, e o período T é igual a 24 (1 dia). A demanda prevista foi considerada apenas a periodicidade da demanda extraída dos dados históricos para construir uma estimativa da demanda atual de água, conforme proposto em [9]. Assim, dado um conjunto de dados históricos de fluxo de entrada sem vazamentos de N_{day} dias de amostragem em $T_s = 1$ hora, o modelo de previsão de demanda consistirá em 24 valores (recursos) \hat{y}_h com $h = 1, \dots, 24$ organizado pelo primeiro recurso igual à previsão de demanda à 1:00h da manhã, e o recurso 24º igual a 0:00h (meia noite). Esses valores são calculados a partir de dados históricos da seguinte maneira:

$$\hat{y}_h = \frac{1}{N_{day}} \sum_{d=0}^{N_{day}-1} y(h + 24d_{ay}) \quad h = 1, \dots, 24 \quad (13)$$

Onde:

N_{day} - Conjunto de dados históricos sem vazamento.

Para a análise do desempenho do método de detecção de vazamento foi criado dados artificiais considerando a variação de demanda observada, com 26 dias, e introduzindo diferentes tamanhos de vazamentos, que começa no 14º dia e pode-se iniciar em diferentes instantes de tempos. Para esta análise, os seguintes parâmetros foram considerados:

- Taxa Positiva Verdadeira (True Positive Rate – TPR), é a proporção de resultados corretamente classificados como positivo.
- Taxa de Falsos Positivos (False Positive Rate – FPR) é a porcentagem de dados sem vazamento que acionou o método de detecção de vazamento.
- Diferença no tempo de detecção (Difference Time Detection - DTD) é o tempo (em horas) desde o aparecimento do vazamento até a detecção do vazamento para diferentes magnitudes de vazamento.

A análise de performance levou em conta o aspecto n_d sendo divididos em: $n_d = 1$ [Tabela 1 e 2] e $n_d = 3$ [Tabela 3 e 4]. Além do mais, para cada cenário utilizou-se o valor de $i = 4$ considerando somente as horas referente a 1:00h a 4:00h da manhã, que representa as horas do Fluxo Mínimo Noturno, conforme já mencionado, este estudo é utilizado com mais frequência para detecção de vazamentos, pois, neste horário do dia, apresenta o menor consumo de água e, conseqüentemente, a menor variância, e o valor de $i = 24$ utilizando todos os recursos disponíveis.

- Considerando $n_d = 1$

Tabela 1: Para $i = 4$

Leak magnitude (l/s)	FPR= 0.009	
	TPR (%)	DTD(hour)
0.5	17.7	162.872
1	90.3	111.374
1.5	100	36.888
2	100	18.998

Tabela 2: Para $i = 24$

Leak magnitude (l/s)	FPR= 0.004	
	TPR (%)	DTD(hour)
0.5	36.4	154.212
1	99.5	52.608
1.5	100	18.997
2	100	14.599

- Considerando $n_d = 3$

Tabela 3: Para $i = 4$

Leak magnitude (l/s)	FPR= 0.005	
	TPR (%)	DTD(hour)
0.5	8.70	160.332
1	78.3	125.795
1.5	100	44.439
2	100	21.243

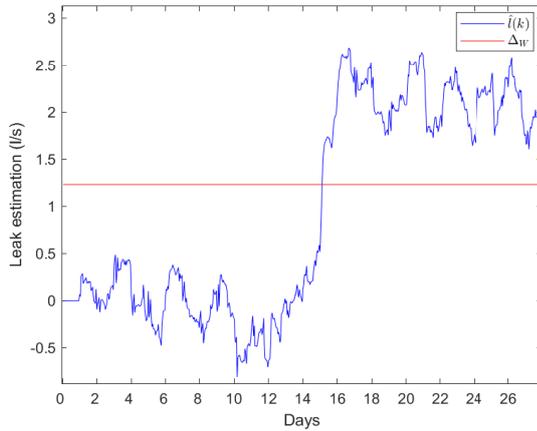
Tabela 4: Para $i = 24$

Leak magnitude (l/s)	FPR= 0.001	
	TPR (%)	DTD(hour)
0.5	21.6	162.781
1	99.5	69.084
1.5	100	21.904
2	100	16.640

Com a análise de n_d , nota-se um pequeno aumento no tempo de detecção ao usar n_d igual a 3 porque mais dados são necessárias para ativar a detecção. Por outro lado, o número de FPR é significativamente menor, podendo chegar a mais de 50% de redução quando i for igual a 4. Para esta rede, pode-se notar que já é possível detectar vazamentos com tamanho de $0,5l/s$, mas com um pequeno TPR. Além disso, possui um TPR de 100% quando o tamanho do vazamento é maior ou igual a $1,5l/s$.

A Figura 2 representa um cenário de análise de erro para a estimação de vazamento com a magnitude de vazamento de $2l/s$ utilizando 24 recursos.

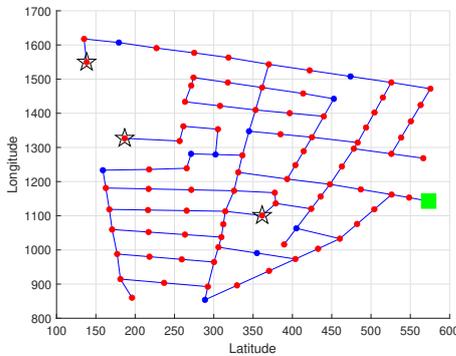
Figura 2: Curva de magnetização em função do campo aplicado.



B. Rede utilizando AMR- hipotética

A tecnologia AMR integrado com a rede de distribuição de água garante uma precisão maior quando comparado a redes que não utilizam. Isso acontece pois com os AMR podemos saber a quantidade exata de demanda de água que cada nó do sistema utilizou em um certo período de tempo e assim gerar uma previsão da demanda mais próxima a realidade. A Figura 3 representa a rede de distribuição de água com 92 nós possuindo 82 nós com AMR.

Figura 3: Rede de distribuição de água



Os dados medidos estão disponíveis a cada 10 minutos, mas foram filtrados a cada hora para obter uma previsão de demanda por hora ($T_s = 1$ hora). Usando a primeira semana de vazão de entrada e as medições dos AMRs, uma constante K

foi criada, sendo o valor percentual entre as vazões medidas e a vazões total. A seguinte equação mostra a previsão de demanda para esta área:

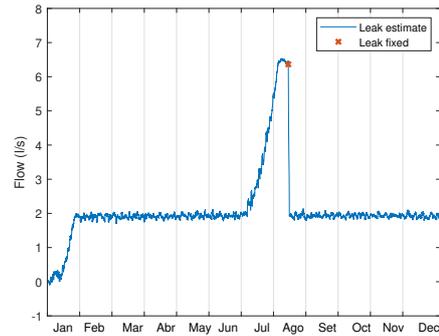
$$\hat{y}(k) = K \sum_{n=1}^{n_m} AMR_n(k) \quad (14)$$

Onde:

- K - Constante do percentual entre as vazões.
- n_m - Total de AMR instalados no sistema.
- AMR_n - São as medições de fluxo dos AMR $n = 1, \dots, n_m$

Dois vazamentos foram adicionados na rede, o primeiro no mês de janeiro e o segundo no mês de julho, somente o ultimo vazamento foi reparado. O método de detecção de vazamento foi aplicado considerando $T_s = 1$ h, e $W = 24$. A Figura 4 mostra o resultado obtido aplicando o método proposto. O limite estimado Δ_W foi calculado, porem como o sistema apresenta um vazamento no começo do ano que não foi reparado, optou-se por não demonstrar na figura, pois deve-se adicionar o valor estimado da magnitude do vazamento ao Δ_W .

Figura 4: Analisar o fluxo de entrada



Analisando a Figura 4 os vazamentos foram identificados corretamente, com o primeiro vazamento possuindo uma magnitude de $2l/s$ e o segundo com o ápice de $4l/s$. Nota-se ao utilizar AMR's os erros produzidos serão menor.

IV. CONCLUSÕES

O presente artigo visa apresentar uma proposta de detecção de vazamento baseado na análise das demandas de água no DMC, considerando o fluxo de entrada durante todas as horas do dia. Considerando que o erro possa ser filtrado em uma distribuição normal, utilizando-se a base de sensor fusion para fundir n valores da estimação do vazamento e assim diminuir a quantidade de incertezas. O método foi testado em um DMC real de Barcelona sendo analisado as taxa positiva verdadeira, taxa negativa verdadeira, diferença de tempo de detecção e a taxa de falsos positivos obtendo bons resultados, especialmente quando aplicado o numero n_p para a prevenção de falsos alarmes. O segundo estudo de caso foi com um sistema hidráulico hipotético onde 89% dos nodes tinha Automated Metered Readings instalados permitindo uma leitura mais precisa das demandas hídricas, o resultado foi satisfatório sendo localizado os dois vazamentos no decorrer do ano. O método se apresenta funcional para diferentes sistema sendo

necessário um estudo prévio do modelo de previsão e dados históricos sem vazamentos consistentes para uma boa detecção de vazamento .

REFERENCES

- [1] *2nd International CCWI (Computing and Control for the Water Industry) / WDSA (Water Distribution Systems Analysis)*. 2020. URL: <http://www.ccwi-wdsa2020.com/index.html> (acesso em 17/09/2020).
- [2] TK Chan, Cheng Siong Chin e Xionghu Zhong. “Review of current technologies and proposed intelligent methodologies for water distributed network leakage detection”. Em: *IEEE Access* 6 (2018), pp. 78846–78867.
- [3] Emmanuel A Donkor et al. “Urban water demand forecasting: review of methods and models”. Em: *Journal of Water Resources Planning and Management* 140.2 (2014), pp. 146–159.
- [4] Fourth Edition. “Guidelines for drinking-water quality”. Em: *WHO chronicle* 38.4 (2011), pp. 104–8.
- [5] Vicente J Garcia, Enrique Cabrera e Enrique Cabrera Jr. “The minimum night flow method revisited”. Em: *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*. 2008, pp. 1–18.
- [6] Simon N Gosling e Nigel W Arnell. “A global assessment of the impact of climate change on water scarcity”. Em: *Climatic Change* 134.3 (2016), pp. 371–385.
- [7] Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). *Ministerio do Desenvolvimento Regional publica diagnosticos da situacao do saneamento no Brasil*. <http://www.snis.gov.br>.
- [8] Obaid Malik. “Probabilistic leak detection and quantification using multi-output Gaussian processes”. Tese de dout. University of Southampton, 2016.
- [9] Harrison E Mutikanga, Saroj K Sharma e Kalanithy Vairavamoorthy. “Methods and tools for managing losses in water distribution systems”. Em: *Journal of Water Resources Planning and Management* 139.2 (2013), pp. 166–174.
- [10] SWAN. *Stated NRW (Non-Revenue Water) Rates in Urban Networks. Technical report, Smart Water Networks Forum*. 2011.