

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

USO DE DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA E TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL NA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Daniel Bezerra Barros¹; David Damacena Olimpio¹, Gustavo Meirelles² & Bruno Brentan²

Abstract: Efficient management of Water Distribution Networks is essential for reducing losses and ensuring supply quality. Given the limitations of traditional methods based on hydraulic variables such as pressure and flow, this study proposes a leak detection methodology grounded in the analysis of water quality time series, using convolutional autoencoders and graph theory. Applied to the Modena network, the approach involved simulations of leak events and chlorination failures, assessing their impacts on residual chlorine concentrations. The results showed that, although water quality data required a longer response time compared to pressure data, they provided broader coverage in leak detection and higher sensitivity to chlorination failures. The integration of these variables, combined with machine learning techniques, contributes to strengthening operational management, promoting safer and more sustainable water supply systems.

Resumo: A gestão eficiente das Redes de Distribuição de Água é fundamental para reduzir perdas e assegurar a qualidade no abastecimento. Diante das limitações dos métodos tradicionais, baseados em variáveis hidráulicas como pressão e vazão, este estudo propõe uma metodologia de detecção de vazamentos fundamentada na análise de séries temporais de qualidade da água, utilizando autoencoders convolucionais e teoria dos grafos. Aplicada à rede de Modena, a abordagem considerou simulações de vazamentos e falhas de cloração, avaliando os impactos nas concentrações de cloro residual. Os resultados mostraram que, embora os dados de qualidade apresentem maior tempo de resposta em comparação aos dados de pressão, oferecem maior cobertura na detecção de vazamentos e elevada sensibilidade a falhas de cloração. A integração dessas variáveis, aliada a técnicas de aprendizado de máquina, contribui para o fortalecimento da gestão operacional, promovendo sistemas de abastecimento mais seguros e sustentáveis.

Palavras-Chave – Redes de distribuição de água, detecção de vazamentos, Autoencoders convolucionais

INTRODUÇÃO

A gestão eficiente dos recursos hídricos é um dos pilares para a sustentabilidade das sociedades contemporâneas. No âmbito dos sistemas de abastecimento de água, as Redes de Distribuição de Água (RDA) apresentam um desafio crítico: o controle das perdas. Essas perdas não apenas geram desperdício de água tratada, mas também acarretam elevados impactos financeiros e ambientais. A expressiva variação nas taxas de perdas ao redor do mundo reflete a complexidade do problema. Países como Holanda, Alemanha e Dinamarca apresentam perdas inferiores a 10%, enquanto França, Bélgica, Polônia, Brasil e Itália registram índices superiores a 20%, chegando a 60% em casos extremos como o da Bulgária (Ociepa-Kubicka et al., 2024; Brasil, 2024). Tais perdas elevam os

1) Afiliação: Universidade Federal do Tocantins (UFT)

2) Afiliação: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

custos operacionais, comprometem a qualidade da água e aumentam os riscos de escassez e contaminação.

Além do desperdício, os vazamentos comprometem a integridade dos sistemas de abastecimento, favorecendo a intrusão de contaminantes externos e microrganismos patogênicos em razão da redução de pressão (Kulat e Gupta, 2018), o que gera riscos expressivos à saúde pública. Alterações nas dinâmicas de transporte de parâmetros de qualidade ao longo das tubulações reduzem a eficácia da desinfecção e ampliam a vulnerabilidade da infraestrutura urbana (Biswas et al., 2016).

Tradicionalmente, a detecção de vazamentos em RDA baseia-se em variáveis hidráulicas, como pressão e vazão. No entanto, a complexidade das interações operacionais e estruturais demanda abordagens mais robustas, capazes de integrar múltiplas fontes de dados e técnicas avançadas de análise. A alocação estratégica de sensores, tema amplamente discutido na literatura, emprega métodos como matrizes de sensibilidade, algoritmos de otimização e análise de redes complexas (Cardoso et al., 2018), buscando maximizar a cobertura da rede e a sensibilidade à identificação de falhas.

Nos últimos anos, autores têm explorado técnicas estatísticas e de aprendizado de máquina para aprimorar os processos de detecção. Tornyeviadzi e Seidu (2023) propuseram uma arquitetura de autoencoder convolucional para séries temporais multivariadas, enquanto Rabieian e Qaderi (2024) combinaram a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) com o algoritmo IWO para otimizar o posicionamento de sensores. Apesar da alta acurácia, tais métodos apresentam elevado custo computacional, principalmente devido à necessidade de múltiplas simulações hidráulicas.

Neste cenário, a incorporação de parâmetros de qualidade da água surge como um complemento promissor aos métodos tradicionais. Indicadores como turbidez, cloro residual, pH e condutividade elétrica podem sinalizar anomalias relacionadas a intrusão de contaminantes ou a alterações nas dinâmicas de escoamento (Onyutha e Kwio-Tamale, 2024). Barros et al. (2023a) demonstraram, por meio de simulações no EPANET e WNTR, que a idade da água e as concentrações de cloro são significativamente afetadas por vazamentos, utilizando teoria dos grafos para mapear os caminhos hidráulicos entre os reservatórios e os sensores.

Diante desse panorama, este estudo propõe uma metodologia baseada em autoencoders convolucionais para detecção de vazamentos a partir de dados de qualidade da água. A proposta busca superar as limitações dos métodos convencionais, ao integrar diferentes fontes de dados e técnicas de análise, promovendo maior eficiência operacional, redução de perdas e segurança na prestação dos serviços de abastecimento, em direção a uma gestão hídrica mais inteligente e sustentável.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo fundamenta-se na utilização de uma base de dados composta por parâmetros hidráulicos e de qualidade da água monitorados ao longo da rede. Essa base de dados constitui a referência para detecção e de vazamentos, além de possibilitar uma avaliação precisa dos resultados obtidos. A partir desses dados, é possível identificar com exatidão os instantes de início e término dos eventos de vazamento, permitindo uma análise detalhada dos impactos no sistema. Para tanto, será empregado o método de simulação proposto por Barros et al. (2023b), o qual estima as vazões associadas aos vazamentos por meio da equação do orifício e das pressões nodais simuladas. O método gera padrões específicos de demanda para cada nó afetado, integrando-os ao modelo hidráulico, o que possibilita uma simulação completa do comportamento da rede por meio do EPANET e do pacote WNTR. Tal abordagem é particularmente relevante, uma vez que a análise abrange não apenas variáveis hidráulicas, mas também parâmetros de qualidade da água, com ênfase na concentração de cloro residual livre.

Construção da base de dados

O presente estudo adota o processo de simulação hidráulica apresentado por Barros et al. (2023b), que utiliza o software EPANET, por meio da biblioteca WNTR, para modelar e analisar vazamentos artificiais em uma rede de distribuição de água. O objetivo é compreender o impacto das perdas de água sobre a pressão e a demanda ao longo do tempo, considerando diferentes cenários de severidade e progressão dos vazamentos.

O processo de simulação da qualidade da água é composto por duas etapas principais. Na primeira etapa, simulam-se as reações químicas entre múltiplos parâmetros presentes na rede, modelando os processos naturais de transformação da qualidade da água ao longo do tempo. Na segunda etapa, avaliam-se cenários de falhas de cloração em diferentes pontos da simulação. A inclusão desta segunda etapa é fundamental para ampliar o escopo do estudo, permitindo que o sistema de detecção e localização identifique não apenas vazamentos, mas também distinga diferentes tipos de falhas operacionais.

Na primeira etapa, os parâmetros de qualidade da água adotados são aqueles descritos por Schwartz et al. (2014), que detalham os processos químicos envolvidos na degradação do cloro em sistemas de abastecimento. O EPANET-MSX permite a modelagem desses fenômenos por meio de equações diferenciais que descrevem a cinética da decomposição do cloro ao longo do tempo. No estudo de Schwartz et al. (2014), a degradação do cloro foi modelada com base no comportamento de primeira ordem, no qual a taxa de decaimento é diretamente proporcional à concentração inicial de cloro. Matematicamente, esse comportamento é descrito pela equação diferencial:

$$\frac{d[Cl_2]}{dt} = -k_b[Cl_2]$$

Essa expressão representa que a taxa de variação da concentração de cloro livre (Cl_2) ao longo do tempo (t) é proporcional à sua própria concentração, com um fator de proporcionalidade negativo k_b , que indica a constante de decaimento. Tal modelagem reflete um fenômeno amplamente documentado em redes de distribuição: o cloro livre reage continuamente com compostos dissolvidos na água, reduzindo sua concentração à medida que percorre as tubulações.

Contudo, a degradação do cloro não ocorre de forma uniforme em toda a rede. Diversos fatores influenciam essa dinâmica, incluindo a velocidade da água, a turbulência do escoamento, a temperatura do fluido e a presença de biofilmes ao longo das tubulações, que podem acelerar o consumo do desinfetante. No estudo de Schwartz et al. (2014), a modelagem do cloro foi integrada à simulação hidráulica, permitindo uma avaliação detalhada de como o transporte da água influencia a distribuição espacial e temporal do cloro na rede.

Para capturar essas interações, o EPANET-MSX foi configurado para simular múltiplos cenários, variando-se as condições de demanda e as concentrações iniciais de cloro nas fontes de abastecimento. Essa abordagem permite prever zonas críticas dentro da rede, nas quais a degradação do cloro pode atingir níveis preocupantes, comprometendo a eficiência da desinfecção e aumentando o risco de contaminação microbiológica. Assim, além de apoiar a detecção e localização de vazamentos, esse modelo fornece subsídios valiosos para o planejamento operacional, possibilitando ajustes na dosagem de cloro e a definição de estratégias para a manutenção da qualidade da água distribuída.

A concentração de cloro adotada nas simulações foi baseada no trabalho de Cardoso et al. (2018), que propôs valores alinhados às normas regulatórias brasileiras. As condições estimadas incluem um teor de sólidos totais dissolvidos (STD) de 1000 mg/L, temperatura de 298 K, pH de 7,3 e alcalinidade de 260 mg/L expressa como $CaCO_3$. Conforme estabelece a Portaria nº 2.914 do

Ministério da Saúde do Brasil, a concentração de cloro residual livre na água distribuída deve ser mantida com um mínimo de 0,2 mg/L e não deve ultrapassar 2 mg/L.

Falha de cloração

Com o intuito de ampliar a representatividade do processo de simulação hidráulica e da qualidade da água, foram incorporadas, de forma controlada, falhas intencionais de cloração. Essas falhas foram introduzidas considerando quatro dimensões principais: duração da falha, momento de ocorrência na simulação, local de manifestação e concentração de cloro aplicada. As durações das falhas variaram entre 3 e 24 horas, distribuídas ao longo de diferentes dias durante o período simulado, a fim de abranger uma gama de cenários operacionais.

Quanto à concentração de cloro, as falhas foram modeladas como desvios no processo de dosagem química, considerando dois intervalos específicos de variação. O primeiro corresponde à subdosagem, na qual a concentração de cloro adicionada (Cl_h) é reduzida por um fator multiplicativo entre 0 e 0,5. O segundo intervalo refere-se à superdosagem, com o fator variando entre 1,5 e 2. Esses intervalos foram definidos com base em parâmetros técnicos e normativos, visando simular condições reais de operação que possam comprometer a eficácia do processo de desinfecção. Essa abordagem de modelagem permite avaliar os impactos das falhas operacionais na qualidade da água, contribuindo para a identificação de pontos críticos na rede e subsidiando o desenvolvimento de medidas corretivas e preventivas.

A base de dados gerada, contendo informações hidráulicas e de qualidade da água, é utilizada para validar os métodos de detecção e localização dos vazamentos simulados, bem como das falhas de cloração introduzidas. Dessa forma, o instante de início, a duração, a localização e a intensidade de cada evento são conhecidas, permitindo que os métodos propostos sejam avaliados com base em sua precisão temporal — ou seja, o tempo decorrido após a ocorrência — e sua proximidade espacial em relação ao local real da falha.

Abordagem de detecção

O método proposto para detecção de anomalias em dados monitorados baseia-se em uma abordagem integrada que combina técnicas de teoria dos grafos com aprendizado de máquina, especificamente o uso de autoencoders, para identificar padrões anômalos em séries temporais (Tornyeviadzi e Seidu, 2023). Para esse fim, os dados monitorados são estruturados em uma matriz X , em que cada coluna representa um sensor (ou ponto de monitoramento) e cada linha corresponde a uma observação temporal. A partir dessa matriz, constrói-se um grafo G , no qual os vértices representam os sensores e as arestas denotam as relações entre eles. Para definir essas relações, calcula-se uma matriz de distâncias D por meio da função *utils.distanz*, que quantifica as dissimilaridades entre os pares de sensores com base em suas respectivas séries temporais. A matriz D é quadrada e simétrica, refletindo as distâncias entre todos os pares de vértices, sendo posteriormente normalizada para garantir que os valores estejam em uma escala comparável, mitigando possíveis vieses decorrentes de diferenças nas magnitudes dos dados.

Em seguida, aplica-se um limiar à matriz de distâncias normalizada para filtrar conexões fracas. Especificamente, os valores de distância que excedem três vezes a média das distâncias são substituídos por um valor próximo de zero (0,0001), indicando que tais conexões são desconsideradas. Esta etapa é fundamental para concentrar a análise nas relações mais significativas entre os sensores, em consonância com abordagens propostas em estudos anteriores, nas quais a remoção de vínculos fracos visa simplificar a estrutura do grafo sem comprometer sua representatividade.

A matriz de distâncias filtrada é então convertida em um grafo G utilizando a biblioteca NetworkX. Nesse grafo, cada vértice corresponde a um sensor, e as arestas são ponderadas pelas distâncias calculadas, representando a intensidade das relações entre os sensores. Uma vez construído o grafo, aplica-se o algoritmo PageRank para calcular a centralidade de cada vértice (Page, 1999). O PageRank é uma métrica de centralidade que avalia a importância de um vértice não apenas com base no número de conexões que possui, mas também considerando a relevância dos vértices aos quais está conectado. Essa métrica é particularmente útil para identificar nós influentes na rede que podem desempenhar um papel central na propagação de informações ou anomalias.

O valor do PageRank é calculado para cada vértice, sendo o valor máximo armazenado e utilizado na etapa de detecção. A detecção de anomalias é realizada por meio de uma rede neural autoencoder, uma arquitetura de aprendizado não supervisionado que aprende a reconstruir os dados de entrada após comprimi-los em um espaço latente de menor dimensão. Neste estudo, o espaço latente foi definido com três dimensões, permitindo ao autoencoder capturar as características mais relevantes dos dados em uma representação tridimensional.

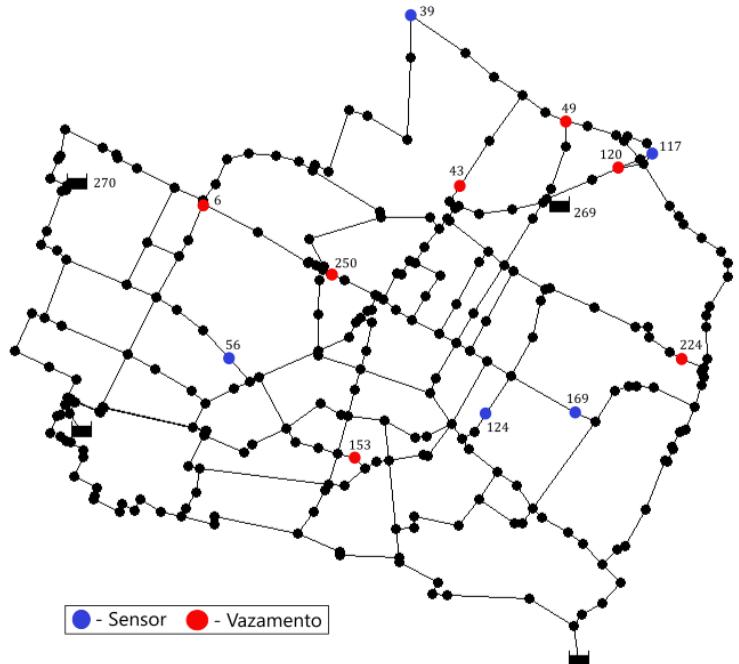
Os dados normalizados são utilizados para treinar o autoencoder, que é configurado com uma função de perda baseada no erro quadrático médio e otimizado utilizando o algoritmo Adam. Após o treinamento, o autoencoder é empregado para reconstruir os dados de entrada (Zhang et al., 2025). O erro de reconstrução é calculado como a diferença média absoluta entre os dados originais e os reconstruídos, fornecendo uma medida da capacidade do modelo em reproduzir a informação de entrada. Define-se um limiar para identificação de anomalias, classificando como anômalos os valores de erro de reconstrução que excedem o percentil 96,5. Tal limiar foi escolhido de modo a assegurar que apenas as maiores discrepâncias sejam sinalizadas, minimizando a ocorrência de falsos positivos.

APLICAÇÃO E RESULTADOS

A metodologia apresentada para a detecção e localização de vazamentos por meio do monitoramento de dados de qualidade da água foi aplicada à rede de distribuição de água de Modena, originalmente introduzida por Bragalli et al. (2012). A rede de Modena, baseada em uma cidade italiana, é composta por 4 reservatórios, 268 nós de demanda e 317 tubulações (Fig. 1). As simulações de vazamentos nessa rede foram realizadas nos estudos de Barros et al. (2023a) e Barros et al. (2023b). Os pontos de monitoramento utilizados nas simulações foram propostos por Mankad et al. (2022) e estão expostos na Figura 1.

O método de simulação foi empregado no presente estudo utilizando as mesmas localizações, vazões e durações de vazamentos adotadas em trabalhos anteriores. O processo de simulação abrangeu um período de 960 horas (40 dias) e foi conduzido utilizando o pacote WNTR, seguindo a metodologia descrita por Barros et al. (2023b). Os vazamentos foram simulados mediante a adição de uma vazão de fuga à demanda nodal, determinada por meio da equação do orifício. Assim, a Tabela 1 apresenta os nós onde as vazões de vazamento foram inseridas, o dia de início, a duração de cada evento e a vazão máxima registrada.

Figura 1 – Topologia da rede de água de Modena, com destaque para os nós com sensores e vazamentos



O conhecimento prévio das localizações, dos tempos de início e término, bem como das vazões máximas dos vazamentos, permite a avaliação da metodologia proposta para detecção de vazamentos. As anomalias detectadas serão associadas às suas prováveis localizações de origem, possibilitando a determinação do tempo decorrido entre o início do vazamento e sua detecção. Além disso, será possível calcular a distância entre o ponto de detecção do vazamento e a sua localização real.

Tabela 1 – Informação dos vazamentos

Nó	Dia de início	Duração (h)	Vazão máxima(L/s)
250	8	29	6
120	10	60	2
224	12	70	3
43	18	100	6
49	27	22	7
6	34	20	2
153	36	Sem fim	2

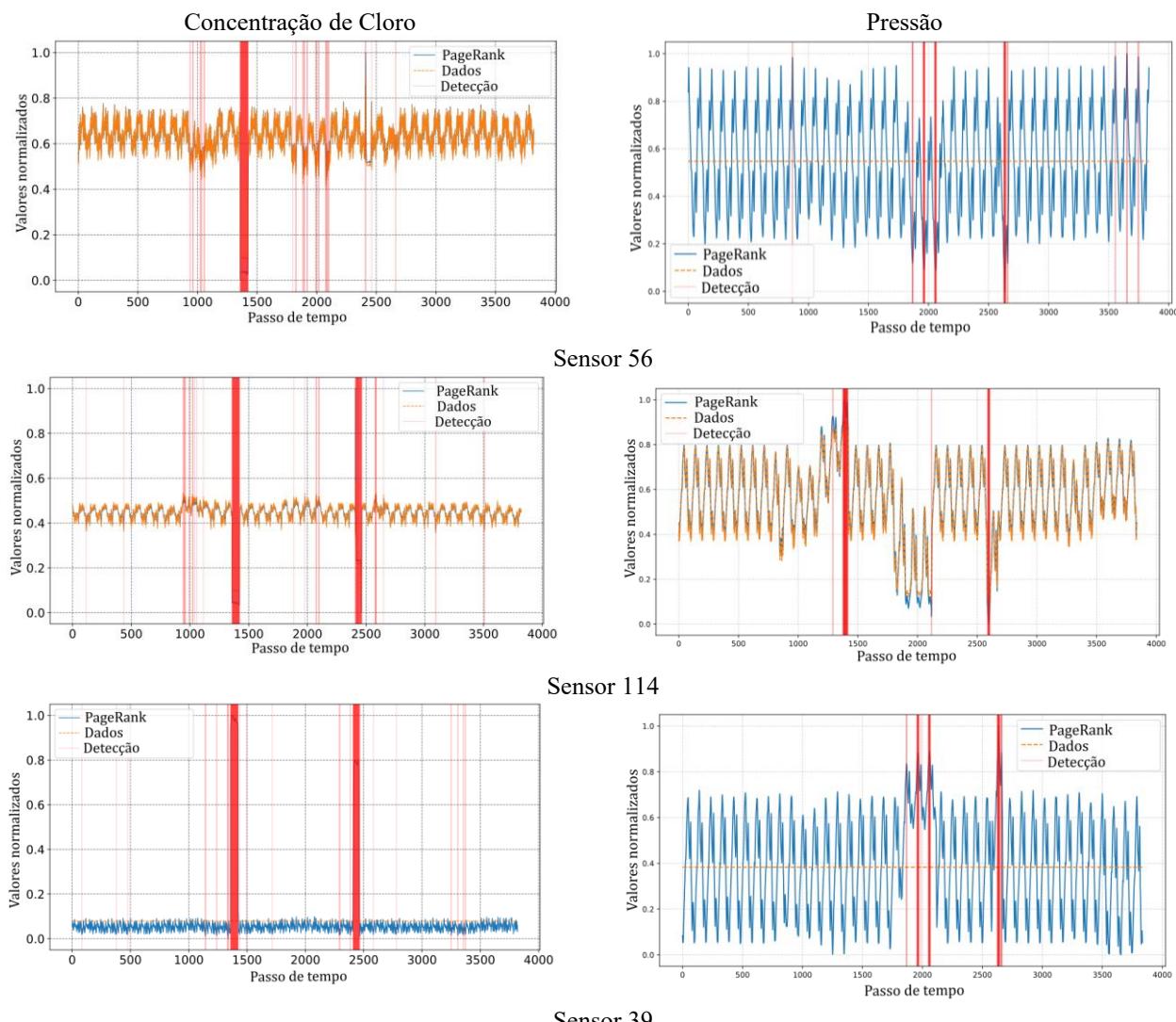
Tabela 2 – Falha de Cloração

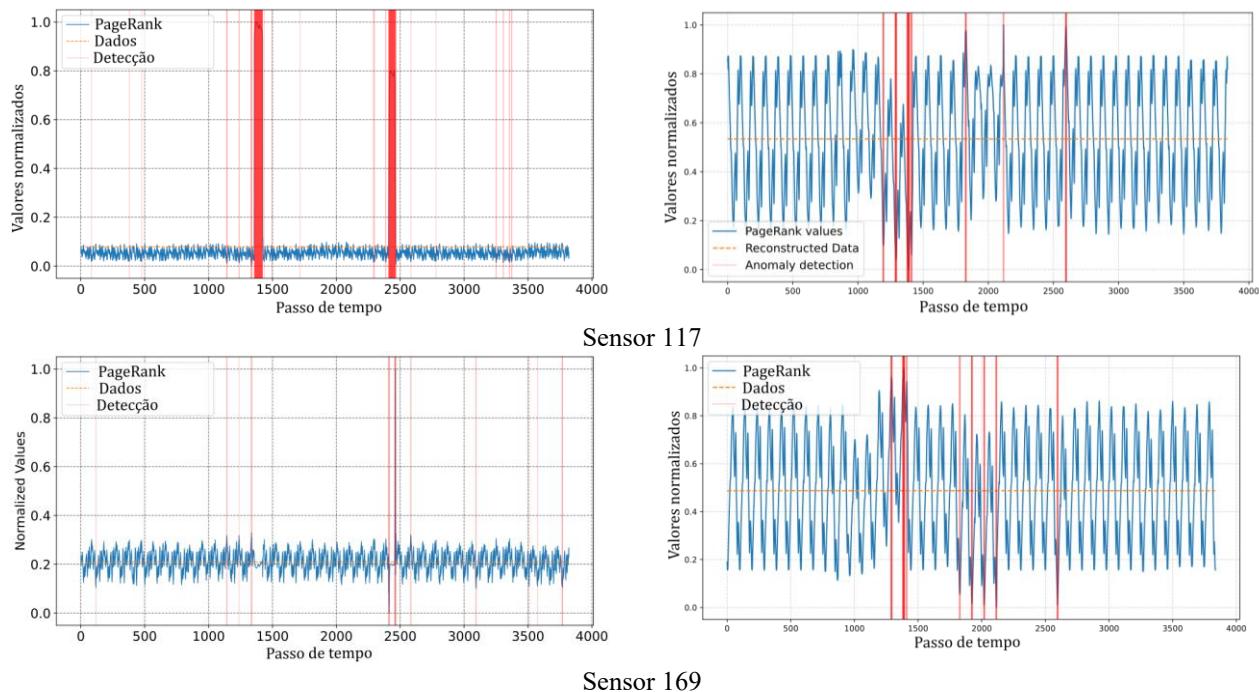
Reservatório	Dia	Hora	Duração (h)	Concentração (mg/L)
269	26	6	12	0.3
270	15	8	15	1.8

Adicionalmente, duas falhas de cloração foram introduzidas para testar o desempenho do método proposto sob essas condições adicionais. Para tal fim, a modelagem da qualidade da água foi realizada por meio do EPANET-MSX, sendo os dados analisados em ambiente de programação. O cloro foi adicionado a uma concentração de 1,2 mg/L em todos os reservatórios, utilizando-se a função CONCEN no arquivo de entrada do EPANET-MSX. Este arquivo também contém a configuração das falhas de cloração, implementadas por meio de um padrão de concentração associado ao processo de dosagem. Para avaliar o comportamento do cloro sob condições de falha de concentração, dois reservatórios distintos foram selecionados aleatoriamente, sendo o dia de início, o horário de início, a duração da falha e o fator multiplicativo aplicado à concentração original (1,2 mg/L) também definidos de forma aleatória, conforme apresentado na Tabela 2.

O processo de simulação hidráulica e de qualidade da água resultou em uma base de dados que abrangeu 40 dias de simulação, com dados monitorados em intervalos de 15 minutos. Consequentemente, o conjunto de dados é composto por 3.840 passos de tempo para cada ponto de monitoramento. O comportamento da concentração de cloro ao longo do tempo pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Comportamento dos dados e detecção de anomalias





A Figura 2 evidencia a eficácia do método proposto na detecção de anomalias em séries temporais de qualidade da água. As falhas de cloração foram prontamente identificadas por todos os sensores, enquanto os vazamentos simulados produziram alterações mais sutis, como observado no sensor 117. O modelo, orientado por dados, baseou-se exclusivamente nas séries temporais dos pontos monitorados para a detecção e localização dos eventos.

Os períodos de vazamento apresentaram correlação direta com aumentos abruptos nos erros de reconstrução, demonstrando a capacidade da abordagem em capturar desvios não triviais mesmo em condições de ruído e flutuações operacionais. Destaca-se a influência da posição topológica e da conectividade hidráulica na sensibilidade de detecção, com o sensor do nó 56 apresentando menor incidência de falsos positivos e o sensor 114 revelando maior resposta a anomalias de curta duração. Além dos vazamentos, a metodologia mostrou-se eficiente na detecção de falhas de cloração, evidenciada pela persistência dos sinais de anomalia ao longo de todo o período simulado, com exceção de um número restrito de falsos positivos no sensor 169.

Para fins comparativos, a metodologia foi aplicada também a dados de pressão, mantendo-se o arcabouço analítico. As séries foram tratadas por meio de janelas deslizantes, com cálculo de distâncias euclidianas, normalização, limiarização e posterior análise por meio do índice de centralidade PageRank. A detecção por pressão apresentou maior rapidez e menor taxa de falsos positivos, resultado atribuído à natureza física da propagação: enquanto as variações de pressão se difundem de forma quase instantânea, os indicadores de qualidade da água respondem conforme a

velocidade de escoamento. Essa diferença nos tempos de resposta é detalhada na Tabela 3, que compara o início e o término dos eventos com os respectivos instantes de detecção.

Tabela 2 – Falha de cloração

	Falhas								Cloro	
	Vazamentos									
Nós	250	120	224	43	49	153	6	270	269	
Tempo de início	761	945	1185	1713	2577	3477	3265	1357	2409	
Tempo de fim	868	1184	1416	2112	2664	∞	3328	1416	2456	
Detecção qualidade	29	197	53	329	5	31		1	5	
Detecção pressão	106		7	111	11	78				

Embora a utilização de dados de qualidade da água amplie o tempo necessário para a detecção de vazamentos, os resultados demonstram sua superioridade em termos de cobertura. Dos sete vazamentos simulados, seis foram identificados com dados de qualidade, frente a cinco detectados por dados de pressão. Ambos os métodos falharam na detecção do vazamento no nó 6, provavelmente devido à baixa vazão no local. Entre os casos detectados por pressão, apenas dois (nós 224 e 43) apresentaram tempo de detecção inferior ao obtido com os dados de qualidade, o que sugere maior sensibilidade da qualidade da água às alterações geradas pelos vazamentos.

As falhas de cloração, como previsto, foram identificadas exclusivamente pelos sensores de qualidade da água, uma vez que tais eventos não impactam os parâmetros hidráulicos. Esses resultados reforçam a relevância de integrar a análise da conectividade hidráulica e da topologia dos sensores no processo de detecção, considerando que a propagação das alterações em pressão e qualidade da água depende diretamente da configuração física e da dinâmica operacional da rede.

CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam o potencial da integração entre dados de qualidade da água e técnicas de aprendizado de máquina para aprimorar a detecção de vazamentos em redes de distribuição. Embora a resposta temporal dos dados hidráulicos seja mais rápida, os parâmetros de qualidade demonstraram maior abrangência na identificação dos eventos, além de permitir a detecção de falhas operacionais como a cloração inadequada. A incorporação da topologia e da conectividade hidráulica ao processo analítico reafirma a importância de abordagens multidimensionais, capazes de fortalecer a gestão da água e promover maior segurança hídrica.

REFERÊNCIAS

- BARROS, D. B., SOUZA, R. G., MEIRELLES, G., & BRENTAN, B. (2023b). “Leak detection in water distribution networks based on graph signal processing of pressure data”. *Journal of Hydroinformatics*, 25(6), 2281-2290.
- BARROS, D., ALMEIDA, I., ZANFEI, A., MEIRELLES, G., LUVIZOTTO JR, E., & BRENTAN, B. (2023a). “An investigation on the effect of leakages on the water quality parameters in distribution networks”. *Water*, 15(2), 324.
- BISWAS, P., YANG, Y., ABOKIFA, A., & LO, C. (2016). “Water quality modeling in the dead end sections of drinking water distribution networks”. *Water research*, 89, 107-17.

BRAGALLI, C., D'AMBROSIO, C., LEE, J., LODI, A., & TOTH, P. (2012). "On the optimal design of water distribution networks: a practical MINLP approach". *Optimization and Engineering*, 13, 219-246.

BRASIL, T. (2024). "Perdas de água 2024 (SNIS 2022): desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico". São Paulo.

CARDOSO, S. M., BARROS, D. B., & OLIVEIRA, E. (2018, JULY). "Multiobjective Optimization and Rule Extraction for Optimum Location of Quality Sensors in Water Distribution Network". In WDSA/CCWI Joint Conference Proceedings (Vol. 1).

KULAT, K., & GUPTA, A. (2018). A Selective Literature Review on Leak Management Techniques for Water Distribution System. *Water Resources Management*, 32, 3247-3269.

MANKAD, J., NATARAJAN, B., & SRINIVASAN, B. (2022). "Integrated approach for optimal sensor placement and state estimation: A case study on water distribution networks". *ISA transactions*, 123, 272-285.

OCIEPA-KUBICKA, A., DESKA, I., & OCIEPA, E. (2024). "Issues in Implementation of EU Regulations in Terms of Evaluation of Water Losses: Towards Energy Efficiency Optimization in Water Supply Systems". *Energies*, 17(3), 633.

ONYUTHA, C., & KWIO-TAMALE, J. (2024). "Influence of physical and water quality parameters on residual chlorine decay in water distribution network". *Heliyon*, 10.

PAGE, L., BRIN, S., MOTWANI, R., & WINOGRAD, T. (1999). "The PageRank citation ranking: Bringing order to the web". Stanford infolab.

RABIEIAN, M., & QADERI, F. (2024). "Development of a novel mathematical model for leakage detection and localization in the water distribution system: based on the modification of the hydraulic model". *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(8), 6297-6312.

SCHWARTZ, R., LAHAV, O., & OSTFELD, A. (2014). "Integrated hydraulic and organophosphate pesticide injection simulations for enhancing event detection in water distribution systems". *Water Research*, 63, 271-284.

TORNYEVADZI, H. M., & SEIDU, R. (2023). "Leakage detection in water distribution networks via 1D CNN deep autoencoder for multivariate SCADA data". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 122, 106062.

ZHANG, J., SU, H., HE, Y., LIU, J., ZHOU, J., ZEITOUNI, K., FAN, L., JIAO, D., & ZHANG, L. (2025). "A dynamic graph convolutional network-based framework for the unsteady operating states recognition of multi-product pipeline systems". *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 141, 109785.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à Fapemig pelo financiamento à participação no congresso sob processo número PCE-00429-25.