MONITORAMENTO DO PLANO PIEZOMÉTRICO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA IDENTIFICAÇÃO DE VAZAMENTOS E REDUÇÃO DE PERDAS REAIS

Evelyn Cristiane Valladares[(1)]
Mestranda em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais (UNICAMP), Engenheira Civil (ESAMC).
Graziele da Silva Mendes
Especialista em Sistemas de Abastecimento de Água (IPOS), Engenheira Civil (FACENS)
Daniel Manzi
Doutor em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais (UNICAMP), Mestre em Hidráulica e Saneamento (EESC-USP) e Engenheiro Civil (EEP)
André Luis Sotero Salustiano Martim
Professor Doutor na Universidade Estadual de Campinas

Endereço[(1)]**:** Avenida Darci Carvalho Dafferner, 151 – Boa Vsita - Sorocaba - São Paulo – 18085-850 - Brasil - Tel: +55 (15) 99777-8600 - e-mail: evelyn.valladares39@gmail.com.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia inovadora para reduzir o tempo entre as etapas de aviso e locação de vazamentos em redes de distribuição de água, com o objetivo de minimizar as perdas reais. O estudo foi conduzido em um setor estanque de abastecimento na cidade de Curitiba-PR, com 55 km de extensão, utilizando o monitoramento diário de pressões em 55 pontos estratégicos. A metodologia baseia-se na análise do plano piezométrico e na comparação entre cargas hidráulicas esperadas e medidas em campo, especialmente durante o regime de pressão estática, permitindo a identificação de anomalias operacionais com maior precisão. A aplicação prática possibilitou restringir a área de pesquisa de vazamentos para apenas 2 km da rede (3,64% do total), reduzindo o tempo de inspeção de 9,17 dias para 0,33 dias. Após o reparo identificado, observou-se uma recuperação de 31,94% do volume de água perdido, com redução da vazão mínima noturna de 17,5 L/s para 11,91 L/s. Os resultados comprovam a eficácia da abordagem proposta, que alia fundamentos da hidráulica com monitoramento sistemático, contribuindo para uma gestão mais eficiente, sustentável e econômica das perdas em sistemas de abastecimento de água.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de perdas, Monitoramento de pressão, Localização de vazamentos.

INTRODUÇÃO

A rede de distribuição de água é essencial para garantir o fornecimento contínuo, em quantidade e qualidade adequadas, à população (Barros et al., 2023). Contudo, sua eficiência enfrenta desafios, especialmente diante das mudanças climáticas e da crescente escassez hídrica, que exigem estratégias sustentáveis para preservar os recursos disponíveis (Yan e Huang, 2023).

Entre as principais ações, destaca-se o controle de perdas nas redes de abastecimento, uma prioridade global em regiões com oferta hídrica limitada. A adoção de boas práticas de gestão, como a detecção e correção rápida de vazamentos, é fundamental para aumentar a eficiência operacional e a sustentabilidade do sistema (Hamilton e Charalambous, 2020).

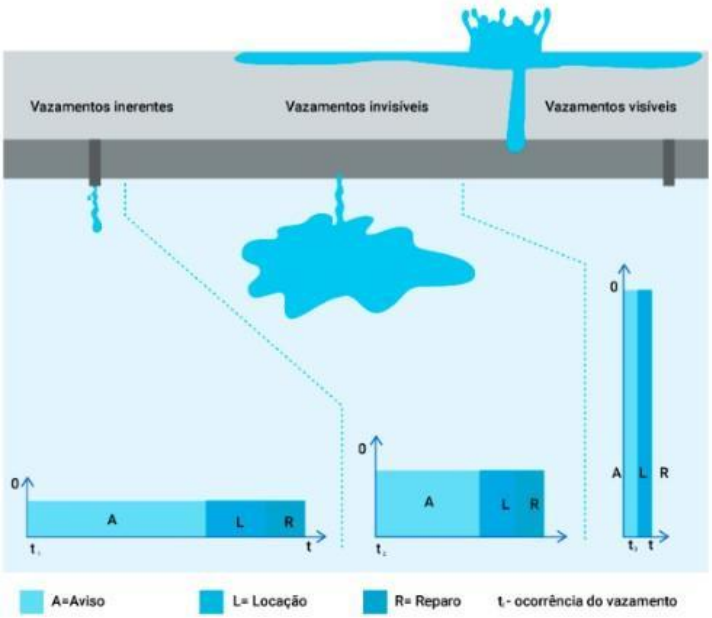
As perdas são significativas: estima-se que 346 milhões de m³ de água por dia não sejam faturados (NRW), gerando perdas econômicas anuais de cerca de US$ 40 bilhões (Liemberger e Wyatt, 2019). Além dos impactos financeiros, há desperdício de energia e degradação ambiental, agravando a escassez de água.

Enfrentar esse cenário requer uma gestão ativa, que integre tecnologias de monitoramento, detecção de vazamentos e um arcabouço legal consistente. No Brasil, a Lei nº 14.026/2020 atualizou o marco legal do saneamento, estabelecendo metas e diretrizes específicas para o controle de perdas. Essa legislação é

complementada por normas como o Decreto nº 10.588/2020 e a Portaria nº 490/2021, que vinculam o repasse de recursos federais ao cumprimento de indicadores como o IPD (Brasil, 2020).

Segundo a IWA (Person, 2019), as perdas podem ser aparentes — decorrentes de erros de medição, falhas administrativas ou fraudes — ou reais, como vazamentos físicos nas redes e reservatórios. O volume de água perdido depende diretamente do tempo de vazamento, dividido em três etapas: aviso, localização e reparo (GIZ, 2011 apud Manzi, 2020) como ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Tipos de vazamentos e influencias no volume de água perdido



Fonte: GIZ (2011) apud Manzi (2020)

O "aviso" do tempo de vazamento geralmente é realizado por meio do monitoramento e análise diária do Volume Mínimo Noturno (VMN) e do Fator de Pesquisa (FP), que relaciona a VMN com a vazão média diária. O VMN é a menor vazão de água registrada durante o período noturno, quando o consumo regular é reduzido, facilitando a identificação de padrões anômalos que podem indicar vazamentos. O FP, por sua vez, é a relação entre a média da vazão durante o período analisado e o volume mínimo noturno, auxiliando na identificação de setores com maior probabilidade de perdas. Após o aviso, a etapa de "locação" tradicionalmente exige a pesquisa de 100% da área do setor para localizar o ponto exato do vazamento. Esse processo, embora eficiente, é moroso, aumentando o tempo para a identificação e, consequentemente, o volume de água perdido durante o processo de pesquisa de vazamentos.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso que propõe uma metodologia inovadora para reduzir o tempo entre as etapas de "aviso" e "locação" de vazamentos, com o intuito de minimizar o volume de água perdido nesse intervalo. A proposta envolve a otimização do procedimento tradicional de varredura nos setores de abastecimento, por meio da restrição da área de pesquisa e do direcionamento das ações operacionais para regiões com maior probabilidade de ocorrência de vazamentos. Para isso, a metodologia faz uso da análise sistemática de dados de pressão nas redes, com o objetivo de aprimorar o monitoramento hidráulico e subsidiar decisões mais precisas no processo de controle de perdas.

METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia adotada neste trabalho consiste na identificação e localização de vazamentos em redes e ramais de distribuição de água, por meio do monitoramento diário de pressões em múltiplos pontos do sistema. Essa

abordagem permite a análise do plano piezométrico em um setor real de abastecimento, oferecendo uma visão detalhada do comportamento hidráulico da rede.
Para fundamentar teoricamente essa metodologia, é essencial compreender o comportamento hidráulico do escoamento em condutos fechados. Nesse contexto de acordo com a equação de Bernoulli (1), que expressa a conservação de energia ao longo de uma linha de fluxo entre dois pontos (Porto, 2006; White, 2009), temos:

$$\frac{P1}{\gamma} + \frac{v^2 1}{2g} + z1 = \frac{P2}{\gamma} + \frac{v^2 2}{2g} + z2 + \Delta h$$

Equação (1)

Onde:
P/γ (m) é a energia ou carga de pressão
z (m) é a carga de posição
$v^2/2g$ (m) é a energia ou carga cinética
Δh é a perda de carga

Em redes de distribuição, devido às baixas velocidades do fluido, é comum desconsiderar a parcela referente à carga cinética, simplificando a equação (2) para:

$$\frac{P1}{\gamma} + z1 = \frac{P2}{\gamma} + z2 + \Delta h$$

Equação (2)

Desta forma, define-se a carga hidráulica total (ou cota piezométrica) como equação (3):

$$h = \frac{P}{\gamma} + z$$

Equação (3)

Essa carga representa a energia disponível por unidade de peso do fluido em determinado ponto da rede. A diferença de carga hidráulica entre dois pontos corresponde à perda de carga, um parâmetro importante para avaliar o desempenho hidráulico e energético do sistema.
As perdas de carga são explicadas teoricamente pela equação universal de perda de carga de Darcy-Weisbach, dada pela equação (4):

$$\Delta h = f . \frac{L}{D^5} . \frac{v^2}{2g}$$

Equação (4)

Onde:
Δh (m) é a perda de carga
f (adimensional) é o fator de atrito de Darcy
L (m) é o comprimento da tubulação
D (m) é o diâmetro da tubulação
v (m/s) é a velocidade do escoamento
g (m/s²) é a aceleração da gravidade

A mesma equação (4) sendo expressa em termos da vazão temos a equação (5):

$$\Delta h = \frac{8 f L Q^2}{\pi^2 g D^5}$$

Equação (5)

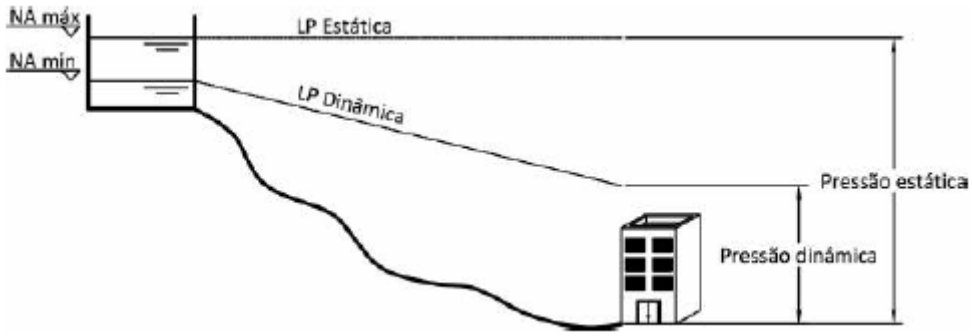
Essa relação evidencia que as perdas de carga aumentam rapidamente em função do quadrado da vazão transportada (Q^2), ou seja, pequenas variações na vazão geram impactos expressivos nas pressões medidas na rede.

Usando essa teoria, para detectar anomalias operacionais, como vazamentos, torna-se necessário distinguir dois regimes hidráulicos principais: a pressão estática e a pressão dinâmica.

A pressão estática é por definição a pressão medida quando há ausência ou mínimo consumo de água na rede, reduzindo a perda de carga no trecho a zero ou valor próximo de zero. Já a pressão dinâmica, também por definição é a pressão medida na tubulação nos períodos em que o escoamento de água é não nulo, em condições normais de consumo, e, portanto, a perda de carga no trecho possui valor significativo e, portanto, a pressão disponível é menor que a estática.

Essas duas condições são representadas graficamente por linhas piezométricas distintas (Figura 2). Monitorar essas variações é fundamental para compreender o comportamento hidráulico da rede, determinar as faixas de pressão da média móvel por trecho de abastecimento, e estabelecer condições técnicas mensuráveis para permitir a detecção de alterações que possam sinalizar possíveis anomalias nas redes de distribuição.

Figura 2: Linha piezométrica e pressão estática e dinâmica.



Fonte: Manzi (2020)

Com o monitoramento de diversos pontos, essa abordagem utiliza a avaliação do plano piezométrico, considerando as pressões registradas em momentos próximos ao regime estático, ou seja, durante períodos de menor consumo.

Para a análise, estabelece-se um ponto de referência na entrada da rede de distribuição. Nesse ponto, considera-se a carga hidráulica esperada, que servirá como base para as demais medições na rede.

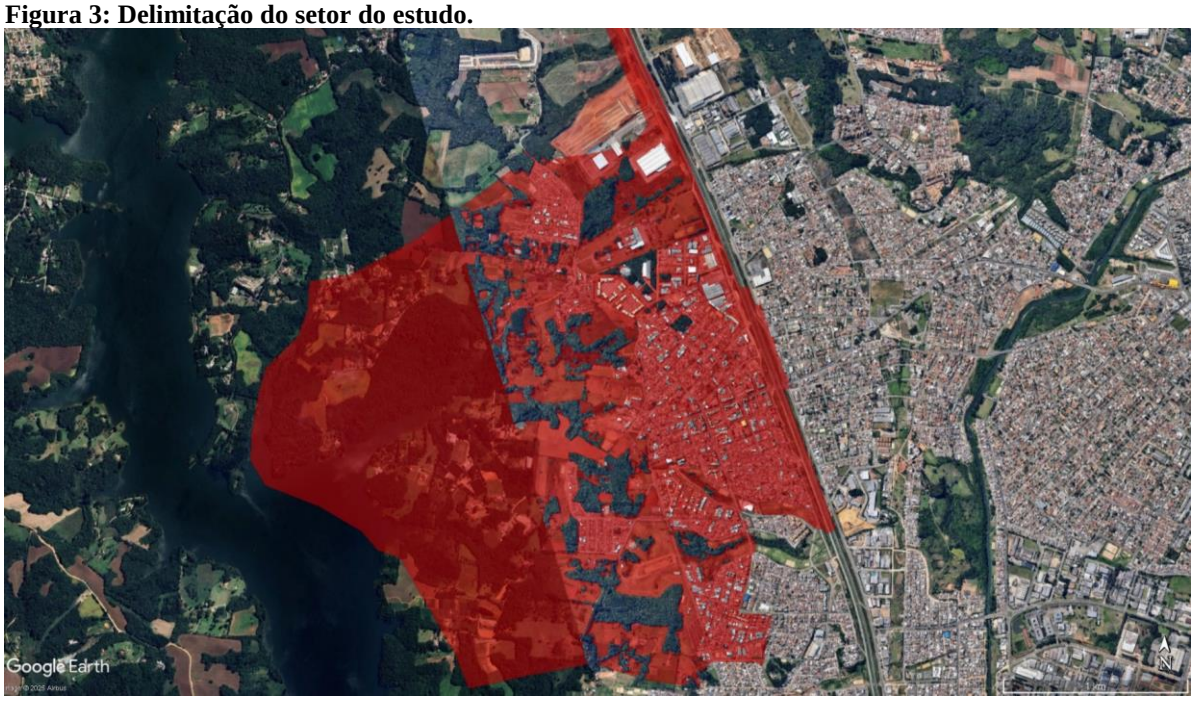
A partir dessa definição, compara-se a carga hidráulica esperada (considerando as características do sistema e perdas por atrito) com a carga medida em campo. As discrepâncias que não podem ser explicadas pelas perdas normais de carga podem indicar potenciais anomalias.

A aplicação dessa metodologia de forma contínua e sistemática permite a detecção de padrões operacionais e o direcionamento das ações de inspeção para áreas específicas com maior probabilidade de falhas, otimizando o processo de localização de vazamentos e contribuindo para a redução das perdas reais de água no sistema.

RESULTADOS OBTIDOS

O estudo foi realizado em um setor de abastecimento estanque, localizado na cidade de Curitiba – PR, com 55 km de extensão de rede, cujo fornecimento de água é realizado por meio de um sistema de pressurização com booster, a figura 3 demonstra a área do setor.

Figura 3: Delimitação do setor do estudo.



Fonte: Acervo do autor.

Com o objetivo de monitorar o comportamento hidráulico da rede em todo o setor estudado, foram instalados 55 pontos estratégicos de monitoramento de pressão, distribuídos espacialmente, garantindo uma representação abrangente da rede.

A instalação dos sensores de pressão ocorreu diretamente no cavalete dos hidrômetros das ligações prediais existentes, conforme exemplificado pela Figura 4.

Figura 4: Exemplo de ponto de monitoramento.

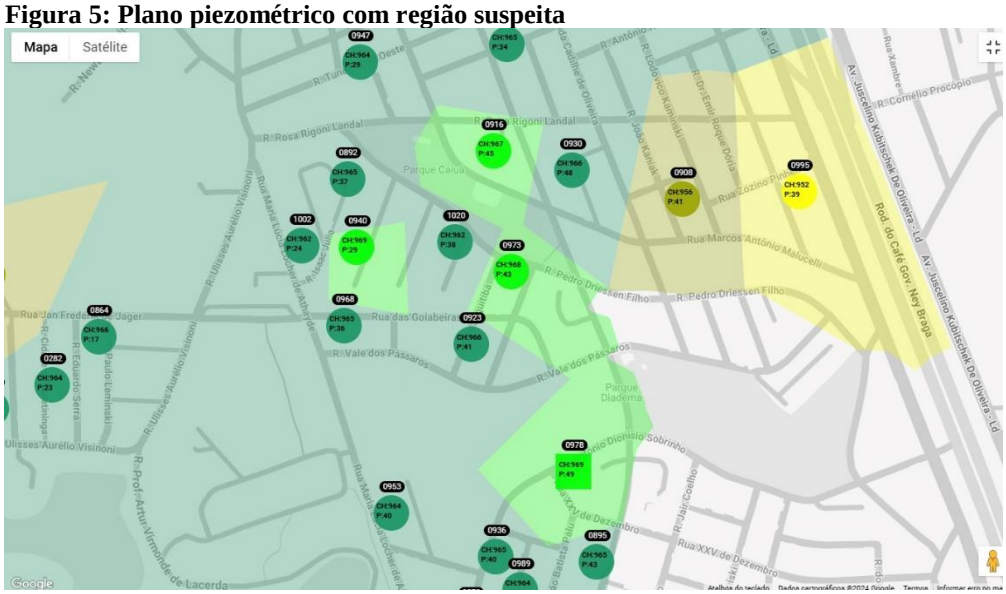


Fonte: Acervo do autor.

Foram coletadas as informações de pressão dos pontos definidos, diariamente foram analisadas as informações obtidas próximo às 04h da manhã, horário caracterizado pelo mínimo consumo de água e próximo ao regime de pressão estática, o que possibilita uma identificação mais precisa das anomalias operacionais. A análise diária consistiu na elaboração de planos piezométricos do setor, nos quais as cargas hidráulicas medidas em cada um dos 55 pontos de monitoramento são comparadas à carga de referência do ponto-base (localizado próximo à jusante do booster). Esses planos piezométricos foram representados em mapas coloridos segundo uma escala de cores que varia do verde (carga hidráulica próxima à referência) até o roxo (grande perda de carga), passando por amarelo, laranja e vermelho. A utilização desta escala permite uma identificação visual e imediata de possíveis regiões onde ocorrem perdas de energia significativas, indicativas de anomalias

operacionais na rede de abastecimento. A Figura 5 ilustra o comportamento do plano piezométrico no dia 31/08/2024, destacando uma região com carga significativamente reduzida (em amarelo), sugerindo uma possível anomalia.

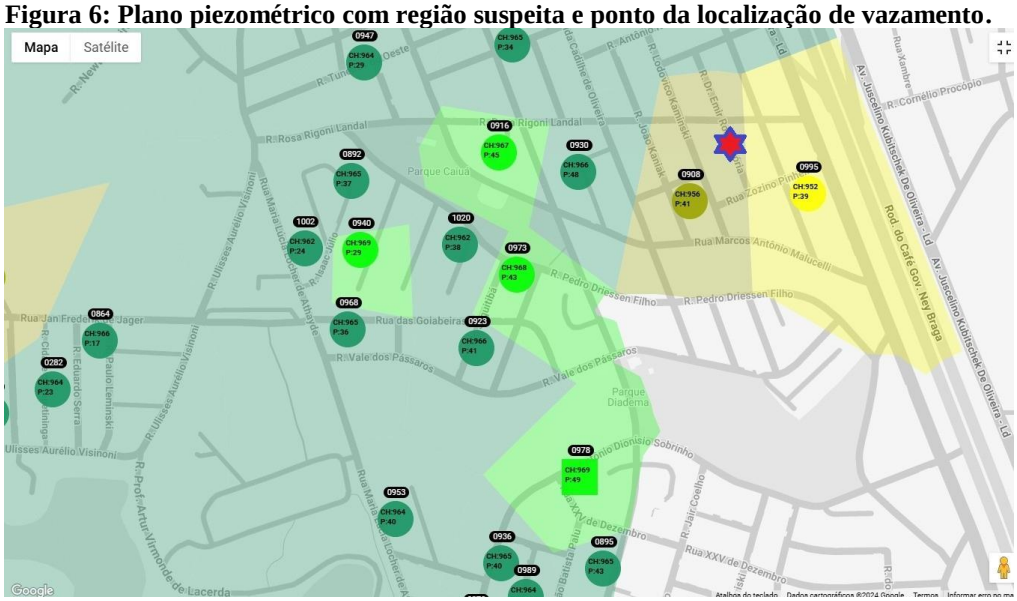
Figura 5: Plano piezométrico com região suspeita



Fonte: Acervo do autor

Com base nessa indicação, foi realizada uma pesquisa de vazamento direcionada, resultando na identificação de um vazamento em um ramal específico, evidenciada a localização na Figura 6.

Figura 6: Plano piezométrico com região suspeita e ponto da localização de vazamento.



Fonte: Acervo do autor

Após o reparo do ramal executado no dia 31/08/2024, foi possível observar a estabilização do plano piezométrico no dia 01/09/2024, indicando um equilíbrio na área que anteriormente apresentava a anomalia. A Figura 7 demonstra a área após o reparo executado.

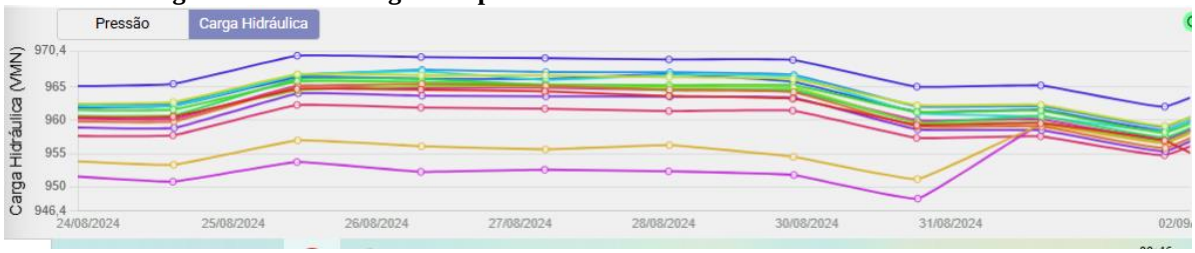
Figura 7: Plano piezométrico após o reparo do vazamento.



Fonte: Acervo do autor

O gráfico 1 demonstra na linha do tempo a carga hidráulica da região suspeita, as linhas em rosa e laranja representam os pontos de monitoramento com maior perda de carga, até o dia 31/08/2024, e a recuperação das cargas hidráulicas após o reparo executado no dia 01/09/2024.

Gráfico 1: Carga hidráulica da região suspeita.



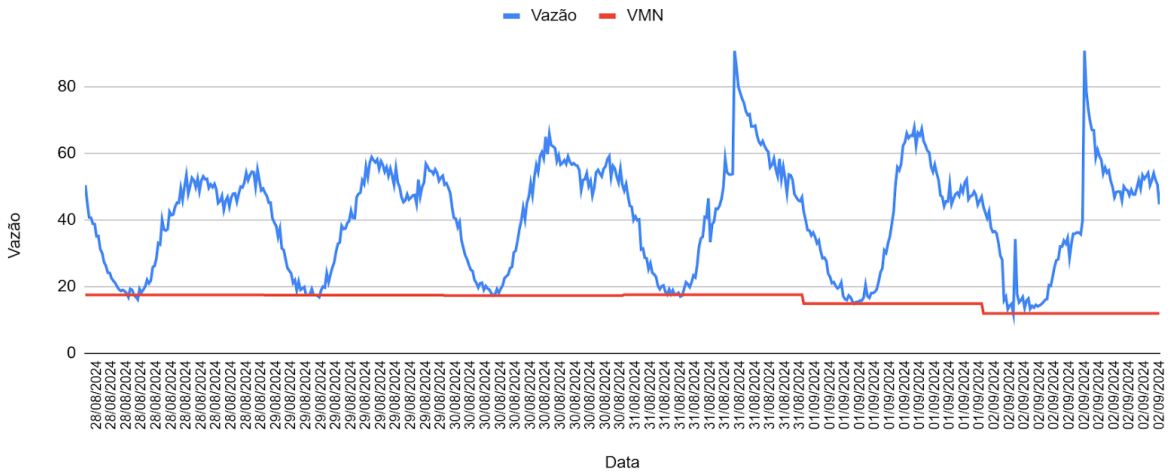
Fonte: Acervo do autor

A Comparando-se ao método tradicional de localização de vazamentos, que exigiria a pesquisa ao longo de toda a extensão da rede do setor (55 km), a metodologia aplicada permitiu direcionar a pesquisa para apenas 2 km da rede, o que corresponde a aproximadamente 3,64% do total.

Considerando um rendimento médio de pesquisa de vazamentos de 6 km por dia, seriam necessários cerca de 9,17 dias para inspecionar toda a extensão da rede no método tradicional. Com o direcionamento proporcionado pela metodologia aplicada, o tempo de pesquisa foi reduzido para apenas 0,33 dias, evidenciando uma significativa economia de tempo e recursos operacionais.

Além disso, a análise da curva de vazão do setor, apresentada no gráfico 2, demonstrou os efeitos da recuperação de água após o reparo dos vazamentos. A vazão mínima noturna, no dia 30/08/2024 era de 17,5 L/s, foi reduzida para 11,91 L/s no dia 02/09/2024, representando uma recuperação de aproximadamente 31,94% do volume de água perdido, comprovando a efetividade da metodologia empregada.

Gráfico 2: Curva da vazão e VMN (L/s) do setor do estudo - de 28/08/2024 a 02/09/2024.



Fonte: Acervo do autor.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo demonstrou que a aplicação de uma metodologia baseada na análise hidráulica e no monitoramento contínuo das pressões em múltiplos pontos da rede pode contribuir significativamente para a gestão de perdas em sistemas de abastecimento de água. A estratégia adotada permitiu uma redução expressiva na área de pesquisa de vazamentos, de 55 km para apenas 2 km (equivalente a 3,64% da extensão do setor), o que resultou na diminuição do tempo necessário para a inspeção de campo de 9,17 dias para 0,33 dias.

Adicionalmente, a abordagem resultou em ganhos operacionais concretos, como a redução da vazão mínima noturna de 17,5 L/s para 11,91 L/s após o reparo, indicando uma recuperação de 31,94% no volume de água anteriormente perdido. Esses resultados evidenciam o potencial da análise piezométrica e da interpretação sistemática de dados hidráulicos como ferramentas eficazes para detecção de anomalias e otimização de recursos em redes de distribuição.

Conclui-se, portanto, que práticas baseadas em fundamentos técnicos de hidráulica e em monitoramento sistemático podem promover avanços relevantes na eficiência operacional dos sistemas de abastecimento, além de gerar benefícios econômicos e ambientais ao mitigar perdas reais de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. *Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água*. Revisão 1. Rio de Janeiro: ABES, 2015.

2. BARROS, D. B. et al. Leak detection in water distribution networks based on graph signal processing of pressure data. *Journal of Hydroinformatics*, v. 25, n. 6, p. 2281–2290, 2023.

3. BRASIL. *Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020*. Atualiza o marco legal do saneamento básico [...]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 28 jul. 2025.

4. GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guidelines for water loss reduction: a focus on pressure management*. Eschborn, Alemanha: GIZ, 2011.

5. HAMILTON, S.; CHARALAMBOUS, B. *Leak detection technology and implementation*. 2. ed. London: IWA Publishing, 2020.

6. LAMBERT, A. et al. *Water loss control manual*. London: International Water Association, 2015.

7. LIEMBERGER, R.; WYATT, A. Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply*, v. 19, n. 3, p. 831–837, 2019.

8. LOPES, R. C. ET AL. Identificação de Vazamentos Utilizando Vazão Mínima Noturna. *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2017.

9. MANZI, D. *A hidráulica de todo dia no saneamento*. Curitiba: [s.n.], 2020.

10. PERSON, L. *Managing water loss*: a practical guide to leakage control and reduction. London: IWA Publishing, 2019.

11. PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 4. ed. São Carlos: EESC/USP, 2006.

12. TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de águ*a. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

13. WHITE, F. M. *Fluid mechanics*. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2009.

14. YAN, R.; HUANG, J. J. Confident learning-based Gaussian mixture model for leakage detection in water distribution networks. *Water Research*, v. 247, p. 120773, 2023.