

## **XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS**

### **PRIORIZAÇÃO DE INTERVENÇÕES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM DADOS LIMITADOS: UMA ABORDAGEM PARA A REDUÇÃO DE PERDAS BASEADA EM PRESSÕES DE REFERÊNCIA**

*Rossa, R. R. A.<sup>1</sup>; Fernandes, C. V. S.<sup>2</sup>; Carreño-Alvarado, E. P.<sup>3</sup>; Kihisi, R. T.<sup>4</sup>; Veiga, B. V.<sup>5</sup>*

**Resumen:** La priorización de inversiones en el control de pérdidas de agua es un desafío en escenarios con escasez de datos operacionales. Este trabajo propone un método basado en presiones de referencia para identificar sectores críticos en redes de abastecimiento, utilizando datos habitualmente disponibles, como topología de la red y información pública (ej.: SNIS, IBGE). Mediante modelación hidráulica en condiciones ideales (sin pérdidas), el método simula presiones nodales y clasifica, mediante un índice, los sectores con tendencia a ser los más críticos en relación a pérdidas de agua, considerando que las anomalías pressométricas son indicadores clave de riesgo de fugas. En un estudio de caso, el método identificó 2 sectores con perfiles de presión críticos (ej.: amplitudes elevadas), con el objetivo de orientar la asignación de recursos para prevención y reducción de pérdidas. Los resultados demuestran que las presiones de referencia son un parámetro viable para clasificar la criticidad de los sectores de una misma red en contextos de datos limitados, ofreciendo un protocolo accesible para gestores de saneamiento.

**Resumo:** A priorização de investimentos em controle de perdas de água é um desafio em cenários com escassez de dados operacionais. Este trabalho propõe um método baseado em pressões de referência para identificar setores críticos em redes de abastecimento, com a utilização de dados normalmente disponíveis, como os referentes à topologia da rede e os declarados publicamente (ex.: SNIS, IBGE). Através de modelagem hidráulica em condições ideais (sem perdas), o método simula pressões nodais e classifica, através de um índice, os setores com tendência a serem os mais críticos em relação às perdas de água, considerando que anomalias de pressão são indicadores-chave de risco de vazamentos. Em um estudo de caso, o método identificou 2 setores com perfis de pressão críticos, com o objetivo de orientar a alocação de recursos para prevenção e redução de perdas. Os resultados demonstram que pressões de referência são um parâmetro viável para classificar a criticidade dos setores da mesma rede em contextos de dados limitados, oferecendo um protocolo acessível para gestores de saneamento.

**Palavras-Chave** – redes de distribuição de água, gerenciamento de pressão, dados limitados.

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – PPGERHA – UFPR. Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 – Jardim das Américas – Bloco V – DHS. Curitiba/PR Email: rafaelarossa@gmail.com

2) Professor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – PPGERHA – UFPR. Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 – Jardim das Américas – Bloco V – DHS. Curitiba/PR Email: cris.dhs@ufpr.br

3) Pós-doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – PPGERHA – UFPR. Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 – Jardim das Américas – Bloco V – DHS. Curitiba/PR Email: elizabeth.pauline@ufpr.br

4) Professora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – PPGERHA – UFPR. Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 – Jardim das Américas – Bloco V – DHS. Curitiba/PR Email: rtkishi.dhs@ufpr.br

5) Professor, Departamento de Hidráulica e Saneamento – UFPR. Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 – Jardim das Américas – Bloco V – DHS. Curitiba/PR Email: bvveiga@ufpr.br

## INTRODUÇÃO

Em redes de distribuição de água, as perdas podem exceder 40% do volume total fornecido, representando ineficiências hidráulicas e energéticas. Múltiplos estudos — incluindo modelagem hidráulica e técnicas de análise de dados — são efetuados ao redor do mundo para o desenvolvimento de métodos para a diminuição dessas perdas. Além disso, a redução dos índices de perdas é um objetivo do Plano Nacional de Saneamento Básico, que estipula métricas de desempenho para as empresas operadoras dos sistemas de abastecimento (Ministério das Cidades, 2022a; Leinæs et al., 2024).

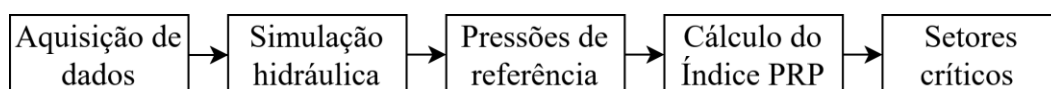
Quando os níveis de vazamento são altos, o gerenciamento de pressão é recomendado como a ação inicial em um programa de controle de perdas, devido ao seu impacto em todos os tipos de perdas e à relação custo-benefício. No entanto, em redes com limitações ou inexistência de dispositivos de medição de pressão, a aplicabilidade de um modelo hidráulico calibrado ou de técnicas analíticas baseadas em dados é significativamente limitada (Oviedo-Ocaña et al., 2020; Lopez et al., 2024).

Este estudo propõe um método para enfrentar os desafios impostos pela escassez de dados de medição. Um modelo hidráulico desenvolvido com os dados disponíveis simula pressões de referência em condições ideais. A partir desses valores simulados, um índice classifica os setores da rede de acordo com o risco potencial de vazamento. O estudo de caso de uma rede em região de topografia acidentada resultou na identificação dos setores que, com base nas simulações realizadas, são os mais críticos e prioritários para medidas de controle de perdas.

## MÉTODO

O método proposto segue cinco etapas sequenciais: a aquisição de dados públicos e operacionais, a simulação hidráulica da rede em condições ideais, a obtenção das pressões de referência, e a identificação de setores críticos via índice de Potencial de Redução de Perdas (*PRP*) — detalhado na Seção Cálculo do *PRP* — conforme o fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma das etapas do método proposto.



A Tabela 1 apresenta a classificação e origem dos dados da etapa de aquisição de dados.

Tabela 1 – Tipos de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo hidráulico.

Dados	Fontes	Exemplos
Disponíveis	Operadora/instituições públicas	Topologia (operadora), topografia (IAT), consumo (SNIS)
Estimados	Simulação, normas (ABNT NBR 12.218/2017), literatura	Demandas, padrão horário, curvas de bombas

A rede estudada está localizada em uma área acidentada em um município do estado do Paraná, atende a uma população urbana de 6.211 habitantes (IBGE, 2024), e foi selecionada por suas características hidráulicas desafiadoras, representadas pela acentuada variação altimétrica.

O sistema tem uma capacidade máxima de bombeamento de pouco mais de 30 l/s, proveniente de poços profundos, e o volume combinado de seus dois tanques é de 475 m<sup>3</sup>. A rede é totalmente composta por tubos de PVC, com o diâmetro mais comum de 50 mm, que representa 52% do total de

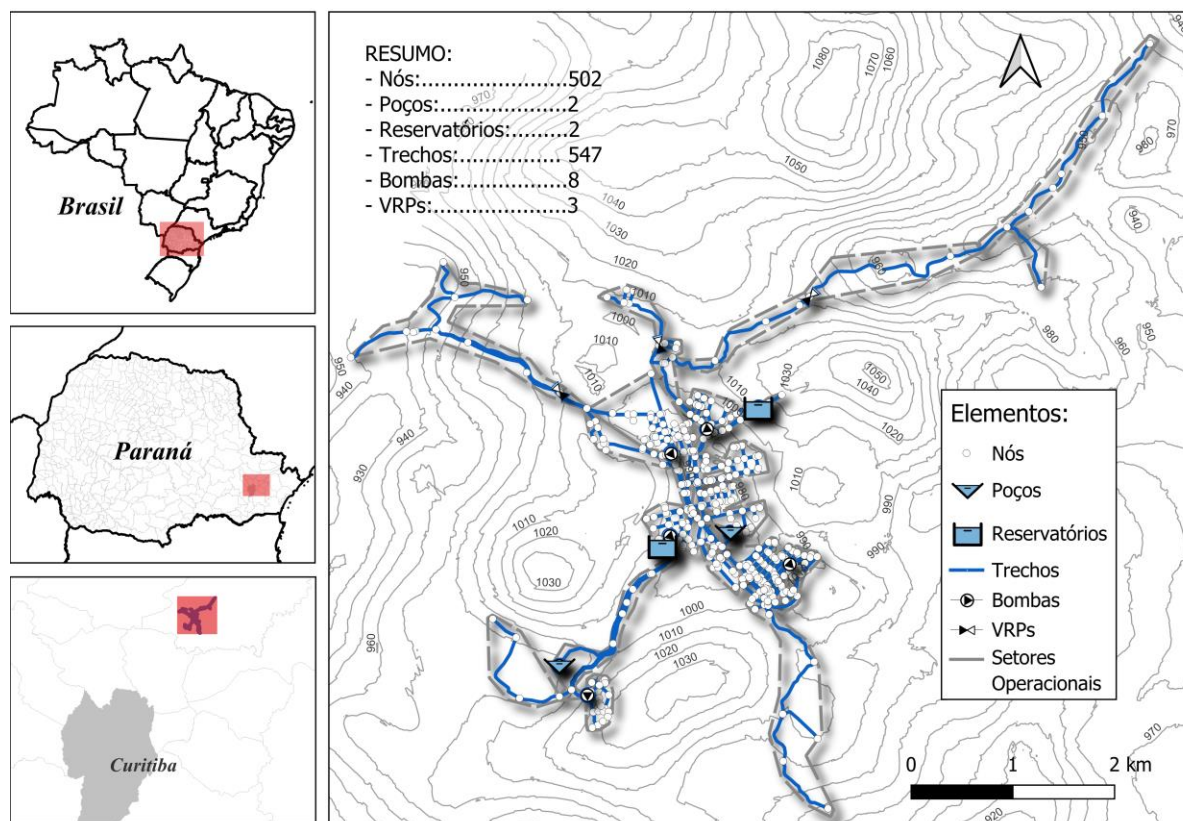
66 km de comprimento. A infraestrutura do sistema inclui 4 bombas e 3 válvulas redutoras de pressão (VRPs).

A Figura 2 apresenta a localização geográfica da rede de abastecimento de água e sua representação esquemática, ilustrando seus elementos principais e sua divisão em setores operacionais, sem medição de pressão ou vazão.

O modelo hidráulico foi desenvolvido com a utilização do software EPANET, e integrado a um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (GIS) utilizando o QGISRed, um *plug-in* do QGIS para construção e análise de modelos hidráulicos.

O modelo digital de elevação (MDE) do terreno, representado na Figura 2 na forma de curvas de nível, foi desenvolvido usando dados do Instituto Água e Terra (IAT), e mostra variações altimétricas em várias zonas da rede, como também setores da rede em regiões mais planas. A partir do MDE, as elevações dos nós foram incorporadas ao modelo da rede.

Figura 2 – Localização da rede e modelo hidráulico esquematizado.



As suposições da simulação incluem:

- Rugosidade: crescimento linear desde o ano de instalação, com base nos valores fornecidos por Netto e Fernández (2018).
- Bombas: Critérios aproximados de funcionamento em função de pressões a jusante e/ou níveis de reservatórios.
- Reservatórios: Níveis simulados de forma a não extrapolar os limites mínimo e máximo.

As demandas nodais foram calculadas combinando:

- Consumo per capita (SNIS, 2022)

- Densidades demográficas (IBGE, 2010, 2024)
- Áreas de influência por diagramas de Voronoi.

A vazão de entrada aplicou os coeficientes  $k_1 = 1,2$  e  $k_2 = 1,5$  (ABNT NBR 12218/2017), com uma curva horária conforme a recomendada por Netto e Fernández (2018).

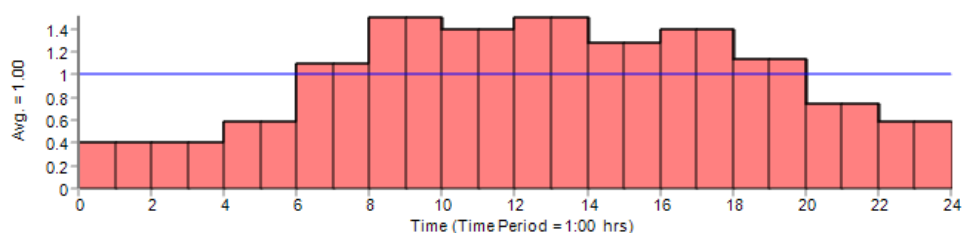
Perdas em VRPs foram fornecidas, e controles de bomba foram estimados iterativamente para simular o funcionamento dos inversores de frequência.

A variação nos níveis de água nos reservatórios, influenciada pela curva de demanda e pela operação da bomba, também foi estimada com uso do modelo hidráulico.

Com os dados de entrada integrados (disponíveis + estimados), simulou-se um ciclo operacional diário completo (24 horas, ou tempos  $t_0$  até  $t_{24}$ ) no EPANET, considerando o sistema em estado ideal sem vazamentos. Essa condição gerou as pressões de referência, usadas para o cálculo do índice *PRP*, capturando a resposta hidráulica às flutuações da demanda para todos os nós em cada intervalo de 1 hora.

A Figura 3 apresenta a curva de demanda pelo tempo considerada no modelo hidráulico para a geração das pressões de referência.

Figura 3 – Curva de demanda, adaptada de Netto e Fernández (2018).



Os valores das pressões simuladas foram capturados com auxílio de uma planilha eletrônica com 502 linhas, representando os nós, e 25 colunas, representando os tempos de  $t_0$  até  $t_{24}$ . A partir dessa matriz de valores de pressão em todos os nós para cada tempo, calculou-se os indicadores necessários para o cálculo do *PRP*.

### Cálculo do índice *PRP*

A relação entre pressão e vazamentos é consolidada na literatura, sendo a pressão nodal a variável mais impactante no fluxo de perdas segundo o modelo de Torricelli (Ávila et al., 2021). Neste contexto, dois tipos de anomalias de pressão são críticos (Oviedo-Ocaña et al., 2020; Wan et al., 2022):

1. Pressões médias elevadas e picos de pressão excessiva, que aumentam o risco de novas falhas e a vazão pelas falhas já existentes;
2. Ciclos de variação excessiva (altas amplitudes de pressão), que provocam fadiga nos materiais, diminuindo sua vida útil.

O índice *PRP* proposto integra esses fatores em uma métrica unificada que classifica setores conforme vulnerabilidade hidráulica. Para isso, analisou-se as pressões simuladas considerando:

1. Valores absolutos (médios e máximos),
2. Variação temporal (amplitudes).

A composição do índice considera os limites estabelecidos pela NBR 12.218/2017:



- pressão estática máxima = 40 mca, ou excepcionalmente 50 mca para topografia acidentada, e
- pressão estática mínima = 10 mca.

Assim, o *PRP* classifica setores críticos com base em três indicadores binários (0 ou 1) derivados das pressões de referência simuladas, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 – Indicadores do índice *PRP*.

Indicador	Critério	Valor
Pressão média ( $P_{med}$ )	Média horária > 40 mca	0 ou 1
Amplitude ( $\Delta P$ )	Variação da pressão > 30 mca (*)	0 ou 1
Pressão máxima ( $P_{max}$ )	Pico instantâneo > 50 mca	0 ou 1

(\*)  $\Delta P > 30$  mca reflete a diferença entre os limites normativos (40 mca - 10 mca = 30 mca).

O índice *PRP* é calculado como a soma dos três indicadores exibidos da Tabela 2, conforme a Equação 1:

$$PRP = P_{med} + \Delta P + P_{max} \quad (1)$$

Valores mais altos indicam maior risco de vazamentos.

Fundamentado na NBR 12.218/2017, o *PRP* combina simplicidade e transparência, facilitando decisões operacionais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

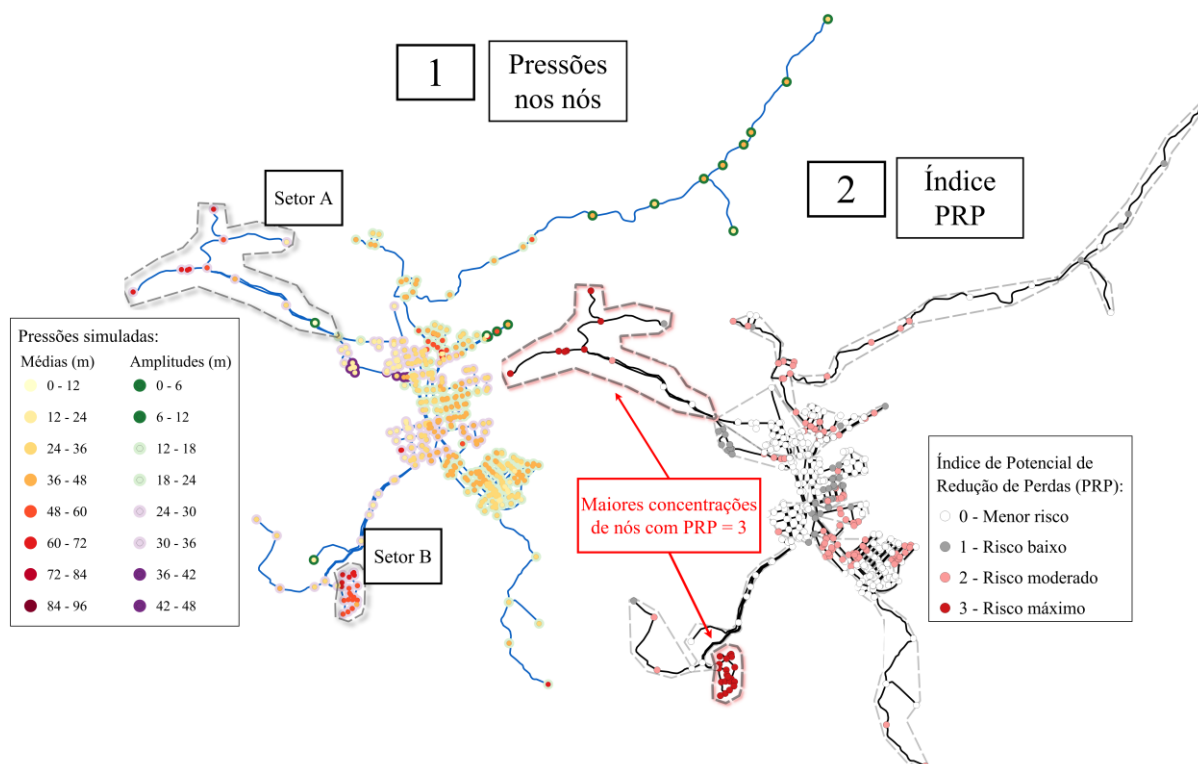
A simulação hidráulica de 24 horas da rede sem vazamentos no EPANET revelou variações significativas de pressão em toda a rede. Dos 502 nós analisados, 153 (30,5%) excederam o limite médio de pressão de 40 m (indicador  $P_{med}$  do índice *PRP*; Tabela 2), enquanto 49 nós (9,8%) exibiram amplitudes de pressão superiores a 30 m (indicador  $\Delta P$ ).

Notavelmente, as pressões simuladas mais altas ocorreram durante períodos de baixa demanda (por exemplo, antes do tempo  $t_3$  e depois do tempo  $t_{23}$ ) em nós em altitudes relativamente mais baixas dentro de seus setores. Por exemplo, foram simuladas pressões superiores a 90 m – quase o dobro do limite estabelecido pela NBR 12.218/2017 para superfícies acidentadas, igual a 50 m (indicador  $P_{max}$  do índice *PRP*).

Essas anomalias foram encontradas predominantemente em setores com topografia acidentada, especialmente nas zonas mais a oeste, ressaltando o papel da topografia na rede hídrica (ver Figura 2).

Em contraste, as pressões mais estáveis, em conformidade com a NBR 12.218/2017 (10-40 m), dominaram os setores mais planos e urbanizados.

A Figura 4(1) apresenta um mapa dos resultados do modelo para os valores de pressão. No centro de cada nó, representou-se sua pressão média entre  $t_0$  e  $t_{24}$ , e, nas bordas, sua amplitude de pressão. A partir desses resultados, o *PRP* de cada nó foi determinado, como mostrado na Figura 4(2).



Na simulação, predominam pressões elevadas e grandes amplitudes de pressão, refletindo o estresse hidráulico inerente do sistema em operação sem vazamentos. O índice *PRP* identificou anomalias de pressão ( $PRP \geq 1$ ) em 34% dos nós. Como os nós podem apresentar anomalias combinadas ( $PRP \geq 2$ ), são gerados perfis de risco distintos nos resultados do modelo:

- 1) Risco de vazamento crônico:  $P_{med} > 40$  m e  $P_{max} > 50$  m, com  $\Delta P \leq 30$  m

Os nós classificados nesse perfil estão associados a vazamentos não detectados em sistemas reais, exacerbando as perdas de água a longo prazo (Oviedo-Ocaña et al., 2020; Berardi & Giustolisi, 2021).

- 2) Risco de ruptura:  $\Delta P > 30$  m e  $P_{max} > 50$  m, com  $P_{med} \leq 40$  m

Os nós que atendem a esses critérios sugerem falhas induzidas por fadiga em redes reais devido a flutuações repetidas de alta amplitude (Leinæs et al., 2024).

Já os casos mais críticos acontecem quando os três indicadores são ativados. Sob as condições modeladas, aproximadamente 6% dos nós atingiram  $PRP = 3$ , sugerindo um status crítico de risco de vazamento:

- 3) Os 3 indicadores ultrapassados:  $P_{med} > 40$  m,  $P_{max} > 50$  m e  $\Delta P > 30$  m

Os nós que apresentam esse índice de criticidade foram então mapeados. Então, esses riscos de perdas classificados por meio do índice *PRP* foram usados para identificar os setores da rede mais propensos a vazamentos.

Embora soluções mais avançadas, e que exigem mais investimentos — como a substituição de tubulações — sejam necessárias, o resultado do *PRP* permite as primeiras etapas imediatas. Por exemplo, a conversão dos setores operacionais mais críticos em distritos de medição e controle (DMCs), permitindo que a área monitorada seja reduzida de toda a rede para setores menores (Wan et al., 2022).

A análise espacial dos resultados do modelo revelou nós de  $PRP = 3$  predominantemente concentrados em dois setores (Setor A e Setor B, na Figura 4). Dentro da estrutura simulada, esses setores foram identificados como os mais críticos para intervenções de emergência e estratégias preventivas de controle de perda de água.

A divisão espacial entre regiões estáveis e críticas ressalta o valor prático do  $PRP$  na priorização de intervenções para provedores de serviços de água que gerenciam sistemas com escassez de dados, uma vez que o índice se baseia na relação entre vazão e pressão, relacionada com as características topológicas da rede.

Essa abordagem está alinhada com a premissa central do estudo: transformar dados básicos disponíveis (elevação, *layout* de tubulação, etc.) em uma classificação de risco de vazamento, gerando informações complementares para apoiar o planejamento de controle de perdas.

Considerando que os principais fatores que influenciam as perdas de água – como as pressões da rede de distribuição, a condição da tubulação e os fatores operacionais – também são os principais impulsionadores da deterioração da tubulação, o índice  $PRP$  aborda tanto os vazamentos menores (por exemplo, vazamentos não comunicados e inerentes) quanto as falhas maiores (por exemplo, rompimentos de tubulação). Esses fatores, em conjunto, aceleram a degradação da infraestrutura, manifestando-se como maiores taxas de vazamento ou falhas e maiores probabilidades de rupturas catastróficas (Berardi & Giustolisi, 2021).

Embora o  $PRP$  não gere novos dados em si, seu cálculo fornece às concessionárias um complemento para as simulações tradicionais baseadas em modelagem. Fundamentada em princípios hidráulicos (Berardi & Giustolisi, 2021), a análise fornece uma linha de base reproduzível para a avaliação da infraestrutura, particularmente valiosa em redes com escassez de dados, onde coexistem vazamentos e infraestrutura envelhecida (Wan et al., 2022).

Além disso, à medida que as redes de distribuição de água se tornam cada vez mais instrumentadas com tecnologias de monitoramento inteligente, o desafio da escassez de dados é significativamente reduzido. Dados de alta qualidade aumentam a precisão dos resultados do modelo (Di Nardo et al., 2021), o que, por sua vez, apoia um planejamento mais eficaz e a priorização de iniciativas de redução de perdas de água (Oviedo-Ocaña et al., 2020; Wan et al., 2022). No entanto, os custos e as dificuldades técnicas para atingir altos níveis de controle ainda são proibitivos para a maioria das concessionárias (Taiwo et al., 2023; Hammond et al., 2024).

Nesse contexto, o índice  $PRP$  surge como uma alternativa estratégica, permitindo que as concessionárias priorizem os investimentos mesmo com recursos limitados. Ao direcionar os fundos disponíveis para as medidas mais críticas de redução de perdas de água, o índice cria um efeito em cascata: à medida que as perdas diminuem, o volume de entrada necessário é reduzido, gerando economia nos recursos hídricos. Isso leva a redução da perda de carga nas tubulações e maior eficiência energética (Leinæs et al., 2024). Essas economias acumuladas podem ser parcialmente reinvestidas na instrumentação gradual da rede, criando um ciclo positivo que aumenta a eficácia do método e os recursos de monitoramento da concessionária ao longo do tempo.

## CONCLUSÃO

Este estudo propôs um método integrado (modelagem hidráulica simplificada com o índice  $PRP$ ) para priorizar setores críticos em redes com escassez de dados, convertendo dados de topografia, setorização, populacionais e sobre demandas em classificações de risco de vazamentos. No estudo de caso em rede em região acidentada, o método identificou setores prioritários nos quais as pressões simuladas dos nós excederam limites sustentáveis – direcionando intervenções emergenciais em áreas críticas e monitoramento preventivo de longo prazo.

Apesar de simplificações (ex.: um único padrão de demanda), a abordagem demonstrou valor operacional imediato ao gerar camadas de risco a partir de dados esparsos, alinhando-se às metas de sustentabilidade por melhoria da eficiência hidroenergética e pela otimização de recursos.

Trabalhos futuros podem ser realizados no sentido de incorporar novos dados operacionais de medições e técnicas de *machine learning* para refinamento estratégico, testar a adaptabilidade em redes topograficamente contrastantes (planícies vs. montanhas), e de validar a aplicabilidade entre os resultados de modelos ideais e as realidades operacionais de operadoras.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por meio de uma bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 12.218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT.

Ávila, C. A. M., Sánchez-Romero, F.-J., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2021). Leakage Management and Pipe System Efficiency. Its Influence in the Improvement of the Efficiency Indexes. *Water*, 13(14), 1909. <https://doi.org/10.3390/w13141909>

Berardi, L., & Giustolisi, O. (2021). Calibration of design models for leakage management of water distribution networks. *Water Resources Management*, 35(8). <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02847-x>

Brasil. (2020). Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras disposições. Presidência da República.

Di Nardo, A., Boccelli, D. L., Herrera, M., Creaco, E., Cominola, A., Sitzenfreni, R., & Taormina, R. (2021). Smart urban water networks: Solutions, trends and challenges. *Water*, 13(4), 501. <https://doi.org/10.3390/w13040501>

Hammond, C., Good, R., & Loge, F. (2024). Economically optimal leak management: Balancing pressure reduction, energy recovery, and leak detection and repair. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6428>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). Censo Demográfico 2010: Características gerais da população, religião e deficiência. Brasília: IBGE.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). Censo Demográfico 2020: Questionário da amostra. Brasília: IBGE.

Leinaes, A., Simukonda, K., & Farmani, R. (2024). Calibration of intermittent water supply systems hydraulic models under data scarcity. *Water Supply*, 24(5), 1626–1644. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.075>

Lopez, L. L., van Zyl, J. E., & Harkness, B. (2024). Analysis and modeling of pressure pipe failures in Auckland, New Zealand. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150(4), 04024007. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6242>

Ministério das Cidades. (2022a). Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB): Relatório de avaliação anual. Brasília: Ministério das Cidades.

Ministério das Cidades. (2022b). Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS): Diagnóstico dos serviços de água e esgoto. Brasília: Ministério das Cidades.



Netto, A., & y Fernández, M. F. (2018). Manual de hidráulica. Editora Blucher.

Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I. C., Celis, J., Blanco, L. C., Cotes, I., Ward, S., & Kapelan, Z. (2020). Water-loss management under data scarcity: Case study in a small municipality in a developing country. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(3), 05020001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001162](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001162)

Romero-Ben, L., Alves, D., Blesa, J., Cembrano, G., Puig, V., & Duviella, E. (2023). Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective. *Annual Reviews in Control*, 55, 392–419. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.012>

Taiwo, R., Shaban, I. A., & Zayed, T. (2023). Development of sustainable water infrastructure: A proper understanding of water pipe failure. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136653. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136653>

Wan, X., Kuhanestani, P. K., Farmani, R., & Keedwell, E. (2022). Literature review of data analytics for leak detection in water distribution networks: A focus on pressure and flow smart sensors. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(10), 03122002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001597](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001597)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2017). *NBR 12.218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público: Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT.

ÁVILA, C.A.M.; SÁNCHEZ-ROMERO, F.-J.; LÓPEZ-JIMÉNEZ, P.A.; PÉREZ-SÁNCHEZ, M. (2021). “Leakage Management and Pipe System Efficiency. Its Influence in the Improvement of the Efficiency Indexes”. *Water* 13(14), p. 1909.

BERARDI, L.; GIUSTOLISI, O. (2021). “Calibration of design models for leakage management of water distribution networks”. *Water Resources Management* 35(8).

BRASIL. (2020). Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras disposições. Presidência da República.

DI NARDO, A. et al. (2021). “Smart urban water networks: Solutions, trends and challenges”. *Water* 13(4).

HAMMOND, C.; GOOD, R.; LOGE, F. (2024). “Economically optimal leak management: Balancing pressure reduction, energy recovery, and leak detection and repair”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2010). Censo Demográfico 2010: Características gerais da população, religião e deficiência. Brasília: IBGE.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2024). Censo Demográfico 2020: Questionário da amostra. Brasília: IBGE.

LEINÆS, A.; SIMUKONDA, K.; FARMANI, R. (2024). “Calibration of intermittent water supply systems hydraulic models under data scarcity”. *Water Supply* 24(5), pp. 1626-1644.

LOPEZ, L.L.; VAN ZYL, J.E.; HARKNESS, B. (2024). “Analysis and modeling of pressure pipe failures in Auckland, New Zealand”. *Journal of Water Resources Planning and Management* 150(4).

MINISTÉRIO DAS CIDADES. (2022a). *Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB): Relatório de avaliação anual*. Brasília: Ministério das Cidades.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. (2022b). *Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS): Diagnóstico dos serviços de água e esgoto*. Brasília: Ministério das Cidades.

NETTO, A.; Y FERNÁNDEZ, M.F. (2018). *Manual de hidráulica*. Editora Blucher.

OVIEDO-OCAÑA, E.R. et al. (2020). “Water-loss management under data scarcity: Case study in a small municipality in a developing country”. *Journal of Water Resources Planning and Management* 146(3).

ROMERO-BEN, L. et al. (2023). “Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective”. *Annual Reviews in Control* 55, pp. 392-419.

TAIWO, R.; SHABAN, I.A.; ZAYED, T. (2023). “Development of sustainable water infrastructure: A proper understanding of water pipe failure”. *Journal of Cleaner Production*, 398.

WAN, X. et al. (2022). “Literature review of data analytics for leak detection in water distribution networks: A focus on pressure and flow smart sensors”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(10).