

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTRICAS DE RESILIÊNCIA APLICADAS A REDES REAIS DE DISTRIBUIÇÃO SOB CENÁRIOS DE FALHA POR VAZAMENTO

*Ianca Peixoto Miranda^{*1}; Tainan Rodrigues Corrêa^{*1}; Débora da Silva Morais^{*1} & Maria Mercedes Gamboa-Medina^{*1}*

Abstract: The resilience of water distribution systems has emerged as a key parameter in assessing a network's ability to maintain service under hydraulic failure conditions. This study aims to compare the behavior of different resilience metrics, both hydraulic and topological, when applied to real water distribution networks under simulated leakage failure scenarios. Simulations were conducted on six macro-sectors of the city of Araraquara (São Paulo, Brazil), using EPANET integrated with the Water Network Tool for Resilience (WNTR). Failures were modeled by adding extra demands at randomly selected nodes, under varying stress levels (1%, 2%, and 3% of the pipes affected) and leakage areas ranging from 5% to 100% of pipe cross-sectional area. Three metrics were analyzed: Todini Index, water service availability, and average shortest path length. Results show a general degradation trend across all metrics with increasing stress, though a high dispersion was observed, particularly in networks composed of multiple subgraphs. This variability is strongly influenced by the failure of location and structural sensitivity of the network.

Resumo: A resiliência de sistemas de distribuição de água tem se destacado como uma métrica para a análise da capacidade de manutenção do serviço frente a falhas. Este trabalho tem como objetivo comparar o comportamento de diferentes métricas de resiliência aplicadas a redes reais de distribuição de água sob cenários simulados de falha por vazamento. As simulações foram realizadas em seis macro setores da cidade de Araraquara (SP), utilizando o EPANET acoplado ao pacote WNTR. As falhas foram representadas por inserção de demandas adicionais em nós aleatórios, considerando diferentes níveis de estresse (1%, 2% e 3% das tubulações) e variações na área relativa do vazamento (de 5% a 100%). Foram analisados três métricas: Índice de Todini, disponibilidade do serviço e comprimento médio do caminho mais curto. Os resultados evidenciam uma tendência geral de degradação das métricas com o aumento do estresse hidráulico, embora com elevada dispersão, especialmente em setores com múltiplos subgrafos. Essa variabilidade está relacionada à localização das falhas e à sensibilidade estrutural da rede.

Palavras-Chave –Resiliência; Sistemas urbanos de abastecimento; Simulação de falhas;

^{*}) Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, São Carlos – SP, (16) 3373 – 9571, iancapmiranda@usp.br¹, tainan@usp.br², morais.debora@usp.br³, mmgamboam@usp.br⁴

INTRODUÇÃO

Embora ainda não haja consenso sobre uma definição única de resiliência, há relativa convergência na literatura sobre dois elementos fundamentais: a capacidade de manter níveis mínimos de desempenho e a habilidade de recuperação do sistema após sofrer perturbações (Cimellaro *et al.*, 2016); (Hosseini; Barker; Ramirez-Marquez, 2016); (Herrera; Abraham; Stoianov, 2016). Tais propriedades tornaram a resiliência um conceito central em diversas áreas da engenharia, especialmente na análise de sistemas técnicos complexos, como redes de infraestrutura. Nesse contexto, a avaliação da resiliência depende da adoção de métricas apropriadas que permitam distinguir o comportamento de um sistema sob diferentes níveis de perturbações, o que gerou, ao longo das últimas décadas, uma variedade significativa de métricas propostas na literatura (Michaela Leštáková *et al.*, 2024).

No caso específico dos sistemas de distribuição de água, o interesse por métricas de resiliência remonta à década de 1980 (Shin *et al.*, 2018). Métricas hidráulicas, avaliam a capacidade de resposta do sistema com base na potência hidráulica excedente disponível. Por outro lado, métricas de natureza topológica, fundamentadas na teoria dos grafos, investigam propriedades estruturais como conectividade, redundância e caminhos (Leise *et al.*, 2021). Embora avanços importantes tenham sido alcançados, como a incorporação de demandas nodais em métricas topológicas para aprimorar a avaliação da resiliência (Herrera; Abraham; Stoianov, 2016), ainda há limitações relevantes.

Entendendo que o conceito de resiliência está relacionado com perturbações no sistema, é interessante a análise dos sistemas de abastecimento sob perturbações ou condições de especial estresse. É de se esperar que uma rede perturbada ou submetida a falhas opere com um nível de resiliência menor ao que teria na condição de operação normal, antes das perturbações. A quantificação de tal efeito, porém, não é simples. É comum que diferentes métricas, aplicadas ao mesmo sistema e sob o mesmo cenário de falha, produzam resultados divergentes, dificultando a interpretação prática da resiliência em sistemas reais (Alexander Fekete; Thomas Hartmann; Robert Jüpner, 2019). Essa fragmentação conceitual e metodológica reforça a importância de análises comparativas que busquem compreender como diferentes métricas respondem a um mesmo evento, que é o objetivo deste trabalho.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo calcular a curva de resiliência à medida que o impacto das falhas afeta a rede. Para isso, foram simulados, por meio de modelagem hidráulica, diversos cenários de falhas causadas por vazamentos simultâneos em seis redes reais de distribuição de água. Em cada cenário, foram calculados os valores de três métricas de resiliência. Dessa forma, foi possível comparar o comportamento das diferentes métricas aplicadas a redes reais, avaliando suas respostas frente aos diversos cenários de falhas.

MATERIAS E METODOS

Esta pesquisa busca comparar o comportamento das métricas de resiliência ao ser aplicadas a redes de distribuição de água em cenários simulados de falhas por vazamento. O estudo é baseado em modelagem matemática e hidráulica utilizando a ferramenta EPANET (Rossman, 2020) integrada ao pacote Water Network Tool for Resilience (WNTR) (Klise *et al.*, 2020). Foram selecionados seis macro setores do sistema real de uma cidade do interior de São Paulo, e neles simulados cenários de falha com três níveis de estresse e 20 tamanhos relativos de vazamento. Em todos os cenários, a resiliência foi avaliada com 3 métricas, e os resultados foram então comparados.

Simulação e cenários de falhas

Os cenários foram compostos por três níveis de estresse: 1%, 2% e 3% das tubulações afetadas simultaneamente, sendo elas selecionadas aleatoriamente. Os vazamentos nessas tubulações foram simulados por meio da inserção de demandas adicionais nos seus nós iniciais, seguindo a equação de descarga por orifício. Para representar diferentes severidades de falhas, foram considerados vazamentos com áreas relativas variando de 5% a 100% da seção transversal do tubo (20 valores). Cada combinação foi repetida 100 vezes com seleção aleatória dos trechos, totalizando 6000 simulações por setor.

Métricas de resiliência

Dentre os critérios adotados para a seleção das métricas, destacou-se a capacidade de quantificar o desempenho da rede como um todo, permitindo a caracterização da resiliência do sistema de forma integrada, e não apenas a identificação de pontos isolados de fragilidade. As métricas foram selecionadas com base em estudos da literatura e estão apresentadas na Tabela 1, considerando sua aplicação frente a cenários de falhas.

Tabela 1 – Métricas de resiliência

Categoria	Parâmetro	Descrição	Referência
Métricas Topológicas	Comprimento médio do caminho mais curto	Número mínimo de arestas entre um nó de origem e todos os outros nós da rede	(Lee; Jung, 2021)
Métricas Hidráulicas	Índice de Todini	Relação entre o excesso de potência interna na rede e a potência máxima que pode ser dissipada internamente	(Todini, 2000)
	Disponibilidade do serviço de água	Razão entre a demanda entregue e a demanda esperada em cada nó	(Shuang; Zhang; Yuan, 2014)

Representação dos grafos

Para análise de resiliência com a métrica baseada na representação das redes foram representadas como grafos, foi completada essa representação como grafos não direcionados e ponderados, nos quais os nós representam reservatórios e conexões e as arestas correspondem às tubulações. Os pesos das arestas foram definidos com base nas vazões simuladas em cada cenário, conforme sugerido por (LIU ET AL., 2017).

Estudo de caso

O estudo foi desenvolvido com base em redes reais de distribuição de água do município de Araraquara, localizado no interior do Estado de São Paulo. Cada setor foi analisado individualmente como uma rede independente, considerando suas conexões hidráulicas, reservatórios e padrões de consumo. A Figura 1 apresenta o esquema individualizado de cada setor. A Tabela 2 resume as principais características estruturais das redes, incluindo o número de nós e tubulações, quantidade de reservatórios, consumo total e número de subgrafos.

Figura 1 – Esquema individual dos Macro setores de distribuição. Fonte: Adaptado de Miranda 2024

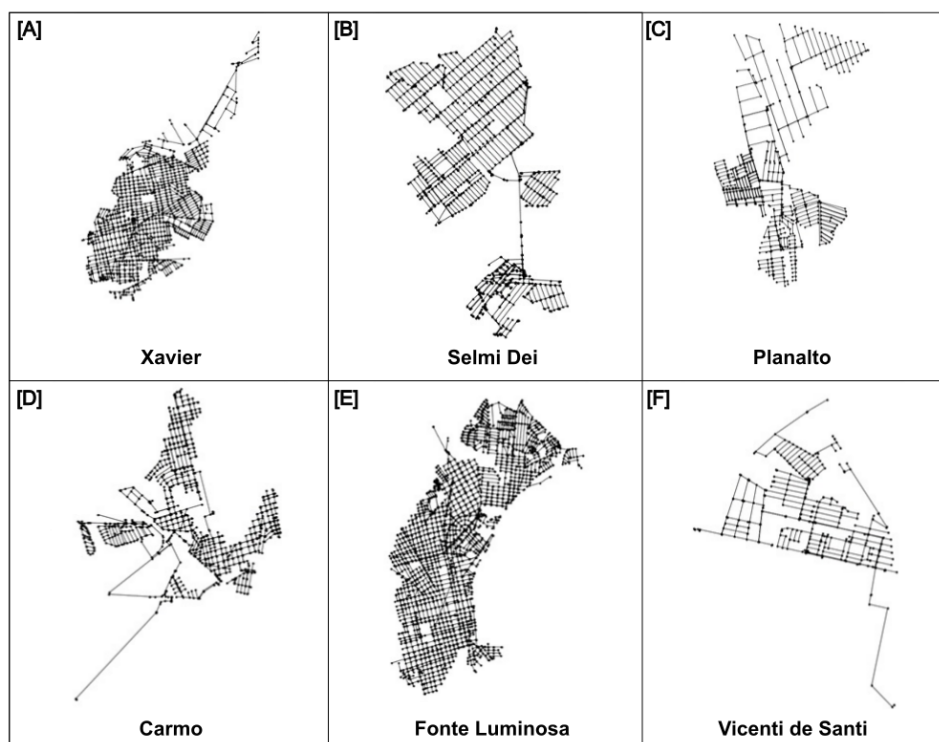


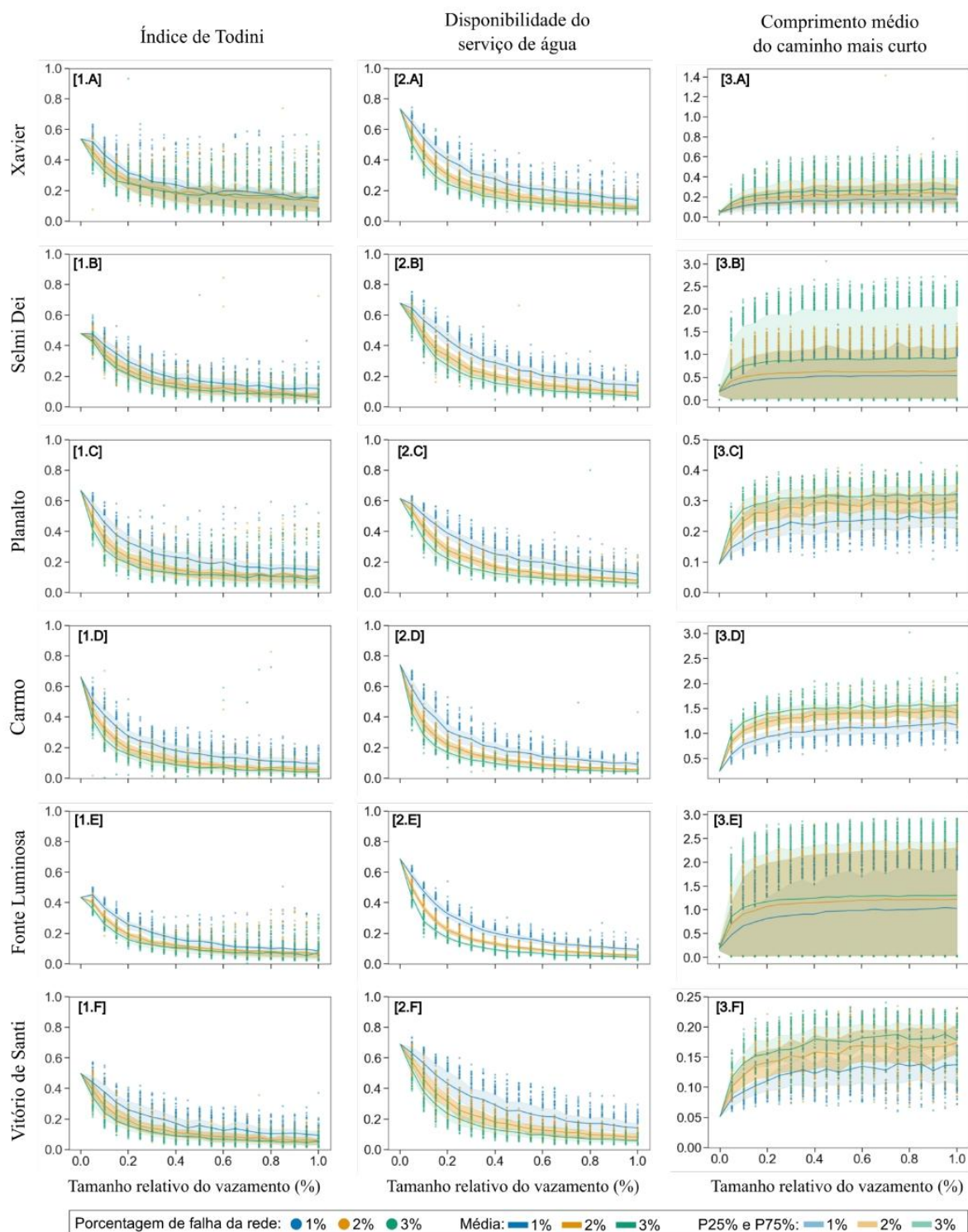
Tabela 2 – Propriedades gerais dos macrosetores de distribuição

Setor	Nº de nós	Nº de tubos	Reservatórios	Consumo total (m ³ /s)	Total de grafos
Xavier	3719	3637	6	0.129	2
Selmi dei	1567	1603	6	0.085	3
Planalto	1000	1052	2	0.058	1
Carmo	1908	1899	2	0.057	1
Fonte Luminosa	6348	6122	6	0.171	3
Vitório de Santi	437	457	1	0.022	1

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 2 são apresentados os resultados consolidados das métricas de resiliência (colunas) para cada uma das redes analisadas (linhas). Dentro de cada gráfico, os pontos correspondem aos cenários, as linhas a sua média, e as faixas ao intervalo de 25% a 75% deles.

Figura 2 – Resultados. Fonte: Miranda, 2024



As duas métricas hidráulicas aplicadas, índice de Todini e Disponibilidade do serviço, apresentam comportamento convergente, com queda progressiva na métrica de resiliência à medida que o tamanho dos vazamentos aumenta, independentemente da proporção de falhas na rede. Essa tendência

indica redução da capacidade da rede em manter o desempenho hidráulico sob estresse, com perdas de potência disponível (Todini) e diminuição na proporção da demanda atendida.

No entanto, a elevada dispersão dos dados simulados observada em diversos setores corrobora o apontado por Yu *et al.*, (2023), ao evidenciar que a posição dos nós impactados (e, portanto, sua importância topológica) exerce influência decisiva no valor da métrica de resiliência de redes de distribuição de água. Mesmo sob o mesmo percentual de falha e severidade de vazamento, a posição dos nós afetados pode levar a respostas altamente distintas, afetando pressão, vazão e conectividade local. Esse resultado é evidente na dispersão dos resultados, que se mantém para diferentes tamanhos de vazamento, porém é menos importante quando a quantidade de trechos afetados é maior, por conta de maior chance de que nós de alto impacto sejam afetados em maior quantidade das repetições.

Por outro lado, a métrica topológica de Comprimento médio do caminho mais curto apresenta comportamento inverso, com aumento sistemático dos valores conforme cresce o tamanho relativo do vazamento. Esse resultado indica que, sob falha, a rede precisa recorrer a caminhos mais longos e complexos para manter a conectividade entre os nós consumidores e os reservatórios. Esse comportamento é consistente com a literatura (Anchieta *et al.*, 2023) e reflete o aumento da complexidade estrutural do sistema em resposta a perturbações.

Entretanto, essa métrica demonstrou ser altamente sensível à estrutura do grafo, especialmente nos macros setores com múltiplos subgrafos, como Fonte Luminosa e Selmidei (com três subgrafos), Xavier (com dois subgrafos). Nestes casos, as simulações apresentaram alta variabilidade, com sobreposição das faixas interquartis (P25–P75) e amplos intervalos de dispersão. Esse comportamento ocorre porque, para o cálculo de comprimento médio do caminho mais curto, é necessário que o grafo esteja conectado Nyblom (2014).

É importante destacar que, embora os gráficos de médias indiquem uma tendência de degradação da resiliência com o aumento do estresse hidráulico, a sobreposição estatística entre os diferentes níveis de falha (1%, 2%, 3%) em diversos casos sugere que a posição dos trechos afetados é tão ou mais determinante que a quantidade de falhas. Ou seja, o impacto de uma falha localizada em um nó de alta criticidade pode ser superior ao de múltiplas falhas em áreas periféricamente conectadas.

Esses achados sustentam a hipótese proposta neste estudo: redes com falhas tendem a apresentar níveis reduzidos de resiliência em relação ao estado inicial, mas essa degradação não ocorre de forma uniforme nem previsível apenas pelo percentual de falha. O comportamento das métricas varia conforme a estrutura da rede, a severidade dos vazamentos e a posição topológica das falhas, o que reforça a importância de uma abordagem multidimensional para a avaliação da resiliência.

CONCLUSÃO

Com os resultados para métricas de resiliência de redes reais sob diversos cenários de falhas com vazamentos simultâneos, verificamos que se a rede precisa operar após esses falhos sua resiliência resulta prejudicada em relação à condição sem falhos. Porém, considerando a elevada dispersão dos dados diante do cenário de falhas, observa-se que a quantificação da resiliência não pode ser definida com base em um modelo associado a uma única localização de falha. A posição dos vazamentos apresenta influência significativa nas métricas de resiliência, mesmo quando se considera o mesmo nível de estresse na rede e a área relativa dos vazamentos. É também de notar que as duas métricas baseadas na hidráulica (Índice de Todini e Disponibilidade do serviço) tem um comportamento semelhante para os cenários analisados, enquanto a métrica de Comprimento de caminho mais curto tem uma dispersão ainda maior e menor consistência dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER FEKETE; THOMAS HARTMANN; ROBERT JÜPNER. Resilience: On-going wave or subsiding trend in flood risk research and practice? [s. l.], v. 7, 2019. <https://doi.org/10.1002/wat2.1397>.
- ANCHIETA, T.; MEIRELLES, G.; CARPITELLA, S.; BRENTAN, B.; IZQUIERDO, J. Water distribution network expansion: an evaluation from the perspective of complex networks and hydraulic criteria. **Journal of Hydroinformatics**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 628–644, 1 maio 2023. <https://doi.org/10.2166/hydro.2023.080>.
- CIMELLARO, G. P.; TINEBRA, A.; RENSCHLER, C.; FRAGIADAKIS, M. New Resilience Index for Urban Water Distribution Networks. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], v. 142, n. 8, p. C4015014, ago. 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001433).
- HERRERA, M.; ABRAHAM, E.; STOIANOV, I. A Graph-Theoretic Framework for Assessing the Resilience of Sectorised Water Distribution Networks. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 1685–1699, mar. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1245-6>.
- HOSSEINI, S.; BARKER, K.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. A review of definitions and measures of system resilience. **Reliability Engineering & System Safety**, [s. l.], v. 145, p. 47–61, jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.08.006>.
- KLISE, K.; HART, D.; BYNUM, M.; HOGGE, J.; HAXTON, T.; MURRAY, R.; BURKHARDT, J. **Water Network Tool for Resilience (WNTR). User Manual, Version 0.2.3**, n. SAND--2020-9301R, EPA/600/R--20/185, 1660790. [S. l.: s. n.], 1 set. 2020. DOI 10.2172/1660790. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1660790/>. Acesso em: 14 mar. 2024.
- LEE, S.; JUNG, D. Shortest-Path-Based Two-Phase Design Model for Hydraulically Efficient Water Distribution Network: Preparing for Extreme Changes in Water Availability. **IEEE Access**, [s. l.], v. 9, p. 53358–53369, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070722>.
- LEISE, P.; NIESSEN, P.; SCHULTE, F.; DIETRICH, I.; KIRCHNER, E.; PELZ, P. F. Potentials and Challenges of Resilience as a Paradigm for Designing Technical Systems. In: PELZ, P. F.; GROCHE, P. (orgs.). **Uncertainty in Mechanical Engineering**. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 47–58. DOI 10.1007/978-3-030-77256-7_5. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-77256-7_5. Acesso em: 29 abr. 2025.
- LIU, H.; SAVIĆ, D. A.; KAPELAN, Z.; CREACO, E.; YUAN, Y. Reliability Surrogate Measures for Water Distribution System Design: Comparative Analysis. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [s. l.], v. 143, n. 2, p. 04016072, fev. 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000728](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000728).
- MICHAELA LEŠTÁKOVÁ; KEVIN T. LOGAN; IMKE-SOPHIE REHM; PETER F. PELZ; JOHN FRIESEN; ; PETER F. PELZ; ; JOHN FRIESEN. Do resilience metrics of water distribution systems really assess resilience? A critical review. [s. l.], v. 248, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120820>.

ROSSMAN, L. A. EPANET 2.0 Manual do Usuário. [s. l.], , p. 201, [s. d.]. .

SHIN, S.; LEE, S.; JUDI, D.; PARVANIA, M.; GOHARIAN, E.; MCPHERSON, T.; BURIAN, S. A Systematic Review of Quantitative Resilience Measures for Water Infrastructure Systems. **Water**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 164, 7 fev. 2018. <https://doi.org/10.3390/w10020164>.

SHUANG, Q.; ZHANG, M.; YUAN, Y. Node vulnerability of water distribution networks under cascading failures. **Reliability Engineering & System Safety**, [s. l.], v. 124, p. 132–141, abr. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.12.002>.

TODINI, E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. **Urban Water**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 115–122, jun. 2000. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00049-2).

YU, X.; WU, Y.; ZHOU, X.; LIU, S. Resilience evaluation for water distribution system based on partial nodes' hydraulic information. **Water Research**, [s. l.], v. 241, p. 120148, ago. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120148>.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.