

IDADE DA ÁGUA COMO INDICADOR DE QUALIDADE E GESTÃO: COMPARAÇÃO ENTRE REDES DE DISTRIBUIÇÃO BENCHMARKS ORIGINAIS E SETORIZADOS

*Lorena Lemos Dias Lara¹; Fernando das Graças Braga da Silva²; Sara Maria Marques³;
Alex Takeo Yasumura Lima Silva⁴; Cláudio Abiar Lourenço⁵ & Felipe Carlos Netto⁶*

RESUMO – O tempo de permanência da água em redes de distribuição afeta diretamente a qualidade do recurso hídrico que abastecerá os consumidores. Alterações na dinâmica hidráulica após a setorização, decorrentes do fechamento de tubulações de fronteira, podem influenciar na renovação da água na rede e elevar a idade da água em regiões ou pontos específicos. Neste trabalho avaliou-se o impacto da setorização sobre a idade da água em cinco redes benchmark. Foram selecionados estudos que propõem métodos de setorização e apresentam as tubulações que receberam válvulas de fechamento, após isso foram feitas simulações de cenários originais e setorizados, em ambiente integrado EPANET-Python, para comparação do tempo de permanência. As simulações foram realizadas para 168h, considerando a média das últimas 48h como condição representativa de regime estável. Os resultados indicaram que, de maneira geral, a setorização não promoveu alterações significativas nos padrões globais de qualidade da água. Contudo, algumas configurações ocasionaram regiões/pontos localizados de baixa renovação hidráulica. Estudos que consideraram a idade da água no processo de otimização apresentaram desempenho superior quanto a limitação de pontos críticos na rede.

Palavras-Chave – Qualidade da água. WNTR. Distritos de Medição e Controle.

ABSTRACT– Water residence time in water distribution networks directly affects the quality of the water supplied to consumers. Changes in hydraulic behavior after sectorization, resulting from the closure of boundary pipes, may influence water renewal within the network and increase water age in specific regions or nodes. This study evaluated the impact of sectorization on water age in five benchmark networks. Studies proposing sectorization methods and presenting the pipes subjected to boundary valve closure were selected. Subsequently, simulations of both original and sectorized scenarios were performed in an integrated EPANET-Python environment to compare water residence time conditions. Simulations were carried out over a 168h period, considering the average values from the last 48h as representative of stable operating conditions. The results indicated that, in general, sectorization did not promote significant changes in the overall water quality patterns. However, some configurations produced localized regions/nodes with low hydraulic renewal. Studies that incorporated water age into the optimization process showed superior performance in limiting critical points within the network.

Key-words – Water quality. WNTR. District Metered Areas.

1) Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG. E-mail: lorenaldlara@unifei.edu.br

2) Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG. E-mail: fernandobraga@unifei.edu.br

3) Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG. E-mail: saramarques.eng.civil@gmail.com

4) Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Itabira-MG, Email: alex.takeo@unifei.edu.br

5) Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG. E-mail: claudioabiar@unifei.edu.br

6) Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG. E-mail: felipe_carlos_netto@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Qualidade da água é o termo usado para se referir à condição e adequação do recurso hídrico para consumo humano. Para assegurar a qualidade da água, diferentes critérios físicos, químicos e biológicos são usualmente monitorados, tanto na saída das estações de tratamento quanto ao longo das redes de distribuição de água (RDAs) (Díaz e González, 2025). A modelagem de qualidade da água possibilita a verificação de condições atuais e a previsão de efeitos de mudanças na RDA, analisando parâmetros de idade ou de concentrações de desinfetantes/contaminantes que podem ajudar os gestores a entender a operação do sistema (US Environmental Protection Agency, 2023).

O parâmetro de qualidade da água mais simples que se pode simular é o de idade da água, ou tempo de residência, que é a quantificação da duração do tempo que um volume discreto de água está na RDA antes de ser consumido ou perdido por vazamento. Embora esse parâmetro não especifique a qualidade geral da água potável distribuída, sendo medido desde o momento em que a água sai da fonte até alcançar o nó de demanda (Burkhart e Janke, 2023; Rossman *et al.*, 2020), é frequentemente um substituto, uma vez que diversos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no interior das RDAs são diretamente influenciados pelo tempo (Díaz e González, 2025).

A idade da água é influenciada tanto pelo design e operação da RDA quanto pelas demandas de consumo associadas, que possuem natureza estocástica (Díaz e González, 2026). A tendência é de que a idade da água seja maior em condições de baixo consumo e em áreas mais distantes às fontes de água da RDA, sendo este parâmetro um fator importante na diminuição do cloro e na formação de subprodutos de desinfecção em sistemas de distribuição (Chenevey, 2022; Salomons *et al.*, 2025).

O consenso entre os estudos é de que, para qualidade mais elevada do recurso hídrico que irá abastecer o consumidor final, a água permaneça pelo menor tempo possível na RDA, não havendo, no entanto, concordância em relação a limites de tempo máximo de permanência (Armand *et al.*, 2018). Na prática, a idade da água pode variar de algumas horas a vários dias, dependendo das características da rede.

As RDAs são sistemas extremamente complexos e alterações, mesmo que locais, influenciam em mudança no comportamento hidráulico como um todo. Uma dessas intervenções que modifica o design e a dinâmica das RDAs é a divisão em áreas menores, os Distritos de Medição e Controle (DMCs), proporcionando a localização mais rápida de vazamentos na rede, monitoramento e o controle de pressões, resultando na redução em perdas de água (Bui *et al.*, 2020).

A setorização é implementada pela instalação de medidores de fluxo e válvulas de fechamento de fronteiras, alterando a resposta hidráulica da rede. Embora seja eficaz no controle de perdas, essa estratégia pode favorecer a formação de trechos com baixa renovação de água (ou “pontas secas”)

aumentando a idade média e a probabilidade de incidentes de descoloração (Armand *et al.*, 2018; Dias *et al.*, 2017; Kourbasis *et al.*, 2020; Patelis *et al.*, 2020). Chondronasios *et al.* (2017), Dias *et al.* (2017), Grayman *et al.* (2009) e Liu e Lansey (2020) não encontraram mudança significativa na métrica geral de idade da água antes e depois de setorizar uma RDA, porém Bui *et al.* (2020) ressaltam que podem haver variações significativas na idade da água em nós de demanda devido ao fechamento de válvulas e Díaz e González (2026) ainda ressaltam o comportamento aleatório que esse parâmetro apresenta, devendo ser caracterizado para identificar áreas potencialmente críticas.

Os métodos de particionamento de RDAs são estudados a partir da proposição de algoritmos e redes neurais para lidar com tamanha quantidade de dados, variáveis e com o dinamismo intrínseco desses sistemas. No entanto, nem sempre os métodos de otimização consideram a idade da água como um parâmetro de restrição ou de otimização nos processos de simulação hidráulica (Armand *et al.*, 2018; Patelis *et al.*, 2020). Armand *et al.* (2018) sugerem que isso é explicado pelo impacto pouco conhecido da setorização das RDAs e pela ambiguidade das variáveis (e restrições) que precisam ser incorporadas nas formulações do problema.

As discussões sobre águas urbanas, embora tradicionalmente associadas aos sistemas de drenagem e aos corpos hídricos urbanos, também abrangem os sistemas de abastecimento de água, que constituem infraestrutura essencial para a segurança hídrica das cidades. Nesse contexto, a avaliação da qualidade da água distribuída à população, incluindo aspectos relacionados ao tempo de permanência da água nas RDAs, contribui para o planejamento e a operação sustentável dos sistemas urbanos de abastecimento, alinhando-se aos princípios de gestão integrada das águas urbanas.

Diante das incertezas associadas aos efeitos da setorização sobre a idade da água, este trabalho compara o comportamento da idade da água em modelos *benchmark* de RDA em seus respectivos estados originais (sem setorização) e setorizados (com a implementação de DMCs). O objetivo é compreender como alterações estruturais decorrentes da implantação de DMCs afetam a dinâmica de renovação da água na rede.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho foi organizada em três etapas: Etapa 1 – Seleção de estudos relacionados à setorização de RDAs *benchmark* com identificação de tubulações de fronteira submetidas a fechamento; Etapa 2 – Simulação da idade da água tanto nas configurações originais das RDAs quanto após a setorização, utilizando ambiente integrado entre o EPANET e o Python; e Etapa 3 – Análise de resultados.

Etapa 1 – Seleção de estudos relacionados à setorização de RDAs *benchmark* com identificação de tubulações de fronteira submetidas a fechamento

Foram selecionadas cinco redes *benchmark* com diferentes características hidráulicas e topológicas – Balerma (Reca e Martínez, 2006), C-Town (Ostfeld *et al.*, 2012), Exnet (Farmani *et al.*, 2004), Modena (Bragalli *et al.*, 2008) e Wolf-Cordera Ranch (WCR) (Lippai, 2005) – e, em seguida, identificados na literatura estudos de setorização aplicados a essas RDAs, que expusessem as tubulações de fronteira fechadas, cujos índices são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Síntese dos estudos selecionados e identificadores das tubulações de fronteira fechadas

Rede benchmark	Estudo	Considera idade da água	Índice das tubulações fechadas
Balerma	Shekofteh <i>et al.</i> (2023)	Não	(a) 174; 366; 457
			(b) 128; 363; 366
			(c) 174; 366
	Lara (2025)	Não	221; 480
C-Town	Pesantez <i>et al.</i> (2019)	Não	PU8; P12; P1000
	Liu e Lansey (2020)	Sim	P39; P1027; P1030
	Shekofteh <i>et al.</i> (2023)	Não	P19; P102
Exnet	Shekofteh <i>et al.</i> (2023)	Não	2263; 2296; 2313; 2564; 2619; 2796; 2998; 3417; 3443; 3970; 4153; 5261; 5271
			4; 27; 205; 254
			1; 85; 116; 147; 153; 191; 206; 273; 247; 254
Modena	Shekofteh <i>et al.</i> (2023)	Não	23; 26; 58; 83; 108; 144; 154; 302
	Anchieta <i>et al.</i> (2024)	Sim	(a) 13; 26; 301
			(b) 17; 27; 28; 56; 116; 124; 214; 237; 243; 249; 269
	Riyahi <i>et al.</i> (2024)	Não	3; 16; 27; 56; 116; 174; 199; 231; 247; 293
	Jacome <i>et al.</i> (2025)	Não	(a): 7; 27; 194; 210; 223; 272; 276 (b): 7; 194; 223; 247; 271; 276 (c): 11; 29; 201; 267; 276; 301 (d): 11; 223; 247; 271 (e): 247
Wolf-Cordera Ranch	Han e Liu (2017)	Não	2076; 2150; 2173; 2184; 2232; 2271; 2036; 2038; 7013; 7070; 7120; 7177; 7180; 7189; 7198; 7437; 7438; 7441; 7489; 7490; 7498; 7826; 7840; 7851; 7853; 7862; 7868; 7890; 7916; 21074; 21083; 21276; 21280; 21292; 21300; 21336; 21340; 71469; 71648; 71764
	Shekofteh <i>et al.</i> (2023)	Não	4002; 7070; 21209; 21827; 22167; 71564

Etapa 2 – Simulação da idade da água tanto nas configurações originais das RDAs quanto após a setorização, utilizando ambiente integrado entre o EPANET e o Python

Para simulação da idade da água das RDAs em condições originais e setorizadas utilizou-se a biblioteca *Water Network Tool for Resilience* (WNTR) – versão 1.4.0, desenvolvida em Python pela *United States Environmental Protection Agency* em parceria com a *Sandia National Laboratories* (Klise *et al.*, 2017).

O WNTR utiliza o motor de simulação do EPANET (*EpanetSimulator*) para realizar as simulações de idade da água. Esse simulador emprega uma abordagem temporal lagrangiana para acompanhar o deslocamento de parcelas discretas de água ao longo das tubulações, bem como sua mistura nos nós da rede, considerando intervalos de tempo previamente definidos. Internamente, o EPANET representa a idade da água com um constituinte reativo cujo aumento é descrito por uma cinética de ordem zero, adotando uma constante de taxa unitária, de modo que a cada segundo de simulação a água acumula um segundo de envelhecimento (Rossman *et al.*, 2020).

As simulações das RDAs foram feitas para um período de 168h de duração sendo os resultados de idade da água obtidos a partir da média calculada nas últimas 48h. A adoção desse período visa garantir a superação dos efeitos de inicialização e a representação de um regime operacional mais estável, condição necessária para a obtenção de estimativas confiáveis da idade da água (Chenevey, 2022; Salomons *et al.*, 2025).

Etapa 3 – Análise de resultados

A análise de resultados foi realizada a partir da comparação da idade da água entre os cenários originais e setorizados das RDAs *benchmark* selecionadas. Para isso, empregou-se gráficos do tipo *violin plot*, elaborados em ambiente Python permitindo representar simultaneamente a densidade de distribuição de dados, sua dispersão e as medidas de tendência central.

Adicionalmente, foram identificados os nós de demanda associados às maiores idades da água em cada cenário, buscando-se verificar possíveis regiões críticas relacionadas à baixa renovação de água após a setorização.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade de distribuição das idades médias das últimas 48h de simulação para cada um dos cenários das RDAs está representada nos gráficos de violino (*violin plots*) da Figura 1. De modo geral, os estudos de setorização aplicados à rede Balerna – Figura 1 (a) – não provocaram alterações expressivas nas medidas de tendência central, com exceção da proposta de Lara (2025) que reduziu ambas as métricas. Apesar de relativa estabilidade dessas medidas, observa-se que o formato das distribuições variou entre os cenários analisados, indicativo de que posicionamento de válvulas em locais diferentes, leva a comportamentos hidráulicos diferentes.

A rede Exnet também não apresentou alterações expressivas nas métricas de tendência central avaliadas após a setorização de Shekofteh *et al.* (2023), mantendo, como mostra a Figura 1 (b), a mesma silhueta de violino que a simulação da rede em condições originais de operação. O mesmo foi observado para as simulações feitas para a rede WCR – Figura 1 (d).

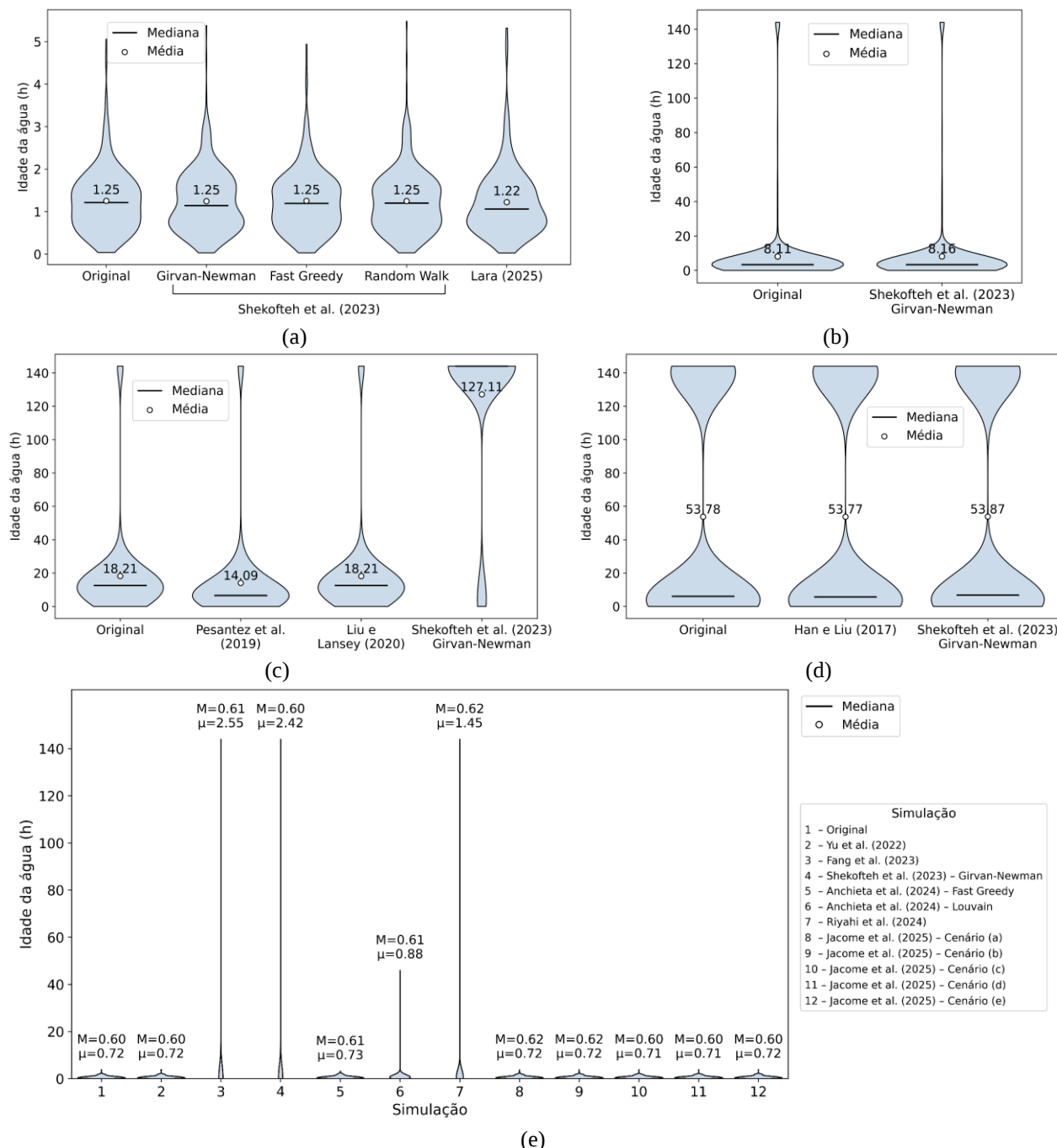


Figura 1 – Violin plot dos dados de idade média nas últimas 48h de simulação: (a) Balerna; (b) Exnet; (c) C-Town; (d) Wolf-Cordera Ranch; (e) Modena

Na rede C-Town, o estudo de Pesantez *et al.* (2019) foi o único que promoveu redução da média da idade da água atingindo 14,09h, diminuição correspondente a 22,62%, além de apresentar distribuição mais concentrada em valores baixos – Figura 1 (c) – sugerindo que a configuração

setorizada favoreceu a renovação da água da rede. Em Liu e Lansey (2020) o comportamento da rede setorizada manteve-se muito similar ao do cenário original. Em contrapartida, a configuração proposta por Shekofteh *et al.* (2023) para a rede C-Town apresentou comportamento distinto daquele observado nos demais cenários, com grande concentração de nós de demanda exibindo idades superiores a 100h, e idade média de 127,11h. Esse resultado indica potencial comprometimento da qualidade da água distribuída aos consumidores, além da formação de regiões com baixa renovação hidráulica causada possivelmente pela criação de DMCs que reduzem a circulação após fechamento de tubulações.

De maneira geral, a rede Modena apresentou, as menores médias do tempo de permanência da água dentre todos os *benchmarks* analisados, na Figura 1 (e) verifica-se que o valor da métrica esteve abaixo de 1h em grande parte das configurações examinadas, com exceção dos cenários de setorização propostos por Fang *et al.* (2023), Riyahi *et al.* (2024) e Shekofteh *et al.* (2023), estudos nos quais há presença de *outliers*. A visualização da silhueta dos violinos foi prejudicada pela discrepância das simulações correspondentes a esses estudos (3, 4 e 7), que alongaram o eixo y de forma a distorcer a representação dos demais. No entanto, as medidas de tendência central similares e os pontos de idade máxima das demais simulações são um indicativo de que, excetuando as propostas 3, 4 e 7, a setorização não acarretou em alterações significativas na idade da água.

A Figura 2 destaca os nós da rede C-Town nos quais a idade máxima da água superou 48h. observa-se que a rede original já apresentava duas regiões (uma a nordeste e outra mais ao centro) nas quais os nós atingiam idades superiores a 48h. Essas áreas foram mantidas após as setorizações de Pesantez *et al.* (2019) e Liu e Lansey (2020) com acréscimo de idade também em nós de uma área próxima à uma tubulação fechada após a proposta de Pesantez *et al.* (2019), localizada na porção oeste da C-Town.

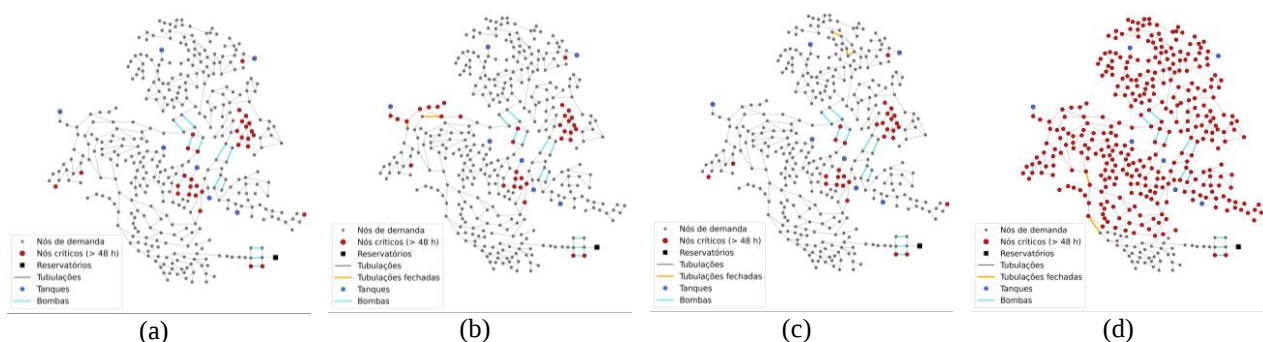


Figura 2 – Destaque de nós em C-Town com idade máxima superior a 48h: (a) original; (b) Pesantez *et al.* (2019); (c) Liu e Lansey (2020) e (d) Shekofteh *et al.* (2023)

A configuração proposta por Shekofteh *et al.* (2023) resultou na maioria dos nós apresentando idades críticas. Isso pode estar associado à adoção de análise de período único para o desenvolvimento

da setorização, abordagem que tende a desconsiderar condições de baixa demanda e possíveis regiões de estagnação hidráulica ao longo da operação da rede, isso interfere no processo de locação adequada de válvulas e consequentemente, o funcionamento hidráulico geral.

A setorização da rede Exnet feita por Shekofteh *et al.* (2023) resultou em elevação da idade para níveis acima de 48h apenas no nó 691, ponto ligado a uma tubulação de fronteira que recebeu uma válvula, criando uma ponta seca. Como pode ser observado nos destaques da Figura 3, a rede Modena também sofreu sutis mudanças após a setorização.

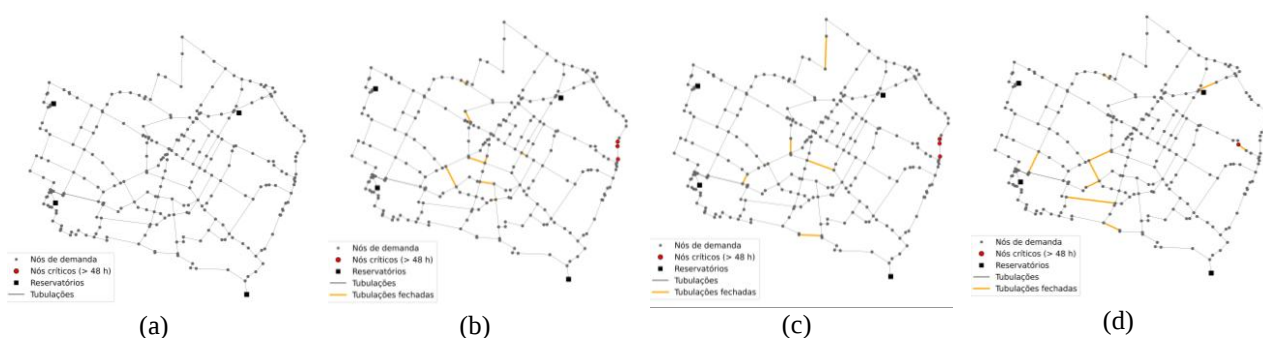


Figura 3 – Destaque de nós em Modena com idade máxima superior a 48h: (a) original; (b) Fang *et al.* (2023); (c) Shekofteh *et al.* (2023); (d) Riyahi *et al.* (2024)

A rede Modena original não possui pontos com idades máximas superiores a 48h. Após a definição de DMCs feita por Fang *et al.* (2023) e por Shekofteh *et al.* (2023) os nós 176, 225 e 226 foram destacados como críticos. Embora essas duas abordagens possuam diferentes tubulações fechadas, elas provavelmente alteram a circulação hidráulica da rede de forma semelhante. Já a simulação da proposta de Riyahi *et al.* (2024) apresentou apenas um ponto crítico (nó 174) também localizado ao encontro de uma tubulação de fronteira fechada. Diferentemente da configuração original da rede Modena, a WCR apresenta elevada incidência de nós com idade máxima superior a 48h distribuídos praticamente por toda extensão da RDA, como mostra a Figura 4 (a).

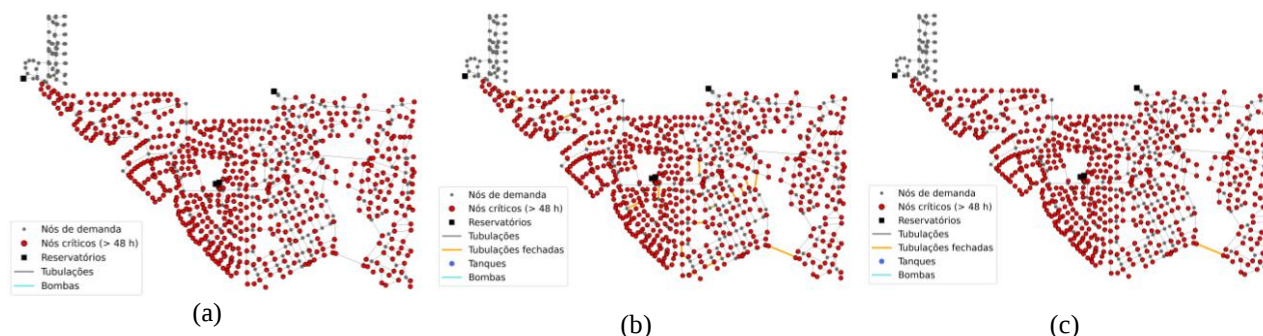


Figura 4 – Destaque de nós em WCR com idade máxima superior a 48h: (a) original; (b) Han e Liu (2017); (c) Shekofteh *et al.* (2023)

Após a aplicação das setorizações na WCR, a distribuição espacial dos nós críticos permaneceu bastante semelhante às condições originais da rede, corroborando com o gráfico de violino exibido na Figura 1 (d). O fechamento das tubulações de fronteira não exerceu influência significativa no

padrão global de renovação de água na rede. Os nós críticos da WCR são pontas secas, ligadas a pontos de consumo usuais, nas quais a demanda é nula, o que explica o comportamento observado.

CONCLUSÕES

No geral, a setorização não acarretou em mudanças globais significativas nos padrões de idade da água das redes *benchmark* analisadas. O tempo de permanência da água pode aumentar em regiões ou pontos específicos a depender do posicionamento de válvulas proposto. Estudos que consideraram a idade da água na formulação do problema de otimização da setorização (Anchieta *et al.*, 2024 e Liu e Lansey, 2020) não apresentaram idade máxima superior a 48h. Além disso, propostas de setorização diferentes podem produzir padrões espaciais semelhantes de aumento da idade da água em pontos de sensibilidade hidráulica da rede. Não foi identificado um padrão em relação a localização de pontos críticos (superiores a 48h), estes ocorreram tanto em pontas secas que foram criadas após a instalação de válvulas, como em pontos de demanda nula e também em regiões malhadas e redundantes das RDAs analisadas.

REFERÊNCIAS

- ANCHIETA, T. F. F. *et al.* (2024). “*Optimal district metered areas design of water distribution systems: A comparative analysis among hybrid algorithms*”. Journal of Water Process Engineering, (63).
- ARMAND, H. *et al.* (2018). “*Impact of network sectorisation on water quality management*”. Journal of Hydroinformatics, (20-2), pp. 424-439.
- BRAGALLI, C. *et al.* (2008). “*Water Network Design by MINLP*”. Rep. No. RC24495.
- BUI, X. K. *et al.* (2020). “*Water Network Partitioning into District Metered Areas: A State-Of-The-Art Review*”. Water, (12-4), pp. 1002.
- BURKHART, B.; JANKE, R (2023). “*Understanding Water Age in Distribution Systems with EPANET*”. Journal AWWA, (115-2), pp. 24-34.
- CHENEVEY, B. (2022). “*Water Quality Modeling in Distribution Systems*”. Journal AWWA, (114-2), pp. 26-33.
- CHONDRONASIOS, A. *et al* (2017). “*Optimizing DMAs’ formation in a water pipe network: the water aging and the operating pressure factors*”. Journal of Hydroinformatics, (19-6), pp. 890-899
- DIAS, V. C. F. *et al.* (2017). “*Predicting Water Quality Impact After District Metered Area Implementation in a Full-Scale Drinking Water Distribution System*”. Journal AWWA, (109-9).
- DÍAZ, S.; GONZÁLEZ, J. (2025). “*Framework for the Statistical Characterization of Supplied Water Age in Water Distribution Networks*”. Water Resources Management, (39-9), pp. 4335-4359.
- DÍAZ, S.; GONZÁLEZ, J. (2026). “*Simplified Approach to Assess Supplied Water Age Variance in Branched Water Distribution Networks*”. Water Resources Management, (40-5), pp. 208.
- FANG, Q. *et al.* (2023). “*A method for water supply network DMA partitioning planning based on improved spectral clustering*”. Water Supply, (23-8), pp. 3432-3452.
- FARMANI, R. *et al.* (2004). “*Exnet benchmark problem for multi-objective optimization of large water systems*” in Venice, Italy: IFAC Workshop.
- GRAYMAN, W. *et al.* (2009). “*Effects of Redesign of Water Systems for Security and Water Quality Factors*”. In: Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

- HAN, R.; LIU, J. (2017). “*Spectral Clustering and Genetic Algorithm for Design of District Metered Areas in Water Distribution Systems*”. *Procedia Engineering*, (186), pp. 152-159.
- JACOME, R. S. et al. (2025). “*Core-periphery structure for district metered area partitioning in urban water distribution systems*”. *Water Science and Engineering*, (18-3), pp. 262–273.
- KLISE, K. A. et al. (2017). “*A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study*”. *Environmental Modelling & Software*, (95), pp. 420–431.
- KOURBASIS, N. et al. (2020). “*Optimizing Water Age and Pressure in Drinking Water Distribution Networks*”. *Environmental Sciences Proceedings*, (2-51).
- LARA, L. L. D. (2025). “*Aplicação da rede neural mapas auto-organizáveis e algoritmo genético NSGA - II à setorização de rede de distribuição de água*”. 128 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- LIPPAI, I. (2005). “*Water System Design by Optimization: Colorado Springs Utilities Case Studies*” in *Pipelines 2005: Optimizing Pipeline Design, Operations, and Maintenance in Today's Economy*, pp. 1058-1070.
- LIU, J.; LANSEY, K. E. (2020). “*Multiphase DMA Design Methodology Based on Graph Theory and Many-Objective Optimization*”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, (146-8).
- OSTFELD, A. et al. (2012). “*Battle of the Water Calibration Networks*”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, (138-5), pp. 523–532.
- PATELIS, M. et al. (2020). “*Pressure Regulation vs. Water Aging in Water Distribution Networks*”. *Water* (12-5), p. 1323.
- PESANTEZ, J. E. et al. (2019). “*Multiphase Procedure to Design District Metered Areas for Water Distribution Networks*”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, (145-8).
- RECA, J.; MARTÍNEZ, J. (2006). “*Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks*”. *Water Resources Research*, (42-5).
- RIYAH, M. M. et al. (2024). “*Coupled multi-objective optimization of water distribution network design and partitioning: a spectral graph-theory approach*”. *Urban Water Journal*, (21-6), pp. 745-756.
- ROSSMAN, L. et al. (2020). “*EPANET2.2 User Manual*”. Cincinnati, Ohio.
- SALOMONS, E. et al. (2025). “*Real-Time Optimal Operation of Water Systems Under Demand Uncertainty and Maximum Water Age Constraints*”. *Water Resources Research*, (61-7).
- SHEKOFTEH, M. R. et al. (2023). “*An Efficient Approach for Partitioning Water Distribution Networks Using Multi-Objective Optimization and Graph Theory*”. *Water Resources Management*, (37-13), pp. 5007-5022.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2023). “*Distribution System Water Quality: Use of Modeling to Protect Water Quality*”. EPA 815-F-22-011.
- YU, T. et al. (2022). “*Optimal design of district metered areas based on improved particle swarm optimization method for water distribution systems*”. *Water Supply*, (22-11), pp. 7930-7944.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pela bolsa de doutorado ID 14029; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado nº 88887.829273/2023-00; ao Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos (NUMMARH); e à Universidade Federal de Itajubá.