



METODOLOGIA MULTICRITÉRIO PARA AGRUPAMENTO DE SEGMENTOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA REABILITAÇÃO

João Caetano¹, Soraia Almeida², Nelson Carriço¹, Dídia Covas³

¹INCITE, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal,
Rua Américo da Silva Marinho, 2939-001 Lavradio, Portugal

²INFRAMOURA, E.M, Rua das Amoreiras, 8125-497 Vilamoura, Portugal

³CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, N.º
1, 1049-001, Lisboa, Portugal

¹*joao.caetano@estbarreiro.ips.pt*

RESUMO

A definição e implementação de estratégias eficazes de reabilitação de condutas de distribuição de água é essencial para contrariar o processo contínuo de deterioração das redes de distribuição de água. As atividades de manutenção e reparação, muitas vezes recorrentes sobre condutas contíguas, são realizadas fechando um conjunto de válvulas, originando assim, pequenos setores isolados da rede denominados por segmentos. Quando ocorre uma avaria numa das condutas pertencentes a um segmento é necessário suspender o seu abastecimento. Assim, qualquer intervenção realizada numa conduta é fortemente condicionada pelo conjunto de válvulas instaladas e não pela discretização da rede caracterizada no sistema de informação geográfica. No contexto da reabilitação, pretende-se a homogeneização da condição estrutural das condutas pertencentes a um determinado segmento, para que, no futuro, as intervenções sejam realizadas a nível do segmento e não ao nível de condutas isoladas, uma vez que as variáveis que influenciam o processo de deterioração passam a ser idênticas (e.g., idade, material). Este facto justifica a consideração de um segmento como unidade mínima de reabilitação. No presente artigo, é apresentada uma metodologia multicritério de agrupamento de segmentos para o planeamento de intervenções de reabilitação em redes de distribuição de água, numa perspetiva de médio e longo-prazo.

Palavras-Chave

agrupamento, planeamento a médio e longo prazo, intervenções de reabilitação

1. INTRODUÇÃO

O envelhecimento das redes de distribuição de água é um processo natural e inevitável, no qual estes sistemas apresentam múltiplos sintomas de deterioração, como elevados níveis de perdas de água e ocorrência frequentes de roturas e problemas de qualidade da água, que podem comprometer, seriamente, o funcionamento, a eficiência e a fiabilidade dos sistemas

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

como um todo [1]. Em Portugal, a maioria das entidades gestoras apresentam baixos níveis de reabilitação, originando grandes extensões de condutas em avançado estado de deterioração. O Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (RASARP) de 2022 [2] apresenta um valor de 0,6% no indicador de reabilitação de condutas (AA09b), para os sistemas em baixa, sendo este considerado insatisfatório. Adicionalmente, o índice de valor da infraestrutura (IVI) que identifica o grau de envelhecimento das infraestruturas apresenta um valor médio de 0,45 para cerca de 88% das redes de distribuição de água, em Portugal, mas cerca de 36% apresenta um valor inferior a 0,40 indicando que, a curto prazo, é crucial a realização de investimentos na reabilitação por parte das entidades gestora.

As metodologias encontradas na literatura [3]–[8] são, geralmente, aplicadas a trechos de condutas, no entanto, as entidades gestoras, não planeiam, nem implementam as atividades de reabilitação ao nível de um único trecho de conduta, mas sim a agrupamentos de condutas contíguas (muitas vezes designadas por frentes de obra), por forma a cumprir com um orçamento disponível e pré-determinado. Esta prática, implica que essas metodologias não sejam adotadas pelas entidades gestoras, surgindo assim a necessidade de investigar novas metodologias que integrem este pressuposto.

Vários trabalhos [9]–[12], salientam os benefícios económicos da integração de abordagens de agrupamento de condutas. Este artigo apresenta e demonstra através de um caso de estudo real, uma nova abordagem para apoiar o planeamento de intervenções de reabilitação em redes de distribuição de água, numa perspetiva de médio e longo-prazo, recorrendo à teoria dos grafos, no sentido de alcançar taxas de reabilitação anuais de aproximadamente 2%, o que implica que as condutas estejam em serviço cerca de 50 anos, coincidente com o tempo de vida útil esperado para o material das condutas instaladas em redes de distribuição de água.

2. METODOLOGIA

2.1 INTRODUÇÃO

A metodologia proposta é uma adaptação da formulação de um problema clássico de otimização para a definição de distritos eleitorais, que se designa por “*Political Districting*”, e permite agrupar elementos, recorrendo a uma estrutura de grafos, garantindo que as relações de contiguidade são respeitadas. Adaptando esta formulação ao problema em estudo, obtém-se uma metodologia que permite o agrupamento de segmentos contíguos de uma rede de distribuição de água, denominados por *unidades de reabilitação*, atendendo a diferentes critérios (i.e., contiguidade, homogeneização dos custos de reabilitação e da condição estrutural).

2.2 DEFINIÇÃO DE UNIDADES DE REABILITAÇÃO

A definição de unidades de reabilitação é um problema combinatório discreto, em que a complexidade aumenta significativamente em redes reais de distribuição de água e com a integração de restrições. Ao contrário da limitação financeira e condição infraestrutural, a restrição de contiguidade tem implicações profundas na forma como o problema é modelado. Neste sentido, uma abordagem comum é o recurso a uma estrutura de grafo que expressa as relações de vizinhança entre segmentos.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

A metodologia de agrupamento pode ser dividida em três procedimentos complementares, mas que obrigatoriamente devem ser aplicados de forma sequencial, sendo os procedimentos denominados: (i) definição e caracterização de segmentos, (ii) construção do grafo e (iii) otimização para agrupamento de segmentos. Estes procedimentos são descritos detalhadamente nas secções seguintes.

2.3 DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SEGMENTOS

Como referido anteriormente, os segmentos são as unidades de reabilitação. Assim, um segmento compreende todas as condutas adjacentes e conectadas, localizadas entre válvulas de secionamento, podendo ser constituídos por múltiplas condutas ou por uma única conduta, quando a mesma apresenta válvulas de secionamento em ambas as extremidades. Por outras palavras, um segmento pode ser caracterizado como o conjunto de condutas que, necessariamente, serão retiradas de serviço para reabilitar uma conduta nele contida. Isto significa que as intervenções de reabilitação estão pensadas para serem realizadas ao nível do segmento e não ao nível de condutas individuais conforme definido no SIG. Uma vez definidos os segmentos, os custos de reabilitação são calculados para cada segmento, considerando as funções de custos desenvolvidas por Marchionni et al. [13], com base no material e diâmetro da conduta. O cálculo do custo é realizado para cada conduta individual e incrementado ao custo total do respetivo segmento.

2.4 CONSTRUÇÃO DO GRAFO

O grafo de segmentos proposto por Walski [14] é utilizado para modelar a contiguidade. Formalmente, um grafo de segmentos é representado por um grafo planar, não direcionado e conectado $G = (N, E)$, onde o conjunto de nós $N = \{1, 2, \dots, n\}$ representa os segmentos e o conjunto de arcos $E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\} \subset N \times N$ representa as válvulas que conectam segmentos, onde $e_1 = \{i, j\}$, denotam dois segmentos adjacentes i e j . Segmentos conectados através de um arco denota a existência de pelo menos uma válvula de limite entre eles. As Figuras 1(a) e (c) representam, numa rede simplificada, a conversão da topologia arco-nó para a topologia segmento-válvula. Observe-se na Figura 1(a) que cada um dos oito segmentos são delimitados nas extremidades por uma ou mais válvulas de secionamento (i.e., representadas por triângulos). Cada segmento na topologia clássica arco-nó tem um nó correspondente no grafo na topologia segmento-válvula (Figura 1(b)).

2.5 OTIMIZAÇÃO PARA AGRUPAMENTO DE SEGMENTOS

Para o procedimento de agrupamento de condutas é utilizado o algoritmo de otimização NSGA-II para definir as unidades de reabilitação compostas por segmentos contíguos, com custos de reabilitação e condição estrutural homogéneos e mais próximo possível do orçamento disponível. Uma solução, resultante do algoritmo, é uma partição do grafo em conjuntos de nós que representam as várias unidades de reabilitação. A Figura 1(d) ilustra três unidades de reabilitação representadas por três cores distintas: vermelho, amarelo e verde, sendo ainda possível verificar a correspondência da topologia válvula-segmento à clássica arco-nó na Figura 1(b). Para que a contiguidade seja respeitada, o subgrafo gerado a partir dos conjuntos definidos na solução deve ter apenas um componente, ou seja, cada partição é composta por um conjunto de segmentos que estão conectados internamente, mas desconectados dos restantes nós do grafo de segmentos.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

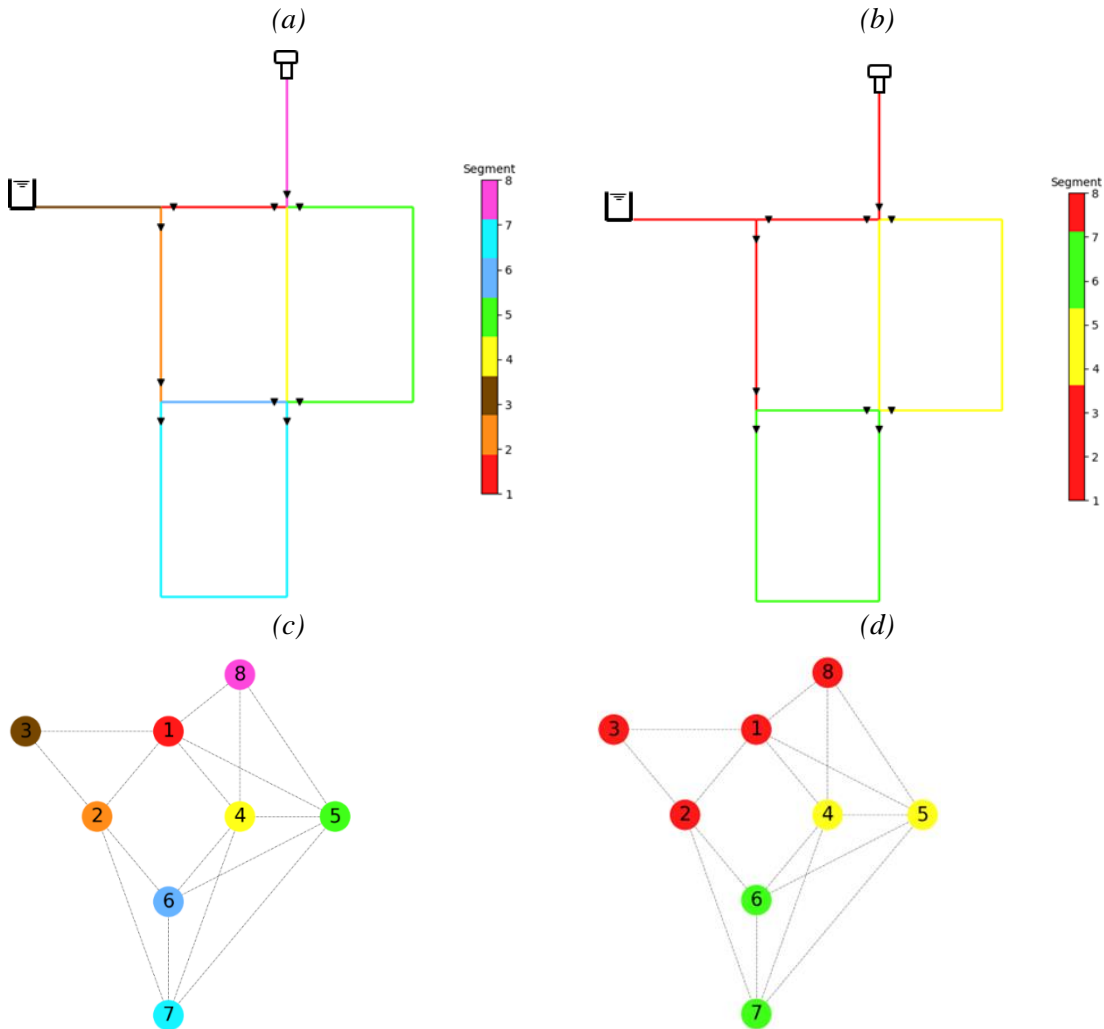


Figura 1. Rede de distribuição exemplificativa ilustrada em: (a) topologia arco-nó sem agrupamento, (b) topologia arco-nó com agrupamento, (c) topologia segmento-válvula sem agrupamento e (d) topologia segmento-válvula com agrupamento.

O critério de contiguidade é respeitado através da adaptação dos operadores genéticos no sentido de explorar as relações de vizinhança entre nós de um grafo. O critério de homogeneização dos custos de reabilitação, f_1 , permite, através da definição de um orçamento médio anual praticável, do ponto de vista financeiro, pelas entidades gestoras, minimizar os desvios ao orçamento, ou seja, permite a realização de investimentos anuais em torno de um valor definido pelos decisores, mantendo taxas de reabilitação, aproximadamente, constantes ao longo da vida útil da infraestrutura, evitando assim os picos de investimento, consequência de longos períodos marcados pela falta de investimento em reabilitação.

$$f_1 = \frac{\sum_{j=1}^{N_{RU}} \left| \sum_{i=1}^{N_j} CS_i - B \right|}{N_{RU} \cdot B} \quad (1)$$

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

onde, N_{RU} é o número de unidades de reabilitação, cs_i é o custo de intervenção no segmento i na unidade de reabilitação j e B é a disponibilidade financeira anual predefinida.

Por último, o critério de homogeneização da condição estrutural, f_2 , minimiza a possibilidade de integrar na mesma unidade de reabilitação, segmentos com condições estruturais muito distintas.

$$f_2 = \frac{1}{N_{RU}} \sum_{j=1}^{N_{RU}} \frac{\left(\frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} (arl_i - \mu_j)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\mu_j} \quad (2)$$

sendo arl_i a vida útil média remanescente das condutas que compõem o segmento um segmento i ponderada pelo respetivo comprimento, μ a média dos valores das vidas úteis médias remanescentes nos segmentos presentes na unidade de reabilitação j , e N o número de segmentos presentes na unidade de reabilitação j .

3. RESULTADOS

3.1 DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

A metodologia multicritério de agrupamento de condutas para reabilitação em redes de distribuição de água é aplicado a um caso de estudo real no Sul de Portugal. A rede em estudo foi construída, essencialmente, na década de 80 e é composta por 521 válvulas de seccionamento e, aproximadamente, 113 km de condutas com diâmetros que variam entre 60 e 700 mm de diferentes materiais, predominantemente, fibrocimento (60%) e PVC (33%).

Sabendo que o custo aproximado para a reabilitação da rede, na sua globalidade, é da ordem de 12 M€, a metodologia é aplicada tendo por base dois cenários distintos, para os investimentos médios anuais de 150 e 250 k€, a realizar durante o ciclo de vida da infraestrutura.

Por forma a acompanhar a condição estrutural de toda a infraestrutura, face às sucessivas intervenções, é realizada uma avaliação anual, através do cálculo do indicador de performance, Índice de Valor da Infraestrutura (IVI) [15], [16]:

$$IVI(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \left(rc_{i,t} \cdot \frac{rl_{i,t}}{esl_i} \right)}{\sum_{i=1}^N rc_{i,t}} \quad (3)$$

onde, t é o ano de análise, $IVI(t)$ é o índice de valor da infraestrutura no ano t , N é o número total de condutas instaladas na rede, $rc_{i,t}$ é o custo de reabilitação da conduta i no ano t , $rl_{i,t}$ é a vida útil residual da conduta i no ano t e esl_i é a vida útil expectável. Para simplificar, supõe-se que todas as condutas tenham uma vida útil expectável de 50 anos, independentemente do material.

Os resultados do procedimento de agrupamento dos 397 segmentos (i.e., nós do grafo de segmentos), considerando a disponibilidade financeira anual de 150 e 250 k€, originam 72 e 46 unidades de reabilitação, respetivamente. Estes valores representam taxas médias de reabilitação anual de aproximadamente 1.39% e 2.17%, respetivamente. Importa referir que cada unidade de reabilitação será afeta a um e apenas um ano. Assim, conclui-se que, para

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

que seja possível completar um ciclo de investimento, ou seja, para que toda a infraestrutura seja reabilitada, serão necessários 72 e 46 anos, respetivamente. A Figura 2 ilustra a priorização das unidades de reabilitação ao longo de um ciclo de investimento, sendo possível observar que a contiguidade é inteiramente respeitada.

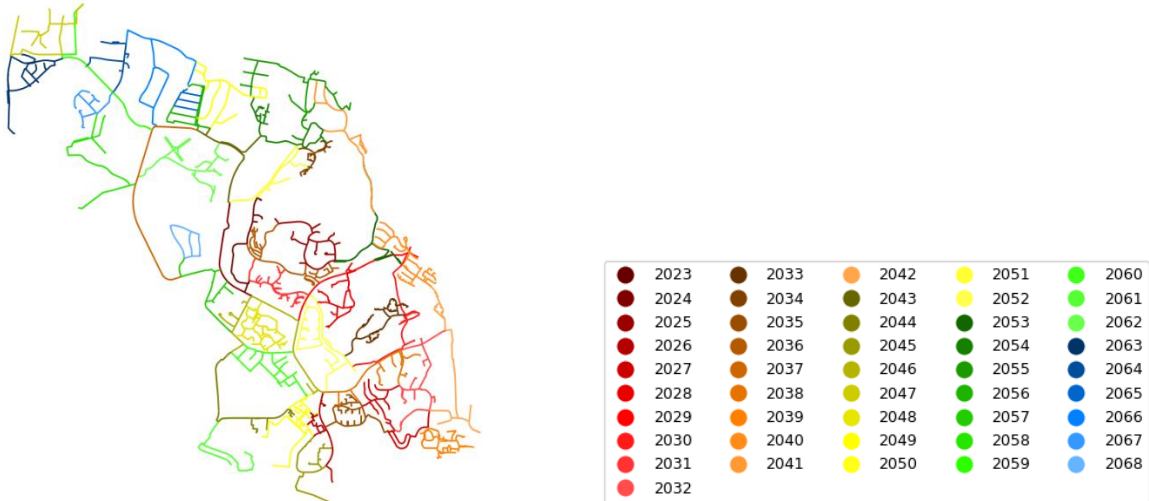


Figura 2. Representação espacial da priorização das unidades de reabilitação a intervir num ciclo de investimentos.

A Figura 3 ilustra a evolução do IVI face aos investimentos realizados ao longo de dois ciclos de investimentos, sendo que a cor vermelha indica que o IVI se encontra abaixo do valor inferior de referência e a cor verde indica que o valor de IVI se encontra entre os valores de referência. Note-se que uma infraestrutura madura e bem mantida deve apresentar valores de IVI entre 0.4-0.6.

Assim, é possível concluir que, o estabelecimento de 150 k€ como valor médio de reabilitação anual está abaixo do esperado, visto não permitir contrariar o processo contínuo de deterioração da infraestrutura. Contrariamente, com o investimento de 250 k€ por ano, é possível, em 20 anos, atingir um valor de IVI acima dos 0.4 e ao final de um ciclo de investimento estabilizá-lo, em média, nos 0.55, diferente dos 0.35 obtidos com 150 k€.

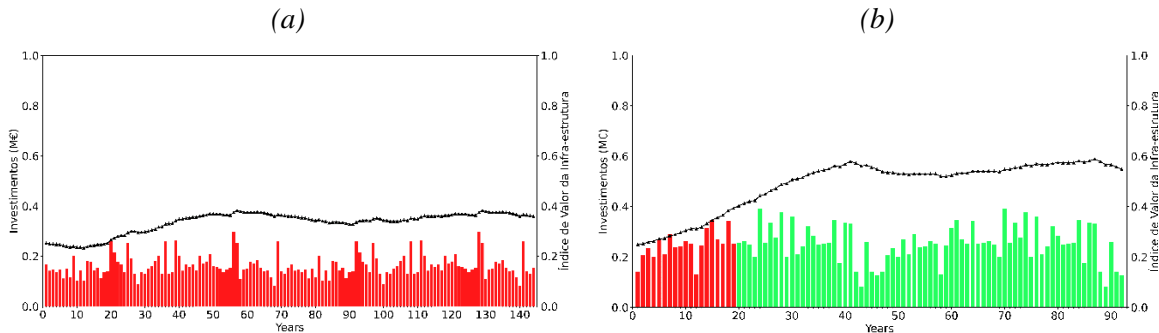


Figura 3. Resultados da aplicação da metodologia ao caso de estudo Investimentos e respetiva evolução do Índice de Valor da Infraestrutura: (a) investimento anual médio de 150 k€ e (b) investimento anual médio de 250 k€.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

4. CONCLUSÕES

Esta metodologia assume que a reabilitação é realizada em agrupamentos de condutas contíguas, o que torna a abordagem coerente com as atividades de reabilitação realizadas pelas EG. O problema de otimização para agrupamento considera que a disponibilidade financeira é, aproximadamente, constante ao longo do tempo. Neste sentido, pretende-se que o orçamento definido origine um número de unidades de reabilitação que se aproxime da vida útil expectável para condutas de abastecimento de água (e.g., 50 – 100 anos). Esta constatação resulta que as condutas estejam em serviço durante um período razoável do ponto de vista do processo de deterioração das mesmas.

A aplicação da metodologia demonstra a capacidade de alcançar taxas de reabilitação médias de 1-2%, o que implica a não existência de picos de investimento e a estabilização do IVI entre 0.4-0.6 (i.e., valores recomendados para redes maduras e bem mantidas).

Adicionalmente, esta metodologia permite obter uma correspondência clara entre a disponibilidade financeira anual determinada para investir em reabilitação e o respetivo agrupamento de condutas a ser reabilitado. Os resultados demonstram que esta metodologia é uma excelente ferramenta para o estabelecimento de estratégias de reabilitação, uma vez que a abordagem proposta é facilmente colocada em prática pelas Entidades Gestoras (EG).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento da investigação através da bolsa de doutoramento do João Caetano (referência n.º 2022.13214.BD) e da unidade de investigação CERIS através do projeto referência n.º UIDB/04625/2020).

REFERÊNCIAS

- [1] N. Carriço *et al.*, “Data integration for infrastructure asset management in small to medium-sized water utilities,” *Water Sci. Technol.*, vol. 82, no. 12, pp. 2737–2744, 2020, doi: 10.2166/wst.2020.377.
- [2] RASARP, “Annual Report of Water and Waste Services in Portugal. Volume I - Characterization of the water and waste sector,” 2022. [Online]. Available: www.ersar.pt.
- [3] A. Robles-Velasco, J. Muñuzuri, L. Onieva, and P. Cortés, “An evolutionary fuzzy system to support the replacement policy in water supply networks: The ranking of pipes according to their failure risk,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 111, p. 107731, 2021, doi: 10.1016/j.asoc.2021.107731.
- [4] A. Francisque, S. Tesfamariam, G. Kabir, H. Haider, A. Reeder, and R. Sadiq, “Water mains renewal planning framework for small to medium sized water utilities: a life cycle cost analysis approach,” *Urban Water J.*, vol. 14, no. 5, pp. 493–501, 2016, doi: 10.1080/1573062X.2016.1223321.
- [5] A. Scheidegger, J. P. Leitão, and L. Scholten, “Statistical failure models for water distribution pipes - A review from a unified perspective,” *Water Res.*, vol. 83, pp. 237–247, 2015, doi: 10.1016/j.watres.2015.06.027.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [6] S. Salehi, M. Jalili Ghazizadeh, M. Tabesh, S. Valadi, and S. P. Salamati Nia, “A risk component-based model to determine pipes renewal strategies in water distribution networks,” *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 17, no. 10, pp. 1338–1359, 2021, doi: 10.1080/15732479.2020.1842466.
- [7] H. C. Phan, A. S. Dhar, G. Hu, and R. Sadiq, “Managing water main breaks in distribution networks - A risk-based decision making,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 191, p. 106581, 2019, doi: 10.1016/j.res.2019.106581.
- [8] Z. Wang and S. Li, “Data-driven risk assessment on urban pipeline network based on a cluster model,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 196, no. October 2019, p. 106781, 2020, doi: 10.1016/j.res.2019.106781.
- [9] F. Li, L. Ma, Y. Sun, and J. Mathew, “Optimized Group Replacement Scheduling for Water Pipeline Network,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 142, no. 1, p. 04015035, 2015, doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000559.
- [10] M. M. Rokstad and R. M. Ugarelli, “Minimising the total cost of renewal and risk of water infrastructure assets by grouping renewal interventions,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 142, pp. 148–160, 2015, doi: 10.1016/j.res.2015.05.014.
- [11] C. Ramos-Salgado, J. Muñuzuri, P. Aparicio-Ruiz, and L. Onieva, “A decision support system to design water supply and sewer pipes replacement intervention programs,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 216, 2021, doi: 10.1016/j.res.2021.107967.
- [12] C. Kielhauser, B. T. Adey, and N. Lethanh, “Investigation of a static and a dynamic neighbourhood methodology to develop work programs for multiple close municipal infrastructure networks,” *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 361–389, 2017, doi: 10.1080/15732479.2016.1162818.
- [13] V. Marchionni, M. Cabral, C. Amado, and D. Covas, “Estimating Water Supply Infrastructure Cost Using Regression Techniques,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 142, no. 4, 2016, doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000627.
- [14] T. M. Walski, “Water distribution valve topology for reliability analysis,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 42, no. 1, pp. 21–27, 1993, doi: 10.1016/0951-8320(93)90051-Y.
- [15] H. Alegre, D. Vitorino, and S. Coelho, “Infrastructure value index: A powerful modelling tool for combined long-term planning of linear and vertical assets,” *Procedia Eng.*, vol. 89, pp. 1428–1436, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.469.
- [16] M. Cabral, D. Loureiro, and D. Covas, “Using economic asset valuation to meet rehabilitation priority needs in the water sector,” *Urban Water J.*, vol. 16, no. 3, pp. 205–214, 2019, doi: 10.1080/1573062X.2019.1648528.