

Método multicritério aplicado ao planeamento de reabilitação em redes de distribuição de água

João Caetano ^{a,*}, Nelson Carriço ^a, Dídia Covas ^b

^a INCITE, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Politécnico de Setúbal (ESTBarreiro/IPS), Rua Américo da Silva Marinho, 2839-001 Lavradio, Portugal

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

Resumo

O presente artigo tem como objetivo a aplicação de um método multicritério de apoio à decisão a um caso de estudo para a definição de condutas candidatas a intervenção de reabilitação. Para tal, escolheu-se o ELECTRE TRI-B, da família dos métodos ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE), dado que permite uma razoável flexibilidade na priorização de investimentos em reabilitação, comportando desvios, face às disponibilidades financeiras e planos orçamentais, e atendendo a distintos critérios e métricas de avaliação. O caso de estudo permitiu identificar as dificuldades encontradas na aplicação deste método, sendo realizadas considerações relativas ao estabelecimento dos parâmetros estruturais do método e à análise das preferências dos decisores, sendo estes aspetos críticos e condicionantes para os resultados finais. Outra constatação importante é o impacto da escassez ou inexistência de informação organizada e disponível, que impossibilita o estabelecimento de métricas abrangentes. O desenvolvimento de uma metodologia generalista de apoio à decisão com base no método ELECTRE TRI-B é um processo complexo.

Palavras-Chave: análise multicritério, processo de apoio à decisão, reabilitação, gestão de ativos, redes de distribuição de água.

doi: 10.22181/aer.2022.1004

* Autor para correspondência
E-mail: joao.pedro.caetano@tecnico.ulisboa.pt

Multicriteria method applied to rehabilitation planning in water distribution networks

João Caetano^{a,}, Nelson Carriço^a, Dídia Covas^b*

^a INCITE, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Politécnico de Setúbal (ESTBarreiro/IPS), Rua Américo da Silva Marinho, 2839-001 Lavradio, Portugal

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

Abstract

This article aims to apply a multicriteria decision support method, from the ELimination et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE) family of methods, for the definition of candidate pipes for intervention applied to a case study. To this end, the method selected was the ELECTRE TRI-B since this method allows a reasonable flexibility in prioritizing investments in rehabilitation, including deviations, given the financial availability and budget plans, taking into account the different evaluation criteria and metrics. The case study allowed to identify the main difficulties in the application of this method, with considerations regarding the establishment of the method ELECTRE TRI-B structural parameters and the analysis of the decision-makers' preferences, which are critical aspects for the results. Another important finding is the impact of the scarce or inexistent organized and available information, which makes it impossible to establish comprehensive metrics. The development of a general decision support methodology based on the ELECTRE TRI-B method is a complex process.

Keywords: multicriteria decision analysis, Decision-aiding process, Rehabilitation, Asset management, Water distribution networks.

doi: 10.22181/aer.2022.1004

* Corresponding author.

E-mail: joao.pedro.caetano@tecnico.ulisboa.pt

1 Introdução

As redes de distribuição de água (RDA) são infraestruturas essenciais para prestar um serviço indispensável para o desenvolvimento das comunidades – o acesso universal e equitativo a água potável a toda a comunidade. Contudo, na maioria dos países desenvolvidos, as RDA foram projetadas e contruídas na primeira metade do século passado, encontrando-se atualmente deterioradas devido ao processo natural de envelhecimento das infraestruturas, sendo de extrema importância assegurar a reabilitação gradual dos vários ativos que as constituem, no final da sua vida útil ou quando apresentem desempenho inadequado. Neste processo de tomada de decisão é também importante rever a configuração e modo de operação das redes, por forma a garantir condições hidráulicas e de integridade infraestrutural mais adequadas ao funcionamento atual e futuro.

Em Portugal, embora a reabilitação de RDA esteja gradualmente a ser efetuada, a taxa média anual de reabilitação de condutas ainda é insuficiente para contrariar o envelhecimento global dos sistemas, sendo atualmente inferior a 1%/ano (ERSAR 2021). Esta taxa corresponde às condutas permanecerem em serviço por um período médio de cerca de 100 anos, o que é claramente excessivo considerando a vida útil média do material das condutas, regra geral, igual a 50 anos (Amaral et al. 2017). Torna-se, assim, fundamental que as Entidades Gestoras (EG) aumentem a taxa anual de reabilitação das suas condutas, sob pena de comprometerem a sustentabilidade da infraestrutura no médio e longo prazo, uma vez que são vários os problemas associados ao processo de envelhecimento, como sejam, níveis de perdas reais de água elevados, a ocorrência de roturas e interrupções no abastecimento frequentes e o consequente aumento dos custos de operação e manutenção dos sistemas (Carriço 2014).

O processo de reabilitação de ativos, para além de uma necessidade, deverá ser encarado como uma oportunidade de “repensar” os sistemas existentes de forma holística e integrada (Selvakumar e Tafuri 2012). Neste contexto, deverá ser realizado um diagnóstico abrangente da rede com a finalidade de identificar quais os principais constrangimentos e aspetos a melhorar. Para esse efeito, é essencial integrar no processo de decisão diferentes critérios que atendam a aspetos hidráulicos, físicos de integridade infraestrutural, de qualidade da água, de operação e manutenção e económicos. Devem, igualmente, ser selecionadas métricas de avaliação representativas destes aspetos, uma vez que os sistemas são constituídos, em grande parte, por um conjunto de ativos enterrados, que não são facilmente inspecionáveis, e cuja condição deverá ser inferida e avaliada através dessas métricas de avaliação.

No entanto, em situações de RDA totalmente estabilizadas, do ponto de vista de crescimento populacional, sem perspetivas de expansão, onde não é possível a alteração dos diâmetros das condutas devido ao cumprimento da regulamentação municipal e/ou nacional, onde não há problemas de qualidade da água, nem de ineficiências energéticas, a solução é a substituição das condutas em fim de vida útil ou problemáticas (e.g., com elevado histórico de roturas) por outras de características semelhantes (i.e., diâmetro equivalente e com material mais recente). Esta solução é, vulgarmente, designada por substituição de condutas *like-for-like*. Nesta situação, o problema de decisão reduz-se ao estabelecimento e calendarização das prioridades de reabilitação de condutas com recurso a métricas de avaliação ao nível do ativo (i.e., conduta).

A ciência de apoio à decisão, com a utilização de modelos multicritério, poderá ser a solução para a agregação dos vários critérios e respetivas métricas de avaliação. Existem inúmeros métodos de agregação (e.g., MAUT, MACBETH, AHP, PROMETHEE), no entanto não se pode afirmar que um dado método é mais vantajoso do que outro, na sua generalidade, mas sim que um método se adequa melhor a um tipo de problema específico (Polatidis et al. 2006).

O presente artigo sistematiza um método de apoio à decisão, ELECTRE TRI-B, para a categorização de condutas candidatas a intervenção de reabilitação em zonas estabilizadas e sem margem para alteração de configuração de rede ou diâmetros de condutas. A referida categorização considera a substituição de condutas *like-for-like*, ou seja, que as condutas são substituídas por outras com características idênticas. A cada conduta é afetada uma de três categorias de priorização. A aplicação do método é ilustrada com uma rede de distribuição de água real.

O método ELECTRE-TRI-B, apesar de permitir uma tomada de decisão mais fundamentada e robusta, considerando múltiplos critérios e métricas de avaliação e reduzindo a subjetividade e a ambiguidade no processo de decisão, tem aspectos críticos que são necessários considerar, nomeadamente a definição dos parâmetros estruturais do método e a definição das preferências dos decisores, que têm implicações consideráveis nas recomendações finais. O caso prático de aplicação aqui apresentado permite identificar as principais dificuldades encontradas no processo de aplicação do método, deixando para desenvolvimentos futuros questões relacionadas com a elaboração de uma metodologia de apoio à decisão multicritério. Para mais detalhes relacionados com metodologias multicritério aplicadas a sistemas urbanos de água consultar Carriço et al. (2021).

2 Método de agregação

O método de agregação ELECTRE TRI-B, desenvolvido por Yu (1992), permite atribuir cada uma das condutas que compõem a rede de distribuição de água à categoria que melhor a caracteriza, considerando os vários critérios estabelecidos. O método permite categorizar cada uma das condutas comparando-as com os perfis de referência que delimitam cada categoria, ou seja, uma conduta é classificada numa dada categoria se for suficientemente boa para prevalecer sobre o perfil de referência inferior dessa categoria, mas não suficientemente boa para prevalecer sobre o perfil de referência superior da mesma categoria (Clímaco et al. 2015).

Os métodos da família ELECTRE baseiam-se na construção de relações de prevalência cujo significado pode ser entendido como “a ação de intervenção a é pelo menos tão boa quanto a ação de intervenção b ”. Para tal, utilizam um modelo de pseudo-critério que permite verificar uma das seguintes condições entre ações: indiferença, preferência forte, preferência fraca ou incomparabilidade (Figueira et al. 2013). Por forma a explorar as potencialidades do modelo de pseudo-critério, o decisor poderá representar as suas preferências definindo limiares de discriminação relativos a situações de indiferença e preferência. Contudo, a atribuição de valores aos limiares de discriminação não é uma tarefa trivial e influencia, consideravelmente, os resultados finais.

Na maioria dos problemas de decisão, as métricas selecionadas não têm todas a mesma importância, sendo que o método ELECTRE TRI-B tem este facto em consideração. A definição dos coeficientes de importância, a atribuir a cada uma das métricas, é um processo complexo, devido à forte subjetividade inerente. Os métodos para a sua obtenção podem ser caracterizados em métodos por avaliação direta ou indireta.

Os métodos por avaliação indireta têm sido usados na maioria das aplicações, devido à sua simplicidade, uma vez que é relativamente fácil para os decisores expressarem as suas preferências. O método utilizado no presente artigo é o SRF (Simos-Roy-Figueira), proposto inicialmente por Simos, sendo, mais tarde, revisto e estendido por Figueira e Roy (2002), tornando assim o método mais robusto em relação ao original. Este método baseia a definição dos coeficientes de importância, solicitando aos decisores que expressem a importância relativa das métricas, por meio da disposição de cartas (sendo por isso também conhecido por método das cartas de Simos).

De forma sucinta, o método baseia-se num procedimento em que o decisor recebe um conjunto de cartas, identificadas com cada uma das métricas anteriormente selecionadas, usando as mesmas para classificar as métricas da menos importante para a mais importante. No caso de alguma das métricas apresentar a mesma importância para o decisor, este poderá colocá-las juntas na mesma posição. Para além destas cartas, o decisor possui ainda um conjunto de cartas brancas, representativas da maior ou menor diferença entre métricas, sendo que a forma de representar essa diferença, entre métricas sucessivas, consiste em introduzir cartas brancas entre as duas cartas sucessivas. Assim, quanto maior for o número de cartas brancas entre duas métricas sucessivas, maior será a diferença entre a sua importância (Papathanasiou e Ploskas 2018).

É relevante referir que o método ELECTRE TRI-B permite limitar a compensação entre métricas, recorrendo a limiares de veto aplicados a uma ou mais métricas, evitando, assim, que um mau valor numa dada métrica seja compensado pelos bons valores nas restantes métricas.

3 Aplicação ao caso de estudo

3.1 Definição e estruturação do problema

A rede de distribuição de água em estudo tem aproximadamente 113 km de extensão, sendo 60% da rede constituída por condutas em Fibrocimento (FC), construído na década de 60 e 70 e encontrando-se num estado de deterioração elevado.

A EG pretende desenvolver um plano de reabilitação que permita, gradualmente, ir reabilitando os seus ativos, conforme a disponibilidade financeira, aumentando assim a taxa anual de reabilitação de condutas. Para tal, será efetuada uma análise exploratória, através da aplicação de um método multicritério, com o intuito de definir as prioridades de investimento a realizar, garantindo uma razoável flexibilidade para comportar desvios, face às disponibilidades financeiras e planos orçamentais, permitindo futuramente uma decisão mais autónoma e fundamentada por parte da EG. A imposição da EG relativa à flexibilidade do plano de reabilitação foi condicionante na escolha do método multicritério a adotar, sendo que uma das grandes vantagens na utilização de um método multicritério de categorização prende-se com a adaptabilidade na execução dos investimentos, pois não existe uma hierarquia de investimentos rígida que necessite obrigatoriamente de ser respeitada, colocando assim em causa todo o plano traçado.

3.2 Avaliação do problema

3.2.1 Estabelecimento das métricas de avaliação

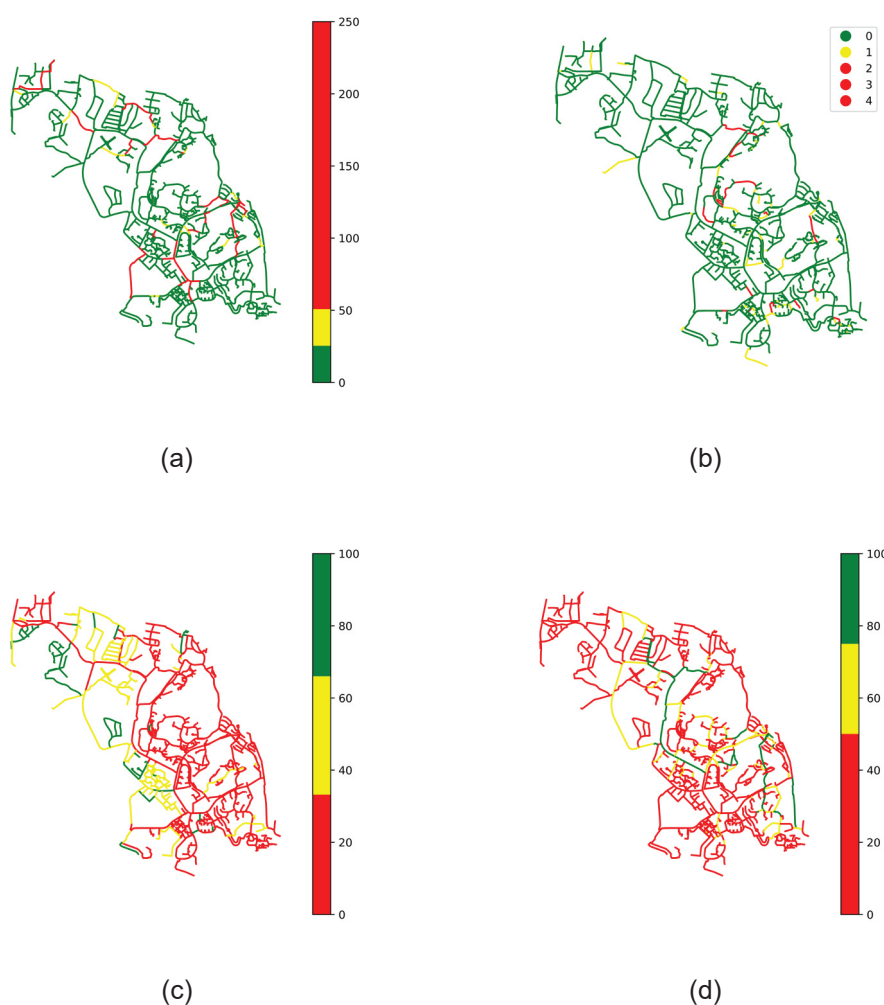
Com o objetivo de realizar um diagnóstico abrangente, procurou-se estabelecer, de forma equitativa, algumas métricas que atendessem a critérios de integridade infraestrutural e às condições hidráulicas de operação e que respeitassem as seguintes propriedades: completude, operacionalidade, decomponibilidade, ausência de redundância e concisão, considerando os dados existentes na EG e o tipo de intervenção requerido (Pinto et al. 2017).

Foram estabelecidas seis métricas de avaliação, apresentadas no Quadro 1, que permitiram inferir as condições hidráulicas e a integridade infraestrutural de cada uma das condutas numa perspetiva de substituição *like-for-like* (i.e., por uma condutas de características semelhantes). A definição de cada uma das métricas pode ser consultada em Carriço (2014). A seleção das métricas permitiu avaliar cada ativo de forma quantitativa e definir os perfis de referência que delimitam cada uma das três categorias: 1.ª prioridade, 2.ª prioridade e 3.ª prioridade.

Quadro 1. Métricas de avaliação

Critérios	Métricas de avaliação		1. ^a	2. ^a	3. ^a
			Prioridade	Prioridade	Prioridade
Integridade infraestrutural	M ₁	Criticidade	$] +\infty; 50[$	$[50; 25[$	$[25; 0]$
	M ₂	N.º de Roturas (Últimos 10 anos)	$] +\infty; 2]$	$[2; 1]$	$] 1; 0]$
	M ₃	Percentagem de Vida Residual	$[0; 33[$	$[33; 66[$	$[66; 100]$
Condições hidráulicas	M ₄	Desempenho Velocidade Mínima	$[0; 50[$	$[50; 75[$	$[75; 100]$
	M ₅	Desempenho Velocidade Máxima	$[0; 50[$	$[50; 75[$	$[75; 100]$
	M ₆	Desempenho Pressão Máxima	$[0; 50[$	$[50; 75[$	$[75; 100]$

Na Figura 1 é apresentada a distribuição espacial dos resultados obtidos nas várias condutas da rede de distribuição de água de acordo com os valores obtidos em cada uma das métricas de avaliação. É importante referir que se observam diferenças consideráveis relativamente à quantidade de condutas afetadas à 1.^a e 2.^a prioridade de intervenção de acordo com cada uma das métricas de avaliação. No caso da métrica M₁, existem muito poucas condutas com elevada criticidade, ou seja, afetadas à 1.^a prioridade ($M_1 > 50$), uma vez que existe uma elevada redundância na rede de distribuição de água que é muito emalhada. A métrica M₅ regista muito pouca variabilidade, estando a maioria das condutas afetadas à 3.^a prioridade, uma vez que a velocidade máxima é verificada em praticamente todas as condutas; isto poderá indicar que esta métrica pode ser pouco representativa das deficiências do comportamento hidráulico do sistema.



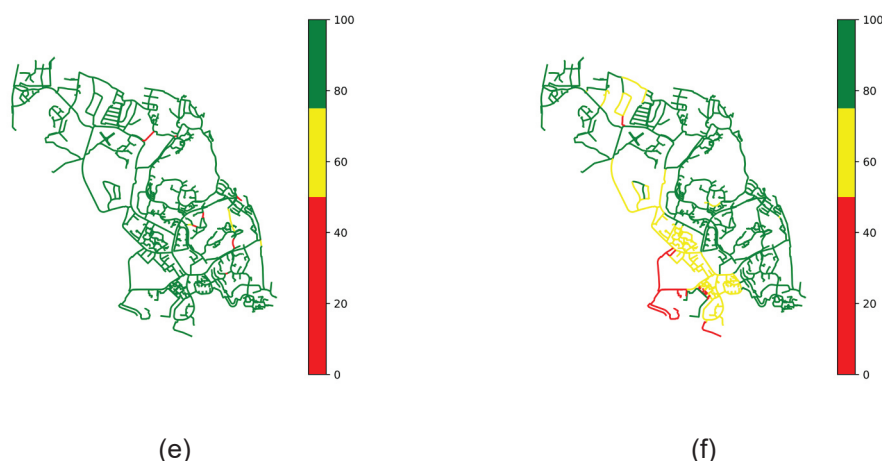


Figura 1. Distribuição espacial dos valores das métricas de avaliação em cada conduta: (a) Criticidade; (b) Número de roturas registadas nos últimos 10 anos; (c) Percentagem de vida residual; (d) Desempenho em velocidade mínima (%); (e) Desempenho em velocidade máxima (%); (f) Desempenho em pressão máxima (%)

3.2.2 Aplicação do método

Definição de parâmetros

Para a aplicação do método ELECTRE TRI-B, é necessária a definição de alguns parâmetros estruturais (e.g., limiares de indiferença e de preferência) e, também, de parâmetros que representem as preferências dos decisores (e.g., coeficientes de importância).

Relativamente aos parâmetros estruturais do modelo, foram atribuídos às várias métricas de avaliação, limiares de indiferença e preferência de 5 e 10, respetivamente, excetuando, a métrica M_2 , à qual foram atribuídos valores nulos em ambos os limiares. Ainda assim, devido à representatividade desta métrica, face ao critério da integridade infraestrutural, foi definido um limiar de veto em que condutas com 3 ou mais roturas nos últimos 10 anos não podem prevalecer sobre os perfis de referência, ou seja, enquadram-se obrigatoriamente na categoria de condutas com 1.^a prioridade. Esta limitação explora a característica não-compensatória dos métodos ELECTRE.

Na Figura 2 apresenta-se o esquema final obtido pelo decisor ao realizar o procedimento SRF e os respetivos resultados, avaliando, assim, os coeficientes de importância.

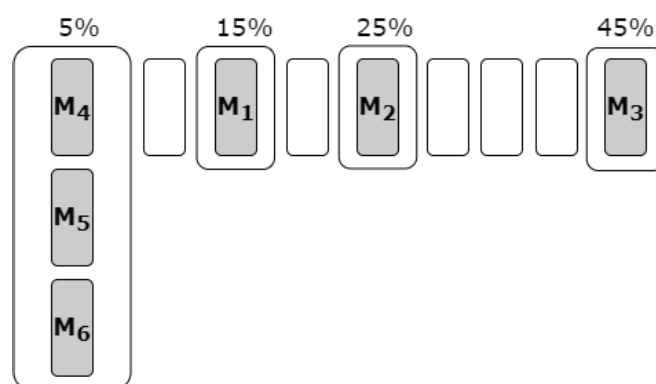


Figura 2. Esquema e resultados do procedimento SRF

Análises de sensibilidade

Após definição dos parâmetros procedeu-se à aplicação do método e às respetivas análises de sensibilidade, por forma a avaliar a variação dos resultados obtidos face a

parâmetros específicos. Foram realizados dois procedimentos distintos, para afetar as condutas às respectivas categorias, o pseudo-disjuntivo e o pseudo-conjuntivo. O procedimento pseudo-disjuntivo atribui as condutas às melhores categorias possíveis, enquanto o procedimento pseudo-conjuntivo atribui as condutas às piores categorias, razão pela qual estes procedimentos são conhecidos por “otimista” e “pessimista”, respectivamente.

Um parâmetro relevante na aplicação destes procedimentos é o nível de corte, que pode variar entre 0,50 e 1,00. O significado desta variação prende-se com uma maior ou menor discordância entre as métricas de avaliação face à asserção “a conduta candidata a intervenção é pelo menos tão boa quanto o perfil de referência”. Foram avaliadas, assim, várias hipóteses, considerando diferentes níveis de corte, onde foi possível concluir que os resultados do método são significativamente afetados por variações no parâmetro nível de corte. Face a esta constatação, procedeu-se ao ajuste do nível de corte por forma a direcionar os resultados às expectativas dos decisores, sendo que, para tal, foi definido para ambos os procedimentos um nível de corte igual a 0,6.

Apresentam-se na Figura 3 os resultados da priorização através do método ELECTRE TRI-B. Estes resultados são consideravelmente diferentes, face ao procedimento adotado. Ainda assim, é possível concluir que as condutas afetadas à 1.^a prioridade no procedimento pseudo-disjuntivo também são atribuídas à mesma categoria na aplicação do procedimento pseudo-conjuntivo, o que demonstra coerência e robustez nos resultados obtidos.

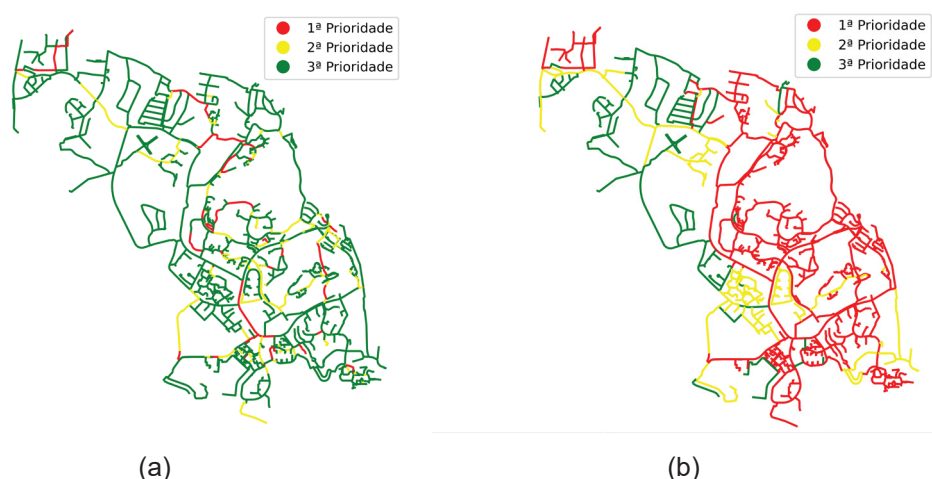


Figura 3. Resultados da aplicação do ELECTRE TRI-B: (a) Otimista com nível de corte = 0,6; (b) Pessimista com nível de corte = 0,6

Apesar desta variabilidade de resultados, é possível limitar o universo de condutas a um conjunto consideravelmente menor, o que facilita a seleção das condutas prioritárias a intervir por parte da EG. Apresenta-se no Quadro 2 o comprimento de condutas atribuídas a cada uma das três categorias, considerando a aplicação dos dois procedimentos. Verifica-se que no procedimento otimista a maioria das condutas é afeta à 3.^a prioridade de reabilitação, enquanto no procedimento pessimista cerca de 60% das condutas são categorizadas em 1.^a prioridade.

Quadro 2. Comprimento de condutas atribuídas a cada categoria

Prioridades	Otimista (km)	Pessimista (km)
1. ^a Prioridade	7,94	67,04
2. ^a Prioridade	12,46	22,01
3. ^a Prioridade	92,20	23,55

4 Conclusões

O processo de estabelecimento de métricas de avaliação representativas para a realização do diagnóstico das condutas, é tipicamente uma tarefa complexa, dada a escassez de informação organizada e disponível na maioria das EG. Recorrendo a modelos hidráulicos, é possível obter informação complementar que permite estimar as condições hidráulicas de funcionamento e avaliar o desempenho dos ativos, tal como ilustrado no caso de estudo. No entanto, é notória a dificuldade, ou mesmo impossibilidade, em estabelecer métricas de avaliação que permitam avaliar, efetivamente, a integridade infraestrutural, colocando assim em causa a aplicabilidade do método ELECTRE TRI-B a componentes individuais (i.e., condutas). Ainda assim, é necessário efetuar mais investigação relativa à aplicação deste método recorrendo a métricas de sistema.

Outro aspeto relevante identificado é a presença de uma reduzida variabilidade nas métricas relativas às condições hidráulicas dado que, na sua generalidade, as redes estão sobredimensionadas, com o objetivo de comportarem situações de emergência, o que se reflete claramente no desempenho para as velocidades mínimas e máximas, tendo esta constatação implicações na aplicação do método.

Por fim, a fixação dos parâmetros é um aspeto crítico da aplicação dos métodos da família ELECTRE pois, para além dos parâmetros estruturais do método, este também envolve parâmetros associados às preferências dos decisores, o que não é totalmente solucionado pela aplicação do procedimento SRF.

De salientar que a abordagem de priorização de substituição de condutas adotada neste artigo – substituição de condutas por outras de dimensão e material equivalente – deve ser seguida com muita parcimónia e apenas em situações em que a rede se encontra estabilizada e sem margem para a introdução de alterações de configuração e de dimensão. No entanto, recomenda-se que a análise das intervenções de reabilitação de redes de distribuição tenha uma visão integrada do sistema e não apenas centrar-se em componentes individuais (e.g., condutas, grupos eletrobomba), avaliando a possibilidade de introduzir novas origens ou pontos de entrega, de eliminar ou mitigar os sistemas elevatórios, maximizar a utilização da energia gravítica, aumentar a flexibilidade e resiliência da rede, melhorar a qualidade da água (reduzir tempos de permanência e manter níveis de cloro residual), recuperar a energia, entre outras medidas de melhoria de desempenho e de eficiência.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento do projeto WISDom – Water Intelligence System Data (referência n.º DSAIPA/DS/0089/2018 e Projeto estratégico do CERIS (referência n.º UIDB/04625/2020) que permitiram desenvolver a presente investigação.

Referências

- Amaral, R., Alegre, H., & Matos, J. S. (2017). Highlights of key international water infrastructure asset management initiatives, and trends, challenges and developments in Portugal. *Water Policy*, 19(1), 128–146. <https://doi.org/10.2166/wp.2016.137>
- Carriço, N. (2014). *Metodologia multicritério de apoio à decisão na gestão patrimonial de infraestruturas urbanas de água*. Tese doutoramento submetida no Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.
- Carriço, N., Covas, D., & Almeida, C. (2021). Multi-criteria decision analysis in urban water asset

- management Multi-criteria decision analysis in urban water asset management. *Urban Water Journal*, 00(00), 1–12. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1913613>
- Clímaco, J., Dias, L., & Almeida, L. (2015). Uma Revisão De Três Pacotes De Software Dedicados a Problemas Multiatributo. *Engevista*, 17(3), 288. <https://doi.org/10.22409/engevista.v17i3.732>
- ERSAR. (2021). *Caracterização do setor de águas e resíduos - 2021 vol. 1* (Vol. 1).
- Figueira, J., Greco, S., Roy, B., & Słowiński, R. (2013). An Overview of ELECTRE Methods and their Recent Extensions. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 20(1–2), 61–85. <https://doi.org/10.1002/mcda.1482>
- Figueira, José, & Roy, B. (2002). Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. *European Journal of Operational Research*, 139(2), 317–326. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00370-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00370-8)
- Papathanasiou, J., & Ploskas, N. (2018). *Multiple Criteria Decision - Aid Methods (Mcda)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91648-4>
- Pinto, F. S., Costa, A. S., Figueira, J. R., & Marques, R. C. (2017). The quality of service: An overall performance assessment for water utilities. *Omega (United Kingdom)*, 69, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.08.006>
- Polatidis, H., Haralambopoulos, D. A., Munda, G., & Vreeker, R. (2006). Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 1(2), 181–193. <https://doi.org/10.1080/009083190881607>
- Selvakumar, A., & Tafuri, A. N. (2012). Rehabilitation of Aging Water Infrastructure Systems: Key Challenges and Issues. *Journal of Infrastructure Systems*, 18(3), 202–209. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)j.1943-555x.0000091](https://doi.org/10.1061/(asce)j.1943-555x.0000091)
- Yu, W. (1992). *Aide Multicritère à la Décision dans le Cadre de la Problématique du Tri: Concepts, Méthodes et Applications*. Université Paris-Dauphine, Paris, France.