

ESTABELECIMENTO DE PRIORIDADES DE REABILITAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Uma ferramenta multicritério de apoio à decisão

Nelson CARRIÇO⁽¹⁾; Dídía COVAS⁽¹⁾; Helena ALEGRE⁽²⁾; Maria do Céu ALMEIDA⁽²⁾;
João P. LEITÃO⁽²⁾

RESUMO

No âmbito do projecto de investigação *Advanced Water Assets Rehabilitation in Portugal* (AWARE-P) está em desenvolvimento uma ferramenta de apoio à decisão para o estabelecimento de prioridades de intervenção de reabilitação, tendo em consideração as dimensões de desempenho, de custo e de risco. A ferramenta tem por base um método multicritério designado por ELECTRE TRI que permite estabelecer prioridades de reabilitação através da atribuição de acções (no presente caso, condutas candidatas à reabilitação) a categorias pré-definidas e ordenadas (da prioridade mais elevada para a mais baixa). Este método é particularmente adequado para o estabelecimento de prioridades para um elevado número de acções (condutas), tendo em conta pelo menos 5 critérios de decisão. A ferramenta multicritério de apoio à decisão é aplicada a um caso de estudo real, sendo efectuada uma análise de sensibilidade a um dos parâmetros do método. No final apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: custo, multicritério, planeamento tático, priorização de alternativas, reabilitação, risco.

⁽¹⁾ Instituto Superior Técnico (IST), Avenida Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa

⁽²⁾ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, a decisão sobre intervenções de reabilitação em sistemas de abastecimento de água é regida por critérios estritamente económicos, com base em custos de investimento e em encargos directos de operação e manutenção do sistema. Esta abordagem clássica permite a comparação e a selecção de diferentes soluções alternativas, assim como a determinação do custo unitário de produção e de venda da água para um determinado período de amortização do investimento.

No entanto, hoje em dia, a tomada de decisão não pode ser ditada meramente por aspectos económicos, sendo fundamental considerar outros factores, como sejam, a melhoria do nível de serviço, a melhoria da fiabilidade do sistema, ou a minimização de perturbações causadas por obras em curso. Surge, assim, o conceito de abordagem integrada onde se incorporam outros critérios, para além dos económicos, no processo da tomada de decisão.

Uma abordagem integrada deve também atender ao risco associado ao funcionamento dos sistemas de abastecimento de água, uma vez que as consequências podem traduzir-se em custos elevados para as entidades gestoras. Por outro lado, ao identificar e estimar os riscos, na eventualidade das falhas associadas aos mesmos ocorrerem, é mais fácil para as entidades gestoras responderem em situações de emergência, pois já são conhecidas as suas potenciais consequências.

A tendência actual é de fundamentar a tomada de decisão em três dimensões distintas: o custo, o risco e o desempenho (Alegre e Covas, 2010; Almeida e Cardoso, 2010). Assim, de modo a manterem os níveis de serviço aceitáveis, as entidades gestoras de abastecimento de água têm de tomar decisões de investimento que devem ser bem suportadas por vários critérios que reflectam os objectivos de maximização do desempenho e minimização simultânea do risco e do custo.

De acordo com Alegre (2007) a Gestão Patrimonial de Infra-estruturas (GPI) é a “arte” de encontrar o equilíbrio entre o desempenho, custo e risco, garantindo um alinhamento entre objectivos da organização, decisões de gestão e decisões técnicas operacionais.

A entrada em vigor do Decreto-lei n.º 194/2009, de 20 de Agosto, que estabelece o regime jurídico dos serviços municipais de abastecimento público de água, de saneamento de águas residuais e de gestão de resíduos urbanos, obriga através do Artigo 8º, ponto 5, alínea b) as entidades gestoras que sirvam mais de 30 000 habitantes a promover e a manter um sistema de gestão patrimonial de infra-estruturas, fomentando, deste modo a elaboração de planos de GPI. Não existem fronteiras claras que diferenciem um plano (táctico) de reabilitação de um plano geral de distribuição de água ou de um plano (táctico) de GPI (Alegre e Covas, 2010).

O projecto de investigação, em curso, *Advanced Water Assets Rehabilitation in Portugal (AWARE-P)*³ visa o desenvolvimento de metodologias e de uma aplicação computacional de apoio à GPI de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais, incorporando as três dimensões atrás referidas (desempenho, custo e risco).

³ O Projecto AWARE-P, financiado pelos fundos EEA, está a ser desenvolvido em parceria pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), o Instituto Superior Técnico (IST), o centro de investigação norueguês SINTEF, a Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), a empresa YDreams e quatro entidades gestoras (AdP Serviços, Veolia, SMAS O&A e AGS, SA)

Neste âmbito enquadra-se o recurso a métodos de análise multicritério para ajudar no estabelecimento de prioridades de reabilitação com base em critérios frequentemente contraditórios entre si (e.g., perdas de água, nível de serviço, fiabilidade hidráulica, custos de reabilitação, perturbações para terceiros). Este tipo de abordagens tem sido amplamente utilizado no estabelecimento de prioridades com múltiplos critérios (Sægrov *et al.*, 1999; Engehardt *et al.*, 2000; Kleiner, 2001; Albee, 2005; Pascal *et al.*, 2007).

Apresenta-se a aplicação de uma ferramenta multicritério especificamente desenvolvida para o estabelecimento de prioridades de intervenção de reabilitação, tendo em consideração as dimensões de desempenho, de custo e de risco. Neste estudo não são comparadas alternativas de intervenção, sendo apenas identificadas quais as prioridades de intervenção.

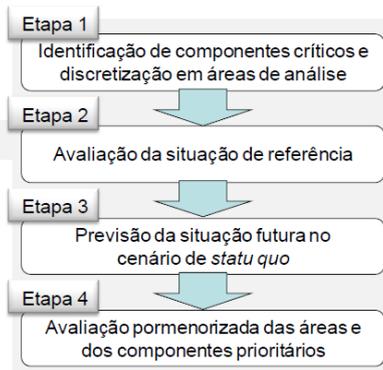
A aplicação de métodos de decisão multicritério como o que aqui se apresenta pressupõe que a intervenção de reabilitação num qualquer componente do sistema objecto da decisão não afecta o comportamento (*i.e.*, a avaliação face aos critérios de decisão seleccionados) dos outros componentes. No caso concreto das redes de água, não é, por exemplo, válido aplicar este tipo de métodos para definir prioridades de intervenção quando existem problemas de capacidade hidráulica em trechos emalhadados, já que a substituição de uma conduta por outra de características diferentes vai fazer alterar o caudal e as restantes características hidráulicas de outras condutas. Contudo, quando o que está em causa são deficiências relativas à condição física dos componentes do sistema, o estabelecimento de prioridades entre componentes é independente entre si, tornando-se importante dispor de ferramentas de decisão que permitam hierarquizar as intervenções de reabilitação de modo eficiente e expedito. É também importante que os critérios de decisão sejam independentes entre si de modo a cobrir todos os aspectos relevantes para a decisão, mas sem que se registre sobreposição. Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento de uma ferramenta multicritério e um exemplo de aplicação à reabilitação de uma rede de distribuição de água.

2. DECISÃO NO ÂMBITO DA GPI DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

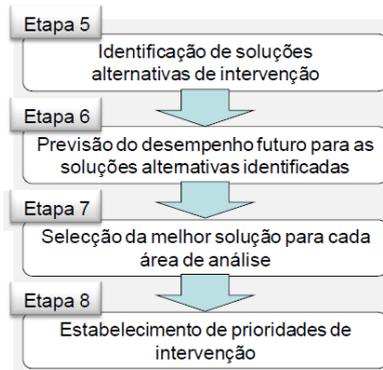
Alegre e Covas (2010) e Almeida e Cardoso (2010) propõem uma metodologia para uma abordagem hierárquica à reabilitação de infra-estruturas urbanas de água. De acordo com Alegre e Covas (2010) a elaboração de um plano táctico de reabilitação assenta em cinco passos fundamentais (*cf. Figura 1*): (i) definição de objectivos e metas; (ii) elaboração de diagnóstico; (iii) elaboração do plano táctico; (iv) implementação do plano; (v) monitorização e revisão do plano. Nas fases de diagnóstico e de elaboração do plano táctico, é necessário comparar sistemas (Etapas 1-4) (*Figura 2a*) ou comparar soluções alternativas de intervenção (Etapas 5-8) (*Figura 2b*), tendo em conta critérios que muitas vezes são contraditórios, o que nem sempre é uma tarefa trivial.



Figura 1 – Fases para a elaboração de um plano tático de reabilitação (Alegre e Covas, 2010)



(a) Recolha de informação e avaliação de desempenho



(b) Identificação e análise de alternativas de intervenção

Figura 2 – Metodologia proposta por Alegre e Covas (2010)

A ferramenta multicritério de apoio à decisão apresentada neste artigo constitui um instrumento de grande utilidade para estas situações. Neste artigo, a ferramenta é aplicada a uma rede de distribuição para o estabelecimento de prioridades de reabilitação de condutas, enquadrando-se nas Etapas 5 a 7 da metodologia para elaboração de um plano tático de reabilitação.

Tendo por base as três dimensões custo (C), desempenho (P) e risco (R), existem diferentes vias para formular o problema multicritério. Uma abordagem possível consiste em agregar todas as avaliações de C, P e R em simultâneo (Figura 3a); Uma outra possibilidade seria agregar primeiro as avaliações de cada dimensão (e.g., PI_1, PI_2, \dots, PI_n) numa avaliação global (e.g., P_{global}) e, depois, a tomada de decisão teria por base a agregação das três avaliações globais P_{global}, R_{global} e C_{global} (Figura 3b).

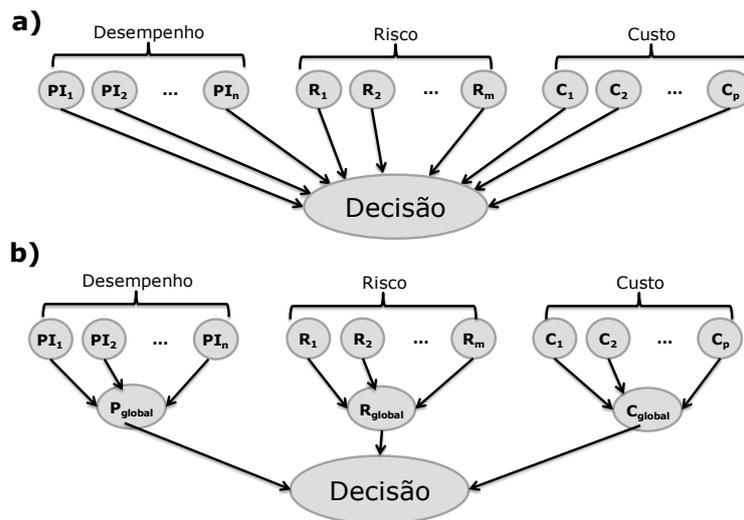


Figura 3 - Formulação do problema: (a) agregação de todas as avaliações em simultâneo para um dado de cenário; (b) agregação de todas as avaliações numa avaliação global, seguida da agregação das três dimensões globais

3. ANÁLISE MULTICRITÉRIO

De um modo geral, o principal objectivo da análise multicritério é proporcionar ferramentas de apoio à decisão de modo a permitir a resolução de problemas, na maioria das vezes com pontos de vista contraditórios (Vincke, 1992). A análise multicritério surgiu na década de 1960 como crítica à teoria da decisão clássica que se baseava, fundamentalmente, em soluções de decisão óptimas. Não existem decisões que satisfaçam todos os pontos de vista em simultâneo, por isso o conceito de optimização faz pouco sentido no contexto da análise multicritério em que não existem decisões óptimas. No contexto da GPI a análise multicritério pode ajudar os decisores a estabelecer prioridades de um número pré-definido de acções (opções, alternativas, cenários, candidatos) avaliando cada acção potencial de acordo com determinados critérios, muitas vezes, conflitantes entre si e expressos em unidades diferentes.

Os problemas multicritério podem dividir-se em problemas multiobjectivo e problemas multiatributo. Nos primeiros, as alternativas são definidas por um conjunto de restrições e os objectivos⁴ são explicitados através de funções objectivo (Matos, 1988). Nos segundos, o número de alternativas é limitado e os atributos⁵ são explicitamente conhecidos. Doumpos e Zopounidis (2002) dividem os problemas de decisão em discretos e contínuos. Note-se que a designação “problemas discretos” é muitas vezes utilizada para designar os problemas multiatributo, o que não é correcto uma vez que existem problemas discretos multiobjectivo.

No contexto da classificação da situação de decisão identificam-se, geralmente, quatro tipos de problemas, nomeadamente: escolha (*selection* ou *choice*), afectação (*sorting* ou *classification*), ordenação (*ranking*) e descrição ou cognição (*description* ou *cognition*). A problemática de escolha (*P.α*) consiste na escolha de uma única acção, considerada a melhor para a globalidade dos critérios e no conjunto de todas as acções. A problemática de

⁴ Um objectivo indica o sentido e a direcção do aumento de satisfação de um critério.

⁵ Um atributo mede quantitativa ou qualitativamente o grau de satisfação de um critério, correspondendo ao “valor” do critério.

afecção ($P.\beta$) tem como objectivo atribuir a cada uma das acções uma categoria pré-definida considerada a mais adequada. A problemática de ordenação ($P.\gamma$) tem como objectivo a ordenação, parcial ou completa, do conjunto de acções. Finalmente, a problemática de descrição ou cognição ($P.\delta$) tem como objectivo descrever as acções através das suas consequências de forma sistemática assim como a formalizar ou a elaborar um procedimento cognitivo (Roy, 1996).

Dada a existência de inúmeros métodos multicritério é muitas vezes difícil o estabelecimento de uma classificação de aceitação geral e que os enquadre a todos. Uma classificação possível destes métodos baseia-se na escola de origem: *americana* e *francesa* (ou europeia). Os métodos da escola americana consistem na agregação dos diferentes pontos de vista numa única função de síntese e na posterior aplicação de um algoritmo de optimização. Como exemplos desta família referem-se os métodos MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) (Bana e Costa e Vasnick, 1995; Bana e Costa *et al.*, 2005) e AHP (*Analytical Hierarchical Process*) (Saaty e Vargas, 1982; Saaty e Vargas, 2001). Os métodos da escola francesa consistem na construção de relações binárias, designadas por relações de prevalência (*outranking*), que representam o sistema de preferências do decisor. Como exemplos, referem-se os métodos ELECTRE (*ELECTION et Choix Traduisant la Réalité*) (Roy, 1991; Figueira *et al.*, 2005) e PROMETHEE (*Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations*) (De Keyser e Peeters, 1996; Brans e Mareschal, 2005).

A selecção do método multicritério a utilizar depende de vários factores, como sejam o tipo de problema, o contexto, os agentes de decisão (ou actores) envolvidos, a estrutura da preferência e o tipo de problemática (Morais e Almeida, 2006).

Os métodos da família ELECTRE têm tido bastante aplicação nas mais diversas áreas de actividade e adequam-se a situações em que existem pelo menos cinco critérios a ter em conta. Entre as principais vantagens destacam-se o facto de as acções serem avaliadas segundo escalas ordinais e permitirem a heterogeneidade nos valores dos critérios resultante da natureza das avaliações (Figueira *et al.*, 2005). A ferramenta de apoio à decisão multicritério que se apresenta neste artigo foi desenvolvida com base no método ELECTRE TRI que se descreve na próxima secção.

4. MÉTODO ELECTRE TRI

O método ELECTRE TRI enquadra-se na problemática de afectação ($P.\beta$) e consiste em atribuir (ou afectar) cada uma das acções (alternativas, candidatos, etc.) a uma das várias categorias (classes) pré-definidas. O método consiste, numa primeira fase, na construção de relações de prevalência (subordinação ou superação) que caracterizam o modo como as acções são comparadas e, numa segunda fase, na exploração que se refere à afectação das acções às categorias pré-definidas. As referidas relações de prevalência utilizadas neste método têm como significado “*pelo menos tão bom quanto*”. Na Figura 4 ilustram-se graficamente os perfis de referência (b_0, b_1, b_2 e b_3), as categorias (C_1, C_2 e C_3), os critérios (g_1, g_2, g_3, g_4 e g_5) e as acções (a_1 e a_2).

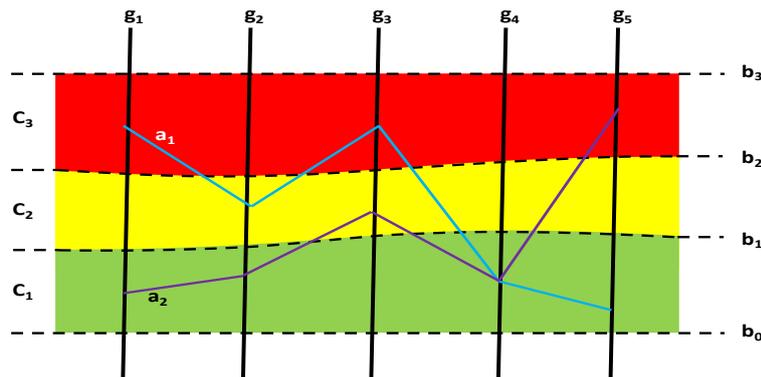


Figura 4 – Categorias definidas no ELECTRE TRI

Na comparação entre duas acções, podem ocorrer quatro situações distintas: (i) preferência estrita ou forte (P); (ii) preferência fraca (Q); (iii) indiferença (I); e (iv) incomparabilidade (R). A preferência estrita corresponde à situação em que existe uma preferência clara e sem dúvidas a favor de uma de duas acções. A situação de indiferença surge quando o decisor não é capaz de distinguir a preferência entre duas acções, ou seja, as acções são equivalentes entre si. A preferência fraca corresponde à situação em que o decisor hesita entre a preferência estrita e a indiferença, correspondendo a uma zona de transição. Podem surgir situações em que duas acções são incomparáveis, por haver razões fortes para preferir uma delas como para preferir a outra; esta situação designa-se por incomparabilidade.

As relações P , I e R constituem o que se designa, em análise multicritério, por estrutura de preferência. Cada estrutura de preferência pode ser caracterizada por uma relação de prevalência (S) tal que “ a prevalece sobre b ” (aSb), se e só se “ a for preferível a b ” (aPb) ou se “ a for indiferente a b ” (aIb) (Figueira *et al.*, 2005). No método ELECTRE TRI a relação de prevalência é construída para tornar possível a comparação de uma acção, a_i , com um perfil de referência, b_h . A afirmação a_iSb_h significa que “ a_i não tem um desempenho pior do que o limite b_h ” ou “ a_i é pelo menos tão bom quanto o limite b_h ”.

De modo a considerar o carácter imperfeito das avaliações das acções, os métodos da família ELECTRE podem utilizar limiares de discriminação. Estes limiares podem ser constantes ou variar ao longo da escala. A metodologia de aplicação do método ELECTRE TRI encontra-se bem estabelecida e a sua descrição detalhada pode ser encontrada em Roy (1991; 1996), Mousseau *et al.* (1999) e Figueira *et al.* (2005).

Na validação da afirmação a_iSb_h (ou b_hSa_i) as condições de concordância e não discordância devem ser verificadas. A condição de concordância é verificada quando uma maioria suficiente de critérios for a favor da asserção a_iSb_h (ou b_hSa_i). A condição de não discordância é verificada quando em condição de concordância esperada nenhum dos critérios na minoria se opuser à afirmação a_iSb_h (ou b_hSa_i).

A relação de prevalência entre uma acção a e uma acção de referência b_h é estabelecida a partir dos índices de credibilidade e de um limiar de corte λ constante. O limiar de corte deverá ser superior a 0,50 representando, deste modo, a maioria de critérios que são a favor da asserção a_iSb_h (ou b_hSa_i).

A atribuição das acções às categorias é efectuada por dois procedimentos (fase de exploração referida anteriormente): um pseudo-disjuntivo (abordagem “*bottom-up*”) e um pseudo-conjuntivo (abordagem “*top-down*”). O procedimento pseudo-conjuntivo atribui as acções às piores categorias possíveis e, pelo contrário, o procedimento pseudo-disjuntivo, procura atribuir as acções às melhores categorias possíveis.

5. CASO DE ESTUDO

5.1. Caracterização do caso de estudo

A zona em estudo é um sector de uma rede de distribuição de água de uma cidade de média dimensão da Área Metropolitana de Lisboa. Este sector abastece uma população aproximada de 11 000 habitantes, em cerca de 4 150 fogos habitacionais. Os fogos estão distribuídos por edifícios, com uma média, de 5 andares (existindo, no entanto, edifícios mais altos com cerca de 17 andares). A ligação à rede de distribuição de água é efectuada através de 416 ramais domiciliários. A rede apresenta uma extensão total de 10,3 km, com diâmetros nominais entre 38 e 400 mm. Nesta rede coexistem condutas de diferentes materiais, tais como, ferro fundido dúctil (FFD), ferro galvanizado (FG), polietileno de alta densidade (PEAD), policloreto de vinilo (PVC) e fibrocimento (FC) (*cf.* Figura 5). A idade média das condutas da rede é superior a 30 anos, e foram registadas 227 ordens de serviço (ou de trabalho) nos últimos 10 anos (de 2000 a 2010). Destas ordens de serviço, 44 correspondem a roturas não provocadas por terceiros.

5.2. Problema de decisão

Admita-se que o utilizador está a aplicar a metodologia proposta por Alegre e Covas (2010), ao nível tático, e que identificou este sector como uma área prioritária de intervenção (terminou a Etapa 4) e que pretende definir, então, quais são as condutas prioritárias e quais as alternativas de intervenção (*i.e.*, Etapas 5 a 8). É importante referir que, em certos casos, a intervenção a realizar pode não incidir directamente sobre a conduta identificada mas sim em outras partes do sistema. A utilização do método ELECTRE TRI tem como objectivo o estabelecimento de prioridades de intervenção de reabilitação dos componentes (condutas) de uma determinada área de análise. A definição das prioridades de reabilitação é efectuada através da categorização dos candidatos que, com base em critérios bem estabelecidos e independentes, permitirá distinguir cada uma das condutas numa avaliação qualitativa do tipo mau, satisfatório ou bom (candidato) e à qual poderá ser atribuída, obviamente, uma prioridade de intervenção.

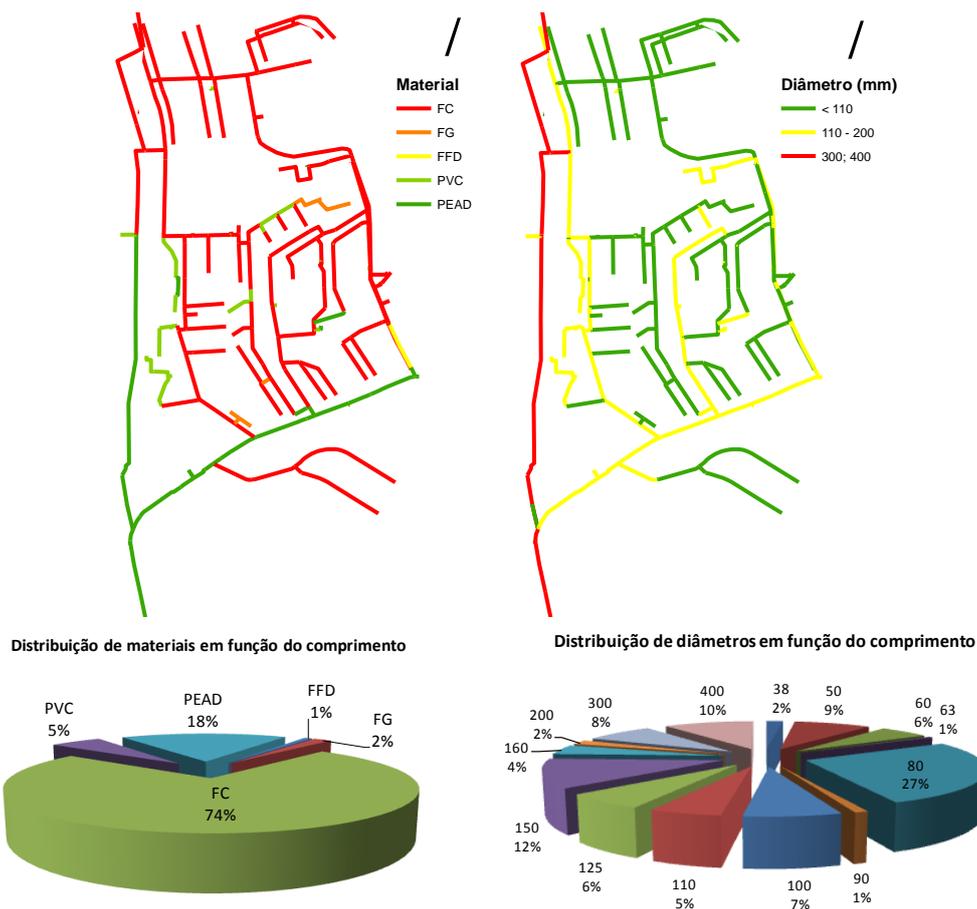


Figura 5 – Distribuição dos diâmetros e dos materiais na rede de distribuição da área em estudo

O método ELECTRE TRI adequa-se a situações em que haja mais que cinco critérios, por isso, foram escolhidos para o presente caso os seguintes cinco critérios que se consideram relevantes para a definição de prioridades de reabilitação: taxa média de rotura do grupo, taxa média de rotura do indivíduo, índice de desempenho de velocidade, factor de importância do componente para a satisfação do consumo e percentagem de vida útil residual. Os critérios considerados neste estudo são apenas exemplos de critérios que podem ser utilizados na aplicação do método, não devendo, por isso, ser entendidos como qualquer tipo de recomendação à aplicação da metodologia proposta. O problema é formulado sem a distinção ou a agregação prévia dos critérios em cada uma das dimensões, seguindo a primeira via das duas abordagens referidas (Figura 3a).

5.3. Taxas médias de rotura

Foram considerados como critérios duas taxas médias de rotura: uma relativa ao grupo e a outra relativa ao indivíduo. O primeiro critério utiliza uma taxa média de rotura de um grupo com características iguais, ou seja, material, diâmetro e época de instalação e que por isso seja expectável um comportamento semelhante. O segundo critério considera a taxa de rotura verificada num dado indivíduo. Este último critério pretende evidenciar as condutas

em que já se tenha verificado a ocorrência de uma rotura. Na determinação das taxas deve ser tido em conta o período de observação do histórico de roturas.

5.4. Índice de desempenho de velocidade

Um índice de desempenho utiliza curvas de penalidade que permitem traduzir a relação entre o comportamento da propriedade ou variável de estado em análise e a respectiva classificação em termos de desempenho técnico de um sistema desde o serviço nulo até ao bom serviço. O índice de desempenho varia entre a ausência de serviço (desempenho nulo) e o serviço óptimo (desempenho máximo), e as curvas destinam-se a penalizar qualquer desvio deste óptimo (Alegre, 1998).

A convenção adoptada por Coelho e Alegre (1999) quanto à escala de desempenho considera valores de 0 a 4: 4 – serviço óptimo; 3 – serviço adequado; 2 – serviço minimamente aceitável (limiar de aceitabilidade); 1 – serviço inaceitável; e 0 – ausência / interrupção do serviço. Dias (1999) redefine a escala de desempenho para um intervalo de 0 a 100%, e que é adoptada no âmbito deste artigo.

Coelho e Alegre (1999) propõem a utilização da equação fixada na alínea a) do art. 21º do Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de Agosto (Equação 1) para a velocidade máxima de escoamento para o caudal de ponta no horizonte de projecto em condutas em pressão em sistemas de distribuição de água:

$$V_{max} = 0,127D^{0.4} \quad (1)$$

em que:

V_{max} = velocidade máxima (m/s);

D = diâmetro interno da conduta (mm).

O desempenho óptimo de velocidade (100%) é atribuído à velocidade de referência do respectivo trecho de conduta. Abaixo da velocidade de referência, o desempenho reduz-se linearmente até um desempenho aceitável (75%) para a velocidade mínima admissível (0,3 m/s), seguindo a mesma tendência até atingir um desempenho inaceitável (25%) para a velocidade nula. Acima da velocidade de referência, o desempenho também se reduz linearmente até um desempenho inaceitável (25%) para o dobro da velocidade de referência, continuando a diminuir, até se tornar nulo (0%) para o triplo desta velocidade.

5.5. Factor de importância do componente para a satisfação do consumo

O método utilizado para a determinação do factor de importância do componente para a satisfação do consumo (FICSC) recorre ao modelo de simulação hidráulica EPANET (Rossman, 2000) e analisa a importância de cada trecho de conduta no conjunto da rede de distribuição através do efeito da variação de pressão nos nós. O algoritmo consiste na simulação de roturas em cada uma das condutas através do fecho dos trechos de conduta e na respectiva simulação hidráulica. Deste modo, é simulada a consequência de uma eventual ocorrência de uma rotura num determinado trecho, ao nível dos consumos nos nós tendo em conta a variação de pressão nos mesmos.

Conceptualmente num nó podem-se verificar as seguintes situações: (i) se a pressão for inferior à pressão mínima não há ocorrência de consumo; (ii) se a pressão for acima da

pressão de referência o consumo é totalmente satisfeito; (iii) se a pressão estiver entre as pressões mínima e de referência então o valor do consumo é ajustado de acordo com a Equação 2 (Wagner *et al.*, 1988).

$$Q_i = Q_{0,i} \sqrt{\frac{p_i - p_{min}}{p_{ref} - p_{min}}} \quad (2)$$

em que:

Q_i = caudal fornecido ao nó i (m^3/s);

$Q_{0,i}$ = consumo global no nó i (m^3/s);

p_i = pressão no nó i (Pa);

p_{min} = pressão mínima (Pa);

p_{ref} = pressão de referência (Pa)

Finalmente, o FICSC é obtido através da razão entre o caudal entrado na rede de distribuição e o consumo total da rede utilizando a Equação 3.

$$FICSC_n = \sum_{i=1}^i \left(1 - \frac{Q_i}{Q_{0,i}} \right) \quad (3)$$

5.6. Percentagem de vida útil residual

A vida útil residual de um componente corresponde ao período durante o qual se prevê que o componente ainda cumpra adequadamente as suas funções. A percentagem de vida útil residual (PVUR) corresponde ao rácio entre a vida residual e a vida útil técnica (Equação 4).

$$PVUR_i = 1 - \left(\frac{Ano_j - Ano_{i,0}}{VUT_i} \right) \quad (4)$$

Em que:

$PVUR_i$ = vida útil residual do componente i (%);

Ano_j = ano civil actual (ano);

$Ano_{i,0}$ = ano civil da instalação do componente (ano);

VUT_i = vida útil técnica do componente i (anos).

As vidas úteis dependem do tipo e natureza do componente podendo ser afectadas significativamente pela qualidade de produção dos materiais, condições de transporte e armazenamento, forma de instalação, adequação às condições locais e ao uso e forma de operação e manutenção. A vida útil técnica, considerada nas fases de concepção e de projecto, pode ser majorada uma vez que numa grande parte dos casos esta se encontra já ultrapassada.

5.7. Aplicação do método ELECTRE TRI

O método ELECTRE TRI utiliza limiares de discriminação (indiferença, preferência, de veto) associados a cada um dos critérios; a determinação destes limiares é uma tarefa complexa. A maioria dos autores considera que a estimação dos limiares é subjectiva, flexível e dependente do contexto de estudo (Wagner *et al.*, 1988). No âmbito do presente estudo optou-se, nesta fase, por não utilizar os limiares de discriminação, simplificando, deste

modo, a utilização do método. O método ELECTRE TRI foi implementado em Microsoft Excel 2007 recorrendo à linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA). Os critérios e os resultados obtidos são visualizados através de um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Os perfis de referência correspondem à fronteira entre as categorias (ou classes) pré-definidas. Para uma melhor percepção acerca das categorias optou-se por representá-las com três cores distintas: vermelho, amarelo e verde. Na Figura 6 apresentam-se para cada um dos critérios as condutas do caso estudo categorizadas.

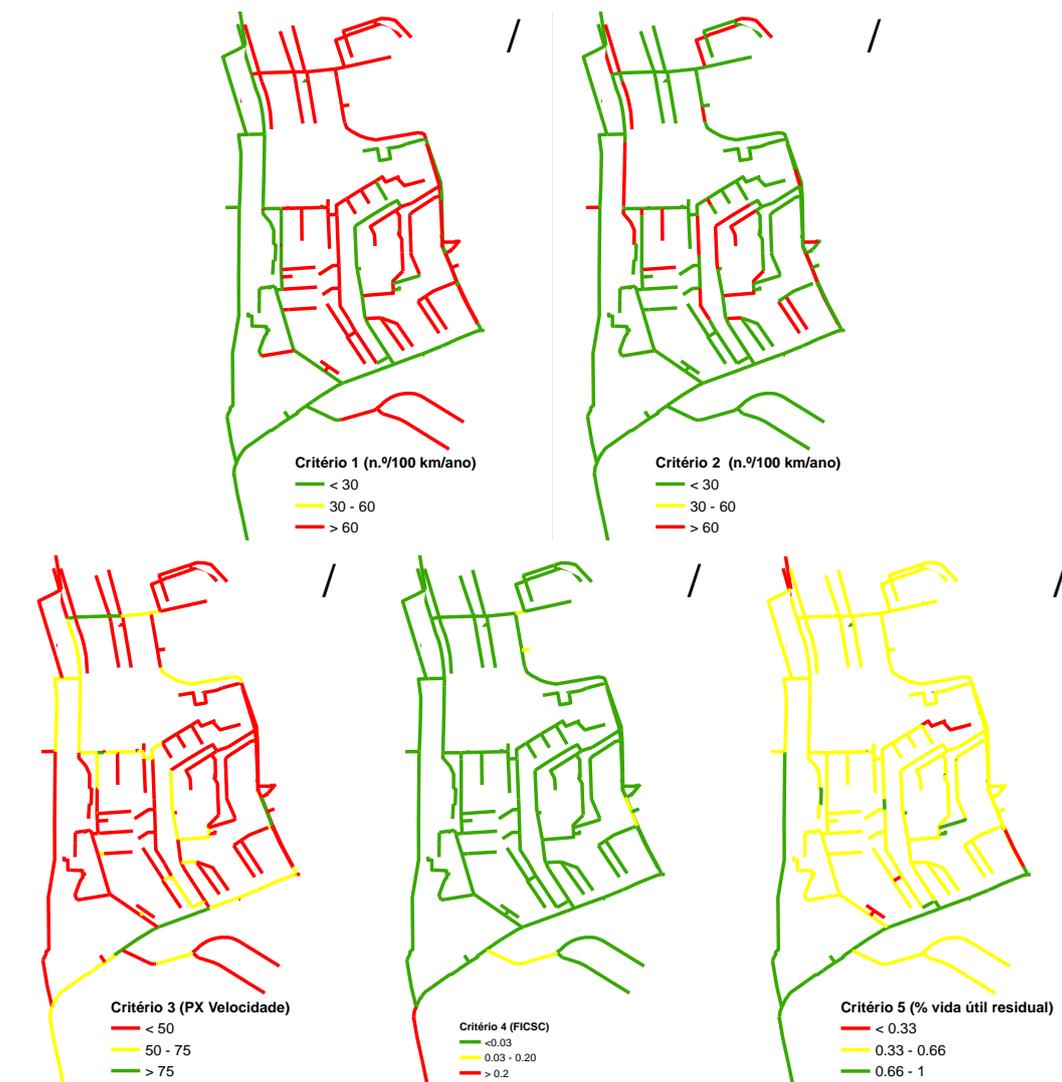


Figura 6 – Categorização de cada um dos critérios (Critérios 1 a 5)

No Quadro 1 apresentam-se os limites das classes e que definem os perfis de referência no método ELECTRE TRI. Optou-se, nesta fase, por atribuir a cada critério a mesma importância, ou seja, atribuir o mesmo peso a cada um dos critérios.

Quadro 1 – Limites das classes (perfis de referência)

Critério		Classe 1	Classe 2	Classe 3
1	Taxa média de rotura do grupo	[0; 30]	]30; 60]	]60; +∞[
2	Taxa média de rotura do indivíduo	[0; 30]	]30; 60]	]60; +∞[
3	Índice de desempenho de velocidade	]75; 100]	]50; 75]	[0; 50]
4	Factor de importância hidráulica do componente	[0; 0,03]	]0,03; 0,2]	]0,2; 1]
5	Percentagem de vida útil residual	]0,66; 1]	]0,33; 0,66]	[0; 0,33]

5.8. Resultados obtidos

Os resultados obtidos com a aplicação do método ELECTRE TRI e para diferentes níveis de corte (λ) apresentam-se na Figura 7. Relembre-se que o nível de corte está associado à maioria de critérios a favor da asserção “ a_i é pelo menos tão prioritário quanto b_h ”, a utilização de níveis de corte de 0,6, 0,8 e 1, significa que três, quatro e cinco critérios (num total de cinco critérios) são, respectivamente, a favor da referida asserção.

A atribuição das condutas candidatas (à reabilitação) aos perfis de referência é efectuada por dois procedimentos: pseudo-disjuntivo (optimista) e pseudo-conjuntivo (pessimista). O primeiro número a seguir à letra “C” na legenda da Figura 7 corresponde à categoria atribuída pelo procedimento pseudo-conjuntivo, enquanto o segundo número corresponde à categoria atribuída pelo procedimento pseudo-disjuntivo. As Categorias 1 e 3 são consideradas, respectivamente, a melhor e a pior categoria.

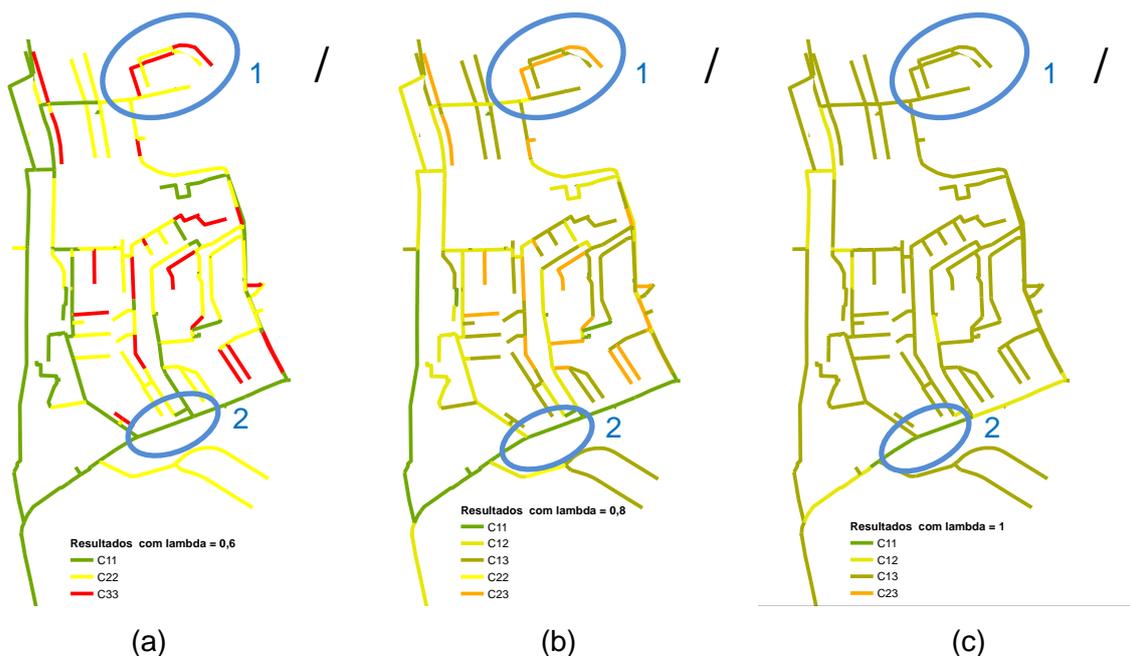


Figura 7 – Resultados obtidos para diferentes três níveis de corte (λ): (a) $\lambda=0,6$, (b) $\lambda=0,8$ e (c) $\lambda=1,0$

A utilização de um nível de corte superior a 0,60 implica um maior “desentendimento” entre os critérios quanto à asserção “ a_i é pelo menos tão prioritário quanto b_h ”, apontando os

resultados obtidos pelos procedimentos pseudo-disjuntivo e pseudo-conjuntivo em direcções opostas (como seria de esperar).

Observe-se, por exemplo, a Zona 1 na Figura 7. Para $\lambda=0,6$ os procedimentos pseudo-disjuntivo e pseudo-conjuntivo classificam uma parte das condutas na Categoria 3 (representada a vermelho), o que está de acordo com o que se observa na Figura 6 em que os Critérios 1 a 3 se encontram a vermelho. No entanto, para $\lambda=0,8$, o que equivale a aumentar a “maioria” com mais um critério (neste caso, para 4 critérios), a atribuição à Categoria 3 passa a ser “questionada” por este novo critério, sendo efectuada uma atribuição diferente pelos procedimentos pseudo-conjuntivo e pseudo-disjuntivo: o primeiro procedimento classifica a Zona 1 na Categoria 2 enquanto o segundo atribui à Categoria 3. Se se observar a Figura 6 verifica-se que os Critérios 1 a 3 são vermelhos mas o Critério 5 é amarelo, por isso são afectados às Categorias 2 e 3. Finalmente, quando se utiliza $\lambda=1,0$ (situação em que todos os critérios são tidos em conta para se manifestarem a favor da asserção “ a_i é pelo menos tão prioritário quanto b_h ”), os procedimentos pseudo-conjuntivo e pseudo-disjuntivo afastam-se na atribuição às categorias, sendo, as atribuições efectuadas respectivamente às Categorias 1 e 3, devido ao Critério 4.

Analise-se outra situação, a Zona 2 na Figura 7. Neste caso, os procedimentos pseudo-conjuntivo e pseudo-disjuntivo afectam os candidatos à Categoria 1, mantendo essa afectação inalterável, independentemente do valor de λ , o que está de acordo com o que se verifica em cada um dos critérios da Figura 6, em que estes estão todos representados a verde implicando, claramente, uma atribuição à Categoria 1.

Em síntese, se se pretender estabelecer prioridades de reabilitação, sendo menos conservativo e tendo em conta apenas três critérios, as condutas de prioridade mais elevada são as indicadas a vermelho na Figura 7a (Categoria 33). Se pelo contrário se pretender ter em conta simultaneamente os cinco critérios (Figura 7c), então praticamente todas as condutas são de igual prioridade de reabilitação (são quase todas da categoria C13), não sendo possível estabelecer preferências.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objectivo deste estudo foi o desenvolvimento de uma ferramenta multicritério de apoio à decisão para o estabelecimento de prioridades de reabilitação em sistemas de abastecimento de água, ao nível tático. De acordo com a metodologia AWARE, proposta por Alegre e Covas (2010) e Almeida e Cardoso (2010), a aplicação desta ferramenta pode ser útil tanto na fase de diagnóstico como na fase de identificação e análise de alternativas de intervenção, particularmente quando o número de hipóteses em análise é elevada e existe independência entre elas. A ferramenta foi desenvolvida em Microsoft Excel recorrendo à linguagem VBA e tem por base o método de decisão multicritério ELECTRE TRI, sendo os resultados visualizados em ambiente SIG. A ferramenta ajuda a definir prioridades de intervenção de modo eficiente e expedito, e é aplicável, sobretudo, quando estão em causa deficiências relativas à condição física dos componentes do sistema, i.e. quando as alternativas de intervenção são independentes entre si.

Neste estudo, e em particular na aplicação do método ELECTRE TRI, não se consideraram os limiares de discriminação (o que equivale a igualar os valores dos limiares a zero) e considerou-se que os critérios têm todos a mesma importância relativa (*i.e.*, peso igual a 1).

Através da análise de sensibilidade do parâmetro λ (valor corte), verificou-se que a utilização de níveis de corte maiores implica um maior “desacordo” entre os critérios quanto à asserção “*a* é pelo menos tão prioritário quanto *b*”. Este resultado está de acordo com o resultado esperado uma vez que o aumento do nível de corte implica o aumento do número de critérios a favor da referida asserção. Desta forma, os resultados obtidos utilizando os procedimentos pseudo-disjuntivo e pseudo-conjuntivo tornam-se mais diferentes, *i.e.* as classes atribuídas a cada uma das acções pelos procedimentos pseudo-disjuntivo e pseudo-conjuntivo diferem mais quanto maior for o valor do nível de corte.

O trabalho realizado apresenta grande interesse no que respeita ao desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão aplicados a sistema de abastecimento de água. No entanto, o trabalho ainda se encontra em fase de desenvolvimento, preconizando-se como próximos passos a introdução de limiares de discriminação, a utilização de pesos e a realização de análises de sensibilidade e de robustez ao método aqui apresentado. A utilização de um método para ordenação das condutas candidatas à reabilitação (as que são atribuídas à pior categoria), tendo como objectivo incorporar a restrição orçamental para a realização das intervenções será também investigada na sequência deste estudo. Além da ordenação das condutas a reabilitar encontra-se também em desenvolvimento uma metodologia multicritério que permita seleccionar de entre as técnicas de reabilitação existentes a(s) que melhor serve(m) os candidatos à reabilitação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Mecanismo Financeiro do Espaço Europeu (EEA Grants) e aos parceiros utilizadores finais – AdP Serviços S.A, AGS, S.A., SMAS de Oeiras e Amadora e Veolia Agua – o apoio financeiro para a realização deste trabalho através do projecto AWARE- P, Projecto n.º PT0043. À restante equipa de I&D do projecto, à ERSAR e aos parceiros utilizadores finais agradecem-se os contributos técnicos, essenciais para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albee. S. (2005). America's pathway to sustainable water and wastewater systems. *Water Asset Management International*. 1(1), 9-14.
- Alegre. H. (1998). Indicadores de desempenho de sistemas de abastecimento de água - trabalho em curso no âmbito da IWSA. *In Anais do 4º Congresso da Água: “A água como recurso estruturante do desenvolvimento”*. Lisboa.
- Alegre. H. (2007). *Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água e de drenagem e tratamento de águas residuais*. Programa de Investigação. LNEC. Lisboa.

- Alegre. H., Covas. D. I. C. (2010). *Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água: uma abordagem centrada na reabilitação*. ERSAR. Lisboa.
- Almeida. M. C., Cardoso. M. A. (2010). *Gestão patrimonial de infra-estruturas de drenagem de águas residuais e pluviais: uma abordagem centrada na reabilitação*. Lisboa.
- Bana e Costa. C., Corte. J. M., Vansnick. J. C. (2005). On the mathematical foundation of MACBETH. In *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Eds. J. Figueira, S. Greco and M. Ehrgott.. Springer Science + Business Media. Inc.. USA.
- Bana e Costa. C., Vansnick. J. C. (1995). General overview of the MACBETH approach. In *Advances in multicriteria analysis*. Eds. P. M. Pardalos, Y. Siskos and C. Zopounidis. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (The Netherlands).
- Brans. J., Mareschal. B. (2005). PROMETHEE methods. In *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Eds. J. Figueira. S. Greco and M. Ehrgott. Springer. Inc.. New York (USA).
- Coelho. S. T., Alegre. H. (1999) Indicadores de desempenho de sistemas de saneamento básico. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa.
- De Keyser. W., Peeters. P. (1996). A note on the use of PROMETHEE multicriteria methods. *European Journal of Operational Research*. 89(3), 457-461.
- Doumpos. M., Zopounidis. C. (2002). Introduction to the classification problem. In *Multicriteria decision aid classification methods*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht (The Netherlands).
- Engelhardt. M. O., Skipworth. P. J., Savic. D. A., Saul. A. J., Walters. G. A. (2000). Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective. *Urban Water* (2), 153-170.
- Figueira. J., Mousseau. V., Roy. B. (2005). Electre methods. In *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Eds. J. Figueira, S. Greco and M. Ehrgott.. Springer Science + Business Media. Inc.. USA.
- Kleiner. Y. (2001). Scheduling inspection and renewal of large infrastructure assets. *Journal of Infrastructure Systems* 7(4), 136-143.
- Matos. M. (1988). *Ajuda à decisão multicritério: novas contribuições*. Dissertação de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Morais. D. C., Almeida. A. T. (2006). Modelo de decisão em grupo para gerenciar perdas de água. *Pesquisa Operacional* (26), 567-584.
- Mousseau. V., Slowinski. R., Zielniewicz. P. (1999). *ELECTRE TRI 2.0a methodological guide and user's manual*. Université Paris-Dauphine. Paris (France).
- Pascal. L. G., Hatem. H., David. P., Katia. L., Rolf. B., Marcello. S. (2007). A multicriteria decision support methodology for annual rehabilitation programs of water networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22(7), 478-488
- Rossman. L. A. (2000). *Epanet 2: Users manual*. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Cincinnati (United States).
- Roy. B. (1991). The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory and Decision* 31(1), 49-73.

- Roy. B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding* . Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (The Netherlands).
- Saaty. T. L., Vargas. L. G. (1982). *The logic of priorities: applications of business. energy. health and transportation*. Kluwer-Nijhoff. Boston (USA).
- Saaty. T. L., Vargas. L. G. (2001). *Models. methods. concepts & applications of the analytic hierarchy process* . Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (The Netherlands).
- Sægrov. S., Baptista. J. M., Conroy. P., Herz. R. K., Le Gauffre. P., Moss. G., Oddevald. J. E., Rajani. B., Schiatti. M. (1999). Rehabilitation of water networks. Survey of research need and on-going efforts. *Urban Water* (1), 15-22.
- Vincke. P. (1992). *Multicriteria decision-aid* . John Wiley & Sons. Inc.. Chichester (UK).
- Wagner. J. M., Shamir. U., Marks. D. H. (1988). Water distribution reliability: simulation methods. *Journal of Water Resources Planing and Management*. 114(3), 276-294.