

METODOLOGIA DE APOIO À DECISÃO EM SISTEMAS DE ADUÇÃO DE ÁGUA

Aplicação a um caso de estudo

Nelson J. G. CARRIÇO

Aluno de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais 1049-001 Lisboa, nelson.carrico@ist.utl.pt

Didia I. C. COVAS

Professora associada, Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais 1049-001 Lisboa, didia.covas@civil.ist.utl.pt

Maria do Céu ALMEIDA

Investigadora principal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil 101 1700-066 Lisboa, mcalmeida@lnec.pt

João Paulo LEITÃO

Bolseiro de pós-doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil 101 1700-066 Lisboa, jpleitao@lnec.pt

Resumo

No presente artigo apresenta-se a aplicação de uma metodologia de apoio à decisão a um caso de estudo real. A metodologia é comparada com a abordagem tradicional utilizada num problema de decisão em engenharia e são apresentadas algumas reflexões sobre a sua utilização. O caso de estudo incide na componente de adução de água tratada entre a ETA e o reservatório de distribuição ao complexo industrial e considera diferentes cenários de evolução do consumo, diferentes métricas das dimensões de custo, risco e desempenho e diferentes alternativas técnicas de intervenção.

Aplicação destas abordagens mostrou que, apesar de ambas serem diferentes, os resultados obtidos são coerentes entre si e podem conduzir à mesma solução. A abordagem multicritério é mais abrangente e mais complexa na resolução do problema do que a abordagem tradicional; no entanto apresenta dificuldades na fase do modelo de avaliação, nomeadamente, na utilização dos cenários futuros, no tratamento da incerteza e na escolha do operador de agregação.

Palavras-Chave: análise multicritério, custo, desempenho, risco

1. INTRODUÇÃO

A tomada de decisão é uma atividade humana, sustentada na noção de valor e, portanto, a subjetividade estará sempre omnipresente e é o motor da decisão (Bana e Costa, 1993b). Tradicionalmente, os problemas de decisão são modelados matematicamente considerando apenas um único objetivo em que se pretende maximizar ou minimizar, caso se trate de um ganho (lucro) ou de uma perda (custo), respetivamente. No entanto, um problema de decisão é tipicamente uma situação onde podem ser identificados vários pontos de vista, várias dimensões, vários atores com os seus próprios valores, preferências e critérios. A formulação de um problema de decisão como um problema de otimização é uma simplificação da realidade e nem sempre permite considerar a complexidade do processo de decisão (Bouyssou *et al.*, 2006; Tsoukiàs, 2007; Tsoukiàs, 2008).

Tradicionalmente, a tomada de decisão sobre intervenções de reabilitação em sistemas de abastecimento de água é regida por critérios estritamente económicos, com base nos custos de investimento e nos encargos diretos de operação e manutenção do sistema. Esta abordagem permite a comparação e a seleção de diferentes soluções alternativas, assim como a estimativa 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 simplesmente por aspetos económicos, sendo fundamental considerar outros fatores, como sejam, os níveis de serviço, a fiabilidade do sistema, ou as perturbações causadas por obras em curso. Surge, assim, a necessidade de se incorporarem outros critérios, para além dos económicos, no processo da tomada de decisão.

Assim, as entidades gestoras para manterem níveis de serviço aceitáveis têm de tomar decisões de investimento e de planeamento que devem ser bem suportadas por vários critérios que reflitam os objetivos de maximização do desempenho e minimização simultânea do risco de falha do serviço e do custo. O equilíbrio, entre as dimensões de desempenho, de custo e de risco não é óbvio e cabe inevitavelmente ao decisor selecionar a solução que corresponda ao melhor compromisso entre estas dimensões. A utilização da análise multicritério ou metodologia de apoio à decisão (Albee, 2005; Barata, 2008; Engehardt *et al.*, 2000; Le Gauffre *et al.*, 2007) para a agregação destas três dimensões, numa perspetiva de longo prazo (*i.e.*, incorporando uma quarta dimensão – o tempo) é um tema de investigação em aberto.

No presente artigo apresenta-se a aplicação de uma metodologia de apoio à decisão a um caso de estudo real. A metodologia é comparada com a abordagem tradicional utilizada num problema de decisão em engenharia e são apresentadas algumas reflexões sobre a sua utilização.

2. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO E IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Uma entidade gestora do setor empresarial do estado gere e explora as infraestruturas urbanas de água de um importante complexo industrial. A maioria dessas infraestruturas foi construída há mais de 30 anos, sendo o seu estado de conservação desconhecido. O complexo industrial tem um elevado potencial de crescimento e é reconhecido como sendo um importante polo de desenvolvimento para a região. Num futuro próximo prevê-se a instalação de, pelo menos, uma grande indústria e a expansão de várias outras existentes. Consequentemente prevê-se, num curto prazo, um aumento considerável das necessidades de água industrial relativamente às atuais. Assim, a entidade gestora achou pertinente proceder a uma cuidada avaliação técnica ao sistema de abastecimento de água industrial.

A avaliação técnica efetuada permitiu identificar problemas ao nível da componente de adução de água tratada. A componente de adução de água tratada consiste, essencialmente, numa conduta em betão pré-esforçado, com alma de aço, com uma extensão total aproximada de 10 km e uma gama de diâmetros variável entre DN1000 e DN1500. A água industrial tratada é aduzida através da referida

conduta para um reservatório de distribuição com duas células de 50.000 m³ de capacidade total instalada.

Do ponto de vista hidráulico, a conduta tem capacidade de transporte máxima de 40 hm³/ano. Do ponto de vista estrutural, não se conhece o seu verdadeiro estado de conservação. A conduta encontra-se em funcionamento desde a sua instalação e, desde então, nunca foi colocada fora de serviço e alvo de qualquer tipo de inspeção. Todavia, têm sido registadas pequenas falhas que, até à data, não têm colocado em causa a continuidade do serviço, tais como válvulas não operacionais e roturas pontuais nos troços de conduta em aço localizados no interior das câmaras de válvulas.

Adicionalmente constata-se que não existem alternativas de fornecimento do serviço, ao complexo industrial, em caso de ocorrência de uma falha grave (e.g., rotura de grande dimensão de um trecho de conduta). Por isso, a falta de fiabilidade do sistema é uma preocupação atual da entidade gestora que deverá ser tida em consideração na avaliação.

Em suma, a entidade gestora vê-se forçada a intervir no sistema de abastecimento de água ao complexo industrial, nomeadamente, na componente de adução de modo a repor o seu estado de conservação para um nível satisfatório e aumentar a fiabilidade do sistema.

3. ABORDAGEM TRADICIONAL

3.1. Identificação de alternativas

Tradicionalmente, um problema de decisão deste tipo é, do ponto de vista da engenharia, abordado começando-se a criar as possíveis alternativas de intervenção que permitam solucionar o problema. No presente caso, as alternativas de intervenção têm como objetivo aumentar a fiabilidade do sistema, ou seja, são alternativas que permitem resolver os problemas estruturais da conduta e, se possível, criar redundância no sistema. A consideração de qualquer alternativa que implique a reabilitação da conduta terá que prever a construção de uma nova, uma vez que não é possível proceder à respetiva reabilitação sem interromper o serviço.

Após a conceção de alternativas, estas são avaliadas e comparadas considerando os custos de investimento e os custos de operação e manutenção. Em muitos casos, são considerados apenas os custos de investimento. Quanto aos benefícios das alternativas não são, na maioria das vezes, considerados porque o respetivo impacto nas receitas da organização não é óbvio nem facilmente quantificável. Além disso, as soluções técnicas podem nem sequer ter um impacto direto nas receitas sendo os benefícios, apenas, de natureza social ou ambiental e que, por isso, não são difíceis de quantificar em termos monetários. A alternativa recomendada como sendo a melhor solução técnica final é, normalmente, a que apresenta o custo financeiro mais baixo desde que satisfaça todos os requisitos técnicos exigidos.

No presente caso de estudo em análise as possíveis alternativas para a resolução do problema foram as seguintes:

- A₀: manter o *statu quo*;
- A₁: construir uma nova conduta e reabilitar a existente;
- A₂: construir uma nova conduta nova e desativar a existente.

3.2. Definição de cenários

De salientar que a conduta existente tem capacidade de transporte estimada em 40×10⁶ m³/ano e as necessidades atuais de água industrial situam-se em cerca de 40×10⁶ m³/ano, pelo que a conduta se encontra, atualmente, sobredimensionada, com capacidade para transportar o quadruplo das necessidades atuais (i.e., 10×10⁶ m³/ano).

Uma vez que a intervenção no sistema se torna evidente é inevitável, com ou sem a construção de uma conduta nova é, por isso, necessário considerar cenários futuros de previsão das necessidades de água industrial. Geralmente, um qualquer cenário futuro implica uma evolução no tempo, neste caso, das necessidades de água ao longo de todo o ciclo de vida de uma infraestrutura ou de um componente. No entanto, neste tipo de problemas e na prática corrente da engenharia apenas é considerado o valor máximo das necessidades de água num dado cenário e não a respetiva variação ao longo do tempo. A principal razão para isso prende-se com o facto de que do ponto de vista da engenharia se pretende avaliar se a capacidade hidráulica instalada é adequada às necessidades de água futuras e no caso de esta não se verificar determinar, então, o diâmetro mínimo para a instalação de uma nova conduta. A implementação de uma qualquer alternativa implica consequências futuras que não estão consideradas neste tipo de abordagem tradicional.

Na prática corrente interessa saber, apenas, quais são as necessidades de água máximas previstas, em cada cenário, para se poder determinar os caudais de transporte das condutas e, com isso, proceder-se ao respetivo pré-dimensionamento hidráulico.

No Quadro 1 apresenta-se os diferentes cenários considerados associados a cada um, as necessidades de água máximas previstas, no longo prazo, assim, como a capacidade de transporte prevista nas condutas nas diferentes alternativas. Existem cinco cenários futuros de necessidades de água industrial (40, 50, 55, 60 e $65 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$) e três alternativas de intervenção (A_0 , A_1 e A_2).

Cenários	Necessidade de água máxima prevista ($10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$)	Capacidade de transporte ($10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$)		
		Conduta existente	Conduta adicional	Total
C_0	40	40	0	40
C_1	50		10	50
C_2	55		15	55
C_3	60		20	60
C_{4a}	65		25	65
C_{4b}		65		

Quadro 1 – Cenários futuros de necessidades de água

3.3. Pré-dimensionamento de alternativas em função dos cenários

No pré-dimensionamento das condutas determina-se os diâmetros das condutas novas, sendo que estes podem depender do tipo de material selecionado. Regra geral, para condutas deste diâmetro é recomendada a utilização de ferro fundido dúctil (FFD) ou de polietileno de alta densidade (PEAD). Assim, ambos os materiais foram considerados na análise. No Quadro 2 apresenta-se os custos de investimento para as duas alternativas que consideram a construção de uma nova conduta (A_1 e A_2) com os diferentes diâmetros referentes a cada um dos cenários (1, 2, 3, e 4) e por tipo de material (PEAD e FFD).

PEAD MRS100 PN10				
Alternativa	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro interno (mm)	Custo unitário (€/m)	Custo de investimento (M €)
$A_1.C_1$	710	626	465	4,5
$A_1.C_2$	800	705	573	5,6
$A_1.C_3$	900	793	702	6,8
$A_1.C_{4a}$	1000	881	847	8,3
$A_2.C_{4b}$	1400	1234	1 530	14,9

FFD PN10				
Cenário	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro interno (mm)	Custo unitário (€/m)	Custo de investimento (M €)
C ₁	600	600	473	4,6
C ₂	700	700	680	6,6
C ₃	800	800	869	8,4
C _{4a}	900	900	1 034	10,9
C _{4b}	1200	1200	1 200	11,7

Quadro 2 – Custos de investimento em condutas novas, para as alternativas A₁ e A₂, em função do tipo de material e do cenário

3.4. Escolha da melhor alternativa

A comparação entre os tipos de material (PEAD vs. FFD) apenas pode ser efetuada entre diâmetros internos que garantem capacidade de transporte equivalente, e não por diâmetros nominais (DN). A comparação dos custos entre os dois tipos de material permite concluir que o PEAD é mais económico para a alternativa A₁ enquanto que para a alternativa A₂ é o FFD. O custo da reabilitação da conduta existente foi estimado em cerca de 5 M €. Assim, o custo de investimento de cada uma das alternativas é o que se apresenta no Quadro 3.

Alternativa	Capacidade de transporte (10 ⁶ m ³ /ano)	Diâmetro nominal da conduta nova (mm)	Material da conduta nova	Custo total de investimento (M €)
A ₀	40	–	–	5,0
A ₁	50	710	PEAD	9,5
	55	800		10,6
	60	900		11,8
	65	1000		13,3
A ₂	65	1200	FFD	11,7

Quadro 3 – Custo total de investimento para cada alternativa em função do cenário de consumo

Como referido anteriormente, a necessidade de reabilitação da conduta parece ser uma inevitabilidade face aos problemas detetados. No entanto, essa reabilitação, de um adutor com quase 10 km e diâmetros elevados (DN1000 a DN1500), tem sempre custos significativos. Além disso, não é possível suspender o serviço da conduta adutora durante um período de tempo suficientemente alargado para efetuar uma inspeção ao seu real estado de conservação é, por isso, sensato avançar para a construção de uma nova conduta adutora. Assim, a alternativa A₀ deve ser eliminada, independentemente de ser a alternativa que apresenta o custo de investimento mais baixo e de, ainda, satisfazer as necessidades de água no médio prazo.

A alternativa A₂ (*i.e.*, abandonar a conduta existente e construir outra em sua substituição) traduz-se numa opção radical. Trata-se de uma alternativa apenas realista se a perceção dos técnicos operacionais da entidade gestora ou um pré-diagnóstico à conduta existente conduzisse a uma conclusão de uma iminente falha grave e da impossibilidade total de recuperação. Como esta alternativa se traduz numa situação pouco verosímil, para além de não permitir criar redundância no sistema deve ser, por isso, rejeitada.

Assim, resta apenas a alternativa A₁, isto é, reabilitação da conduta existente e construção de uma nova. Quanto ao diâmetro a adotar para a nova conduta estará, como atrás exposto, associado ao

cenário. A questão que se coloca, então, é como é escolher o cenário mais plausível perante a grande incerteza existente relativamente ao futuro? Não existindo uma resposta óbvia para esta questão e tendo a regra do custo mais baixo, desde que os requisitos técnicos sejam cumpridos, a escolha a tomar seria a da construção de uma conduta nova em PEAD PN 10 DN 710 permitindo, assim, uma capacidade de transporte adicional de $10 \times 10^6 \text{ m}^3$. Saliente-se que a alternativa foi pensada para a construção de uma nova conduta paralelamente à existente e que por isso o custo calculado refere-se a uma conduta nova com 10 km de extensão e, por isso, qualquer valor diferente deste implica uma variação do custo final de investimento. O traçado final para a nova conduta não influencia a escolha entre as alternativas apresentadas.

4. ABORDAGEM MULTICRITÉRIO

4.1. Considerações iniciais

O objetivo da análise multicritério é o de fornecer um conjunto de ferramentas que permitem resolver problemas de decisão com diversos pontos de vista (em muitos casos contraditórios entre si) (Vincke, 1992). Um processo de decisão é uma sequência de passos a tomar para resolver um determinado problema de decisão, podendo o problema de decisão ser simples ou complexo (Bana e Costa, 1993a). Quando um problema de decisão é complexo e um decisor não possui os recursos suficientes (*e.g.*, disponibilidade, conhecimento técnico) para obter as respostas indispensáveis para a sua resolução é, frequente, recorrer a um apoio externo.

O apoio à decisão é a atividade da pessoa que através da utilização de modelos explícitos, mas não obrigatoriamente formalizados, ajuda a obter elementos de resposta a questões colocadas pelos intervenientes do processo de decisão. Os elementos de resposta tentam clarificar a decisão, habitualmente, para recomendar ou simplesmente favorecer um comportamento que irá aumentar a consistência entre a evolução do processo, os objetivos e o sistema de valores dos intervenientes (Roy, 1996). Quando um decisor recorre ao apoio à decisão é recorrente surgirem outros intervenientes no processo de decisão, nomeadamente, o cliente que tanto pode ser o próprio decisor ou alguém designado, por ele, e que o representará no processo de decisão e o analista que é quem presta o apoio à decisão. O analista também influencia o processo de decisão e o seu trabalho não é neutro (Roy, 1996). Quando o analista e o decisor são pessoas diferentes é comum que estes não tenham contacto direto.

São inúmeros os processos de decisão encontrados na bibliografia, desde os mais simples aos mais complexos. Esta abundância de processos deve-se, em parte, à grande variedade de tipos de problema de decisão existente. Segundo Tsoukiàs (2007; 2008) as grandes fases de um processo de decisão são: (i) contexto de decisão; (ii) formulação do problema; (iii) modelo de avaliação; e (iv) recomendação final. Estas quatro etapas serão analisadas, de uma forma pormenorizada e aplicadas ao caso de estudo, nas próximas secções. As quatro fases não são obrigatórias podendo existir todas ou apenas parte delas, dependendo do grau de complexidade do problema.

4.2. Contexto de decisão

A primeira etapa num processo de decisão é o estabelecimento do contexto de decisão, que corresponde a uma fase de inteligência na qual se tenta compreender a natureza e o respetivo ambiente do problema. Utilizando a perspetiva de um analista que é contratado por um cliente, com o objetivo de o apoiar na sua decisão, o analista sentirá necessidade de colocar várias questões para conhecer o problema, tais como: Quem tem o problema? Porque é que isto é um problema? Quem decide sobre este problema? Quais os sistemas de valores dos agentes de decisão? Quem irá sofrer as consequências da decisão? Que opções existem? (Bouyssou *et al.*, 2006; von Winterfeldt e

Edwards, 1986). De uma forma geral, nesta fase identificam-se os intervenientes ou atores (diretos ou indiretos), os respetivos valores e recursos e os objetivos da análise (von Winterfeldt e Edwards, 1986).

De acordo com Tsoukiàs (Tsoukiàs, 2008) a formulação de um problema é formada por um conjunto de três elementos: (i) conjunto de intervenientes no processo de decisão; (ii) conjunto dos objetos; e (iii) conjunto de recursos que cada interveniente afeta aos seus objetos e aos objetos dos outros intervenientes. Dependendo da etapa no processo de decisão os objetos podem ser: um conjunto de situações (no contexto de decisão); um conjunto de ações potenciais (na formulação do problema); ou um conjunto de ações (no modelo de avaliação) (Ouerdane, 2009).

No caso de estudo, o problema de decisão pertence à entidade gestora que gere as infraestruturas urbanas de água do complexo industrial, sendo, por isso, o principal interveniente neste processo de decisão. Para além da entidade gestora podem-se identificar outros intervenientes, como por exemplo: (i) os cliente do complexo industrial que, apesar de não participarem no processo de decisão, são estes que sofrerão as consequências (positivas ou negativas) da decisão (a estes intervenientes é usual chamar-se de terceiros ou agidos), (ii) a empresa que gere o complexo industrial e que pode de alguma forma exercer influência direta sobre a entidade gestora, e (iii) outros intervenientes que não participam diretamente no processo de decisão mas que podem influenciar a decisão final (e.g., políticos, entidade reguladora). Após a identificação dos intervenientes devem ser identificados os valores que cada um destes trará para o referido processo de decisão.

A decisão que se analisa, no presente artigo, é de vital importância para a entidade gestora uma vez que a ocorrência de uma falha grave no referido sistema adutor poderá provocar perturbações incalculáveis aos consumidores industriais, e conseqüentemente, acarretar elevados danos financeiros à entidade gestora do sistema (pagamento de sanções elevadas) e com isso comprometer o seu futuro. Para os consumidores do complexo industrial a decisão é de extrema importância porque a ocorrência de uma eventual falha no sistema poderá causar uma paragem forçada do fornecimento de água às empresas instaladas no complexo, obrigando a que algumas dessas empresas tenham que suspender a respetiva laboração e em resultados disso podem ocorrer elevados prejuízos económico-financeiros. A entidade que gere o complexo industrial tem todo o interesse no processo de decisão porque qualquer incidente grave que ocorra no referido complexo pode de algum modo comprometer a imagem do complexo e isso pode afastar potenciais interessados que se queiram instalar no referido complexo.

Finalmente, os recursos correspondem às disponibilidades e compromissos que cada um dos intervenientes está disposto a alocar ao processo de decisão (Sousa, 2010).

4.3. Formulação do problema

4.3.1. Considerações iniciais

O objetivo da formulação do problema é reduzir a realidade do processo de decisão num problema formal e abstrato (Ouerdane, 2009). A formulação de um problema engloba o conjunto dos seguintes três elementos: (i) conjunto das ações potenciais; (ii) conjunto dos pontos de vista fundamentais, incluindo diferentes cenários para o futuro; e (iii) resultado esperado (Tsoukiàs, 2007). Num processo de decisão complexo um analista pode construir diferentes formulações para um dado problema. Quando isso acontece pode-se estar perante a resolução de um meta-problema que é escolher a formulação mais apropriada para o problema (Matos, 2007). Normalmente, o decisor acaba por preferir uma das formulações.

4.3.2. Ações potenciais (alternativas em GPI)

Por definição, as ações potenciais são todas as ações reais ou fictícias provisoriamente julgadas realistas por pelo menos um dos intervenientes ou entendidas como tal pelo analista com o intuito de fazer progredir o processo de apoio à decisão (Roy, 1996). Uma ação é dita global se a sua implementação implicar a exclusão de qualquer outra ação introduzida no modelo (vulgarmente uma ação global é chamada de alternativa), caso contrário, a ação é dita fragmentada (Bana e Costa, 1993a). Na prática, o termo ação pode ser substituído por termos como: cenário, plano, programa, projeto, proposta, variante, *dossier*, operação, investimento, opção ou solução dependendo da situação (Roy, 1999).

No caso de estudo, em análise, as ações potenciais (consideradas reais ou ideais) que permitam resolver os problemas estruturais existentes na conduta ou criar redundância no sistema. Como as ações potenciais são mutuamente exclusivas elas podem ser designadas por alternativas. Assim, foram definidas as cinco seguintes alternativas potenciais:

- A₀: manter o *statu quo*;
- A₁: construir uma nova conduta e reabilitar a existente;
- A₂: construir uma nova conduta e desativar a existente;
- A₃: reabilitar a conduta existente;
- A₄: construir duas condutas novas.

4.3.3. Pontos de vista (dimensões em GPI)

De acordo com Tsoukiàs (2007) os pontos de vista são as diferentes dimensões pelos quais observamos, analisamos, descrevemos, avaliamos e comparamos os elementos do conjunto das ações potenciais. Bana e Costa (1993a) um ponto de vista representa todo o aspeto da decisão real apercebido como importante para a construção de um modelo de avaliação de ações existentes ou a criar. Ambas as definições são equivalentes. De referir que Keeney e Raiffa (1976) designam os pontos de vista por objetivos. Nesta fase, os pontos de vista não têm que ter, ainda, quaisquer propriedades formais nem têm que definir uma estrutura (e.g., hierarquia) (Bouyssou *et al.*, 2006).

No âmbito da Gestão Patrimonial de Infraestruturas (GPI) é recomendada uma metodologia que se encontra publicada nos guias técnicos n.º 16 e 17 (Alegre e Covas, 2010; Almeida e Cardoso, 2010) pela Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos (ERSAR) em que se recomenda a fundamentação da tomada de decisão em três dimensões distintas:

- custo;
- risco;
- desempenho.

No guia técnico n.º 16, referente às infraestruturas de abastecimento de água, no subcapítulo “Principais tipos de consequências de uma reabilitação insuficiente ou inadequada” quando aborda as dimensões de análise de consequência refere que o desempenho pode ser avaliado segundo diferentes pontos de vista ou dimensões (Alegre e Covas, 2010). Numa primeira análise do que foi exposto pode-se afirmar que se o desempenho é uma dimensão a ter em conta na tomada de decisão e que pode ser avaliado através de diferentes pontos de vista ou dimensões significando então que o desempenho se subdivide em diferentes sub-dimensões. Por outro lado refere-se a pontos de vista ou a dimensões implicando, assim, uma equivalência entre os conceitos, deste modo, o custo, o desempenho e o risco são os pontos de vista fundamentais a ter em conta para o presente caso de estudo.

4.3.4. Cenários

A abordagem multicritério refere que neste ponto da formulação do problema deve ser tido em conta diferentes cenários para o futuro. Os cenários para o futuro são os diferentes estados do mundo, isto é, são os fatores aleatórios que determinam as circunstâncias em que a decisão vai ser executada. O conceito de estados do mundo foi introduzido por Savage (1954) e refere-se a uma “descrição do mundo tão completa que se conhecido e verdadeiro as consequências de cada uma das ações serão conhecidas.” O termo mundo é utilizado, neste contexto, para descrever o objeto da decisão. Por definição os estados do mundo são mutuamente exclusivos, implicando que apenas um estado do mundo pode acontecer, e têm que ser exaustivos.

As decisões do género da que se analisa no caso de estudo são fortemente influenciadas pela evolução da procura de água por parte dos consumidores da zona de abastecimento servida pelo sistema em análise. Por isso, consideram-se dois cenários de evolução dos consumos de água no parque industrial (cf. Figura 1):

- Cenário 1: aumento do consumo de 20 para 50 hm³/ano, a partir de 2020;
- Cenário 2: redução de 20 para 10 hm³/ano, a partir de 2025

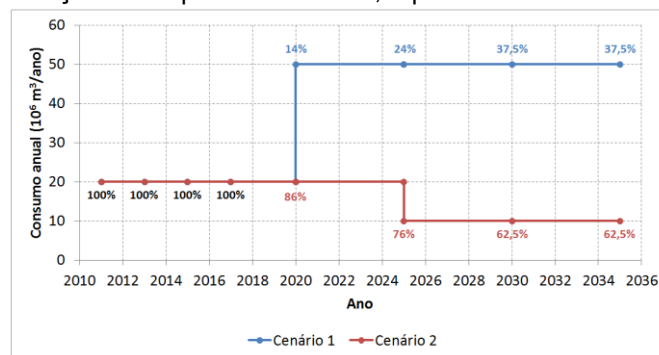


Figura 1 – Cenários de evolução dos consumos de água industrial

4.3.5. Resultado esperado

O resultado esperado é aquilo que o decisor espera obter no final do processo de decisão. Regra geral, o conceito de decisão é associado ao conceito de escolha, no entanto, esta assunção é limitadora face aos diferentes contextos de decisão que um decisor pode enfrentar. Um decisor pode, por exemplo, ter que escolher entre diferentes alternativas, ordenar entre diferentes opções, rejeitar diferentes alternativas, descrever um problema de decisão, etc. (Stamelos e Tsoukiàs, 2003). O resultado esperado num processo de decisão está, normalmente, ligado às problemáticas de apoio à decisão. Roy (1996) define quatro tipos de problemáticas: escolha ou seleção ($P.\alpha$); classificação ou afetação ($P.\beta$); ordenação ou seriação ($P.\gamma$) e problemática de descrição ou cognição ($P.\delta$).

No presente caso de estudo, uma vez que a entidade gestora pretende saber qual é a melhor alternativa de intervenção, o resultado esperado tanto pode ser a escolha da melhor alternativa como a ordenação das diferentes alternativas. No caso de estudo em análise, podem-se criar duas formulações para o problema, uma vez que se podem construir dois resultados esperados diferentes, isto é, pode haver uma formulação para a problemática de escolha e uma outra para a problemática de ordenação. Apenas a problemática de ordenação será tida em conta, por isso ter-se-á perante apenas uma formulação do problema.

4.4. Modelo de avaliação

4.4.1. Considerações iniciais

De um modo geral, existem três tipos de informações respeitantes às alternativas: (i) as opiniões e julgamentos dos diferentes intervenientes; (ii) as características das alternativas nos diferentes atributos; (iii) os possíveis cenários em que a informação relativa às alternativas pode ser diferente. Deste conjunto de fontes de informação (intervenientes, critérios e incerteza) podem surgir sentenças do tipo: o interveniente α gosta mais da alternativa x ; os intervenientes α e β preferem as alternativas x a y ; a opinião do interveniente α é mais importante que a do interveniente β ; o valor da métrica x na alternativa a_1 é k ; no cenário n_1 a alternativa x é inaceitável (Tsoukiàs, 2012). Do ponto de vista formal, as opiniões, os atributos e os cenários são diferentes dimensões nos quais se avaliam as alternativas.

Num dado contexto de decisão pode haver necessidade de se organizar a informação disponível de modo a obter-se uma resposta formal à formulação do problema, e construir-se, assim, um modelo de avaliação. Um modelo de avaliação pode ser definido pelo conjunto dos seguintes elementos: (i) conjunto das ações, ao qual o modelo se aplica; (ii) conjunto de dimensões (atributos) e respetivas medidas e escalas com as quais os elementos do conjunto das alternativas são observados, descritos, medidos, etc.; (iii) conjunto de critérios (se os houver) com os quais cada elemento do conjunto de alternativas é avaliado de modo a ter em conta as preferências dos intervenientes; (iv) conjunto das medidas de incerteza associadas às dimensões e/ou aos critérios; (v) conjunto de operadores de agregação que permitem obter informação sintetizada acerca dos elementos do conjunto de alternativas (Bouyssou *et al.*, 2006; Tsoukiàs, 2007).

4.4.2. Ações a modelar

As ações a modelar são as alternativas de intervenção que efetivamente vão ser avaliadas e que foram consideradas consensuais em reuniões com a entidade gestora. As referidas alternativas são: manter o *statu quo* (A_0); construir uma nova conduta e reabilitar a existente (A_1); construir uma nova conduta e desativar a existente (A_2).

4.4.3. Dimensões (métricas em GPI)

As dimensões de acordo com a abordagem multicritério correspondem aos atributos. Um atributo é uma característica ou um sinal que permite comparar duas coisas (*e.g.*, noções, avaliações de um objeto). Segundo Bana e Costa (1993a) as características são as diversas propriedades, predicados, qualidades e respetivos indicadores, inerentes atribuídos ou desejados para as ações potenciais. Um atributo apenas se tornará um critério quando servir de base para um julgamento de preferências.

As dimensões no âmbito da GPI designam-se por métricas. As métricas são, de acordo com Morisio e Tsoukias (1997), números ou símbolos que são imputados objetivamente aos atributos. A noção de métricas distingue-se da de preferências pela subjetividade atribuída a esta última.

Assim, as métricas consideradas para o caso de estudo em análise foram as seguintes:

1. risco de roturas em condutas (R_1);
2. risco de insuficiente capacidade hidráulica do sistema (R_2);
3. indicador de perdas reais de água (P_1);
4. indicador de excesso de capacidade hidráulica das condutas (P_2);
5. índice de valor da infraestrutura – IVI (P_3);
6. custo total (C_1).

As escalas podem ser de diferentes tipos, tais como, ordinal, de intervalo ou de razão, Para cada uma das métricas referidas foram definidas escalas.

4.4.4. Critérios

Um critério define-se como sendo um instrumento que serve para avaliar e comparar ações potenciais de acordo um ponto de vista bem definido (Bouyssou, 1990; Roy, 1985; 1999). Na prática, um critério é uma dimensão a que se pode associar um modelo de preferência de modo a que um decisor possa efetuar uma escolha nessa dimensão (Ouerdane, 2009).

Numa abordagem multicritério são construídos vários critérios usando diferentes pontos de vista, neste caso deve-se construir uma família coerente de critérios e para tal é necessário que sejam cumpridas três condições habitualmente designadas por axiomas de Roy. Esses axiomas, em linguagem não matemática, são: exaustividade; coesão; e não redundância (Bisdorff, 2002; Pardalos e Hearn, 1999; Roy, 1996).

No caso de estudo em análise foram considerados como critérios as dimensões atrás referidas e que se encontram descritos em Carriço *et al.* (2012). Os critérios foram avaliados tendo em conta o longo prazo, isto é, para um período de análise de 25 anos.

4.4.5. Incerteza

Entende-se por incerteza a falta de informação completa sobre qualquer coisa, isto é, está-se perante incerteza quando alguém é incapaz com a informação de que dispõe de descrever, prescrever ou prever deterministicamente ou numericamente um sistema, o seu comportamento ou outras características (Stewart, 2005). As incertezas podem ser internas ou endógenas e externas ou exógenas. Exemplos de incertezas internas incluem a dificuldade de discriminar alternativas, numa dada dimensão ou critério, devido à sua natureza ambígua ou natureza linguística, inconsistências resultantes de informação contraditória e empobrecimento da informação devido à agregação das dimensões ou dos critérios. Casos típicos de incertezas externas incluem a presença de diferentes cenários das avaliações, informação deficiente ou inexistente acerca das dimensões ou dos critérios e hesitações ou inconsistências dos agentes de decisão no estabelecimento dos critérios (Bouyssou *et al.*, 2006).

Para além dos cenários para o futuro atrás referidos não foi considerada qualquer tipo de incerteza na análise do caso de estudo devido à dificuldade em definir limiares de discriminação. Os limiares de discriminação pretendem ter em conta a natureza imperfeita do conhecimento relativa às ações e são utilizados para modelar situações em que a diferença entre as avaliações associadas a duas ações pode: (i) justificar a preferência a favor de uma ou duas ações (limiares de preferência); (ii) ser compatível com a indiferença entre duas ações (limiares de indiferença); e (iii) ser interpretadas como uma hesitação entre optar por uma preferência ou uma indiferença entre duas ações. A determinação dos limiares associados a cada um dos critérios não é uma tarefa fácil. Na bibliografia, a maioria dos autores consideram que a estimação dos limiares é subjetiva, flexível e depende do contexto de estudo (Roy, 1996).

A incerteza associada aos consumos é tratada no presente artigo sob a forma de cenários.

4.4.6. Operadores de agregação

Os operadores de agregação podem ser classificados como procedimentos de critério único excluindo incomparabilidade (teoria da utilidade/valor multiatributo); procedimentos de relação de prevalência aceitando incomparabilidade (métodos de prevalência) e procedimentos de julgamento interativo com interações de tentativa-e-erro (métodos interativos) (Roy, 1996; Vincke, 1992).

A escolha do método depende da formulação do problema adotada e deve possuir significado teórico e operacional. Cada método requer a definição de um conjunto de parâmetros (Bouyssou *et al.*, 2006). Existem inúmeras técnicas que se adequam a diferentes situações. Guitouni e Martel (1998) afirmam que a escolha de um método multicritério de apoio à decisão é, por si só, um outro problema

multicritério. Diferentes métodos quando aplicados a um dado problema e com informação equivalente produzem em muitos casos resultados díspares (Bouyssou *et al.*, 2006; Polatidis *et al.*, 2006).

O operador de agregação utilizado no caso de estudo foi o ELECTRE III que se aplica à problemática do tipo ordenação, e que se adequa a situações em que existem pelo menos cinco critérios a ter em conta, permite utilizar alternativas avaliadas segundo escalas ordinais e permite incorporar a incerteza endógena. Para além disso os métodos da família ELECTRE têm tido bastante aplicação nas mais diversas áreas de atividade, inclusive no setor da água.

Como já foi referido os diferentes critérios foram avaliados tendo em conta o longo prazo. Com isto uma questão se levanta na aplicação do método ELECTRE III, se existem seis critérios avaliados num período de 25 anos e para dois cenários diferentes como se deve, então, aplicar o método? Numa primeira abordagem ao problema optou-se por agregar os critérios ao longo do tempo. No caso dos critérios de risco (R_1 e R_2), o risco global da alternativa corresponde ao valor máximo no período nessa alternativa. O critério de custo agregou-se somando os custos anuais atualizados. Para os critérios de desempenho, exceto para o IVI, usou-se a média dos valores anuais utilizando a Equação 1.

$$g_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_i(t) \quad (1)$$

em que g_j = valor global do critério j ; m = número de instantes temporais.

Os critérios não têm todos a mesma importância relativa por isso um painel de técnicos da entidade gestora atribuiu pesos a cada um dos critérios.

Nos Quadros 4 e 5 apresentam-se os valores dos critérios, por alternativa, utilizados no método ELECTRE III para os Cenários 1 e 2, respetivamente. Para além disso, apresenta-se o sentido da preferência do critério, ou seja, se o critério de avaliação é a minimizar (\downarrow) ou a maximizar (\uparrow).

	Alternativa	R_1 (-)	R_2 (-)	P_1 (%)	P_2 (-)	P_3 (-)	C_1 (M €)
Síntese dos critérios de avaliação	A_0	0,50	0,07	1,6	1,2	0,41	241,0
	A_1	0,50	0,00	1,1	1,5	0,71	249,8
	A_2	0,50	0,00	0,6	1,4	0,80	244,9
Sentido da preferência		\downarrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\downarrow
Pesos		10	8	1	1	2	10

Quadro 4 – Valores dos critérios utilizados no ELECTRE III, para o Cenário 1

	Alternativa	R_1 (-)	R_2 (-)	P_1 (%)	P_2 (-)	P_3 (-)	C_1 (M €)
Síntese dos critérios de avaliação	A_0	0,50	0,07	4,0	2,9	0,41	94,5
	A_1	0,50	0,00	2,8	4,0	0,71	103,3
	A_2	0,50	0,00	1,2	3,5	0,80	98,4
Sentido da preferência		\downarrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\downarrow
Pesos		10	8	1	1	2	10

Quadro 5 – Valores dos critérios utilizados no ELECTRE III, para o Cenário 2

O período de análise é de 25 anos, de 2011 a 2036. No entanto, previu-se a entrada em funcionamento das condutas novas para o ano de 2015 para ter em conta a fase de estudo prévio,

projeto e obra. Quanto à conduta reabilitada previu-se a entrada em funcionamento 2 anos após a construção da nova conduta, ou seja, 2017 no caso da alternativa A₂.

O critério R₁ corresponde ao risco de roturas em condutas sendo que este é sempre máximo no início do período de análise como, nessa altura, ainda não ocorreu qualquer tipo de intervenção no sistema o risco máximo será sempre igual em todas as alternativas. O que significa que o critério de risco R₁ não permite distinguir as alternativas. A utilização do valor máximo para os critérios de risco levanta a dúvida da utilização do valor máximo na comparação de alternativas.

Para além disso a elevada atribuição por parte dos técnicos da entidade gestora aos critérios de risco denota a grande importância que estes têm na análise. Refira-se que a atribuição de pesos aos diferentes critérios não é trivial e que existem diversas técnicas para o fazer. No presente caso de estudo os pesos foram atribuídos como se de votos se tratassem o que só é permissível por se utilizar um operador de agregação da família ELECTRE.

Além disso Bana e Costa (2000) afirma que a mera atribuição directa de “pesos” a critérios mal definidos e de pontuações às ações, e depois calcular pontuações globais por soma ponderada não pode ser considerada uma análise multicritério.

4.5. Recomendação final

O modelo de avaliação irá ter um resultado final que se encontra expresso em linguagem própria de um sistema de apoio à decisão e que, por isso, terá que ser traduzida para a linguagem do cliente, a essa tradução designa-se por recomendação final. A recomendação final deve ser coerente com todas as informações fornecidas pelo cliente. O resultado do modelo de avaliação é um resultado que é essencialmente consistente com o modelo. Isto não garante que esse resultado seja consistente com as preocupações do cliente e ainda menos com o processo de decisão para o qual a ajuda foi requerida. O cliente tem que ter a certeza que o modelo o representa, que ele o compreende e que deverá ser capaz de utilizar as suas conclusões.

A aplicação do modelo de avaliação permitiu obter a seguinte ordenação das alternativas, da melhor para a pior, para ambos os cenários: A₂, A₀ e A₁. Esta ordenação não é coerente com as preocupações do decisor uma vez que a percepção do risco associada à alternativa A₂ é maior que a da alternativa A₁. A razão para essa percepção resulta de se ficar apenas com uma conduta em funcionamento à semelhança da alternativa A₀. No caso de ocorrência de uma rotura tanto a alternativa A₂ como a A₀ podem causar perturbações ao fornecimento de água ao complexo industrial situação que não se verifica no caso da alternativa A₁. Daqui se pode deduzir que os critérios de risco ou estão mal definidos ou a consideração do valor máximo de risco não é adequado.

5. COMPARAÇÃO ENTRE AS ABORDAGENS

Na abordagem tradicional se a entidade gestora decidir que necessidades futuras de água são no longo prazo de 65×10^6 m³/ano e por isso tem-se na alternativa A₁ o cenário C_{4a}. Assim, a ordenação das alternativas, da melhor para a pior, seria A₂, A₁ e A₀. Comparando este resultado com o da abordagem multicritério verifica-se uma troca na ordem das alternativas A₁ e A₀. Se a alternativa A₀ não tivesse sido tida em conta na análise os resultados seriam idênticos. A questão que se coloca é a se a alternativa A₀ deverá ser tida em conta no modelo de avaliação? A alternativa de *statu quo* deve ser utilizada para se poder comparar as restantes alternativas mas em muitos casos não deve ser utilizada no modelo de avaliação. O perigo de se utilizar a alternativa *statu quo* é a de esta alternativa sair vencedora quando não se pretende. Uma solução poderia ser utilizar a alternativa A₀ como base e determinar os critérios nas restantes alternativas com base nas diferenças em relação ao *statu quo*.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho aplicaram-se duas abordagens diferentes a um caso de estudo para resolver um problema de decisão de reabilitação de condutas de abastecimento de água. O caso de estudo é constituído por uma conduta adutora de água tratada e respetiva reserva.

Ambas as abordagens são nitidamente diferentes no entanto os resultados podem ser coerentes. A abordagem multicritério aparenta ser mais abrangente mas mais complexa na resolução do problema do que a abordagem tradicional. A abordagem multicritério apresenta dificuldades na fase do modelo de avaliação, nomeadamente, na utilização dos cenários futuros, da incerteza e na escolha do operador de agregação. Quanto ao operador de agregação encontram-se as dificuldades na definição dos parâmetros técnicos, tais como, limiares de discriminação e nas importâncias relativas dos critérios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Mecanismo Financeiro do Espaço Europeu (EEA Grants) o apoio financeiro através do Projeto n.º PT0043 e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelos apoios financeiros através dos projetos n.º PTDC/ECM/112868/2009 e n.º PTDC/ECM/116747/2010. Agradece-se, também, às entidades gestoras de sistemas urbanos de água AdP Serviços, SA, AGS, SA, Veolia Águas de Mafra, SMAS Oeiras e Amadora e à ERSAR pelos seus contributos, assim como à restante equipa do projeto AWARE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albee, S. (2005). "America's pathway to sustainable water and wastewater systems." *Water Asset Management International*, 1(1), 9-14
- Alegre, H., Covas, D. (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*, ERSAR, Lisboa
- Bana e Costa, C. (1993a). *Processo de apoio à decisão: actores e acções; estruturação e avaliação*. 618, 31. 1993a. Lisboa, CESUR.
- Bana e Costa, C. (1993b). "Três convicções fundamentais na prática do apoio à decisão." *Pesquisa Operacional*, 13(1), 9-20
- Bana e Costa, C. A., Ferreira, J. A. A., Corrêa, É. C. (2000). "Metodologia Multicritério de Apoio à Avaliação de Propostas em Concursos Públicos." *Casos de Aplicação da Investigação Operacional*, C. H. Antunes and L. V. Tavares, eds., McGraw-Hill, Lisboa, 337-364.
- Barata, P. (2008). "Construção de um modelo de gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento público de água." *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (área de especialização em Engenharia Municipal) MSc., Universidade do Minho*.
- Bisdorff, R. (2002). "Logical foundation of multicriteria preference aggregation." *Aiding decisions with multiple criteria: essays in honor of Bernard Roy*, D. Bouyssou, E. Jacquet-Lagrez, P. Perny, R. Slowinski, D. Vanderpooten, and P. Vincke, eds., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (The Netherlands), 378-407.
- Bouyssou, D. (1990). "Building criteria: a prerequisite for MCDA." *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, C. Bana e Costa, ed., Springer-Verlag, Berlin (Germany).
- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukiàs, A., Vincke, P. (2006). *Evaluation and decision models with multiple criteria: stepping stones for the analyst*, Springer Science + Business Media, Inc., USA

- Carriço, N., Covas, D., Leitão, J. P., Almeida, M. C., Alegre, H., Mamouros, L., Lopes, N., Mendes, D. (2012). "Seleção de opções de reabilitação em infraestruturas urbanas de água: caso de estudo." 11º Congresso da Água, Eds. APRH, Pub. APRH.
- Engehardt, 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
- Guitouni, A., Martel, J. M. (1998). "Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method." *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501-521
- Keeney, R., Raiffa, H. (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, John Wiley and Sons, Inc., New York (USA)
- Le Gauffre, P., Haidar, H., Poinard, D., Laffréchine, K., Baur, R., Schiatti, M. (2007). "A Multicriteria Decision Support Methodology for Annual Rehabilitation Programs of Water Networks." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(7), 478-488
- Matos, M. (2007). "Notas transversais sobre ajuda à decisão." *Decisão: Perspectivas interdisciplinares*, C. H. Antunes and L. Dias, eds., Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra (Portugal), 151-171.
- Morisio, M., Tsoukias, A. (1997). "IusWare: a methodology for the evaluation and selection of software products." *Software Engineering. IEE Proceedings-* [see also *Software, IEE Proceedings*], 144(3), 162-174
- Ouerdane, W. (2009). "Multiple Criteria Decision Aiding: a dialectal perspective." PhD thesis, Université Paris-Dauphine.
- Pardalos, P. M., Hearn, D. (1999). *Multi-Criteria Decision Analysis via Ratio and Difference Judgement*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- 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
- Roy, B. (1985). *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*, Ed. Economica, Paris
- Roy, B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- Roy, B. (1999). "Decision-aiding today: what should we expect." *Multicriteria decision making: advances in MCDM models, algorithms theory, and applications*, T. Gal, T. J. Stewart, and T. Hanne, eds., Kluwer Academic Publishers, Boston (USA), 1-1-1-35.
- Sousa, J. P. (2010). "Avaliação multicritério de alternativas de reabilitação de sistemas de drenagem urbana." MSc. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, Instituto Superior Técnico.
- Stamelos, I., Tsoukiàs, A. (2003). "Software evaluation problem situations." *European Journal of Operational Research*, 145(2), 273-286
- Stewart, T. J. (2005). "Dealing with uncertainties in MCDA." *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, eds., Springer Science + Business Media, Inc., 445-470.
- Tsoukiàs, A. (2007). "Da teoria da decisão à metodologia de ajuda à decisão." *Decisão Perspectivas Interdisciplinares*, C. Antunes and L. Dias, eds., Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 95-151.
- Tsoukiàs, A. (2008). "From decision theory to decision aiding methodology." *European Journal of Operational Research*, 187(1), 138-161
- Vincke, P. (1992). *Multicriteria Decision-aid*, John Wiley & Sons, Inc., Chichester
- von Winterfeldt, D., Edwards, W. (1986). *Decision analysis and behavioral research*, Cambridge University Press, Cambridge (UK)