



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
NOVOS
DESAFIOS

ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA O REFORÇO FASEADO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

João, MARQUES¹; Maria, CUNHA²; Dragan, SAVIĆ³

¹ Investigador, INESC-Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, jmarques@dec.uc.pt

² Professora Catedrática, INESC-Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, mccunha@dec.uc.pt

³ Full Professor, Centre for Water Systems, College of Engineering, Computing and Mathematics, University of Exeter, Exeter, Reino Unido, D.Savic@exeter.ac.uk

Resumo

Neste trabalho apresenta-se a aplicação de um método de Análise de Decisão Multicritério ao estudo de alternativas para o reforço faseado de redes de distribuição de água. Uma intervenção faseada permite adaptar as redes para funcionarem adequadamente num conjunto alargado de condições futuras. A análise multicritério realizada considera quatro critérios: os custos de investimento, os défices de pressão, os défices na satisfação da procura e as emissões de carbono. Para o cálculo dos défices de pressão e satisfação da procura, as alternativas são avaliadas para um conjunto de cenários gerados de modo a ter-se em conta a incerteza dos consumos futuros. A ordenação das alternativas é feita através do método PROMETHEE, usando-se três conjuntos distintos de pesos a serem atribuídos aos critérios. Os resultados obtidos, para um estudo de caso da literatura, apresentam a ordenação de nove alternativas possíveis para o reforço da rede a realizar de um modo faseado. Resultados desta natureza dão um grande contributo para um processo de decisão mais informado.

Palavras-chave: Redes de distribuição de água; dimensionamento faseado; Análise de Decisão Multicritério; PROMETHEE.

Tema: 7 - Serviços de abastecimento, drenagem e tratamento de águas.

1. INTRODUÇÃO

As entidades que gerem redes de distribuição de água enfrentam desafios de natureza diversa. Um dos desafios relaciona-se com a falta de capacidade hidráulica de redes já instaladas, consequência do envelhecimento, conjugado com a falta de investimento em renovação e reforço.

A solução para o reforço de redes de distribuição de água deve ser determinada usando ferramentas adequadas, capazes de ter em conta não só aspectos económicos, mas também aspectos relacionados com a qualidade de serviço prestado e com os impactes ambientais. A Análise de Decisão Multicritério (ADMC) permite ter em conta todos estes aspectos de uma forma estruturada, contribuindo para um processo de decisão mais transparente (Mutikanga *et al.*, 2011). A ADCM tem sido usada em diversos trabalhos relativos às redes de distribuição de água para a priorização de condutas ou áreas da rede a reabilitar: Scholten *et al.* (2014); Marzouk *et al.* (2015) e Salehi *et al.* (2017). Neste trabalho propõe-se o uso de ADCM para resolver um problema diferente. Pretende-se analisar um conjunto de alternativas de dimensionamento para o reforço de redes que operam acima das suas capacidades, recomendando as que devem ser implementadas. Além disso, considera-se uma intervenção faseada para permitir adaptar a rede a novas condições. Estas infraestruturas, ao longo do horizonte planeamento, são submetidas a variações das solicitações nodais, pelo que devem ser suficientemente flexíveis para poderem ser ajustadas facilmente quando emerge nova informação.

A revisão da literatura permite concluir que entre os métodos de ADCM mais usados estão os seguintes: TOPSIS (Yoon, 1987), ELECTRE (Roy, 1968), AHP (Saaty, 1987) e PROMETHEE (Brans e Viche, 1985). Neste trabalho utiliza-se o “Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations” (PROMETHEE), amplamente aplicado em diversas áreas, conforme a revisão bibliográfica publicada por Behzadian *et al.* (2010) onde são comentados 217 trabalhos.

Depois da introdução, a metodologia é apresentada na secção 2, a aplicação da Análise de Decisão Multicritério e os resultados são expostos na secção 3 e a secção 4 refere as conclusões e os trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA

2.1. Bases para a aplicação da ADCM

A metodologia aqui proposta apresenta-se dividida em três passos (Fig. 1). O primeiro passo consiste em identificar as alternativas para reforço faseado de redes de distribuição de água, os critérios para a avaliação das alternativas e os pesos que definem a importância relativa desses critérios. No segundo passo, são avaliadas as alternativas de acordo com os critérios estabelecidos, realizando-se o cálculo dos custos de investimento, das emissões de carbono e da qualidade de serviço que prestam. A avaliação da qualidade de serviço determina-se através da simulação do comportamento hidráulico de cada alternativa, tendo em consideração um conjunto de cenários para os consumos futuros. Na terceira fase, procede-se à aplicação do método de ADCM para identificar as soluções de dimensionamento melhor posicionadas para se realizar o reforço da rede durante o horizonte de planeamento.

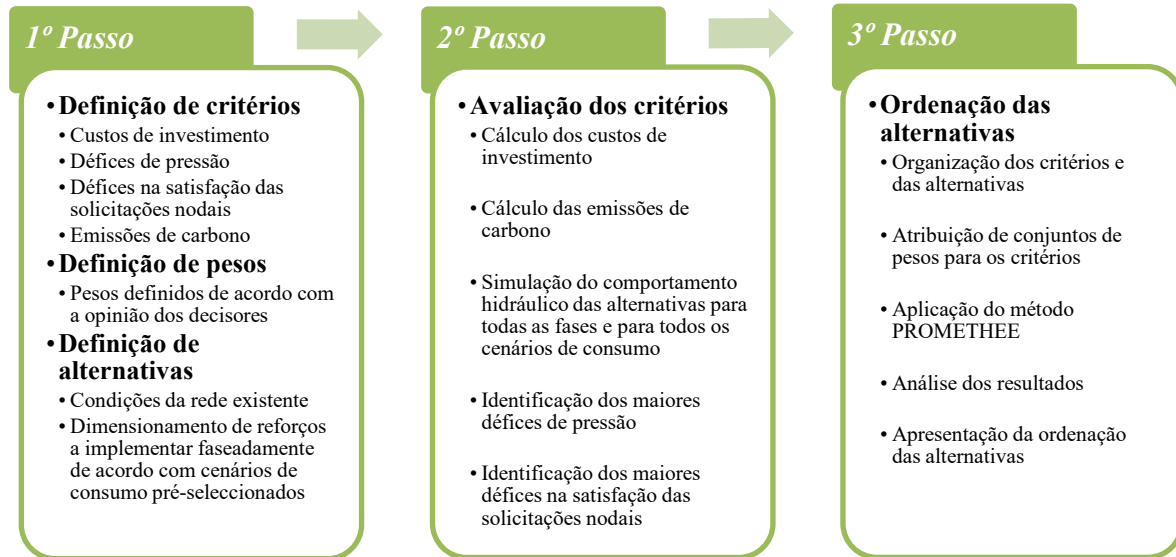


Figura 1. Passos para a aplicação da ADMC

2.2. Definição de critérios, alternativas e pesos

2.2.1. Definição de critérios

Os critérios propostos avaliam os custos de investimento, os défices de pressão, os défices na satisfação das solicitações nodais e as emissões de carbono das alternativas de reforço faseado das redes. Os custos de investimento, que deve ter o menor valor possível, são calculados pela expressão (1) considerando a soma de todas as condutas a instalar no conjunto das fases do planeamento:

$$CI = \sum_{f=1}^{NF} \left(\sum_{i=1}^{NC} (Cc_i(Dc_{i,f}) \times L_i) \frac{1}{(1+Ta)^{Y_i}} \right) \quad (1)$$

Em que:

CI – custos de investimento (\$)

NF – número de fases em que o horizonte de planeamento é subdividido

f – fase (a fase $f=1$ inicia-se no ano zero de planeamento)

NC – número de condutas da rede

$Cc_i(Dc_{i,f})$ – custo unitário da conduta i em função do diâmetro comercial $Dc_{i,f}$ (\$/m)

$Dc_{i,f}$ – diâmetro comercial da conduta i a instalar na fase f (mm)

L_i – comprimento da conduta i (m)

Ta – taxa de actualização dos custos

Y_f – ano de início da fase f (para $f=1$ o ano de início é o ano zero $Y_1=0$) (anos).

Por outro lado, a capacidade hidráulica das redes de distribuição de água é essencial para satisfazer os consumos e pressões requeridos. São usados critérios para representar os défices de pressão e os défices na satisfação das solicitações nodais e assim poder avaliar-se a qualidade de serviço proporcionada pela rede para um conjunto de cenários de consumo plausíveis no futuro. O critério da expressão (2) determina o maior défice de pressão para todos os cenários de consumo:

$$DPmx = \max_s^{NS} (DP_s) \quad (2)$$

$$DP_s = \sum_{f=1}^{NF} \sum_{n=1}^{NN} \max \{0; (Pd_n - P_{n,f,s})\}, \quad s \in NS \quad (3)$$

Em que:

$DPmx$ – défice máximo de pressão (m)

NS – número de cenários de consumo

DP_s – défice de pressão no cenário s (m)

NN – número de nós da rede

Pd_n – pressão mínima desejável no nó n (m)

$P_{n,f,s}$ – pressão no nó n , na fase f e no cenário s (m).

Os défices de pressão são determinados através da soma, para todos os nós e para todas as fases, das diferenças entre as pressões desejáveis e as pressões simuladas na rede para todos os cenários (expressão 3). Um modelo de simulação hidráulica do tipo “*pressure driven*” é usado para o simular as pressões e caudais na rede. O critério de défices máximos na satisfação das solicitações nodais é calculado por um procedimento semelhante através da expressão (4):

$$DQmx = \max_s^{NS} (DQ_s) \quad (4)$$

$$DQ_s = \sum_{f=1}^{NF} \sum_{n=1}^{NN} (NQ_{n,f,s} - C_{n,f,s}) \quad s \in NS \quad (5)$$

Em que:

$DQmx$ – défice máximo na satisfação das solicitações nodais (m^3/s)

DQ_s – défice na satisfação das solicitações nodais no cenário s (m^3/s)

NQ_n – solicitação de caudal no nó (solicitação nodal) n na fase f e no cenário s (m^3/s)

$C_{n,f,s}$ – consumo (caudal entregue) no nó n , na fase f e no cenário s (m^3/s).

Os défices relativos às solicitações nodais são calculados para cada cenário na expressão (5) pela soma, para todos os nós e para todas as fases, das diferenças entre a solicitação de caudal e o caudal efectivamente aduzido.

Actualmente é reconhecida a necessidade de reduzir as emissões de carbono, pelo que a análise multicritério inclui também o critério da expressão (6), correspondente às emissões de carbono associadas à instalação de condutas. Estas emissões podem ser calculadas de acordo com o processo apresentado em Marques *et al.* (2015):

$$EC = \sum_{f=1}^{NF} \left\{ \sum_{i=1}^{NC} \left(E C c_i (D c_{i,f}) \times L_i \right) \right\} \quad (6)$$

Em que:

EC – emissões de carbono ($TonCO_2$)

$E C c_i (D c_{i,f})$ – emissões de carbono unitárias da conduta i em função do diâmetro comercial $D c_{i,f}$ ($TonCO_2/m$).

2.2.2. Definição dos pesos a atribuir aos critérios

A ordenação das alternativas requer a proposta de um conjunto de pesos a atribuir aos critérios. Estes pesos podem ser directamente estabelecidos pelos decisores ou através da utilização de métodos como o SIMOS (Figueira e Roy, 2002) e representam a importância relativa de cada critério.

2.2.3. Definição das alternativas

As alternativas de dimensionamento para o reforço das redes são construídas considerando a incerteza associada à variação do consumo no futuro, através da geração de cenários plausíveis para a respectiva evolução. Depois da geração dos consumos, um pequeno conjunto de cenários é seleccionado para representar todo o espectro de possíveis consumos futuros. É com base nestes cenários particulares que são dimensionadas alternativas, uma para cada um dos cenários de consumo ao longo do horizonte de projecto. Para tal, é usado um modelo de minimização dos custos de investimento considerando, entre outras, restrições de pressão mínima.

2.3. Cálculo dos critérios

A avaliação dos critérios é feita com base nas expressões (1 a 6). Os custos de investimento e as emissões de carbono são determinados a partir do dimensionamento de cada alternativa em função das condutas a instalar. Os défices máximos de pressão e os défices máximos na satisfação das solicitações nodais são obtidos através da simulação do comportamento hidráulico de cada alternativa para todos os cenários de caudal gerados.

2.4. Ordenação das alternativas

A ADMC aqui proposta é realizada através do *software* Visual PROMETHEE (Mareschal e De Smet, 2009), o qual ordena as alternativas de acordo com um índice de preferência.

Trata-se de um *software* baseado no método PROMETHEE proposto por Brans e Vicke (1985) aplicado com sucesso em diversos problemas (Behzadian *et al.*, 2010), incluindo em infraestruturas de abastecimento de água.

3. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA ADMC

3.1. Estudo de caso

A ADMC proposta neste trabalho é aplicada à rede de Nova York (Schaake e Lai, 1969). A necessidade de reforço justifica-se pela falta de capacidade desta rede e consiste na instalação de condutas paralelas às existentes, onde for necessário, para obter pressões maiores ou iguais às mínimas requeridas. O objectivo em Schaake e Lai (1969) foi o de determinar o diâmetro das condutas a instalar com o mínimo custo, de um conjunto de 15 diâmetros comerciais disponíveis apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Diâmetros comerciais

Diâmetro (polegadas)	Diâmetro (mm)	Custo unitário (USD/m)	Emissões de carbono (toneladas CO ₂ /m)
0	0	0.00	0.0
36	914	306.75	0.4
48	1 219	439.63	0.6
60	1 524	577.43	1.0
72	1 829	725.07	1.3
84	2 134	875.98	1.8
96	2 438	1 036.75	2.8
108	2 743	1 197.51	3.3
120	3 048	1 368.11	4.5
132	3 353	1 538.71	6.1
144	3 658	1 712.60	9.7
156	3 962	1 893.04	13.5
168	4 267	2 073.49	18.9
180	4 572	2 260.50	26.4
192	4 877	2 447.51	37.0
204	5 182	2 637.80	51.7

3.2. Cenários de consumo

A incerteza associada à evolução dos consumos futuros de água é tida em conta neste trabalho através da análise de um conjunto de cenários de consumo equiprováveis, para três fases de dimensionamento em que o horizonte de planeamento é subdividido. Todos os cenários consideram, para o ano zero do horizonte de planeamento, as solicitações nodais definidas em Schaake e Lai (1969). São gerados 100 cenários (Fig. 2) para um consumo a variar entre 0 e 10% em cada uma das fases de dimensionamento. Para o efeito é usada uma distribuição uniforme que permite propor os incrementos nas solicitações nodais, de fase para fase. Juntam-se ainda dois cenários particulares: o aumento de 10% em todas as fases, representado na Fig. 2 pelo cenário 1, e o cenário 9 onde não se verifica qualquer aumento (o consumo permanece constante) durante as três fases.

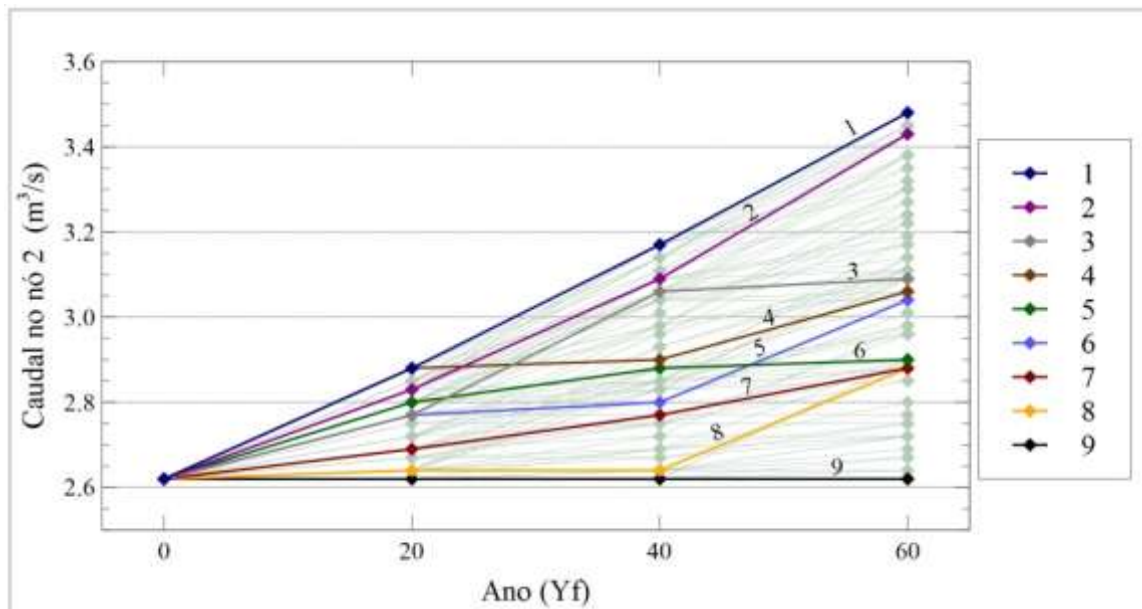


Figura 2. Cenários de consumo para o nó 2, com um caudal igual a $2.62\text{m}^3/\text{s}$

3.3. Alternativas de dimensionamento

As alternativas para reforço da rede são dimensionadas para cumprir as pressões mínimas não só para a condição de consumo inicial (caudal em $Y_f=0$), mas também tendo em conta os 60 anos do horizonte de planeamento. No total são dimensionadas 9 alternativas diferentes, uma para cada um dos 9 cenários de consumo apresentados na Fig. 2. Estes cenários são escolhidos de entre os 102, para representar todo o espectro de variação das solicitações futuras. As alternativas são dimensionadas com o objectivo de minimizar os custos, usando o método referido em Marques *et al.* (2012), o qual é baseado na heurística de recozimento simulado (Kirkpatrick *et al.*, 1983). A análise hidráulica da rede é feita com o simulador EPANET “pressure driven” proposto por Morley e Tricarico (2008). Sendo considerado um dimensionamento faseado, na primeira fase (com início no ano zero, $Y_f=0$) é apenas necessário o reforço da rede para os primeiros vinte anos de operação, no entanto tendo em conta os possíveis aumentos de consumo que podem verificar-se no futuro. Nas fases seguintes, é possível intervir novamente na rede caso surja nova informação sobre o aumento futuro de consumo.

As soluções obtidas para as 9 alternativas apresentam-se nas Tabelas 2, 3 e 4, incluindo o diâmetro das condutas (em mm) a instalar em cada fase, os custos de investimento de cada fase (CF) e o custo de investimento total (CI).

Tabela 2. Alternativas 1, 2 e 3 de dimensionamento da rede

Troço	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
	Ano 0	Ano 20	Ano 40	Ano 0	Ano 20	Ano 40	Ano 0	Ano 20	Ano 40
1	0	0	3 658	0	0	1 219	0	0	0
2	0	0	3 048	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	5 182	0	5 182	5 182	0	0	2 438
13	4 572	4 572	4 572	0	0	5 182	0	5 182	5 182
14	4 267	4 267	4 267	4 572	4 572	4 572	2 438	2 438	2 438
15	4 267	4 267	4 267	4 572	4 572	4 572	4 267	4 267	4 267
16	2 134	2 134	2 134	2 438	2 438	2 438	2 438	2 438	2 438
17	2 743	2 743	2 743	2 743	2 743	2 743	2 743	2 743	2 743
18	2 743	2 743	2 743	2 438	2 438	2 438	2 438	2 438	2 438
19	1 829	1 829	1 829	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2 438	2 438	2 438	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134
CF ($\times 10^6$)	\$ 78.487	\$ -	\$ 5.022	\$ 63.438	\$ 4.477	\$ 4.360	\$ 54.698	\$ 8.845	\$ 0.802
CI ($\times 10^6$)			\$ 83.509			\$ 72.275			\$ 64.345

Tabela 3. Alternativas 4, 5 e 6 de dimensionamento da rede

Troço	Alternativa 4			Alternativa 5			Alternativa 6		
	Ano 0	Ano 20	Ano 40	Ano 0	Ano 20	Ano 40	Ano 0	Ano 20	Ano 40
1	0	0	0	3 353	3 353	3 353	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	914	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	3 658	1 219	1 219	1 219
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	4 267	0	0	0	0	0	4 572
14	4 267	4 267	4 267	0	2 743	2 743	0	1 829	1 829
15	4 267	4 267	4 267	5 182	5 182	5 182	5 182	5 182	5 182
16	2 438	2 438	2 438	2 438	2 438	2 438	2 743	2 743	2 743
17	2 743	2 743	2 743	2 743	2 743	2 743	2 743	2 743	2 743
18	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 438	2 438	2 438
19	1 829	1 829	1 829	1 829	1 829	1 829	2 134	2 134	2 134
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134
CF ($\times 10^6$)	\$ 59.545	\$ -	\$ 3.315	\$ 54.311	\$ 3.519	\$ 1.044	\$ 53.296	\$ 2.127	\$ 3.456
CI ($\times 10^6$)			\$ 62.860			\$ 58.875			\$ 58.881

Tabela 4. Alternativas 7, 8 e 9 de dimensionamento da rede

Troço	Alternativa 7			Alternativa 8			Alternativa 9		
	Ano 0	Ano 20	Ano 40	Ano 0	Ano 20	Ano 40	Ano 0	Ano 20	Ano 40
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	3 658	3 658	3 658
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1 524
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	2 743	2 743	0	0	0	0	0	0
14	0	0	4 267	0	0	5 182	0	0	0
15	4 572	4 572	4 572	3 658	3 658	3 658	0	0	0
16	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 438	2 438	2 438
17	2 438	2 438	2 438	2 743	2 743	2 743	2 438	2 438	2 438
18	2 438	2 438	2 438	2 134	2 134	2 134	2 438	2 438	2 438
19	1 524	1 524	1 524	1 829	1 829	1 829	2 134	2 134	2 134
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	2 134	1 829	1 829	1 829
CF ($\times 10^6$)	\$ 44.773	\$ 4.020	\$ 2.778	\$ 43.231	\$ -	\$ 3.534	\$ 40.471	\$ -	\$ 0.459
CI ($\times 10^6$)			\$ 51.571			\$ 46.765			\$ 40.930

A alternativa 1, determinada para o maior aumento de solicitações nodais (cenário 1) é aquela que apresenta custos mais elevados. Por outro lado, a alternativa 9, dimensionada para o cenário 9, sem aumento de consumo, é aquela que mostra os custos mais baixos. As restantes alternativas são determinadas com os cenários destacados na Fig. 2, prevendo-se reforços nos Anos 20 e 40 se o cenário para o qual são dimensionadas o requerer. Por exemplo, a alternativa 8 é reforçada no Ano 40 com uma conduta paralela de 5182mm no troço 14 porque o cenário 8 (Fig. 2) considera um grande aumento do consumo na última fase do horizonte de planeamento.

3.4. Avaliação dos critérios

Os valores obtidos considerando os 4 critérios para a avaliação das 9 alternativas são apresentados na Tabela 5. As alternativas com maiores custos de investimento e emissões de carbono (alt.1 e 2) são as que apresentam menores défices máximos de pressão e de satisfação da procura. Estas são também as soluções dimensionadas para os cenários com maiores aumentos nas solicitações nodais (cenários 1 e 2) e por isso apresentam capacidade hidráulica suficiente para cumprir as pressões e procura nos diversos cenários. Do lado oposto, as alternativas com os custos de investimento e emissões de carbono mais baixos (alt. 8 e 9) são as que apresentam maiores défices máximos de pressão e na satisfação da procura. Estas soluções são dimensionadas para os cenários com menor aumento de procura e não possuem capacidade suficiente quando carregados com os diversos cenários de consumo.

Tabela 5. Valor dos critérios

Alternativas	$CI (\times 10^6)$ (\$)	$DPmx$ (m)	$DQmx$ (m ³ /s)	$EC (\times 10^6)$ (Ton. CO ₂)
Alt. 1	83.509	0.000	0.000	2.484
Alt. 2	72.278	0.675	0.022	3.168
Alt. 3	64.345	8.856	0.258	1.948
Alt. 4	62.860	14.218	0.443	1.437
Alt. 5	58.875	22.128	0.680	1.322
Alt. 6	58.881	15.051	0.424	1.803
Alt. 7	51.571	34.236	1.061	1.152
Alt. 8	46.765	30.375	0.892	1.502
Alt. 9	40.930	51.328	1.503	0.392

3.5. Ordenação das alternativas

Depois de definidas as alternativas e avaliados os critérios, é definida a importância relativa destes. Neste estudo são usados os três conjuntos de pesos (CP) da Tabela 6: CP1 considera o mesmo peso para todos os critérios; CP2 considera os custos de investimento como o critério mais importante e as emissões de carbono como o menos importante; CP3 atribui o maior peso aos défices máximos de satisfação da procura, sendo os custos de investimento e as emissões de carbono os critérios com menor peso.

Tabela 6. Conjuntos de pesos

Conjuntos de pesos	Critérios			
	CI	$DPmx$	$DQmx$	EC
CP1	0.25	0.25	0.25	0.25
CP2	0.35	0.20	0.30	0.15
CP3	0.15	0.20	0.50	0.15

No método PROMETHEE, as alternativas são ordenadas com base no índice (Phi). Phi é um valor entre -1 e 1 dado pela diferença entre dois índices Phi+ e Phi-. Phi+ é o índice de preferência positivo (forças) que avalia o quanto uma alternativa (a) é preferida em relação às restantes N-1 alternativas do problema (N é o número de alternativas). Quanto maior o Phi+, maior a preferência. O índice negativo Phi- (fraquezas) avalia o quanto as N-1 alternativas são preferidas em relação à alternativa (a) e quanto menor é Phi-, maior a preferência. O índice Phi agrega as forças e as fraquezas da alternativa em um único índice e quanto maior é o Phi, melhor posicionada se encontra a alternativa.

Dadas as alternativas, os critérios e os pesos é aplicado o Visual PROMETHEE (Mareschal e De Smet, 2009) cujos resultados são apresentados na Tabela 7. A alternativa 6 (a negrito) é a melhor posicionada em CP1 e CP2. No CP3, a melhor classificada é a alternativa 3. Na ordenação de CP1, as alternativas melhor classificadas (Alt. 4 e 6) apresentam valores de Phi muito semelhantes pelo que podem ser consideradas boas opções a implementar enquanto a alternativa 7, que se encontra na última posição, poderá ser descartada. Em CP2, a ordenação é obtida atribuindo um peso de 0.35 (o peso mais elevado) ao custo de investimento, o que justifica a última posição da alternativa 1 ($CI = \$ 83.509 \times 10^6$). No caso de

CP3, o défice máximo na satisfação da procura é o critério mais importante (0.5) e a alternativa que se encontra na última posição (Alt. 9) é aquela que apresenta o maior valor para este critério ($DQmx=1.503m^3/s$).

Tabela 7. Ranking das alternativas (alt.) de dimensionamento calculado pelo Visual PROMETHEE

Rank	CP1				CP2				CP3			
	Alt.	Phi	Phi+	Phi-	Alt.	Phi	Phi+	Phi-	Alt.	Phi	Phi+	Phi-
1	Alt. 6	0.101	0.156	0.055	Alt.6	0.109	0.162	0.053	Alt.3	0.162	0.212	0.051
2	Alt.4	0.100	0.161	0.061	Alt.3	0.083	0.172	0.089	Alt.1	0.133	0.310	0.177
3	Alt.3	0.087	0.172	0.084	Alt.4	0.080	0.152	0.072	Alt.6	0.133	0.172	0.039
4	Alt.5	0.044	0.134	0.091	Alt.5	0.033	0.129	0.096	Alt.4	0.128	0.172	0.044
5	Alt.8	0.001	0.166	0.165	Alt.8	0.030	0.189	0.159	Alt.2	0.118	0.297	0.180
6	Alt.1	-0.073	0.221	0.294	Alt.2	-0.044	0.215	0.258	Alt.5	0.013	0.118	0.105
7	Alt.9	-0.086	0.310	0.396	Alt.7	-0.089	0.131	0.219	Alt.8	-0.099	0.119	0.218
8	Alt.2	-0.086	0.214	0.299	Alt.9	-0.090	0.304	0.394	Alt.7	-0.223	0.084	0.307
9	Alt.7	-0.088	0.131	0.219	Alt.1	-0.113	0.221	0.334	Alt.9	-0.364	0.186	0.550

De seguida refere-se a alternativa 6 para ilustrar o dimensionamento para o reforço faseado da rede. Esta alternativa inclui os seguintes valores para os critérios: $CI = \$ 58,880,842$, $DPmx = 15.051m$, $DQmx = 0.424m^3/s$ e $EC = 1,803,152 \text{ Ton.CO}_2$ (Tabela 5). O seu dimensionamento prevê que no ano zero sejam instaladas condutas paralelas nos troços: 7, 15, 16, 17, 18, 19 e 21. Nas duas fases seguintes estão também previstos reforços dos troços 14 no ano 20 e do troço 13 no ano 40 (Tabela 3). No entanto, os reforços em fases futuras poderão ser reavaliados à medida que for obtida informação actualizada.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a aplicação de um método de ADMC para o estudo de alternativas para o reforço faseado de redes de distribuição de água. A análise envolve 9 alternativas de dimensionamento para um estudo de caso, 4 critérios e 3 conjuntos de pesos. O método PROMETHEE é usado para ordenar as alternativas por ordem de preferência. Os resultados obtidos permitem não só identificar as alternativas de dimensionamento que se encontram melhor posicionadas, de acordo com os critérios e pesos estabelecidos, mas também identificar as alternativas que poderão tornar-se descartáveis. Para trabalhos futuros pretende desenvolver-se uma análise de sensibilidade aos resultados e comparar o dimensionamento faseado com o dimensionamento tradicional em uma fase única.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198–215.
- Brans, J. P., Vique, P. (1985). A preference ranking organisation method. *Management Science*, 31(6), 647–657.



- Figueira, J., 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.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671–680.
- Mareschal, B., De Smet, Y. (2009). Visual PROMETHEE: Developments of the PROMETHEE & GAIA multicriteria decision aid methods. In 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 1646–1649.
- Marques, J., Cunha, M., Sousa, J., Savić, D. (2012). Robust optimization methodologies for water supply systems design. *Drinking Water Engineering and Science Discussions*, 5(1), 173–192.
- Marques, J., Cunha, M., Savić, D. A. (2015). Using real options for an eco-friendly design of water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics*, 17(1), 20–35.
- Marzouk, M., Hamid, S. A., El-Said, M. (2015). A methodology for prioritizing water mains rehabilitation in Egypt. *HBRC Journal*, 11(1), 114–128.
- Morley, M. S., Tricarico, C. (2008). Pressure Driven Demand Extension for EPANET (EPANETpdd). Technical Report, CWS, 10p.
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., Vairavamoorthy, K. (2011). Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management. *Water Resources Management*, 25(14), 3947–3969.
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *RAIRO - Operations Research - Recherche Opérationnelle*, 2(8), 57–75.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176.
- Salehi, S., Jalili Ghazizadeh, M., Tabesh, M. (2017). A comprehensive criteria-based multi-attribute decision-making model for rehabilitation of water distribution systems. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1–23.
- Schaake, J., Lai, F. H. (1969). Linear programming and dynamic programming application to water distribution network design. MIT Hydrodynamics Laboratory, 222p.
- Scholten, L., Scheidegger, A., Reichert, P., Mauer, M., Lienert, J. (2014). Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research*, 49, 124–143.
- Yoon, K. (1987). A Reconciliation Among Discrete Compromise Solutions. *Journal of the Operational Research Society*, 38(3), 277–286.