

Seleção de alternativas de conservação de água no meio urbano utilizando abordagem multicritério

Selection of water conservation alternatives in urban areas using the multicriteria approach

Tuane Batista do Egito¹, Marcele Elisa Fontana² e Danielle Costa Morais³

¹Mestre, Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco (PE), Brasil

²Doutor, Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, Pernambuco (PE), Brasil

³Doutor, Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco (PE), Brasil

Resumo

A degradação e exploração dos recursos hídricos no meio urbano tem sido tema de grandes discussões em comitês de preservação ambiental. Isso se deve a má utilização deste recurso devido ao aumento da população, a falta de política de conservação e a falta de uma cultura de preservação nas áreas urbanas. Diante deste problema é necessária a busca por alternativas que promovam a conservação da água nestes centros. Para a avaliação dessas alternativas foi desenvolvido um modelo de apoio à decisão multicritério. Este modelo usa um método baseado na abordagem de sobreclassificação, o PROMETHEE V, para auxiliar o decisor na seleção de algumas alternativas de conservação e uso eficiente da água, considerando os critérios levantados pelo decisor e as restrições existentes no problema.

Palavras-chave: Apoio à decisão multicritério, PROMETHEE V, Conservação de água, Área urbana.

Abstract

The degradation and exploitation of water resources in urban areas has been the subject of much debate in environmental preservation committees. This is due to misuse of this resource due to increased population, the lack of conservation policy and the lack of a culture of resource conservation in urban areas. For this problem, it is necessary to search for alternatives that promote water conservation in these centers. Therefore, a model was developed to support multi-criteria decision to evaluate these alternatives. This model uses a method based on outranking approach, the PROMETHEE V, to assist the decision maker in selecting some alternatives of conservation and efficient use of water, considering the criteria surveyed by decision maker and the restrictions on the problem.

Keywords: Multicriteria decision support, PROMETHEE V, Water conservation, Urban area.

1 Introdução

O desenvolvimento econômico acelerado das últimas décadas trouxe inúmeros benefícios à sociedade, como avanços tecnológicos e científicos, por exemplo. No entanto, todo esse avanço elevou os impactos ao meio ambiente, derivados das atividades econômicas produtivas e extrativistas, estas dependentes, principalmente, de recursos naturais limitados (SOARES *et al.*, 20014). Além disso, nos centros urbanos do Brasil, a multiplicação das favelas é um exemplo do crescimento desorganizado dos centros urbanos. Isto faz com que bairros muito povoados sofram com a falta de água e de saneamento, contaminando os mananciais (HAFNER, 2007). Neste cenário, a produção de água potável, para suprir as necessidades das aglomerações urbanas, encontra-se extremamente fragilizada, devido, principalmente, à crescente demanda associado à falta de políticas de conservação e, também, pela falta de cultura de preservação por parte da população, que ainda trata a água como sendo um recurso inesgotável.

A solução para isso seria o aumento da oferta através de novas formas de captação e ampliação dos sistemas de distribuição e tratamento de água. No entanto, segundo Chang *et al.* (2010), o desenvolvimento de novos reservatórios para atender à crescente demanda de água, aumentando a qualidade de vida, urbanização e industrialização, inevitavelmente, envolve um grau substancial de risco ambiental. Além disso, a captação de água está sendo feita em reservas cada vez mais distantes destes centros, exigindo grandes investimentos em longo prazo.

Neste sentido, devem-se estudar soluções com o objetivo de combater o desperdício de água e sua utilização inadequada no meio urbano, bem como estudar fontes alternativas do recurso, como por exemplo, uso de águas pluviais. Neste caso, ao escolher fontes alternativas de abastecimento de água é importante considerar os custos envolvidos na aquisição, os custos decorrentes da descontinuidade do fornecimento e os custos para garantir a qualidade da água necessária para cada uso específico, garantindo a integridade e a saúde dos usuários. Deve-se também tomar cuidado com o uso indevido e falta de gestão das fontes alternativas, pois estes fatores podem colocar em risco a saúde dos consumidores e as atividades que utilizam água.

Outro fator importante é o desperdício ocasionado por perdas no sistema de distribuição de água, que podem ser provenientes de várias fontes. Estas perdas podem ser (1) físicas ou (2) reais. As perdas físicas são aquelas provenientes do consumo não autorizado e de medições imprecisas, em geral, ocorrem por falta de uma fiscalização mais rigorosa das empresas de abastecimento de água. Já as perdas reais são aquelas provenientes de vazamentos em tubos ou conexões, ou extravasamentos nos reservatórios, etc. (CAMBRAINHA & FONTANA, 2015). No entanto, vazamentos são mais comuns em redes de distribuição de água (RDA), devido ao envelhecimento e à deterioração dos seus componentes, causada, principalmente, por estresses ambientais e operacionais (GIUSTOLISI & BERARDI, 2009; SILVA FILHO *et al.*, 2014).

De acordo com Morais *et al.* (2010) “atualmente, entende-se que as perdas de água devem ser tratadas e gerenciadas com medidas preventivas, melhorando os procedimentos de manutenção e operação das RDAs”. Assim, a manutenção dos sistemas municipais de distribuição de água é muito importante para o desenvolvimento urbano sustentável (MORAIS & DE ALMEIDA, 2007). No entanto, a reabilitação da RDA é muito complicada, devido à falta de políticas de saneamento e falta de recursos, além do envolvimento de diferentes stakeholders com interesses e objetivos diferentes e/ou conflitantes (MORAIS & DE ALMEIDA, 2010). Como a água tem grande importância para a vida das pessoas e é um recurso escasso, geralmente, os problemas de abastecimento de água envolvem a comunidade como um todo. Assim, decisões que envolvem a RDA apresentam, ainda, um caráter social (FONTANA & MORAIS, 2015).

Além disso, a Agência Nacional das Águas (ANA) destaca outros fatores que também contribuem para a diminuição da disponibilidade hídrica em áreas urbanas como: os baixos níveis de tratamento de esgotos domésticos; disposição inadequada de resíduos sólidos; impermeabilização crescente do solo urbano interferindo nas condições naturais de drenagem, amplificando os efeitos das cheias;

comprometimento de mananciais próximos às áreas urbanas contribuindo para a escassez de disponibilidade hídrica em qualidade adequada (BRASIL, 2007).

Desta maneira, observa-se que as decisões em planejamento e gestão de recursos hídricos são complexas, pois envolvem uma série de alternativas, em que cada uma é capaz de fornecer diferentes níveis de satisfação em cada objetivo/critério, sendo estes muitas vezes divergentes, com consequências incertas e interações complexas (ALIPOUR *et al.*, 2010; HYDE *et al.*, 2005). Essas características fazem com que a análise multicritério das alternativas analisadas seja uma forma interessante de tratar esse tipo de problema de decisão (HAJKOWICZ & HIGGINS, 2008).

Diante do problema exposto, é necessária a busca por alternativas para a conservação e uso eficiente da água em áreas urbanas, evitando o agravamento do problema da escassez nestes centros. No entanto, a complexidade do problema faz com que o gestor de recursos hídricos tenha dificuldade em escolher a alternativa de melhor compromisso, analisando apenas de maneira intuitiva (FARIAS *et al.*, 2013), ou seja, sem o auxílio de algum métodos específico. Além disso, nestes casos a escolha de apenas uma alternativa pode não ser o suficiente para resolução do problema; por outro lado a adoção de todas as alternativas possíveis pode não ser viável, devido às restrições impostas, como por exemplo, as restrições financeiras.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo propor um modelo para auxiliar na definição de um subconjunto de alternativas de conservação e uso eficiente da água (portfólio), baseado em um método de apoio à decisão multicritério. O método utilizado é o *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations V* (PROMETHEE V), que é capaz de selecionar um subconjunto de alternativas considerando todos os aspectos envolvidos na situação, sejam eles técnicos, financeiros, sociais ou ambientais, bem como as restrições impostas para determinada região. Com este modelo é possível obter uma melhor caracterização do problema, conseqüentemente, maior entendimento da situação e de suas consequências, bem como garante que todos os critérios envolvidos sejam considerados, aumentando a qualidade das recomendações e, ainda, uma maior transparência e agilidade ao processo decisório.

O artigo está estruturado da seguinte maneira. A seção 2 traz informações de fontes secundárias sobre o apoio à decisão multicritério e o método utilizado, bem como é proposto o modelo para seleção de alternativas de conservação de água no meio urbano. Na seção 3 apresentam-se os resultados e análises da aplicação do modelo proposto. Por fim, as considerações finais do estudo são relatadas.

2 Materiais e métodos

Como apresentando anteriormente, decisões em planejamento e gestão de recursos hídricos são complexas. Este tipo de decisão é difícil de ser tomada avaliando-se um único aspecto, isto porque, geralmente essas decisões têm que atender a múltiplos objetivos e as suas consequências não podem ser precisamente identificadas (GOMES *et al.*, 2006, de ALMEIDA, 2015). Segundo Zeleny (1994) a tomada de decisão multicritério é uma forma de tentar resolver problemas com objetivos conflitantes que impede de chegar a uma solução ótima e conduz à procura da melhor escolha.

Neste sentido, a seleção das alternativas de conservação e uso eficiente da água no meio urbano deve ser feita mediante aspectos econômico-financeiro, ambiental, social e técnico, que serão representados pelos critérios de avaliação do decisor que levará em consideração suas preferências, seus valores pessoais, pontos de vista e a sua experiência com relação ao problema. Assim, é proposto aqui o uso de um método multicritério para apoiar a decisão.

Roy (1996) define o apoio à decisão multicritério como sendo uma atividade onde um analista utilizando modelos formais, ajuda a obter elementos que respondam às questões levantadas pelos decisores. Elementos esses, que tornarão a decisão mais clara e servirão para recomendar ou favorecer na evolução do processo, tornando-o mais consistente com os objetos e com as preferências dos decisores. Dentro da metodologia de apoio a decisão Vincke (1992) aponta duas vertentes principais, que são: (1) a Escola Americana, baseada na agregação de vários critérios em uma única função de síntese (como por exemplo, MAUT, SMARTS); e (2) a Escola Europeia, que consiste na construção de

uma relação de sobreclassificação (*outranking*), que representa as preferências estabelecidas pelo decisor (exemplo, o ELECTRE e o PROMETHEE).

Para o desenvolvimento deste trabalho é proposto o uso do método PROMETHEE V. Este método é adequado porque se enquadra ao problema em estudo, uma vez que trabalha sob a ótica da problemática de portfólio com restrições. O PROMETHEE V irá selecionar um subconjunto de alternativas potenciais dentro da ordenação, realizada *a priori*, das alternativas levantadas para o problema em questão. Segundo Morais & de Almeida (2012) uma vantagem dos métodos da família PROMETHEE está relacionada ao fato do decisor compreender facilmente os conceitos e parâmetros inerentes ao método, o que torna mais simples a modelagem das preferências e, conseqüentemente, aumenta a eficiência da aplicação do método.

Assim, os métodos da família PROMETHEE constroem uma relação de sobreclassificação valorada. Para cada critério é dado um peso p_j , em que os pesos são medidas de importância relativa do critério. Eles são expressos através de escalas, que podem ser cardinais, verbais ou ordinais. Após a determinação dos pesos é construída uma matriz de decisão de avaliações das alternativas relacionadas a um determinado conjunto de critérios. Para a construção da matriz é necessário definir uma função de preferência para cada critério, que descreve a intensidade de preferência de uma alternativa a sobre uma alternativa b por um dado critério j , que é denotado por $F_j(a,b)$ e assume valores entre 0 e 1 (BELTON & STEWART, 2002; VINCKE, 1992). Brans *et al.* (1986), apresentam seis formas diferentes para as funções de preferência do PROMETHEE, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Formas para função de preferência

Tipo	Nome	Definição	$F_j(a,b)$
I	Critério usual	$g_j(a) - g_j(b) > 0$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$F_j(a,b) = 1$ $F_j(a,b) = 0$
II	Quase-critério	$g_j(a) - g_j(b) > q$ $g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F_j(a,b) = 1$ $F_j(a,b) = 0$
III	Critério de preferência linear	$g_j(a) - g_j(b) > p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$F_j(a,b) = 1$ $F_j(a,b) = [g_j(a) - g_j(b)]/p$ $F_j(a,b) = 0$
IV	Critério Nível	$ g_j(a) - g_j(b) > p$ $q < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $ g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F_j(a,b) = 1$ $F_j(a,b) = 1/2$ $F_j(a,b) = 0$
V	Critério de preferência linear com zona de indiferença	$ g_j(a) - g_j(b) > p$ $q < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $ g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F_j(a,b) = 1$ $F_j(a,b) = [g_j(a) - g_j(b) - q] / (p - q)$ $F_j(a,b) = 0$
VI	Gaussiana	$g_j(a) - g_j(b) > 0$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	A preferência aumenta segundo uma distribuição normal

Fonte: adaptado de Brans *et al.* (1986); de Almeida & Costa (2003).

Segundo Abu-Taleb & Mareschal (1995), o PROMETHEE V consiste em duas etapas: (1) PROMETHEE II e (2) Programação linear inteira (0-1). No PROMETHEE II, a partir dos valores das funções de preferência e dos pesos atribuídos para cada critério, é calculado o índice de preferência da alternativa a sobre a alternativa b , pela Equação 1.

$$\pi(a,b) = \frac{1}{P} \sum_{j=1}^n p_j F_j(a,b), \quad (1)$$

Onde:

$$P = \sum_{j=1}^n p_j \quad (2)$$

Brans *et al.* (1986) indicam que o próximo passo do método é calcular os índices de sobreclassificação positivo e negativo para cada alternativa. O fluxo positivo $Q^+(a)$ (ou fluxo de saída), expressa o quanto uma alternativa a sobreclassifica às demais. Quanto maior for $Q^+(a)$, melhor é a alternativa, e isso é calculado pela Equação 3, em que n é o número de alternativas. Enquanto o fluxo negativo $Q^-(a)$ (ou fluxo de entrada) indica o quanto uma alternativa a é sobreclassificada pelas outras. Quanto menor for $Q^-(a)$ melhor é a alternativa e calcula-se utilizando a Equação 4.

$$Q^+(a) = \sum_{b \in A} \frac{\pi(a,b)}{n-1} \quad (3)$$

$$Q^-(a) = \sum_{b \in A} \frac{\pi(b,a)}{n-1} \quad (4)$$

Existe também o fluxo líquido de sobreclassificação, que nada mais é que a diferença entre o fluxo de saída e o fluxo de entrada e representa o balanço entre a força e a fraqueza da alternativa. Quanto maior o fluxo líquido, melhor é a alternativa, calculado pela Equação 5.

$$Q(a) = Q^+(a) - Q^-(a) \quad (5)$$

Assim, a partir do método PROMETHEE II é possível ranquear as alternativas obtendo um valor para cada uma, que será o seu fluxo líquido. Este fluxo líquido será, então, usado na segunda etapa do método PROMETHEE V, ou seja, os coeficientes da função objetivo da programação linear inteira serão os valores do fluxo líquido, obtido na primeira fase do método, ou seja, resultantes do PROMETHEE II (ABU-TALEB & MARESCHAL, 1995). Logo, o modelo de programação linear inteira é determinado pelas Equações 6 e 7.

$$\text{Max} \sum_{i=1}^k \phi(a_i)x_i \quad (5)$$

$$\text{s.a:} \sum_{i=1}^n a_i x_i \leq C \quad (6)$$

Onde:

a_i representa os valores das avaliações feita para cada alternativa sobre o critério i ;

x_i é a variável de decisão, em que $x_i \in \{1,0\}$ e $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$;

C é o valor da restrição.

Desta forma, através da programação linear inteira é obtido um subconjunto de alternativas que satisfazem as restrições impostas ao problema e, também, é obtido um novo fluxo líquido, onde: se x é igual a um (1), a alternativa será selecionada; se x igual à zero (0), a alternativa não fará parte a solução (MACHARIS *et al.*, 1998). Para maiores informações sobre os métodos PROMETHEE II e PROMETHEE V vejam: Behzadian *et al.* (2010), Fontana & Morais (2013) e Morais & de Almeida (2014).

Contudo, as etapas do modelo proposto neste trabalho, baseado no PROMETHEE V, podem ser visualizadas na Figura 1.

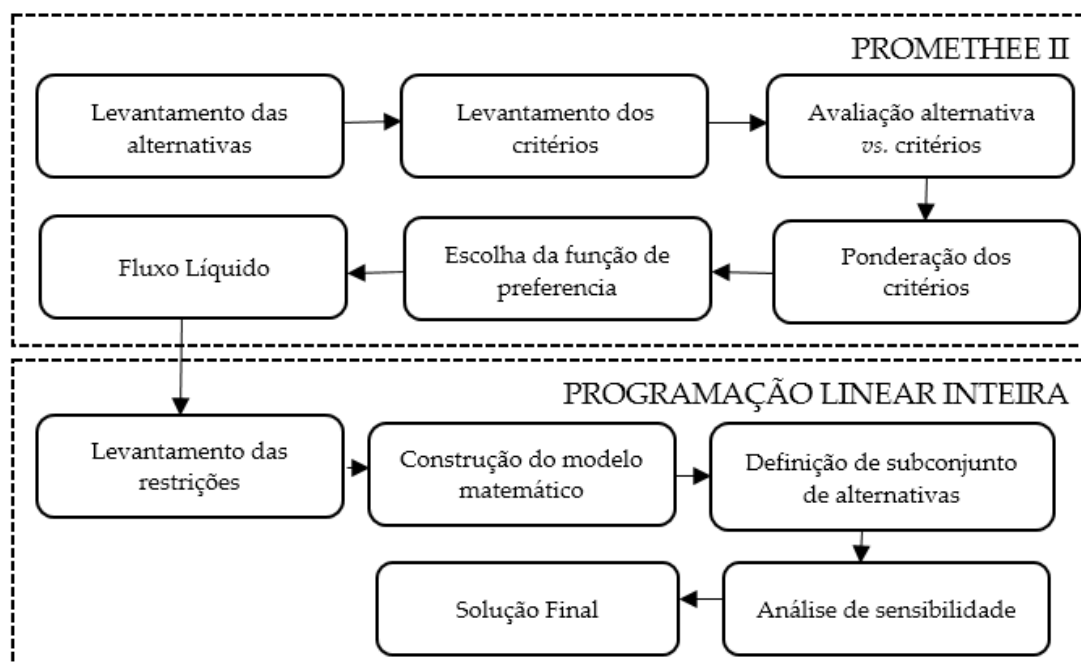


Figura 1 – Etapas do modelo para definição de alternativas de conservação e uso eficiente da água no meio urbano

Todo o processo apresentando na Figura 1 é interativo, pois em qualquer fase pode haver a necessidade de voltar para a anterior visando melhorar e facilitar o processo de decisão. Para explicar as fases deste modelo será apresentado, na próxima secção, um estudo realizado na região delimitada pelo Distrito-30, que se localiza no bairro de San Martim, na cidade do Recife, estado de Pernambuco, Brasil. O distrito apresenta uma área de 305,70 hectares, ocupada por uma população de 50.631 habitantes, caracterizada por ser de urbanização de média a baixa renda com focos de pobreza.

3 Resultados e análises

Os resultados e análises serão apresentados na mesma sequencia do modelo (Figura 1) para que as etapas do modelo sejam compreendidas.

3.1. Levantamento das alternativas

A partir da situação em que se encontra hoje o problema da escassez de água nas áreas urbanas, foi possível levantar, através de pesquisas bibliográficas e entrevista com especialistas na área de recursos hídricos, algumas alternativas que podem ser implementadas como forma de amenizar ou até mesmo solucionar o problema exposto neste trabalho. As alternativas estão dispostas em três categorias, que são:

- ✓ Ações voltadas à diminuição do consumo de água:
 - A1 - Reuso de águas residuais;
 - A2 - Campanhas de Educação ambiental;
 - A3 - Implantação de dispositivos economizadores de água;
 - A4 - Uso de águas pluviais.
- ✓ Ações voltadas à qualidade da água:
 - A5 - Projeto de esgotamento sanitário nas áreas urbanas;
- ✓ Ações voltadas à eficiência operacional do sistema:
 - A6 - Setorização da rede de distribuição de água;
 - A7 - Controle e fiscalização de fraudes;
 - A8 - Controle de vazamentos na rede de abastecimento.

3.2. Levantamento dos critérios

A determinação dos critérios foi realizada juntamente com o decisor e levou em consideração aspectos econômicos, sociais, ambientais e operacionais as condições atuais do problema de escassez de água nos centros urbanos, o caráter de urgência de levantar medidas de conservação e uso eficiente da água e, ainda, o conhecimento de órgãos e entidades interessadas na questão. A determinação de critérios adequados é crucial para a eficiência e eficácia do método. Os critérios identificados são:

- ✓ Critério C1 (Investimento inicial): Corresponde ao valor monetário investido para a implantação da ação dados em Reais (R\$).
- ✓ Critério C2 (Custo de manutenção da ação): Corresponde ao valor monetário investido para a implantação da ação dados em Reais (R\$).
- ✓ Critério C3 (Tempo de resposta da ação implantada): Corresponde ao tempo necessário para obter-se o resultado das ações implantadas (meses).
- ✓ Critério C4 (Impacto das alternativas sobre a população envolvida): Corresponde ao nível de aceitação ou rejeição pela população da ação.
- ✓ Critério C5 (Eficiência da ação): Corresponde a verificar se os resultados obtidos com a implantação das alternativas estão de acordo com os objetivos esperados pelo decisor sobre determinada alternativa.
- ✓ Critério C6 (Redução do consumo): Verifica se houve redução do volume de água consumido após a implantação da ação.

3.3. Avaliação das alternativas com relação aos critérios

Para o caso em estudo, os critérios como investimento inicial (C1), custo de manutenção da ação (C2) e tempo de resposta da ação implantada (C3) são avaliadas de acordo com estimativas cedidas por órgão competentes e, também, por pesquisas que identificam onde as mesmas ações são realizadas. Estes critérios possibilitam uma comparação objetiva levando em consideração o custo monetário para a implantação da alternativa.

Os demais critérios (C4, C5 e C6) apresentam um caráter subjetivo, ou seja, não possuem valores claros que possibilitem um julgamento mais preciso das alternativas, por isso serão avaliados através de uma escala verbal que mede o impacto positivo da alternativa naquele critério, onde se tem: (5) Muito Alto, (4) Alto, (3) Médio, (2) Baixo, (1) Muito Baixo. O método PROMETHEE consegue lidar muito bem com escalas verbais e numéricas, uma vez que ele faz comparações par-a-par e verifica a diferença entre as avaliações. A matriz de avaliação das alternativas *versus* critérios pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz avaliação alternativas *vs.* critérios

<i>Alternativas</i>	<i>Critérios</i>					
	<i>C1 (R\$)</i>	<i>C2 (R\$/mês)</i>	<i>C3 (meses)</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>	<i>C6</i>
Objetivo	<i>Minimizar</i>	<i>Minimizar</i>	<i>Minimizar</i>	<i>Maximizar</i>	<i>Maximizar</i>	<i>Maximizar</i>
A1	2.800.000,00	170.000,00	12	Alto	Alto	Muito alto
A2	36.000,00	0,00	6	Muito alto	Médio	Muito baixo
A3	210.000,00	0,00	12	Alto	Alto	Alto
A4	1.500.000,00	100.000,00	18	Alto	Alto	Muito alto
A5	2.700.000,00	25.000,00	2	Médio	Muito alto	Baixo
A6	55.000,00	11.500,00	2	Muito baixo	Muito alto	Médio
A7	26.000,00	24.000,00	1	Médio	Alto	Alto
A8	25.000,00	24.000,00	1	Baixo	Muito alto	Muito alto

3.4. Ponderação dos Critérios

Neste estudo foi solicitado ao decisor que ele ordenasse os critérios de acordo com as suas preferências. Posteriormente, o mesmo deve atribuir um peso de 0 a 10 a cada critério. Antes de atribuir os pesos, o decisor deve entender o significado dos critérios e entender como eles serão avaliados dentro dos respectivos níveis de escala. Deve ficar claro ao decisor que o peso de um critério representa a importância que este tem em relação aos demais, ou seja, o peso é uma medida de importância relativa entre critérios. Após a atribuição dos pesos por pelo decisor, o analista deve realizar a normalização das medidas, conforme a Equação 2. Assim, os pesos atribuídos são: 0,26 (C6), 0,23 (C1), 0,21 (C2), 0,15 (C5), 0,10 (C3) e 0,05 (C4).

3.5. Escolha das funções de preferência

A escolha das funções de preferência deve levar em consideração a forma como o decisor avalia cada critério. Elas transformam a diferença entre duas avaliações, em um determinado critério, para um valor real entre 0 e 1. As funções de preferência, na maioria das vezes, são escolhidas pelo decisor. Assim, é exposto a ele como se comporta cada função para determinado critério e, então, ele escolhe a mais adequada para o critério escolhido.

Para o problema em questão os critérios C4, C5 e C6 são de natureza subjetiva, então, foi utilizada a recomendação indicado por Keyser & Peeters (1996) onde critérios desse tipo são mais bem avaliados se analisados utilizando a função de preferência Critério Usual – Tipo I. O critério C3 foi analisado a partir da função de preferência Quase-Critério – Tipo II, com limiar de indiferença $q = 3$.

Para os critérios C1 e C2, que representam custos, decidiu-se por considerar que a preferência do decisor por uma alternativa em relação à outra cresce linearmente com a diferença de desempenho entre elas e que, a partir de um determinado limiar, uma alternativa é estritamente preferível à outra. Dessa forma foi utilizada a função de preferência Critério de Preferência linear – Tipo III. Neste caso o valor do limiar p estabelecido é de 150.000,00 no critério C1 e de 50.000,00 para o critério C2.

3.6. Fluxo líquido do PROMETHEE II

Com as avaliações das alternativas, a determinação do peso dos critérios e a escolha da função de preferência para cada critério são, então, calculadas a intensidade de preferência para cada critério. A próxima etapa do modelo é calcular os índices de preferência para cada alternativa, ou seja, o somatório de todas as intensidades de preferência encontradas em cada critério.

A partir do cálculo dos índices de preferência, se obtém os fluxos de entrada, de saída e os fluxos líquidos das alternativas e, com isso, é possível chegar ao *ranking* das alternativas potenciais de uso e conservação de água no meio urbano, de acordo com resultados apontados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado dos fluxos encontrados

Alternativas	Fluxos			Posição das alternativas
	Q ⁺	Q ⁻	Q	
A1	1,90	3,85	-1,95	8 ^o
A2	2,37	3,30	-0,93	5 ^o
A3	2,69	2,70	-0,01	4 ^o
A4	2,32	3,61	-1,29	6 ^o
A5	1,93	3,57	-1,64	7 ^o
A6	3,27	1,77	1,51	2 ^o
A7	2,78	1,74	1,05	3 ^o
A8	3,86	0,60	3,25	1 ^o

3.7. Levantamento das restrições

O levantamento das restrições também é realizado pelo decisor, pois é ele quem vai determinar as limitações existentes para a implantação das alternativas, indicando os valores limites da restrição. Dentro da área de recursos hídricos existe uma série de parâmetros que podem ser levados em consideração no levantamento das restrições lineares para o problema de decisão. Esses parâmetros podem expressar limitações orçamentárias, dispersão geográfica, impactos ambientais, entre outros (ABU-TALEB & MARESCHAL, 1995).

Para o problema em questão três restrições serão adotadas. A primeira diz respeito à limitação orçamentária para a implantação das ações de conservação de água no meio urbano num valor de máximo de R\$ 4.000.000,00 (quatro milhões de reais). A segunda refere-se ao limite no orçamento para atividades de manutenção destas ações de R\$ 100.000,00 (cem mil reais). E, por fim, a restrição sobre um limite para o tempo de resposta da alternativa implantada, pois se espera obter resultados no prazo máximo de 30 meses. Então, dentro destas limitações deverá ser encontrado um subconjunto de alternativas viáveis.

3.8. Construção do modelo matemático de Programação Linear Inteira

Segundo Abu-Taleb & Mareschal (1995), a função objetivo, do PROMETHEE V, é composta pelo domínio dos fluxos líquidos, tal como definido pelo PROMETHEE II (Tabela 3), e que deve ser maximizado. Com isso tem-se:

$$Max Z = -1,95x_{A1} - 0,93x_{A2} - 0,01x_{A3} - 1,29x_{A4} - 1,64x_{A5} + 1,51x_{A6} + 1,05x_{A7} + 3,25x_{A8} \quad (8)$$

Sujeito a:

$$2.800.000x_{A1} + 36.000x_{A2} + 210.000x_{A3} + 1.500.000x_{A4} + 2.700.000x_{A5} + 55.000x_{A6} + 26.000x_{A7} + 25.000x_{A8} \leq 4.000.000 \quad (9)$$

$$170.000x_{A1} + 0x_{A2} + 0x_{A3} + 100.000x_{A4} + 25.000x_{A5} + 11.500x_{A6} + 24.000x_{A7} + 24.000x_{A8} \leq 100.000 \quad (10)$$

$$12x_{A1} + 6x_{A2} + 12x_{A3} + 18x_{A4} + 2x_{A5} + 2x_{A6} + x_{A7} + x_{A8} \leq 30 \quad (11)$$

$$x_{A1}, x_{A2}, x_{A3}, x_{A4}, x_{A5}, x_{A6}, x_{A7}, x_{A8} = [0, 1] \quad (12)$$

Onde: (8) é a função objetivo; (9) Restrição orçamentária de implantação; (10) Restrição orçamentária de manutenção; (11) Restrição sobre o tempo de resposta; (12) restrição quanto ao valor dos x_s . A variável de decisão x_{Ai} corresponde à variável que representa a alternativa do problema, por exemplo x_{A1} corresponde a alternativa A1.

Porém, Fontana & Morais (2013) observaram que, como o objetivo é maximizar a função, pela programação linear inteira não há qualquer possibilidade das alternativas que possuem fluxo líquido negativo entrarem no subconjunto das soluções.

No caso estudado, por exemplo, apenas as alternativas A6, A7 e A8 poderiam fazer parte da solução final. O fato das demais alternativas apresentarem um fluxo negativo não caracteriza alternativas dominadas ou ineficientes, apenas que, pela avaliação dos critérios, são menos preferíveis que as alternativas com fluxo positivo. Contudo, por exemplo, se todas as alternativas com fluxo líquido positivo estiverem impossibilitadas de execução devido às restrições impostas, o problema não teria solução viável pelo PROMETHEE V. Este fato não faz sentido, uma vez que o problema possui alternativas viáveis, embora menos preferíveis.

Para resolver este problema Vetschera & de Almeida (2012) definem um portfólio c -ótimo, como o melhor portfólio contendo exatamente c alternativas, e, sendo a_i uma alternativa e um número de alternativas no portfólio igual a p , adiciona-se uma restrição (13) tal que o número de alternativas no portfólio seja $c > p$.

$$\sum a_i = c \quad (13)$$

Adicionando-se esta restrição ao problema é possível encontrar uma solução com um Z_{Max} menor, porém com um número maior de alternativas na solução. Em outras palavras, a restrição faz com que seja possível a entrada das alternativas com fluxo negativo na solução final (DE ALMEIDA & VETSCHERA, 2012; VETSCHERA & DE ALMEIDA, 2012).

3.9. Solução do problema – Subconjunto de alternativas

A solução do problema é dada da seguinte forma: se a variável de decisão x_{Ai} receber valor 1, significa que esta alternativa faz parte do subconjunto de soluções viáveis. Caso x_{Ai} receba valor 0, isso implica que a alternativa não faz parte do subconjunto de soluções viáveis.

Resolvendo a programação inteira sem a restrição (13) tem-se um subconjunto de alternativas composto por A6, A7 e A8, um $Z_{Max}= 5,81$, porém uma folga suficiente para implementação de outras alternativas igual à: R\$ 3.894.000,00 no orçamento de implantação, R\$ 40.500,00 no orçamento para manutenção e 26 meses no tempo de resposta.

Portanto, aplicando-se a restrição (13) é possível chegar a uma solução com um subconjunto de alternativas tal que a folga no tempo de resposta caia para 6 meses e para R\$ 948.000,00 no recursos para implantação e para R\$ 15.500,00 de recursos destinados à manutenção das ações. Isto significa a implantação de 06 alternativas ao invés de 03, ou seja, uma vez que todas as alternativas são interessantes e o maior número de alternativas significa a maximização do desempenho do sistema de abastecimento, tem-se, então, uma solução melhor. O subconjunto de alternativas potenciais está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Subconjunto das alternativas potenciais

Alternativas	Representação
Campanhas de Educação ambiental	A2
Implantação de dispositivos economizadores de água	A3
Projeto de esgotamento sanitário nas áreas urbanas	A5
Setorização da rede de distribuição de água	A6
Controle e fiscalização de fraudes	A7
Controle de vazamentos na rede de abastecimento	A8

3.10. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade deve ser realizada para verificar a robustez do resultado quanto às incertezas inseridas na atribuição dos pesos, especialmente no que diz respeito à diferença de importância entre os critérios.

A análise foi realizada alterando-se o peso de todos os critérios da seguinte maneira: (1) escolher um critério C_i , (2) adicionar ao seu peso 5%, (3) retirar 1% do peso dos outros 05 critérios, (4) fazer isso para os outros critérios. Depois disso, deve-se: (1) escolher novamente um critério C_i , (2) retirar do seu peso 5%, (3) adicionar 1% no peso dos outros 05 critérios, (4) repetir isso para os outros critérios. Lembrando que o somatório dos pesos sempre deve ser igual a 1 (Equação 2). Para cada alteração de pesos um novo raque pelo *PROMETHEE II* deve ser gerado, alterando-se os fluxos líquidos das alternativas e, em seguida, realizar a etapa de programação linear inteira.

Algumas inversões de raque e mudanças nos valores dos fluxos líquidos foram observadas, porém nenhuma foi suficiente para mudar o resultado do subconjunto de alternativas na solução final.

4. Considerações finais

O uso de um modelo como auxílio a decisões na área de recursos hídricos permite analisar as diversas ações segundo diferentes aspectos envolvidos no problema. Dessa forma, é possível que as alternativas levantadas sejam avaliadas por diferentes critérios, levando em consideração aspectos

econômicos, ambientais, operacionais e sociais, além de contar com o sistema de valor do decisor envolvido no problema.

Assim, pode-se concluir que o modelo proposto, baseado no método PROMETHEE V, é interessante neste tipo de decisão. A aplicação numérica realizada, utilizando dados realísticos, foi essencial para confirmar a necessidade e importância do modelo. A coerência dos resultados, a facilidade de aplicação do método e o entendimento de seu funcionamento, por parte do decisor, são fatores que confirmam as afirmativas encontradas na literatura a respeito da eficiência e eficácia do PROMETHEE V, quando aplicado a problemas referentes ao gerenciamento de recursos hídricos. Além disso, a análise de sensibilidade demonstrou que, para o problema analisado, o método é robusto.

Na aplicação do modelo verificou-se a possibilidade de haver uma solução melhor, com a adição da restrição (13). Esta restrição foi essencial para garantir que alternativas com fluxo negativo entrasse no subconjunto das alternativas viáveis, quando estas atendiam as restrições impostas ao problema. Isto garante um resultando final com um maior número de alternativas. Ressalta-se que isso é interessante quando se tem um problema como o analisado neste artigo, ou seja, quando o ideal seria a implantação de todas as alternativas, porém há restrições que impedem a implementação de todas. Desta forma, o problema de decisão é estabelecer, então, quais serão implantadas, considerando estas restrições.

O modelo aqui exposto pode ser implantado em outras localidades, servindo como um referencial para a aplicação de métodos de apoio a decisão multicritério na busca de alternativas de conservação e uso eficiente da água em áreas urbanas. As alternativas e os critérios podem ser determinados pelo decisor de acordo com as suas preferências e com as características do local.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos revisores e as agências de fomento, o CNPq e a CAPES, pelos apoios financeiros concedidos.

Referências

- ABU-TALEB, M. F., MARESCHAL, B. Water resources planning in the Middle East: application of the PROMETHEE V multicriteria method. *European Journal of Operational Research*. 1995; 81: 500-511.
- ALIPOUR, M. H., SHAMSAI, A., AHMADY, N. A new fuzzy multicriteria decision making method and its application in diversion of water. *Expert Systems with Applications*, 2010; 37: 8809-8813.
- BEHZADIAN, M., KAZEMZADEH, R. B., ALBADVI, A., AGHDASI, M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*. 2010; 200 (1): 198-215.
- BELTON, V., STEWART, T. J. *Multiple Criteria Decision Analysis*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BRANS, J. P., VINCKE, Ph., MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*. 1986; 24: 228-238.
- BRASIL. MMA & ANA (Ministério do Meio Ambiente & Agência Nacional das Águas). *Geo Brasil: recursos hídricos: componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil/ Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional das Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente*. Brasília, 2007: 264. Available from: <http://www.ceivap.org.br/estudos/Geo-Brasil-Recursos-Hidricos-Resumo-Executivo.pdf>
- CAMBRAINHA, G. M. G., FONTANA, M. E. Análise da aplicação de investimentos em perdas de água no nordeste brasileiro. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET*, 2015. (aceito para publicação)

- CHANG, N. B., CHEN, H. W., NING, S. K., HSU, H. Y., SHAO, K. T., HUN, T. C. Sizing an Off-stream Reservoir with Respect to Water Availability, Water Quality, and Biological Integrity. *Environ Model Assess.* 2010; 15: 329-344.
- de ALMEIDA, A. T., CAVALCANTE, C. A. V., ALENCAR, M. H., FERREIRA, R. J. P., ALMEIDA-FILHO, A. T., GARCEZ, T. V. Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis. In: *International Series in Operations Research & Management Science.* 2015; 231.
- de ALMEIDA, A. T., COSTA, A. P. C. S. Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão. Recife: Ed. Universitária da UFPE. 2003; 14.
- de ALMEIDA, A. T., VETSCHERA, R. A note on scale transformations in the PROMETHEE V method. *European Journal of Operational Research.* 2012; 219: 198–200.
- FARIAS, A. P. da S., FONTANA, M. E., MORAIS, D. C. Modelo de sistema de informação e decisão para intervenções de reabilitação em redes de distribuição de água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH.* 2013; 18 (2): 55-65.
- FONTANA, M. E., MORAIS, D. C. Using *PROMETHEE V* to select alternatives so as to rehabilitate water supply network with detected leaks. *Water Resour Manage.* 2013; 27: 4021–4037.
- FONTANA, M. E., MORAIS, D. C. Modelo para setorizar redes de distribuição de água baseado nas características das unidades consumidoras. *Produção (São Paulo. Impresso).* 2015; 25 (1): 143-156.
- GIUSTOLISI, O., BERARDI, L. Prioritizing Pipe Replacement: From Multiobjective Genetic Algorithms to Operational Decision Support. *Journal of Water Resources Planning and Management.* 2009; 135 (6): 484-492.
- GOMES, L. F. A. M., GOMES, C. F. S., de ALMEIDA, A. T. Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério. 2ª Ed. Rio de Janeiro, Editora Atlas, 2006.
- HAFNER, A. V. Conservação e Reuso de Água em Edificações – Experiências Nacionais e Internacionais. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia Civil). [dissertation]. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- HAJKOWICZ, S., HIGGINS, A. A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. *European Journal of Operational Research.* 2008; 184: 255-265.
- HYDE, K. M., MAIER, H. R., COLBY, C. B. A distance-based uncertainty analysis approach to multi-criteria decision analysis for water resource decision making. *Journal of Environmental Management.* 2005; 77: 278–290.
- KEYSER, W., PEETERS, P. A note on the use of *PROMETHEE* multicriteria methods. *European Journal of Operational Research.* 1996; 89: 457-461.
- MACHARIS, J., BRANS, P., MARESCHAL, B. The GDSS *PROMETHEE* procedure. *Journal of Decision Systems.* 1998; 7: 283-307.
- MORAIS, D. C., de ALMEIDA, A. T. Group decision-making for leakage management strategy of water network. *Resources, Conservation and Recycling.* 2007; 52: 441–459.
- MORAIS, D. C., de ALMEIDA, A. T. Water network rehabilitation: A group decision-making approach. *Water AS.* 2010; 36 (4): 487-494.
- MORAIS, D. C., CAVALVANTE, C. A. V., de ALMEIDA, A. T. Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água. *Pesquisa Operacional.* 2010; 30 (1): 15-32.
- MORAIS, D. C., de ALMEIDA, A. T. Group decision making on water resources based on analysis of individual rankings. *Omega.* 2012; 40: 42–52.

- ROY, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- SILVA FILHO, J. L., FONTANA, M. E., MORAIS, D. C. Strategic Options Development and Analysis to identify criteria to evaluate segmentation problems of a water distribution network. *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, San Diego, CA, USA. 2014: 283-288.
- SOARES, A. M. F., FONTANA, M. E., MORAIS, D. C. Sistema de Gestão Ambiental: um estudo de caso da implantação do controle operacional no Beneficiamento de areia em uma indústria de fundições. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET*. 2014; 18 (3): 1179-1199.
- VETSCHERA, R., de ALMEIDA, A. T. A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems. *Computers & Operations Research*. 2012; 39: 1010–1020.
- VINCKE, Ph. *Multicriteria decision aid*. Bruxelles, Jonh Wiley & Sons, 1992.
- ZELNY, M. Six concepts of optimality. *TIMS/Orsa Joint Meeting*, Boston, 1994.