

XI-094 - APLICAÇÃO DE UM MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA HIERARQUIZAR ALTERNATIVAS DE CONTROLE DE PERDAS DE ÁGUA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Júlia Daniele Silva de Souza⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Bolsista de Iniciação Científica da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE.

Eduardo Luiz Chaves de Medeiros

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

Andreia Azevedo Abrantes de Oliveira

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

Lucas Caitano da Silva

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

Saulo de Tarso Marques Bezerra

Professor Associado do curso de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil e Ambiental e Doutor em Engenharia Mecânica.

Endereço⁽¹⁾: Rua João Cordeiro de Souza, 184, Vassoural, Caruaru-PE, CEP: 50030-025, Brasil, Telefone: (81) 993330224. E-mail: juliadaniele_souza@hotmail.com.

RESUMO

Um dos principais desafios enfrentados pelas empresas de abastecimento de água é o alto nível de perdas de água nos sistemas de distribuição. Essas perdas correspondem ao volume de água não faturado pela concessionária local, ou perdido por meio de vazamentos em adutoras e redes, ou extravasamentos de reservatórios. O objetivo desse trabalho foi aplicar o método multicritério PROMETHEE para definir a melhor alternativa para minimizar as perdas de água de sistemas de abastecimento de água de municípios de médio porte de Pernambuco. O PROMETHEE foi aplicado para avaliar as diversas opções para o problema, por meio da reflexão da opinião de diferentes especialistas no assunto. O modelo desenvolvido estabeleceu uma relação de hierarquização entre as soluções propostas, analisando-se os critérios estabelecidos pelo agente decisor. As alternativas estabelecidas foram o controle ativo de perdas, a gestão da pressão e a gestão da infraestrutura. A gestão da pressão foi a alternativa que obteve o melhor desempenho, por ter sido bem avaliado nos quatro critérios considerados.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência Hidráulica, Controle de pressão, Controle ativo de perdas, Gestão da infraestrutura, PROMETHEE.

INTRODUÇÃO

A progressiva deterioração dos recursos hídricos e o agravamento dos conflitos entre os diversos usuários impulsionam discussões sobre a situação atual e futura da água em todo o mundo. No setor de saneamento brasileiro, o desperdício de água começa pela contaminação dos mananciais urbanos e prossegue pelos vazamentos nas adutoras, reservatórios e redes de distribuição. Os índices brasileiros de perda de água são superiores ao dobro do índice internacionalmente aceito pela comunidade científica.

As perdas são influenciadas por diversos fatores estruturais e operacionais. Estas dependem basicamente das características das redes de distribuição e de fatores relacionados às práticas de operação, do nível de tecnologia do sistema e da expertise dos técnicos responsáveis pelo controle dos processos (BEZERRA e CHEUNG, 2013). A universalização do acesso à água em condições de potabilidade, com implantação e manutenção de uma infraestrutura capaz de atender de maneira adequada e otimizada a demanda dos grandes centros urbanos, é o grande desafio dos prestadores de serviço público de abastecimento de água para as

próximas décadas. É reconhecido que uma gestão que visa o controle e a redução de perdas permite postergar investimentos em ampliação dos sistemas de produção e o melhor equacionamento dos investimentos para a universalização do acesso aos serviços.

Dentre os novos referenciais, a perspectiva de aumento continuado da oferta de água, que orienta a gestão “tradicional” dos serviços de abastecimento, vem sendo substituída por uma perspectiva de gestão eficiente, que proporciona um aumento virtual da disponibilidade de água. As companhias de saneamento têm a responsabilidade pelo uso racional da água, assim, ações e políticas devem ser postas em prática para a diminuição das perdas e desperdícios. Ao diminuir as perdas de água, a concessionária reduz o volume captado e, consequentemente, os mananciais são preservados. E além de impactar diretamente no faturamento, as perdas afetam a imagem das empresas junto à sociedade, aos agentes financiadores, aos órgãos ambientais e ao poder público.

O desenvolvimento de técnicas direcionadas especificamente para a gestão de perdas em sistemas de distribuição de água é, relativamente, novo. Atualmente, o tema “perdas de água” está sendo objeto de estudos realizados em diversas instituições de pesquisa e companhias de saneamento, que visam quantificar, classificar e determinar padrões para os processos das empresas. Apesar dos estudos empíricos serem importantes, o desenvolvimento de novas técnicas e metodologias que empregam princípios baseados em conhecimentos predominantemente científicos, como, por exemplo, teorias da engenharia hidráulica, sistemas de suporte à decisão, e modelos de gestão (planejamento estratégico), é imprescindível.

As perdas de água são classificadas em aparentes e reais. As perdas aparentes, também chamadas de perdas não físicas e perdas comerciais, correspondem ao volume de água consumido, mas que não é contabilizado pela companhia de abastecimento, ou seja, é a parte da água distribuída que não foi “fisicamente perdida”, mas não gerou receita a empresa.

As perdas aparentes são causadas por ligações clandestinas (chamadas popularmente de “gatos”), roubo ou uso ilegal (por exemplo, retirada de água em válvulas de descargas de adutoras), fraudes nos hidrômetros, erros de leituras dos hidrômetros e falhas no cadastro comercial (cadastro desatualizado, ligação não cadastrada por descuido, registro de inatividade em ligação ativa) (BEZERRA e CHEUNG, 2013).

As perdas reais representam o volume efetivamente perdido no sistema. As perdas reais são decorrentes de vazamentos que ocorrem nas tubulações das adutoras e nas redes de distribuição, nos ramais das ligações prediais, nas estações de tratamento de água e nos extravasamentos de reservatórios.

A quantidade de água perdida devido a vazamentos nas redes de distribuição representa um dos maiores desafios para os gerentes das empresas, não só por causa do custo, mas também porque implica impactos na sociedade e no meio ambiente. Fato que é agravado em regiões onde a disponibilidade hídrica é limitada, que é o caso da Região Nordeste. Portanto, as decisões técnicas devem basear-se em um exercício de tomada de decisão que inclua um maior número de critérios, além dos aspectos puramente técnicos e econômicos que normalmente são levados em consideração na avaliação de um projeto.

A tomada de decisão sobre a gestão de perdas é complexa e representa um desafio para os gestores. Se o problema for observado unicamente do ponto de vista econômico, é possível que as ações se resumam apenas na substituição de hidrômetros e na reparação de vazamentos evidentes ou relatados. No entanto, dado que é um serviço público imprescindível para os usuários e que as decisões tomadas pela empresa têm amplos impactos, deve-se buscar soluções que avaliem diversos critérios, além dos aspectos técnicos e econômicos usuais, para que as ações impostas sejam as mais apropriadas para a empresa, a população e o meio ambiente.

OBJETIVOS

O objetivo desse estudo foi aplicar o método multicritério PROMETHEE para definir a melhor alternativa para minimizar as perdas de água de sistemas de abastecimento de água de municípios de médio porte de Pernambuco.

REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Alegre *et al.* (2005), perdas de água correspondem ao volume de água que pode ser calculado por meio da diferença entre a água que entra no sistema de abastecimento e a água consumida pela população. Para esse cálculo, devem ser consideradas as circunstâncias das perdas, devido ao fato de que elas podem ocorrer a partir da rede de água não tratada até as zonas do sistema de distribuição de água. É interessante ressaltar que esse cálculo é relativamente simples de ser feito, porque apenas depende do volume de água de entrada no sistema, algo fácil de ser aferido por meio da empresa concessionária, e do volume medido nos hidrômetros das residências locais.

A gestão das perdas de água consiste em uma série de ações que são realizadas para combater e reduzir o número de perdas de água em um sistema de abastecimento, levando em conta os inúmeros custos e prejuízos que tais perdas podem ocasionar. Para isso, é preciso determinar o nível de perdas do sistema, e os recursos que a empresa possui para combatê-las. Feito isso, determina-se as ações que podem ser executadas para reduzir as perdas, de acordo com os objetivos planejados e os cálculos realizados.

Gerenciar as perdas de água é desafiador, pois exige esforço e, principalmente, conhecimento de todas as causas que implicam na ocorrência das mesmas. É fundamental haver um planejamento íntegro na gestão das perdas, desde a caracterização e diagnóstico do problema, até a obtenção de um plano de ação, objetivando-se atingir um controle preciso das perdas e, assim, podendo programar ações para reduzi-las (MIRANDA, 2002).

Segundo o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto, divulgado anualmente pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, no ano de 2011, o índice de perdas de água do Brasil era de 38,8%, valor semelhante ao verificado no levantamento feito pelo IBNET (2011). No diagnóstico mais recente, do ano de 2016, o índice de perdas do Brasil era de 38,1%, indicando que o país vem reduzindo de forma lenta a porcentagem de perda de água tratada. Esse diagnóstico é feito com base nos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, ou SNIS, que calcula os indicadores de perdas com base nos resultados dos índices de perdas na distribuição (SNIS, 2016).

Segundo Alegre *et al.* (2005), os sistemas de abastecimento possuem um papel muito importante na distribuição de água potável para a população. Para que esse objetivo seja atingido, é preciso que esse sistema seja gerido de forma eficiente, otimizando os recursos disponíveis na produção do serviço, e eficaz, de modo que todos os objetivos estabelecidos sejam cumpridos.

Conforme Galván (2011), a gestão de perdas de água é uma série de ações realizadas para enfrentar os efeitos das perdas de água, que traz prejuízos adicionais ao sistema de abastecimento de água. Os quatro pilares principais que sustentam o gerenciamento dessas perdas são:

- Controle ativo e passivo das perdas, que seria a localização e reparação de perdas evidentes, ou a prevenção das mesmas;
- A gestão da pressão, que seria reduzir o fluxo de perdas indetectáveis sem modificar a infraestrutura, realizando o controle das pressões do sistema;
- A velocidade e qualidade dos reparos, pois realizando reparos rápidos e eficazes tem como consequência a diminuição das perdas;
- E a gestão de infraestrutura, que, apesar de ter custo elevado, visa obter o abastecimento das zonas distintas por apenas uma instalação de medição.

Os métodos multicritérios surgiram nos anos 60 como uma ferramenta de apoio à decisão. Sua aplicação é feita na análise comparativa de ações para serem implementadas à uma situação complexa, com base em diversos critérios estabelecidos. Esses modelos ajudam aos decisores a integrar as diversas opções em ações para determinado problema, por meio da reflexão da opinião de diferentes especialistas no assunto. Os resultados são apresentados, em geral, como orientações de decisão e recomendações para futuras ações.

Conforme Almeida e Costa (2003), o apoio multicritério é um conjunto de métodos que auxiliam na resolução de um problema, onde o objetivo deste é avaliado, segundo múltiplos critérios geralmente conflitantes. O método *Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*, ou PROMETHEE, foi escolhido, porque é

um método de fácil entendimento, de forma que seus conceitos e parâmetros utilizados são de rápido entendimento pelo decisor.

O método PROMETHEE, proposto por Brans e Vincke (1985), estabelece uma relação de hierarquização entre as soluções adotadas, analisando-se os critérios estabelecidos pelo agente decisor. Segundo Vincke (1992), durante seu processo de análise, o objetivo é decomposto em critérios, onde se comparam, de duas em duas, as alternativas no último nível de decomposição, seguindo as preferências estabelecidas pelo tomador de decisão. Para se construir a relação hierárquica entre as alternativas, utilizam-se alguns conceitos:

- w_j é o peso do critério j , onde indica se um critério tem maior importância do que outro;
- $g_j(a)$ é o desempenho da alternativa comparada no critério j ;
- q representa um valor de indiferença entre dois critérios, onde considera o maior valor de $[g_j(a) - g_j(b)]$, abaixo do qual existe uma indiferença;
- p representa um valor de preferência entre dois critérios, onde considera o menor valor de $[g_j(a) - g_j(b)]$, acima do qual existe uma preferência;
- $F_j(a,b)$ é a função de preferência, representando a preferência do agente decisor a duas alternativas, sendo elas comparadas em relação a um determinado critério. Seu valor varia entre 0 e 1.

Conforme Vincke (1992), após estabelecer o nível das preferências, obtêm-se o grau de hierarquização $\pi(a,b)$ para cada duas alternativas (a,b) comparadas, calculando-se da seguinte forma:

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

Após esse cálculo, as alternativas são ordenadas da seguinte maneira:

- Ordem decrescente de $\Phi^+(a)$, que é chamado de fluxo de saída. É obtido pela seguinte equação: $\Phi^+(a) = \sum \pi(a,b)/(n-1)$. Ele representa o nível de preferência da alternativa a sobre as demais. Logo, quanto maior $\Phi^+(a)$, melhor será a alternativa;
- Ordem crescente de $\Phi^-(a)$, que é chamado de fluxo de entrada. É obtido pela seguinte equação: $\Phi^-(a) = \sum \pi(b,a)/(n-1)$. Ele representa o nível de preferência das demais alternativas sobre a. Logo, quanto menor $\Phi^-(a)$, melhor será a alternativa.

Para gerar a ordem das soluções, escolheu-se o método PROMETHEE II, atribuindo diferentes pesos para cada uma das alternativas consideradas. Segundo Souza (2013), no método PROMETHEE II, para cada alternativa considerada, admite-se que o fluxo de importância líquida é:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (2)$$

A variável n é o número de alternativas do problema. A ordem final das alternativas é definida por:

- a é preferível de b se: $\phi(a) > \phi(b)$;
- a é indiferente de b se: $\phi(a) = \phi(b)$.

Onde: a e b são alternativas de um conjunto A .

Diversos autores publicaram artigos sobre a aplicação do método PROMETHEE. Os pesquisadores utilizaram essa metodologia em diversas áreas, como na área de gás e petróleo, e na área de saneamento, além da área de recursos hídricos, com o objetivo de tomar a decisão de qual alternativa é a mais adequada, de acordo com a avaliação dos critérios apresentados em cada caso. (LIMA *et al.*, 2013; MORAIS e ALMEIDA, 2006; EGITO, FONTANA e MORAIS, 2015).

Lima *et al.* (2013) fizeram uma análise das alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na região Nordeste do Brasil utilizando um modelo de apoio a decisão, no caso, o método PROMETHEE II, em função de sua relevância. O estudo teve como objetivo propor alternativas de tratamento dos resíduos sólidos urbanos em forma de arranjos tecnológicos e obter uma ordenação de tais alternativas, considerando critérios econômicos, sociais e ambientais. A utilização do método obteve ótimos resultados quanto a indicar os arranjos tecnológicos mais relevantes para o tratamento em questão, além de trazer a possibilidade do uso desse método nas demais regiões brasileiras.

Na área de recursos hídricos, Morais e Almeida (2006) usaram um modelo de decisão em grupo para o gerenciamento de perdas de água, empregando o método PROMETHEE II. O método foi aplicado com base em critérios financeiros, técnicos, sociais e ambientais, definidos por quatro decisores, a fim de obter uma nova postura frente a esse processo decisório. Por meio do estudo, foi possível ilustrar bem a metodologia aplicada, observando que outros métodos poderiam ser utilizados para essa análise, possivelmente obtendo-se resultados diferentes, dependendo das características do sistema que está sendo considerado.

Egito, Fontana e Morais (2015) utilizaram uma abordagem multicriterial na área de recursos hídricos, onde selecionaram as alternativas de conservação de água no meio urbano, por meio do método PROMETHEE V. O estudo buscava a seleção das melhores alternativas que promovessem a conservação e o uso eficiente da água em centros urbanos, levando em consideração os critérios de preferência do decisor. Os resultados encontrados evidenciaram a eficácia da aplicação do método PROMETHEE em problemas de gerenciamento de recursos hídricos. Os autores também destacaram a simplicidade da aplicação e entendimento do método e a coerência dos resultados.

MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa do trabalho é a fase de estruturação do problema proposto, que se objetivou em avaliar a viabilidade da aplicação de alternativas no gerenciamento de perdas de água em sistemas de abastecimento de água de municípios de médio porte de Pernambuco, por meio de um modelo multicritério de apoio à decisão.

Com o objetivo definido, e as alternativas e os critérios estabelecidos, determinou-se a matriz de avaliação, que foi preenchida com a avaliação de uma alternativa de acordo com o seu desempenho, segundo determinado critério. Os pesos foram definidos com base na avaliação e ponderação de um grupo de especialistas na área de recursos hídricos e saneamento, selecionados com base em suas experiências nessas áreas, por meio de aplicação de questionário.

A matriz representa o grau de importância e preferência dos especialistas em relação às alternativas e critérios estabelecidos, visto que a escolha de uma alternativa mais adequada para o problema em geral é subjetiva. É importante salientar que os valores finais obtidos na matriz de avaliação foram arredondados, a fim de simplificar a utilização do método de apoio à decisão.

Portanto, na matriz das funções preferência, atribui-se o valor 0 se a alternativa for indiferente ou pior do que a outra alternativa comparada, e atribui-se 1 caso o contrário ocorra. As alternativas são classificadas de acordo com a ordem decrescente do valor aferido de seus respectivos fluxos líquidos (Φ), que são obtidos após a aplicação do método PROMETHEE II.

Para hierarquizar as ações consideradas para o controle das perdas de água, escolheu-se a função II - Quase Critério do método PROMETHEE, onde define-se o parâmetro limite de indiferença. Essa função foi escolhida pelo fato de ser a mais adequada para uma análise qualitativa da problemática. Segundo Souza (2013), no método PROMETHEE II, para cada alternativa considerada, utiliza-se o fluxo de importância líquida (Φ) para obter uma pré-classificação completa considerando que P e I representam, respectivamente, preferência e indiferença. Desta forma, por meio do PROMETHEE II pode-se obter uma hierarquização adequada, evitando-se as ocorrências de alternativas incomparáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o conjunto de alternativas estabelecidas, o próximo passo foi definir os pesos de cada critério. Para isso, tomou-se novamente a opinião do grupo de especialistas entrevistados. A seguir, serão descritos os critérios definidos, seus subcritérios e seus respectivos pesos, atribuídos com base nas entrevistas com esses especialistas:

- **Social:** representa o reflexo da implementação da alternativa dentro da sociedade ao qual será implementada. Os subcritérios adotados para esse critério são o tempo de implementação da alternativa e os possíveis danos causados à infraestrutura existente no local. O peso atribuído a esse critério foi 0,30;
- **Técnico:** visa analisar o desempenho técnico da alternativa. Os subcritérios adotados para esse critério são a viabilidade da implantação da alternativa e complexidade de sua implantação. O peso atribuído a esse critério foi 0,20;
- **Ambiental:** julga as influências e os impactos da implementação das alternativas ao meio ambiente, pela diminuição da água perdida irracionalmente. Os subcritérios adotados para esse critério são a redução do consumo de água e a redução das perdas de água. O peso atribuído a esse critério foi 0,25;
- **Econômico:** considera o custo da implantação das alternativas e avalia se esse investimento é atrativo para as empresas. Os subcritérios adotados para esse critério são o custo de implantação e o tempo de retorno dos investimentos. O peso atribuído a esse critério foi 0,25.

A matriz de avaliação (critérios *versus* alternativas) está representada na Tabela 1. Cada valor da matriz representa o desempenho de uma alternativa, com base em um critério. Vale ressaltar que a análise possui natureza qualitativa, devido ao fato de que os critérios têm caráter subjetivo, não possuindo uma escala definida para a comparação.

Portanto, as alternativas foram avaliadas segundo o critério mensurado de uma escala likert de comparações verbais, que se baseia em conceitos definidos de acordo com o nível de preferência, variando de 1 (pior desempenho) a 5 (melhor desempenho). Desta forma, é possível realizar a análise de forma simplificada e objetiva. Para facilitar a identificação das alternativas, dos critérios e subcritérios estabelecidos, foi feita uma legenda auxiliar, que pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 1: Matriz de avaliação.

Alternativas	Subcritérios							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	4	4	4	3	4	4	3	4
A2	3	2	3	3	4	5	2	4
A3	4	4	4	3	5	5	3	4

Uma matriz de funções preferência foi definida para cada critério, onde foi comparada a preferência de duas em duas alternativas, determinando uma hierarquia entre as alternativas estabelecidas, segundo um determinado subcritério. Para a montagem dessas matrizes, calculou-se o valor de $d_j(a,b)$, que é a diferença entre os desempenhos das alternativas a e b em um determinado critério j . Feito isso, comparou-se o valor obtido com o valor do limite de indiferença q , que representa um valor de indiferença entre duas alternativas. Se a diferença entre as avaliações das alternativas $d_j(a,b)$ for maior que o valor de q , existe uma preferência da alternativa a sobre a b . Para o problema em questão, o valor atribuído ao limite de indiferença q foi 0,9. As matrizes das funções preferência dos subcritérios considerados são representadas nas tabelas a seguir.

Tabela 2: Identificação das alternativas, critérios e subcritérios.

Alternativas	-	A1	Controle ativo de perdas
		A2	Gestão da infraestrutura
		A3	Gestão da pressão
Critérios e Subcritérios	Social	C1	Tempo de implementação
		C2	Danos à infraestrutura existente
	Técnico	C3	Viabilidade de implantação
		C4	Complexidade de implantação
	Ambiental	C5	Redução do consumo de água
		C6	Redução das perdas de água
	Econômico	C7	Custo de implementação
		C8	Tempo de retorno dos investimentos

No subcritério C1 (tempo de implementação), do critério social, as alternativas A1 e A3 obtiveram bons desempenhos, enquanto que a alternativa A2 obteve um desempenho médio. Consequentemente, as alternativas A1 e A3 são indiferentes entre si, e possuem preferência sobre a alternativa A2, nesse subcritério. Isso ocorre pelo fato de que o tempo que se leva para executar todas as ações e equipamentos necessários para implementar o controle ativo de perdas e a gestão da pressão ser menor do que o tempo necessário para restaurar toda a infraestrutura da rede de distribuição. A matriz das funções preferência do subcritério “tempo de implementação”, é representada na Tabela 3.

Tabela 3: Matriz de funções preferência do subcritério C1 (tempo de implementação).

	A1	A2	A3
A1	-	1	0
A2	0	-	0
A3	0	1	-

No subcritério C2 (danos à infraestrutura existente), do critério social, as alternativas A1 e A3 obtiveram bons desempenhos, enquanto que a alternativa A2 obteve um desempenho ruim. Consequentemente, as alternativas A1 e A3 são indiferentes entre si, e possuem preferência sobre a alternativa A2, nesse subcritério. A matriz das funções preferência do subcritério “danos à infraestrutura existente” é representada na Tabela 4.

Os equipamentos utilizados para o controle ativo das perdas e a gestão da pressão da rede de distribuição não causam tantos danos à infraestrutura existente no local. Entretanto, a reparação da rede de distribuição pela gestão de sua infraestrutura causa muitos danos ao local onde está instalada, além dos transtornos causados à população local.

Tabela 4: Matriz de funções preferência do subcritério C2 (danos à infraestrutura).

	A1	A2	A3
A1	-	1	0
A2	0	-	0
A3	0	1	-

No subcritério C3 (viabilidade de implantação), do critério técnico, as alternativas A1 e A3 obtiveram bons desempenhos, enquanto que a alternativa A2 obteve um desempenho médio. Consequentemente, as alternativas A1 e A3 são indiferentes entre si, e possuem preferência sobre a alternativa A2, nesse subcritério. A matriz das funções preferência do subcritério “viabilidade de implantação” é representada na Tabela 5.

O controle ativo de perdas e a gestão da pressão são alternativas mais viáveis para a gestão das perdas, pelo fato de serem ações que utilizam equipamentos mais fáceis de serem manejados e implementados, como os sensores sonoros (controle ativo de perdas) e as válvulas de retenção (gestão da pressão) instalados em pontos da rede. Diferentemente das outras alternativas, a gestão da infraestrutura é menos viável nesse subcritério, por envolver maquinário pesado para sua implementação.

Tabela 5: Matriz de funções preferência do subcritério C3 (viabilidade de implantação).

	A1	A2	A3
A1	-	1	0
A2	0	-	0
A3	0	1	-

No subcritério C4 (complexidade de implantação), do critério técnico, as três alternativas obtiveram desempenhos médios. Consequentemente, as alternativas são indiferentes entre si. Sendo assim, nenhuma delas possui preferência sobre a outra, nesse subcritério. Isso significa que as três alternativas de gestão de perdas de água possuem uma certa complexidade para serem implantadas. A matriz das funções preferência do subcritério “complexidade de implantação” é representada na Tabela 6.

Tabela 6: Matriz de funções preferência do subcritério C4 (complexidade de implantação).

	A1	A2	A3
A1	-	0	0
A2	0	-	0
A3	0	0	-

No subcritério C5 (redução do consumo de água), do critério ambiental, as alternativas A1 e A2 obtiveram bons desempenhos, enquanto que a alternativa A3 obteve um ótimo desempenho. Consequentemente, as alternativas A1 e A2 são indiferentes entre si, e a alternativa A2 possui preferência sobre as demais, nesse subcritério.

A matriz das funções preferência do subcritério “redução do consumo de água”, é representada na Tabela 7. A redução do consumo de água causada pelo controle ativo de perdas e pela gestão da infraestrutura é notável, mas não tão eficientes quanto a redução causada pela gestão da pressão, como pode ser analisado pela opinião dos especialistas.

Tabela 7: Matriz de funções preferência do subcritério C5 (redução do consumo de água).

	A1	A2	A3
A1	-	0	0
A2	0	-	0
A3	1	1	-

No subcritério C6 (redução das perdas de água), do critério ambiental, as alternativas A2 e A3 obtiveram ótimos desempenhos, enquanto que a alternativa A1 obteve um desempenho bom. Consequentemente, as alternativas A2 e A3 são indiferentes entre si, e possuem preferência sobre a alternativa A1, nesse subcritério. A matriz das funções preferência do subcritério “redução das perdas de água”, é representada na Tabela 8.

A redução das perdas de água causada pelo controle ativo de perdas é eminente, mas a redução causada pela gestão da infraestrutura e pela gestão da pressão é ainda maior. Muita água é perdida por meio de vazamentos na rede de distribuição, causados pelo estado estrutural dela. Quando a rede é restaurada, evita-se a perda de toda essa água.

Com relação a gestão da pressão, segundo Silva *et al.* (2003), há uma correlação entre a redução da pressão e a redução das perdas em uma rede de distribuição. Quanto mais a redução da pressão, maior a redução das perdas, indicando que essa alternativa é excelente no subcritério analisado.

Tabela 8: Matriz de funções preferência do subcritério C6 (redução das perdas de água).

	A1	A2	A3
A1	-	0	0
A2	1	-	0
A3	1	0	-

No subcritério C7 (custo de implementação), do critério econômico, as alternativas A1 e A3 obtiveram desempenhos médios, enquanto que a alternativa A2 obteve um desempenho ruim. Consequentemente, as alternativas A1 e A3 são indiferentes entre si, e possuem preferência sobre a alternativa A2, nesse subcritério. A matriz das funções preferência do subcritério “custo de implementação”, é representada na Tabela 9.

Todas as alternativas tem um custo de implementação considerável. Com relação à gestão da pressão e ao controle ativo das perdas, esse custo se dá pelos equipamentos peculiares que são usados, e pela mão-de-obra especializada necessária para o use desses equipamentos. No caso da gestão da infraestrutura, essa alternativa demanda um custo ainda maior, devido ao fato de haver um grande custo com o maquinário utilizado, e também com a reparação dos danos causados à infraestrutura existente no local, apesar da mão-de-obra necessária ser mais barata.

Tabela 9: Matriz de funções preferência do subcritério C7 (custo de implementação).

	A1	A2	A3
A1	-	1	0
A2	0	-	0
A3	0	1	-

No subcritério C8 (tempo de retorno dos investimentos), do critério econômico, as três alternativas obtiveram bons desempenhos. Consequentemente, as alternativas são indiferentes entre si. Sendo assim, nenhuma delas possui preferência sobre a outra, nesse subcritério. Isso significa que as três alternativas de gestão de perdas de água possuem um tempo de retorno dos investimentos parecidos. A matriz das funções preferência do subcritério “tempo de retorno dos investimentos” é representada na Tabela 10.

Tabela 10: Matriz de funções preferência do subcritério C8 (tempo de retorno dos investimentos).

	A1	A2	A3
A1	-	0	0
A2	0	-	0
A3	0	0	-

A matriz dos graus de sobreclassificação, representada pela Tabela 11, contém o grau de sobreclassificação entre todos os possíveis pares de alternativas comparadas. A soma dos pesos relativos obtidos dos critérios é igual a 1. Por exemplo, o cálculo do grau de sobreclassificação $\pi(A1, A2)$ da alternativa A1 sobre a alternativa A2, resultando num valor de 0,525.

Tabela 11: Matriz dos graus de sobreclassificação.

	A1	A2	A3
A1	-	0,525	0
A2	0,125	-	0
A3	0,25	0,65	-

A matriz do índice de preferência contém os fluxos das alternativas estabelecidas calculados pelo método PROMETHEE II. Pode ser visto na Tabela 12 o resultado final da hierarquização das alternativas. Por exemplo, os fluxos de saída (Φ^+) e de entrada (Φ^-), e o fluxo líquido (Φ) da alternativa A1 calculados resultaram, respectivamente, em 0,2625, 0,1875 e 0,08.

Tabela 12: Matriz do índice de preferência (fluxos).

	Φ^+	Φ^-	Φ
A1	0,2625	0,1875	0,08
A2	0,0625	0,5875	-0,53
A3	0,45	0	0,45

Em síntese, a aplicação do método PROMETHEE II resultou em um ranking das alternativas estabelecidas, que pode ser visto na Tabela 13. A gestão da pressão (A3) obteve o melhor desempenho, por ter o maior valor aferido dentre os fluxos líquidos calculados, sendo $\Phi(A3)$ igual a 0,45. Esta alternativa foi bem avaliada nos quatro critérios. Segundo a opinião do grupo de especialistas, esta alternativa possui ótimo desempenho no critério ambiental, além de ter obtido boa avaliação nos critérios técnico, econômico e principalmente no social, que é o critério com maior peso, levando-a a ser a melhor alternativa a ser implementada.

Tabela 13: Resultado da aplicação do método.

Ranking	Alternativa	
1º	A3	Gestão da pressão
2º	A1	Controle ativo de perdas
3º	A2	Gestão da infraestrutura

A gestão da infraestrutura (A2) obteve o pior desempenho, pois, apesar do bom desempenho na redução de perdas de água – critério ambiental, não possuiu bom desempenho nos demais critérios, com ênfase no seu alto custo de implementação e nos grandes danos que são causados à infraestrutura local, como danos ao pavimento do local, interferindo na rotina da comunidade, este que é um subcritério do critério social, que possui o maior grau de importância dentre os demais.

Apesar de obter um bom desempenho em quase todos os subcritérios avaliados, o controle ativo de perdas (A1) obteve um desempenho praticamente neutro com relação às demais alternativas, apresentando um valor de fluxo líquido $\Phi(A1)$ levemente acima de zero. É importante que seja considerado que esta alternativa possui, ainda segundo a opinião do grupo de especialistas, um custo considerável de implantação e complexidade no uso de alguns equipamentos para sua implantação.

Por fim, a análise de sensibilidade foi realizada para verificar a consistência do modelo adotado, e para observar seu comportamento diante de possíveis variações, principalmente nos pesos atribuídos. Uma análise de sensibilidade procura determinar mudanças que podem ocorrer devido ao efeito da variação de um determinado fator relevante ao problema. Essa análise é importante para determinar se o resultado alcançado é sólido. Uma variação nos pesos atribuídos aos critérios foi feita, e notou-se que não houve mudanças significativas no ranking aferido.

Para uma análise mais abrangente dos resultados, é fundamental ser feita uma discussão com outros trabalhos que utilizem o método PROMETHEE, para avaliar quais são as melhores alternativas para a redução de perdas de água em sistemas de abastecimento de água de cidades de médio porte de Pernambuco.

CONCLUSÕES

Determinar qual é a melhor ação para problemas complexos e subjetivos pode ser uma tarefa difícil, principalmente quando os especialistas no assunto não conseguem convergir para um consenso. Após a modelagem do problema, onde foram estabelecidos os critérios e as ações, o método de sobreclassificação PROMETHEE II foi uma importante ferramenta para o auxílio da tomada de decisão.

Com a ferramenta PROMETHEE, foi possível determinar a melhor alternativa para minimizar as perdas de água em sistemas de abastecimento de água localizados no interior de Pernambuco, tornando possível compreender quais elementos direcionam a classificação das alternativas propostas. Além disso, o método se mostrou bastante eficiente ao unificar a opinião do grupo de especialistas, obtendo a opção “gestão de pressão” como a melhor alternativa para o controle de perdas de água.

Como recomendação para futuras pesquisas, a fim de se obter melhores resultados, deve-se avaliar outras alternativas e critérios e, por fim, implementar de fato as soluções aferidas para o gerenciamento das perdas de água em sistemas de abastecimento de água, reduzindo os seus altos índices.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALEGRE, H.; COELHO, S. T.; ALMEIDA, M. C.; VIEIRA, P. Controlo de perdas de água em sistemas de adução e distribuição. IRAR, Lisboa. 2005.
2. ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão. Editora Universitária. 2003.
3. BEZERRA, S. D. T. M.; CHEUNG, P. B. Perdas de água: Tecnologia de controle. 1a. ed. João Pessoa: UFPB, 2013.
4. BRANS, J. P.; VINCKE, P. A preference ranking organization method (The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making). Management Science, v. 31, p. 647-656, 1985.
5. EGITO, T. B.; FONTANA, M. E.; MORAIS, D. C. Seleção de alternativas de conservação de água no meio urbano utilizando abordagem multicritério. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 19, p. 209-221, 2015.
6. GALVÁN, X. V. D. Aplicación del método de jerarquías analíticas (AHP) a la gestión de pérdidas de agua en redes de abastecimiento. 242p. Tesis doctoral - Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. 2011.
7. LIMA, J.D.; JUCÁ, J.F.T.; NÓBREGA, C.C.; MARIANO, M.O. H.; JUNIOR, F.H. C.; LIMA, M. T. C. D. Modelo de apoio à decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na região nordeste do Brasil. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica, v. 6, n. 3, p. 11-28, 2013.
8. MIRANDA, E. C. Avaliação de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água – Indicadores de Perdas de Metodologias para Análise de Confiabilidade. 130p. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília. 2002.
9. MORAIS, D.C.; ALMEIDA, A.T. Modelo de Decisão em Grupo para Gerenciar Perdas de Água. Pesquisa Operacional, v. 26, p. 567-584, 2006.
10. SILVA, B. O. C.; MONTEIRO, C. O.; TORRES, C. G. V.; SHINZATO, E.; MOKARZEL, F. C.; GUIBOSHI, M.; PELLEGRINI, T. C. Controle de perdas de água em sistemas de distribuição. 14p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia Hidráulica e Sanitária. 2003.

11. SNIS. Sistema nacional de informações sobre saneamento. SNIS, 2016. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2016>>. Acesso em: 04 de junho de 2018.
12. SOUZA, A. C. Otimização Hidroenergética da Operação de Sistemas de Distribuição de Água. 131p. Dissertação em Engenharia do Meio Ambiente. Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás – UFG. Goiânia. 2013.
13. VINCKE, P. Multicriteria Decision-Aid. John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 0-471-93184-5, 1992.