



AVALIAÇÃO DE AÇÕES DIRECIONADAS À GESTÃO EFICIENTE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

**Andreia Azevedo Abrantes de Oliveira¹, Sabrina da Silva Corrêa¹,
Maísa Mendonça Silva¹ e Saulo de Tarso Marques Bezerra^{1*}**

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Av. Marielle Franco, Km 59, Nova Caruaru,
Caruaru, Pernambuco, Brasil, CEP 55014-900

¹ *saulo.tarso@ufpe.br*

RESUMO

Tendo em vista o cenário atual de escassez de água, e a busca pelo aumento da eficiência das empresas de saneamento, se faz necessária, além de outras ações, a tarefa de redução das perdas de água dos sistemas de abastecimento. A gestão eficiente desses sistemas envolve a participação de diferentes setores da empresa que, normalmente, lidam com escolhas de diretrizes conflitantes. As estratégias disponíveis incluem uma gama de ações para a minimização das perdas de água, o que transforma o processo decisório dos gestores em uma tarefa complexa. Desta forma, o estudo tem como objetivo avaliar ações direcionadas à gestão eficiente de sistemas de distribuição de água, aplicando o método DS/AHP para a agregação de evidências de membros individuais de um grupo de tomada de decisão. Os resultados evidenciaram a implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais. Conclui-se que o estudo apresentou simplicidade em seu processo, e conseguiu elucidar de forma clara a implementação de valores de preferência dos critérios, como também os julgamentos dos especialistas para a classificação das alternativas.

Palavras-Chave

Abastecimento de água, perdas de água, tomada de decisão.

1. INTRODUÇÃO

Numerosos centros urbanos no mundo lidam com problemáticas relacionadas ao abastecimento de água. Cenários atuais de mudanças globais, como crescente urbanização, alterações climáticas e crescimento populacional, estão reduzindo os recursos naturais disponíveis. A probabilidade de agravamento da situação é ampliada pela alta taxa de deterioração da infraestrutura dos sistemas de água e deficiência operacional.

No Brasil, a implantação e ampliação dos sistemas de abastecimento de água, aumentando assim a oferta de água, é a solução tradicional frente ao problema do aumento da demanda. No entanto, os altos índices de perdas de água do país apontam para a necessidade da

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

melhoria dos sistemas. O controle das perdas de água é um dos maiores desafios das concessionárias e uma questão relevante na gestão de recursos hídricos, necessitando de estratégias eficientes para combater suas causas e os fatores que a influenciam.

Para o controle das perdas, em muitos casos, não é suficiente escolher apenas uma alternativa, muito menos utilizar todas as disponíveis, devido às restrições, muitas vezes de cunho financeiro. Com isso, para avaliar quais alternativas adotar, é importante pesquisar ferramentas que as avaliarão de acordo com as necessidades das empresas [1]. Observa-se, na prática, uma dificuldade relativamente acentuada ao tentar encontrar e priorizar alternativas ideais para a gestão eficiente dos sistemas. Isso se dá pelo fato de haver diversos atores com visões, em alguns casos, distintas e/ou conflitantes, representando vários setores, dentro ou fora de uma empresa de saneamento, que são partes interessadas e detentoras de conhecimento sobre o problema. Com efeito, cada especialista aponta diferentes conclusões e objetivos específicos e se faz necessária uma metodologia capaz de avaliar as possíveis ações através de múltiplos critérios conflitantes já definidos, de forma a ponderar cada alternativa através dos seus vários pontos de vista.

Diante do exposto, esta pesquisa optou pela aplicação do método DS/AHP [2], que é a incorporação do método Dempster Shafer (DS) ao Processo Analítico Hierárquico (AHP), para avaliar ações direcionadas à gestão eficiente de sistemas de distribuição de água. Este método traz como principal benefício a inclusão de medidas de incerteza e ignorância, que se relacionam com os julgamentos realizados pelos especialistas.

2. METODOLOGIA

2.1 DETERMINAÇÃO DOS CRITÉRIOS E ALTERNATIVAS

Como primeira etapa do trabalho, tem-se a fase de determinação dos critérios e alternativas (DAs). Essa consiste em avaliar quais as alternativas a serem hierarquizadas e quais os critérios preponderantes na análise, por meio de um método de apoio à decisão que avalia a viabilidade de ações direcionadas à gestão eficiente de sistemas de distribuição de água.

Beneficiando-se da pesquisa bibliográfica recente sobre a problemática em questão, os critérios e alternativas adotados na pesquisa foram: redução das perdas reais (C1); redução das perdas aparentes (C2); facilidade de implantação das alternativas (C3); transtorno para a população (C4); menor custo de implementação (C5); aumento de receita da empresa (C6). as alternativas são: controle ativo de vazamentos (A1); controle passivo de vazamentos (A2); gestão de pressão (A3); fiscalização contra fraudes (A4); campanha educativa contra fraudes (A5); implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais (A6); implantação de hidrômetros em áreas em situação de vulnerabilidade (A7); reabilitação de redes de distribuição de água (A8); reparo ou substituição de instalações e/ou tubulações das redes de distribuição de água; reaproveitamento de água de lavagem das ETA (A9); automação (A10).

2.2 ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA

A estrutura hierárquica do problema consiste em quatro níveis; no nível central, encontra-se o objetivo geral da problemática. No segundo nível, indicados por g_n , são apresentados os tomadores de decisão (DMs) que estabelecem julgamentos individuais sobre o problema em

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

questão. Os critérios de avaliação se encontram no terceiro nível, representados por c_n , já com seus respectivos Valores de Prioridade dos Critérios (VPC) associados (escolhidos pelos DMs), sendo usados na avaliação e diferenciação dos desempenhos das alternativas de decisão em termos de atingir o objetivo geral. O quarto e último nível consistem nas DAs, separadas por critério, e representadas por A_n . As DAs estão agrupadas entre si pelo valor da escala de preferência associado, escolhidas pelo DM.

Para auxiliar na escolha das melhores ações direcionadas à gestão, foi selecionado especialistas com experiência profissional na área, seja essa acadêmica ou técnica. Com isso, três indivíduos foram convidados para fazer julgamentos sobre as ações, os considerados tomadores de decisão, sendo esses: dois engenheiros, gestores em empresas de abastecimento de água (g_1 e g_2); e um professor doutor e engenheiro civil especialista em perdas de água e sistemas de abastecimento (g_3). Cada especialista aplicou seu conhecimento sobre cada critério, atribuindo valores de VPC que vão de 0 até 1. As etapas gerais do procedimento são explicadas a seguir:

Etapa 1 – Aplicação de questionários a três experts. O questionário foi formulado para que a opinião do especialista fosse dada em termos linguísticos (Quadro 1). A avaliação realizada corresponde ao grau de viabilidade de cada alternativa em relação a todas as demais alternativas, para cada critério.

Quadro 1 – Grau de viabilidade de cada alternativa em relação às demais.

Valor linguístico	Valor numérico
A alternativa possui viabilidade inferior às demais	0
A alternativa possui viabilidade pouco superior às demais	1
	2
	3
A alternativa possui viabilidade superior às demais	4
	5
	6
A alternativa possui viabilidade extremamente superior	7

Etapa 2 – Realização da análise DS/AHP sobre os julgamentos de cada indivíduo. Para os critérios com VPC positivos, GAs são formados, sendo a preferência entre esses, percebida através da escolha do valor de escala positivo. Cada julgamento é considerado uma crença exata, e para cada critério se tem a construção de um corpo de evidência (BOE), estando associado a esse os conjuntos de alternativas com seus respectivos julgamentos de preferência e seu VPC associado.

Os GAs foram escolhidos pelos DMs em cada critério, chamados inicialmente de elementos focais. Após o cálculo, os valores de BPA representaram os níveis de crença exata nas preferências dos elementos focais. O BPA $m(\Theta)$ dado a Θ foi interpretado como um nível de ignorância, já que esse peso de evidência não é um discernível entre as hipóteses. Em um único critério, os d elementos focais (GAs) S_1, S_2, \dots, S_d foram identificados e os valores de

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

escala foram a_1, a_2, \dots, a_d , respectivamente, o BOE (denotado por $m(\cdot)$) associado ao critério foi definido pelas Eq. (1) e (2):

$$m(S_i) = \frac{a_i p}{\sum_{j=1}^d a_j p + \sqrt{d}}, \quad i = 1, 2, \dots, d \quad (1)$$

$$m(\Theta) = \frac{\sqrt{d}}{\sum_{j=1}^d a_j p + \sqrt{d}} \quad (2)$$

Onde Θ é o quadro de discernimento com o conjunto de alternativas consideradas no critério, p é o VPC associado, e o $m(\Theta)$ define o nível local de ignorância naquele critério.

Etapa 3 – Determinação do BOE associado aos julgamentos feitos pelo especialista g_n sobre os diferentes critérios, de forma a se obter um BOE total de cada especialista. Com isso, lança-se mão da Regra da Combinação de Dempster (RCD) a qual permite a combinação de evidências independentes. A combinação de evidências de dois BOE m_1 e m_2 para uma proposição x foi definida por Beynon et al. [3] através da Eq. (3):

$$[m_1 \oplus m_2](x) = \begin{cases} 0, & x = \emptyset \\ \frac{\sum_{s_1 \cap s_2 = x} m_1(s_1) m_2(s_2)}{1 - \sum_{s_1 \cap s_2 = \emptyset} m_1(s_1) m_2(s_2)}, & x \neq \emptyset \end{cases} \quad (3)$$

Onde s_1 e s_2 são elementos focais associados ao BOE $m_1(\cdot)$ e $m_2(\cdot)$, respectivamente. A partir da existência de múltiplos critérios, é necessário a combinação entre eles, de forma que, a combinação de dois BOE, resulta em outro BOE, fruto dessa combinação.

Etapa 4 – Nesta etapa foi combinado as evidências de todos os especialistas para formar a decisão final do grupo. A regra da combinação de Dempster é novamente utilizada e combina os BOE individuais de cada especialista, resultando no grupo BOE definido por $m_g^T(\cdot)$. Cada valor de BPA $m_g^T(\cdot)$ indica o nível de crença exata de que o grupo associado de alternativas inclui as melhores DAs [2].

Etapa 5 – Para o ranking e identificação das melhores alternativas, as medidas de crença e plausibilidade foram utilizadas [Eq. (4) e (5)]. Os grupos de alternativas considerados os melhores, serão aqueles com os maiores valores de Pls associados.

- Se $[Bel(x), Pls(x)] = [0,0]$, não há evidências para apoiar a alternativa de decisão x .
- Se $[Bel(x), Pls(x)] = [0,6;0,9]$, a probabilidade de suporte exato para x é 0,6; e a probabilidade máxima possível para x é 0,9; isto é, existe uma probabilidade de 0,1 de x não ocorrer.

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (4)$$

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

$$Pls(A) = \sum_{A \cap B = \emptyset} m(B) \quad (5)$$

Etapa 6 – Para a apresentação das DAs em forma de ranking, agregou-se a está metodologia a transformação pignística, que serve para auxiliar em problemas de tomada de decisão que usam DST [4]. A função de probabilidade pignística BetP. Eq. (6) distribuiu de forma igual cada massa $m(A)$ entre as afirmações que compõem A. A BetP representa o valor total da massa que A pode transportar e pode ser vista como um compromisso de aposta com A [5-6].

$$BetP(A) = \sum_{B \subseteq \theta} m(B) \times \left(\frac{|A \cap B|}{|B|} \right) \quad (6)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para aplicação do método DS/AHP, os especialistas atribuíram um grau de viabilidade de cada alternativa com relação às demais, para cada critério, através de uma escala linguística. Adicionalmente, cada entrevistado atribuiu seu valor de prioridade do critério entre 0 e 1, tendo como somatório final a unidade, como pode ser visto no Quadro 2. A atribuição de VPCs apenas positivos, demonstrou total conhecimento e domínio do tema por parte dos especialistas, de forma a demandar consideração adicional com relação às DAs.

Quadro 2 – Valores de prioridade dos critérios para cada DM.

Especialista → Crítérios ↓	DM 1	DM 2	DM 3
Redução das perdas reais (C1)	0,30	0,25	0,20
Redução das perdas aparentes (C2)	0,20	0,25	0,20
Facilidade de implantação (C3)	0,10	0,10	0,10
Transtorno para a população (C4)	0,10	0,05	0,10
Menor custo (C5)	0,15	0,15	0,20
Aumento de receita (C6)	0,15	0,20	0,20

No Quadro 2, é possível observar que, os critérios técnicos-ambientais “redução das perdas reais” (C1) e “aparentes” (C2), e os critérios de cunho econômico “menor custo” (C5) e “aumento de receita” (C6), foram os preferidos pelos especialistas em relação aos critérios de caráter social, como o “transtorno a população” (C4). O DM1, DM2 e DM 3 atribuíram VPCs aos critérios de forma independente e dessa forma, o que é natural, geraram VPCs diferentes um dos outros. Para todos os decisores, os principais critérios obtiveram a ordem técnico-ambiental > econômicos > sociais.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Os maiores VPCs foram atribuídos, de forma unânime, aos critérios redução de perdas reais e redução de perdas aparentes, nesta ordem. Essa atribuição demonstra o caráter prioritário e urgente do combate às elevadas perdas de água em sistemas de distribuição. Os critérios de cunho econômico, menor custo e aumento de receita, também se valeram de atribuições relevantes, demonstrando a importância da ponderação nas escolhas das alternativas, de forma que os especialistas também acham importante o menor custo associado e aumento da receita da empresa. O critério transtorno para a população recebeu o menor destaque dentre todos, de forma que o critério social não desponta como fator decisivo na escolha de ações/alternativas para a gestão eficiente de sistemas de distribuição de água. O ranking individual de cada DM das alternativas para gestão eficiente dos sistemas é apresentado no Quadro 3.

Observa-se, no Quadro 3, que nenhum dos DMs considerou a mesma alternativa como a melhor. Notou-se que as alternativas, “campanha educativa contra fraudes”, “implantação e substituição de hidrômetros em áreas residenciais” e “automação” (A5, A6 e A10) respectivamente, são prioritárias, para os três DMs, ou seja, as únicas que estão presentes para os três especialistas acima da sexta posição.

Quadro 3 – Ranking individual das alternativas para gestão eficiente de sistemas de distribuição de água

Decisor → Ranking ↓	DM1	DM2	DM3
1	A10	A6	A3
2	A4	A5	A5
3	A7	A3	A10
4	A6	A4	A6
5	A5	A7	A1
6	A1	A10	A9
7	A3	A8	A2
8	A8	A1	A4
9	A2	A9	A8
10	A9	A2	A7

É notória a preferência por alternativas frequentemente usadas para o controle das perdas aparentes entre as melhores alternativas. Isso demonstra a necessidade das empresas gestoras de voltar sua atenção para o controle das perdas financeiras, visando o consequente aumento de sua receita. Incrementado a essas, alternativas de gestão de pressão e controle ativo de vazamento evidenciam o necessário controle sobre a operação da rede e ao abastecimento eficiente.

O ranking final é apresentado no Quadro 4, onde se observa que a “implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais” é a ação mais indicada. A importância da implantação e substituição de hidrômetros é comprovada, sendo frequentemente utilizada como alternativa para gestão de perdas de água em sistemas de distribuição de água [1; 7].

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

No dia a dia das companhias brasileiras, esta é uma das primeiras ações adotadas pelos gestores, pois é disseminado no meio técnico que esta possui um baixo tempo de retorno do investimento.

Quadro 4 – Ranking das alternativas para gestão eficiente de sistemas de distribuição de água.

Ranking	Alternativa	BetP(A)
1	{A6}: Implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais	0,226
2	{A10}: Automação	0,159
3	{A5}: Campanha educativa contra fraudes	0,158
4	{A4}: Fiscalização contra fraudes	0,139
5	{A3}: Gestão de pressão	0,121
6	{A7}: Implantação de hidrômetros em áreas em situação de vulnerabilidade	0,070
7	{A1}: Controle ativo de vazamentos	0,061
8	{A8}: Reabilitação de redes de distribuição de água	0,027
9	{A2}: Controle passivo de vazamentos	0,021
10	{A9}: Reaproveitamento de água de lavagem das ETA	0,018

4. CONCLUSÃO

Visando à gestão eficiente de sistemas de distribuição de água, este trabalho fez uso de um método multicritério para apoiar a tomada de decisão de um grupo de especialistas, que possuem objetivos específicos e divergentes mediante o problema. A abordagem foi lançada de forma genérica, não sendo específica para um estudo de caso, envolvendo opiniões de especialistas brasileiros da área, dessa forma, os resultados refletirão a imagem e necessidades de países em desenvolvimento.

A metodologia aplicada apresentou simplicidade em seu processo, e conseguiu elucidar de forma clara a implementação de valores de preferência dos critérios, como também os julgamentos dos especialistas para a classificação das alternativas. O DS/AHP incorporou em sua estrutura a noção de ignorância e incerteza. Ao comparar um grupo de alternativas com o quadro de discernimento, o especialista expressou algum grau de conhecimento sobre cada um desses grupos, o que diverge do AHP, que faz comparações pareadas entre cada alternativa.

Por fim, conclui-se que o estudo apresentou simplicidade em seu processo, e conseguiu elucidar de forma clara a implementação de valores de preferência dos critérios, como também os julgamentos dos especialistas para a classificação de alternativas direcionadas à gestão eficiente de sistemas de distribuição de água.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) (Brasil) [processo IBPG-0244-3.01/18], do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) (Brasil) [processo nº 420012/2021-4, processo nº 308202/2022-8], e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Brasil) [processo nº 88882.380441/2019-01, Código Financeiro 001].

REFERÊNCIAS

- [1] M. E. Fontana, D. C. Morais, “Decision model to control water losses in distribution networks”, *Production*, vol. 26, no. 4, 2016, pp. 688-697.
- [2] M. J. Beynon, “A method of aggregation in DS/AHP for group decision-making with the non-equivalent importance of individuals in the group”, *Computer & Operations Research*, vol. 32, 2005, pp. 1881-1896.
- [3] M. Beynon, B. Curry, P. Morgan, “The Dempster-Shafer theory of evidence: an alternative approach to multicriteria decision modelling”, *Omega*, vol. 28, 2000, pp. 37-50.
- [4] L. G. O. Silva, A. T. Almeida-Filho, “A multicriteria approach for Analysis of conflicts in evidence Theory”, *Information Sciences*, vol. 346-347, 2016, pp. 275-285.
- [5] P. Smets, R. Kennes, “The transferable belief model”, *Artificial Intelligence*, vol. 66, 1994, pp. 191-234.
- [6] M. M. Silva, K. W. Hipel, D. M. Kilgour, A. P. C. S. Costa, “Strategic analysis of a regulatory conflict using Dempster-Shafer Theory and AHP for preference elicitation”, *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, vol. 28, 2019, pp. 1-19.
- [7] D. C. Morais, “Modelagem multicritério em grupo para planejamento estratégico do controle de perdas no abastecimento de água”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Recife 2006.