



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANDREIA AZEVEDO ABRANTES DE OLIVEIRA

**MODELO MULTICRITÉRIO PARA HIERARQUIZAÇÃO DE AÇÕES
DIRECIONADAS À GESTÃO EFICIENTE DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Caruaru

2020

ANDREIA AZEVEDO ABRANTES DE OLIVEIRA

**MODELO MULTICRITÉRIO PARA HIERARQUIZAÇÃO DE AÇÕES
DIRECIONADAS À GESTÃO EFICIENTE DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra.

Coorientadora: Profa. Dra. Maisa Mendonça Silva.

Caruaru

2020

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

O48m Oliveira, Andreia Azevedo Abrantes de.
Modelo multicritério para hierarquização de ações direcionadas à gestão eficiente de sistemas de distribuição de água. / Andreia Azevedo Abrantes de Oliveira. – 2020.
104 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Saulo de Tarso Marques Bezerra.
Coorientadora: Maísa Mendonça Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2020.
Inclui Referências.

1. Abastecimento de água. 2. Água - Desperdício. 3. Processo decisório por critério múltiplo. 4. Evidência. 5. Análise hierárquica (Psicologia). I. Bezerra, Saulo de Tarso Marques (Orientador). II. Silva, Maísa Mendonça (Coorientadora). III. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2020-084)

ANDREIA AZEVEDO ABRANTES DE OLIVEIRA

**MODELO MULTICRITÉRIO PARA HIERARQUIZAÇÃO DE AÇÕES
DIRECIONADAS À GESTÃO EFICIENTE DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 03 / 08 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Maisa Mendonça Silva (Coorientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Almir Cirilo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Lucimário Gois de Oliveira Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho a José, meus pais (Robson e Dalva) e irmãos (Rafaela, Pedro e Arthur), pelo amor, zelo, compreensão, incentivo, e acima de tudo, por compartilhar os bons e maus momentos dessa jornada (a vida).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela sua infinita bondade e amor, pelos seus braços zelosos que nunca desistiram de me reerguer nos momentos de dificuldade. Neste fechamento de ciclo minha inteira gratidão a Ele.

Aos meus pais, Robson e Dalva, entrego este trabalho como prova da gratidão por todo esforço que fizeram para me trazer até aqui, por todo apoio e compreensão. Vocês são meus exemplos. À minha irmã, Rafaela, por ser suporte e conselheira quando mais precisei, e por ser esse exemplo de dedicação que me faz querer ser melhor a cada dia. Aos meus irmãos, Pedro e Arthur, pela presença fundamental na minha vida. Vocês são tudo para mim, amo vocês.

Ao meu namorado, melhor amigo, companheiro de vida e conselheiro, José Venâncio, também dedico este trabalho. Agradeço pela compreensão, paciência, desprendimento, ajuda indispensável, colo e amor para que este ciclo chegasse ao fim. Você, mais do que ninguém sabe tudo que senti e passei para chegar até aqui, que essa parceria seja para toda vida. Amo você.

As minhas amigas Sabrina, Júlia e Thaise por todo apoio, incentivos, compartilhamento de experiências e torcida para a conclusão deste trabalho e para o fechamento deste ciclo. Obrigada por caminharem comigo. Vocês nem imaginam o quão melhor e mais frutífero esse caminho se tornou por causa de vocês. Vocês são essenciais para mim.

Ao professor, Saulo de Tarso, meu orientador, por desde sempre me acolher e acreditar no meu trabalho, sempre extraindo o melhor de mim, por toda sua dedicação, paciência, amizade e exemplo.

À professora Maisa, coorientadora deste trabalho, por suas indispensáveis contribuições, cujo entusiasmo e excelência são motivadores para mim. Obrigada pela forma de me tratar e toda a atenção.

À Universidade Federal de Pernambuco, por ser minha segunda casa, desde a graduação testemunhando meus passos, amadurecimento, medos e vitórias.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental e a todos os professores e funcionários, por proporcionarem tanto aprendizado e apoio.

À FACEPE pela bolsa de mestrado concedida, e por todo incentivo imprescindíveis para a conclusão desta pesquisa. Meu muito obrigado.

E por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta etapa da minha vida.

Somos livres. A vida precisa das nossas escolhas. A liberdade não é propriamente um direito que usamos como quem usa um chapéu panamá quando quer; a liberdade é uma sina. Somos condenados às nossas escolhas, condenados a ser livres. (BARROS FILHO; KARNAL, 2016, p. 28).

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, necessitando assim, de um procedimento estruturado para o conflito de escolha. Desta forma, o estudo tem como objetivo indicar e avaliar a viabilidade das principais ações para a gestão eficiente dos sistemas de abastecimento de água, aplicando o método DS/AHP para a agregação de evidências de membros individuais de um grupo de tomada de decisão. O DS/AHP é um método de tomada de decisão multicritério baseado na *Dempster-Shafer Theory* e no Processo Analítico Hierárquico. Os resultados da análise foram obtidos em grupos de alternativas e em rankings – este último obtido por meio da transformação pignística - deixando em evidência as alternativas: implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais, campanha educativa contra fraude e automação. O estudo possibilitou a análise da incerteza envolvida no processo decisório e enfatizou a aplicação bem-sucedida na agregação de opiniões de especialistas do método DS/AHP para problemas complexos. Dessa forma, vislumbra-se a importante contribuição que a estrutura desenvolvida pode agregar às políticas de gerenciamento dos sistemas de distribuição de água, prevendo o benefício para os mais variados segmentos envolvidos nessa problemática.

Palavras-chave: Sistemas de abastecimento de água. Perdas de água. Tomada de decisão. Dempster-Shafer Theory. AHP.

ABSTRACT

Given the current water scarcity scenario and the search for increasing the efficiency of sanitation companies, it is necessary, in addition to other actions, the task of reducing water losses from supply systems. The efficient management of these systems involves the participation of different sectors of the company, which normally deal with conflicting policy choices. The available strategies include a range of actions to minimize water losses, which turns the decision-making process of managers into a complex task, thus requiring a structured procedure for the conflict of choice. Hence, the study aims to indicate and evaluate the feasibility of the main actions for the efficient management of water supply systems, applying the DS/AHP method to aggregate evidence from individual members of a decision-making group. DS/AHP is a multi-criteria decision-making method based on the Dempster-Shafer Theory and the Analytical Hierarchical Process. The analysis results were obtained in groups of alternatives and rankings – the latter obtained by means of pignistic transformation - highlighting the alternatives: implantation or replacement of water meters in residential areas, an educational campaign against fraud, and automation. The study made it possible to analyze the uncertainty involved in the decision-making process and emphasized the successful application in aggregating expert opinions from the DS/AHP method for complex problems. In this way, we see the important contribution that the developed structure can add to the management policies of water distribution systems, providing the benefit for the most varied segments involved in this problem.

Keywords: Water supply. Water losses. Decision making. Dempster-Shafer Theory. AHP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais componentes para o combate às perdas reais.	30
Figura 2 – Diagrama do relacionamento de Bel(A) e Pls(A)	52
Figura 3 – Representação hierárquica de um problema de decisão no AHP.....	55
Figura 4 – Modelo DS/AHP do problema de decisão em grupo.	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Balanço hídrico proposto pela IWA para SAA.	23
Quadro 2 – Resumo dos artigos publicados sobre gestão eficiente em SAA.....	47
Quadro 3 – Escala de comparação do método AHP	56
Quadro 4 – Grau de viabilidade de cada alternativa em relação às demais.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Combinação de duas evidências.....	51
Tabela 2 – Valores de prioridade dos critérios para cada DM.	69
Tabela 3 – Critério BOE, para cada DM, com seus valores gerais de BPA.....	71
Tabela 4 – Resultado intermediário da combinação do critério BOE $M1,1(.)$ e $M1,2(.)$	72
Tabela 5 – Corpos de evidência individuais de $M1(.)$, $M2(.)$ e $M3(.)$	73
Tabela 6 – Elementos focais e valores de BPA que compõem o grupo $mgT(.)$	74
Tabela 7 – Grupos de alternativas com os maiores valores de Bel e Pls.	75
Tabela 8 – Melhores grupos de alternativas para cada DM.....	76
Tabela 9 – Grupos de alternativas com os maiores valores de Bel e Pls do $mgT(.)$	76
Tabela 10 – Melhores grupos de alternativas de tamanho até 7.....	78
Tabela 11 – Ranking individual das alternativas para gestão eficiente de SAA.....	78
Tabela 12 – Ranking das alternativas para gestão eficiente de SAA.	79
Tabela 13 – Resultados obtidos no novo cenário.....	82
Tabela 14 – Melhores grupos de alternativas para novo cenário de tamanho até 7.	82
Tabela 15 – Ranking das alternativas – Análise de sensibilidade.	83
Tabela 16 – Ranking individual das alternativas – Análise de sensibilidade.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária
AHP	Analytic Hierarchy Process
Bel	Crença
BOE	Corpo de evidência
BPA	Atribuição de probabilidade básica
Class.	Classificação
DA	Alternativas de decisão
DM	Tomadores de decisão
DMC	Distrito de medição e controle
DS	Dempster-Shafer
DST	Teoria de Dempster-Shafer
ELECTRE	Elimination et Choix Traduisant la Réalité
ETA	Estação de tratamento de água
GA	Grupo de alternativa
IWA	International Water Association
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique
MAUT	Multi-attribute Utility Theory
Pls	Plausibilidade
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
RCD	Regra da combinação de Dempster
SAA	Sistema de abastecimento de água
SIG	Sistema de informações geográficas
SMARTS	Simple Multi-Attribute Rating Technique using Exploiting Rankings
VIP	Variable interdependent parameters
VPC	Valores de prioridade dos critérios
VRP	Válvula redutora de pressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral	18
2.2	Objetivos específicos	18
3	REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1	Operação dos sistemas de abastecimento de água	19
3.1.1	Automação de sistemas de abastecimento de água	20
3.1.2	Perdas em sistemas de abastecimento de água.....	22
3.1.3	Método de avaliação e controle das perdas reais	26
3.1.4	Controle das perdas aparentes.....	37
3.2	Apoio a decisão multicritério	43
3.3.1	Métodos multicritérios para gestão de sistemas de abastecimento.....	46
3.3.2	Dempster-Shafer theory.....	49
3.3.3	Processo Analítico Hierárquico.....	54
3.3.4	Dempster-Shafer/AHP (DS/AHP).....	57
4	MATERIAIS E MÉTODOS	61
4.1	Determinação dos critérios e alternativas	61
4.2	Estruturação do problema	62
4.3	Método DS/AHP	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
6	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO	103

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 e deficiência operacional, resultando em maiores perdas de água. Sistemas de distribuição urbanos mal administrados, em associação a pressões de mudanças climáticas globais, podem gerar cenários de extrema escassez no futuro (MUTIKANGA *et al.*, 2013).

A ampliação da infraestrutura de captação dos sistemas de abastecimento de água (SAA), aumentando assim a oferta de água, é a solução mais tradicional frente ao problema do aumento da demanda. Contudo, devido ao alto investimento financeiro e danos ao meio ambiente, essa alternativa tem sido questionada pela comunidade técnica-científica. Segundo Moraes, Almeida & Figueira (2014), quando as perdas de água são elevadas, é muito mais econômico racionalizar e otimizar a utilização da água do que ampliar a captação dos SAA.

De forma contrária, no Brasil, ao longo dos anos, o setor de saneamento priorizou obras de implantação e ampliação de projetos de abastecimento, em vez de investir em processos de manutenção e operação dos mesmos. Prova disso está na imprecisão e deterioração dos equipamentos de medição e controle, e a ausência de tecnologias para uma gestão eficiente. Dessa forma, grande parte da água produzida não chega ao consumidor, sendo perdida, desde a produção até a distribuição. Nesse contexto, no entanto, nos últimos anos, as perdas de água passaram a receber mais atenção entre as concessionárias de água (DUTRA; OLIVEIRA, 2017).

A gestão das perdas de água e uso consciente dos recursos naturais são de fundamental importância para a sociedade, assegurando sustentabilidade ambiental e social. Globalmente, 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.

As perdas de água são inerentes a todos os SAA, e todas suas unidades (captação, elevação, adução, tratamento, reservação e distribuição) são susceptíveis às perdas. Do ponto de vista operacional, as perdas correspondem aos volumes não contabilizados e se dividem em perdas reais (físicas), que representam o volume de água produzido que

foi realmente perdido e desperdiçado, não chegando assim ao consumidor final, e perdas aparentes (comerciais), que correspondem ao volume de água produzido que não foi faturado pela prestadora. Entretanto, para que haja diminuição de parcela desses volumes, ações diferenciadas precisam ser tomadas para cada tipo de perda (BEZERRA; CHEUNG, 2013).

Contudo, ações para reduções de perdas são caras, e muitas vezes não são consideradas prioridades nos orçamentos das concessionárias de água. Os recursos das empresas são limitados, necessitando assim de uma otimização dos recursos direcionados para essa área, sendo importante ressaltar a importância da aplicação contínua dos procedimentos para controle das perdas, incluindo estes como parte da rotina da empresa.

Os SAA, por sua complexidade, embutem certo grau de perda de produção, sendo problemático o convívio das empresas com os altos índices de perdas e, conseqüentemente, de receita por falta de um gerenciamento adequado, baixa qualidade dos materiais utilizados e infraestrutura física deficiente (MORAIS; ALMEIDA, 2006). Além disso, a democratização e a consciência ambiental têm colocado a população não apenas como usuária da água, mas como inquisidora das empresas de saneamento, exigindo a modernização dos sistemas. É notório o enfrentamento de novos conflitos por parte das companhias de abastecimento, sejam essas públicas ou privadas, sendo necessário aos gestores grande desenvoltura para integrar o pouco recurso disponível e os objetivos estratégicos da concessionária em um plano eficaz que auxilie na gestão eficiente dos SAA (TROJAN; MORAIS, 2012).

Diante da multiplicidade de aspectos no âmbito da gestão operacional dos sistemas, é necessário a busca por metodologias que “avaliem” as alternativas/ações para uma gestão eficiente dos mesmos. Em muitos casos, para a resolução de problemas 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 (EGITO; FONTANA; MORAIS, 2015; FONTANA; MORAIS, 2016). É interessante destacar também que, dentro das empresas existem grupos com interesses políticos, sociais e econômicos diferentes que necessitam de negociação entre si, fazendo-se útil então, um método de mediação eficiente que agregue todas as necessidades e auxilie os autores envolvidos a encontrar a melhor solução (MORAIS; ALMEIDA, 2006).

Diante desse contexto, observa-se uma dificuldade relativamente acentuada ao tentar encontrar e priorizar alternativas ideais para a gestão eficiente de SAA. 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 (MORAIS; ALMEIDA, 2010). A necessidade de maior interação entre os diversos atores envolvidos nessas decisões tem provocado uma ampliação na demanda em relação ao tema Decisão em Grupo.

Entretanto, não é realista esperar que os especialistas tenham todas as informações sobre o problema, estando incluso em seu julgamento um certo grau de incerteza associado a algumas escolhas (BEYNON, 2002). Segundo Silva *et al.* (2019), os conflitos do mundo real normalmente incluem percepções errôneas, incertezas ou mesmo ignorância sobre as escolhas. Assim, para a modelagem dos julgamentos de um grupo de especialistas, esta pesquisa optou pela aplicação do método DS/AHP (BEYNON, 2005), que é a incorporação do método *Dempster Shafer* ao Processo Analítico Hierárquico (AHP), trazendo como benefício e diferencial a construção de uma medida de incerteza e ignorância, que no método, se relacionam com os resultados dos julgamentos feitos pelos especialistas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Estruturação de um procedimento para hierarquização de ações direcionadas à gestão eficiente de sistemas de distribuição de água baseado na Teoria *Dempster-Shafer* e no Processo Analítico Hierárquico.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar critérios de avaliação e alternativas relevantes para a análise, através de uma revisão de literatura.
- Incluir e agregar o conhecimento de múltiplos especialistas na problemática em questão.
- Propor recomendações a respeito das alternativas analisadas para a gestão eficiente dos sistemas de distribuição de água.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Operação dos sistemas de abastecimento de água

A situação das companhias de saneamento do Brasil ainda é muito crítica, em termos de direcionamento de recursos (DUTRA; OLIVEIRA, 2017). Em algumas cidades, há um grande déficit ou até mesmo ausência total de saneamento básico, resultando na falta de distribuição de água tratada para a população, bem como também pela ausência de coleta e tratamento de esgoto. Entretanto, o abastecimento de água potável é primordial para que o homem viva em sociedade, suprimindo os consumos demandados pela sociedade, para fins de uso doméstico, consumo industrial, comercial e serviços públicos.

O sistema de abastecimento de água (SAA) público é um complexo sistema hidráulico, constituído de instalações, equipamentos e serviços, destinados a produzir, transportar e distribuir água potável à população. Para que façam sua função de modo eficiente e eficaz, os sistemas devem satisfazer algumas condições, como: fornecimento contínuo de água potável com qualidade e quantidade a todos os consumidores, conservação da infraestrutura, respeito a legislação vigente, e custos compatíveis com o sistema.

A falta de planejamento e manutenção adequada, associadas à escassez de recursos financeiros, têm contribuído para a deficiência dos SAA, fazendo com que os mesmos se deteriorem prematuramente, originando problemas operacionais que baixam a qualidade do serviço prestado e aumentem os custos operacionais, recaíndo sobre os consumidores em forma de tarifas. A baixa qualidade dos serviços prestados causa danos aos consumidores e é reconhecida por eles através da má qualidade da água, interrupções frequentes das vias públicas para reparação nas redes de distribuição ou adutoras, intermitência de abastecimento, e problemas com pressões muito acima ou abaixo dos limites normativos.

Diante dessas questões, dar um retorno a sociedade se torna uma tarefa difícil para as empresas gestoras, sendo necessário um monitoramento total do sistema que abranja um cadastro técnico acessível e atualizado, de preferência com o mapeamento dos clientes, macromedição dos volumes entregues, conhecimento prévio da rede (válvulas de controle, registros, etc.) e também de suas pressões.

Alguns instrumentos de controle operacional, como macromedição, cadastro, telemetria e controle de pressão não são, por muitas vezes, utilizados nos sistemas de

distribuição de água, apesar de serem equipamentos operacionais de grande importância e que devem ser adequadamente integrados ao sistema. Da mesma forma, SAA que possuem esses componentes, podem sofrer com a ausência de pessoal qualificado para operar e manter as ferramentas disponibilizadas.

Segundo Ormsbee & Lansey (1994), a operação de SAA permite aos técnicos o monitoramento das pressões e taxas de fluxo em todo o sistema, como também a operação de alguns elementos de controle como o ligamento e desligamento de bombas e abertura de válvulas de controle, a partir de um local central. Entretanto, para Carrijo (2004), o conceito é mais amplo e envolve aspectos de planejamento, controle e supervisão, serviços de infraestrutura de apoio e atendimento ao usuário, sendo todos considerados de forma simultânea e interdependentes entre si.

Nas redes de distribuição de água é corriqueiro as mais variadas alterações, como: expansões ou substituição de tubos, interligações de zonas de pressão, instalações de válvulas, entre outros (MENESES, 2011). Dessa forma, se faz necessário um bom acervo de informações técnicas, pois, essas são úteis para a tomada de decisão futura, uma vez que, uma regra operacional aplicada de forma inadequada leva a consequências desastrosas de cunho financeiro, de material e operação. É comum, em sistemas de pequeno e médio porte, um técnico mais antigo que memoriza as informações do sistema, sendo ele, o único detentor desse conhecimento. Com isso, Zahed Filho (1990) chama a atenção para os benefícios do controle automático dos sistemas, dentre estes, a redução dos custos operacionais e aumento da segurança e confiabilidade, permitindo a obtenção de dados essenciais para o planejamento futuro do sistema.

Segundo Moraes, Almeida & Figueira (2014), o controle operacional tem assumido uma maior prioridade nos dias atuais, mediante a escassez gradual dos recursos hídricos e as limitações financeiras das empresas, tendo em vista que a perda de água está relacionada à falta de investimento na manutenção da infraestrutura de distribuição.

3.1.1. Automação de sistemas de abastecimento de água

Para Bezerra & Gomes (2019), o principal objetivo da automação em SAA é possibilitar a operação assistida e o controle automático de todos os processos envolvidos na prestação de serviço, que vai desde a captação até a distribuição da água para o cliente. A automação traz como principais benefícios, que justifiquem a sua implantação a redução do consumo de energia, otimização dos processos, melhoria na qualidade do

tratamento da água, diminuição da mão de obra não especializada, aumento da segurança na operação, controle das perdas de água e diminuição dos custos (TSUTIYA, 2006). Algumas contribuições adicionais do processo de automação são: a conexão do sistema de controle com os sistemas corporativos de administração das empresas, de forma a compartilhar as informações em tempo real, aumentando a agilidade e a confiabilidade nos dados que auxiliam na tomada de decisão das empresas; e a visualização do histórico de qualquer variável do processo, através de um sinótico do historiador, com capacidade para voltar a uma determinada data de interesse (MENESES, 2011).

O controle e interferência nas unidades, decorrente da automação, possibilita um melhoramento no desempenho operacional, de forma a se obter uma coleta de informações e posterior processamento das mesmas com uso de tecnologia de informação, e com os resultados, atuar, sobre os estados e grandezas para obtenção do resultado desejado (SOUZA, 2006). As principais variáveis controladas e monitoradas nos SAA são (BEZERRA; GOMES, 2019):

- Vazões e pressões de adutoras e redes hidráulicas.
- Níveis de água dos mananciais e reservatórios.
- Acionamento dos conjuntos motobomba.
- Grandezas elétricas dos motores (tensão, corrente, etc.).
- Ângulo de abertura de válvulas de controle.
- Volumes armazenados e distribuídos.
- Consumo de clientes especiais.

A automação já é uma realidade no Brasil, porém, percebe-se que muitas das empresas gestoras ainda não estão preparadas para incorporá-la nos procedimentos operacionais. Isso ocorre, muitas vezes, pela ausência de profissionais habilitados, ou simplesmente pela necessidade de um melhor treinamento, como também da aquisição dos equipamentos. A automação é uma importante ferramenta para a gestão de perdas de água, pois aumenta a eficiência de operação dos SAA, e permite conhecer o funcionamento do sistema por meio da mensuração e controle dos seus principais parâmetros, como pressão, vazão e nível.

Trojan & Kovaleski (2005) apontaram a automação como uma ferramenta eficiente para o controle das perdas de água. O estudo de caso ocorreu em Ponta Grossa – PR, e consistiu da implantação da automação no sistema da SANEPAR (Companhia de

Saneamento do Paraná). Como resultados, o estudo constatou uma redução nas perdas de água de 15,06% em dois anos, uma maior rapidez e qualidade nos reparos das tubulações, como também a formação de uma base de informações para a criação de programas para novas instalações e melhorias no sistema. Trojan & Morais (2012) também apontam a automação nas empresas de saneamento como fonte para controlar e monitorar as perdas de água, além de assinalar a necessidade de um alto investimento. Apesar da contribuição efetiva para a redução das taxas de perdas em médio prazo, os autores indicam que a relação custo-benefício é vantajosa somente em sistemas com altos níveis de perdas.

Dessa forma, é possível observar a automação atuando de forma eficiente em SAA complexos, não apenas no simples ato de ligar ou desligar uma bomba, como também no controle das perdas de água e de energia elétrica.

3.1.2. Perdas em sistemas de abastecimento de água

As perdas de água ocorrem em todas as etapas no sistema de distribuição, indo desde a fonte de captação até o ponto de medição e consumo. Para uma gestão adequada e eficiente de um SAA, controlar e gerir as perdas são de importância ímpar, visto que as mesmas trazem consequências não apenas financeiras às empresas gestoras, mas principalmente ambiental, diante de um cenário de escassez hídrica e de conflito de uso. Para implementação da ação adequada de controle dessas perdas, é fundamental como primeiro passo, a identificação e mensuração da mesma, contando com o auxílio de tecnologias e metodologias facilitadoras e precisas.

O Programa Nacional do Combate ao Desperdício de Água do Ministério das Cidades define que as perdas de água, do ponto de vista operacional, são consideradas correspondentes aos volumes não contabilizados, englobando tanto as perdas reais como as perdas aparentes. As perdas aparentes, também chamadas de perdas comerciais, estão ligadas à volume de água que foi efetivamente consumido pelo usuário, mas que não foi medido ou contabilizado, gerando perda de faturamento ao prestador do serviço de água. Tais falhas são oriundas de ligações clandestinas, *by-pass* nos ramais de ligação, falhas no cadastro comercial, erros de medição (submedição de hidrômetros, erros de leitura, fraudes, erros na calibração dos hidrômetros), etc. Em tais casos, tem a ocorrência do consumo da água, mas sem o devido faturamento.

As perdas reais estão relacionadas a água que sai para a distribuição, mas que não chega aos consumidores. Essas perdas ocorrem devido aos vazamentos em adutoras,

redes, ramais e conexões, extravasamentos de reservatórios, etc. (BEZERRA; CHEUNG, 2013; DUTRA; OLIVEIRA, 2017). As perdas reais são compreendidas principalmente por vazamentos nas tubulações de rede de distribuição, potencializados pelo excesso de pressão, geralmente em regiões com grande variação de topografia (DUTRA; OLIVEIRA, 2017).

Teoricamente, deve haver equilíbrio entre o volume de água disponibilizado e o volume retirado do sistema. Neste sentido, a contribuição mais relevante na definição das perdas foi realizada pelos grupos especialistas da IWA (*International Water Association*), que em 1997, baseando-se na melhor prática de muitos países, produziram uma terminologia padrão buscando sua uniformização, em decorrência da sua grande diversidade de formatos e definições (LAMBERT, 2002; BEZERRA; GOMES, 2019). Esse método de análise culminou no Balanço Hídrico (Quadro 1). O cálculo contínuo do balanço hídrico permite determinar o volume de água perdido e representa uma das melhores ferramentas de gerenciamento dessas perdas (MIRANDA, 2002). Sendo importante destacar, que a quantidade de água perdida é um importante indicador da eficiência dos sistemas de distribuição de água (LAMBERT; HIRNER, 2002; FONTANA; MORAIS, 2013).

Quadro 1 – Balanço hídrico proposto pela IWA para SAA.

Volume de entrada no sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado faturado	Consumo faturado medido (inclui água exportada)	Água faturada
			Consumo faturado não medido (estimados)	
		Consumo autorizado não faturado	Consumo não faturado medido (usos próprios, caminhão pipa, etc.)	Água não faturada
			Consumo não faturado não medido (combate a incêndios, favelas, etc.)	
	Perdas de água	Perdas aparentes	Uso não autorizado (fraudes e falhas de cadastro)	
			Erros de medição (macro e micromedição)	
		Perdas reais	Perdas reais nas tubulações de água bruta e no tratamento (quando aplicável)	
			Vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição	
			Vazamentos e extravasamentos nos reservatórios de adução e/ou distribuição	
			Vazamentos em ramais prediais (à montante do ponto de medição)	

O Quadro 1 elucida os componentes do balanço hídrico e os separa de acordo com sua identificação. O consumo autorizado é o volume medido ou não medido fornecido a consumidores registrados, que é autorizado pela empresa de abastecimento, e inclui, muitas vezes, o consumo da própria empresa e a água exportada. Este consumo pode ser também faturado ou não. A água não faturada é a diferença resultante entre o volume de água e o consumo autorizado faturado, essa água não faturada inclui não somente as perdas, mas também o consumo autorizado não faturado. No que tange as perdas de água, que já foram definidas anteriormente, estas correspondem a diferença entre a volume de água que entra no sistema e o consumo autorizado.

De acordo com Melato (2010), as perdas de água ocorrem em todos os sistemas de abastecimento, unicamente variando em quantidade perdida, estando estas ligadas diretamente as características físicas dos sistemas, de fatores e costumes locais, de práticas operacionais e do nível de tecnologia aplicada para seu controle. Mesmo em países mais desenvolvidos, onde o controle de perdas é realizado de forma mais rigorosa, ainda há uma parcela de perdas. Sempre haverá, por exemplo, um vazamento que demorará um tempo ínfimo para ser reparado, imprecisões do hidrômetro e fraudes. Entre as causas dos elevados índices, destacam-se (TROJAN, 2012; MORAIS; ALMEIDA, 2005):

- Projetos de engenharia pobres (construção e manutenção);
- Intermittência no abastecimento;
- Falha no controle de vazamentos visíveis (aflorem na superfície, sendo na grande parte das vezes de grande magnitude) e vazamentos invisíveis, que necessitam de equipamentos acústicos para detectá-los ou localizá-los;
- Falha na especificação e controle de qualidade dos materiais utilizados;
- Mão-de-obra não qualificada para execução dos serviços;
- Efeito do tráfego na infraestrutura;
- Falha nos processos de micromedição e macromedição;
- Informações ineficientes aos consumidores;
- Pressões elevadas;
- Ligações clandestinas e roubo de água.

Diante do exposto, percebe-se que, se nada for feito, haverá o surgimento de novos vazamentos, deterioração das redes de distribuição, envelhecimento do parque de

hidrômetros e aumento das fraudes, entre outros. Portanto, são necessários esforços para, primeiramente, conter este crescimento natural, para depois, reduzir as perdas. Conforme afirmado anteriormente, não é possível “perda zero” em sistemas de abastecimento de água. A chamada perda inevitável, corresponde ao mínimo aceitável de perda de água para um sistema ideal e a diferença entre a perda existente e a inevitável representa o volume de perda potencialmente recuperável. Considera-se que o combate as perdas possuem dois níveis (BEZERRA; GOMES, 2019):

- Limite técnico: nível alcançável por meio de todas as técnicas e recursos disponíveis (perdas inevitáveis).
- Limite econômico: nível ótimo de perdas, que corresponde à situação em que a redução da perda de 1 m^3 é igual ao ganho recuperado por 1 m^3 . Esse limite é atingido antes do limite técnico.

O ótimo econômico é o ponto de equilíbrio entre o custo benefício, isto é, acima deste ponto, qualquer tentativa de redução acarretaria em custos excessivos, que ultrapassaria os benefícios oriundos dessa redução. Essa análise é bastante usada em avaliações econômicas onde se comparam os custos envolvidos no programa de combate as perdas com os benefícios econômicos oriundos da sua diminuição (DELGADO-GALVÁN *et al.*, 2010).

Associados às perdas de água há uma série de custos, que se gerenciados de forma adequada podem ser diminuídos ou, até mesmo, evitados, são eles: custos energéticos, técnicos, sociais, ambientais e de qualidade da água. As perdas corroboram para que um maior volume de água seja retirado dos corpos hídricos, visando cobrir a ineficiência do sistema e acarretando com isso, custos com novas rotas de abastecimento e de novos equipamentos. Simultaneamente, surgem novos gastos com produtos químicos necessários para a desinfecção da água, energia elétrica, mão de obra e serviços terceirizados, além do aumento da pressão sobre o consumo do manancial e, conseqüentemente, um impacto negativo sobre o meio ambiente.

Além desses custos citados, existem outros, de difícil avaliação, denominados custos por externalidades. Na ponderação das melhores alternativas para gestão das perdas, analisar os prejuízos que cada segmento agrega é fundamental, dessa forma, a análise dos custos por externalidades associadas a cada alternativa, juntamente com a análise econômica habitual, é uma ferramenta efetiva para uma melhor priorização dessas ações de controle, isso tudo visando uma melhor decisão para a empresa e seu entorno.

Para Bezerra & Gomes (2019), a sustentabilidade técnica e econômica da solução escolhida também deve ser levada em consideração.

O escasso recurso financeiro limita as melhorias nos SAA a longo prazo, voltando o foco para resolução de problemas locais, com caráter emergencial (MORAIS; ALMEIDA; FIGUEIRA, 2014). As ações são direcionadas, na grande maioria das empresas, para o controle passivo de vazamento visíveis, ou seja, as manutenções são frequentemente do tipo corretiva. A manutenção estratégica precisa ser aplicada por meio de planos de gestão, em conjunto com o monitoramento contínuo e adequado dos sistemas, desta forma melhorando a disponibilidade dos produtos e serviços relacionados ao abastecimento de água.

Todo SAA possui sua peculiaridade local e nível de perda de água associado, com isso, necessitam de ações para controle e redução dessas perdas direcionadas para cada tipo de sistema, sendo a seleção da opção mais conveniente um processo composto (ZYOUN *et al.*, 2016). Os fatores limitantes da gestão das perdas de água também precisam ser destacados, dentre eles: a continuidade do abastecimento, extensão da rede, quantidade de ligações, pressão média de operação da rede e localização dos hidrômetros (MIRANDA, 2002).

Obtendo o sucesso na diminuição das perdas, as companhias de água obterão melhor desempenho econômico, revertendo o benefício em tarifas mais baixas aos clientes, postergação de novos investimentos na ampliação dos sistemas de produção, adução e reservação de água. Além disso, o investimento no controle e redução de perdas traz benefícios em outros segmentos (KUSTERKO *et al.*, 2018):

- Econômico, pois, passados os investimentos iniciais, os resultados reduzem os custos operacionais e aumentam o faturamento a curto prazo;
- Tecnológico, capacitação técnica e modernização dos equipamentos;
- Energético, reduzir as perdas gera economia e eficiência energética;
- Ambiental, reduz os impactos da crise hídrica mundial;
- Sociocultural, necessita de ações e campanhas sociais e educativas para a conscientização dos envolvidos na redução das fraudes.

3.1.3. Método de avaliação e controle das perdas reais

As principais práticas no gerenciamento de perdas de água consistem em uma combinação de cálculos do balanço hídrico e medição de vazão noturna, ambas de forma

contínua ou conforme a necessidade. Além do balanço hídrico, os métodos de avaliação direcionado às perdas reais são: análise de vazão noturna em áreas setorizadas; número de ocorrências e tipos de vazamentos, com suas respectivas vazões médias e duração, e por fim, simulações de cálculo que considerem vazamentos ocultos e pressão (LAMBERT, 2000).

Um estudo conduzido pela ABES (2015) destaca que para a análise das perdas reais, é necessária a existência de um cadastro técnico atualizado e confiável, e que as avaliações e resultados da redução de perdas sejam realizados em áreas delimitadas e estanques do sistema de distribuição. Quanto menores essas áreas, mais fácil estabelecer as relações de causa e efeito e depurar as ações subsequentes, no sentido de aumentar a eficácia no controle e redução das perdas. Essa delimitação de área com consequente redução nas dimensões das redes de distribuição é chamada de setorização. Essas redes são chamadas de distritos de medição e controle (DMC), sendo importante ressaltar que a divisão dos sistemas de abastecimento em grandes setores, que não necessariamente são DMC, são conhecidos como Zonas de Pressão.

Segundo Bezerra & Gomes (2019), a setorização é uma das principais formas de controle de vazão e pressão, permitindo por sua vez, a implantação de projetos para gestão das perdas de água. A delimitação dos DMC usualmente ocorre pelo fechamento de válvulas ou por uma desconexão completa de redes de tubulação nas quais os volumes de água que entram e saem da área são quantificados (PETERS; BALFOUR, 2014). Dessa forma, é possível obter por meio da análise do fluxo a quantificação do nível de vazamento, utilizando a análise de fluxo mínimo noturno, que possui maior sensibilidade para determinação do aumento do consumo progressivo ou um aumento repentino, sendo este indicativo de vazamentos. O princípio do fluxo mínimo noturno é baseado na ideia de que a demanda residencial geralmente diminui à noite, dando espaço para identificação de vazamentos (KARADIREK *et al.*, 2012).

A macromedição é de fundamental importância para a valoração das perdas reais, e é a referência de todo o balanço hídrico, realizada na apuração dos volumes produzidos nas estações de tratamento de água – ETA, que são posteriormente distribuídos para subsetores da rede de distribuição (ABES, 2015). Em seu estudo, Arreguín-Cortes & Ochoa-Alejo (1997) avaliam a importância da macro e micromedição, enquanto analisam as perdas de água e relatam que a comparação entre os dados macro e micromedidos é um dos métodos mais simples e fácil para determinação e avaliação das perdas em SAA.

As redes de distribuição estão enterradas e espalhadas pelas grandes áreas urbanas, muitas vezes em locais desconhecidos (ausência ou falha do cadastro técnico) e de difícil acesso, causando transtorno à população quando há a necessidade de operação dessas redes. As perdas reais ocasionadas pelos vazamentos aumentam os custos de produção e desgastam os recursos hídricos, pois não chegam aos seus destinos e uso apropriado, sendo captada, tratada e por fim, perdida (MORAIS, 2006). Além dos vazamentos em redes, ramais e tubulações adutoras, as perdas reais ocorrem em ETA e por extravasamento de reservatórios. Dessa forma, é seguro dizer que não existe rede estanque, o volume de água perdido só varia de proporção, entretanto, é inaceitável o índice de perda real superior a 30% do total de água disponível para abastecimento, de forma a comprovar a necessidade do combate contínuo a vazamentos.

Para Fontana & Morais (2013), o problema do envelhecimento da infraestrutura e das perdas de água associadas aos sistemas de abastecimento têm sido um dos maiores problemas de infraestrutura nas cidades. Uma rede de distribuição é considerada ineficiente, quando a mesma não cumpre com a missão para a qual foi projetada, ou seja, satisfazer as necessidades dos consumidores em termos de quantidade e qualidade. As tubulações geralmente são as principais causas dos problemas de deficiência em SAA (HOOGSTEEN, 1999). As causas mais citadas dos problemas com as tubulações são (MORAIS, 2006):

- Redução do diâmetro efetivo devido ao aumento das incrustações no interior das tubulações;
- Flutuação excessiva da pressão ao longo do dia;
- Deterioração da qualidade da água distribuída devido à degradação da rede;
- Elevados índices de ruptura e reparos nas adutoras e redes, atrapalhando a continuidade do abastecimento e a estanqueidade da sua estrutura.

Os vazamentos que proporcionam as perdas de água em SAA são classificados em visíveis e não visíveis. Os vazamentos visíveis possuem altas vazões e afloram rapidamente à superfície, sendo assim de fácil detecção, sendo vistos mais rapidamente pela população, que conseqüentemente aciona a operadora de saneamento para o reparo. Com isso, é negada a afirmação de que esse tipo de ruptura é responsável pela maior parte da água perdida nos SAA. Assim, as maiores parcelas das perdas reais são ocasionadas pelos vazamentos não visíveis, ou seja, aqueles que não afloram à superfície.

Os vazamentos visíveis prejudicam a imagem da prestadora de saneamento perante a sociedade, como também geram grandes danos e transtornos. Nas operadoras de saneamento, as avaliações de perdas reais apontam para os ramais prediais como os que detêm maior parte das ocorrências de vazamentos. No Brasil, os ramais em sua grande maioria são executados com tubos plásticos, e possuem muitas juntas e peças que apresentam problemas com frequência. No entanto, existem também muitas redes antigas, que possuem juntas de chumbo ou cimento amianto, detendo elevadas perdas por vazamento (ABES, 2005). As principais implicações dos vazamentos nos sistemas de distribuição são (BEZERRA; GOMES, 2019):

- Danos aos patrimônios públicos e privados, pela gradação do sistema viário e o comprometimento das edificações, devido a infiltrações.
- Aumento dos custos de produção, operação e manutenção, resultando ao consumidor o pagamento de tarifas mais elevadas.
- Riscos de contaminação da água. Na ausência de pressão, ou em casos de pressões negativas, é possível a introdução de agentes nocivos na rede de distribuição de água.

Os vazamentos não visíveis podem ser inerentes (não detectáveis) e detectáveis. Estes possuem baixas vazões (menores que 250 L/h) e são denominados por alguns autores de “fugas”, possui longa duração e representam a água perdida através de pequenos orifícios nas tubulações, nas juntas de conexão, nas peças especiais de controle, etc. O não afloramento da água na superfície do terreno, faz com que esse tipo de vazamento não seja passível de detecção pelos equipamentos atuais de detecção acústica. Apesar da baixa vazão, é comum que o volume perdido nesse tipo de vazamento esteja representado no total das perdas de água, em decorrência do longo período de tempo que o mesmo permanece ativo sem ser notado (ABES, 2015; BEZERRA; GOMES, 2019).

Os vazamentos detectáveis (não visíveis) não afloram na superfície, mas são detectáveis pelos equipamentos de detecção acústica. Esse tipo de vazamento possui vazão moderada e sua duração varia de acordo com a frequência com que as empresas realizam pesquisas de vazamento. De acordo com Bezerra & Gomes (2019), no Brasil grande parte das empresas não realizam campanhas periódicas para detecção de vazamentos, de forma que o volume perdido seja uma parcela significativa das perdas reais.

Para o combate às perdas reais, é necessário um conjunto de ações com alto custo de execução. Para minimizá-lo, o esquema mostrado na Figura 3 foi proposto pela IWA

e disseminou-se pelo mundo, composto pelos quatro principais componentes de um programa efetivo de controle e redução de perdas reais, as quais, na medida e na ordem ideal para cada sistema, respondem pela obtenção dos resultados esperados. Cada componente é explicado em detalhes na próxima seção.

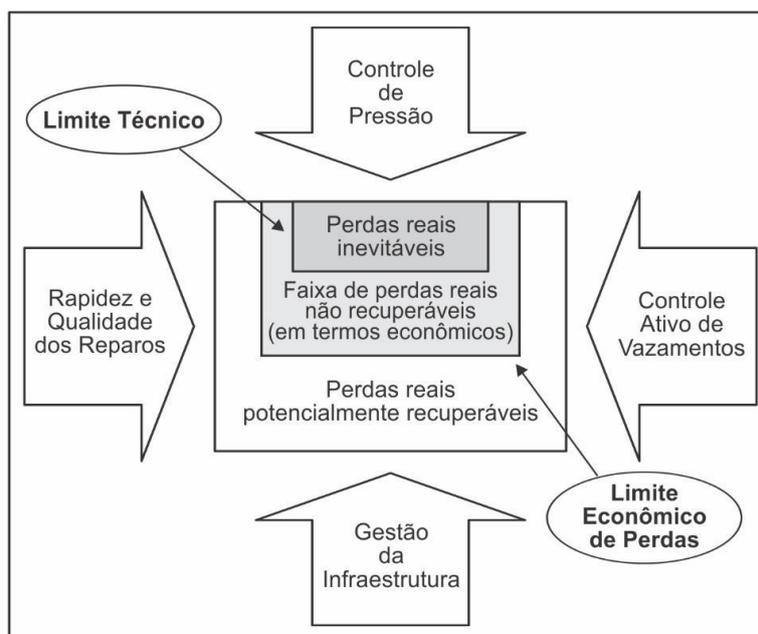


Figura 1 – Principais componentes para o combate às perdas reais.

(Fonte: BEZERRA; GOMES, 2019).

3.1.3.1. Controle de Pressão

Dentre as ações voltadas para a gestão eficiente das perdas de água, o controle de pressão desponta como a alternativa mais eficaz para a redução do volume de água perdido em vazamentos, principalmente durante a noite quando o consumo é menor e as pressões maiores. Em um sistema de água pressurizado, é natural a ocorrência de vazamentos, sendo a pressão um dos principais fatores que influenciam a taxa de vazamentos, visto que a velocidade de escoamento da água é alterada.

Para Xu *et al.* (2014) “o vazamento de água está positivamente relacionado à pressão da água, e a redução na pressão da água pode ser traduzida em redução do vazamento de água”. A gestão de pressão também funciona como única estratégia que permite a redução de vazamentos de água residual devido à danos indetectáveis nos tubos, além de, reduzir novas quebras e aumentar a vida útil da tubulação (XU *et al.*, 2014).

Diante disso, a relação da pressão na redução dos vazamentos é bem documentada e possui métodos comprovados para reduzir as perdas. No que tange a influência da pressão no consumo de água, e na importância da setorização, o estudo de Xu *et al.* (2014) propôs um experimento de regulação da pressão para estabelecer a relação de vazamento por pressão em um DMC na cidade de Pequim, China. Os resultados encontrados apontaram, como esperado, para uma relação entre as vazões e pressões, de forma que uma redução de 5,6 m na pressão de entrada, resultou em uma redução de 83% na vazão mínima noturna.

Peters & Balfour (2014) utilizam as medições de fluxo mínimo noturno para estimar as perdas nos DMC de Moloney e Maraval, Trinidad e Tobago, de 37% e 7%, respectivamente. Através da simulação de redução de pressão de pelo menos 20 m nos pontos altos do distrito, foi considerado pelo estudo uma possível redução em mais de 70% das perdas, reduzindo de forma direta a frequência de ruptura dos canos em mais de 40%.

A pesquisa de Gomes, Marques & Sousa (2011) é baseada em várias abordagens de avaliação de vazamentos da literatura e na modelagem de sistemas de distribuição de água. O estudo analisa através de simulações de rede as relações – pressão/vazamento e pressão/consumo durante a vazão mínima noturna para estimar a redução das perdas de água, que podem ser alcançadas a partir da gestão de pressão em DMC.

Babic *et al.* (2014) preveem a economia de água devido à redução da pressão, assumindo sua particular importância para empresas de países em desenvolvimento, cujas pressões são excessivas e uso de água irracional são observados. Com isso, uma válvula redutora de pressão é instalada em um DMC na cidade de Kotez, Sérvia, onde a pressão é monitorada. Os resultados do monitoramento com pressão de entrada reduzida e não regulada mostram que a redução da pressão leva à economia de 927 m³ de água.

Convém destacar que o investimento para a implantação de um DMC em um sistema de água é alto, isso se dá, pois, o tamanho do distrito tem influência direta no seu custo de implantação, sendo maior, quanto menor for o distrito, pois demandará maiores quantidades de válvulas de controle e monitoração (FREIRE, 2017).

A pressão de serviço, na grande maioria dos sistemas de distribuição de água, é projetada para as demandas de pico sob condições normais, logo, quando a demanda é baixa, a pressão se eleva a patamares indesejados, gerando assim grandes vazamentos. Portanto, os sistemas precisam estabelecer o nível máximo de pressão e não o exceder, como também, devem operar acima do seu nível mínimo. A elevada pressão não apenas

intensifica o volume de água perdido nos vazamentos, como também aumenta o número de avarias nos tubos. Na gestão de pressão, mais importante do que apenas diminuir a pressão é incorporar a ela a minimização de flutuações, pois, os rompimentos têm mais probabilidade de acontecer devido a amplitude de oscilação de pressão do que com seu valor médio e máximo (BEZERRA; GOMES, 2019).

Caso seja viável economicamente, as principais ações para controle de pressão são, segundo Morais & Almeida (2006): setorização, controle de bombeamento direto na rede (*boosters*) ou pela introdução de válvulas redutoras de pressão (VRPs) e otimização operacional dos sistemas de bombeamento. As VRPs têm como principal função controlar a pressão nos DMC, sendo, segundo Bezerra e Gomes (2019) uma das alternativas mais eficazes e econômicas para controle de perdas em redes hidráulicas. Araújo (2005) aponta que essas válvulas podem ser controladas de forma mecânica ou eletrônica, funcionando para diversos patamares de pressão a depender da demanda de água. De forma complementar, Ramos *et al.* (2004) aponta a VRP como reguladora de pressão, fazendo isso, através do acionamento de um dispositivo de obturação que aumenta ou reduz a perda de carga na peça até atingir a pressão definida.

Na literatura é possível observar variadas aplicações bem-sucedidas de VRPs em SAA, como também, estudos que se preocupam com condições de localização ótima dessas válvulas, a quantidade a ser utilizada, os valores de ajustes de pressão, lançando mão de metodologias de programação ou otimização matemática (SIVAKUMAR; PRASAD, 2015).

O equilíbrio entre reduzir a pressão para o controle das perdas e o uso da eletricidade, mantendo a pressão suficiente para garantir o nível de serviço, é um desafio para as empresas de abastecimento de água, com isso Wasserkrug, Tsitkin & Zadorojnyi (2014) criaram um algoritmo de otimização que pode fornecer recomendações sobre como definir as VRPs de maneira ideal, considerando os detalhes da rede e os variados objetivos.

Sivakumar & Prasad (2015) analisam a condição de deficiência de pressão através do método de algoritmo modificado, observando os impactos da redução de pressão proporcionados pela a implantação de uma VRP em situações de baixa demanda em um sistema real de Itanagar, Índia. No estudo de De Paola *et al.* (2017), o gerenciamento de pressão através de VRPs é abordado com referência particular às técnicas de otimização meta-heurísticas, utilizando o algoritmo *Harmony-Search* na determinação da localização e ajuste ideal do número de válvulas. A abordagem se prova eficaz, produzindo bons

resultados e reduzindo o tempo computacional. Os autores aplicam seus estudos em um sistema de distribuição de água em Nápoles, Itália, e em uma conhecida rede da literatura, que também foi utilizado por Campisano *et al.* (2012) para a aplicação de um método para calibrar os controladores em tempo real de válvulas de pressão motorizadas em redes de distribuição, visando reduzir o vazamento durante o período de operação normal.

3.1.3.2. Controle ativo de vazamentos

O controle ativo de vazamentos consiste em identificar e reparar os vazamentos antes do afloramento. São os vazamentos não visíveis passíveis de detecção por meio de pesquisa acústicas (por ex., utilização de geofones), em oposição ao “controle passivo de vazamentos”, que só são reparados quando afloram à superfície. Essas ações reduzem o tempo de vazamento e o volume perdido através deste.

O controle ativo não está focado apenas na reparação de vazamentos reportados pela população, essa é uma estratégia para o controle de perdas, de natureza periódica, visando o monitoramento da rede, de forma a detectar e reparar os vazamentos não comunicados. A eficácia do controle ativo de vazamentos está diretamente ligada ao planejamento da atividade. A mesma ocorre, a partir de: maior frequência de pesquisas em áreas com maior histórico de incidência de vazamentos, qualidade da mão de obra empregada, dos recursos tecnológicos e materiais colocados à disposição e o monitoramento da vazão mínima noturna, sendo esta última um indicativo do surgimento de vazamento.

Equipamentos acústicos são comumente usados para localizar vazamentos em tubulações, sendo este o procedimento mais utilizado para o controle ativo das perdas. Estes consistem na utilização de aparelhos eletrônicos que detectam ruídos que podem estar associados a vazamentos não visíveis (BEZERRA; GOMES, 2019). Nestes estão incluídos geofones mecânicos e eletrônicos, haste de escuta simples, localizadores de massa metálica e correlacionadores de ruídos. A eficiência da detecção de vazamentos com registradores de ruído é questionável, sendo os correlacionadores de ruído mais eficazes (HUNAIDI *et al.*, 2004).

Em seu estudo, Hunaidi & Wang (2006) apresentam um novo sistema de correlação de ruído de vazamento, incorporado com vários novos desenvolvimentos, sendo o mais importante o aprimoramento do método de correlação que melhora a eficácia da localização de vazamentos em todos os tipos de tubo, incluindo os tubos de plástico, que são tradicionalmente mais difíceis. Outro aspecto relevante é o baixo custo associado e uso de computadores pessoais como plataforma para registrar e analisar os sinais de vazamento, eliminando os *hardwares* usuais.

Mediante o papel de principal causador das perdas reais, os vazamentos têm estado em destaque, tanto para as empresas de saneamento quanto para os estudiosos da área. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias e estratégias para detectar, avisar com antecedência e controlar os vazamentos é de suma importância (KISHAWY; GABBAR, 2010). Para Li *et al.* (2011), infelizmente, ainda falta tecnologias sistemáticas para detecção efetiva e aviso prévio dos vazamentos. Logo, anualmente são investidas quantias substanciais em detecção e reparo de vazamentos (DELGADO-GALVÁN *et al.*, 2010), mas a determinação de quando e onde reabilitar são questões vitais que merecem devida atenção. Com isso, variados estudos foram elaborados na intenção de otimizar o processo de detecção dos vazamentos.

Li *et al.* (2011) desenvolveram um sistema integrado que detecta, avisa previamente e controla vazamentos em tubulações para um DMC de Pequim, China. O método é baseado no GIS (Sistema de Informações Geográficas), de forma a agilizar e automatizar o *layout* dos instrumentos que detectam os vazamentos. O sistema estimou a probabilidade de vazamentos em cada tubulação com base em dados históricos de vazamentos. Como resultado, é possível observar a detecção de 102 vazamentos categorizados como não “óbvios”, que correspondia a 14,2% do total detectado em Pequim.

As investigações preliminares de um projeto de detecção de vazamentos em sistemas de distribuição de água usando vibrações são apresentadas no estudo de Martini *et al.* (2014). O experimento é realizado em um equipamento de teste e em um sistema real induzindo artificialmente vazamentos de ruptura. Os primeiros resultados se mostram positivos, servindo para implementação de um algoritmo prototípico, necessitando este de melhorias adicionais. A longo prazo o projeto visa o desenvolvimento de um sistema de detecção automática de vazamentos de ruptura ocorridos em tubulações de serviço, devendo fornecer alertas antecipados em caso de ocorrência de explosão e ter integração com o sistema de leitura automática de medidores.

3.1.3.3. Velocidade e Qualidade dos Reparos

O vazamento tem seu tempo total conceitualmente dividido em três estágios: conhecimento, localização e tempo de reparo (BEZERRA; GOMES, 2019). Um ponto chave para vazamentos é que sua detecção precisa ocorrer em tempo útil. Para a reparação, apesar desse tempo depender de fatores externos, como localização do vazamento, profundidade da tubulação, tipo de pavimentação e existência ou não de tráfego local, o ideal é que esse tempo também seja o menor possível.

A respeito do combate a vazamentos visíveis, não basta apenas atuar na correção dos vazamentos para reduzir as perdas reais, já que a efetiva redução acontece quando a operadora de saneamento monta um bom esquema para reparar os vazamentos de forma mais rápida e adequada, evitando a reincidência e retrabalho.

A utilização de materiais e métodos adequados é de fundamental importância, juntamente com a capacitação da mão de obra empregada. Vazamentos reparados sem os devidos cuidados possivelmente ocorrerão novamente no mesmo local (retrabalho), gastando recursos financeiros que na maioria dos casos são limitados, além de perpetuar as perdas (ABES, 2015).

Segundo Delgado-Galván (2011), o tempo de reparo é considerado como um indicador interno da eficiência do sistema. Quanto mais tempo se leva para a detecção e reparo de um vazamento, mais o custo do processo se eleva, pois, intrínseco a ele está o quantitativo de água perdida, que como já se sabe, possui custos adicionais, e um provável custo extra decorrente dessa baixa velocidade de reparação. É importante ressaltar que realizar o reparo com uma maior velocidade, conseqüentemente em um menor tempo, diminui os transtornos e inconvenientes causados à população em decorrência desses reparos.

3.1.3.4. Gestão da Infraestrutura

O foco principal do gerenciamento da infraestrutura é a busca por uma boa execução dos projetos novos e de reabilitação, com bons materiais e mão de obra qualificada. Durante o tempo de vida de um sistema, mesmo sendo bem executado, o surgimento de situações inesperadas ocorre, dentre eles: ampliação da rede, surgimento de novas demandas, deterioração física dos componentes das instalações hidráulicas, vazamento, rompimento de tubulação, etc. (BEZERRA, GOMES, 2019). Com isso, se torna primordial o gerenciamento da infraestrutura. De acordo com Delgado-Galván

(2011), se uma porcentagem da rede fosse renovada todos os anos, em um determinado número de anos, a rede seria completamente renovada. A dúvida usual é, qual parte deve ser renovada a cada ano a fim de obter os melhores benefícios.

No entanto, essa proposta de plano anual de substituição não se encaixa na realidade de todas as empresas de saneamento. Pois, a escolha e decisão em reabilitar ou substituir, ou até mesmo os dois, depende do tamanho do projeto, dos recursos técnicos e de material disponíveis, de outros projetos da empresa, como principalmente da sua disponibilidade financeira (DELGADO-GALVÁN, 2011).

É natural a deterioração da infraestrutura com o tempo, entretanto, segundo Lambert (2002), devido aos altos custos associados, geralmente a renovação e/ou substituição das tubulações é negada, de modo a não produzir uma melhora significativa e rápida nas perdas reais. Porém, uma das formas de retardar o processo de deterioração é através do gerenciamento de pressão, sendo a substituição das tubulações uma opção útil apenas quando o histórico de problemas assim justificar.

Segundo a ABES (2015), a gestão da infraestrutura é a ação mais importante para o combate as perdas reais, com resultados a longo prazo e duradouro, entretanto, o mais oneroso devido seus custos agregados. A reabilitação das infraestruturas ao mesmo tempo que é cara, é probabilística (MORAIS; ALMEIDA, 2013). Esse fato ocorre, porque, a cada comprimento de tubo que exige manutenção, sua taxa de manutenção cresce exponencialmente (HERZ, 1998). Segundo Delgado-Galván (2011), tubos com alto nível de ruptura por quilômetro, na grande maioria das vezes, tendem a ser de pequenos diâmetros, enquanto os tubos com um alto nível de vazamento no fundo geralmente são de grande diâmetro.

Neste sentido, Bezerra & Gomes (2019) definem reabilitação como “qualquer intervenção no sistema que prolongue sua vida útil, melhorando seu desempenho hidráulico, estrutural e de qualidade da água”. Apesar de oneroso Gungor *et al.* (2017) apontam taxas de falha espontâneas quase nulas após conclusão da reabilitação das redes de distribuição de água na cidade de Denizli, Turquia, onde cerca de 340 km de novos tubos são implantados em substituição aos antigos, que já haviam completado sua vida útil, perdendo assim sua força de pressão. A redução da taxa de falhas como resultado da renovação da rede diminui significativamente o custo operacional do sistema, sendo possível minimizar efeitos indiretos, como custo de mão-de-obra para manutenção e custo de material de tubulação. Com isso, entende-se que com taxas de falhas decrescentes há uma diminuição das perdas de água.

3.1.4. Controle das perdas aparentes

As perdas aparentes comumente chamadas de perdas comerciais ou não físicas, dizem respeito a água que é consumida, mas não faturada. Para Mutikanga, Sharma & Vairavamoorthy (2011b) e Xin *et al.* (2014), esse tipo de perda consiste em três componentes principais: imprecisão do medidor do cliente ou erro de leitura do medidor, consumo não autorizado (roubo, desvio do medidor, ligações clandestinas, mau uso dos hidrantes, retirada de água em válvulas de descarga de adutoras, entre outros), manipulação de dados e erros de cobrança.

A imprecisão do medidor (ou submedição) incide na incapacidade de um medidor de água medir os fluxos com precisão, em especial os fluxos mais baixos. Isso aumenta mais rapidamente com o passar do tempo e à medida que o medidor envelhece. O erro de medição ou submedição é uma das principais causas das perdas aparentes nas empresas gestoras de abastecimento (BEZERRA; GOMES, 2019; ARREGUI *et al.*, 2006; RIZZO *et al.* 2007). O erro de medição depende de variados fatores, como: a correta escolha da tecnologia para os medidores, o dimensionamento e instalação corretos dos instrumentos e a política de frequência de substituição desses medidores seguidos pela empresa (ARREGUI *et al.*, 2006).

Existe algumas marcas e tipos de medidores no mercado, cada qual com suas características particulares, variando de tamanho, classe e tipo. Agregado a isso, está a grande variação de padrões de consumos existentes nas redes, dificultando a correta especificação dos medidores. Alguns medidores existentes são dos tipos: volumétrico, multijato, jato único, turbina, medidores inteligentes, ultrassônicos, eletromagnéticos, entre outros. Os medidores residenciais comumente usados são os modelos volumétricos, de jato único e de jato múltiplo (CRIMINISI *et al.*, 2009).

Na intenção de minimizar as questões anteriormente citadas, Arregui *et al.* (2006) indicam uma análise inicial do desempenho dos medidores instalados, de forma que essa análise cobrirá as taxas de fluxo de demanda de água dos usuários e as curvas de precisão dos medidores. Onde posteriormente, conhecido as circunstâncias que afetam uma maior eficiência de medição para o abastecimento de água, se torna mais fácil a escolha correta da tecnologia do medidor e a respectiva frequência de substituição a ser feita.

Da mesma forma, Bezerra & Gomes (2019) afirmam a necessidade de as empresas acompanharem de perto as tendências de consumo dos clientes, de modo que, só assim é possível adotar o medidor mais adequado. E indicam que, através de uma eficiente gestão

do parque de hidrômetros é possível a redução nos erros de medição. A má ou até ausência de gestão do parque de hidrômetros gera queda na receita da empresa gestora e inviabiliza o cálculo das perdas reais.

Algumas variáveis contribuem para o aumento do erro de medição, dentre essas, se destacam as seguintes (ARREGUI *et al.*, 2006; CRIMINISI *et al.*, 2009; BEZERRA; GOMES, 2019):

- Padrão de consumo de água (padrão de consumo com altas taxas de fluxo, próximo e acima da taxa máxima de fluxo do medidor, o degradará de forma mais rápida);
- Qualidade da água (medidores de velocidade e de deslocamento são afetados por essa característica, principalmente na presença de sólidos em suspensão);
- Condições ambientais (medidores instalados ao ar livre, altas temperaturas deterioram os componentes plásticos, enquanto em baixas temperaturas, abaixo de zero, a pressão pode aumentar dentro do medidor acima do valor permitido);
- Seleção incorreta do hidrômetro (dimensionamento e/ou tipo inadequado de medição);
- Idade do medidor (ausência de programa de substituição preventiva ou até corretiva);
- Uso sazonal da água;
- Violação dos hidrômetros (alguns medidores são protegidos contra adulteração de forma mais eficiente que outros).

A ABES (2015) aponta que a submedição é potencializada em alguns países pela existência de caixas d'água com boia. Arregui *et al.* (2007) realizam estudos em hidrômetros residenciais Classe B, com tempo de instalação entre seis e oito anos, e os resultados mostram que a submedição é de 7% com a ausência de caixas d'água domiciliares e de 17% com a presença da caixa d'água.

Segundo Arregui *et al.* (2006), a submedição do hidrômetro devido ao envelhecimento do medidor aumentará caso exista uma caixa d'água particular entre o medidor e o usuário. Durante a escassez hídrica as redes não operam em suas condições de projeto, sendo a intermitência de abastecimento e o racionamento de recursos hídricos as principais ações tomadas pela empresa gestora de abastecimento para driblar essa situação. Esse tipo de abastecimento é comum em alguns lugares do Brasil e em outros

países cuja escassez hídrica é uma constante. Dessa forma, os usuários tentam compensar o serviço descontínuo utilizando reservatórios particulares, que modificam o perfil de demanda dos usuários domésticos (CRIMINISI *et al.*, 2009).

Em seu estudo de campo para quantificar o efeito dos reservatórios particulares no erro de medição, Criminisi *et al.* (2009) destacam a diferença entre um reservatório quase cheio e aqueles que são esvaziados e cheios periodicamente. Este último possui erros de medição mais baixos, devido a necessidade de fluxos mais altos para o reabastecimento do mesmo. Dessa forma, é demonstrado o risco de altas perdas aparentes no uso de reservatórios de água em casos de constantes fornecimentos, ou seja, redes com intermitência de abastecimento. O estudo ainda conclui que os reservatórios, em grande parte alimentados por boias, interferem na medição, produzindo um adicional de perdas aparentes entre 15% e 40%.

Com o objetivo de mensurar as perdas aparentes devido à submedição de hidrômetros, Lugoma, Zyl & Llemobade (2012) investigam hidrômetros domésticos de grupos de alta renda em Johannesburgo, África, e descobrem que 67% das 128 propriedades selecionadas nessa região têm vazamento locais. Em estudo posterior, também em Johannesburgo, Couvelis & Zyl (2015) detectam dois fatores que contribuem para a submedição de hidrômetros, são eles: baixas vazões como resultado de vazamentos locais, e a deterioração da precisão dos hidrômetros por envelhecimento dos mesmos. Os pesquisadores concluem que, as vazões baixas acarretam uma maior submedição por parte dos hidrômetros, e constatam que a submedição do medidor devido aos vazamentos é de 2,2% do consumo e pelo envelhecimento de 2,6%, totalizando aproximadamente 5% de perdas aparentes.

É comum nas empresas de saneamento o indicativo de que as perdas aparentes são em suma contabilizadas pelos erros de medição dos hidrômetros, concluindo assim, que a troca do parque de hidrômetro é a solução frente ao problema. A troca do parque é sim necessária e eficaz, no entanto, os profissionais não devem deixar de lado o cuidado necessário para o tratamento dos dados, que ocorrem nas leituras dos hidrômetros e na transferência de dados para a empresa.

Em algumas empresas de abastecimento do Brasil a micromedição ainda é baixa, tendo como reflexo disso, a cobrança pelo consumo de água ocorrendo por meio de estimativas, ou de forma fixa, na maioria dos operadores igual a 10 m³ por economia mês, gerando um impacto negativo no faturamento da empresa gestora de abastecimento. Isso ocorre, pois, o usuário sente-se à vontade para utilizar a água em excesso, muitas vezes

até desperdiçando, visto que o valor na sua conta sempre será o mesmo (MIRANDA, 2002). Nesses casos, algumas referências consideram que o volume consumido não deve ser considerado como perda, mas sim como volume faturado (medido ou não) (BEZERRA; GOMES, 2019). Dessa forma, a água que excedeu a cobrança não é faturada pelas empresas de saneamento, e como não é hidrometrada, também não é considerada como perda aparente. Mutikanga, Sharma & Vairavamoorthy (2011b) apontam que vários ciclos de faturamento estimados com base na tendência históricas de consumo, sem uma real leitura, aumentam muito a perspectivas de estimativas imprecisas.

A perda de recurso financeiro devido à cobrança de faturas de água por taxas fixas ou por estimativas, tem voltado a atenção para a total hidrometração de um sistema, e sua grande necessidade, não apenas no aspecto financeiro, como também ambiental e na conscientização do consumidor, através da emissão de contas, alertando-os sobre o desperdício de água e da importância de evitar vazamentos.

Segundo a ABES (2015), a modernização do sistema comercial auxilia no combate às perdas aparentes, através da implantação de sistemas informatizados que processam e consolidam os dados ligados à apuração de consumos. A atualização e controle do cadastro técnico também auxiliam nesse combate, sendo responsável pelo registro e conhecimento dos clientes que constituem seu mercado, possibilitando a cobrança pelos serviços prestados. Porém, para Bezerra & Gomes (2019) é evidente que a função e importância dos dados de consumo dos clientes vai além do que servir como base para faturamento, servem também para análise de comportamento dos consumos, modelagens hidráulicas dos sistemas, base de dados para montagem de estratégias de gestão das perdas, como para auditorias do uso da água.

Juntamente com a imprecisão de medição, Mutikanga, Sharma & Vairavamoorthy (2011b) indicam o consumo não autorizado como componente significativo da perda aparente. Enquanto os outros tipos de perdas são em suma responsabilidade da empresa gestora de abastecimento, muitas vezes por falha de capacidade da equipe ou por questões técnicas, o consumo não autorizado é de inteira responsabilidade do cliente e provém da falta de civismo dos mesmos.

Os consumos não autorizados ocorrem das mais diversas formas, sendo as mais comuns, as ligações clandestinas e o uso fraudulento de água de hidrantes, registros e adutoras. Fraudes em hidrômetros são bem comuns e ocorrem através da inclinação do medidor, furo no visor, inserção de objeto na engrenagem, indução de campo magnético em medidor eletrônico, etc. Já as ligações clandestinas ocorrem através da instalação de

um by-pass, conhecidos como “gatos”, ou através da religação sem autorização da empresa (BEZERRA; GOMES, 2019).

Detectar o consumo não autorizado é uma tarefa desafiadora. Muitas das ligações fraudulentas estão enterradas, tornando difícil sua detecção, como também o grande quantitativo de clientes que permanecem por um longo período sem consumo de água, o que é improvável, com exceção dos casos de imóveis abandonados. Nesses casos, se faz necessário uma boa gestão de informação por parte da empresa gestora de abastecimento juntamente com um bom cadastro técnico dos seus clientes. Para Bezerra & Gomes (2019), as empresas de água deveriam ter regulamentos para prestação de serviço de água e meios para detectar falhas usuais no processo de medição, distribuição e faturamento.

Em seu estudo de avaliação dos diferentes componentes das perdas aparentes, Mutikanga, Sharma & Vairavamoorthy (2011b) utilizam para detecção dos consumos não autorizados, uma metodologia com abordagem proativa, investigando tendências de consumo suspeitas, como zero consumo, consumo negativo etc. Anúncios em jornais também são colocados com valores de recompensas para quem reportar usos ilegais da água. Com essas aplicações, é observado um aumento na detecção do consumo não autorizado da água na cidade do estudo, de forma que, é computado um componente de uso ilegal de 4% das vendas de água.

Em seu artigo de orientação para construção de uma estratégia para controle das perdas aparentes, Rizzo *et al.* (2007) propõem uma auditoria das perdas aparentes através de um DMC, sendo indicado que, primeiramente se realize uma detecção e remoção dos vazamentos (perdas reais) e posteriormente se analise o uso ilegal da água, devendo este ser o primeiro componente das perdas aparentes a ser detectado.

Dentre os consumos não autorizados, pode-se encontrar o chamado “volume social”, que corresponde ao volume enviado para comunidades carentes ou áreas invadidas, cujos consumidores não são passíveis de regularização. Bezerra & Gomes (2019) indicam para essa situação a instalação de macromedidor na entrada dessas áreas, de modo a se conhecer o volume exato abastecido e que o mesmo seja contabilizado como consumo autorizado não faturado.

Seago & MacKenzie (2007) analisam o volume cobrado, mas não faturado em empresas da África do Sul. Nas áreas consideradas de baixa renda, seis metros cúbicos de água são disponibilizados gratuitamente por mês, sendo apontado a problemática quando o consumo da água excede o limite oferecido gratuitamente. O estudo aponta que toda a água de consumo excedente é fruto de desperdício, visto que os usuários não pagam

por esta água. Dito isso, a imposição do pagamento se torna um controle de desperdício, ou seja, através da cobrança, é provável o uso mais moderado da água, reduzindo drasticamente o consumo. Ainda sobre os autores, os mesmos apontam a aplicação do projeto Soweto, implementado em Johannesburg, África do Sul, onde o uso da água nas propriedades cai de mais de 50 m³/família/mês para menos de 12 m³/família/mês, por meio da aplicação do pagamento pela água.

Sobre este último fato, dois pressupostos foram abertos, o de que, com a instalação de hidrômetros em áreas de baixa renda, é possível ocasionar uma redução do consumo de água, isso, por meio da efetiva cobrança do consumo; e o segundo, de que, com a diminuição desse consumo, haveria uma redução na necessidade de ampliação da produção. É preciso estar atento, pois, em situações como essa, ocorre um prejuízo direto à população mais carente, que devido a limitações financeiras, não conseguem cumprir com o pagamento do valor aumentado da conta de água, e por isso, muitas vezes, consomem abaixo do mínimo necessário, não atendendo as condições sanitárias e de saúde.

A perda aparente possui efeito negativo muito maior sobre a receita das concessionárias de água, se comparado a perda real, pois a mesma é avaliada à taxa de varejo cobrada dos consumidores, onde em alguns casos, equivale a quatro vezes o custo de produção, diferentemente da perda real que é avaliada pelo custo de produção (BEZERRA; GOMES, 2019). Esse tipo de perda acarreta também distorções na integridade dos dados de consumo, que são necessários para os mais variados tipos de tomada de decisão de gestão da empresa e estudos de engenharia (MUTIKANGA; SHARMA; VAIRAVAMOORTHY, 2011b).

Os problemas relacionados às perdas aparentes são mais pronunciados nas empresas de abastecimento de países em desenvolvimento. Kingdom, Liemberger & Marin (2006) apresentam a situação global das perdas e ilustram que cerca de 30 milhões de m³/dia são entregues aos clientes, mas não são faturados devido aos furtos, falta de medição e corrupção dos funcionários. Os autores apontam que cerca de US\$ 3 bilhões de receita anual são perdidos nesses países por causa das perdas aparentes. O estudo conclui que, embora pouco viável a total eliminação das perdas, sua redução em metade do nível atual geraria estimados US\$ 2,9 bilhões/ano para o setor, tendo potencial assim, para atender cerca de 90 milhões de pessoas sem novos investimentos nas instalações de produção. Tudo isso, demonstra a restrita viabilidade financeira das empresas de

abastecimento em países em desenvolvimento, acarretando em dificuldades de expansão necessárias de serviço, principalmente para os mais necessitados.

A micromedição é a apuração dos volumes de água consumidas pelos clientes das empresas, onde são feitas as leituras periódicas nos hidrômetros instalados. Os sistemas devem conter com sua totalidade de clientes possuindo hidrômetros, sendo estes imprescindíveis para a apuração dos volumes medidos de cada cliente e a existência de um cadastro comercial atualizado e confiável, de forma a não haver distorções na cobrança e deficiências na apuração dos volumes micromedidos.

3.2. Apoio a decisão multicritério

De acordo com De Almeida (2010), um problema de decisão multicritério consiste em um conjunto de métodos que objetivam lucidar um problema, onde há pelo menos duas alternativas de escolha que são avaliadas por meio de múltiplos critérios conflitantes entre si. No apoio multicritério à decisão, algumas ferramentas são oferecidas ao decisor, tornando-o apto a resolver problemas levando em consideração as mais diversas opiniões, muitas vezes contraditórias (ALVES, 2014).

A importância dos métodos multicritérios como instrumentos de apoio à tomada de decisão é vista pelo ângulo de que não há, normalmente, nenhuma solução ou decisão, que seja a melhor, simultaneamente a todos os critérios, e onde a presença de critérios conflituosos, impede a existência da “solução ótima” e conduz a procura da “solução de melhor compromisso” (LOPES, 2005). De acordo com Moraes (2006), uma tomada de decisão considerada boa e eficiente deve ser consequência lógica daquilo que se quer (levando em consideração as consequências das decisões, podendo estas ser incertas e/ou distribuídas no tempo), daquilo que se sabe e daquilo que se pode fazer (alternativas disponíveis de ação).

Para representar e estudar uma situação são utilizados modelos de decisão que representam de forma simplificada seus elementos relevantes. Segundo De Almeida (2010), a aplicação de qualquer método multicritério de apoio à decisão pressupõe a necessidade de se estabelecer quais objetivos o decisor pretende alcançar representando estes múltiplos objetivos através do uso de múltiplos critérios. O surgimento dos métodos multicritérios se deu pela necessidade de resolver problemas com as seguintes características:

- Critérios conflitantes;
- Os critérios e as alternativas de solução não são claramente definidos e as consequências da escolha de uma dada alternativa não são bem compreendidas;
- A solução do problema depende de um conjunto de indivíduos, que podem ter metas conflitantes;
- Desconhecimento das restrições do problema;
- Critérios quantificáveis e outros apenas avaliados por escala de valor qualitativo.

O principal intuito e benefício dos métodos multicritérios é a facilitação no entendimento do problema e auxílio ao agente decisor, seja este um indivíduo, grupo de pessoas ou gestores organizacionais, a tomar decisões acerca de uma situação complexa, estabelecendo suas prioridades, valores e objetivos.

Diversos métodos foram desenvolvidos com a finalidade de apoiar problemas envolvendo a decisão multicritério. Estes métodos não possuem apenas a finalidade de auxiliar o decisor a resolver problemas conflitantes, mas também dar suporte em todo o processo decisório deixando claro todos os elementos da decisão e consequências das ações potenciais, propondo uma solução que se adeque a todos os pontos de vista restritivos do contexto, da forma mais próxima e satisfatória (SANTOS, 2017).

Diante da gama de opções de métodos multicritérios e de suas características particulares inerentes, é de importância ímpar a seleção do melhor método que se adeque ao problema estudado. Desta forma, uma classificação bastante recorrente encontrada na literatura são os tipos de problemáticas existentes (ROY, 1996):

- Problemática de Escolha ($P\alpha$) – orienta a decisão para a escolha do menor subconjunto de um determinado espaço de ações.
- Problemática de Classificação ($P\beta$) – objetiva a alocação de cada ação em uma classe;
- Problemática de Ordenação ($P\gamma$) – admite como objetivo ordenar ações, isto é, criação de um *ranking* dos conjuntos de ações;
- Problemática de Descrição ($P\delta$) – apoia a decisão através da descrição das ações e suas consequências.

De Almeida (2013) pondera sobre mais uma problemática distinta das citadas anteriormente:

- Problemática de Portfólio – visa a escolha de um ou mais conjunto de alternativas que atendam aos objetivos quando submetido a determinadas restrições que limitam a possibilidade de seleção dos mesmos.

Há ainda a classificação dos métodos multicritérios em compensatórios e não compensatórios. Métodos de decisão que, dependendo das necessidades do problema, considerem que o alto desempenho relativo de uma alternativa em um dado critério possa compensar ao menos parcialmente o baixo desempenho desta em outro critério, são denominados métodos compensatórios; os métodos que não o fazem são, por exclusão, denominados não-compensatórios.

Os métodos multicritérios de apoio à decisão se dividem em três famílias, identificadas de acordo com a modelagem das preferências do decisor: (i) Método de critério único de síntese; (ii) Métodos interativos e (iii) Métodos de sobreclassificação. O método interativo é um método de cálculos alternados, que possui sucessivas soluções e interações entre os cálculos em que o diálogo é a principal ferramenta de investigação de informações extras com relação às preferências do decisor, significando a contribuição direta do decisor na construção de uma solução, onde o mesmo se envolve no processo e não somente na definição do problema (MORAIS, 2006). De acordo com De Almeida (2010), esse método pode estar associado a problemas contínuos ou discretos, sendo em sua maioria os métodos de programação linear multiobjetivo os principais exemplos desta classificação.

Para De Almeida (2010), o método de critério único de síntese é assim chamado pois realiza uma comparação global de todas as alternativas, resultando na agregação de todos os critérios considerados em um único critério de síntese. É considerado como parte da Escola Americana e segundo Silva, Costa & Gusmão (2014), é um método compensatório e consiste em agregar variadas perspectivas em uma função que poderá ser maximizada ou otimizada. Dentre os métodos do grupo, destacam-se o MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*), VIP Analysis (*Variable Interdependent Parameters*), AHP (Processo Analítico Hierárquico), SMARTS (*Simple Multi-attribute Rating Technique using Exploiting Rankings*), o FITRADEOFF, e o MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*);

O Método de Sobreclassificação (*Outranking*), é um método não compensatório também conhecido como método de superação, prevalência ou subordinação e síntese. O método é baseado na comparação par a par entre as alternativas, consistindo na construção

de uma relação de sobreclassificação que representa a forte preferência do decisor e posterior exploração dessa relação para o apoio à decisão (MORAIS, 2006). Esse assume a possibilidade de incomparabilidade na estrutura de preferência do decisor, visto à incerteza e imprecisão na construção dessa estrutura. Dentre os vários métodos de sobreclassificação, os com maior destaque são a família PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) e a família ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*).

Métodos multicritérios para tomada de decisão podem ser utilizados para lidar com problemas em várias disciplinas, como instrumento de avaliação para escolhas estratégicas, dentre essas, meio ambiente (ZYLOUD *et al.*, 2016; SENANTE *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2017; PETERS; BAROUD; HORNBERGER, 2019), saúde (LEZAMA, ARROYO, HERNÁNDEZ, 2014; MUHLBACHER, KACZYNSKI, 2015), problemas sociais (SILVA, SCHRAMM, CARVALHO, 2013; VERHEYDEN, MOOR, 2015), economia (CHEN, WANG, 2010), energia sustentável (ALY; JENSEN; PEDERSEN, 2017; MARINAKIS *et al.*, 2017) indústria automobilística (VASILJEVIC *et al.*, 2018) e robótica (DAIM *et al.*, 2018).

3.3.1. Métodos multicritérios para gestão de sistemas de abastecimento

Diante das vastas possibilidades de utilização dos métodos multicritérios surge sua utilização para a seleção de conjuntos de ações para gestão eficiente em sistemas de abastecimento de água, conforme pode ser visto em detalhe no Quadro 2.

Para Alegre *et al.* (2013), para uma efetiva tomada de decisão é necessária uma abordagem abrangente que viabilize o desempenho desejado em um nível de risco aceitável, levando em consideração as despesas de implantação, manutenção e descapitalização ao longo da sua vida útil. Como também, a seleção cuidadosa de especialistas da área de estudo, pois são estes que detêm o conhecimento sobre o tema (MUTIKANGA *et al.*, 2010).

Quadro 2 – Resumo dos artigos publicados sobre gestão eficiente em SAA.

REFERÊNCIA	TÍTULO	OBJETIVO	MÉTODO MULTICRITÉRIO	RESULTADOS
Morais e Almeida (2006)	Modelo de decisão em grupo para gerenciar perdas de água	Priorização de alternativas, avaliando através dos critérios pré-estabelecidos, qual a mais adequada para minimização de perdas de água no sistema, utilizando decisores de interesses específicos.	Promethee II	Como resultados, a preferência das alternativas foram reabilitação de tubos e conexões, campanhas educativas, implantação de hidrômetros, substituição e aferição de hidrômetros e setorização e instalação de VRPs, nessa ordem.
Delgado-Galván <i>et al.</i> (2010)	An analytic hierarchy process for assessing externalities in water leakage management	Comparação entre o controle ativo de vazamento e controle passivo.	AHP	Os resultados obtidos mostram a inclusão de custos sociais e ambientais e apontam claramente na direção do controle ativo de vazamento como a melhor opção no controle de vazamentos.
Mutikanga, Sharma, Vairavamoorthy (2011a)	Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning tool for water loss management	Seleção e priorização de estratégias de redução de perdas de água. Foram identificadas e examinadas 7 alternativas de avaliação em 5 critérios principais conflitantes entre si.	Promethee II	As alternativas priorizadas foram substituição de redes, gerenciamento de pressão, velocidade e qualidade dos reparos, controle ativo de vazamentos, substituição de medidores, estabelecimento de DMC e controle de uso ilegal, nessa ordem.
Trojan e Morais (2012)	Prioritising alternatives for maintenance of water distribution networks: A group decision approach	Priorização de alternativas para redução do uso e desperdício de água, considerando simultaneamente critérios subjetivos e objetivos, indicando a alternativa mais adequada baseada nas preferências dos membros do grupo de áreas diferentes.	Electre II + Copeland	No resultado, obteve-se alternativas como: automação e treinamento em manutenção preventiva e setores de pressão e manobra e manutenção preventiva com redução de custos de manutenção.
Fontana e Morais (2013)	Using Promethee V to Select Alternatives so as to Rehabilitate water supply network with detected leaks	Escolha de um conjunto de alternativas viáveis para reabilitação de redes a partir dos critérios e das restrições estabelecidas pelo decisor sobre o problema.	Promethee V	Como resultado obteve-se uma medida de reabilitação para cada ponto de perda de água, respeitando as restrições impostas.

REFERÊNCIA	TÍTULO	OBJETIVO	MÉTODO MULTICRITÉRIO	RESULTADOS
Fontana e Morais (2016)	Decision model to control water losses in distribution networks	Seleção de um subconjunto de ações de manutenção preventiva para controle de perdas de água, levando em conta as restrições das empresas de água.	Smarter	Resultou na obtenção de um conjunto de alternativas para diminuição das perdas, dentre essas, uso ilegal da água, utilização de geofones elétricos para a detecção de vazamentos, implantação de hidrômetro e campanhas publicitárias.
Zyoud <i>et al.</i> (2016)	A framework for water loss management in developing countries under fuzzy environment: Integration of Fuzzy AHP with Fuzzy TOPSIS	Identificar as principais opções em um conjunto de alternativas propostas dentro de uma estrutura de estratégias para reduzir as perdas em sistemas de distribuição de água dos países em desenvolvimento.	Fuzzy AHP + Fuzzy Topsis	Os resultados mostraram que a alternativa de gestão e controle de pressão foi a mais prevalente, seguida pelo emprego de técnicas avançadas e estabelecimento de DMC.
Cambrainha e Fontana (2018)	A multi-criteria decision making approach to balance water supply-demand strategies in water supply systems	Definir um portfólio de alternativas para equilibrar as estratégias de oferta e demanda de água, respeitando as restrições da companhia de água.	Soda + Promethee V	Alternativas como criação de um manual com procedimentos padrão, criação de programa de imposto, penalização do desperdício de água e criação de time para desenvolver e analisar sistemas para reutilizar a água do SAA.
Egito, Fontana e Morais (2015)	Seleção de alternativas de conservação de água no meio urbano utilizando abordagem multicritério	Definir um subconjunto de alternativas de conservação e uso eficiente da água.	Promethee V	As alternativas selecionadas foram: campanhas educativas, implantação de dispositivos economizadores de água, projeto de esgotamento sanitário, setorização das redes, controle e fiscalização de fraudes e controle de vazamentos nas redes.
Morais e Almeida (2010)	Water network rehabilitation: A group decision-making approach	Escolher a alternativa apropriada dentre as 6 ações para reabilitar a infraestrutura da rede de água, que seja a melhor para todos os autores envolvidos.	Análise de rankings individuais	A reabilitação de tubulações e conexões foi a melhor alternativa.

Na seleção dos líderes, as opiniões de muitos gerentes, de setores diferentes como, operacional, ambiental e financeiro, são frequentemente levadas em consideração, sendo necessário, portanto, uma abordagem de tomada de decisão em grupo. Segundo Fontana & Morais (2017), as questões de abastecimento de água envolvem a sociedade como um todo, dessa forma, envolvendo múltiplos decisores e ampliando a complexidade da tomada de decisão. Zarghami, Abrishamchi & Ardakanian (2008) apontam como principais critérios na gestão de sistemas de abastecimento de água, a minimização dos custos, a maximização do fornecimento de água e a minimização dos riscos sociais.

As decisões tomadas por engenheiros e/ou gerentes da área de abastecimento são baseadas em suas informações dos sistemas, e são frequentemente caracterizadas por um grande número de alternativas, consequências incertas, interações complexas, como também, podem estar incompletas, desatualizadas e imprecisas (HYDE; MAIER; COLBY, 2004; CARRIÇO *et al.*, 2012).

Mediante o contexto, é necessário o uso de um método de decisão em grupo para auxiliar nesse processo. Segundo Chen, Kilgour & Hipel (2012), os métodos de decisão em grupo envolvem problemas de decisão multipartidária em que duas ou mais partes envolvidas independentes precisam tomar uma decisão em conjunto. Para Morais & Almeida (2010), a decisão em grupo é entendida como a unificação de interesses das partes envolvidas, visando a maximização da satisfação entre os membros do grupo.

Por fim, o método multicritério a ser escolhido é resultado de várias considerações, com a análise abrangendo o contexto da situação problema, as informações disponíveis, a racionalidade requerida, e a estrutura de preferência do decisor, a quantidade de decisores e do problema a ser enfrentado.

3.3.2. Dempster-Shafer theory

A Dempster-Shafer Theory (DST) foi introduzida por Dempster (1967), que desenvolveu um sistema de probabilidades inferiores e superiores, e, posteriormente, Shafer (1976) introduziu no método uma explicação mais aperfeiçoada para as funções que representam a crença dos decisores. Em suma, o DST é um método numérico para um raciocínio evidencial, considerado uma ferramenta matemática poderosa e sólida na modelagem tanto da imprecisão quanto da incerteza, podendo lidar também com informações ausentes e ignorância (SU *et al.*, 2015).

O DST é uma generalização da abordagem bayesiana e estão relacionadas entre si por ambas lidarem com crenças subjetivas. Desta forma, esta última está inclusa no DST como um caso especial, tendo em vista a dificuldade da mesma em modelar situações de incerteza, dadas suas premissas axiomáticas (AWASTHI; CHAUHAN, 2011; SILVA; DE ALMEIDA-FILHO, 2016). Além disso, segundo Deng & Chan (2011), o DST possui uma série de vantagens como a oportunidade de atribuir medidas de probabilidade a elementos focais e permitir o anexo de probabilidade ao quadro de discernimento. Consequentemente, o DST tem sido aplicado nas mais diversas áreas, como em análises de decisão multicritério (WANG; YANG; XU, 2006; BEYNON, 2005), análise de conflito na teoria da evidência (SILVA; DE ALMEIDA-FILHO, 2016; SILVA & ALMEIDA-FILHO, 2018), especialidades médicas (JONES; LOWE; HARRISON, 2002), jogos (DENG; JIANG; WANG, 2019), transportes (CHEN; DENG, 2018), processamento de imagem (LIN, 2010), fusão e classificação de informações (YE *et al.*, 2016; LIU, *et al.*, 2017), meio-ambiente (KANG *et al.*, 2020; ZADKARAMI; SHAHBAZIAN; SALAHSHOOR, 2017) e solos (CHEN; POURGHASEMI; ZHAO, 2017).

De acordo com Beynon, Curry & Morgan (2000), alguns dos principais recursos do DST são: a não necessidade de forçar as medidas de probabilidade ou crença a somarem a unidade, e a não exigência de que uma crença quando não comprometida com uma determinada proposição esteja comprometida com sua negação. Ainda conforme os autores, as medidas numéricas de incerteza podem ser atribuídas a conjuntos e subconjuntos de hipóteses, bem como hipóteses individuais, sendo a alocação total da crença variante de acordo com o tamanho do conhecimento sobre o assunto em questão.

Para elucidar o método, considere o seguinte exemplo, adaptado de Beynon, Curry & Morgan (2000), sobre a placa de um carro usado em um assalto. O senhor José foi assaltado e sabe-se que para a realização do ato, o assaltante chegou ao local de carro, cuja placa as três testemunhas tentaram memorizar e repassar à polícia. Das três letras iniciais da placa, apenas duas testemunhas entraram em consenso, sendo a última letra a dúvida em questão. Para cada um deles a letra que faltava era, A, B, O, respectivamente, tendo assim um conjunto de hipóteses, ou seja, quadro de discernimento, $\Theta = (\{A, B, O\})$. Uma das testemunhas possui 90% de certeza de que a última letra da placa era uma vogal, isto é, $P(\text{vogal}) = 0,9$. No DST, as medidas de incerteza são conhecidas como uma “Atribuição de Probabilidade Básica” (BPA), dessa forma, tem-se um BPA, m_1 de 0,9 referente ao elemento focal $\{A, O\}$, isto é, $m_1(\{A, O\}) = 0,9$.

Como não se sabe sobre o resto da probabilidade, a mesma é alocada para o quadro de discernimento geral, isto é, $m_1(\{A, B, O\}) = 0,1$.

Outra evidência foi relatada por uma das testemunhas com confiança de 0,7 que a letra não era A, dessa forma, temos BPA $m_2(\{B, O\}) = 0,7$. O restante da probabilidade é alocada para o quadro de discernimento geral $m_2(\{A, B, O\}) = 0,3$. No DST para a combinação de probabilidades é necessária uma regra de multiplicação mais complexa, combinando duas evidências, seu funcionamento pode ser mostrado na Tabela 1. Em resumo, o resultado da combinação é que, para todos os conjuntos A e B que se interceptam, onde A tem massa M_1 da atribuição m_1 ($m_1(\{A\}) = M_1$) e B tem massa M_2 da atribuição m_2 , a crença que se acumula é o produto m_1 e m_2 (BEYNON; CURRY; MORGAN, 2000).

Tabela 1 – Combinação de duas evidências.

	$m_1(\{A, O\}) = 0,9$	$m_1(\{A, B, O\}) = 0,1$
$m_2(\{B, O\}) = 0,7$	$m_3(\{O\}) = 0,63$	$m_3(\{B, O\}) = 0,07$
$m_2(\{A, B, O\}) = 0,3$	$m_3(\{A, O\}) = 0,27$	$m_3(\{A, B, O\}) = 0,03$

O exemplo anteriormente citado foi utilizado para introduzir os conceitos básicos da Teoria Dempster-Shafer. No modelo DST, $\Theta = \{H_1, H_2, \dots, H_N\}$ é o quadro de discernimento, e indica um conjunto finito de N hipóteses exaustivas e mutualmente exclusivas, que representam todas as proposições interessadas. Um BPA é uma função $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$, denominada função de massa, que satisfaz as Equações (1) e (2):

$$m(\emptyset) = 0 \quad e \quad (1)$$

$$\sum_{A \in \Theta} m(A) = 1 \quad (2)$$

Onde \emptyset é o conjunto vazio, que pertence a quaisquer proposições, A é qualquer subconjunto de Θ , e o conjunto formado por todos os subconjuntos possíveis de Θ é chamado de conjunto de potência 2^Θ (Equação 3), ou seja:

$$2^\Theta = \{\emptyset, \{H_1\}, \dots, \{H_N\}, \{H_1, H_2\}, \{H_1, H_N\}, \dots, \Theta\} \quad (3)$$

Qualquer subconjunto A do quadro de discernimento Θ , para o qual $m(A) > 0$, é chamado de elemento focal. Todos os elementos focais relacionados são chamados coletivamente de corpo de evidência. A probabilidade atribuída (também chamada de massa de probabilidade) $m(A)$ representa a força com que a evidência apoia A e mede exatamente a crença atribuída a A . Todas as probabilidades atribuídas somam à unidade e não há crença no conjunto vazio (\emptyset). A probabilidade atribuída a Θ , ou seja, $m(\Theta)$, é chamada de grau de ignorância (WANG; YANG; XU, 2006; BEYNON, 2005).

Anexa a cada BPA está a medida de crença, Bel , e a medida de plausibilidade, Pls , onde ambas são funções $2^\Theta \rightarrow [0,1]$, e são dadas pelas Equações (4) e (5):

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

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

No DST, a relação entre $Bel(A)$ e $Pls(A)$ divide o intervalo de evidência em intervalo de apoio, intervalo de incerteza e intervalo de rejeição (Figura 4).

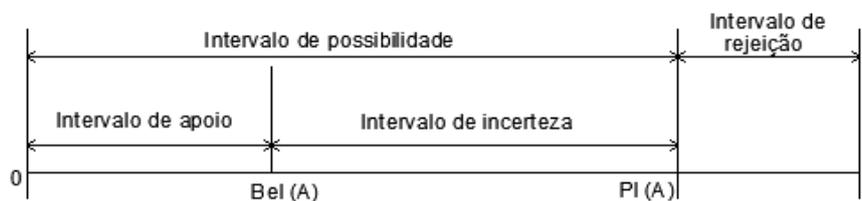


Figura 2 – Diagrama do relacionamento de $Bel(A)$ e $Pls(A)$

(Fonte: YE *et al.*, 2016).

O intervalo $[Bel(A), Pls(A)]$ é denominado intervalo de incerteza, que representa as probabilidades inferiores e superiores respectivamente, sendo cada par considerado o limite para a probabilidade “verdadeira” de A (DEMPSTER, 1967). O limite inferior pode ser visto como um grau de certeza (ou crença) de A ; enquanto o limite superior representa um grau de plausibilidade (ou possibilidade) de A , ou seja, até que ponto A não pode ser negado (DUBAIS; PRADE, 1988). Para Ye *et al.* (2016), o conceito de intervalo de incerteza é parecido com à probabilidade, mas não completamente expresso como. O intervalo torna a proposição possivelmente real, ou seja, não apoia ou nega de forma direta a proposição.

Uma suposição comum é admitir que a evidência que apoia A também nega “não A” (\underline{A}). Essa suposição leva à Equação (6):

$$Bel(A) = 1 - Pls(\underline{A}) \quad (6)$$

Para Dubois & Prade (1988), esta igualdade significa que a certeza de A é equivalente à impossibilidade de \underline{A} . É interessante observar que embora $Bel(A)$ e $Pls(\underline{A})$ sejam limites inferiores e superiores, a recíproca não é verdadeira, isto é, qualquer probabilidade com valor de intervalo não pode ser interpretada como um par de funções de crença e plausibilidade (DUBOIS; PRADE, 1988).

A teoria da evidência oferece ferramentas de agregação apropriadas. A partir da atribuição básica de crenças obtida de cada fonte de informação, é possível usar a Regra de Combinação de Dempster (RCD) para fornecer massas combinadas, compendiando o conhecimento das diferentes fontes. A regra assume que as fontes de informação são independentes e usa a soma ortogonal para combinar várias estruturas de crenças, conforme a Equação (7):

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus \dots \oplus m_K \quad (7)$$

Onde \oplus representa o operador da combinação. Segundo Deng & Chan (2011), o RCD é a primeira regra no âmbito da teoria da evidência que pode combinar dois BPA m_1 e m_2 para produzir um novo BPA. Dito isto, a Regra de Combinação de Dempster é dada pela Equação (8):

$$[m_1 \oplus m_2](C) = \begin{cases} 0, & x = \emptyset \\ \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A)m_2(B)}{1 - K}, & x \neq \emptyset \end{cases} \quad (8)$$

$$K = \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B) \quad (9)$$

Onde A e B são elementos focais e $[m_1 \oplus m_2](C)$ é um BPA; e K é o grau de conflito entre as evidências. O denominador $(1 - K)$ é chamado de fator de normalização. O processo de divisão por K é chamado de normalização e garante a condição representada por (2). Quanto maior o K, maior o número de fontes conflitantes. Se $K = 0$,

isso mostra que não há contradição entre as funções m_1 e m_2 ; e, se $0 < k < 1$, mostra compatibilidade parcial. Por fim, a soma ortogonal não existe quando $K = 1$, nesse caso, as fontes são totalmente contraditórias. A RCD é provada ser comutativa e associativa (SHAFER, 1976), ou seja, $m_1 \oplus m_2 = m_2 \oplus m_1$ (comutatividade) e $(m_1 \oplus m_2) \oplus m_3 = m_1 \oplus (m_2 \oplus m_3)$ (associatividade). Essas duas propriedades mostram que as evidências podem ser combinadas em qualquer ordem. Portanto, no caso de múltiplas estruturas de crenças, a combinação de evidências pode ser realizada de maneira pareada (AWASTHI; CHAUHAN, 2011; WANG; YANG; XU, 2006).

O DST envolve fortemente o acordo entre variadas fontes e ignora o conflito entre essas, e quando essas fontes concordam, reduz-se a incerteza no resultado da combinação. No entanto, no acontecimento de discordância entre as fontes, muitas vezes ocorre geração de resultados contra intuitivos (ZADEH, 1986). Para demonstração dessas situações, considere o seguinte exemplo apresentado por Silva e De Almeida-Filho (2018), onde o BPA atribuído a primeira função de crença é dada por $m_1(A) = 0,1$ e $m_1(C) = 0,9$; ao mesmo tempo que o segundo BPA atribuído à segunda função de crença é $m_2(A) = 0,1$ e $m_2(B) = 0,9$, tendo $\Theta = \{A, B, C\}$. Em resposta à combinação dos dois corpos de evidência do exemplo acima obtém-se $m_{12}(A) = 1$. Isso ocorre, pois, mesmo o elemento A possuindo a menor crença atribuída, ele é o elemento comum a ambos os corpos de evidência, sendo desconsiderados os altos valores atribuídos à B e C.

3.3.3. Processo Analítico Hierárquico

O Processo Analítico Hierárquico (AHP), do inglês *Analytic Hierarchy Process*, é um método de tomada de decisão que foi desenvolvido por Saaty (1977), sendo projetado para lidar com problemas complexos envolvendo vários critérios, e primeiramente aplicado ao estudo de transporte do Sudão (SAATY, 1977). O método consiste em formalizar e refletir sobre a compreensão de problemas complexos através da construção de um modelo hierárquico. A estrutura hierárquica é representada com multiníveis (Figura 5), onde cada nível representa a divisão do problema em partes cada vez menores, que, posteriormente, conduzirão o tomador de decisão através de uma série de julgamentos de comparação pareados. O objetivo principal encontra-se no topo da estrutura multinível, seguido sucessivamente pelos critérios de decisão, muitas vezes acompanhado pelos subcritérios a depender da complexidade do problema, a fim de

fornecer informações detalhadas sobre os critérios. Por fim, encontra-se o nível mais baixo, geralmente compreendido por um conjunto de alternativas (DELGADO-GALVÁN *et al.*, 2010; BEYNON; CURRY; MORGAN, 2000).

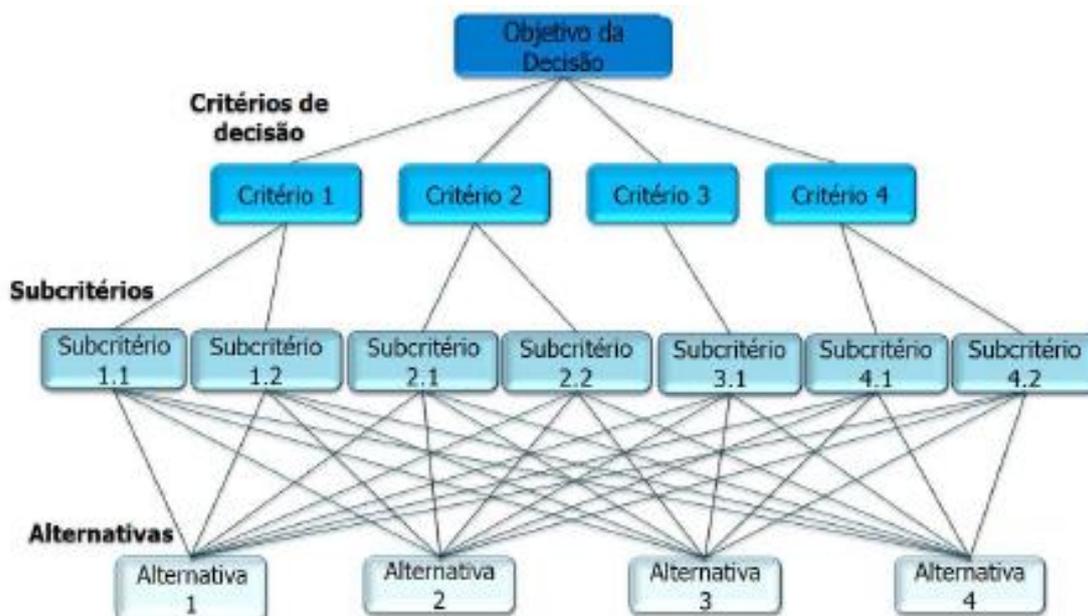


Figura 3 – Representação hierárquica de um problema de decisão no AHP.

O AHP é uma ferramenta flexível dentre os métodos multicritérios, não envolvendo matemática complexa e fazendo uso dos princípios da decomposição, comparação pareada e geração e síntese de vetores prioritários. Além disso, têm-se a facilidade de entendimento do método e sua desenvoltura para lidar efetivamente com dados quantitativos e qualitativos (KAHRAMAN; CEBECI; ULUKAN, 2003). Pesquisas com aplicações do AHP são comuns nas mais diversas áreas de estudo, como: avaliação de sustentabilidade ambiental (KAMARUZZAMAN *et al.*, 2018), educação (YUKSEL; DAGDEVIREN; KABAK, 2018; GHASSABI, 2017), transporte urbano (GHORBANZADEH *et al.*, 2019), solos (POURGHASEMI; ROSSI, 2017; RAHMAT *et al.*, 2017) ecologia marinha (KARAHALIOS, 2017), resíduos sólidos (KAMDAR *et al.*, 2019; KHODAPARAST; RAJABI; EDALAT, 2018), logística reversa (SIRISAWAT; KIATCHAROENPOL, 2018), indústria automobilística (JAIN *et al.*, 2018) e qualidade da água (SUTADIAN *et al.*, 2017).

No método AHP, o tomador de decisão deve expressar sua opinião sobre a importância relativa de cada critério (critérios dos quais os elementos subsequentes dependem) comparando-os em pares, sendo essas prioridades relativas registradas por

meio de matrizes (SILVA *et al.*, 2019). O número de comparações pareadas necessárias para uma matriz de ordem n (número de elementos comparados) é $(n(n-1))/2$, devido à sua reciprocidade e à soma dos seus elementos diagonais ser a unidade (SAATY, 1977). Para as alternativas de decisão, são necessárias comparações pareadas com cada um dos critérios. Para cada nível, as comparações aos pares são normalizadas produzindo um vetor de pesos (com soma unitária), sendo esses pesos, posteriormente “sintetizados” produzindo uma avaliação das alternativas. Em resumo, os elementos do nível superior são usados para comparar os elementos no nível imediatamente abaixo, onde para cada elemento utiliza-se as prioridades obtidas nas comparações para ponderar as prioridades no nível imediatamente abaixo (SAATY, 2008a; BEYNON; CURRY; MORGAN, 2000).

O AHP é comumente implementado com uma escala, cuja função é mapear os rótulos que indicam a visão do tomador de decisão para um valor numérico. Tais decisões ocorrem nos níveis, onde as comparações são fundamentadas, e suas representações são feitas por meio de uma escala de comparação proposta por Saaty (1977, 1990, 2008a, 2008b), cujos valores variam entre 1 e 9, como mostra o Quadro 3.

Quadro 3 – Escala de comparação do método AHP

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Duas atividades que contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância fraca de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida em relação a outra e sua dominância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorecendo uma atividade em relação a outra é do mais alto grau de certeza
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Quando é necessária uma condição de compromisso
Recíprocos	Se a atividade i tem uma das intensidades de importância ou de preferência de 1 a 9 quando comparada com a atividade j , então j tem o valor recíproco quando comparado com i .	

Algumas críticas são feitas ao método AHP tradicional, mesmo diante de sua aplicação bem-sucedida em problemas complexos. De acordo com Huang *et al.* (2014), no caso de uma grande quantidade de alternativas de julgamento, haverá inúmeras comparações pareadas entre essas, tornando complicado o uso do AHP. Outra desvantagem do AHP é a consistência das comparações. Num dado exemplo, se uma caneta A é preferida em relação à B, B preferida em relação à C e, por sua vez, C preferida em relação à A, o processo seria considerado inconsistente. Esse entendimento a respeito da consistência é medido e debatido dentro do método AHP. Em síntese, as preocupações com o método AHP são (BEYNON; CURRY; MORGAN, 2000):

- O número de comparações;
- A consistência das comparações;
- Falta de uma representação da ignorância dentro do modelo.

Um debate sobre as principais críticas do AHP pode ser encontrado em Smith e Winterfeldt (2004). Alguns pesquisadores em seus trabalhos criticam a consistência das comparações (COSTA; VANSNICK, 2008; KWIESIELEWICZ; UDEN, 2004; KARAPETROVIC; ROSENBLOOM, 1999), relatam irregularidades na classificação (DYER, 1990), questionam o quantitativo de comparações (SILVA, *et al.*, 2019; BEYNON; CURRY; MORGAN, 2000) ou indicam a ausência de representação da ignorância no método AHP (BEYNON; CURRY; MORGAN, 2000). Mediante o aludido, a combinação do AHP com outros métodos, tais como a Teoria Dempster-Shafer (DST), tem sido adotada para superar os problemas apontados.

3.3.4. Dempster-Shafer/AHP (DS/AHP)

Beynon, Curry & Morgan (2000) desenvolveram o método DS/AHP, que combina aspectos da teoria das evidências Dempster-Shafer (DEMPSTER, 1968; SHAFER, 1976) ao AHP (SAATY, 1977). O DS/AHP é baseado em uma estrutura hierárquica, como o AHP, e permite que o tomador de decisão possua um notório controle sobre os julgamentos feitos e realize julgamentos em grupos de alternativas (GAs), em vez de individuais ou por comparações pareadas (BEYNON, 2005b). A noção de ignorância é o que conduz a colocação ou não das alternativas em grupos, e, dessa forma, o DS/AHP é indicado para uso quando houver a presença de ignorância em um problema multicritério. No que tange à inclusão do DST no método, o mesmo permite uma quantificação

subjetiva de probabilidade, permitindo a capacidade de atribuir medidas de probabilidade (atribuições básicas de probabilidade) aos GAs, em detrimento à probabilidade clássica, em que medidas são dadas a alternativas individuais (BEYNON; COSKER; MARSHALL, 2001; BEYNON, 2002).

O DST/AHP possui a capacidade de atribuir níveis de incerteza e de conflito às decisões tomadas e contribui para o alívio e tratamento de algumas deficiências do método AHP tradicional. O método é fundamentado em uma medida de favorecimento do conhecimento que se tem de um grupo de alternativas em comparação com Θ (quadro de discernimento) de cada critério específico. Para cada critério, existem certos GAs, que incluem também Θ , sobre os quais o tomador de decisão pode expressar algum grau de conhecimento favorável. As alternativas das quais o tomador de decisão não tem opinião a respeito, podem ficar isentas de julgamentos e serem ignoradas (BEYNON; CURRY; MOORGAN, 2000; BEYNON; COSKER; MARSHALL, 2001).

Sendo a ignorância uma das dificuldades discutidas no método AHP, no DS/AHP considera-se o Θ como um grupo de alternativas permitindo a alocação da ignorância. Da mesma forma, a consistência do AHP foi questionada, observando-se no DS/AHP a ausência de comparações entre alternativas em pares, relacionando GAs com Θ , não trazendo problemas de consistência dentro de um critério, desde que não haja dois subconjuntos de Θ considerados em um critério com alternativas em comum (BEYNON; CURRY; MORGAN, 2000). Por exemplo, no critério X, se os conjuntos $\{1, 2\}$ e $\{1, 3\}$ fossem comparados favoravelmente a Θ , ocasionaria inconsistência no julgamento, devido a inclusão da alternativa 1 nos dois grupos, já que cada grupo recebeu níveis diferentes de favoritismo. É importante salientar, que os resultados obtidos através da aplicação do DS/AHP são níveis de favoritismo (crença e plausibilidade) em GAs.

Beynon, Cosker e Marshall (2001) introduzem um sistema especialista em DS/AHP, o qual permite todos os aspectos do método apresentado em Beynon, Curry & Morgan (2000) e que possibilita ao tomador de decisão uma maneira eficiente de aplicação do DS/AHP, levando a uma gama de aplicações específicas com uma consequente variedade de resultados. Ao mesmo tempo, o artigo estende a teoria para incluir novos aspectos da análise e representação dos resultados, incluindo, representações gráficas de níveis de favoritismos das alternativas e a incerteza associada.

Beynon (2002) aponta que uma das desvantagens do DS/AHP é a falta de uma estrutura matemática adequada. Com efeito, em Beynon, Curry & Morgan (2000), a explanação do método é feita em um exemplo específico sendo observada uma limitação

da filosofia matemática. Neste artigo está incluso uma análise matemática do DS/AHP, e oferece uma solução para o problema, através de funções explícitas, provando um conjunto de resultados que permitem que os níveis de prioridade dadas aos GAs sejam caracterizados por essas funções. Uma avaliação nos valores de escalas de classificação também foi realizada, observando o papel da escala de cinco pontos originalmente determinada em Beynon, Curry & Morgan (2000), resultando em escalas alternativas que permitem o aumento da faixa de incerteza, mantendo um número razoável e acertado de valores nesta escala.

Beynon (2005a) desenvolve uma nova abordagem DS/AHP, aplicado à agregação de evidências de membros individuais de um grupo de tomada de decisão com diferentes equivalências de importância dentro do grupo. Sendo, nesse contexto, dada atenção à não equivalência em importância dentro de um grupo, sendo definida uma taxa de desconto a depender do nível individual de importância apreendido. Neste mesmo ano, Beynon (2005b) realiza uma investigação no que diz respeito à medição do nível de ignorância nos julgamentos feitos, em conjunto com a elucidação de uma medida associada de não especificidade. Tais valores são utilizados na introdução de um gráfico de imprecisão, sendo esse um auxiliar na aferição dos resultados que podem sofrer alterações interativas nos julgamentos.

Beynon (2006) destaca o papel da medida de distância, onde a mesma permite identificar os membros do grupo de tomada de decisão que estão em maior acordo aos julgamentos feitos individualmente. Essa abordagem desenvolve o método DS/AHP como uma ferramenta para identificar consensos ou alianças entre os grupos introduzindo uma abordagem de “regra da maioria”.

Após análise da evolução e atualizações do DS/AHP no decorrer do tempo, o método tem sido aplicado nas mais diversas áreas e de variadas formas. Em Silva *et al.* (2019), aplica-se o DS/AHP de forma integrada em um conflito regulatório. Como resultado, a metodologia utilizada é projetada para o emprego no Modelo de Grafo para Resolução de Conflitos e aplicada em uma disputa verídica de construção na cidade de Ipojuca, Brasil. Nos estudos de Awasthi & Chauhan (2011), Chen & Deng (2018) e Su *et al.* (2015) a metodologia híbrida também é aplicada, nos dois primeiros, é direcionada a avaliação de impacto de medidas de transportes sustentáveis ao meio ambiente, e no último é realizada uma análise de confiabilidade humana. Em todos os casos, o AHP é usado na estruturação e classificação dos critérios e o DST para combinar as informações das mais variadas fontes.

O método DS/AHP é proposto para problemas multicritérios e mostra potencial em lidar com problemas que possuam informações incompletas (HUA; GONG; XU, 2008; SHIAU, 2013a; SHIAU, 2013b; HAN; DENG, 2018; HUANG *et al.*, 2014; JU; WANG, 2012), diferindo da maioria dos métodos atuais, pois resolve o problema diretamente com base em sua matriz de decisão incompleta.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. 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:

Critérios

- Redução das perdas reais (C1): Análise das alternativas que auxiliam na redução das perdas reais.
- Redução das perdas aparentes (C2): Análise das alternativas que auxiliam na redução das perdas aparentes.
- Facilidade de implantação (C3): Análise das alternativas com os menores tempos e grau de dificuldade para implantação, acarretando menos gastos com equipe e materiais.
- Transtorno para a população (C4): Capacidade das alternativas de causar menos perturbação para a população com sua implantação e/ou manutenção, causando menos interferências no dia-a-dia da população.
- Menor custo (C5): Análise das alternativas com os menores custos associados à sua implementação.
- Aumento de receita (C6): Capacidade da alternativa de produzir e aumentar a receita da empresa.

Alternativas

- Controle ativo de vazamentos (A1): Ações proativas a fim de reconhecer e reparar vazamentos que não tenham sido reportados.
- Controle passivo de vazamentos (A2): Ações reativas com o intuito de reparar vazamentos evidentes que tenham sido reportados à empresa.

- Gestão de pressão (A3): Assegurar o fornecimento suficiente e eficiente, bem como reduzir o excesso de pressão.
- Fiscalização contra fraudes (A4): Monitoramento eficiente e aplicação de dispositivos legais.
- Campanha educativa contra fraudes (A5): Promoção de conscientização dos usuários de água através de campanhas.
- Implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais (A6): Implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais, objetivando melhorar a precisão e conhecer o volume consumido individualizado.
- Implantação de hidrômetros em áreas em situação de vulnerabilidade (A7): Implantação de hidrômetros em áreas em situação de vulnerabilidade, objetivando evitar o desperdício de água e as perdas aparentes, pois é comum em áreas de baixa renda o consumo maior do que o estimado.
- 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): Reutilizar a água de lavagem para fins menos nobres, objetivando reduzir o consumo de água.
- Automação (A10): Otimização de processos nos sistemas de distribuição da água, auxiliando também no monitoramento e controle das perdas de água.

4.2. Estruturação do problema

A estrutura hierárquica do problema de gestão eficiente dos sistemas de distribuição de água é mostrada na Figura 6, que inclui os julgamentos de todos os tomadores de decisão. A estrutura 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 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 (DAs) 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. Segundo Beynon (2002), o número de grupos de alternativas (GAs)

identificados é decidido pelo decisor e pode refletir a quantidade de conhecimento que esse possui sobre o critério.

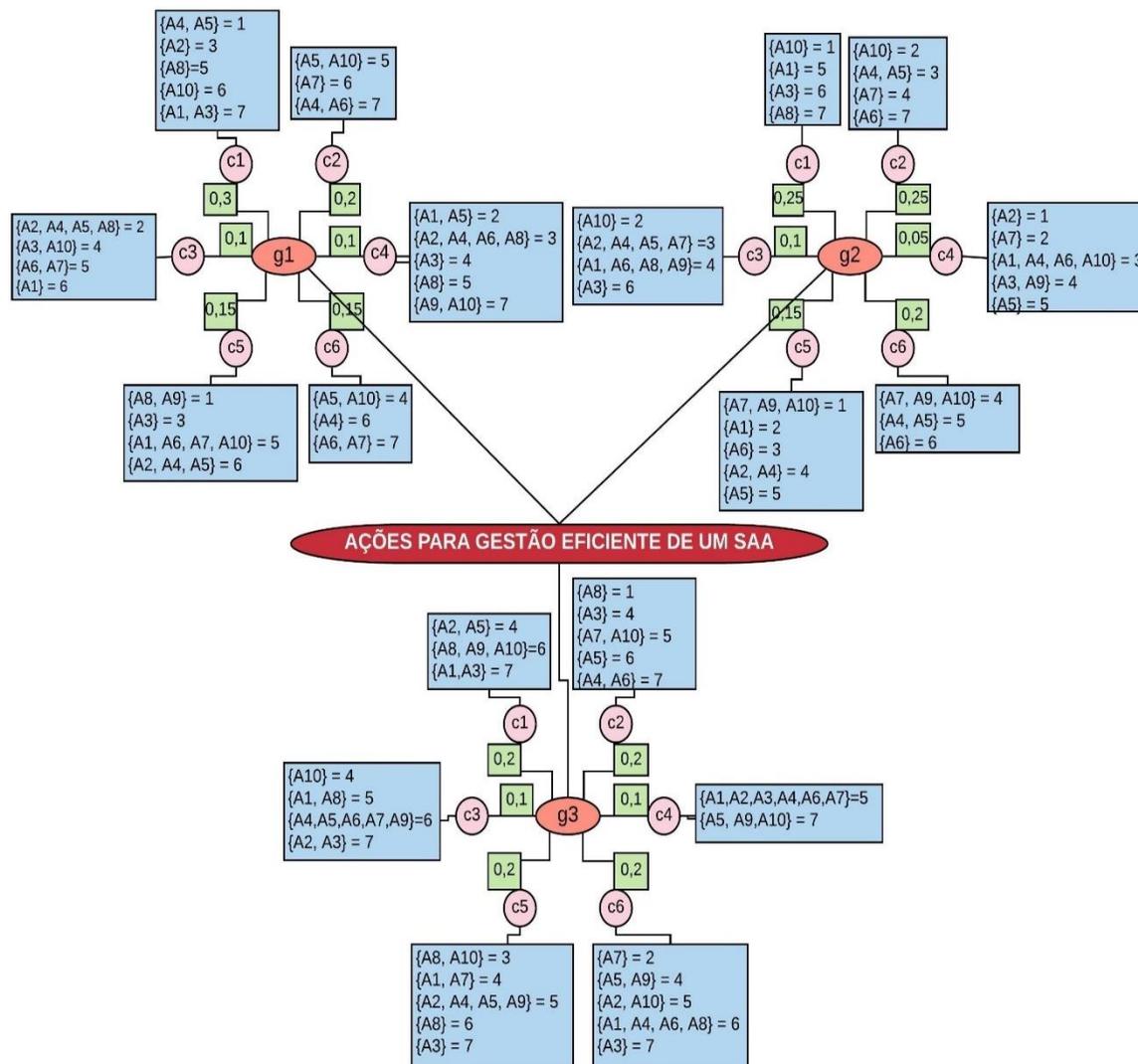


Figura 4 – Modelo DS/AHP do problema de decisão em grupo.

Para auxiliar na escolha das melhores ações direcionadas à gestão eficiente dos sistemas de distribuição de água, 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 (DMs), sendo esses:

- Dois engenheiros, gestores em empresas de abastecimento de água (g_1 e g_2).
- Um professor doutor e engenheiro civil especialista em perdas de água e sistemas de abastecimento (g_3).

Inicialmente, as avaliações serão realizadas por meio de questionários (Apêndice A), onde os três indivíduos g_1 , g_2 e g_3 serão designados para o grupo de tomada de decisão, que por sua vez, possui um caráter quantificável em termos de importância para o problema de “ações para gestão eficiente de sistemas de distribuição de água”. No grupo de tomada de decisão, não há interação entre os membros, cada DM confere conhecimento para cada critério através da atribuição de valores entre 0 e 1, que somam juntos o total de 1. É possível atribuir o valor 0 ao critério, determinando que o especialista não se julga capaz de avaliar.

No nível das DAs, os DMs utilizam uma escala de oito variáveis para que decidam graus de preferência em GAs. Essas escalas estão associadas a variáveis linguísticas, cuja interpretação verbal varia de “alternativa possui viabilidade inferior às demais” até “alternativa possui viabilidade extremamente superior”. É importante ressaltar, que a mesma DA não pode ser escolhida mais de uma vez em um mesmo critério, além de que, diferentes valores na escala de preferência devem ser dados aos GAs, em um mesmo critério. Para as análises do DS/AHP (BEYNON, 2005a) será adotado o Microsoft Excel®. Por fim, obtêm-se o agrupamento das melhores alternativas para a gestão eficiente de sistemas de distribuição de água. Para as diferentes etapas do processo, os resultados serão apresentados em tabelas.

4.3. Método DS/AHP

A questão central do problema é “ações para gestão eficiente de sistemas de distribuição de água”, onde a hierarquia é dividida nos julgamentos feitos pelos membros individuais do grupo (Ver Figura 4), sendo a união dos julgamentos dos indivíduos g_1 , g_2 e g_3 , o foco desta seção. O método DS/AHP desenvolvido e aplicado por Beynon (2005a) foi adotado para este fim e sua implementação começa na etapa 2 do processo. As etapas gerais do procedimento são explicadas a seguir:

Etapa 1 – aplicação de questionários (Apêndice A) para especialistas de diferentes regiões do Brasil com profundo entendimento do problema em questão. Suas funções são de avaliar a estrutura geral do problema, e desenvolver uma ferramenta eficiente e precisa para a gestão eficiente dos sistemas de distribuição, bem como o controle e redução das perdas de água. O questionário foi formulado para que a opinião do entrevistado fosse dada em termos linguísticos. A escolha da escala linguística constitui-se como uma

ferramenta importante na tomada de decisão, devendo sintetizar numericamente cada opinião qualitativa obtida. Com isso, é utilizada a escala de acordo com o Quadro 4. A avaliação corresponde ao grau de viabilidade de cada alternativa em relação a todas as demais alternativas, para cada critério.

Quadro 4 – 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 – Após respostas individuais de cada especialista no questionário, é feita a análise DS/AHP sobre os julgamentos de cada indivíduo. Cada especialista aplica seu conhecimento sobre cada critério de forma única, atribuindo aos critérios valores de VPC que vão de 0 até 1. Critérios com VPC de 0, indicando que o DM não é capaz de avaliar o critério ou não o considera relevante, dessa forma, o critério BOE será formado apenas pela crença exata da ignorância local. Para os critérios com VPC positivos, GAs são formados, sendo a preferência entre esses, percebida através da escolha do valor de escala positivo proposto no Quadro 2. 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.

No DST, um BOE é composto de atribuições de probabilidade (BPA) definidos por $m(\cdot)$. Cada $m(\cdot): 2^\theta \rightarrow [0,1]$ é uma função de massa tal que [1] e [2] são satisfeitos. A notação 2^θ é usada para representar o conjunto de potência de Θ (quadro de discernimento com o conjunto finito de hipóteses considerados no problema). É chamado de elemento focal qualquer subconjunto x do quadro de discernimento para o qual $m(x) \neq 0$ (BEYNON, 2005a).

Quando se compara o grupo de alternativas a Θ , o DM exprime algum grau de conhecimento favorável sobre cada um desses GAs, sendo essa a maior diferença do

método AHP, que utiliza comparações aos pares entre as alternativas individuais. No DS/AHP, cada GA identificado é comparado com todas as DAs possíveis do quadro de discernimento Θ (BEYNON, 2002).

Os GAs são escolhidos pelos DMs em cada critério, chamados inicialmente de elementos focais. Após o cálculo, os valores de BPA representam os níveis de crença exata nas preferências dos elementos focais. O BPA $m(\Theta)$ dado a Θ , é interpretado como um nível de ignorância, já que esse peso de evidência não é um discernível entre as hipóteses.

Em um único critério, se os d elementos focais (GAs) S_1, S_2, \dots, S_d são identificados e os valores de escala são a_1, a_2, \dots, a_d , respectivamente, o BOE (denotado por $m(\cdot)$) associado ao critério pode ser definido pelas Equações 10 (BEYNON, 2002; BEYNON, 2005a):

$$m(S_i) = \frac{a_i p}{\sum_{j=1}^d a_j p + \sqrt{d}}, i = 1, 2, \dots, d \quad m(\Theta) = \frac{\sqrt{d}}{\sum_{j=1}^d a_j p + \sqrt{d}} \quad (10)$$

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 – Após encontrado o critério BOE associados aos critérios de cada DM, é necessário agora, encontrar o 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 é definida por (BEYNON; CURRY; MORGAN, 2000; BEYNON, 2002; BEYNON, 2005a) através da Equação (11):

$$[m_1 \oplus m_2](x) = \begin{cases} 0, & x = \emptyset \\ \frac{\sum_{s_1 \cap s_2 = x} m_1(s_1) m_2(s_2)}{1 - \sum_{s_1 \cap s_2 = \emptyset} m_1(s_1) m_2(s_2)}, & x \neq \emptyset \end{cases} \quad (11)$$

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. O aumento de outro BOE no BOE combinado pode ser realizado.

Durante o processo de combinação dos BOE, os elementos focais e valores de BPA resultantes desse novo BOE combinado, são obtidos a partir da intersecção e multiplicação dos elementos focais e valores de BPA de cada critério BOE, essas combinações ocorrem até que se compare todos os critérios BOE. Como exemplo, para a problemática desse trabalho, seis critérios são elucidados, sendo com isso, necessárias cinco combinações.

Na última combinação, para encontrar o valor real dos BPA associados aos elementos focais do BOE individual de cada especialista, o denominador da Equação (11), exige a soma dos produtos dos valores pré-BPA associados a intersecção vazia (\emptyset) dos elementos focais e sua posterior subtração por um. Por fim, para cada especialista um BOE individual deve ser encontrado.

Etapa 4 – Nesta etapa é 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 (BEYNON, 2005a).

É importante deixar claro que a metodologia agrega opinião de especialistas e não busca consenso. Apesar das recomendações para uma situação de “decisão em grupo”, essa não deve ser definida como tal. De modo que, não há agregação de preferência no sentido literal, o que ocorre é a agregação de conhecimento, visto que, até os pesos refletem uma avaliação racional do decisor sobre os impactos das alternativas e não a “preferência” desse, não é porque o decisor “gosta” da alternativa e sim porque sabe do impacto dessa.

Etapa 5 – Para o ranking e identificação das melhores alternativas, as medidas de crença e plausibilidade são usualmente utilizadas, sendo definidas pelas Equações (4) e (5). Segundo Beynon (2002), de fato as medidas de crença e plausibilidade estão em GAs. Portanto, no conjunto das considerações, essas podem auxiliar na identificação do conjunto de escolhas de um DM.

Para Beynon (2005a), a medida de crença (Bel) é extraída da soma dos valores de BPA associados aos elementos focais de um BOE $m(\cdot)$, e representa a certeza de que a proposição x está em s_1 ou em qualquer subconjunto de s_1 . Ainda segundo Beynon

(2005a), a medida de plausibilidade é uma função $Pls(x)$, e representa até que ponto não acreditamos em s_1 .

Para a interpretação dos intervalos de crença $[Bel(x), Pls(x)]$, os mesmos podem ser vistos como os limites inferior e superior, respectivamente, das probabilidades para as quais x é suportado pelas evidências atuais (DEMPSTER, 1967; WANG; YANG; XU, 2006). Segundo Hua, Gong & Xu (2008):

- 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. Na Figura 4 é possível analisar essa interpretação do intervalo de crenças.

Dessa forma, os grupos de alternativas considerados os melhores, serão aqueles com os maiores valores de Pls associados.

Etapa 6 – Para a apresentação das DAs em forma de ranking, agrega-se a esta metodologia a transformação pignística, que serve para auxiliar em problemas de tomada de decisão que usam DST (SILVA; ALMEIDA-FILHO, 2016). Silva *et al.* (2019) aponta que esse processo é semelhante ao de defuzzificação da Teoria Fuzzy, transformando um intervalo de valores em um número *crisp* (número nítido), e que essa ideia de transformação, que descreve estruturas de crenças, foi axiomáticamente justificada por Smets & Kennes (1994).

A função de probabilidade pignística $BetP$ distribui 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 (SMETS; KENNES, 1994; SILVA *et al.* 2019). Com isso, $BetP$ é definido pela Equação (12):

$$BetP(A) = \sum_{B \subseteq \theta} m(B) \times \left(\frac{|A \cap B|}{|B|} \right) \quad (12)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para aplicação do método DS/AHP, cada especialista atribuiu 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 (VPC) entre 0 e 1, tendo como somatório final a unidade, como pode ser visto na Tabela 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.

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

Especialista → Critérios ↓	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

Na Tabela 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.

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. Visto que, no Brasil, uma redução das perdas de água de 45% para 25% nas empresas gestoras de saneamento acarretaria em uma disponibilização anual de recursos superior a um bilhão de reais. 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. Para Zyoud *et al.* (2016), essa prevalência dos critérios econômicos frente aos demais ocorre devido à dificuldade de manuseio dos países em desenvolvimento com os crescentes custos operacionais e de manutenção, resultante das estratégias de controle de perdas, levando-os a fortalecer esse tipo de critério. 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.

Como consequência do destaque recebido pelos critérios redução de perdas reais e aparentes, as pontuações nas alternativas que possuem relação direta com esses critérios passarão a ter maior representatividade na composição do panorama geral. Com o julgamento de cada DM sobre as DAs, foi possível chegar ao critério BOE, através da aplicação das equações [10]. Dessa forma, é fornecido os BPA dependentes dos VPCs de cada critério, conforme destacado na Tabela 3.

Na Tabela 3 é possível observar a influência dos VPCs, atribuídos aos critérios, nos valores de BPA de cada critério BOE. Os VPCs variam de 0 (sem conhecimento) até 1. Os que tendem a 1 representam bom conhecimento, de forma que os GAs possuem valores de crença mais exatos, diminuindo o nível de ignorância local (BEYNON, 2005). Para corroborar com esta afirmação, para o DM2, o critério “redução das perdas reais” (C1) recebeu VPC de 0,25, enquanto o critério “transtorno à população” (C4) recebeu VPC de 0,05 (ver Tabela 3), o maior e o menor valor de VPC deste DM. Com isso, analisando a Tabela 4, é possível observar que no critério C1, que possui o maior valor associado de VPC, a ignorância local representada por $M_{2,1}\{\Theta\}$ é a menor, enquanto que para o C4, que possui o menor valor de VPC, a ignorância local representada por $M_{2,4}\{\Theta\}$ é a maior, sendo os valores de ignorância local 0,2963 e 0,7488, respectivamente.

Tabela 3 – Critério BOE, para cada DM, com seus valores gerais de BPA.

Especialista → Critérios ↓	DM 1		DM 2		DM 3	
	Critério BOE	BPA	Critério BOE	BPA	Critério BOE	BPA
1	M1,1{A4, A5}	0,0340	M2,1{A10}	0,0370	M3,1{A2, A5}	0,1559
	M1,1{A2}	0,1019	M2,1{A1}	0,1852	M3,1{A8, A9, A10}	0,2338
	M1,1{A8}	0,1698	M2,1{A3}	0,2222	M3,1{A1, A3}	0,2728
	M1,1{A10}	0,2037	M2,1{A8}	0,2593	M3,1{∅}	0,3375
	M1,1{A1, A3}	0,2377	M2,1{∅}	0,2963		
	M1,1{∅}	0,2531				
2	M1,2{A5, A10}	0,1875	M2,2{A10}	0,0833	M3,2{A8}	0,0293
	M1,2{A7}	0,2251	M2,2{A4, A5}	0,1250	M3,2{A3}	0,1170
	M1,2{A4, A6}	0,2626	M2,2{A7}	0,1667	M3,2{A7, A10}	0,1463
	M1,2{∅}	0,3248	M2,2{A6}	0,2917	M3,2{A5}	0,1755
			M2,2{∅}	0,3333	M3,2{A4, A6}	0,2048
					M3,2{∅}	0,3271
3	M1,3{A2, A4, A5, A8}	0,0541	M2,3{A10}	0,0571	M3,3{A10}	0,0952
	M1,3{A3, A10}	0,1081	M2,3{A2, A4, A5, A7}	0,0857	M3,3{A1, A8}	0,1190
	M1,3{A6, A7}	0,1351	M2,3{A1, A6, A8, A9}	0,1143	M3,3{A4, A5, A6, A7, A9}	0,1429
	M1,3{A1}	0,1622	M2,3{A3}	0,1714	M3,3{A2, A3}	0,1667
	M1,3{∅}	0,5405	M2,3{∅}	0,5714	M3,3{∅}	0,4762
4	M1,4{A1, A5}	0,0461	M2,4{A2}	0,0167	M3,4{A1, A2, A3, A4, A6, A7}	0,1913
	M1,4{A2, A4, A6, A7}	0,0692	M2,4{A7}	0,0335	M3,4{A5, A9, A10}	0,2678
	M1,4{A3}	0,0922	M2,4{A1, A4, A6, A10}	0,0502	M3,4{∅}	0,5410
	M1,4{A8}	0,1153	M2,4{A3, A9}	0,0670		
	M1,4{A9, A10}	0,1614	M2,4{A5}	0,0837		
	M1,4{∅}	0,5157	M2,4{∅}	0,7488		
5	M1,5{A8, A9}	0,0353	M2,5{A7, A9, A10}	0,0334	M3,5{A8, A10}	0,0829
	M1,5{A3}	0,1059	M2,5{A1}	0,0669	M3,5{A1, A7}	0,1106
	M1,5{A1, A6, A7, A10}	0,1765	M2,5{A6}	0,1003	M3,5{A2, A4, A5, A9}	0,1382
	M1,5{A2, A4, A5}	0,2118	M2,5{A2, A4}	0,1337	M3,5{A6}	0,1658
	M1,5{∅}	0,4706	M2,5{A5}	0,1672	M3,5{A3}	0,1935
			M2,5{∅}	0,4984	M3,5{∅}	0,3090
6	M1,6{A5, A10}	0,1401	M2,6{A7, A9, A10}	0,1691	M3,6{A7}	0,0568
	M1,6{A4}	0,2102	M2,6{A4, A5}	0,2113	M3,6{A5, A9}	0,1137
	M1,6{A6, A7}	0,2452	M2,6{A6}	0,2536	M3,6{A2, A10}	0,1421
	M1,6{∅}	0,4045	M2,6{∅}	0,3660	M3,6{A1, A4, A6, A8}	0,1705
					M3,6{A3}	0,1990
					M3,6{∅}	0,3178

Diante dos valores de cada critério BOE, se faz necessário, a unificação destes para a construção de um BOE que represente a opinião geral de cada DM. Para isso, utilizou-se a expressão [11]. O somatório dos BPA de cada critério BOE é a unidade. Na Tabela 4 é possível observar os resultados intermediários da utilização da Regra da Combinação de Dempster para o critério 1 e 2 do DM1.

Tabela 4 – Resultado intermediário da combinação do critério BOE M1,1(.) e M1,2(.)

M1,1(.) \ M1,2(.)	{A5, A10}: 0,1875	{A7}: 0,2251	{A4, A6}: 0,2626	Ø: 0,3248
{A4, A5}: 0,0340	{A5}: 0,0064	Ø: 0,0076	{A4}: 0,0089	{A4, A5}: 0,0110
{A2}: 0,1019	Ø: 0,0191	Ø: 0,0229	Ø: 0,0267	{A2}: 0,0331
{A8}: 0,1698	Ø: 0,0318	Ø: 0,0382	Ø: 0,0446	{A8}: 0,0551
{A10}: 0,2037	{A10}: 0,0382	Ø: 0,0458	Ø: 0,0535	{A10}: 0,0662
{A1, A3}: 0,2377	Ø: 0,0446	Ø: 0,0535	Ø: 0,0624	{A1, A3}: 0,0772
Ø: 0,2531	{A5, A10}: 0,0475	{A7}: 0,0570	{A4, A6}: 0,0664	Ø: 0,0822

Na Tabela 4, nota-se que o elemento focal {A5} surgiu da intersecção dos elementos focais {A4, A5} e {A5, A10}. O resultado dessa intersecção é um pré-valor de BPA, devido às futuras combinações com outros critérios BOE. Dessa forma, o valor do pré-BPA foi encontrado através da multiplicação dos respectivos valores de BPA, como $M1,1\{A4, A5\} \times M1,2\{A5, A10\} = 0,0340 \times 0,1875 = 0,0064$. A soma dos produtos dos valores pré-BPA referentes à intersecção vazia Ø dos elementos focais é 0,4508. Para prosseguir com as demais combinações entre critérios BOE, o valor de Ø somado com os demais deve ser igual a um. Os critérios BOE foram combinados aos pares até o último, de forma a se obter o BOE individual de cada DM.

O BOE individual evidencia os julgamentos feitos pelo DM na forma de valores de crenças exatas em GAs, sendo essas as melhores alternativas escolhidas (BEYNON, 2005). Os BOE individuais de M1(.), M2(.) e M3(.), podem ser encontrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Corpos de evidência individuais de M1(.), M2(.) e M3(.

DM 1	DM 2	DM 3
M1({A1}): 0,0583	M2({A1}): 0,0632	M3({A1}): 0,0555
M1({A2}): 0,0309	M2({A2}): 0,0022	M3({A2}): 0,0485
M1({A3}): 0,0519	M2({A3}): 0,0946	M3({A3}): 0,2120
M1({A4}): 0,1146	M2({A4}): 0,0344	M3({A4}): 0,0291
M1({A5}): 0,0494	M2({A5}): 0,0823	M3({A5}): 0,0970
M1({A6}): 0,0686	M2({A6}): 0,2452	M3({A6}): 0,0559
M1({A7}): 0,0922	M2({A7}): 0,0750	M3({A7}): 0,0328
M1({A8}): 0,0528	M2({A8}): 0,0715	M3({A8}): 0,0338
M1({A9}): 0,0143	M2({A9}): 0,0129	M3({A9}): 0,0382
M1({A10}): 0,1541	M2({A10}): 0,0645	M3({A10}): 0,0993
M1({A1, A3}): 0,0399	M2({A1, A6}): 0,0009	M3({A1, A3}): 0,0259
M1({A1, A5}): 0,0038	M2({A2, A4}): 0,0210	M3({A1, A7}): 0,0115
M1({A2, A4}): 0,0034	M2({A3, A9}): 0,0061	M3({A1, A8}): 0,0091
M1({A3, A10}): 0,0085	M2({A4, A5}): 0,0915	M3({A2, A3}): 0,0112
M1({A4, A5}): 0,0091	M2({A7, A9, A10}): 0,0381	M3({A2, A4}): 0,0037
M1({A4, A6}): 0,0389	M2({A1, A4, A6, A10}): 0,0046	M3({A2, A5}): 0,0158
M1({A5, A10}): 0,0477	M2({A1, A6, A8, A9}): 0,0136	M3({A2, A10}): 0,0106
M1({A6, A7}): 0,0689	M2({A2, A4, A5, A7}): 0,0102	M3({A4, A6}): 0,0453
M1({A8, A9}): 0,0032	M2(Φ): 0,0681	M3({A5, A9}): 0,0342
M1({A2, A4, A5}): 0,0210		M3({A7, A10}): 0,0106
M1({A1, A6, A7, A10}): 0,0159		M3({A8, A10}): 0,0108
M1({A2, A4, A5, A8}): 0,0042		M3({A9, A10}): 0,0081
M1({A2, A4, A6, A7}): 0,0057		M3({A1, A4, A6}): 0,0045
M1(Φ): 0,0425		M3({A4, A5, A9}): 0,0032
		M3({A4, A6, A7}): 0,0025
		M3({A5, A9, A10}): 0,0117
		M3({A8, A9, A10}): 0,0164
		M3({A1, A4, A6, A8}): 0,0127
		M3({A2, A4, A5, A9}): 0,0106
		M3({A4, A5, A6, A7, A9}): 0,0071
		M3({A1, A2, A3, A4, A6, A7}): 0,0084
		M3(Φ): 0,0237

As variações no quantitativo, conteúdo e diferenças das alternativas, dentro dos GAs de cada DM, são consequências do nível de julgamento e conhecimento da problemática por parte de cada especialista consultado. O somatório dos BPA de cada BOE individual é a unidade.

Com os dados de corpos de evidência individuais de cada DM, é possível a combinação das evidências de cada DM em uma decisão em grupo. O resultado dessa combinação é o grupo BOE definido por $m_g^T(\cdot)$, que pode ser visualizado na Tabela 6.

O DS/AHP pertence ao paradigma de agregação de opinião/conhecimento de especialistas e, sendo assim, não se preocupa com consenso entre os especialistas. Como consequência, quando empregada, pode ou não gerar altos graus de conflitos, como foi o caso do presente trabalho ($k = 0,94$). Isso se dá simplesmente pelo fato de os especialistas terem ou não opiniões/conhecimentos homogêneos.

Tabela 6 – Elementos focais e valores de BPA que compõem o grupo $m_g^T(\cdot)$.

{A1}: 0,05674	{A2}: 0,01748	{A3}: 0,11771	{A4}: 0,12899
{A5}: 0,15083	{A6}: 0,21782	{A7}: 0,06607	{A8}: 0,02592
{A9}: 0,01455	{A10}: 0,15522	{A1, A3}: 0,00428	{A1, A5}: 0,00011
{A1, A6}: 0,00076	{A1, A7}: 0,00084	{A1, A8}: 0,00058	{A2, A3}: 0,00060
{A2, A4}: 0,0240	{A2, A5}: 0,00155	{A2, A10}: 0,00056	{A3, A9}: 0,00011
{A3, A10}: 0,00025	{A4, A5}: 0,00676	{A4, A6}: 0,00853	{A4, A7}: 0,00003
{A4, A8}: 0,00007	{A5, A9}: 0,00182	{A5, A10}: 0,00212	{A6, A7}: 0,00379
{A6, A9}: 0,00008	{A7, A9}: 0,00021	{A7, A10}: 0,00148	{A8, A9}: 0,00037
{A8, A10}: 0,00057	{A9, A10}: 0,00151	{A1, A4, A6}: 0,00033	{A1, A6, A7}: 0,00017
{A1, A6, A8}: 0,00014	{A1, A6, A10}: 0,00003	{A2, A4, A5}: 0,00121	{A2, A4, A7}: 0,00010
{A4, A5, A7}: 0,00006	{A4, A5, A9}: 0,00017	{A4, A6, A7}: 0,00020	{A5, A9, A10}: 0,00062
{A7, A9, A10}: 0,00071	{A8, A9, A10}: 0,00087	{A1, A4, A6, A8}: 0,00068	{A1, A4, A6, A10}: 0,00008
{A1, A6, A7, A10}: 0,00047	{A1, A6, A8, A9}: 0,00025	{A2, A4, A5, A7}: 0,00019	{A2, A4, A5, A8}: 0,00013
{A2, A4, A5, A9}: 0,00056	{A2, A4, A6, A7}: 0,00023	{A4, A5, A6, A7, A9}: 0,00038	{A1, A2, A3, A4, A6, A7}: 0,00045

Um total de 57 GAs compõem o grupo $m_g^T(\cdot)$. Os valores de cada BPA $m_g^T(\cdot)$ indicam o nível de crença exata no grupo associado de alternativas que incluem as melhores alternativas (BEYNON, 2005).

Utilizando os dados da Tabela 6, as melhores alternativas foram identificadas através das medidas de crença (Bel) e plausibilidade (Pls). Neste contexto, os diferentes GAs (de tamanhos 1 a 10) estão identificados. As respostas ocorrem em grupos e os acréscimos das alternativas acontecem na horizontal, conforme disposto na Tabela 7.

Tabela 7 – Grupos de alternativas com os maiores valores de Bel e Pls.

Class.	DM 1			
	Grupos de alternativas	Bel	Grupos de alternativas	Pls
1	A10	0,154	A10	0,269
2	A4 , A10	0,269	A4 , A10	0,451
3	A4, A7 , A10	0,361	A4, A7 , A10	0,603
4	A4, A6 , A7, A10	0,537	A4, A6 , A7, A10	0,695
5	A4, A5 , A6, A7, A10	0,612	A1 , A4, A6, A7, A10	0,749
6	A1 , A4, A5, A6, A7, A10	0,664	A1, A3 , A4, A6, A7, A10	0,847
7	A1, A3 , A4, A6, A7, A8, A10	0,765	A1, A3, A4, A5 , A6, A7, A10	0,899
8	A1, A2 , A3, A4, A5, A6, A7, A10	0,875	A1, A3, A4, A5, A6, A7, A8 , A10	0,930
9	A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8 , A10	0,940	A1, A2 , A3, A4, A5, A6, A7, A8, A10	0,986
10	A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9 , A10	1,000	A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9 , A10	1,000
Class.	DM 2			
	Grupos de alternativas	Bel	Grupos de alternativas	Pls
1	A6	0,245	A6	0,332
2	A3 , A6	0,340	A5 , A6	0,516
3	A3, A5 , A6	0,422	A5, A6, A7	0,572
4	A3, A4 , A5, A6	0,497	A3 , A5, A6, A7	0,685
5	A3, A4, A5, A6, A7	0,569	A3, A5, A6, A7, A8	0,750
6	A3, A4, A5, A6, A7, A8	0,633	A3, A5, A6, A7, A8, A10	0,850
7	A3, A4, A5, A6, A7, A8, A10	0,697	A1 , A3, A5, A6, A7, A8, A10	0,922
8	A1 , A3, A4, A5, A6, A7, A8, A10	0,828	A1, A3, A4 , A5, A6, A7, A8, A10	0,985
9	A1, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9 , A10	0,898	A1, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9 , A10	0,998
10	A1, A2 , A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10	1,000	A1, A2 , A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10	1,000
Class.	DM 3			
	Grupos de alternativas	Bel	Grupos de alternativas	Pls
1	A3	0,212	A3	0,281
2	A3, A10	0,311	A3, A5	0,461
3	A3, A5 , A10	0,408	A3, A5, A10	0,617
4	A3, A5, A9 , A10	0,464	A3, A5, A6 , A10	0,738
5	A2 , A3, A5, A9, A10	0,546	A1 , A3, A5, A6, A10	0,776
6	A1 , A2, A3, A5, A9, A10	0,632	A1, A3, A5, A6, A9 , A10	0,852
7	A1, A2, A3, A5, A8 , A9, A10	0,724	A1, A2 , A3, A5, A6, A9, A10	0,885
8	A1, A2, A3, A5, A6 , A8, A9, A10	0,794	A1, A2, A3, A5, A6, A8 , A9, A10	0,933
9	A1, A2, A3, A4 , A5, A6, A8, A9, A10	0,849	A1, A2, A3, A5, A6, A7 , A8, A9, A10	0,967
10	A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 , A8, A9, A10	1,000	A1, A2, A3, A4 , A5, A6, A7, A8, A9, A10	1,000

Na Tabela 7 estão dispostos os grupos de alternativas de cada DM, divididos entre os maiores valores de Bel e de Pls. É notório algumas divergências entre os GAs, em cada tamanho, para os maiores valores de Bel e de Pls. Como visto no DM2, para o tamanho 2, tem-se o GA {A3, A6} com os maiores valores de Bel, e nessa mesma categoria, tem-se as DAs {A5, A6} com os maiores valores de Pls. Dessa forma, seguindo a

recomendação de Hua, Gong & Xu (2008), decidiu-se optar pelos valores de Pls, pois estes representam a probabilidade máxima de suporte possível para a alternativa ou conjunto destas. Contudo, a apresentação dos grupos de alternativas reduziu-se ao tamanho até sete, visto que os GAs de tamanho até dez expunham todos as alternativas, sendo utilizado apenas para demonstrar a condução dos resultados. Na Tabela 8, visualiza-se as melhores DAs de cada DM de tamanho até sete.

Tabela 8 – Melhores grupos de alternativas para cada DM.

Decisor → Class. ↓	DM1	DM2	DM3
1	A10	A6	A3
2	A4 , A10	A5 , A6	A3, A5
3	A4, A7 , A10	A5, A6, A7	A3, A5, A10
4	A4, A6 , A7, A10	A3 , A5, A6, A7	A3, A5, A6 , A10
5	A1 , A4, A6, A7, A10	A3, A5, A6, A7, A8	A1 , A3, A5, A6, A10
6	A1, A3 , A4, A6, A7, A10	A3, A5, A6, A7, A8, A10	A1, A3, A5, A6, A9 , A10
7	A1, A3, A4, A5 , A6, A7, A10	A1 , A3, A5, A6, A7, A8, A10	A1, A2 , A3, A5, A6, A9, A10

Convém mencionar, que a DA acrescentada ao grupo subsequente é dependente da DA anterior, de forma que, mesmo que a DA tenha um alto valor de Bel e Pls individual, não é indicativo de que essa será a próxima a ser incluída. A DA a ser acrescentada será aquele que, em conjunto com o DA anterior, possuir o maior valor de Bel e Pls associados. De modo semelhante, utilizando os dados da Tabela 6, os melhores valores de Bel e Pls das alternativas foram encontrados para o BOE do grupo. Os resultados também são dados em grupos de alternativas, e estão dispostos do tamanho 1 até o 10. Os resultados podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 9 – Grupos de alternativas com os maiores valores de Bel e Pls do $m_g^T(\cdot)$.

Class.	Alternativas	Bel	Alternativas	Pls
1	{ A6 }	0,2178	{ A6 }	0,2357
2	{A6, A10 }	0,3730	{ A5 , A6}	0,4018
3	{ A5 , A6, A10}	0,5260	{A5, A6, A10 }	0,5630
4	{ A4 , A5, A6, A10}	0,6703	{ A4 , A5, A6, A10}	0,6945
5	{ A3 , A4, A5, A6, A10}	0,7882	{ A3 , A4, A5, A6, A10}	0,8172
6	{A3, A4, A5, A6, A7 , A10}	0,8599	{A3, A4, A5, A6, A7 , A10}	0,8844
7	{ A1 , A3, A4, A5, A6, A7, A10}	0,9237	{ A1 , A3, A4, A5, A6, A7, A10}	0,9417
8	{A1, A3, A4, A5, A6, A7, A8 , A10}	0,9516	{A1, A3, A4, A5, A6, A7, A8 , A10}	0,9680
9	{A1, A2 , A3, A4, A5, A6, A7, A8, A10}	0,9765	{A1, A2 , A3, A4, A5, A6, A7, A8, A10}	0,9855
10	{A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9 , A10}	1,0000	{A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9 , A10}	1,0000

Como forma de mostrar a obtenção dos resultados expostos na Tabela 9, o GA tamanho três {A5, A6, A10} foi selecionado, o qual possui maior valor de crença (Bel) e plausibilidade (Pls) de todos os grupos possíveis de tamanho três. A obtenção dos respectivos valores Bel ({A5, A6, A10}) = 0,5260 e Pls ({A5, A6, A10}) = 0,5630 foi feita a partir dos dados do BOE $m_g^T(\cdot)$ da Tabela 7, e podem ser vistos a seguir:

$$Bel(\{A5, A6, A10\}) = \sum_{S_2 \subseteq \{A5, A6, A10\}} M_g^T(\{A5, A6, A10\}) = M_g^T(\{A5\}) + M_g^T(\{A6\}) + M_g^T(\{A10\}) + M_g^T(\{A5, A10\}) = 0,5260.$$

$$Pls(\{A5, A6, A10\})$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{\{A5, A6, A10\} \cap S_2 \neq \emptyset} M_g^T(\{A5, A6, A10\}) = M_g^T(\{A5\}) + M_g^T(\{A6\}) \\ &+ M_g^T(\{A10\}) + M_g^T(\{A1, A5\}) + M_g^T(\{A1, A6\}) + M_g^T(\{A2, A5\}) \\ &+ M_g^T(\{A2, A10\}) + M_g^T(\{A3, A10\}) + M_g^T(\{A4, A5\}) + M_g^T(\{A4, A6\}) \\ &+ M_g^T(\{A5, A9\}) + M_g^T(\{A5, A10\}) + M_g^T(\{A6, A7\}) + M_g^T(\{A6, A9\}) \\ &+ M_g^T(\{A7, A10\}) + M_g^T(\{A8, A10\}) + M_g^T(\{A9, A10\}) \\ &+ M_g^T(\{A1, A4, A6\}) + M_g^T(\{A1, A6, A7\}) + M_g^T(\{A1, A6, A8\}) \\ &+ M_g^T(\{A1, A6, A10\}) + M_g^T(\{A2, A4, A5\}) + M_g^T(\{A4, A5, A7\}) \\ &+ M_g^T(\{A4, A5, A9\}) + M_g^T(\{A4, A6, A7\}) + M_g^T(\{A5, A9, A10\}) \\ &+ M_g^T(\{A7, A9, A10\}) + M_g^T(\{A8, A9, A10\}) + M_g^T(\{A1, A4, A6, A8\}) \\ &+ M_g^T(\{A1, A4, A6, A10\}) + M_g^T(\{A1, A6, A7, A10\}) \\ &+ M_g^T(\{A1, A6, A8, A9\}) + M_g^T(\{A2, A4, A5, A7\}) \\ &+ M_g^T(\{A2, A4, A5, A8\}) + M_g^T(\{A2, A4, A5, A9\}) \\ &+ M_g^T(\{A2, A4, A6, A7\}) + M_g^T(\{A4, A5, A6, A7, A9\}) \\ &+ M_g^T(\{A1, A2, A3, A4, A6, A7\}) + M_g^T(\emptyset) = 0,5630. \end{aligned}$$

A resposta final do estudo é dada por meio da classificação em grupo das melhores alternativas e pelo ranqueamento. Os melhores GAs apontam de uma a sete alternativas. Na prática, a implantação de qual grupo de alternativas adotar dependeria da disponibilidade financeira da empresa gestora. Com isso, quanto mais recurso disponível, mais alternativas serão implantadas, gerando mais receita e mais benefícios para o meio ambiente e a sociedade.

Na Tabela 10 é possível visualizar os grupos das melhores alternativas para a gestão eficiente de um sistema de distribuição de água. Se apenas uma alternativa for necessária para a gestão eficiente, a DA “implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais” (A6) é identificada como a melhor, baseado nos valores de crença e plausibilidade. Adicionalmente, um conjunto de considerações de mais de uma alternativa pode ser identificada.

Tabela 10 – Melhores grupos de alternativas de tamanho até 7.

Class.	Alternativas
1	{ A6 }
2	{ A5 , A6}
3	{A5, A6, A10 }
4	{ A4 , A5, A6, A10}
5	{ A3 , A4, A5, A6, A10}
6	{A3, A4, A5, A6, A7 , A10}
7	{ A1 , A3, A4, A5, A6, A7, A10}

Outra forma de apresentação dos resultados é através do ranking das alternativas, para isso, fez-se uso dos dados da Tabela 5, aplicando sobre esses a transformação pignística (Equação 12). O ranking individual de cada DM das alternativas para gestão eficiente de sistemas de distribuição de água é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Ranking individual das alternativas para gestão eficiente de SAA.

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 possível observar na Tabela 11 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.

O ranking do grupo de especialistas é apresentado na Tabela 12, onde se observa que a “implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais” é a ação mais indicada.

Tabela 12 – Ranking das alternativas para gestão eficiente de SAA.

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

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 (MORAIS; ALMEIDA, 2006; FONTANA; MORAIS, 2016). Diante de especialistas com atuação em concessionárias de água, é comum o despontar de alternativas voltadas ao retorno financeiro da empresa, onde segundo Zyoud *et al.* (2016), no campo da gestão de sistemas, visando a redução das perdas de água, a economia geralmente desempenha um papel central. Contudo, sabendo da difundida perda de recurso financeiro no Brasil, ocasionada pela cobrança de faturas por estimativa ou valor mínimo (BEZERRA; GOMES, 2019), ainda há uma busca pelo total hidrometração dos consumidores, como também a manutenção dos mesmos. No dia a dia das companhias, 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.

Diante do exposto, é interessante pontuar a significativa diferença de colocação da alternativa “implantação de hidrômetros em áreas em situação de vulnerabilidade” (A7).

Como o consumo desta população é baixo e as contas de água são, em muitos casos, subsidiadas, a viabilidade é questionada por muitos técnicos. Brevilieri & Padilha (2017) destacam que a implantação da medição de consumo nessas áreas de vulnerabilidade minimiza impactos danosos causados pelo desperdício e apontam o incremento no faturamento da empresa. Clientes sem hidrômetros, normalmente, não possuem bons hábitos de consumo e é comum um desperdício maior do que o consumo dos clientes medidos (MORAIS, 2006).

Juntamente com a alternativa A6, no grupo de tamanho dois, foi adicionada a alternativa “campanha educativa contra fraudes” (A5), logo seguida pela inclusão da alternativa “automação” (A10) no grupo de alternativas de tamanho três (Tabela 10). Para o DM2, a alternativa {A6} também foi identificada como a melhor, sendo as opções {A5, A6} igualmente escolhidas como melhores alternativas para gestão. Enquanto para o DM2 a opção {A10} foi a melhor alternativa, e para o DM3 a opção “controle de pressão” (A3) foi a selecionada (Tabela 8). No ranqueamento, essas três alternativas se mantiveram como as primeiras, porém, a alternativa {A10} se encontra em segundo e a {A5} em terceiro.

Em segundo no ranking, tem-se a automação. Trojan & Morais (2012) indicam a opção automação como principal alternativa de manutenção de um sistema. Apesar do seu alto custo associado, a alternativa, além de imprescindível para a operação assistida e controle automático dos processos dos SAA, auxilia no controle das perdas de água e na eficiência energética (BEZERRA; GOMES, 2019; VOTRE *et al.*, 2014).

Os estudos de Morais & Almeida (2006), Egito, Fontana & Morais (2015), Fontana & Morais (2016) também destacam a importância do uso de campanhas educativas, apontando como efeito das campanhas educativas contra fraudes, a agilidade na comunicação e notificação contra o uso ilegal da água e a sensibilização dos clientes, chamando-os à responsabilidade.

Apesar de sua boa colocação para alguns dos DMs, a alternativa “gestão de pressão” (A3) não atendeu aos requisitos aguardados. Sua priorização é bem documentada em casos específicos de gestão de perdas. Zyoud *et al.*, (2016) apontam o potencial dessa alternativa para garantir o abastecimento de água de forma suficiente, como também reduzir as elevadas pressões que contribuem para o aumento desnecessário dos vazamentos. Entretanto, quando o estudo considera cenários mais complexos de gestão de sistemas de distribuição de água, a alternativa decai de patamar, abrindo espaço

para outras alternativas. Mesmo assim, a alternativa se mantém em boa colocação, sendo a quinta no ranking entre as melhores alternativas para a gestão eficiente.

As opções “controle passivo de vazamentos” (A8), “reabilitação de redes de distribuição” (A2) e “reaproveitamento de água de lavagem de filtros” (A9) ficaram fora do grupo das melhores alternativas, como também, foram classificadas como as três últimas colocadas no ranking. No ranqueamento, em todas as avaliações individuais, as alternativas {A2}, {A8} e {A9} estiveram abaixo da posição seis, dessa forma permanecendo sem entrar no grupo final das melhores alternativas, demonstrando assim, sua baixa prioridade entre os especialistas.

É notória a preferência por alternativas frequentemente usadas para o controle das perdas aparentes entre os grupos das melhores alternativas. Isso demonstra a necessidade das empresas gestoras de voltar sua atenção para o controle das perdas financeiras, visando o conseqüente 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 dos usuários, tudo isso agregado a uma ferramenta de controle automático atualmente considerada imprescindível para a gestão de sistemas de distribuição de água.

Convém salientar o caráter generalista da pesquisa, sendo evidente as particularidades de cada sistema, de modo que as outras alternativas podem ser implementadas, ou até mesmo usadas em diferentes ordens das indicadas nesse estudo, e a concessionário obter, da mesma forma, resultados satisfatórios.

Por último, a análise de sensibilidade foi realizada para verificar a consistência do modelo adotado e avaliar o comportamento de algumas variáveis quanto às incertezas inseridas em um determinado fator relevante ao problema, principalmente no que tange à diferença de preferência dos critérios. Segundo Guo & Zhao (2015), essa análise é primordial para investigar os impactos dos VPCs dos critérios na tomada de decisão final. Dito isto, foi proposto apenas um cenário de avaliação para a análise de sensibilidade. Neste novo cenário, optou-se por considerar um mesmo valor para todos os VPCs, igual a 0,1666. De forma a conduzir a análise de sensibilidade com detalhes, pode ser observado o resultado para o intervalo de crença $[Bel(x), Pls(x)]$ na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados obtidos no novo cenário.

Class.	Grupo de alternativas	Bel	Grupo de alternativas	Pls
1	{ A6 }	0,2310	{ A6 }	0,2523
2	{ A5 , A6}	0,3995	{ A5 , A6}	0,4339
3	{ A4 , A5, A6}	0,5453	{ A4 , A5, A6}	0,5698
4	{A4, A5, A6, A10 }	0,6675	{A4, A5, A6, A10 }	0,6945
5	{ A3 , A4, A5, A6, A10}	0,7803	{ A3 , A4, A5, A6, A10}	0,8105
6	{A3, A4, A5, A6, A7 , A10}	0,8628	{A3, A4, A5, A6, A7 , A10}	0,8862
7	{ A1 , A3, A4, A5, A6, A7, A10}	0,9223	{ A1 , A3, A4, A5, A6, A7, A10}	0,9406
8	{A1, A3, A4, A5, A6, A7, A9 , A10}	0,9514	{A1, A3, A4, A5, A6, A7, A9 , A10}	0,9641
9	{A1, A2 , A3, A4, A5, A6, A7, A9, A10}	0,9793	{A1, A2 , A3, A4, A5, A6, A7, A9, A10}	0,9834
10	{A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8 , A9, A10}	1,0000	{A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8 , A9, A10}	1,0000

Para a análise de sensibilidade, não houve divergência na classificação dos grupos de alternativas, sendo os mesmo tanto para Bel quando para Pls, entretanto, para a simplificação e melhor apresentação dos resultados, os mesmos podem ser vistos na Tabela 14. A análise de apenas um cenário foi satisfatório e suficiente para o entendimento do comportamento das alternativas, que comprovaram, por fim, a robustez e viabilidade da solução. O ranking das DAs neste novo cenário é apresentado na Tabela 15.

Tabela 14 – Melhores grupos de alternativas para novo cenário de tamanho até 7.

Class.	Grupo de alternativas
1	{ A6 }
2	{ A5 , A6}
3	{ A4 , A5, A6}
4	{A4, A5, A6, A10 }
5	{ A3 , A4, A5, A6, A10}
6	{A3, A4, A5, A6, A7 , A10}
7	{ A1 , A3, A4, A5, A6, A7, A10}

Percebe-se, como resultante desse novo cenário, que a alternativa {A6} salvou sua posição original mesmo diante das alterações dos valores de prioridade dos critérios. Na análise, a igualdade entre os VPCs enfraquece as DAs {A10} e {A8}. A DA {A10} perde posição, caindo do grupo tamanho três para o de tamanho quatro na Tabela 14 e do

segundo lugar do ranking para quarto na Tabela 15. Já a alternativa {A8} que antes se encontrava em oitavo lugar no ranking, desceu para decimo.

Tabela 15 – Ranking das alternativas – Análise de sensibilidade.

Ranking	Alternativa	BetP(A)
1	{A6}: Implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais	0,240
2	{A5}: Campanha educativa contra fraudes	0,175
3	{A4}: Fiscalização contra fraudes	0,142
4	{A10}: Automação	0,124
5	{A3}: Gestão de pressão	0,115
6	{A7}: Implantação de hidrômetros em áreas em situação de vulnerabilidade	0,080
7	{A1}: Controle ativo de vazamentos	0,057
8	{A9}: Reaproveitamento de água de lavagem das ETA	0,026
9	{A2}: Controle passivo de vazamentos	0,023
10	{A8}: Reabilitação de redes de distribuição de água	0,018

Com o resultado, percebe-se que a opção mais superior em termos de posição foi menos sensível às mudanças nos valores de prioridade dos critérios se comparada com as opções mais moderadas. A explicação para isso está na relação entre a ignorância local e o VPC. Uma vez que, o VPC tendendo a 1 (bom conhecimento), diminui a ignorância local e os valores de crença das alternativas ficam mais exatos, enquanto que o VPC tendendo a 0 (pouco conhecimento), aumenta o nível de ignorância local (BEYNON, 2005). Sabendo disso, quando os valores foram igualados, acarretou uma tendência a 0 de alguns VPCs, como também um aumento de valor em outros, causando instabilidade nos GAs mais moderados. Entretanto, mesmo com essas oscilações na ignorância local dos critérios, a grande maioria das DAs salvaram suas posições, como também a DA de topo, confirmando a significativa viabilidade e robustez dessa solução.

Os VPCs que sofreram maiores alterações foram os dos critérios de “redução das perdas reais” (C1) do DM1, que possuía valor de 0,30 e o “transtorno para a população” (C4) do DM2, com valor de 0,05 (ver Tabela 2). Com isso, conseqüentemente possuíam o menor e o maior valor de ignorância local associado, respectivamente.

Para o caso do C1, quando reduzido à quase metade, acarretou na diminuição dos valores de crenças exatas de seus GAs. Visto que a DA {A10} foi bem avaliada nesse critério, como também para todo o DM1 (ver Tabela 7), é explicada a queda de patamar que a acometeu.

Para o C4, tendo seu VPC triplicado, é notório o aumento dos valores de crença exata dos GAs selecionados naquele critério. Dessa forma, é possível observar que a DA {A8} é a única que se encontra ausente nesse critério, não aumentando seu valor de crença associado, ao contrário de todos as demais, contribuindo assim, para a sua queda de patamar. É importante ressaltar que outras alterações simultâneas a essas ocorreram em todos os critérios BOE, auxiliando nessas oscilações de posição, no entanto, as mais acentuadas e características foram as então mencionadas.

Na Tabela 16, é possível observar as oscilações ocorridas no ranking individual das alternativas anteriormente citadas, a partir das alterações nos valores de prioridades dos critérios. Mais oscilações de posição ocorreram para o DM3, contribuindo para o status final das alternativas encontradas na Tabela 15. Entretanto, devido à força de algumas posições, como, por exemplo, a alternativa {A6}, essas oscilações não tiveram influência.

Tabela 16 – Ranking individual das alternativas – Análise de sensibilidade.

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

6. 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 introduzida neste trabalho foi o DS/AHP, que é uma hibridização do Dempster Shafer com o AHP tradicional, e que incorpora em sua estrutura a noção de ignorância e incerteza. Neste método, ao comparar um grupo de alternativas com o quadro de discernimento, o especialista expressa algum grau de conhecimento sobre cada um desses grupos, o que diverge do AHP, que faz comparações pareadas entre cada alternativa. O problema “alternativas para gestão eficiente de um sistema de distribuição de água” incluiu um grupo de 3 especialistas que fizeram julgamentos de preferência entre dez alternativas, mediante critérios pré-estabelecidos que divergem entre si por possuírem caráter técnico-ambiental, econômico e social.

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. Com essa visualização, a tomada de decisão se torna mais confiável, com maior probabilidade de melhores resultados. Além disso, o potencial do método se manifesta por sua capacidade de refletir o conhecimento e incertezas associadas às várias partes envolvidas na decisão. Tais incertezas garantiram ao processo de avaliação um caráter mais realista, visto que as questões relacionadas aos sistemas de distribuição de água são complexas e imprecisas por natureza, pois envolvem variados processos, técnicas, como também toda a sociedade.

No método, os resultados foram dados em forma de ranking e como intervalo de crença. Este último, demonstra níveis de crenças em grupos de alternativas, cabendo interpretações entre a confiança exata naquela proposição ou sua probabilidade máxima de ocorrência. Com isso, é possível uma mensuração da incerteza envolvida no processo.

Os grupos de melhores alternativas, podem ser aplicadas nas concessionárias de água de acordo com suas restrições de cunho financeiro como também de suas particularidades. As alternativas preferidas foram: implantação e/ou substituição de

hidrômetros, campanhas educativas contra fraude e automação. A forte tendência para alternativas normalmente usadas para gestão das perdas aparentes, demonstra a grande necessidade do controle das perdas financeiras nos sistemas de abastecimento de água.

Perante a multiplicidade de aspectos na gestão de SAA é primordial para as concessionárias de água uma tomada de decisão que envolvam alternativas técnicas e econômicas viáveis, como também que beneficiem os consumidores. Dessa forma, acredita-se que a principal aporte deste trabalho foi a consideração de variadas alternativas, vislumbrando beneficiar os mais variados segmentos envolvidos nessa problemática.

Portanto, mesmo que na prática, as decisões sejam tomadas por poucos setores dentro de uma concessionária de água, esse trabalho vislumbra a complementação dessa falta, apontando a importância de outros decisores no processo de tomada de decisão, de forma a incrementar o processo, com novos pontos de vistas e necessidades, que por muitas vezes não são visualizadas por todos.

REFERÊNCIAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água: Posicionamento e contribuições técnicas da ABES**. 2015.

ALEGRE, H.; COELHO, S.; COVAS, D.; ALMEIDA, M. C.; CARDOSO, A. A utility-tailored methodology for integrated asset management of urban water infrastructure. **Water Science & Technology**, v. 13, n. 6, p. 1444-1451, 2013.

ALVES, E. O. **Modelo multicritério para alocação de produtos focado em níveis de serviço**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

ALY, A.; JENSEN, S. S.; PEDERSEN, A. B. Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multi-criteria decision making analysis. **Renewable Energy**, v. 113, p. 159-175, 2017.

ARAÚJO, L. S. **Controlo de Perdas na Gestão Sustentável dos Sistemas de Abastecimento de Água**. Tese de doutorado – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2005.

ARREGUI, F. J.; CABRERA, E.; COBACHO, R.; GARCÍA-SERRA, J. Reducing apparent losses caused by meters inaccuracies. **Water Practice & Technology**, v.1, n.4, 2006.

ARREGUI, F. J.; PARDO, M. A.; PARRA, J. C.; SORIANO, J. Quantification of meter errors of domestic users: A case study. In: IWA water loss conference. 2007, Bucharest: **Anais...**2007.

ARREGUÍN-CORTES, F. I.; OCHOA-ALEJO, L. H. Evaluation of water losses in distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 123, n. 5, p. 284-291, 1997.

AWASTHI, A.; CHAUHAN, S. S. Using AHP and Dempster-Shafer theory for evaluating sustainable transport solutions. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, p. 787-796, 2011.

BABIC, B.; DUKIC, A.; STANIC, M. Managing water pressure for water savings in developing countries. **Water SA**, v. 40, n. 2, p. 221-232, 2014.

BARNETT, J. A. Computational methods for a mathematical theory of evidence. In: Proceedings 7th International Joint Conference on Artificial Intelligent (IJCAI), Vancouver, Canadá, v. 2, p. 868-875, 1981.

BARROS FILHO, C.; KARNAL, L. **Felicidade ou morte**. Papirus 7 mares, São Paulo, 2016.

BEYNON, M. DS/AHP method: A mathematical analysis, including na understanding of uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 140, p. 148-164, 2002.

BEYNON, M. J. A method of aggregation in DS/AHP for group decision-making with the non-equivalent importance of individuals in the group. **Computer & Operations Research**, v. 32, p. 1881-1896, 2005a.

BEYNON, M. J. The role of the DS/AHP in identifying inter-group alliances and majority rule within group decision making. **Group Decision and Negotiation**, v. 15, p. 21-42, 2006.

BEYNON, M. J. Understanding local ignorance and non-specificity within the DS/AHP method of multi-criteria decision making. **European Journal of Operational Research**, v. 163, p. 403-417, 2005b.

BEYNON, M. J.; COSKER, D.; MARSHALL, D. Na expert system for multi-criteria decision making using Dempster Shafer theory. **Expert Systems with Applications**, v. 20, p. 357-367, 2001.

BEYNON, M.; CURRY, B.; MORGAN, P. The Dempster-Shafer theory of evidence: na alternative approach to multicriteria decision modelling. **Omega**, v. 28, p. 37-50, 2000.

BEZERRA, S. D. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de água: tecnologia de controle**. Editora UFPB, João Pessoa, 2013.

BEZERRA, S. T. M.; GOMES, H. P. **Abastecimento de água**. LENHS/UFPB, João Pessoa, 2019.

BLOCH, I. Some aspects of Dempster-Shafer evidence theory for classification of multi-modality medical images taking partial volume effect into account. **Pattern Recognition Letters**, v. 17, p. 905-919, 1996.

BREVILIERI, C. R. G.; PADILHA, P. S. Um novo conceito de combate às perdas através da regularização de áreas de alta vulnerabilidade social utilizando contratos de performance. In: Congresso ABES, 2017 **Anais...** FENASAN, 2017.

CAMBRAINHA, G. M.; FONTANA, M. E. A multi-criteria decision making approach to balance water supply-demand strategies in water supply systems. **Production**, v. 28, p. 1-13, 2018.

CAMPISANO, A.; MODICA, C.; VETRANO, L. Calibration of proportional controllers for the RTC of pressures to reduce leakage in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 4, p. 377-384, 2012.

CARRIÇO, N. J. G.; GONÇALVES, F. V.; COVAS, D. I. C.; ALMEIDA, M. C.; ALEGRE, H. Multi-criteria analysis for the selection of the best energy efficient option in urban water systems. **Procedia Engineering**, v. 70, p. 292-301, 2014.

CARRIJO, I. B. **Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjectivo e aprendizado de máquina**. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CARVALHO, P.; MARQUES, R. C. The influence of the operational environment on the efficiency of water utilities. **Journal of Environment Management**, v. 92, p. 2698-2707, 2011.

CHEN, L.; DENG, X. A modified method for evaluating sustainable transport solutions based on AHP and Dempster-Shafer theory. **Applied Sciences**, v. 8, n. 4, p. 2-17, 2018.

CHEN, M. K.; WANG, S. C. The use of a hybrid Fuzzy-Delphi-AHP approach to develop global business intelligence for information service firms. **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 7394-7407, 2010.

CHEN, W.; POURGHASEMI, H. R.; ZHAO, Z. A GIS-based comparative study of Dempster-Shafer, logistic regression and artificial neural network models for landslide susceptibility mapping. **Geocarto International**, v. 32, n.4, p. 367-385, 2017.

CHEN, Y.; KILGOUR, D.; HIPEL, K. A decision rule aggregation approach to multiple criteria-multiple participant sorting. **Group Decision and negotiation**, v. 21, n. 5, p. 727-745, 2012.

COSTA, C. A. B. C.; VANSNICK, J. C. A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. **European Journal of Operational Research**, v.187, p. 1422-1428, 2008.

COUVELIS, F. A.; ZYL, J. E. V. Apparent losses due to domestic water meter under-registration in South Africa. **Water SA**, v. 41, n. 5, p. 698-704, 2015.

CRIMINISI, A.; FONTANAZZA, C. M.; FRENI, G.; LA LOGGIA, G. Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. **Water Science & Technology**, p. 2373-2382, 2009.

DE ALMEIDA, A. T. **O conhecimento e o uso de métodos multicritérios de apoio à decisão**. Editora Universitária da UFPE, Recife, 2010.

DE ALMEIDA, A. T. **Processo de decisão nas organizações: Construindo modelos de decisão multicritério**. São Paulo: Atlas: 2013.

DE PAOLA, F.; GIUGNI, M.; PORTOLANO, D. Pressure management through optimal location and setting of valves in water distribution networks using a music-inspired approach. **Water Resource Management**, v. 31, p. 1517-1533, 2017.

DELGADO-GALVÁN, X.; PÉREZ-GARCÍA, R.; IZQUIERDO, J.; MORARODRÍGUEZZ, J. An analytic hierarchy process for assessing externalities in water leakage management. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 55, p. 1194-1202, 2010.

DEMPSTER, A. P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 38, n. 2, p. 325-339, 1967.

DENG, X.; JIANG, W.; WANG, Z. Zero-sum polymatrix games with link uncertainty: A Dempster-Shafer theory solution. **Applied Mathematics and Computation**, v. 340, p. 101-112, 2019.

DENG, Y.; CHAN, F. T. S. A new fuzzy dempster MCDM method and its application in supplier selection. **Expert Systems with Applications**, v. 38, p. 9854-9861, 2011.

DUBOIS, D.; PRADE, H. Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures. **Computational Intelligence**, v. 4, n. 3, p. 244-264, 1988.

DUTRA, R. H. A.; OLIVEIRA, A. L. Utilização de válvulas redutoras de pressão no controle de perdas em redes de abastecimento de água. **Revista DAE**, v. 65, n. 208, p. 122-154, 2017.

DYER, J. S. Remarks on the analytic hierarchy process. **Management Science**, v. 36, n. 3, p. 249-258, 1990.

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.

FONTANA, M. E.; MORAIS, D. C. Decision model to control water losses in distribution networks. **Production**, v. 26, n. 4, p. 688-697, 2016.

FONTANA, M. E.; MORAIS, D. C. Using Promethee V to select alternatives so as to rehabilitate water supply network with detected leaks. **Water Resource Management**, v. 27, p. 4021-4037, 2013.

FONTANA, M. E.; MORAIS, D. C. Water distribution network segmentation based on group multi-criteria decision approach. **Production**, v. 27, p. 1-13, 2017.

FREIRE, M. R. **Modelo para setorização de redes de distribuição de água**. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlo – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, 2017.

GHASSABI, Z. Employee performance evaluation in institute of higher education using fuzzy AHP methods. **International Journal of Business Information Systems**, v. 24, n. 4, 2017.

GHORBANZADEH, O.; MOSLEM, S.; BLASCHKE, T.; DULEBA, S. Sustainable urban transport planning considering different stakeholder groups by an interval-AHP decision support model. **Sustainability**, v. 11, n. 1, p. 1-18, 2019.

GOMES, R.; MARQUES, A. S.; SOUSA, J. Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems. **Urban Water Journal**, v. 8, n. 2, p. 65-77, 2011.

GÜNGÖR, M.; YARAR, U.; FIRAT, M. Reduction of water losses by rehabilitation of water distribution network. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, p. 498, 2017.

GUO, S.; ZHAO, H. Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective. **Applied Energy**, v. 158, p. 390-402, 2015.

HAJKOWICZ, S.; COLLINS, K. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. **Water Resource Management**, v. 21, p. 1553-1566, 2007.

HAN, Y.; DENG, Y. Na evidential fractal analytic hierarchy process target recognition method. **Defence Science Journal**, v. 68, n. 4, p. 367-373, 2018.

HERZ, R. K. Exploring rehabilitation needs and strategies for water distribution networks. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 47, n. 6, p. 275-283, 1998.

HOOGSTEEEN, K. J. **Basic distribution system maintenance**. In: AWWA, Annual Conference and Exposition, Chicago, 1999.

HUA, Z.; GONG, B.; XU, X. A DS/AHP approach for multi-attribute decision making problem with incomplete information. **Expert Systems with Applications**, v. 34, p. 2221-2227, 2008.

HUANG, S.; SU, X.; HU, Y.; MAHADEVAN, S.; DENG, Y. A new decision-making method by incomplete preferences based on evidence distance. **Knowledge-Based Systems**, v. 56, p. 264-272, 2014.

HUNAIDI, O.; WANG, A. A new system for locating leaks in urban water distribution pipes. **Management of Environmental Quality: An International**, v. 17, n. 4, p. 450-466, 2006.

HUNAIDI, O.; WANG, A.; BRACKEN, M.; GAMBINO, T., FRICKE, C. Acoustic methods for locating leaks in municipal water pipe networks. **International Water Demand Management Conference**, p 1-14, 2004.

HYDE, K. M.; MAIER, H. R.; COLBY, C. B. Reliability-based approach to multicriteria decision analysis for water resources. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, p. 429-439, 2004.

JAIN, V.; SANGAIAH, A. K.; SAKHUJA, S.; THODUKA, N.; AGGARWAL, R. Supplier selection using fuzzy AHP and TOPSIS: a case study in the Indian automotive industry. **Neural Computing and applications**, v. 29, p. 555-564, 2018.

JONES, R. W.; LOWE, A.; HARRISON, M. J. A framework for intelligent medical diagnosis using the theory of evidence. **Knowledge-Based Systems**, v.15, p. 77-84, 2002.

JU, Y.; WANG, A. Emergency alternative evaluation under group decision makers: A method of incorporating DS/AHP with extended TOPSIS. **Expert Systems with Applications**, v. 39, p. 1315-1323, 2012.

KAHRAMAN, C.; CEBECI, U.; ULUKAN, Z. Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. **Logistics Information Management**, v. 16, n. 6, p. 382-394, 2003.

KAMARUZZAMAN, S. N.; LOU, E. C. W.; WONG, P. F.; WOOD, R.; CHE-ANI, A. I. Developing weighting system for refurbishment building assessment scheme in Malaysia through analytic hierarchy process (AHP) approach. **Energy Policy**, v. 112, p. 280-290, 2018.

KAMDAR, I.; ALI, S.; BENNUI, A.; TECHATO, K.; JUTIDAMRONGPHAN, W. Municipal solid waste landfill siting using an integrated GIS-AHP approach: A case study from Songkhla, Thailand. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 149, p. 220-235, 2019.

KANG, B.; ZHANG, P.; GAO, Z.; CHHIPI-SHRESTHA, G.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Environmental assessment under uncertainty using Dempster-Shafer theory a Z-numbers. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 11, p. 2041-2060, 2020.

KARADIREK, I. E.; KARA, S.; YILMAZ, G.; MUHAMMETOGLU, A. MUHAMMETOGLU, H. Implementation of hydraulic modelling for water-loss reduction through pressure management. **Water Resources Management**, v. 26, n. 9, p. 2555-2568, 2012.

KARAHALIOS, H. The application of the AHP-TOPSIS for evaluating ballast water treatment systems by ship operations. **Transportation Research Part D**, v. 52, p. 172-184, 2017.

KARAPETROVIC, S.; ROSENBLOOM, E. S. A quality control approach to consistency paradoxes in AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 119, p. 704-718, 1999.

KHODAPARAST, M.; RAJABI, A. M.; EDALAT, A. Municipal solid waste landfill siting by using GIS and Analytical Hierarchy Process (AHP): a case study in Qom city, Iran. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 52, p. 1-12, 2018.

KINGDOM, B.; LIEMBERGER, R.; MARIN, P. The challenge of reducing Non-Revenue Water (NRW) in developing countries. How to private sector can help: A look at performing-based service contracting. **Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series**, n. 8, p. 1-40, 2006.

KWIESIELEWICZ, M.; UDEN, E. V. Inconsistent and contradictory judgements in pairwise comparison method in the AHP. **Computer & Operations Research**, v. 31, p. 713-719, 2004.

LAMBERT, A. Losses from water supply systems: Standard terminology and recommended measures. **The Blue Pages – IWA**, v. 10, n. 3, p. 273-284, 2000.

LAMBERT, A. Now revenue water and water losses: Best practice water balance calculation. In: Encontro técnico sobre controle e redução de perdas em sistemas de abastecimento de água, 2002, salvador. **Anais...** SEDU/PR,2002.

LAMBERT, V.; HIRNER, W. Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures. *Voda i Sanitama Tehnika*, v. 32, p. 29-38, 2002.

LEZAMA, A. P. S.; ARROYO, J. C.; HERNÁNDEZ, C. A. Applying the Fuzzy Delphi method for determining socio-ecological factors that influence adherence to mammography screening in rural areas of México. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 30, n. 2, p. 245-258, 2014.

LI, W.; LING, W.; LIU, S.; ZHAO, J.; LIU, R.; CHEN, Q.; QIANG, Z.; QU, J. Development of systems for detection, early warning, and control of pipeline leakage in drinking water distribution: A case study. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 11, p. 1816-1822, 2011.

LIN, T. C. Switching-based filter based on Dempster's combination rule for image processing. **Information Sciences**, v.180, p.4892-4908, 2010.

LIU, Z. G.; PAN, Q.; DEZERT, J.; MARTIN, A. Combination of classifiers with optimal weight based on evidential reasoning. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 26, n.3, p. 1-15, 2017.

LOPES, M. R. C. M. **Uso das metodologias Promethee e F-Promethee na avaliação de clientes**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

LUGOMA, M. F. T.; ZYL, J. E.; LLEMOBADE, A. A. The extent of on-site leakage in selected suburbs of Johannesburg. **Water**, v. 38, n.1, p. 127-131, 2012.

MARINAKIS, V.; DOUKAS, H.; XIDONAS, P.; ZOPOUNIDIS, C. Multicriteria decision support in local energy planning: An evaluation of alternative scenarios for the sustainable energy action plan. **Omega**, v. 69, p. 1-16, 2017.

MARTINI, A.; TRONCOSSI, M.; RIVOLA, A.; NASCETTI, D. Preliminary Investigations on Automatic Detection of Leaks in Water Distribution Networks by Means of Vibration Monitoring. **Advances in Condition Monitoring in Non-Stationary Operations**, p. 535-544, 2014.

MELATO, D. S. **Discussão de uma metodologia para o diagnóstico e ações para redução de perdas de água: aplicação no sistema de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MENESES, R. A. **Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: O caso de Campina Grande**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2011.

MIRANDA, E. C. **Avaliação de perdas em sistemas de abastecimento de água – Indicadores de perdas e metodologias para análise de confiabilidade**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, 2002.

MORAIS, D. C.; ALMEIDA, A. T. Water network rehabilitation: A group decision-making approach. **Water SA**, v. 36, n. 4, 2010.

MORAIS, D. C.; ALMEIDA, A. T.; FIGUEIRA, J. R. A sorting model for group decision making: A case study of water losses in Brazil. **Group Decision Negotiation**, v. 23, p. 937-960, 2014.

MORAIS, D. C.; DE ALMEIDA, A. T. Modelo de decisão em grupo para gerenciar perdas de água. **Pesquisa Operacional**, v. 26, n. 3, p. 567-584, 2006.

MORAIS, D. C.; DE ALMEIDA, A. T. Multicriteria decision model for investment in reduction of losses in water supply system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPERATION RESEARCH FOR DEVELOPMENT (V-ICORD), 2005, Jamshedpur, India, **Anais...** 2005.

MORAIS, D.C. **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.

MUHLBACHER, A. C.; KACZYNSKI, A. Making good decisions in healthcare with multi-criteria decision analysis: The use, current research and future development of MCDA. **Applied Health Economics Health Policy**, v. 14, n. 1, p. 29-40, 2015.

MUTIKANGA, H. E., SHARMA, S. K., VAIRAVAMOORTHY, K. Assessment of apparent losses in urban water systems. **Water and Environment Journal**, v. 25, p. 327-335, 2011b.

MUTIKANGA, H. E., SHARMA, S. K., VAIRAVAMOORTHY, K. Methods and tools for managing losses in water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 2, p. 166-174, 2013.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Multi-criteria decision analysis: A strategic planning tool for water loss management. **Water Resource Management**, v. 25, p. 3947-3969, 2011b.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K.; CABRERA JR, E. Using performance indicators as a water loss management tool in developing countries. **Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA**, v. 59, n. 8, p. 471-481, 2010.

OKEOLA, O. G.; SULE, B. F. Evaluation of management alternatives for urban water supply system using multicriteria decision analysis. **Journal of King Saud University – Engineering Sciences**, v. 24, p. 19-24, 2012.

ORMSBEE, L. E.; LANSY, K. E. Optimal control of water supply pumping systems. **Journal of Water Resource Planning and Management**, v. 120, n. 2, p.237-252, 1994.

PETERS, C. N.; BAROUD, H.; HORNBERGER, G. M. Multicriteria decision analysis of drinking water source selection in Southwestern Bangladesh. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 4, p. 1-14, 2019.

PETERS, E. J.; BALFOUR, K. D. Water Losses and the Potential of Reducing System Pressure: A Case Study in Trinidad. **The West Indian Journal of Engineering**, v. 37-41, p. 50-57, 2014.

POURGHASEMI, H. R.; ROSSI, M. Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, p. 609-633, 2017.

RAHNAT, Z. G.; NIRI, M. V.; ALAVI, N.; GOUDARZI, G.; BABAEI, A.; BABOLI, Z.; HOSSEINZADEH, M. Landfill site selection using GIS and AHP: a case study: Behbahan, Iran. **KSCE Journal of Civil Engineering**. V. 21, p. 111-118, 2017.

RENZETTI, S.; DUPONT, D. Ownership and performance of water utilities. **Greener Management International**, v. 42, p. 9-19, 2003.

RIZZO, A.; VERMERSCH, M.; GALEA ST. JOHN, S.; MICALLEF, G.; RIOLO, S.; PACE, R. Apparent water loss control: The way forward. **Water**, v. 21, p. 45-47, 2007.

ROY, B. Multicriteria methodology for decision aiding. Kluwer Academic Publishers, 1996.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83-97, 2008b.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of operational Research**, v.48, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L. Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. **Revista de la Real Academia de Ciencias Serie A: Matemáticas**, v. 102, n. 2, p. 251-318, 2008a.

SAATY, T. L. The Sudan transport study. **Interfaces**, v. 8, n. 1, p. 37-57, 1977.

SANTOS, D. F. **Modelo multicritério de apoio à decisão na avaliação dos indicadores de risco em saúde**. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SANTOS, S. M.; SILVA, M. M.; MELO, R. M.; GAVAZZA, S.; FLORÊNCIO, L.; KATO, M. T. Multi-criteria analysis for municipal solid waste management in a Brazilian metropolitan area. **Environmental Monitoring and Assessment**, p. 189-561, 2017.

SEAGO, C. J.; MCKENZIE, R. S. **An assessment of non-revenue water in South Africa**. **Water Research Commission**. Pretoria, 2007.

SENANTE, M. M.; GÓMEZ, T.; CABALLERO, R.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; SALA-GARRIDO, R. Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: An analytic network process approach. **Science of the Total Environment**, v. 532, p. 676-687, 2015.

SHAFER, G. **A mathematical theory of evidence**. Princeton University Press, New Jersey, 1976.

SHIAU, T. Evaluating sustainable transport strategies for the counties of Taiwan based on their degree of urbanization. **Transport Policy**, v. 30, p. 101-108, 2013a.

SHIAU, T. Sea use management using a hybrid operational model: Taiwan's experience. **Marine Policy**, v. 39, p. 265-272, 2013b.

SILVA, F. R. M. **Implantação e desenvolvimento de uma rede de automação industrial e sistema SCADA para estação de tratamento de água purificada**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SILVA, L. G. O.; ALMEIDA-FILHO, A. T. A multicriteria approach for Analysis of conflicts in evidence Theory. **Information Sciences**, v. 346-347, p. 275-285, 2016.

SILVA, L. G. O.; ALMEIDA-FILHO, A. T. A new PROMETHEE-based approach within a framework for conflict Analysis in Evidence Theory Integrating three conflict measures. **Expert Systems with Applications**, v. 18, p. 1-27, 2018.

SILVA, M. M.; COSTA, A. P. C. S.; GUSMÃO, A. P. H. Continuous cooperation: A proposal using a fuzzy multicriteria sorting method. **Int. J. Production Economics**, v. 151, p. 67-75, 2014.

SILVA, M. M.; HIPEL, K. W.; KILGOUR, D. M.; COSTA, A. P. C. S. Strategic analysis of a regulatory conflict using Dempster-Shafer Theory and AHP for preference elicitation. **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, v. 0, n. 0, p. 1-19, 2019.

SILVA, V. B. S.; SCHRAMM, F.; CARVALHO, H. R. C. O uso do método Promethee para seleção de candidatos à bolsa-formação do Pronatec. **Production**, v. 24, n. 3, p. 548-558, 2014.

SIRISAWAT, P.; KIATCHAROENPOL, T. Fuzzy AHP-TOPSIS approaches to prioritizing solutions for reverse logistics barriers. **Computers & Industrial Engineering**, v. 117, p. 303-318, 2018.

SIVAKUMAR, P.; PRASAD, R. K. Extended period simulation of pressure-deficient networks using pressure reducing valves. **Water Resource Management**, v. 29, p. 1713-1730, 2015.

SMETS, P.; KENNES, R. The transferable belief model. **Artificial Intelligence**, v. 66, p. 191-234, 1994.

SMITH, J. E.; WINTERFELDT, D. V. Decision analysis in management Science. **Management Science**, v. 50, n. 5, p.561-574, 2004.

SOUZA, M. **Proposta de um sistema de gestão empregando instrumentação inteligente e redes de campo na automação do processo de tratamento da água**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade De São Paulo, São Paulo, 2006.

SU, X.; MAHADEVAN, S.; XU, P.; DENG, Y. Dependence assessment in human reliability analysis using evidence theory and AHP. **Risk Analysis**, v. 35, n. 7, p. 1296-1316, 2015.

SUTADIAN, A. D.; MUTTIL, N.; YILMAZ, A. G.; PERERA, B. J. C. Using the Analytic Hierarchy Process to identify parameter weights for developing a water quality index. **Ecological Indicators**, v. 75, p. 220-233, 2017.

TROJAN, F.; KOVALESKI, J. L. Automação no abastecimento de água: Uma ferramenta para redução de perdas e melhoria nas condições de trabalho. In: XII SIMPEP. 2005, Bauru: **Anais...2005**.

TROJAN, F.; MORAIS, D. C. Using ELECTRE TRI to support maintenance of water distribution networks. **Pesquisa Operacional**, v. 32, n. 2, p. 423-442, 2012.

VASILJEVIC, M.; FAZLOLLAHTABAR, H.; STEVIC, Z.; VESKOVIC, S. A rough multicriteria approach for Evaluation of the supplier criteria in automotive industry. **Decision Making: Applications in Management and Engineering**, v. 1, n. 1, p. 82-96, 2018.

VERHEYDEN, T.; MOOR, L. D. Multi-criteria decision analysis: methods to define and evaluate socially responsible investments. **International Journal of management and Decision Making**, v. 14, n. 1, p. 44, 2015.

VOTRE, R.; NEUFFER, D.; MARQUES, T. M. P.; KROIN, E. Automação e ferramentas para controle de perdas em um sistema de abastecimento de água. **Revista Intech**, v. 153, p. 12-20, 2014.

WANG, Y.; YANG, J.; XU, D. Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach. **European Journal of Operational Research**, v. 174, p. 1885-1913, 2006.

WASSERKRUG, S.; TSITKIN, A.; ZADOROJNIY, A. Relieving pressure: Optimizing water distribution pressure management at Valley of the Moon water district. **Interfaces**, v. 44, n. 5, p. 509-524, 2014.

XIN, K.; TAO, T.; LU, Y.; XIONG, X.; LI, F. Apparent losses analysis in district metered areas of water distribution systems. **Water Resource Management**, v. 28, p. 683-696, 2014.

XU, Q.; CHEN, Q.; MA, J.; BLANCKAERT, K.; WAN, Z. Water saving and energy reduction through pressure management in urban water distribution networks. **Water Resources Management**, v. 28, p. 3715-3726, 2014.

YE, F.; CHEN, J.; LI, Y.; KANG, J. Decision-Making algorithm for multisensor fusion based on grey relation and DS Evidence Theory. **Hindawi Publishing Corporation Journal of Sensors**, p. 1-11, 2016.

YUKSEL, M.; DAGDEVIREN, M.; KABAK, M. An analysis of the factors determining the effectiveness of chemistry education by using fishbone analysis and AHP-PROMETHEE techniques. **Necatibey Faculty of Education Electronic Journal of Science and Mathematics Education**, v. 12, n. 1, p. 442-472, 2018.

ZADEH, L. A. A simple view of the Dempster-Shafer Theory of evidence and its implication for the rule of combination. **AI Magazine**, v. 7, n. 2, p. 85-90, 1986.

ZADKARAMI, M.; SHAHBAZIAN, M.; SALAHSHOOR, K. Pipeline leak diagnosis based on wavelet and statistical features using Dempster-Shafer classifier fusion technique. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 105, p. 156-163, 2017.

ZAHED FILHO, K. **Previsão de demanda de consumo em tempo real no desenvolvimento operacional de sistemas de distribuição de água**. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

ZARGHAMI, M.; ABRISHAMCHI, A.; ARDAKANIAN, R. Multi-criteria decision making for integrated urban water management. **Water Resources Management**, v. 22, p. 1017-1029, 2008.

ZYOUD, S. H.; KAUFMANN, L. G.; SHAHEEN, H.; SAMHAN, S.; FUCHS-HANUSCH, D. A framework for water loss management in developing countries under fuzzy environment: Integration of Fuzzy AHP with Fuzzy TOPSIS. **Expert System with Applications**, v. 61, p. 86-105, 2016.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO

O objetivo deste questionário é avaliar as principais ações direcionadas à gestão eficiente de sistemas de distribuição de água. **Por favor, preencha os Quadros 3 e 4.**

Quadro 1 – Alternativas para o aumento da eficiência em sistemas de distribuição de água.

A1	Controle ativo de vazamento
A2	Controle Passivo de vazamento
A3	Gestão de pressão
A4	Fiscalização contra fraudes
A5	Campanha educativa contra fraudes
A6	Implantação ou substituição de hidrômetros em áreas residenciais
A7	Implantação de hidrômetros em áreas em situação de vulnerabilidade
A8	Reabilitação de rede de distribuição
A9	Reaproveitamento de água de lavagem das ETAs
A10	Automação

Com base na escala apresentada no Quadro 2, **atribua um valor numérico (Quadro 3)** que represente a viabilidade de cada alternativa em relação a todas as demais alternativas, para cada critério.

Quadro 2 – 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

Quadro 3 – Grau de Viabilidade*

Critérios	Alternativas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C1 (Redução das perdas reais)										
C2 (Redução das perdas aparentes)										
C3 (Facilidade de implantação)										
C4 (Transtorno para a população)										
C5 (Menor custo)										
C6 (Aumento de receita)										

*Pode ser atribuído qualquer valor entre 0 e 7, e os valores poderão se repetir em mais de uma alternativa.

Quadro 4 – Valores de prioridade dos critérios (o somatório deve ser igual a 100)

Critério	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Peso						

Deseja que sua avaliação seja anônima? () sim () não