



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA

JÚLIA DANIELE SILVA DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE UM MÉTODO MULTICRITÉRIO FUZZY PROMETHEE PARA
GESTÃO DE PERDAS DE ÁGUA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

CARUARU

2019

JÚLIA DANIELE SILVA DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE UM MÉTODO MULTICRITÉRIO FUZZY PROMETHEE PARA
GESTÃO DE PERDAS DE ÁGUA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
do Centro Acadêmico do Agreste – CAA,
da Universidade Federal de Pernambuco –
UFPE, como requisito parcial para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Área de concentração: **Recursos Hídricos**

Orientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso
Marques Bezerra

CARUARU

2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

S729a Souza, Júlia Daniele Silva de.
Aplicação de um método multicritério fuzzy Promethee para gestão de perdas de água em sistemas de distribuição de água. / Júlia Daniele Silva de Souza. – 2019.
64 f. il. : 30 cm.

Orientador: Saulo de Tarso Marques Bezerra.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Abastecimento de água. 2. Controle de perdas. 3. Infraestrutura. 4. Recursos hídricos. I. Bezerra, Saulo de Tarso Marques (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2019-087)

JÚLIA DANIELE SILVA DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE UM MÉTODO MULTICRITÉRIO FUZZY PROMETHEE PARA
GESTÃO DE PERDAS DE ÁGUA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à coordenação do curso de Engenharia Civil
do Centro Acadêmico do Agreste – CAA,
Universidade Federal de Pernambuco –
UFPE, em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

A banca examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o candidato

APROVADO com nota _____

Caruaru, 26 de junho de 2019.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dra. Máisa Mendonça Silva: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos: _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina de TCC)

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz Serafim de Souza Júnior e Jane Márcia Silva de Souza, pelo amor e apoio incondicionais, e à minha irmã Laura Fernanda Silva de Souza, por acreditar em mim e garantir boas risadas ao longo dessa trajetória, tornando minha vida bem mais leve e feliz.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as bênçãos em minha vida.

Aos meus pais, Luiz Serafim de Souza Júnior e Jane Márcia Silva de Souza, que são a luz da minha vida e doaram-se por inteiro para que eu chegasse até aqui, sendo referenciais para mim de bondade, persistência, esforço e amor ao próximo.

À minha irmã, Laura Fernanda Silva de Souza, pela cumplicidade, amor e momentos de alegria compartilhados.

Aos meus amigos da graduação, Eduardo, Gisely, Elyson, Rayanne e Matheus, pelos laços de amizade e companheirismo formados e pelo apoio incondicional, vocês foram suporte para mim e tornaram essa trajetória bem mais divertida.

Aos meus amigos, Luana, Martyna, João, Fernando e Raniê, que sempre torceram por mim e foram importantes em momentos decisivos da minha vida, vocês são a prova de que nem o tempo e nem a distância destroem uma verdadeira amizade.

Ao Curso de Engenharia Civil da UFPE. Sou grata pelos conhecimentos adquiridos, pelas pessoas que tive o prazer de conhecer ao longo dessa jornada e por ter me tornado uma pessoa melhor.

Ao professor Saulo de Tarso Marques Bezerra, pelo suporte e orientação, tornando esse trabalho possível de ser realizado.

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

“Matar o sonho é matarmo-nos. É mutilar a nossa alma. O sonho é o que temos de realmente nosso, de impenetravelmente e inexpugnavelmente nosso”.

Fernando Pessoa

RESUMO

Historicamente, os investimentos em expansão de redes de distribuição de água foram prioritários no setor de saneamento básico brasileiro, corroborando para a expansão da infraestrutura e consequente descaso na manutenção dos sistemas de abastecimento existentes. Este cenário se reflete no alto percentual dos índices de perdas de água no Brasil, o que constitui um dos problemas mais desafiadores para os gestores das companhias de saneamento. Além de impactar diretamente no faturamento, as perdas afetam a imagem das empresas junto à sociedade, aos agentes financiadores, aos órgãos ambientais e ao poder público. O desenvolvimento de técnicas direcionadas especificamente para a gestão de perdas em sistemas de distribuição de água é, relativamente, novo e a avaliação de quais alternativas de controle devem ser implantadas é um problema complexo. Visando propor um modelo multicritério capaz sintetizar as várias nuances dos problemas reais envolvidos na gestão de perdas de água, optou-se pela utilização do Método Fuzzy Promethee. Nesse, é possível hierarquizar as alternativas mais recomendadas para a gestão, considerando um cenário de critérios relevantes para municípios de médio porte de Pernambuco. O Método Promethee é capaz de estabelecer uma relação de hierarquização entre as soluções adotadas, analisando-se os critérios estabelecidos pelo agente decisor, a Lógica Fuzzy, por sua vez, permite que o desempenho das alternativas seja difuso, enquanto as preferências do decisor não. O primeiro resultado do estudo é a estruturação do problema proposto, consistindo em avaliar quais as alternativas a serem hierarquizadas e quais os critérios e subcritérios preponderantes na análise. As alternativas escolhidas foram: controle ativo de perdas, gestão de pressão, gestão de infraestrutura e velocidade e qualidade dos reparos. Quanto aos critérios e subcritérios, buscou-se avaliar aspectos importantes como os custos de implementação, manutenção e operação, tempos de implementação e de vida útil, possíveis impactos na geração de receita e preservação da água, flexibilidade da alternativa e acessibilidade, além de possíveis danos e transtornos sociais que a alternativa pudesse causar. O método foi capaz de estruturar satisfatoriamente o problema, elencando as possíveis soluções com base em aspectos sociais, ambientais, econômicos e técnicos. Os resultados obtidos apontam que, apesar das implicações da Lógica Fuzzy, o resultado tende a ter o mesmo padrão de comportamento para as várias combinações de pesos testadas. De maneira geral, o bom desempenho da gestão da pressão nos critérios ambiental, social e econômico garante a sua preferência, indicando-a como melhor solução para o controle de perdas de água em sistemas de abastecimento de água de municípios de médio porte de Pernambuco.

Palavras-chave: Sistemas de abastecimento de água. Gestão de pressão. Controle ativo de perdas. Gestão da infraestrutura. Velocidade e qualidade de reparos.

ABSTRACT

Historically, investments in expansion of water distribution networks have been a priority in the Brazilian basic sanitation sector, corroborating the expansion of infrastructure and consequent neglect in the maintenance of existing water supply systems. This scenario is reflected in the high percentage of water loss indexes in Brazil, which is one of the most challenging problems for managers of sanitation companies. In addition to impacting directly on revenues, the losses affect the image of companies with society, financial agents, environmental agencies and public authorities. The development of techniques specifically directed to the management of losses in water distribution systems is relatively new and the evaluation of which control alternatives should be implemented is a complex problem. Aiming to propose a multicriteria model able to synthesize the various nuances of the real problems involved in the management of water losses, the Fuzzy Promethee Method was chosen. In this, it is possible to rank the most recommended alternatives for management, considering a scenario of relevant criteria for medium-sized municipalities in Pernambuco. The Promethee method is able to establish a hierarchical relationship between the adopted solutions, analyzing the criteria established by the decision agent, the Fuzzy Logic, in turn, allows the performance of the alternatives to be diffuse, while the preferences of the decision maker do not. The first result of the study is the structuring of the proposed problem, which aim to evaluate the alternatives to be prioritized and what criteria and sub-criteria prevailing in the analysis. The chosen alternatives were active loss control, pressure management, infrastructure management and speed and quality of repairs. Regarding the criteria and subcriteria, it was sought to evaluate important aspects such as the costs of implementation, maintenance and operation, implementation and life times, possible impacts on revenue generation and water preservation, alternative flexibility and accessibility, as well as possible damages and social disruptions that the alternative might cause. The method was able to satisfactorily structure the problem, listing possible solutions based on social, environmental, economic and technical aspects. The results show that, despite the implications of the Fuzzy Logic, the result tends to have the same behavior pattern for the various combinations of weights tested. In general, the good performance of pressure management in environmental, social and economic criteria guarantees its preference, indicating it as the best solution to control water losses in water supply systems in medium-sized municipalities in Pernambuco.

Keywords: Systems of water supply. Pressure management. Active control of losses. Infrastructure management. Speed and quality of repairs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Custo total decorrente de perdas de água.	22
Figura 2 –	Componentes para controle das perdas reais.	26
Figura 3 –	Estruturação do problema.	38
Figura 4 –	Escala linguística de avaliação.	39
Figura 5 –	Possíveis distribuições de $d_j(a,b)$	41
Figura 6 –	Representação gráfica da função de preferência na abordagem Geldemann <i>et al.</i> (2000).	43
Figura 7 –	Distribuições dos conjuntos fuzzy mais encontradas no problema.	48
Figura 8 –	Resultados finais obtidos pelos métodos multicritérios: Goumas, Geldemann e Promethee II.	53
Figura 9 –	Resultados dos métodos para os diferentes cenários propostos.	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Parcelas das perdas de água (reais e aparentes) em relação ao volume que entra no sistema.	19
Quadro 2 -	Características principais de perdas reais e aparentes.	21
Quadro 3 -	Funções de preferência do Método Promethee.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Conjuntos fuzzy triangulares para escala linguística.	39
Tabela 2 -	Pesos médios obtidos via entrevista.	45
Tabela 3 -	Matriz fuzzy de avaliação.....	46
Tabela 4 -	Desempenho das alternativas em cada subcritério via comparativo de Índice Yager	47
Tabela 5 -	Matriz de preferência para o subcritério de energia economizada pela abordagem Goumas e Lygerou (2000).	48
Tabela 6 -	Grau de hierarquização para Fuzzy Promethee II pela abordagem Goumas e Lygerou (2000).	49
Tabela 7 -	Comparativo de fluxos para Fuzzy Promethee II pela abordagem Goumas e Lygerou (2000).	49
Tabela 8 -	Matriz de preferência do subcritério de energia economizada pela abordagem Geldemann <i>et al.</i> (2000).	50
Tabela 9 -	Grau de hierarquização para Fuzzy Promethee II pela abordagem Geldemann et al. (2000).	50
Tabela 10 -	Comparativo de fluxos para Fuzzy Promethee II pela abordagem Geldermann et al. (2000).	51
Tabela 11 -	Matriz de preferência para o subcritério de energia economizada pelo Método Promethee II.	51
Tabela 12 -	Grau de hierarquização para Promethee II.	52
Tabela 13 -	Comparativo de fluxos para Promethee II.....	52
Tabela 14 -	Pesos atribuídos nos novos cenários de análise.....	54
Tabela 15 -	Resultados obtidos nos diferentes cenários.	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	INFRAESTRUTURA EM REDES DE ÁGUA NO BRASIL.....	17
3.2	CLASSIFICAÇÃO DAS PERDAS DE ÁGUA	18
3.3	IMPACTO ECONÔMICO DAS PERDAS DE ÁGUA	22
3.4	GESTÃO DE PERDAS DE ÁGUA	24
3.4.1	Controle ativo de vazamentos.....	26
3.4.1.1	Haste de escuta	27
3.4.1.2	Geofone	27
3.4.1.3	Correlacionador de ruídos	28
3.4.1.4	Haste de perfuração	28
3.4.1.5	Procedimentos básicos.....	28
3.4.2	Gestão de pressão.....	29
3.4.3	Gestão de infraestrutura	31
3.4.4	Velocidade e qualidade dos reparos.....	32
3.5	MÉTODO FUZZY PROMETHEE.....	33
4	METODOLOGIA.....	37
4.1	ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA.....	37
4.2	OBTENÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	38
4.3	O MODELO DE DEFUZZIFICAÇÃO	39
4.4	MÉTODO MULTICRITÉRIO F-PROMETHEE.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45

6	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO.....	63

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2009), estima-se que o Brasil possua cerca de 12% da disponibilidade de água doce do planeta, entretanto a distribuição natural desse recurso não é equilibrada. Na Região Nordeste, por exemplo, observam-se condições críticas em períodos de estiagem que, atreladas à alta evapotranspiração, subsolo desfavorável e baixo desenvolvimento socioeconômico, configuram um cenário preocupante. Apesar disso, o percentual de perdas de água na região é elevado, reflexo dos baixos investimentos na manutenção das redes de abastecimento de água. Em geral, pode-se afirmar que as perdas são influenciadas por diversos fatores infraestruturais e operacionais. Estas dependem basicamente das características das redes de distribuição e de fatores relacionados às práticas de operação, do nível de tecnologia do sistema e da expertise dos técnicos responsáveis pelo controle dos processos (BEZERRA; CHEUNG, 2013).

O combate efetivo das perdas de água é um dos problemas mais desafiadores para os gestores das companhias de saneamento. As empresas prestadoras de serviço devem buscar continuamente níveis elevados de eficiência e estarem aptas a fornecer o melhor serviço aos usuários. Além de impactar diretamente no faturamento, as perdas afetam a imagem das empresas junto à sociedade, aos agentes financiadores, aos órgãos ambientais e ao poder público.

O desenvolvimento de técnicas direcionadas especificamente para a gestão de perdas em sistemas de distribuição de água é, relativamente, novo. Durante muito tempo, não havia sequer um conceito padronizado para perdas de água, dificultando a quantificação, classificação e determinação de padrões para os processos das empresas (ABES, 2015).

Atualmente, as perdas de água são classificadas em aparentes e reais. As perdas aparentes, também chamadas de perdas não físicas e perdas comerciais, correspondem ao volume de água consumido, mas que não é contabilizado pela companhia de abastecimento, ou seja, é a parte da água distribuída que não foi fisicamente perdida, mas não gerou receita a empresa. As perdas aparentes são causadas por ligações clandestinas, roubo ou uso ilegal, fraudes nos hidrômetros, erros de leituras dos hidrômetros e falhas no cadastro comercial.

As perdas reais representam o volume efetivamente perdido no sistema. Essas são decorrentes de vazamentos que ocorrem nas tubulações das adutoras e nas redes de distribuição, nos ramais das ligações prediais, nas estações de tratamento de água e nos extravasamentos de reservatórios. A quantidade de água perdida devido aos vazamentos nas redes de distribuição representa um dos maiores desafios para os gerentes das empresas, não

só por causa do custo, mas também porque implica impactos na sociedade e no meio ambiente. Fato que é agravado em regiões onde a disponibilidade hídrica é limitada, que é o caso da Região Nordeste.

Portanto, o desenvolvimento de novas técnicas e metodologias que empregam princípios baseados em conhecimentos predominantemente científicos, como, por exemplo, teorias da engenharia hidráulica, sistemas de suporte à decisão, e modelos de gestão (planejamento estratégico), é imprescindível. A tomada de decisão deve incluir um maior número de critérios, além dos aspectos puramente técnicos e econômicos que normalmente são levados em consideração na avaliação de um projeto, o que eleva a complexidade de processo e configura-se como um grande desafio para os gestores.

Caso o problema seja observado unicamente do ponto de vista econômico, é possível que as ações se resumam apenas na substituição de hidrômetros e na reparação de vazamentos evidentes ou relatados. No entanto, existem fatores técnicos, econômicos e sociais que devem ser considerados, a fim de que as ações impostas sejam as mais apropriadas para a empresa, a população e o meio ambiente.

Sob esse cenário, surge a necessidade da análise multicritério como ferramenta fundamental de apoio à decisão, possibilitando a hierarquização de soluções viáveis para gestão de perdas em um panorama de critérios e subcritérios que refletem as necessidades e anseios locais. Através da análise multicritério Fuzzy Promethee, pode-se obter uma hierarquização da viabilidade das soluções, considerando as várias nuances de problemas reais, além de imprecisões e de ambiguidades, que são comuns na gestão de perdas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar métodos multicritérios Fuzzy Promethee e Promethee II, a fim de avaliar quais as alternativas são mais viáveis para gestão de perdas de água em sistemas de abastecimento de água, considerando critérios socioeconômicos, técnicos e fatores ambientais preponderantes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar a aplicação do Método Fuzzy Promethee com as abordagens de Goumas e Lygerou (2000) e Geldemann *et al.* (2000);
- Quantificar o impacto da adoção da Lógica Fuzzy, a fim de avaliar o desempenho do Método Promethee II através da comparação dos resultados obtidos nos diferentes modelos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção busca esclarecer conceitos importantes que serão utilizados ao longo do trabalho e que servirão de suporte e embasamento teórico à metodologia empregada. Perfazendo, desde conceitos básicos sobre perdas de água, até ações de controle e gestão de perdas e estruturação do método multicritério Fuzzy Promethee.

3.1 INFRAESTRUTURA EM REDES DE ÁGUA NO BRASIL

A gestão de recursos hídricos em países em desenvolvimento, como o Brasil, passou por fases similares aos dos países desenvolvidos, a diferença básica foi o período em que cada estágio ocorreu. Após a segunda guerra mundial, enquanto países desenvolvidos construíam diversas obras hidráulicas, o Brasil estava na fase de inventariar seus recursos (TUCCI *et al.*, 2000). Similarmente, apenas na década de 80 foi aprovada a legislação ambiental e os critérios de controle de sistemas hídricos e hidrelétricos, enquanto países desenvolvidos já apresentavam uma base legislativa de controle ambiental desde 1960.

Historicamente, os investimentos em expansão dos sistemas foram privilegiados no setor de saneamento básico brasileiro, principalmente nos serviços de abastecimento de água. Segundo Barreto (2008), a política adotada é a gerência pela oferta, ou seja, aumenta-se a oferta para fazer frente ao aumento da demanda. Dessa forma, o crescimento populacional e a poluição de mananciais promovem, cada vez mais, a busca por mananciais mais distantes dos grandes centros urbanos, o que demanda maiores investimentos na infraestrutura. Sendo a água um recurso escasso, finito e vulnerável, essa abordagem é limitada, corroborando para que fossem empreendidas ações de controle sobre a demanda como forma de aliviar a pressão sobre os mananciais.

Apesar da mudança gradual de postura no gerenciamento de recursos hídricos, a pouca atenção dada aos investimentos na manutenção e na modernização da gestão dos prestadores dos serviços tem resultado em uma série de ineficiências na provisão como, por exemplo, elevadas perdas de água, tanto reais quanto aparentes. Um estudo realizado em 2013 pela Fundação para Pesquisa e Desenvolvimento da Administração, Contabilidade de Economia (FUNDACE, 2013) aponta a ineficiência dos prestadores em monitorar a rede de abastecimento e mensurar a água produzida, distribuída e consumida, ressaltando os seguintes problemas de operação dos prestadores de serviço:

- Produção, na maioria dos casos, de quantidade de água muito superior à necessária, o que amplia os custos de produção;
- Parcela significativa da água produzida é perdida na distribuição, ou seja, nem chega aos cidadãos, o que representa custos incorridos e desperdícios;
- Parte da água distribuída não é cobrada, ou seja, o consumidor recebe o recurso hídrico, consome, mas não paga. O prestador, por sua vez, incorre nos custos de produção e de distribuição sem auferir receita;
- O não pagamento pelo usuário estimula, ainda, o consumo excessivo e o desperdício (FUNDACE, 2013, p.2).

O Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil, criado pelo Ipea e PNUD, apresentou um panorama nacional do abastecimento urbano de água, no qual pôde-se observar que os maiores problemas de abastecimento de água decorrem da existência de sistemas produtores deficitários. Aproximadamente 46% das sedes urbanas necessitam de investimentos em seus sistemas produtores, e 9% apresentam déficits decorrentes dos mananciais utilizados. No que se refere às ações não estruturais, as principais preocupações concentram-se no controle de perdas de água do sistema de produção e distribuição de água. Para isso, foram definidos estratégias e investimentos para gestão nacional de perdas. Já as obras estruturais, o planejamento incluiu um conjunto de obras para o aproveitamento de novos mananciais e para adequações de sistemas de produção de água, totalizando investimentos de R\$ 22,2 bilhões, beneficiando cerca de três mil municípios (55% do total do País) e cerca de 139 milhões de habitantes até o ano 2025 (72% da população brasileira estimada).

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS PERDAS DE ÁGUA

Por muito tempo, o conceito de perdas de água e sua abrangência não foram padronizados, essa falta de um entendimento partilhado corroborou para que a avaliação das perdas fosse distinta em cada país, ou mesmo em cada companhia de saneamento em um mesmo país. Nos Estados Unidos, por exemplo, os volumes de vazamentos eram estimados pela água não contabilizada que sobrava ao realizar-se a Auditoria das Águas. No Japão, por sua vez, as perdas de água ficavam restritas aos conceitos de uso efetivo e não efetivo da água (ABES, 2015).

A falta de uniformização impossibilitava avaliar e comparar os indicadores de perdas entre sistemas de abastecimento de cidades, países e companhias. Dessa forma, não era possível afirmar qual sistema era mais eficaz e tampouco elaborar um plano de ação preciso de controle de perdas. Tendo isso em vista, a *International Water Association – IWA* constituiu um grupo-tarefa (*Water Loss Specialist Group*) para estudar, discutir e propor uma padronização mundial de terminologia, conceitos e indicadores de perdas em sistemas

públicos de abastecimento de água. Segundo a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2015), esse estudo foi concluído por volta do ano 2000, e o Brasil adotou esse entendimento por meio do Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS), do Ministério das Cidades, e de várias companhias estaduais e municipais de saneamento. Ainda assim, muitos países prosseguem com suas abordagens peculiares, dando margem para interpretações equivocadas dos seus dados e indicadores.

Apesar da confiabilidade dos estudos promovidos pelo IWA, pode-se perceber que este tema ainda está aberto para pesquisas, pois muitos projetos impõem limites a algumas considerações iniciais e até mesmo trazem novas propostas para o segmento. O objetivo central é oferecer suporte técnico e operacional às companhias ou operadoras de saneamento do mundo todo (ABES, 2015).

No Quadro 1, é apresentado o balanço hídrico, desenvolvido pela IWA, que esquematiza os processos pelos quais a água pode passar desde o momento em que entra no sistema. A Matriz do Balanço Hídrico é considerada por muitos o "ovo de Colombo" na estruturação do problema das perdas de água, pois apesar de objetiva, clara e fácil de ser compreendida, demandou estudos e análises complexas para sua elaboração (ALEGRE *et al.*, 2006).

Quadro 1- Parcelas das perdas de água (reais e aparentes) em relação ao volume que entra no sistema.

		Consumo autorizado faturado	Consumo faturado medido (inclui água exportada)	Água Faturada
			Consumo faturado não medido (estimados)	
Água que entra no sistema (inclui água importada)	Consumo autorizado	Consumo autorizado não faturado	Consumo não faturado medido (usos próprios, caminhão pipa, etc.)	
			Consumo não faturado não medido (combate a incêndios, favelas, etc.)	
	Perdas de água	Perdas aparentes	Uso não autorizado (fraudes e falhas de cadastro)	Água Não Faturada
			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 nos ramais (a montante do ponto de medição)	

Fonte: IWA (2000).

Segundo Tardelli Filho (2014), pode-se fazer algumas leituras importantes a partir da estruturação dos usos da água proposta pelo IWA. A primeira delas reforça a diferença entre perdas reais e aparentes, conforme as definições seguintes.

- Perdas reais referem-se aos vazamentos em várias partes do sistema e extravasamentos em reservatórios de água tratada, ou seja, as perdas físicas de água;
- Perdas aparentes referem-se às águas que são consumidas, mas não são faturadas pela companhia de saneamento, ou seja, as perdas comerciais, decorrentes, principalmente, de submedição nos hidrômetros e fraudes.

Além disso, convém salientar que nem todas as águas não faturadas são perdas, há usos legítimos da água, mas que não são faturados como, por exemplo, combate a incêndios e abastecimento de água em assentamentos urbanos irregulares. Tendo isso em vista, a seguir são explicitados alguns conceitos importantes adotados pela IWA.

Consumo autorizado: volume anual de água, medido ou não medido, faturado ou não, fornecido a consumidores registrados, a outros que estejam implícitas ou explicitamente autorizados a fazê-lo para usos domésticos, comerciais ou industriais e à própria entidade gestora. Inclui a água exportada. O consumo autorizado pode incluir água para combate à incêndio, lavagem de condutas e coletores, lavagem de ruas, rega de espaços verdes municipais, etc. O consumo autorizado inclui as fugas e o desperdício, por parte de clientes registrados, que não são medidos.

Perdas de água: volume de água correspondente à diferença entre a água que entra no sistema e o consumo autorizado. As perdas de água dividem-se em perdas reais e perdas aparentes.

Água não faturada: volume de água correspondente à diferença entre os totais anuais da água que entra no sistema e do consumo autorizado faturado. A água não faturada inclui não só as perdas reais e aparentes, mas também o consumo autorizado não faturado.

Consumo faturado medido: é o volume de água anual que gera receita para a companhia prestadora de serviços e corresponde ao somatório dos valores arrecadados nas contas de água emitidas. É composto pelo volume medido nos hidrômetros.

Consumo faturado não medido: corresponde ao consumo estimado pelas companhias de abastecimento, relativo à economia onde não há hidrômetro, seja o consumidor de baixa renda ou não.

Consumo não faturado medido: é o consumo destinado aos clientes que a empresa dispensa o pagamento da conta de água mais o consumo interno medido da companhia (por exemplo, lavagem de filtros da ETA).

Consumo não faturado não medido: é o consumo destinado aos consumidores que a empresa dispensa o pagamento da conta de água e o volume não é medido (por exemplo, água para combate a incêndio, abastecimento de caminhões pipa, irrigação de praças etc.).

Uso não autorizado: é o volume que não produz receita. Neste volume, incluem-se as ligações clandestinas, as fraudes etc.

No Quadro 2, é mostrado um resumo das características preponderantes das perdas reais e aparentes, a fim de esclarecer as especificidades e impactos de cada uma.

Quadro 2 - Características principais de perdas reais e aparentes.

Itens	Características Principais	
	Perdas Reais	Perdas Aparentes
Tipo de ocorrência mais comum	Vazamento.	Erro de medição.
Custos associados aos volumes de água perdidos	Custo de produção.	Tarifa.
Efeitos no Meio Ambiente	Desperdício do Recurso Hídrico e necessidades de ampliações de mananciais.	-
Efeitos na Saúde Pública	Risco de contaminação.	-
Empresarial	Perda do Produto.	Perda de receita.
Consumidor	Imagem negativa (ineficiência e desperdício).	-
Efeitos no Consumidor	Repasse para tarifa e desincentivo ao uso racional	Repasse para tarifa e incitamento a roubos e fraudes.

Fonte: ABES (2013).

As operadoras de água brasileiras têm grande dificuldades em identificar e atuar no controle de perdas de água dos processos produtivos de seus sistemas de abastecimento. Os altos índices de perdas em um sistema de abastecimento de água podem implicar em um déficit econômico crítico para as concessionárias. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019), no ano de 2017, o índice de perdas do conjunto de prestadoras de serviço no Brasil era de 38,3%. Isso significa que a despesa operacional para produzir e distribuir a água perdida é desperdiçada, ou seja, a água produzida não é de fato faturada pela operadora.

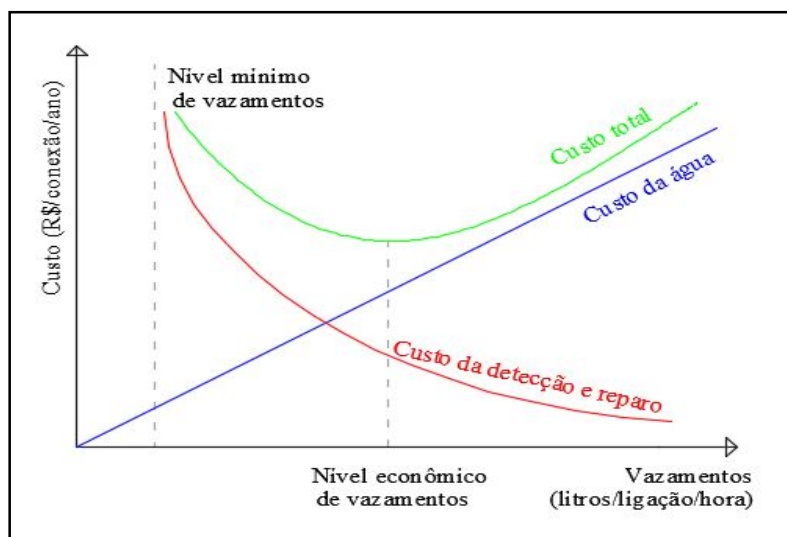
3.3 IMPACTO ECONÔMICO DAS PERDAS DE ÁGUA

No sistema de abastecimento de água, existe um conceito importante conhecido como o nível econômico de vazamentos que preconiza que, para qualquer sistema de água potável, existe um nível de fuga que não é economicamente rentável reparar. Isso significa dizer que há um ponto em que o valor de água perdido devido a vazamentos é menor que o valor do investimento no controle de perdas (GALVÁN, 2011).

Segundo Farley e Trow (2003), o nível econômico do vazamento a curto prazo está diretamente ligado à condição da rede e à facilidade de coleta de dados. Em contrapartida, uma análise mais rebuscada é exigida a longo prazo como, por exemplo, a análise de investimentos tendo em conta o nível atual de fuga, o nível econômico de vazamento no curto prazo, a quantidade de água poupada, a mudança em termos de recursos investidos do controle de vazamento ativo comparado à nova política, o custo dos investimentos propostos e o período de retorno.

Outro aspecto importante é a existência de um nível mínimo de vazamentos, isto porque os sistemas de distribuição são compostos por tubulações enterradas e sob pressão, sendo inevitável um nível mínimo de perdas reais. É ilustrado na Figura 1 a relação entre o custo econômico e os vazamentos do sistema de abastecimento.

Figura 1 – Custo total decorrente de perdas de água.



Fonte: INSTITUTO TRATA BRASIL (2015).

Obviamente, em países como o Brasil, cujo nível de perdas é elevado, a ideia de inviabilidade econômica de gestão de perdas não reflete a realidade, pois as implementações

de ações de controle demandam menores custos que os prejuízos bilionários resultantes de perdas de água.

Ao longo do tempo, muitos estudos foram desenvolvidos a partir do estudo econômico do gerenciamento de vazamentos. Em 1977, por exemplo, a fundação de pesquisa da *American Water Works Association* (AWWA) publicou o relatório “Perdas de água e rendimento: água não faturada”. Em 1987, o Banco Mundial publicou um “Guia de trabalho para a redução e controle da água não-abastecida” dentro da série de gerenciamento de operações das agências de abastecimento. Além disso, países como Inglaterra e País de Gales exigem, por ordem do Escritório de Serviços de Água (OFWAT), das empresas de abastecimento de água, o cálculo dos níveis econômicos de vazamentos e os planejamentos de redução de vazamentos desde 1998.

Segundo Gálvan (2011), parte do trabalho realizado pela OFWAT desde a década de 1980 foi publicado em 1994 em uma série de volumes intitulada “Relatórios de gerenciamento de vazamentos”. Nesses, é possível dispor de uma metodologia para cálculo do custo marginal da água e do controle ativo de vazamentos.

Em geral, as perdas de água geram custos energéticos, sociais, técnicos, ambientais e custos relacionados com o tratamento da água. Isso ocorre porque as perdas reais corroboram para que um maior volume de água seja retirado do corpo hídrico a fim de cobrir a ineficiência do sistema. Dessa forma, são demandados maiores gastos com produtos químicos para tratamento da água, energia elétrica, mão de obra e serviços terceirizados, além do aumento da pressão de consumo no manancial e, conseqüentemente, um grande impacto negativo sobre o meio ambiente. Do ponto de vista econômico-financeiro e ambiental, diminuir as perdas de água é viável para as operadoras e permite que mais pessoas sejam abastecidas.

Similarmente, é de interesse dos prestadores otimizar o volume gasto para tratamento e transporte da água do manancial ao destino final, que retornará na forma de receita para as operadoras, além da redução das perdas que impactam diretamente na receita das concessionárias. Diminuir fraudes na ligação, a falta de hidrômetros, os problemas de medição e os consumos não faturados geram um aumento do volume faturado.

Como pode-se perceber, existem várias abordagens diferentes para redução do impacto econômico das perdas de água para o prestador, o que torna relevante saber a influência econômica de cada tipo de perda e quais ações de controle devem ser implementadas e priorizadas no sistema. Para facilitar a tomada de decisão, deve-se estimar o prejuízo que cada segmento agrega.

O Instituto Trata Brasil desenvolveu uma metodologia, com base índice de perdas de faturamento total o qual inclui perdas comerciais e perdas físicas, capaz de elaborar um diagnóstico da eficiência em um sistema de abastecimento e de mensurar os potenciais ganhos com a redução de perdas. O impacto econômico das perdas de água é uma composição formada pelo impacto das perdas físicas, do volume de serviços e das perdas comerciais. Para a divisão das perdas de água entre perdas físicas e comerciais, o instituto optou por utilizar a referência do Banco Mundial para países em desenvolvimento, que indica que as perdas podem ser divididas em 60% de perdas físicas e 40% de perdas comerciais. Sendo assim, às perdas físicas e volume de serviços há um prejuízo relativo ao custo de produção da água e às perdas aparentes, à falta de cobrança da tarifa média.

3.4 GESTÃO DE PERDAS DE ÁGUA

A gestão de perdas de água é o conjunto de atividades que visa reduzir as perdas de um sistema de abastecimento de água e, conseqüentemente, os custos de produção dessa água. As perdas ocorrem desde a captação de água até a distribuição e se devem, principalmente, à operação e manutenção deficientes e inadequada gestão das companhias de saneamento.

O primeiro passo para combater às perdas de água é levantar dados sobre o sistema e estudar as alternativas viáveis. A partir disso, é possível definir um plano de ação de curto, médio e longo prazo, que orientará a tomada de decisão ao longo de todo o processo. Para Baggio (2000), as seguintes medidas devem ser tomadas para gestão de perdas:

- Implantação de um modelo de gerenciamento de rotina do trabalho no processo de operação de sistemas de abastecimento de água;
- Democratização das informações;
- Promoção de ações para a conscientização do problema;
- Bloqueio das causas predominantes das perdas de água.

Miranda (2002) afirma que os principais fatores para o elevado índice de perdas decorrem da baixa capacidade institucional e de gerenciamento dos sistemas, poucos investimentos no setor, cultura do aumento da oferta em detrimento ao controle da demanda e má gestão da pressão. Todos esses fatores impedem que o sistema seja gerido de forma eficiente, com pressão adequada e custo mínimo para população.

Segundo Arikawa (2005), a implantação do Plano Nacional de Saneamento na década de 70 foi um marco histórico para a gestão de perdas de água no Brasil. Através dele, foi

possível aumentar significativamente a quantidade de companhias estatais de água e esgoto. Apesar disso, foi apenas em 1981 que, por iniciativa do Banco Nacional de Habitação, foi criado o Plano Estadual de Controle de Perdas, cujo objetivo era a redução do volume de água perdido no sistema através da identificação dos fatores causadores.

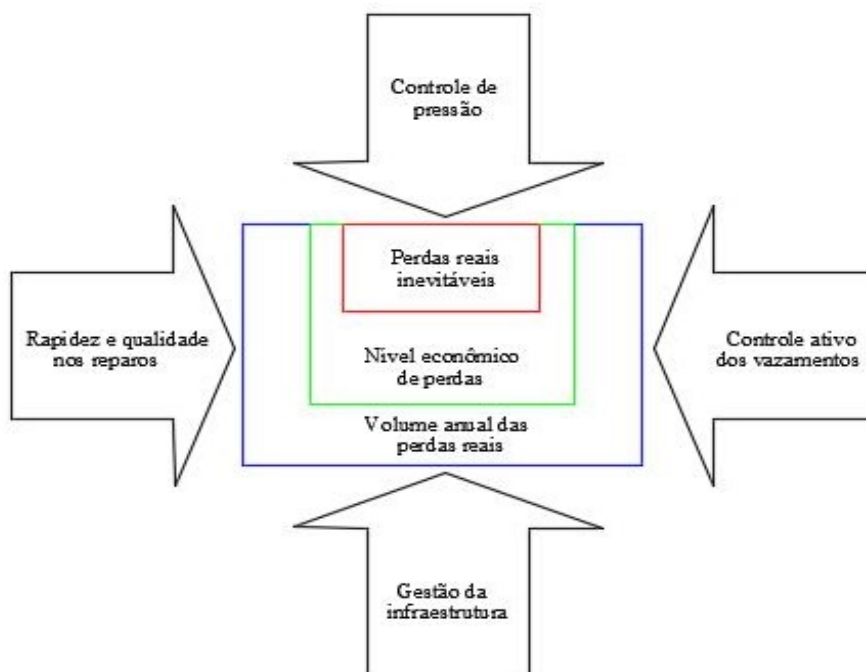
Outro passo importante na trajetória de controle de perdas foi a criação do Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS) pelo Governo Federal no começo da década de 90, que propiciou o surgimento Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS). O SNIS é uma plataforma que dispõe de diagnóstico, visão geral da prestação de serviços em saneamento e armazenamento de dados de série histórica, auxiliando na tomada de decisão e quantificação das perdas de água de cada prestador e município.

Andrade Sobrinho e Borja (2012) reforçam que, apesar da literatura disponível, fornecer estratégias e métodos para uma gestão eficiente, boa parte das Empresas de Saneamento do Brasil insiste em executar ações pontuais, de forma não integrada e sem continuidade. Esse cenário reduz drasticamente a eficiência do controle de perdas, tendo em vista que um programa de perdas é um processo de mudança cultural devendo ser internalizado por todos e disseminado entre todos os funcionários próprios e terceirizados.

Os quatro pilares principais que sustentam o gerenciamento das perdas (Figura 2) são:

- Controle ativo de vazamentos: envolve ações programadas de investigação e detecção dos vazamentos não-visíveis, por métodos acústicos e de pesquisa, e a execução dos reparos necessários.
- Gestão de pressão: redução do fluxo de perdas indetectáveis sem modificar a infraestrutura, realizando o controle das pressões do sistema;
- Gestão de infraestrutura: conhecimento das condições dos sistemas de redes de distribuição como, por exemplo, idade e material, para gerenciamento otimizado dos recursos relativos à substituição da rede;
- Velocidade e qualidade de reparos: execução de reparo assim que detectada a ocorrência, seja um vazamento visível ou não.

Figura 2 – Componentes para controle das perdas reais.



Fonte: LAMBERT e HIRNER (2000).

3.4.1 Controle ativo de vazamentos

O controle ativo de vazamentos promove varreduras periódicas através do uso de equipamentos de detecção acústica, a fim de buscar vazamentos não visíveis e ocultos. Configura-se como oposto ao controle passivo de perdas, no qual a companhia de abastecimento espera a notificação dos clientes sobre a existência de um vazamento aparente (SANTOS; MONTENEGRO, 2014).

Conforme Gálvan (2011), os principais métodos utilizados nessa abordagem são:

- Inspeções regulares ou sondas em conexões e tubulações;
- Realização de medições por zonas;
- Medições por distrito, para mensurar o fluxo total que entra diariamente, semanalmente e mensalmente;
- Medições contínuas ou intermitentes dos fluxos noturnos;
- Realização de medições ao longo do dia;
- Utilização de sensores de som para vazamentos.

Cada um desses métodos tem suas limitações e alcance de aplicação. Portanto, o uso de um ou outro, ou a combinação de vários, será determinado pelas dimensões e condições do sistema de distribuição. A seguir, tem-se uma breve explanação dos principais equipamentos adotados no controle de vazamentos não visíveis.

3.4.1.1 Haste de escuta

A haste de escuta é um acessório que permite encontrar possíveis vazamentos e furtos de água em tubulações. É composta por um amplificador, que pode ser mecânico ou eletrônico, ligado a uma haste metálica. A haste é introduzida no solo e capta ruídos produzidos por acessórios da rede, todavia o local preciso do vazamento não é indicado (ALMEIDA, s.d.).

Por causa disso, é normalmente utilizada para se obter um primeiro mapeamento indicativo da ocorrência de vazamentos, que serão confirmados depois com o uso de geofone, correlacionador de ruídos e haste de perfuração. As hastes podem ser mecânicas ou eletrônicas, apesar das últimas disporem de maior faixa de frequência de operação, apresentam maior custo de aquisição e manutenção (ZANIBONI, 2009).

3.4.1.2 Geofone

“Os geofones têm como princípio básico de funcionamento a amplificação dos ruídos produzidos pelos vazamentos, captando-os nas várias frequências possíveis e tornando-os perceptíveis aos seres humanos” (ALMEIDA, s. d.). Similarmente às hastes de escuta podem ser mecânicos ou eletrônicos. Enquanto o geofone eletrônico é formado por um sensor, um amplificador, um filtro de ruídos e um fone de ouvidos, o mecânico não dispõe de filtro de ruídos, o que confere a essa menor precisão.

Segundo Zaniboni (2009), a capacidade de filtragem do equipamento depende da sensibilidade dele à intensidade das frequências e da diminuição das frequências que podem interferir na escuta do vazamento, em função das informações relativas ao material, diâmetro e profundidade da rede a ser geofonada.

3.4.1.3 Correlacionador de ruídos

Zaniboni (2009) aponta que o correlacionador de ruídos é o equipamento para detecção acústica mais desenvolvido tecnologicamente. Consiste basicamente de um conjunto de dois sensores eletrônicos, conectados a dois pré-amplificadores e uma unidade de processamento. Seu princípio de funcionamento é a correlação entre o tempo em que um som de vazamento atinge dois sensores colocados em pontos de contato com componentes das redes. É importante que o vazamento esteja na área entre os sensores para que o equipamento opere corretamente.

Uma característica importante dos correlacionadores de ruídos é a possibilidade de executar sua operação em trechos onde existem vários tipos de materiais e/ou diâmetros entre os sensores. Nesse caso, a existência de vários tipos de materiais e diâmetros diferentes fará com que o equipamento calcule um tubo médio, que servirá de parâmetro indicador para os cálculos das distâncias.

3.4.1.4 Haste de perfuração

Utilizada para confirmar a existência do vazamento, a haste de perfuração permite obter a localização precisa do vazamento, evitando a abertura de áreas desnecessárias para execução do reparo. Basicamente, essas podem ser do tipo perfuratrizes mecânicas ou manuais, tendo, é claro, as perfuratrizes mecânicas maior custo de aquisição e manutenção. As perfuratrizes podem ser utilizadas em qualquer tipo de pavimento e permitem a execução de pequenos furos na região onde o vazamento foi detectado (ZANIBONI, 2009). Quando a haste é retirada, a umidade que se apresenta na mesma, bem como do material que vem grudado confirma ou não a presença do vazamento na região do furo (ABENDI, 2005).

3.4.1.5 Procedimentos básicos

Almeida (s.d.) destaca que o controle ativo de vazamentos sem pesquisa e planejamento levaria a custos exorbitantes, por isso é necessário definir áreas prioritárias de implantação. Quando não há medições e monitoramento das vazões de cada região, deve-se utilizar dados históricos da ocorrência de vazamentos, bem como registro de pressões elevadas e idade da rede. A situação ideal, no entanto, é a medição em tempo real das vazões de cada área e o monitoramento das vazões mínimas noturnas.

Com informações confiáveis e definição das áreas prioritárias, a equipe de detecção, normalmente formada por um técnico e um ou dois auxiliares, deve ir a campo fazer uma varredura da área crítica com a haste de escuta, apontando os trechos com possíveis vazamentos. Utilizando o geofone ou o correlacionador de ruídos, é possível obter a localização exata do vazamento que deve ser posteriormente confirmada pela introdução de uma haste de perfuração no solo. Caso a ponta da haste esteja úmida, há vazamento no ponto e reparos devem ser executados (ALMEIDA, s.d.).

3.4.2 Gestão de pressão

A pressão de operação da rede de abastecimento de água influencia a taxa de vazamento, visto que a velocidade de escoamento da água é alterada. Por isso, gerir a pressão da rede configura-se como uma alternativa muito importante para controle de perdas de água, principalmente durante a noite quando o consumo é menor e as pressões são maiores. Estudos realizados apontam que um sistema que opera sob condição contínua com pressão superior a 40 mca apresenta aumento significativo da probabilidade de ocorrência de novos vazamentos (GALVÁN, 2011).

Nas últimas décadas, vários estudos relacionam as ações estratégicas para controle de vazamentos e pressão nas tubulações com a minimização das perdas no sistema de distribuição de água. Lambert (2002) lista alguns benefícios claros para implantação da gestão de pressão como, por exemplo:

- Extensão da vida útil da infraestrutura de distribuição;
- Redução na frequência de novas quebras em tubos e acessórios;
- Redução de vazão de vazamentos existentes;
- Redução de novos vazamentos em tubulações;
- Redução do consumo de alguns componentes diretamente relacionados à pressão da rede.

Apesar das vantagens inegáveis da gestão de pressão em um sistema, é de primordial importância avaliar os diferentes requisitos e exigências a serem alcançados. Dessa forma, deve-se optar pela forma de gestão de pressão conforme as características do sistema de distribuição de água. Para a implantação de programas de combate às perdas, é imprescindível a setorização do sistema. A setorização consiste na divisão da rede em distritos de medição e controle (DMC) por patamares de pressão em função das condições topográficas. Segundo

Alegre *et al.*(2005), a setorização deve garantir não apenas pressões mínimas e máximas admissíveis, mas também a manutenção de um sistema de pressões estável.

Morrison (2004) destaca que a setorização surgiu em 1980 no Reino Unido, quando a entidade gestora isolou parte da rede de distribuição por meio do fechamento de válvulas, controlando assim a entrada e saída de água na zona. Os objetivos principais consistem em ter a vazão regularmente monitorada para que vazamentos ou rupturas possam ser identificados e gerenciar as pressões, permitindo à rede operar em um nível ótimo de pressão (MORRISON *et al.*, 2007).

Convém destacar que o investimento necessário para setorizar uma rede de abastecimento de água é alto e, por causa disso, não é possível fazê-lo com a celeridade desejável. Além disso, o tamanho dos distritos de medição e controle tem influência direta no custo de implantação, quanto menor, maior será o seu custo, tendo em vista a necessidade de mais dispositivos de controle e monitoração (ALEGRE *et al.*, 2005; FREIRE, 2017).

O controle de pressão em DMC pode ser realizado, em geral, por meio do controle de velocidade de rotação de conjuntos motor-bombas ligados diretamente ao sistema ou válvulas de controle automático. A operação de bombas em velocidade variável reduz os altos picos de correntes e tensão mecânica devido à partida dos motores, alto custo de energia devido a não adaptação da velocidade da bomba à operação e diminuição da vida útil dos componentes mecânicos (MESQUITA *et al.*, 2006).

A utilização de válvulas de controle automático tem a vantagem de poder ser implementado em qualquer DMC da rede de distribuição de água e permite ajustar a pressão a jusante ao consumo efetivo, de forma permanente ou ao longo do tempo (GOMES, 2011). Os tipos de válvulas mais utilizados pelas entidades gestoras são as válvulas redutoras de pressão (VRP). Segundo Ramos *et al.* (2004), a VRP regula a pressão através do acionamento de um dispositivo de obturação que aumenta ou reduz a perda de carga na peça até atingir a pressão definida. Araújo (2005) destaca que as válvulas redutoras de pressão podem ser controladas de forma mecânica ou eletrônica, funcionando para diversos patamares de pressão a depender da demanda de água. Segundo Motta (2010), as válvulas redutoras de pressão devem ser instaladas em um by-pass da rede principal, o sistema é composto ainda por um filtro, um medidor de vazões de válvulas de bloqueio a montante e a jusante a fim de proporcionar o isolamento do conjunto.

3.4.3 Gestão de infraestrutura

Infraestrutura de adução e distribuição de água é o conjunto de componentes do sistema que garante a prestação do serviço, devendo manter-se funcional enquanto for necessário. Para que uma infraestrutura se mantenha em condições de operacionalidade, surge a necessidade de uma gestão patrimonial eficaz, assegurando um equilíbrio entre as dimensões de desempenho, risco e custo a longo prazo. Uma das maiores dificuldades para gestão de infraestrutura em sistemas de abastecimento de água é a predominância de componentes enterrados, sendo difícil avaliar a condição física da estrutura (ALEGRE; COVAS, 2010).

Segundo Alegre e Covas (2010), a vida útil de um sistema pode ser definida como o período a partir da instalação em que o componente cumpre satisfatoriamente a função a que se destina. Em um sistema de abastecimento de água assim como em qualquer outro, a vida útil é um fator preponderante na gestão da infraestrutura. Essa depende do tipo e da natureza do componente, todavia Burns *et al.* (1999) afirmam que ainda que cada componente tenha uma vida útil associada, não se pode atribuir uma vida útil à infraestrutura em sua totalidade.

Os componentes de adução e de distribuição de água estão sujeitos a diversos tipos de fatores agressivos que contribuem para a degradação do material. Baptista e Alegre (2000a, 2000b) enumeram os principais agentes agressores do sistema: (1) Condições hidráulicas do escoamento, (2) Características químicas da água transportada no sistema, (3) Características químicas e físicas dos solos e das suas águas intersticiais e (4) Condições geotécnicas, sísmicas e mecânicas.

Sarzedas (2009) aponta os principais problemas inerentes à deterioração da infraestrutura de abastecimento de água:

- Aumento da taxa de quebra de tubulações devido à deterioração da integridade estrutural da tubulação, aumentando custos operacionais e de manutenção, perdas de água e inconveniências sociais atreladas ao agravamento da reparação;
- Diminuição da capacidade hidráulica do sistema, aumentando o consumo de energia elétrica e diminuindo a eficiência do serviço;
- Deterioração da qualidade da água no sistema de distribuição devido às incrustações e demais problemas na superfície interna das tubulações.

Segundo Galván (2011), algumas empresas optam por um plano anual de substituição de tubulações. Ao renovar uma certa porcentagem da rede de abastecimento de água, em certo

número de anos a rede seria totalmente renovada. A dúvida usual é qual parte deve ser renovada a cada ano a fim de obter os melhores benefícios. Alegre e Covas (2010) reforçam que estas decisões são dificultadas pelo fato de se tratar de infraestruturas enterradas que não podem ser facilmente inspecionadas, pelo que é necessário recorrer a métodos de diagnóstico e apoio à decisão indiretos.

Os benefícios da gestão de infraestrutura normalmente abrangem o melhoramento do serviço e redução de perdas de água. Cabe a entidade gestora a decisão de substituir ou reabilitar, a depender do tamanho do projeto, dos recursos disponíveis, de outros projetos da empresa e de sua capacidade financeira.

3.4.4 Velocidade e qualidade dos reparos

Apesar do tempo de reparo de vazamentos depender de fatores externos, como localização do vazamento, existência ou não de tráfego local, profundidade da tubulação e pavimentação da rua, por exemplo, o ideal é que esse tempo seja o menor possível. Além disso, deve-se ter uma atenção especial à qualidade da mão de obras e dos materiais utilizados nos reparos, a fim de evitar que haja reincidências (MOTTA, 2010). O desempenho de obras de baixa qualidade pode fazer com que o vazamento reapareça em um período de tempo relativamente curto, gerando custos não previstos e, conseqüentemente, perdas de recursos. Lambert (1998) afirma que a velocidade e a boa qualidade dos reparos são fatores preponderantes no gerenciamento de vazamentos.

Segundo Galván (2011), o tempo de reparo é frequentemente considerado um indicador interno de eficiência do sistema, apesar disso, deve-se levar em consideração os custos extras envolvidos na melhoria do serviço. Por isso, é importante encontrar um ponto ótimo para que os recursos disponíveis sejam utilizados da melhor maneira possível e perdas de água excessivas sejam evitadas.

Outro aspecto importante que deve ser levado em consideração são os custos sociais dos reparos. Esses podem ser de vários tipos como, por exemplo, interrupções de estradas para tráfego, paralisação do serviço de abastecimento de água, descontinuidades nos processos comerciais e industriais e perturbação da vida doméstica. O ideal é que os reparos sejam realizados o mais rápido possível, visando reduzir o volume perdido e a magnitude dos transtornos.

3.5 MÉTODO FUZZY PROMETHEE

Segundo Rignel *et al.* (2011), o precursor da Lógica Fuzzy foi o polonês Jan Lukasiewicz, que combinou conjuntos de grau de pertinência com fundamentos da lógica clássica. Essa abordagem corroborou para que, na década de 60, o professor de Ciências da Computação da Universidade da Califórnia Lofti Asker Zadeh fosse o primeiro autor de uma publicação sobre Lógica Fuzzy.

Apesar da inicial relutância da comunidade científica em absorver o método, foi percebida a necessidade de encontrar um método capaz de sintetizar as várias nuances de problemas reais presentes no cotidiano que não podem ser explicadas pelas pessoas envolvidas. Por isso, atualmente cada vez mais trabalhos são publicados sobre o tema.

Na Lógica Fuzzy, aspectos como incerteza, imprecisão e ambiguidade pertinentes aos problemas reais são analisados e incorporados nos métodos de apoio à decisão. Por causa disso, muitos autores têm estudado meios de integrar a Lógica Fuzzy aos métodos de apoio à decisão multicritério, buscando garantir uma análise mais próxima de uma situação real.

Neste trabalho, o método de apoio à decisão multicritério escolhido foi Promethee, sendo a Lógica Fuzzy uma ferramenta adicional ao método e não uma metodologia isolada. O Método Promethee estabelece uma relação de hierarquização entre as soluções adotadas, analisando-se os critérios estabelecidos pelo agente decisor. A Lógica Fuzzy, por sua vez, permite que o desempenho das alternativas seja difuso, enquanto as preferências do decisor não.

O Método Promethee apresenta seis variações principais, sendo essas:

- Promethee I: a interseção entre os fluxos estabelece uma pré-ordem parcial entre as alternativas;
- Promethee II: a interseção entre os fluxos estabelece uma pré-ordem completa entre as alternativas, organizadas em ordem decrescente de fluxo líquido;
- Promethee III: resolve os problemas por meio de tratamentos probabilísticos de fluxos, obtendo-se uma ordem por intervalos;
- Promethee IV: destina-se a problemas de escolha e ordenação com número de alternativas infinito;
- Promethee V: adotado após o estabelecimento de uma pré-ordem completa entre as alternativas, onde são inseridas restrições para as alternativas estabelecidas, com otimização inteira;

- Promethee VI: adotado quando o decisor não consegue estabelecer valores fixos de pesos adequados, ao invés disso, atribui-se intervalos para os pesos.

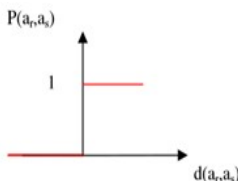
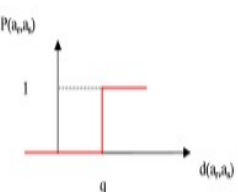
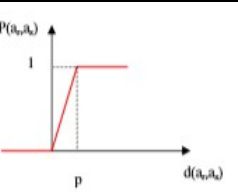
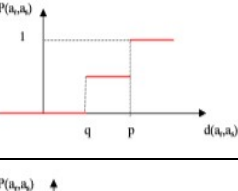
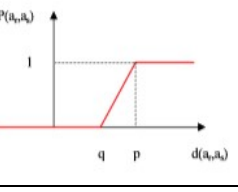
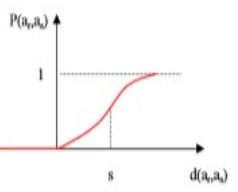
Optou-se por utilizar o Método Promethee II aliado a Lógica Fuzzy, pois nos trabalhos de Moraes e De Almeida (2006) e Mutikanga et al. (2011), cujo tema faz parte da mesma campo de atuação, foram utilizados o Promethee II como metodologia multicritério, indicando que essa variação atende bem aos requisitos da área de estudo.

Brans e Mareschal (2002) estabeleceram os seguintes conceitos importantes para o uso do Promethee II:

- w_j é o peso do critério j , que indica se um critério tem maior importância do que outro;
- $g_j(a)$ é o desempenho da alternativa comparada no critério j , atribuído de acordo com a escolha que o decisor achar mais apropriada;
- q é um limite de indiferença, que representa um valor de indiferença entre duas alternativas, expresso pelo maior valor de $[g_j(a) - g_j(b)]$, abaixo do qual existe uma indiferença e adotado, nesse trabalho, igual a 0;
- p é um limite de preferência, que representa um valor de preferência entre duas alternativas, expresso pelo menor valor de $[g_j(a) - g_j(b)]$, acima do qual existe uma preferência e adotado, nesse trabalho, igual a 0,4;
- $F_j(a,b)$ é a função de preferência, representando a preferência do agente decisor a duas alternativas, sendo essas comparadas em relação a um determinado critério. Seu valor varia entre 0 e 1.

Em geral, a função de preferência pode assumir diversas formas, a depender do problema a ser analisado. Existem seis possibilidades a serem utilizadas no processo (Quadro 1), sendo escolhida a função V com área de indiferença neste trabalho.

Quadro 3 – Funções de preferência do Método Promethee.

<i>I – Critério usual:</i> Não há parâmetro a ser definido		$gj(a) - gj(b) > 0$ $gj(a) - gj(b) \leq 0$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 0$
<i>II – Quase critério:</i> Define-se o parâmetro q (limite de indiferença)		$gj(a) - gj(b) > q$ $gj(a) - gj(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 0$
<i>III – Limite de preferência:</i> Define-se o parâmetro p (limite de preferência)		$gj(a) - gj(b) > p$ $gj(a) - gj(b) \leq p$ $gj(a) - gj(b) \leq 0$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = \frac{gj(a) - gj(b)}{p}$ $F(a,b) = 0$
<i>IV – Pseudocritério:</i> Definem-se os parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência)		$gj(a) - gj(b) > p$ $q < gj(a) - gj(b) \leq p$ $gj(a) - gj(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 1/2$ $F(a,b) = 0$
<i>V – Área de indiferença:</i> Definem-se os parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência)		$gj(a) - gj(b) > p$ $q < gj(a) - gj(b) \leq p$ $gj(a) - gj(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = \frac{gj(a) - gj(b) - q}{p - q}$ $F(a,b) = 0$
<i>VI – Critério Gaussiano:</i> O desvio-padrão deve ser fixado		$gj(a) - gj(b) > 0$ $gj(a) - gj(b) \leq 0$	A preferência aumenta segundo uma distribuição normal $F(a,b) = 0$

O Método Multicritério Fuzzy Promethee é retratado em vários trabalhos da literatura, com os pesquisadores adaptando os métodos a depender da abordagem e objetivos da pesquisa (RADOJEVIC; PETROVIC, 1997; GOUMAS; LYGEROU, 2000; GELDERMANN *et al.*, 2000; MOREIRA *et al.*, 2009; GUL *et al.*, 2017). Radojevic e Petrovic (1997), por exemplo, utilizaram a Lógica Fuzzy para obtenção das funções de preferência. Ao introduzir termos linguísticos como pequena, média e grande diferença, foi possível estabelecer a preferência de uma alternativa em relação a outra de maneira mais natural. Esses destacaram a imprecisão de julgamento das funções de preferência do método Promethee, apontando sua simplicidade e rigidez matemática.

Goumas e Lygerou (2000), por sua vez, avaliaram quatro utilizações para um campo geotérmico na Grécia, analisando a viabilidade em quatro critérios diferentes. Os autores optaram por utilizar números fuzzy triangulares para as avaliações das alternativas, mas os pesos de cada um dos critérios foram fixos e estipulados pelos pesquisadores. Para fins comparativos, a metodologia Promethee II também foi utilizada e os resultados foram analisados e discutidos.

Geldermann *et al.*(2000) analisaram o ciclo de vida nas indústrias siderúrgicas, atribuindo variáveis linguísticas aos pesos dos critérios e convertendo-as posteriormente em números fuzzy trapezoidais. Moreira *et al.*(2009) utilizaram a metodologia Fuzzy Promethee para estabelecer um ranking de modos de falha de equipamentos. Gul *et al.*(2017) analisaram materiais para execução de painéis de automóveis, atribuindo variáveis linguísticas e números fuzzy trapezoidais para as avaliações das alternativas.

Diante disso, observa-se que o Método Multicritério Fuzzy Promethee é aplicável nas mais diversas áreas do conhecimento e permite mudanças em sua metodologia de acordo com as especificações da avaliação. Isso permite uma análise mais próxima da realidade do problema, obtendo conseqüentemente uma priorização mais realista das alternativas.

4 METODOLOGIA

A presente seção busca descrever os métodos e diligências estabelecidos na pesquisa, desde a estruturação do problema até as formulações empregadas nas abordagens do Método Multicritério Fuzzy Promethee II (F-Promethee).

4.1 ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA

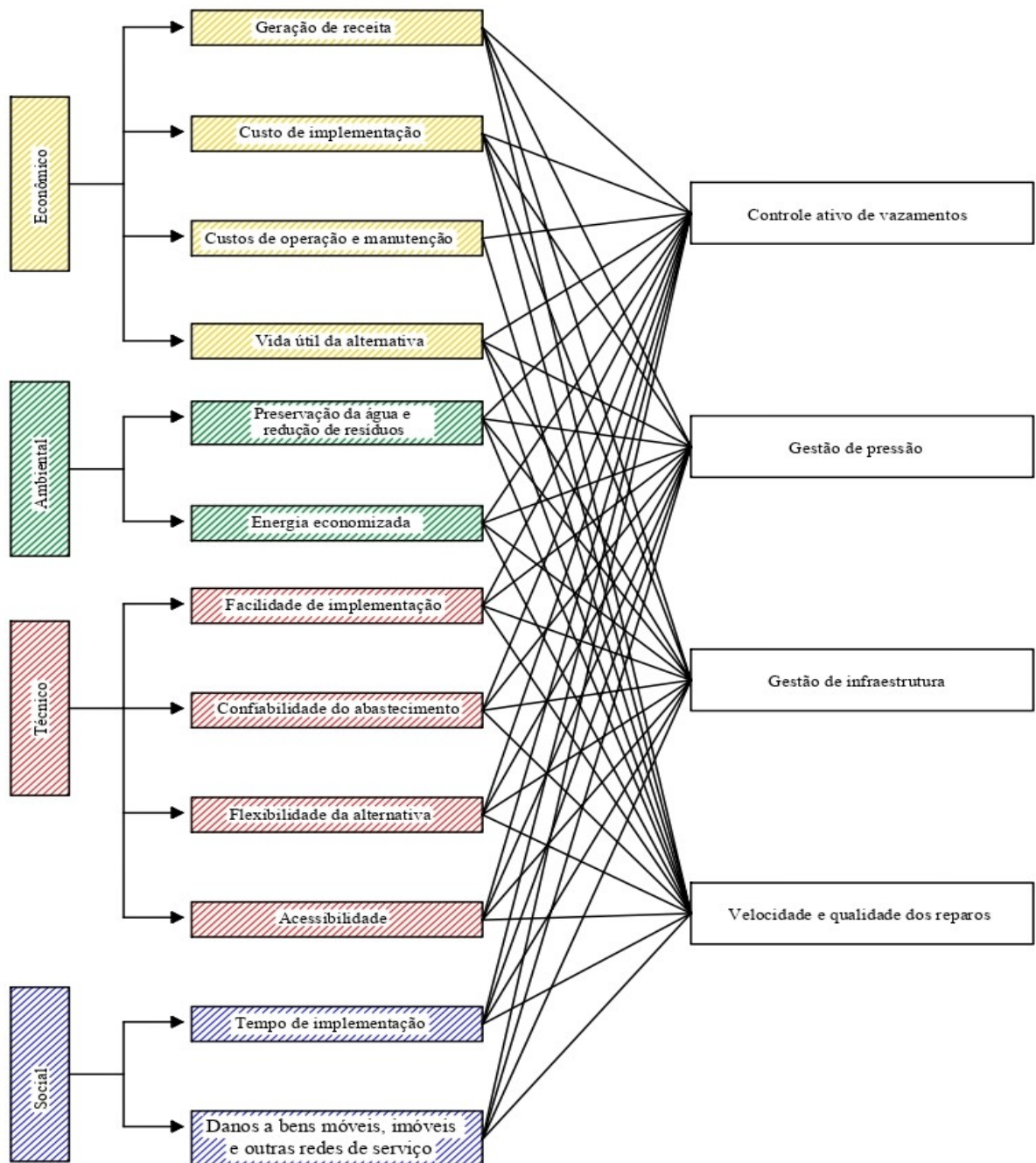
A primeira etapa do trabalho é a fase de estruturação do problema proposto. Essa consiste em avaliar quais as alternativas a serem hierarquizadas e quais os critérios e subcritérios preponderantes na análise, com vistas a desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão que avalia a viabilidade de alternativas de controle de perdas de água em sistemas de abastecimento de municípios de médio porte de Pernambuco.

As alternativas escolhidas foram: controle ativo de perdas, gestão de pressão, gestão de infraestrutura e velocidade e qualidade dos reparos, abordagens que já foram discutidas ao decorrer do trabalho. Quanto aos critérios e subcritérios, tem-se a seguinte configuração:

- Critério econômico: avalia se esse investimento é atrativo para as empresas, elencando itens importantes como, por exemplo, geração de receita, custo de implementação, custos de operação e manutenção e vida útil da alternativa;
- Critério ambiental: julga as influências e os impactos da implementação das alternativas ao meio ambiente, pela preservação da água e redução de resíduos e pela energia economizada;
- Critério técnico: visa analisar o desempenho técnico da alternativa, ponderando aspectos relevantes como facilidade de implementação, confiabilidade do abastecimento, flexibilidade da alternativa e acessibilidade da alternativa nas limitações locais;
- Critério social: representa o reflexo da implementação da alternativa dentro da sociedade, focando nas possíveis inconveniências do processo como, por exemplo, tempo de implementação e danos a bens móveis, imóveis e outras redes de serviço.

É apresentado na Figura 3 a estrutura do problema proposto, onde observa-se os critérios, subcritérios e alternativas.

Figura 3 – Estruturação do problema.



Fonte: Autora (2019).

4.2 OBTENÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

Os pesos para cada critério (W_j) e o desempenho das alternativas em cada critério ($g_j(a)$) são parâmetros essenciais no Método Fuzzy Promethee. Na metodologia proposta, os pesos foram determinados com base em informações obtidas por meio de entrevistas com especialistas, através de uma resposta média para cada um dos parâmetros. Desse modo, W_j é

um número real (*crisp*) e $g_j(a)$ é expresso por variáveis linguísticas que variam desde uma aceitabilidade muito baixa até muito grande (Figura 4). Cada uma das variáveis linguísticas relaciona-se a um número fuzzy triangular $(m, \alpha, \beta)_{LR}$, conforme metodologia de Bilsel *et al.* (2006). É detalhado na Tabela 1 a escala linguística adotada para o problema.

Figura 4 – Escala linguística de avaliação.

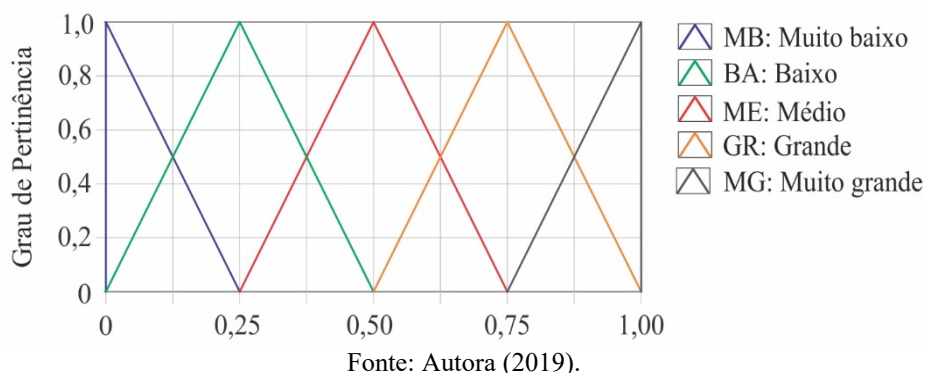


Tabela 1 - Conjuntos fuzzy triangulares para escala linguística.

Código	Descrição	M	α	β
1	Muito Baixo	0,00	0,00	0,25
2	Baixo	0,25	0,25	0,25
3	Médio	0,50	0,25	0,25
4	Grande	0,75	0,25	0,25
5	Muito Grande	1,00	0,25	0,00

Fonte: Autora (2019).

4.3 O MODELO DE DEFUZZIFICAÇÃO

Uma necessidade comum na manipulação de números fuzzy está na conversão do conjunto fuzzy em um número real que melhor o represente. O módulo de defuzzificação é amplamente utilizado e configura-se como uma ferramenta indispensável em comparações entre conjuntos fuzzy. Em geral, existem vários métodos de defuzzificação, dos quais destacam-se:

- Método da defuzzificação pelo Centro de Área ou Centro de Gravidade;
- Método de defuzzificação pela média do máximo;
- Centro dos máximos.

O método adotado ao longo do trabalho consiste na defuzzificação pelo centro de área ou centro de gravidade, conhecido como índice Yager. Dessa forma, tem-se então que, para um número fuzzy triangular $(m, \alpha, \beta)_{LR}$, o índice Yager é expresso pela Equação (1):

$$I_Y = \frac{\int_{m-\alpha}^m x \cdot \left(1 - \frac{m-x}{\alpha}\right) dx + \int_m^{m+\beta} x \cdot \left(1 - \frac{x-m}{\beta}\right) dx}{\int_{m-\alpha}^m \left(1 - \frac{m-x}{\alpha}\right) dx + \int_m^{m+\beta} \left(1 - \frac{x-m}{\beta}\right) dx} = \frac{3 \cdot m - \alpha + \beta}{3} \quad (1)$$

4.4 MÉTODO MULTICRITÉRIO F-PROMETHEE

Considerando um critério j qualquer, as relações entre um par de determinadas alternativas a e b podem ser enquadradas em uma relação de dominância natural (I, P), com I significando indiferença entre as alternativas e P significando preferência entre as alternativas, como pode ser visto na Equação (2):

$$\forall a, b \in A: \begin{aligned} g_j(a) > g_j(b) &\leftrightarrow aP_jb \\ g_j(a) = g_j(b) &\leftrightarrow aI_jb \end{aligned} \quad (2)$$

A função preferência, $F_j(a, b)$, representa o grau de preferência da alternativa a sobre a b em função de $d_j(a, b)$, que é a diferença entre os desempenhos das alternativas a e b no critério j , tal que a diferença $d_j(a, b)$ seja um número fuzzy triangular $(m, \alpha, \beta)_{LR}$. Utilizando a operação de subtração aplicada a números Fuzzy, tem-se a configuração demonstrada na Equação (3):

$$d_j(a, b) = (m, \alpha, \beta)_{LR} = (n, c, d)_{LR} - (o, e, f)_{LR} = (n - o, c + f, d + e)_{LR} \quad (3)$$

A Equação 3 aplica-se a subcritérios cujo cenário ideal preconiza a maximização, ou seja, alternativas com avaliação *muito grande* apresentam prioridade de implantação. Por sua vez, em subcritérios relativos a custos, possíveis danos causados ou tempo de implementação, a tendência natural é que as alternativas avaliadas como *muito baixo* tenham preferência. Dessa forma, a diferença $d_j(a, b)$ a ser adotada passa a assumir a forma de $d_j(b, a)$.

Outra operação muito importante que será amplamente utilizada ao longo do trabalho é a multiplicação de um número fuzzy triangular por um escalar, descrita pela Equação (4):

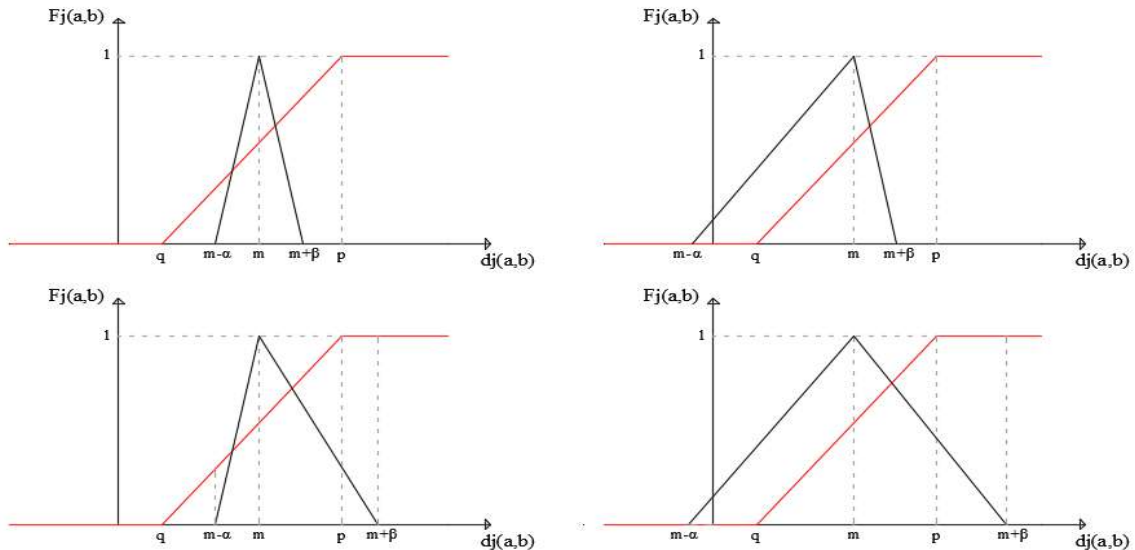
$$(m, \alpha, \beta)_{LR} \cdot (n, 0, 0) = (n \cdot m, n \cdot \alpha, n \cdot \beta)_{LR} \quad (4)$$

Nesse trabalho, optou-se por utilizar a função preferência, $F_j(a, b)$, segundo duas abordagens. A primeira delas foi proposta por Goumas e Lygerou (2000), sendo mundialmente difundida e amplamente utilizada em diversos campos de pesquisa. A outra, proposta por Geldemann *et al.* (2000), foi inicialmente utilizada em números fuzzy trapezoidais, mas a satisfatoriedade dos resultados obtidos e a natureza do método corroboraram para a adaptação para números fuzzy triangulares.

A função de preferência V do método F-Promethee é adotada segundo a abordagem do método de Goumas e Lygerou (2000), conforme a Equação (5). Como pode-se perceber, a depender da distribuição do número fuzzy, $d_j(a, b)$ pode pertencer a mais de uma categoria, tendo em vista que as proposições não são totalmente excludentes. A Figura 5 apresenta algumas configurações de $d_j(a, b)$, referentes à localização do número fuzzy triangular em relação à região de preferência relativa.

$$F_j(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } m - \alpha \leq q \\ \frac{(m, \alpha, \beta) - q}{p - q} & \text{se } q \leq m - \alpha \text{ e } m + \beta \leq p \\ 1 & \text{se } m + \beta \geq p \end{cases} \quad (5)$$

Figura 5 – Possíveis distribuições de $d_j(a, b)$.



Fonte: Autora (2019).

Apesar dessa metodologia ser bastante utilizada pela comunidade científica, muitos autores realizaram pequenas modificações na formulação original, a fim de evitar que essas inconveniências ocorressem com seus conjuntos de dados. Venkatesan e Goh (2016) corrigiram os intervalos fechados coincidentes presentes na formulação original. Kavilal *et al.* (2016) trocaram o parâmetro β na terceira proposição por α . Apesar dessas correções, as alternativas continuam não excludentes, podendo causar inconsistências em outros conjuntos de dados.

A fim de corrigir essas falhas, nesse trabalho foram realizadas pequenas alterações na metodologia original de Goumas e Lygerou (2000). Esses ajustes não modificaram a natureza e as propriedades originais do método, mas garantiram que cada número fuzzy triangular fosse associado a único valor de preferência. A fim de averiguar o impacto dessa alteração nos resultados, optou-se por recalcular os resultados encontrados por Goumas e Lygerou (2000), os novos resultados preservaram a hierarquização original e garantiram oscilações nos fluxos apenas em escala centesimal, garantindo assim a viabilidade das alterações. O modelo proposto é explicitado nas Equações (6) e (7).

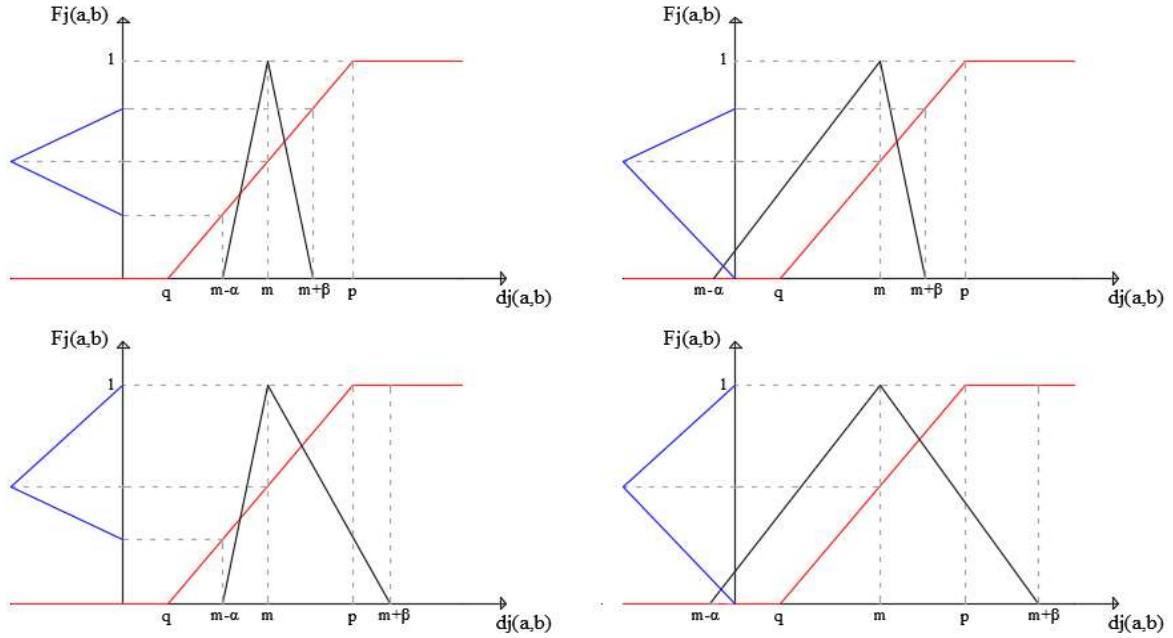
$$Fj(a,b) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{se } m - \alpha < q \quad e \quad m + \beta \leq p \\ \frac{(m, \alpha, \beta) - q}{p - q} & \text{se } q \leq m - \alpha \quad e \quad m + \beta \leq p \\ P(I_Y) & \text{se } q > m - \alpha \quad e \quad m + \beta > p \\ 1 & \text{se } m - \alpha \geq q \quad e \quad m + \beta > p \end{array} \right\} \quad (6)$$

$$P(I_Y) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{se } I_Y \leq q \\ \frac{I_Y - q}{p - q} & \text{se } q < I_Y \quad e \quad I_Y \leq p \\ 1 & \text{se } I_Y > p \end{array} \right\} \quad (7)$$

A segunda abordagem F-Promethee adotada é a proposta por Geldemann *et al.* (2000), na qual a função de preferência fuzzy V é apresentada, para um número fuzzy triangular $(m, \alpha, \beta)_{LR}$, segundo a Equação (8). Aplicando a Equação (8) aos exemplos da Figura 5, é possível entender melhor o modelo proposto por Geldemann *et al.* (2000). A Figura 6 apresenta a representação gráfica da função de preferência nessa abordagem.

$$F_j(a,b) = (F_j(m); F_j(m) - F_j(m - \alpha); F_j(m + \beta) - F_j(m)) \quad (8)$$

Figura 6 – Representação gráfica da função de preferência na abordagem Geldemann *et al.* (2000).



Fonte: Autora (2019).

Conforme Vincke (1992), após estabelecer o nível das preferências, obtêm-se o grau de hierarquização $\pi(a,b)$ para cada duas alternativas a e b comparadas. Este índice de preferência ponderada, que indica o percentual de preferência da alternativa a sobre b , levando-se em consideração os pesos de cada critério, é calculado por meio da Equação (9). Os pesos foram obtidos com base nas entrevistas.

$$\pi(a,b) = \frac{\sum_{j=1}^n w_j F_j(a,b)}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (9)$$

Calculada a função de hierarquização para cada duas funções comparadas, dá-se início à etapa final do processo, o cálculo dos fluxos ou ordens. A ordem decrescente, $\Phi^+(a)$, que é chamada de fluxo de saída, representa o nível de preferência da alternativa a sobre as demais alternativas do conjunto A . Logo, quanto maior $\Phi^+(a)$, maior será a sua preferência sobre as demais alternativas. Esta é obtida pela Equação (10):

$$\phi^+(a) = \frac{\sum_{b=1, b \neq a}^n \pi(a,b)}{n-1} \quad (10)$$

A ordem crescente, $\Phi^-(a)$, que é chamada de fluxo de entrada, é obtida pela Equação (11). Essa representa o nível de preferência das demais alternativas do conjunto A sobre a alternativa a . Logo, quanto menor $\Phi^-(a)$, maior será a preferência da alternativa a sobre as demais alternativas.

$$\phi^-(a) = \frac{\sum_{b=1, b \neq a}^n \pi(b,a)}{n-1} \quad (11)$$

Ao adotar-se o Promethee II, surge fluxo líquido (Φ), que é o resultado da diferença entre o fluxo de saída (Φ^+) e o fluxo de entrada (Φ^-) da alternativa a , simplificando a tomada de decisão, como pode ser visto na Equação (12):

$$\varphi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (12)$$

A ordem final das alternativas é definida por:

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

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As alternativas, critérios e subcritérios são a base do modelo proposto e definem quais os tipos de dados e informações a serem incorporadas ao método multicritério. Esses dados foram obtidos através de entrevistas, tomando-se o cuidado de garantir a imparcialidade do questionário, a fim de evitar a geração de uma tendência de respostas que não reflitam a verdadeira opinião dos entrevistados.

Para o método multicritério Fuzzy Promethee (F-Promethee), cada especialista atribuiu uma descrição ao grau de viabilidade da alternativa em relação ao subcritério, inserindo conjuntos fuzzy na análise. A escolha da escala linguística constituiu-se como uma ferramenta importante na tomada de decisão, devendo sintetizar numericamente cada opinião qualitativa obtida.

Adicionalmente, cada entrevistado atribuiu um grau de importância para cada um dos critérios e a média das informações de pesos coletados foi calculada, como pode ser visto na Tabela 2. Estes pesos serão adotados nos métodos Promethee II e F-Promethee. Pode-se perceber que o critério ambiental apresentou maior destaque, consequentemente, as pontuações nos subcritérios correspondentes detêm maior representatividade na composição do panorama geral. A atribuição de um peso menor para o critério econômico destaca as mudanças de perspectiva no setor, configurando os impactos na sociedade e no meio ambiente como fatores decisivos na hierarquização das alternativas, ainda que gerem custos adicionais.

Tabela 2 - Pesos médios obtidos via entrevista.

Critério	Pesos
Econômico	0,20
Ambiental	0,29
Técnico	0,25
Social	0,26

Fonte: Autora (2019).

Com as informações obtidas via entrevista, foi possível chegar a uma matriz de resultados acerca da aceitabilidade de cada alternativa em relação aos subcritérios propostos. Essa matriz é expressa pela média simples das respostas, tendo em vista que as operações de soma e multiplicação por escalar em conjuntos fuzzy obedecem às mesmas prerrogativas das operações com números reais (*crisp*).

Sendo assim, os métodos Promethee II e F-Promethee (GOUMAS; LYGEROU, 2000 e GELDEMANN *et al.*, 2000) utilizaram os valores das Tabelas 2 e 3 como variáveis de entrada do sistema. Convém salientar que, como o Método Promethee II trata de valores não fuzzy, foi atribuído o valor de m para cada uma das relações entre alternativa e subcritério supondo um número fuzzy triangular $(m, \alpha, \beta)_{LR}$, conforme destacado na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz fuzzy de avaliação.

Subcritério	Controle ativo de vazamentos (A1)			Gestão de pressão (A2)			Gestão de infraestrutura (A3)			Velocidade e qualidade de reparos (A4)		
Geração de receita	0,75	0,25	0,19	0,75	0,25	0,13	0,69	0,25	0,19	0,56	0,25	0,25
Custo de implementação	0,56	0,25	0,25	0,63	0,25	0,19	0,56	0,25	0,19	0,50	0,25	0,25
Custo de operação e manutenção	0,50	0,25	0,25	0,44	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25	0,50	0,25	0,25
Vida útil da alternativa	0,56	0,25	0,25	0,69	0,25	0,19	0,63	0,25	0,25	0,69	0,25	0,19
Preservação da água e redução de resíduos	0,69	0,25	0,19	0,75	0,25	0,13	0,63	0,19	0,13	0,38	0,19	0,25
Energia economizada	0,75	0,25	0,19	0,88	0,25	0,13	0,63	0,25	0,25	0,38	0,25	0,25
Facilidade de implementação	0,44	0,25	0,25	0,44	0,19	0,25	0,50	0,25	0,25	0,69	0,25	0,19
Confiabilidade do abastecimento	0,75	0,25	0,13	0,94	0,25	0,06	0,81	0,25	0,13	0,75	0,25	0,19
Flexibilidade da alternativa	0,75	0,25	0,13	0,56	0,25	0,25	0,56	0,25	0,25	0,75	0,25	0,13
Acessibilidade	0,56	0,25	0,19	0,56	0,25	0,19	0,63	0,25	0,19	0,63	0,25	0,19
Tempo de implementação	0,63	0,25	0,19	0,56	0,25	0,25	0,81	0,25	0,19	0,75	0,25	0,19
Danos a bens móveis, imóveis e outras redes de serviço	0,56	0,25	0,25	0,56	0,25	0,25	0,69	0,25	0,19	0,56	0,25	0,25

Fonte: Autora (2019).

Comparando os conjuntos fuzzy triangulares através de seus respectivos índices Yagers, pode-se ter uma ideia geral da aceitabilidade das alternativas. Como já discutido, os subcritérios custo de implementação, custo de operação e manutenção, tempo de implementação e danos a bens móveis, imóveis e outras redes de serviço (destacados na Tabela 4) apresentam melhores resultados tanto quanto menores forem as pontuações. Nos demais critérios, as maiores notas implicam em melhores resultados.

É possível perceber visualmente que a gestão de pressão atende satisfatoriamente os subcritérios, o que pode indicar um bom resultado nas aplicações do método. A alternativa velocidade e qualidade de reparos é a segunda melhor avaliada pela análise da Tabela 4, todavia em muitos subcritérios seu desempenho é o pior dentre todas as alternativas, não sendo possível identificar previamente sua aplicabilidade.

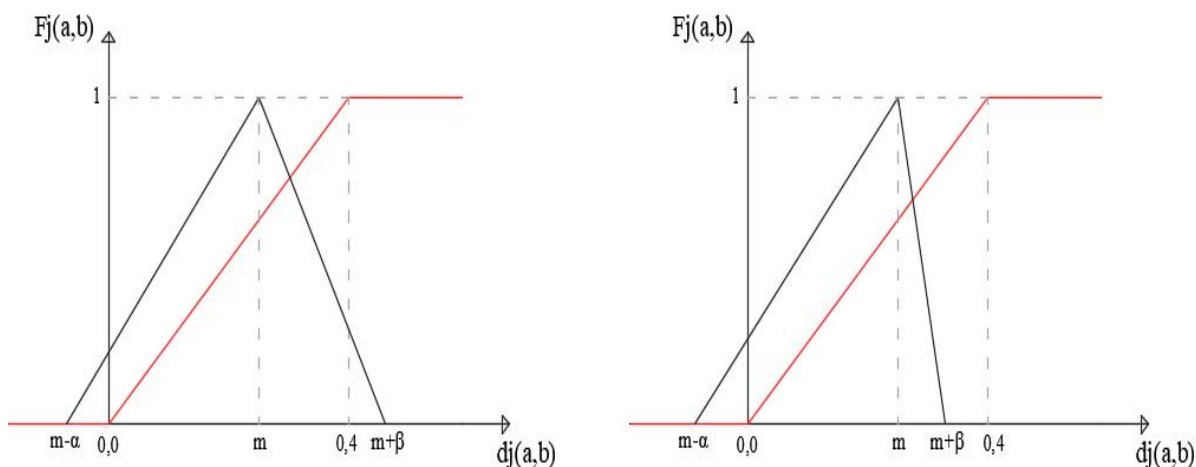
Tabela 4 – Desempenho das alternativas em cada subcritério via comparativo de Índice Yager.

Subcritério	Controle ativo de vazamentos (A1)	Gestão de pressão (A2)	Gestão de infraestrutura (A3)	Velocidade e qualidade de reparos (A4)
Geração de receita	0,73	0,71	0,67	0,56
Custo de implementação	0,56	0,60	0,54	0,50
Custo de operação e manutenção	0,50	0,44	0,50	0,50
Vida útil da alternativa	0,56	0,67	0,63	0,67
Preservação da água e redução de resíduos	0,67	0,71	0,60	0,40
Energia economizada	0,73	0,83	0,63	0,38
Facilidade de implementação	0,44	0,46	0,50	0,67
Confiabilidade do abastecimento	0,71	0,88	0,77	0,73
Flexibilidade da alternativa	0,71	0,56	0,56	0,71
Acessibilidade	0,54	0,54	0,60	0,60
Tempo de implementação	0,60	0,56	0,79	0,73
Danos a bens móveis, imóveis e outras redes de serviço	0,50	0,56	0,67	0,56

Fonte: Autora (2019).

Antes de obter a matriz de preferências, é necessário calcular o valor de $d_j(a,b)$, que é a diferença entre os desempenhos das alternativas a e b em um determinado critério j . A proximidade das pontuações no geral e formulação da operação básica de subtração entre números fuzzy triangulares corroboraram para que as seguintes situações fossem corriqueiras na análise (Figura 7). Isso acontece porque a subtração dos termos centrais graficamente gera um valor de pequeno módulo, mas a soma alternada das amplitudes garante que o número fuzzy esteja contido em intervalos abrangentes.

Figura 7 – Distribuições dos conjuntos fuzzy mais encontradas no problema.



Fonte: Autora (2019).

Por isso, utilizando a função de preferência definida por Goumas e Lygerou (2000), situações como a descrita na Tabela 5 foram bastante comuns no processo. Trata-se de uma inconveniência desse método, pois, ao se atribuir o valor nulo a uma preferência cujo número fuzzy intercepta a região de preferência relativa, são desconsideradas imprecisões inerentes ao problema que podem apresentar impactos substanciais no resultado.

Tabela 5 - Matriz de preferência para o subcritério de energia economizada pela abordagem Goumas e Lygerou (2000).

	Controle ativo de vazamentos (S1)			Gestão de pressão (S2)			Gestão de infraestrutura (S3)			Velocidade e qualidade de reparos (S4)		
A1	-	-	-	0	0	0	0,260	0	0	0,885	0	0
A2	0,260	0	0	-	-	-	0,521	0	0	1,000	0	0
A3	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0,625	0	0
A4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-

Fonte: Autora (2019).

A matriz dos graus de sobreclassificação ou hierarquização, representada pela Tabela 6, contém o grau de hierarquização entre todos os possíveis pares de alternativas comparadas. Em suma, trata-se de uma síntese dos resultados obtidos por subcritério através de uma média ponderada, cujo os pesos utilizados são mostrados na Tabela 2. Por exemplo, o grau de hierarquização $\pi(A1, A3)$ é definido pelo número fuzzy triangular (0,053;0;0).

Tabela 6 - Grau de hierarquização para Fuzzy Promethee II pela abordagem Goumas e Lygerou (2000).

	Controle ativo de vazamentos (A1)			Gestão de pressão (A2)			Gestão de infraestrutura (A3)			Velocidade e qualidade de reparos (A4)		
A1	-	-	-	0	0	0	0,053	0	0	0,122	0	0
A2	0	0	0	-	-	-	0,069	0	0	0,176	0	0
A3	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0,041	0	0
A4	0,033	0	0	0,030	0	0	0,024	0	0	-	-	-

Fonte: Autora (2019).

A matriz do índice de preferência contém os fluxos das alternativas estabelecidas calculados pelo método. Pode ser visto na Tabela 7, o resultado final da hierarquização das alternativas expresso pelo índice Yager do fluxo líquido.

Tabela 7 - Comparativo de fluxos para Fuzzy Promethee II pela abordagem Goumas e Lygerou (2000).

	$\phi +$			$\phi -$			ϕ			Índice Yager
A1	0,149	0	0	0,089	0	0	0,060	0	0	0,060
A2	0,199	0	0	0,066	0	0	0,133	0	0	0,133
A3	0,076	0	0	0,161	0	0	-0,085	0	0	-0,085
A4	0,108	0	0	0,216	0	0	-0,108	0	0	-0,108

Fonte: Autora (2019).

Comparando os índices, pode-se perceber que a gestão da pressão (A3) obteve o melhor desempenho, o que era esperado baseado na análise dos dados de entrada. Apesar da alternativa de velocidade e qualidade de reparos apresentar a melhor avaliação em cinco dos doze subcritérios, ficando atrás apenas da gestão de pressão, isso não foi suficiente para garantir um resultado satisfatório, tendo em vista a baixa pontuação nos demais subcritérios. Por isso, a alternativa A4 ocupou a última posição no cenário proposto.

O controle ativo de vazamentos apresentou-se como uma opção viável, mas com índice de aproveitamento inferior ao da gestão de pressão. Já a gestão de infraestrutura ocupou a terceira posição, não atendendo aos requisitos esperados. Convém salientar que a hierarquização reflete a estruturação do modelo, os subcritérios, os pesos e as alternativas comparadas. Isso significa dizer que em outras circunstâncias, pode-se obter outros

resultados, de modo que as alternativas com menores pontuações podem ser implementadas pela concessionária e obter resultados satisfatórios.

Utilizando o modelo de preferência proposto por Geldemann *et al.* (2000), a matriz de preferência para o subcritério de energia economizada é definida pela Tabela 8. Como pode-se perceber, a função de preferência dessa abordagem agrega mais informações à análise e aumenta a amplitude dos números fuzzy. Enquanto a função de preferência de Goumas e Lygerou (2000) atribuíram valores nulos a muitos dos subcritérios, Geldemann *et al.* (2000) permitiram calcular os valores reais de preferência, ainda que esses expressem pouca representatividade no panorama geral.

Tabela 8 - Matriz de preferência do subcritério de energia economizada pela abordagem Geldemann *et al.* (2000).

	Controle ativo de vazamentos (S1)			Gestão de pressão (S2)			Gestão de infraestrutura (S3)			Velocidade e qualidade de reparos (S4)		
S1	-	-	-	0	0	0,781	0,312	0,312	0,688	0,938	0,938	0,062
S2	0,312	0,312	0,688	-	-	-	0,625	0,625	0,375	1	1	0
S3	0	0	0,938	0	0	0,625	-	-	-	0,625	0,625	0,375
S4	0	0	0,312	0	0	0	0	0	0,625	-	-	-

Fonte: Autora (2019).

Similarmente ao descrito anteriormente, a etapa seguinte baseia-se na obtenção da matriz de hierarquização, que se configura como uma ferramenta indispensável para obtenção do resultado. O grau de hierarquização encontrado pela abordagem Geldemann *et al.* (2000) para cada par de alternativas comparadas encontra-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Grau de hierarquização para Fuzzy Promethee II pela abordagem Geldemann *et al.* (2000).

	Controle ativo de vazamentos (A1)			Gestão de pressão (A2)			Gestão de infraestrutura (A3)			Velocidade e qualidade de reparos (A4)		
A1	-	-	-	0,065	0,065	0,857	0,183	0,183	0,793	0,245	0,245	0,702
A2	0,133	0,133	0,843	-	-	-	0,237	0,237	0,753	0,318	0,318	0,621
A3	0,051	0,051	0,844	0,038	0,038	0,812	-	-	-	0,159	0,159	0,792
A4	0,100	0,100	0,739	0,129	0,129	0,636	0,145	0,145	0,756	-	-	-

Fonte: Autora (2019).

Calculando o fluxo líquido por alternativa e o índice Yager que o representa, é possível perceber que a hierarquização se manteve igual nas duas abordagens adotadas, conforme pode ser visto na Tabela 10. Há variações nos valores provenientes das peculiaridades dos métodos, entretanto são pequenas e não trazem diferenças significativas.

Tabela 10 - Comparativo de fluxos para Fuzzy Promethee II pela abordagem Geldermann et al. (2000).

	$\phi +$				$\phi -$		ϕ			Índice Yager
A1	0,164	0,164	0,784	0,095	0,095	0,809	0,070	0,973	0,879	0,038
A2	0,229	0,229	0,739	0,077	0,077	0,768	0,152	0,998	0,817	0,092
A3	0,083	0,083	0,816	0,188	0,188	0,767	-0,106	0,850	1,004	-0,054
A4	0,125	0,125	0,710	0,241	0,241	0,705	-0,116	0,830	0,951	-0,076

Fonte: Autora (2019).

No Método Promethee II, a função de preferência é similar à descrita por Geldermann *et al.* (2000), mas trata-se de um número único e não mais um conjunto fuzzy. Por causa disso, os valores de preferência encontrados são exatamente iguais ao $Fj(m)$ da formulação de Geldermann *et al.* (2000), que corresponde ao primeiro termo do conjunto fuzzy na representação da Equação (8): $(Fj(m); Fj(m) - Fj(m - \alpha); Fj(m + \beta) - Fj(m))$. Apesar dessa similaridade, a influência da Lógica Fuzzy pode corroborar para variações nos resultados, a depender, é claro, dos fatores α e β , que são variantes do processo. A matriz de preferência para o subcritério de energia economizada está explicitada na Tabela 11.

Tabela 11 - Matriz de preferência para o subcritério de energia economizada pelo Método Promethee II.

	Controle ativo de vazamentos (S1)	Gestão de pressão (S2)	Gestão de infraestrutura (S3)	Velocidade e qualidade de reparos (S4)
S1	-	0	0,312	0,938
S2	0,312	-	0,625	1,000
S3	0	0	-	0,625
S4	0	0	0	-

Fonte: Autora (2019).

A matriz de sobreclassificação encontrada no Método Promethee II, utilizando os mesmos pesos da Tabela 2, está disposta na Tabela 12.

Tabela 12 - Grau de hierarquização para Promethee II.

	Controle ativo de vazamentos (A1)	Gestão de pressão (A2)	Gestão de infraestrutura (A3)	Velocidade e qualidade de reparos (A4)
A1	-	0,065	0,183	0,245
A2	0,133	-	0,237	0,318
A3	0,051	0,038	-	0,159
A4	0,100	0,129	0,145	-

Fonte: Autora (2019).

Os fluxos obtidos, de uma maneira geral, distanciaram-se daqueles obtidos pelo Método de Geldemann *et al.* (2000), o que não se configura como uma regra geral e sim como um reflexo da influência que a utilização de números fuzzy traz aos resultados, como pode ser visto na Tabela 13. Como pode-se perceber também, a ordem da viabilidade das alternativas manteve-se a mesma, indicando uma tendência constante de comportamento que, para essa configuração de pesos, independe da metodologia aplicada no processo.

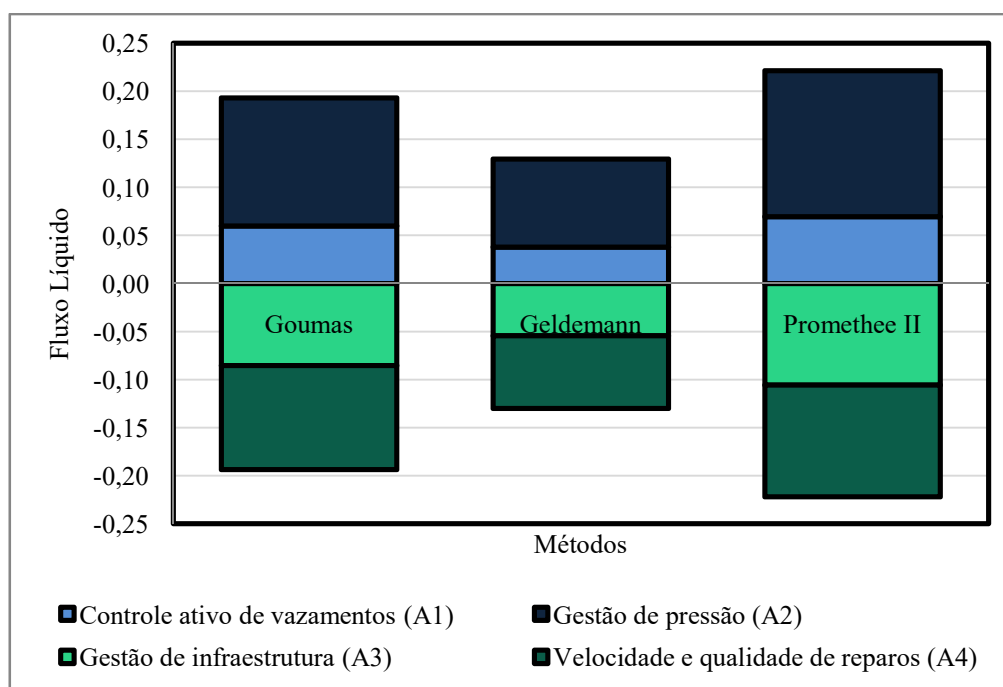
Tabela 13 - Comparativo de fluxos para Promethee II.

	$\phi +$	$\phi -$	ϕ
A1	0,164	0,095	0,070
A2	0,229	0,077	0,152
A3	0,083	0,188	-0,106
A4	0,125	0,241	-0,116

Fonte: Autora (2019).

Para efeito comparativo, a Figura 8 apresenta os resultados obtidos pelos métodos utilizados, permitindo avaliar melhor a amplitude da diferença de valores. Percebe-se que as imprecisões desconsideradas na abordagem Goumas e Lygerou (2000) garantiram resultados próximos ao Método Promethee II.

Figura 8 – Resultados finais obtidos pelos métodos multicritérios: Goumas, Geldemann e Promethee II.



Fonte: Autora (2019).

Os resultados calculados são justificados pelas pontuações atribuídas e o grau de importância dado aos critérios. A gestão de pressão apresentou o melhor resultado em seis dos doze subcritérios, sendo a melhor avaliada em todos os subcritérios ambientais, cujo peso é maior. Ao retirá-la da análise a fim de avaliar melhor as demais alternativas, é possível perceber que o controle ativo de vazamentos assume posições de destaque em todos os subcritérios sociais e ambientais, corroborando para um fluxo líquido positivo.

Comparando a alternativa gestão de infraestrutura com a velocidade e qualidade de reparos, percebe-se que a segunda se destaca em uma maior quantidade de subcritérios. Apesar disso, na maioria dos subcritérios em que A4 tem melhor desempenho, a pontuação de A3 é apenas centésimos menor, enquanto nos subcritérios em que A3 apresenta melhor resultado, a diferença entre esses chega a décimos. Além disso, a distribuição de pesos confere significativa vantagem a A3, justificando também a hierarquização obtida e destacando a inconstância desse resultado para diferentes configurações de pesos.

Por fim, a análise de sensibilidade foi realizada para verificar a consistência do modelo adotado, e para observar seu comportamento diante de possíveis variações, principalmente nos pesos atribuídos. Uma análise de sensibilidade procura determinar mudanças que podem ocorrer devido ao efeito da variação de um determinado fator relevante ao problema. Essa análise foi importante para determinar que o resultado alcançado é sólido.

Para isso, foram propostos mais quatro cenários de análise. No cenário 1, optou-se por igualar os graus de importância dos subcritérios. Nos demais cenários, foram utilizados os pesos sugeridos por cada um dos entrevistados. São mostrados na Tabela 14 os pesos considerados em cada cenário de avaliação.

Tabela 14 - Pesos atribuídos nos novos cenários de análise.

Critério	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Econômico	0,25	0,20	0,20	0,20
Ambiental	0,25	0,20	0,35	0,30
Técnico	0,25	0,30	0,10	0,30
Social	0,25	0,30	0,35	0,20

Fonte: Autora (2019).

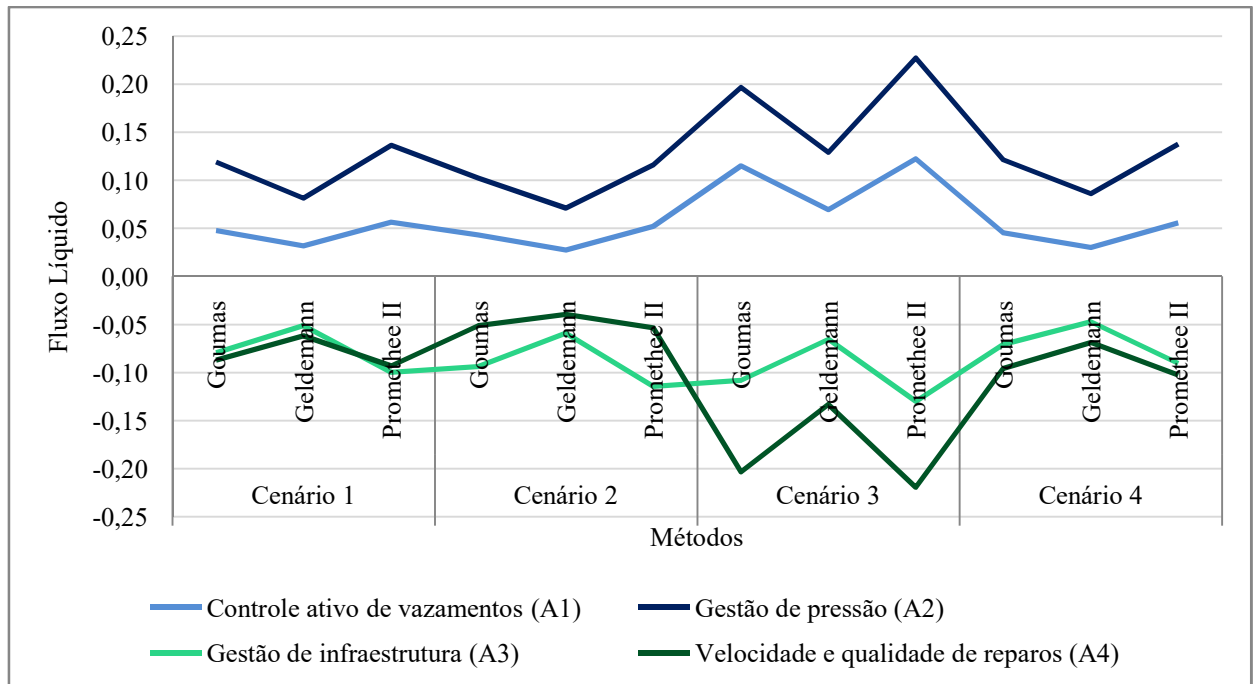
Os resultados obtidos na análise são apresentados na Tabela 15. Nota-se que há divergências de hierarquização nos cenários 1 e 2. No cenário 1, a igualdade entre os pesos enfraquece a vantagem da Alternativa 3 em relação a 4, de modo que a não utilização da Lógica Fuzzy passa a exercer uma influência considerável nas posições encontradas. Essa situação destaca a necessidade e importância de anexar ao sistema a ambiguidade e imprecisões dos problemas reais. No cenário 2, a diminuição considerável do peso do critério ambiental, cuja alternativa A3 tem desempenho superior, e o aumento dos pesos para os critérios social e técnico, cuja alternativa A4 tem melhores pontuações, reflete a situação hierárquica encontrada. Ainda assim, em todos os cenários e métodos, as alternativas A1 e A2 preservam suas posições, confirmando a significativa viabilidade dessas soluções. São apresentados na Figura 9 os diversos resultados obtidos, permitindo uma melhor compreensão do comportamento do ranking nas diferentes configurações.

Tabela 15 - Resultados obtidos nos diferentes cenários.

Método	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Goumas	A2>A1>A3>A4	A2>A1>A4>A3	A2>A1>A3>A4	A2>A1>A3>A4
Geldemann	A2>A1>A3>A4	A2>A1>A4>A3	A2>A1>A3>A4	A2>A1>A3>A4
Promethee II	A2>A1>A4>A3	A2>A1>A4>A3	A2>A1>A3>A4	A2>A1>A3>A4

Fonte: Autora (2019).

Figura 9 – Resultados dos métodos para os diferentes cenários propostos.



Fonte: Autora (2019).

6 CONCLUSÃO

Determinar as melhores alternativas para a gestão de perdas de água é um desafio para os gestores das empresas prestadoras de serviço de saneamento. A dificuldade de encontrar um consenso de opiniões dos técnicos, além dos possíveis impactos e reflexos das ações na sociedade, reforça a complexidade e subjetividade da tomada de decisão.

A Metodologia Fuzzy Promethee foi capaz de estruturar o cenário de estudo, elencando as possíveis soluções a serem adotadas e os aspectos sociais, ambientais, econômicos e técnicos que exercem forte influência na viabilidade da ação. A diferença entre os fluxos líquidos das abordagens Goumas e Lygerou (2000) e Geldemann *et al.* (2000) destacam a importância da função de preferência e sua influência direta na análise. O Método Promethee II resultou no mesmo padrão de comportamento do Método Fuzzy Promethee, mantendo igual hierarquização para as mesmas condições adotadas.

Ainda que testadas várias combinações de pesos para os critérios, foi possível perceber que a gestão de pressão se apresentou como a alternativa de maior viabilidade de implantação. De maneira geral, seu bom desempenho nos critérios ambiental, social e econômico garantiu posição de destaque entre as demais alternativas, transformando-a na melhor solução para controle de perdas de água em sistemas de abastecimento de água de municípios de médio porte de Pernambuco.

A fim de aprofundar o estudo, recomenda-se agregar mais alternativas, critérios e subcritérios à análise, além de considerar informações quantitativas relativas aos custos de implantação, manutenção e operação das alternativas. Utilizar outros métodos multicritérios e expandir o número de entrevistados também são ideias para futuras pesquisas na área.

REFERÊNCIAS

- ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos E Inspeção. **Apostilado Curso de Pesquisa de Vazamentos Não Visíveis – Nível I, II e III**. São Paulo: CETRE, 2002.
- ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio Não-Destrutivos e Inspeção. **Deteção de Vazamentos Não-Visíveis – Métodos Acústicos**. Apostila do Curso Ministrado no CETRE – Centro de Treinamento da ABENDE. São Paulo, 2005.
- 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, revisão 1, 2015.
- ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Perdas em sistemas de abastecimento de água: diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate**. 2013.
- ALEGRE, H. *et al.* **Guia Técnico 3: Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição**. Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR), Instituto da Água (INAG) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). ISBN: 972-99354-4-0, 2005.
- ALEGRE, H. *et al.* **Performance indicators for water supply services**. 2. ed. Londres: IWA, 2006. (IWA Manual of Best Practice Series.)
- ALEGRE, Helena; COVAS, Dídia. **Gestão patrimonial de infraestruturas de abastecimento de água: Uma abordagem centrada na reabilitação**. Série guias técnicos. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Instituto Superior Técnico. Lisboa, Dezembro de 2010.
- ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. Modelo de decisão multicritério para a priorização de sistemas de informação com base no método PROMETHEE. **Gestão e Produção**, v. 9, n. 2, p. 201-214, 2002.
- ALMEIDA, D. F. C. **Controle e Redução de Perdas Reais em Sistemas de Abastecimento de Água**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Disciplina de PHD 2537 – Águas em Ambientes Urbanos, s.d.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional**. Engecorp/Cobrape, Brasília, v.1, 2010.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Fatos e tendências: Água**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2009.
- ANDRADE SOBRINHO, R. BORJA, P. C. **Perdas de água e eficiência energética na região metropolitana de Salvador: a percepção dos técnicos da EMBASA**. 42^a Assembléia Nacional da ASSEMAE, 2012.

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

ARIKAWA, K. C. O. **Perdas reais em sistemas de distribuição de água – Proposta de metodologia para avaliação de perdas reais e definição das ações de controle**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

BAGGIO, M.A. **Diagnóstico de perdas de sistemas de abastecimento de água**. Franca: ABES, 2000.

BAKI, Rahmi. For Supplier Evaluation Process through Fuzzy Promethee Method. **International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing**, Vol. 5, No. 3, August 2017.

BAPTISTA, J. M.; ALEGRE, H. Seleção de materiais de tubagens para sistemas de abastecimento de água. IX Encontro Nacional de Saneamento Básico, APESB, Loures, 14, 2000b.

BAPTISTA, J. M.; ALEGRE, H. **Especificação de materiais para as redes de abastecimento de água de Oeiras e Amadora**. Relatório 193/00 – NES, LNEC, 282 p. Lisboa, 2000a.

BARRETO, Douglas. Perfil do consumo residencial e usos finais da água. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 23-40, 2008.

BEZERRA, S. D. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de água: tecnologia de controle**. 1a.ed. UFPB. João Pessoa. 2013.

BILSEL, R. U., BUYUKOZKAN, G., RUAN, D. **A fuzzy preference ranking model for a quality evaluation of hospital web sites**. In. J. Intell. Syst. 21, p. 1181–1197, 2006.

BORJA, P. C.; SOBRINHO, R. A. **Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: um estudo dos fatores intervenientes na RMS**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.21, n.4, p. 783-795, out/dez 2016.

BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. **European Journal of Operational Research**, v. 24, p. 228-238, 1986.

BURNS, P.; HOPE, D.; ROORDA, J. **Automation in Construction**. Volume 8(6), 689-703, 1999.

CAMPISANO, A.; CREACO, E.; MODICA, C. RTC of valves for leakage reduction in water supply networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, january/february 2010.

DA MOTTA, Renato Gonçalves. **Importância da setorização adequada para combate às perdas reais de água de abastecimento público**. Dissertação apresentada à Escola

Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em engenharia. São Paulo, 2010.

FANTOZZI, M.; CALZA, F.; LAMBERT, A. Experience and results achieved in introducing District Metered Areas (DMA) and Pressure Management Areas (PMA) at Enia utility (Italy). IWA International Specialised Conference “Water Loss 2009”, 2009.

FARLEY, M. Leakage Management and Control – A Best Practice Training Manual. **World Health Organization**, 163p. Geneva, 2001.

FARLEY, M.; TROW, S. Losses in Water Distribution Networks. A practitioner’s guide to assessment, monitoring and control. **IWA publishing**. Reino Unido, 2003.

FREIRE, Mariana Rivera. **Modelo para setorização de redes de distribuição de água**. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2017.

FUNDACE – Fundação para Pesquisa e Desenvolvimento da Administração, Contabilidade de Economia. **Perdas de água: Entraves ao avanço do saneamento básico e riscos de agravamento à escassez hídrica no Brasil**. 2013.

GALVÁN, X. V. D. **Aplicación del método de jerarquías analíticas (AHP) a la gestión de pérdidas de agua en redes de abastecimiento**. 242p. Tesis doctoral – Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València, 2011.

GELDERMANN, J.; SPENGLER, T.; RENTZ, O. **Fuzzy outranking for environmental assessment case study: In and steel making industry**. Fuzzy Set Systems, v. 115, pp. 45-65, 2000.

GOMES, Ricardo de Jesus. **Modelação matemática como ferramenta de gestão e exploração de sistemas de distribuição de água**. Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil na Especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. Coimbra, 2011.

GOUMAS, M.; LYGEROU, V. **An extension of the Promethee method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects**. Chemical Engineering, Section II: Process Analysis & Plant Design, National Technical University of Athens, 9 Heroon Polytechniou Str., 15780 Athens, Greece. European Journal of Operational Research, p. 606-613, 2000.

GUL, Muhammet *et al.* **A fuzzy logic based Promethee method for material selection problems**. Beni-Suef University, Journal of Basic and Applied Sciences, 2017.

Haste de escutamecânica – MECALTEC, 2018. Disponível em: <<http://www.mecaltec.com.br/haste-escuta-mecanica>>. Acesso em: 16 de novembro de 2018.

HELLER, P. G. B. *et al.* Desempenho dos diferentes modelos institucionais de prestação dos serviços públicos de abastecimento de água: uma avaliação comparativa no conjunto dos municípios brasileiros. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.17,n.3 , p. 333-342, jul/set 2012.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Perdas de água: Desafios ao avanço do saneamento básico e à escassez hídrica.** São Paulo. 2015.

LAMBERT, A. HIRNER, W. Losses from Water Supply Systems: Standart Termonology and Recommended Performance Measures. **IWA-International Water Association.**, p 4-7, U.K, 2000.

LAMBERT, A. **Water Losses Management and Techniques.** Water Science Technology: Water Supply. International Report. 2002.

LAMBERT, A.; Myers, S.; Trow, S. **Managing Water Leakage, economic and technical issues.** Financial Times Energy Report. Londres, 1998.

LOPES, E. J. B. **Uso das metodologias Promethee e F-Promethee na avaliação de clientes.** Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão da Água. Lisboa, 2013.

LOPES, M. R. C. M. **Gestão de pressões em redes de distribuição de água – Caso de Santa Maria da Feira.** Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná para obtenção do grau de Mestre em Ciências. Curitiba, 2005.

KAVILAL, E. G.; VENKATESAN, S. P.; KUMAR, K. D. H. An integrated fuzzy approach for prioritizing supply chain complexity drivers of an Indian mining equipment manufacturer. **Elsevier Ltd**, p 204-218, 2016.

MESQUITA, A. L. A. *et al.* Aspectos importantes na utilização de bombas centrífugas em velocidade variável para a redução do consumo de energia. VI SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa, 2006.

Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Panorama do saneamento básico no brasil.** Análise situacional do déficit em saneamento básico, v. 2. Brasília, 2011.

MIRANDA, E.C. **Avaliação de perdas em sistemas de abastecimento de água: indicadores de perdas e metodologias para análise de confiabilidade.**p.193 . Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

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.

MOREIRA, P. M.; DUPONT, C. J.; VELLASCO, M. M. B. R. **Promethee and Fuzzy Promethee multi criteria methods for ranking equipment failure modes.** In Intelligent System Applications to Power Systems. ISAP09, 15th, Internacional Conference,p. 1-6, IEEE, 2009.

MORRISON, J. Managing Leakage by District Metered Areas: a practical approach. **IWA Water Loss Task Force.** Water 21, 2004.

MORRISON, J.; TOOMS, S.; ROGERS, D. District Metered Areas: Guidance Notes. **IWA Water Loss Task Force**, 2007.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Multi-criteria decision: A strategic planning tool for water loss management. **Water Resources Management**, v.25, n. 14, p. 3947, 2011.

OLIVEIRA, Gesner *et al.* **Perdas de água 2018 (snis 2016): desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico**. Instituto Trata Brasil: São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/perdas-2018/estudo-completo.pdf>>. Acesso em 12 de outubro de 2018.

Plano estratégico de redução de perdas. **Deteção e controle de fugas**. SIGA – Solução Integrada de Gestão em Água, Pinto&Braz.

PUC-Rio. **Métodos utilizados para priorização dos modos de falha**. Certificação Digital N° 0621336/CA.

RADOJEVIC, D.; PETROVIC, S. A **Fuzzy Approach to Preference Structure in Multicriteria Ranking**. Int. Trans. Opl Res. Vol. 4, No. 516, p.419-430. Mihajlo Pupin Institute, Yugoslavia, 1997.

RIGNEL, D. G. S.; CHENCI, G. P.; LUCAS, C. A. Uma introdução a Lógica Fuzzy. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica**, v. 1, 2011.

SANTOS, D. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Avaliação da metodologia para controle de perdas de água em rede de distribuição no Recife-PE. **Revista DAE**, nº197, setembro-dezembro 2014.

SARZEDAS, Guaraci Loureiro. **Planejamento para a substituição de tubulações em sistemas de abastecimento de água da Região Metropolitana de São paulo**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em engenharia. São Paulo, 2009.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2017**. Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento, Brasília, 2019.

TARDELLI FILHO, J. Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água. **Revista DAE**, janeiro-abril 2016.

TARDELLI FILHO, J. **Perdas e Vazamentos nos Sistemas de Abastecimento de Água**. Temas de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – Vision de Expertos de América Latina y el Caribe, AIDIS, 2014.

Texas Water Development Board. **Water Loss Manual**. Austin, 2005.

TONETO JÚNIOR, R.; SAIANI, C.; RODRIGUES, R. **Perdas de água: entraves ao avanço do saneamento básico e riscos de agravamento à escassez hídrica no Brasil**. . FUNDACE-

Fundação para Pesquisa e Desenvolvimento da Administração, Contabilidade de Economia, 2013.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. de M. Cenários da gestão da água no Brasil: uma contribuição para a “visão mundial da água”. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 31-43, Jul/Set 2000.

VENKATESAN, S. P.; GOH, M. Multi-objective supplier selection and order allocation under disruption risk. **Elsevier Ltd.**, p. 124-142, 2016.

VICENTIN, Liliana Pedroso. **Componentes do balanço hídrico para avaliação de perdas em sistemas de abastecimento de água**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em engenharia. São paulo, 2012.

VINCKE, P. Multicriteria Decision-Aid. **John Wiley & Sons Ltd**. ISBN: 0-471- 93184-5, 1992.

ZANIBONI, Nilton. **Equipamentos e metodologias para o controle e redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em engenharia. São paulo, 2009.

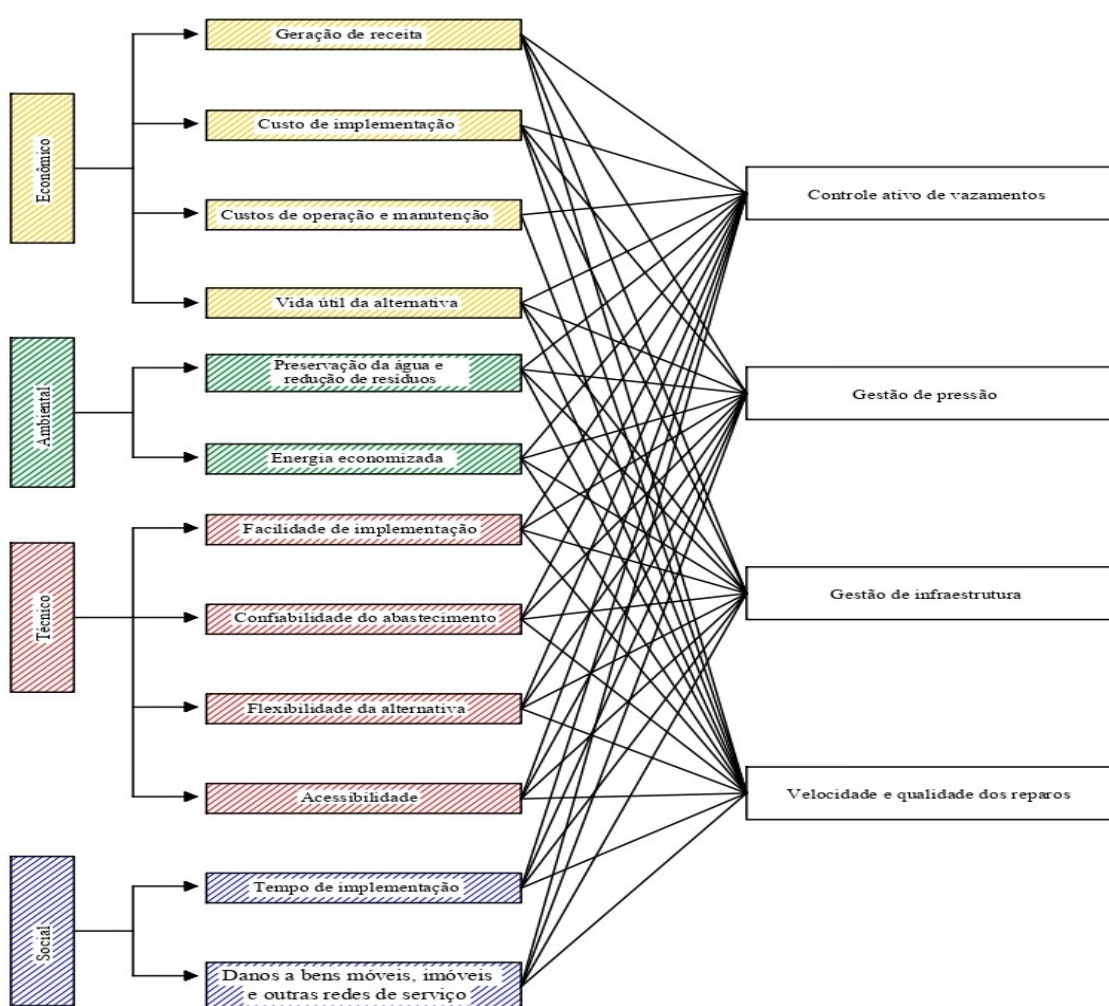
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO

Objetivo da Pesquisa

Avaliar o desempenho de alternativas para gestão de perdas de água em sistemas de abastecimento de água, considerando critérios socioeconômicos e fatores ambientais preponderantes.

Panorama geral

CRITÉRIOSUB-CRITÉRIO ALTERNATIVA¹



¹**Controle ativo de vazamentos:** promove varreduras periódicas através do uso de equipamentos de detecção acústica, a fim de buscar vazamentos não visíveis e ocultos, reparando perdas de água não reportadas à concessionária;

Gestão da infraestrutura: reabilitação de tubulações;

Gestão da pressão: assegura que o sistema opere com pressões adequadas, principalmente durante a noite quando o consumo é menor e as pressões são maiores;

Velocidade e qualidade dos reparos: garante que o reparo seja realizado no menor tempo possível e que uma atenção especial seja dada à qualidade da mão de obras e dos materiais utilizados nos reparos, a fim de evitar que haja reincidências.

Questionário

Qual o grau de viabilidade você considera que os subcritérios apresentados têm na gestão de perdas de água, com relação às alternativas consideradas (Muito grande, Grande, Médio, Baixo ou Muito Baixo)?

Obs.: Marque um X na opção correspondente.

Subcritérios	Controle ativo de vazamentos					Gestão de pressão					Gestão da infraestrutura					Velocidade e qualidade de reparos				
	M B	B	M	G	M G	M B	B	M	G	M G	M B	B	M	G	M G	M B	B	M	G	M G
Geração de receita																				
Custo de implementação																				
Custo de operação e manutenção																				
Vida útil da alternativa																				
Preservação da água e redução de resíduos																				
Energia economizada																				
Facilidade de implementação																				
Confiabilidade do abastecimento																				
Flexibilidade das alternativas																				
Acessibilidade																				
Tempo de implementação																				
Danos a bens móveis, imóveis e outras redes de serviço																				

Qual o grau de importância (peso) que você atribui para cada um dos critérios considerados para a gestão de perdas de água em sistemas de abastecimento de água?

Obs.: A soma dos pesos deve ser igual a 1.

Econômico	Ambiental	Técnico	Social