

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Estudo de custos de perdas em sistemas de distribuição de água: Avaliação energética e ambiental com análise de cenários computacionais**

Solange Cristina Raimundo Alves

Orientador: Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva

**ITAJUBÁ (MG)**

**2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Solange Cristina Raimundo Alves

**Estudo de custos de perdas em Sistemas de Distribuição de Água: Avaliação energética e ambiental com análise de cenários computacionais**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Energia.

**Área de Concentração:** Energia, Sociedade e Meio Ambiente

**Orientador:** Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva

**ITAJUBÁ (MG)**

**2024**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, inspiração e sabedoria que me foram concedidas ao longo desta jornada. Sem Sua presença constante, este trabalho não teria sido possível. Manifesto também minha profunda devoção a Nossa Senhora Aparecida e a Santa Rita, por suas intercessões e por me concederem esperança e conforto nos momentos mais desafiadores.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando, por sua orientação, paciência e apoio inestimável durante todo o processo de desenvolvimento desta dissertação. Sua experiência e dedicação foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. A sua habilidade em fornecer orientação clara e valiosa, bem como o seu encorajamento contínuo, foram essenciais para superar os desafios encontrados ao longo do caminho. Sou imensamente grata por suas contribuições intelectuais e pelo suporte pessoal, que foram cruciais para a realização deste estudo.

Agradeço profundamente a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo conhecimento compartilhado, dedicação e incentivo ao longo desta jornada acadêmica. Suas aulas, orientações e exemplos foram fundamentais para meu crescimento profissional e pessoal, contribuindo de maneira significativa para a realização deste trabalho.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pela oportunidade de estar realizando o sonho do mestrado e pelos recursos essenciais que foram fundamentais para a realização deste estudo.

Um agradecimento especial à minha família, pelo apoio incondicional, amor e compreensão durante todos os momentos desta caminhada acadêmica. Sem o suporte de vocês, este trabalho não teria sido possível.

Agradeço ao NUMMARH – Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos da Unifei e ao LHC – Laboratório de Hídrica Computacional.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

Muito obrigada a todos!

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta dissertação à memória de Monsenhor Alderigi Maria Torriane, que se encontra em processo de beatificação e a quem tenho como um dos santos de minha devoção, pelas graças alcançadas através de sua intercessão. Sua vida e exemplo de fé têm sido uma fonte constante de inspiração e fortaleza para mim.

Dedico esta dissertação à memória dos meus amados pais, Maria Divina e Lázaro Raimundo, que, embora não estejam mais fisicamente presentes, continuam a me guiar e inspirar todos os dias. A eles, toda minha gratidão pelo amor, apoio e ensinamentos que moldaram quem sou hoje. Este trabalho é uma homenagem ao legado que deixaram.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)

## RESUMO

Os sistemas de distribuição de água das cidades têm um alto custo de operação e manutenção, o que destaca a importância crescente de estudos sobre eficiência hídrica e energética. As perdas de água nos sistemas de distribuição, que geralmente são elevadas em grande parte do mundo, estão diretamente relacionadas à melhoria da eficiência dessas estruturas hídricas. Portanto, o estudo dos custos das perdas nos sistemas de distribuição de água tem como objetivo identificar o impacto econômico e ambiental das perdas em áreas urbanas. Neste trabalho, o objetivo foi avaliar e quantificar os custos das perdas de água nas empresas de distribuição, com a meta de identificar possíveis melhorias a serem implementadas. Como etapas metodológicas, inicialmente definiu-se quantificar os tipos de perdas de água em um sistema de distribuição, e em seguida, quantificar os custos relacionados à água, energia e impactos ambientais por meio de ferramentas de modelagem e simulação. Posteriormente, foi realizada construção de um sistema de saneamento hipotético, representativo de sistemas reais. A análise foi conduzida por meio de cenários computacionais e simulação por meio de uma rotina computacional construída e simulação dos cenários estabelecidos com vistas a cenários temporais de perdas de água. Os resultados demonstraram a que a importância do estudo e investimento em redução de perdas e impacto econômico e ambiental e a quantificação e valoração de diferentes etapas componentes de um sistema de abastecimento. Conclui-se que o impacto de redução de perdas de água pode ser quantificado e valorado demonstrando a importância de composição de custos parciais, ilustrando a importância de combater as perdas em diferentes etapas de processos de sistema de abastecimento.

**Palavras-chave:** Sistemas de distribuição de água. Perdas de água. Quantificação de custos de perdas de água. Cenários computacionais.

## ABSTRACT

City water distribution systems have a high operating and maintenance cost, which highlights the growing importance of studies on water and energy efficiency. Water losses in distribution systems, which are generally high in much of the world, are directly related to improving the efficiency of these water structures. Therefore, the study of the costs of losses in water distribution systems aims to identify the economic and environmental impact of losses in urban areas. In this work, the objective is to evaluate and quantify the costs of water losses in distribution companies, with the aim of identifying possible improvements to be implemented. As methodological steps, it was initially defined to quantify the types of water losses in a distribution system, and then, to quantify the costs related to water, energy and environmental impacts through modeling and simulation tools, subsequently, construction was carried out of a hypothetical sanitation system, representative of real systems. The analysis was conducted through computational scenarios and simulation through a constructed computational routine and subsequent simulation of the established scenarios with a view to temporal scenarios of water losses. The results demonstrated the importance of studying and investing in reducing losses and economic and environmental impact and quantifying and valuing different component stages of a supply system. It is concluded that the impact of reducing water losses can be quantified and valued, demonstrating the importance of composing partial costs, illustrating the importance of combating losses in different stages of supply system processes.

**Keywords:** Water distribution systems. Water losses. Quantification of water loss costs. Computational scenarios.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Processo que envolve todo o sistema de abastecimento de água .....	16
Figura 2- Balanço de água .....	19
Figura 3 - Variados tipos de perdas que podem ocorrer nos sistemas .....	22
Figura 4- Fluxograma das etapas de trabalho .....	31
Figura 5- Sistema de Abastecimento de Água Teórico .....	35
Figura 6 - Rede 1 .....	37
Figura 7- Rede 2 .....	39
Figura 8 - Rede 3 .....	41
Figura 9 - Rede 4 .....	43
Figura 10- Entrada de dados .....	60
Figura 11- Cálculos dos custos considerados .....	61
Figura 12- Avaliação dos custos das perdas .....	63
Figura 13- Custos e perdas em 1 dia.....	64
Figura 14- Custos e perdas em 1 mês .....	64
Figura 15- Custos e perdas em 1ano.....	65
Figura 16- Custos e perdas em 25 anos .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Simulação Hidráulica da Rede 1 .....	38
Tabela 2- Simulação Hidráulica da Rede 2 .....	40
Tabela 3- Simulação Hidráulica da Rede 3 .....	42
Tabela 4- Simulação Hidráulica da Rede 4 .....	45
Tabela 5- Custo de operação considerando o total de pessoas atendidas .....	48
Tabela 6 - Custo associado à construção da rede de distribuição (tubulações).....	49
Tabela 7- Custo associado à válvula redutora de pressão .....	50
Tabela 8- Custo das bombas utilizadas no sistema de estudo .....	50
Tabela 9- Custo dos reservatórios no sistema de estudo .....	51
Tabela 10- Somatório de custos de Infraestrutura.....	51
Tabela 11- Custo de produção da água no processo de tratamento químico.....	53
Tabela 12- Custo de produção da água por elementos de despesa.....	53
Tabela 13- Custos de energia .....	54
Tabela 14- Custos dos créditos de carbono .....	55
Tabela 15- Custos de pessoal .....	55
Tabela 16- Custos de veículos.....	56
Tabela 17- Porcentagens de perdas e custos em 1 ano.....	65
Tabela 18- Porcentagens de perdas e custos em 25 anos .....	66
Tabela 19- Relação de custos .....	68
Tabela 20- Análise comparativa de custos .....	69
Tabela 21- Custo de Depreciação e custo de energia .....	71

## **LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

ETA - Estação de Tratamento de Água

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

ACV - Análise de Ciclo de Vida

EG - Entidade Gestora

SAA - Sistema de Abastecimento de Água

LPS - Litros por segundo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	15
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	16
<b>3.1 Sistemas de Abastecimento de Água</b> .....	16
<b>3.2 Perdas de água em redes de abastecimento</b> .....	17
<b>3.3 Análise de Ciclo de vida – Perdas de água</b> .....	21
<b>3.4 Custo de Sistema de Abastecimento de Água e custos associados as perdas de água</b> .....	23
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	31
<b>Etapas do trabalho</b> .....	32
<b>5. RESULTADOS</b> .....	60
<b>6. CONCLUSÕES RECOMENDAÇÕES</b> .....	72
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	74

## 1. INTRODUÇÃO

A importância da água para o ser humano é tal que, ao longo da história, muitas civilizações se desenvolveram ao redor de rios, lagos ou do mar, que foram a principal fonte de água para a população. As primeiras cidades foram construídas perto dessas fontes de água, que eram essenciais para a sobrevivência dos habitantes. Hoje, o acesso à água limpa ainda é uma questão fundamental em muitas partes do mundo. A água é muitas vezes tomada como certa e sua importância nem sempre é apreciada. A disponibilidade e o acesso à água são essenciais para a existência das cidades. Desde os primeiros grupos humanos conhecidos, as pessoas têm procurado encontrar maneiras de ter acesso a este recurso vital.

A essencialidade da água para a sobrevivência humana faz dela um elemento indispensável para garantir espaços saudáveis, seguros e dinâmicos e, portanto, a existência das cidades está, desde seu início, ancorada na disponibilidade e no acesso a este recurso. Toda a tecnologia que se pode desfrutar não seria possível sem água, portanto, é uma necessidade. Entretanto, a água é um recurso limitado, e é essencial para a sobrevivência.

De acordo com Gomes (2005), apud Silva Junior, (2017), as perdas de água nos sistemas de abastecimento no Brasil, que incluem as perdas físicas e por consumos não contabilizados, alcançam cerca de 40% e chegam a atingir 70% em algumas cidades do país. Essas perdas são principalmente atribuídas a problemas como tubulações antigas, que apresentam vazamentos e colapsos frequentes. Portanto, uma gestão eficiente dos sistemas de abastecimento de água torna-se essencial diante dessa situação.

Os sistemas de abastecimento de água são infraestruturas urbanas essenciais com um papel importante na distribuição de água. Entretanto, muitas vezes sofrem com altos índices de perda de água, devido a vazamentos físicos ou aparentes em vários estágios do processo de distribuição, incluindo coleta, tubulações, tratamento e reserva. Esses sistemas são fundamentais para garantir um abastecimento de água confiável e seguro. Essas perdas podem ter um impacto significativo na eficiência geral do sistema e no próprio abastecimento de água e podem ocorrer nas várias etapas da distribuição de água.

Os autores Moraes, Cavalcante e Almeida (2010), ressaltam que todas as unidades de um sistema de abastecimento de água, incluindo captação, adução, tratamento, reservação e distribuição, são locais passíveis de perdas. No entanto, é na etapa de distribuição que ocorrem os índices mais altos de perdas, seja devido à falta de manutenção adequada da infraestrutura, seja devido à proximidade do usuário final, que pode se beneficiar do abastecimento por meios ilícitos.

Ao longo dos anos, a movimentação das redes e ramais pode resultar em distúrbios nas tubulações, causando vazamentos nos quais a água é escoada pelas redes de esgoto ou água pluvial, dificultando a detecção visível do problema, muitas vezes por um período prolongado.

É importante a quantificação dos custos das perdas, pois muitos recursos naturais e financeiros são usados para o envio da água a seu destino que são desperdiçados. De acordo com Moura (2001), a descontrolada degradação dos recursos hídricos, aliado ao constante crescimento das populações urbanas, tem-se consequência inevitável a insuficiência de água nos mananciais, para o abastecimento público. A crescente ameaça da escassez de água nos mananciais, requer implementação de novas técnicas gerenciais para seu uso e, neste contexto, as ferramentas computacionais são de grande importância.

A avaliação de custos financeiros e ambientais de perdas em sistemas de distribuição de água pode ser feita com apoio de rotina computacional para avaliação de cenários. São muito comentados os números elevados de perdas de água com valores em escala nacional de mundial. Entretanto a mensuração de custos, sejam estes de energia, produtos químicos, material humano e avaliação ambiental é necessária para quantificar este desperdício. A modelagem matemática, é uma ferramenta muito útil para o estudo dessa parte do sistema. A partir desta abordagem com o uso de um software de simulação foi possível avaliar cenários de custos para apoio a avaliação dos prejuízos.

Lacerda (2009) apud Lucena, (2020) considera em seu trabalho que, a otimização da operação dos sistemas de abastecimento traz uma série de benefícios, tais como a gestão adequada da demanda, que pode resultar na redução da vazão necessária e contribuição para a preservação dos mananciais ; o atendimento contínuo à demanda em termos de quantidade e qualidade; a regularização das pressões nos sistemas, levando à diminuição das perdas físicas causadas por vazamentos ou rupturas de tubulações e evitando os impactos ambientais causados por escavações e manutenção de ruas; a redução das perdas físicas, o que aumenta a oferta de água e reduz a demanda, gerando em menor consumo de substâncias químicas no tratamento, menor consumo de energia para adução e menor preço final da água para o consumidor; e a diminuição dos custos com bombeamento e manutenção.

A quantificação dos custos associados às perdas de água não foi simples; por isso, o foco do trabalho concentrou-se nessa questão. Com base nessas considerações, tornou-se essencial trabalhar na melhoria das redes de distribuição de água, bem como na redução das perdas de água, para garantir um abastecimento confiável e eficiente. Este trabalho discutiu questões relacionadas ao

processo de abastecimento de água, incluindo perdas causadas por vazamentos, mau funcionamento dos sistemas e outras causas que resultam em custos e perdas. O objetivo foi realizar um estudo dessas perdas por meio de uma avaliação energética e ambiental, utilizando cenários computacionais e modelagens matemáticas.

## **2. OBJETIVOS**

Este trabalho teve como objetivo principal analisar os custos associados a diversos componentes das perdas de água em um sistema de distribuição, considerando diferentes cenários de composição de custos e períodos de tempo. Detalhou-se a composição dos custos e sua importância em termos econômicos e de sustentabilidade.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Propôs-se uma metodologia para análise e composição dos custos envolvidos nas perdas de água;
- Produziu-se um sistema teórico de abastecimento de água para análise;
- Construiu-se uma rotina computacional para a simulação de cenários de custos de perdas em sistemas de abastecimento de água.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Sistemas de Abastecimento de Água

O sistema de abastecimento de água é o conjunto de infraestrutura e serviços necessários para fornecer água a uma comunidade. Nele, a água é retirada da natureza, tratada e transportada até os consumidores. É composto por uma rede de infraestrutura que inclui barragens, reservatórios etc. O processo de tratamento de água pode variar de acordo com a fonte e a qualidade da água.

Barreto (2010) explica o processo do sistema de abastecimento de água:

- A captação é o local onde o equipamento é colocado próximo à fonte (manancial, rio etc.). A tubulação que sai da captação e vai até a Estação de Tratamento de Água (ETA) é chamada de linha de adução ou adutora. A água bruta é recebida na ETA, em uma caixa de chegada e, por meio de canais, passa por um medidor de vazão.

- A água é primeiramente filtrada em camadas de areia e carvão especial. Após a filtração, a água recebe cal hidratada para corrigir seu pH, que geralmente é ácido. O ácido fluo-silícico também é aplicado para fluoretar nossas águas, a fim de reduzir bastante a taxa de cárie dentária.

A água assim tratada é controlada por testes laboratoriais que atestam a sua potabilidade através de testes físicos, químicos e bacteriológicos. Após o tratamento, segue para reservatórios no próprio terreno da ETA. Na Figura 1 é possível visualizar o processo que envolve todo o Sistema de Abastecimento de Água, desde sua captação nos mananciais até seu destino final, residências, prédios comerciais, escolas, hospitais, etc.

Figura 1- Processo que envolve todo o sistema de abastecimento de água



Fonte: ALFACOMP (2019)

De acordo com Silva Junior (2017), os sistemas de abastecimento de água são compostos por conjuntos de infraestruturas, obras civis, materiais, equipamentos e estão sujeitos a contextos legais, administrativos e sociais. Esses sistemas têm como objetivo principal a produção e distribuição de água potável de forma canalizada para a população, bem como para os setores agrícolas, industriais

e comerciais. O autor mencionado também ressalta que os sistemas de abastecimento de água são considerados simultaneamente como um arcabouço legal, um setor econômico e um conjunto de ações práticas adotadas para a promoção da saúde e preservação do meio ambiente.

O processo de abastecimento de água envolve uma ampla estrutura que precisa ser adequadamente mantida, desde a captação da fonte de água até a distribuição ao usuário final. É crucial garantir uma manutenção adequada para evitar problemas de escassez e assegurar a qualidade da água fornecida.

### **3.2 Perdas de água em redes de abastecimento**

A rede de distribuição de água é vasta e complexa, e as perdas de água podem ocorrer em qualquer ponto do caminho. Para minimizar essas perdas, é importante ter um sistema bem projetado e bem conservado. Muitos fatores podem causar perdas de água e, sem uma gestão correta, podem ter sérios efeitos sobre a infraestrutura. As perdas de água são uma enorme questão ambiental, pois a escassez de água não é apenas uma questão de inconveniência, mas também um desastre ambiental.

Silva Junior (2017), ressalta que o processo de abastecimento de água tratada é composto por três fases principais. A primeira fase é a captação e adução da água bruta, que consiste na coleta da água em seu estado bruto a partir dos mananciais de abastecimento e no seu transporte até a unidade de tratamento. A segunda fase é o tratamento e reservação da água tratada, que engloba os processos mecânicos e químicos para tornar a água potável e o armazenamento dessa água tratada antes de ser distribuída. Por fim, a terceira fase é o sistema de distribuição de água, que abrange os processos de transporte da água tratada até os pontos de consumo. É nessa etapa que ocorrem a maioria das perdas.

Fatores que podem contribuir para essas perdas incluem vazamentos, ruptura de redes e tanques, e rachaduras. Problemas com vazamentos em dutos e quebras de tubulações de água são a causa mais comum de perda de água. Geralmente são causadas por vazamentos da rede de água, bombas com vazamento, tubulações com vazamento, torneiras com mau funcionamento ou aparelhos com mau funcionamento. Silveira (2019) destaca que, dado o alto nível de complexidade dos sistemas de abastecimento de água, é crucial compreender tanto seus componentes estáticos quanto dinâmicos durante o funcionamento. Manobras realizadas em certos elementos ou mesmo uma interrupção súbita de energia podem gerar ondas de pressão que se propagam por todo o sistema, aumentando o risco de rupturas nas tubulações.

Segundo Mutikanga, Sharma e Vairavamoorthy (2009), nos países em desenvolvimento, a perda de água estimada em sistemas de abastecimento pode ser significativa, em torno de 40% em relação ao volume de entrada do sistema. Diversos fatores contribuem para essas perdas, incluindo práticas de operação e manutenção insatisfatórias, gestão inadequada, medições insuficientes e inadequadas, usos não autorizados, dados operacionais inadequados para o balanço padrão, ausência de terminologias padrões e indicadores de desempenho e má administração.

De acordo com Fortes (2016), o desperdício de água é um grande problema, estimado em aproximadamente 39,8% de acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2013. Uma das maneiras de minimizar esse desperdício é através da redução tanto do desperdício por parte dos consumidores quanto das perdas no sistema. As perdas de água são classificadas em duas categorias: perdas reais e perdas aparentes.

As perdas reais referem-se aos vazamentos que ocorrem no sistema de distribuição, gerados em uma quantidade significativa de água perdida. Por outro lado, as perdas aparentes são aquelas em que há consumo de água, porém esse volume não é medido e faturado pela distribuidora. O alto grau de fragmentação e a falta de um sistema de gerenciamento centralizado dificultam a prevenção e o controle das perdas de água nessas redes. Há muitas razões pelas quais as perdas de água ocorrem nestas redes.

As perdas de água nos sistemas públicos de abastecimento são um problema significativo, e a principal fonte dessas perdas físicas está nas redes distribuidoras e nos ramos prediais. Essas estruturas são subterrâneas e estão dispersas por extensas áreas urbanas, o que apresenta grandes dificuldades operacionais para o controle e a manutenção adequada.

Essas perdas no sistema de abastecimento de água podem ser classificadas em perdas reais (físicas) e perdas aparentes (não físicas). Segundo Silva e Conejo (1999), apud Benedito, (2019), as perdas físicas são consequências de vazamentos que ocorrem em diferentes etapas do sistema, como captação, adução, tratamento, reservação e distribuição da água tratada. Além disso, procedimentos operacionais, como descargas na rede e lavagem de filtros, quando excedem o consumo necessário previsto para essas operações, também podem contribuir para as perdas físicas. Por outro lado, as perdas não físicas estão relacionadas a ligações não comerciais, ligações clandestinas, hidrômetros não operacionais ou fraudulentos, entre outros fatores. Essas perdas também são conhecidas como perdas de faturamento.

De acordo com Morais, Cavalcante e Almeida (2010), as redes distribuidoras são responsáveis pela maior parte das perdas reais de água em um sistema público de abastecimento. Essas redes enfrentam desafios operacionais consideráveis devido à sua natureza subterrânea e à sua extensão

em grandes áreas urbanas. A localização e a manutenção dessas estruturas são complexas, tornando essencial um bom conhecimento da rede de distribuição para reduzir as perdas de água nesses sistemas.

Embora as perdas reais e aparentes possam contribuir para a perda total de água, é importante diferenciar entre as duas, a fim de identificar efetivamente e mitigar as causas. As perdas reais são perdas de água que ocorrem devido a vazamentos, estouros e outras falhas físicas no sistema. Perdas aparentes são perdas que não são realmente físicas, mas que são devidas a erros de medição, faturamento impreciso ou roubo. Essas perdas impactam diretamente a receita e sustentabilidade financeira de abastecimento de água. Benedito, (2019) destaca o trabalho de Alegre e outros (2006), através da caracterização dessas perdas mencionadas de acordo com a figura denominada “balanço de água”.

A Figura 2 apresenta um esquema de classificação do volume de entrada de água em um sistema de abastecimento, dividido em diferentes categorias de consumo e perdas. A estrutura detalha como a água é utilizada e como as perdas podem ser categorizadas em autorizadas e não autorizadas, bem como em perdas aparentes e reais.

Figura 2- Balanço de água

Volume de entrada no sistema	Consumo Autorizado	Consumo Autorizado Faturado	Consumo Medido Faturado (incluindo água importada)	Água Faturada
			Consumo Estimado Faturado	
		Consumo Autorizado Não Faturado	Consumo Medido Não Faturado	Água Não Faturada (ANF)
			Consumo Estimado Não Faturado	
	Perda de Água	Perdas Aparentes (Não Físicas)	Consumo Não Autorizado	
			Erro de Medição	
		Perdas Reais (Físicas)	Vazamentos e Extravasamentos em Reservatórios	
			Vazamentos em Adutoras e Redes	
Vazamentos em Ramais até o ponto de medição do cliente				

Fonte: adaptado de Alegre et al. (2006) apud Benedito (2019)

A perda de água dos sistemas de distribuição é uma grande preocupação para as concessionárias em todo o mundo. Diversos fatores contribuem para essa perda, desde avarias na rede de água até o mau funcionamento de válvulas e vazamentos em hidrantes. Essa infraestrutura comprometida resulta em uma quantidade significativa de água perdida periodicamente. As perdas de água são um problema comum em muitas redes de abastecimento em todo o mundo, e o Brasil não é exceção.

A evolução das perdas de água no sistema de abastecimento brasileiro é uma questão complexa e variável de acordo com cada região do país. No entanto, é possível fornecer uma visão geral sobre o assunto com base nas informações disponíveis até setembro de 2021.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2020, as perdas totais de água no Brasil foram de aproximadamente 38,1%. Esse índice inclui tanto perdas reais quanto perdas aparentes. No entanto, é importante ressaltar que esse número pode variar consideravelmente de uma região para outra. As perdas de água têm sido uma preocupação constante no setor de abastecimento brasileiro, devido aos impactos financeiros e ambientais. Para enfrentar esse desafio, diversas ações têm sido adotadas por empresas de saneamento e governos locais. Entre as medidas mais comuns estão: 1. Investimentos em infraestrutura: Substituição e modernização das redes de distribuição de água para reduzir vazamentos e perdas físicas. 2. Investimentos em infraestrutura: Substituição e modernização das redes de distribuição de água para reduzir vazamentos e perdas físicas.

Combater as perdas de água é um desafio financeiro significativo para muitas empresas concessionárias de água. Reduzir as perdas no sistema de abastecimento é uma prioridade para garantir o uso eficiente dos recursos hídricos e otimizar a operação dos sistemas. Essas perdas podem resultar em custos adicionais, tanto em termos de recursos financeiros para a empresa como também em relação à sustentabilidade ambiental. Portanto, é fundamental que os distribuidores de água adotem medidas eficazes para mitigar as perdas e buscar uma gestão eficiente dos recursos disponíveis. Benedito, (2019) conduziu um estudo de custos em um sistema de distribuição de água real, no qual destacou que o combate às perdas de água tem sido um grande desafio tanto para os coletores de saneamento público quanto os privados. Em algumas dessas situações, as perdas podem representar até 60% do volume produzido. Para realizar uma gestão mais eficiente dos recursos a serem investidos no combate às perdas, é fundamental compreender o valor financeiro que essas perdas representam.

Para reduzir o valor financeiro das perdas de água, é necessário reduzir o volume de água produzida, o que por sua vez reduz a quantidade de energia necessária para a produção de água. Além disso, por terem um valor financeiro preciso para a água, os concessionários poderão tomar decisões mais bem informadas sobre onde alocar recursos para reduzir as perdas de água. Conforme mencionado por Silva (2019), o perfil das perdas do sistema de abastecimento de água pode ser determinado pelo meio do balanço hídrico. Esse balanço consiste em equacionar as entradas e saídas de água no sistema, revelando a diferença entre a quantidade de água que entra no sistema para ser distribuída e a quantidade de água efetivamente utilizada pelos usuários. Essa abordagem fornece uma visão clara das perdas ao longo do sistema e auxilia na identificação de áreas específicas que induzem a intervenção para reduzir essas perdas.

Para lidar com os problemas de perdas de água, tanto no Brasil quanto no mundo, são necessárias ações integradas e abordagens abrangentes. Isso inclui investimentos em infraestrutura, manutenção adequada dos sistemas, detecção e reparo rápido de vazamentos, implementação de tecnologias mais eficientes, conscientização da população sobre o uso responsável da água e regulamentações adequadas para garantir a gestão sustentável dos recursos hídricos.

### **3.3 Análise de Ciclo de vida – Perdas de água**

Análise do ciclo de vida da água usada nos sistemas de abastecimento é uma ferramenta que pode ser usada para reduzir as perdas de água. A fim de reduzir o impacto ambiental da perda de água, a ACV pode ajudar a identificar formas de reduzir a quantidade de água perdida através do processo de produção. Ao aplicar um ACV às perdas de água, podem ser considerados vários aspectos ambientais, como o consumo de recursos hídricos, consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa, uso de produtos químicos no tratamento da água e impacto na qualidade da água e nos ecossistemas aquáticos. Ao se identificar oportunidades de melhoria e implementar medidas de redução de perdas, é possível minimizar os impactos ambientais e promover a gestão sustentável dos recursos hídricos.

A análise do ciclo de vida vem sendo aplicada em pesquisas recentes sobre o sistema de abastecimento de água e no tratamento de água residuais. De acordo com Plappally et. al. (2012, apud Silva, 2019), o ciclo de vida da água em uma rede de tratamento e distribuição começa com a coleta de fontes como rios, lagos, aquíferos ou oceanos. O tratamento básico envolve a remoção de microrganismos e sólidos suspensos quando a água é proveniente de rios e lagos. Em casos de tratamento mais avançado, são removidas partículas e compostos orgânicos para garantir uma boa qualidade da água.

Segundo Póvoas (2015), as perdas de água, sejam elas reais ou aparentes, apresentam um impacto brutal no desempenho econômico-ambiental de uma Entidade Gestora (EG). Assim, cabe à EG encontrar soluções para minimizar esse impacto e, se possível, alcançar a melhor combinação entre o custo das medidas de redução de perdas e o preço da água perdida. Não há solução única para o problema das perdas de água nos sistemas de saneamento, pois cada sistema é único e requer uma abordagem personalizada. Entretanto, algumas medidas comuns que podem ser tomadas para reduzir as perdas incluem: reparar vazamentos, melhorar os procedimentos de medição e faturamento e educar os clientes sobre a importância da conservação da água.

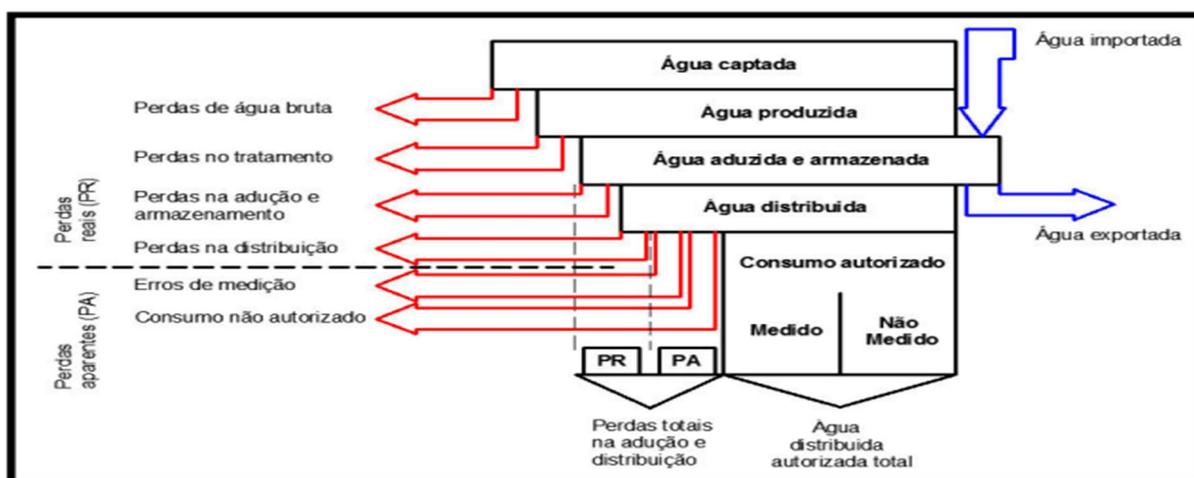
Pereira e Tinôco (2022) argumentam que em meio a uma crise hídrica evidente e onerosa, torna-se desafiador identificar um legado positivo. No entanto, destacam-se a necessidade de implementar

medidas ambientais, especialmente no âmbito da água, a fim de enfrentar essa crise. Eles propõem a elaboração e execução de um programa destinado a controlar e reduzir as perdas hídricas, buscando resultados que vão além dos benefícios econômico-financeiros, ao proporcionar maior eficiência na gestão da demanda de água. Essa abordagem visa minimizar principalmente os impactos socioambientais causados pela economia de água.

A relação do ciclo de vida com custos associados a perdas de água pode ser foco importante, pode inicialmente destacar o trabalho de Silva, (2019) que realizou estudo comparativo de Métodos de Perda de Água e Parâmetros Hidráulicos com análise do Ciclo de Vida e Aplicação em rede do Sul de Minas Gerais. Tal trabalho aplicado de forma local, mas demonstrando potencial de aplicações futuras.

Martins (2014) destaca que diversos fatores podem influenciar as perdas de água nos sistemas de abastecimento. Esses fatores estão relacionados à topografia dos terrenos onde as tubulações estão localizadas, à densidade dos ramos existentes, ao comprimento das condutas, à pressão média de serviço durante a pressurização do sistema, à qualidade da operação e manutenção do sistema de abastecimento, à duração média e frequência das rupturas, entre outros. A Figura 3 ilustra os diversos tipos de perdas que podem ocorrer nos sistemas de abastecimento de água, bem como a distribuição de consumo não autorizado.

Figura 3 - Variados tipos de perdas que podem ocorrer nos sistemas



Fonte: Gomes, (2011), apud, Martins (2014)

Morais e Almeida (2006) afirmam que, devido à complexidade e às características próprias dos sistemas de abastecimento de água, é utópico esperar atingir perdas zero. No entanto, destacam que as empresas de saneamento enfrentam índices elevados de perdas, resultando em perda de receita e desperdício de água tratada por falta de gerenciamento adequado. Os autores sugerem que uma gestão eficiente dos recursos hídricos é essencial para reduzir essas perdas, impactando

positivamente os resultados financeiros das empresas. Eles recomendam estratégias como a detecção de vazamentos, controle rigoroso do consumo, monitoramento constante dos sistemas de distribuição e conscientização dos usuários sobre a importância da conservação da água.

Através da ACV, é possível identificar as etapas do sistema de abastecimento onde ocorrem as maiores perdas de água e avaliar as opções de mitigação disponíveis. Por exemplo, medidas para reduzir os vazamentos e melhorar a eficiência do sistema podem ser incorporadas com base nos resultados da ACV. Além disso, um ACV pode ser usado para comparar diferentes estratégias de gestão de água e determinar qual delas tem menor impacto ambiental.

Em resumo, uma análise do ciclo de vida pode fornecer informações valiosas sobre os impactos ambientais das perdas de água no sistema de abastecimento. Ao identificar oportunidades de melhoria e implementar medidas de redução de perdas, é possível minimizar os impactos ambientais e promover a gestão sustentável dos recursos hídricos.

### **3.4 Custo de Sistema de Abastecimento de Água e custos associados as perdas de água**

A água é um recurso precioso, e seu valor financeiro reflete isso. O custo da infraestrutura de tratamento e distribuição da água pode se somar rapidamente, por isso é importante estar atento ao uso e conservação da água. O custo de um Sistema de Abastecimento de Água (SAA) pode variar significativamente, dependendo de vários fatores, como o tamanho da população atendida, a extensão da rede de distribuição, a infraestrutura existente, a qualidade da água e os requisitos regulatórios locais. Portanto, é difícil fornecer um valor específico sem informações específicas sobre o projeto em questão.

Costa, Castro e Ramos, (2010) destacam que a alteração dos procedimentos operacionais de bombeamento é uma medida prática que pode levar à redução dos custos de energia elétrica de forma eficaz. Essa abordagem não requer investimentos ambiciosos e resultados em economias de curto prazo. No entanto, os autores enfatizam que a orientação de estratégias operacionais que garantem custos energéticos reduzidos, ao mesmo tempo em que manter a qualidade do atendimento aos clientes, é uma tarefa complexa. Nesse processo, objetivos distintos estão envolvidos, como a utilização eficiente da tarifa energética e a manutenção das variáveis hidráulicas dentro dos limites alcançados. Para lidar com essa complexidade, é necessário o uso de modelos que considerem todos esses elementos.

Ainda no mesmo contexto destaca também o trabalho dos autores Duarte e Covas (2008), os custos de energia consumidos, juntamente com os custos relacionados ao trabalhador, representam

a parcela mais significativa dos custos de operação dos sistemas de abastecimento de água. Diversos fatores, como a distância até a fonte de captação de água, a topologia do sistema e a topografia das áreas atendidas, têm influência no consumo de energia nos sistemas de abastecimento. Esses fatores devem ser considerados ao buscar estratégias para otimizar o uso da energia nesses sistemas.

Conforme apontado por Lucena (2020), de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), as despesas com energia elétrica das empresas de saneamento em 2018 totalizaram aproximadamente R\$ 6,19 bilhões. Esse consumo de energia foi de 12,9 TWh, sendo 11,5 TWh referentes ao abastecimento de água e 1,4 TWh relacionados ao esgotamento sanitário. O SNIS indica uma tendência de aumento do consumo de energia devido ao crescimento dos índices de consumo per capita de água e da expansão dos serviços de água e esgoto.

Entretanto, ao avaliar a implementação de medidas para redução das perdas de água, é crucial considerar o custo inicial dessas ações em relação aos benefícios financeiros a longo prazo. Embora seja verdade que a redução das perdas de água pode resultar em economias significativas ao longo do tempo, é importante reconhecer que pode ser necessário um alto investimento inicial para implementar as mudanças necessárias.

Segundo Carvalho (2012), a fim de minimizar os custos energéticos, é importante buscar ajustes no sistema que possam reduzir a velocidade de rotação dos conjuntos de bombeamento. Essa abordagem deve prevalecer sobre as perdas de carga necessárias para regular como pressão na rede, quando o sistema de controle utiliza válvulas. Em outras palavras, as válvulas devem operar na maior abertura possível, enquanto os conversores devem operar na menor frequência necessária. Isso contribui para a eficiência energética do sistema de abastecimento de água.

Benedito, (2019) conduziu um estudo de custos que levou em consideração os componentes das perdas de água, no entanto, não abordou os aspectos de modelagem matemática e simulação de cenários, que são os principais focos desta discussão.

É importante notar que as perdas de água nas redes de abastecimento também podem ter um impacto financeiro significativo. Além do custo da própria água, essas perdas também podem levar ao aumento dos custos de energia, bem como aos custos de manutenção e reparos. É necessário levar esses fatores em consideração ao projetar um sistema de abastecimento de água para garantir sua sustentabilidade a longo prazo. Um aspecto frequentemente negligenciado é a implementação limitada da cobrança pelo uso da água. Esta questão, que pode ter sido abordada de forma restrita nesta dissertação, deverá ganhar relevância com a ampliação e aprimoramento dos mecanismos de

cobrança. A melhoria na cobrança pode ajudar a cobrir os custos adicionais e incentivar uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, refletindo melhor o custo real da água e os impactos das perdas.

Segundo Vicente (2005) a falta de planejamento e manutenção eficiente, juntamente com a economia de recursos financeiros, tem levado à redução da eficiência dos sistemas de abastecimento de água. Essa falta de eficiência é evidenciada pelos altos índices de perdas no sistema, os quais estão principalmente relacionados à alta pressão de trabalho das redes e ao aumento significativo do consumo de energia. O alto custo operacional da energia elétrica justifica a necessidade de investimentos para aumentar a eficiência do sistema, sem comprometer a qualidade dos serviços prestados.

Além de reduzir o custo dos sistemas de abastecimento de água, a minimização das perdas de água também traz benefícios ambientais. A produção de água limpa requer uma quantidade significativa de energia, o que contribui para a emissão de gases de efeito estufa e a mudança climática. Ao reduzir as perdas de água, menos água precisa ser captada, tratada e distribuída, o que resulta em uma demanda energética menor para todo o processo.

Para Galván (2011), apud. Medeiros (2018), as perdas de água acarretam diversos custos, que, se gerenciados controlados, podem ser reduzidos ou evitados. Entre esses custos, podem ser mencionados os custos energéticos, sociais e ambientais, os custos relacionados ao tratamento da água para manter sua qualidade na rede de distribuição, e os custos técnicos, como os custos de manutenção e implementação do sistema de abastecimento. A avaliação dos custos associados às perdas de água tem como objetivo encontrar soluções técnicas e economicamente viáveis para reduzir essas perdas, melhorar a qualidade da rede de abastecimento e beneficiar os consumidores. Ao entender os custos envolvidos, é possível implementar estratégias eficientes que resultem em uma gestão mais eficaz do sistema de abastecimento de água

A fim de administrar mais efetivamente os recursos e combater as perdas de água, é essencial conhecer o valor financeiro da água perdida. Em muitos casos, as perdas de água podem representar uma porcentagem significativa do volume total produzido por uma concessionária. Estas informações financeiras podem ajudar as empresas de água a tomar melhores decisões sobre onde alocar recursos a fim de reduzir as perdas de água.

Gumier, (2005) destaca que quando se depara com um sistema de abastecimento que, de um lado não consegue suprir a demanda e de outro perde parte de sua produção em vazamentos, fica estabelecida uma situação de conflito em que deverão pesar os custos de detecção e reparo dos vazamentos existentes e os de projeto e execução de novas obras, além de questões operacionais e

estratégicas e de disponibilidade hídrica que possam ser importantes. O nível econômico de perdas em um sistema de abastecimento pode ser obtido pelo levantamento e análise dos custos do volume de água perdido e dos custos oriundos dos programas de controle e detecção dos vazamentos. Idealmente o ponto ótimo de perdas é onde o custo da água é igual ao custo do controle ativo das perdas.

Ao conhecer o valor financeiro da água perdida, as distribuidoras de água podem ter uma visão clara do impacto econômico das perdas em suas operações. Em muitos casos, essas perdas representam uma porcentagem considerável do volume total produzido. Ter informações financeiras precisas sobre as perdas de água permite às empresas tomarem decisões mais pesadas sobre onde alocar recursos para reduzir essas perdas. De acordo com Benedito, (2019) a estrutura de custos proposta classifica as perdas de água nas categorias de Custos Fixos e Custos Variáveis. Os custos fixos estão relacionados à infraestrutura da cuidadora, representando seus aspectos parentes. Por outro lado, os custos que estão sujeitos ao volume de água produzido são considerados como variáveis. Essa abordagem considera uma relação linear entre os custos e o volume de produção de água, visando simplificar a abordagem do problema.

Além disso, ter uma compreensão clara do valor financeiro das perdas de água também pode servir como um incentivo para que as empresas implementem medidas de gestão mais eficientes. Ao reconhecer o impacto financeiro negativo das perdas, os participantes têm um incentivo adicional para buscar soluções inovadoras e estratégias de combate às perdas, visando a melhoria da eficiência operacional e financeira

Segundo Sobrinho et al. (2016), as perdas de água nos sistemas de abastecimento público resultam em desperdício de recursos públicos, o que geralmente é repassado para os usuários. A redução dessas perdas permitiria um melhor aproveitamento do sistema existente, direcionando os recursos economizados para as melhorias necessárias. É importante destacar que o controle das perdas de água nos sistemas de abastecimento público torna-se uma necessidade, uma vez que os volumes não contabilizados não são faturados. Portanto, a quantificação dessas perdas é de extrema importância para os provedores de serviço, tanto em termos de eficiência na distribuição de água quanto em aspectos sanitários e ambientais.

Conforme destacado por Andrade, Sobrinho e Borja (2016), é de extrema importância o desenvolvimento de um conjunto de indicadores para medir a eficácia, controlar e eficiência das ações incorporadas no controle das perdas de água. Esses indicadores devem abordar de forma abrangente os problemas do uso eficiente da água e energia, buscando uma abordagem mais integral. Além disso, é relevante mensurar o impacto das ações de controle das perdas de água na postergação

de investimentos futuros. Isso implica não apenas na minimização das perdas reais e aparentes, mas também considerando a sustentabilidade do sistema de abastecimento de água em termos econômico-financeiros e socioambientais. Dessa forma, a avaliação dos resultados obtidos por meio desses indicadores permitirá uma análise mais completa do desempenho das ações de controle de perdas, fornecendo subsídios para decisões estratégicas e direcionamento de recursos de forma mais eficiente e sustentável.

Entretanto, é importante pesar os custos de implementação de tecnologias em relação à economia potencial em perdas de água. Uma análise de custo-benefício pode fornecer uma visão abrangente das implicações financeiras da adoção dessas medidas e ajudar os tomadores de decisão a determinarem se os benefícios superam os custos. A realização de uma análise de custo-benefício combinada com modelagem matemática permite aos tomadores de decisão identificarem as soluções mais econômicas e garantir a sustentabilidade do sistema de abastecimento de água.

Conforme ressalta Botelho (2014), o conhecimento das estimativas de custos, desempenho de um papel fundamental no planejamento, seleção de investimentos e apoio a decisões de médio e longo prazo. É essencial que as estimativas de custos sejam aprovadas de forma clara, compreensível, controlável e verificável, a fim de evitar falhas graves nas decisões tomadas com base nesses valores. No contexto do sistema de abastecimento de água, a modelagem de custos traz benefícios ao se tornar uma ferramenta para alcançar metas de redução de custos e maximização da eficiência. Ela fornece um ponto de partida para o desenvolvimento de modelos de otimização do sistema, buscando identificar oportunidades de melhoria e tomar decisões embasadas em informações intuitivas.

Além dos benefícios financeiros, a infraestrutura avançada de medição e as redes inteligentes de água também podem fornecer dados valiosos que podem informar as decisões operacionais e melhorar o atendimento ao cliente. A análise de dados em tempo real pode ajudar a identificar vazamentos, imprecisões de medidores e outras anomalias que podem levar a perdas de água, bem como fornecer informações sobre os padrões e preferências de uso do cliente.

Para Costa, et.al. (2010) uma medida prática que pode resultar na redução dos custos de energia elétrica é a alteração dos procedimentos operacionais de bombeamento. Essa abordagem demonstra ser altamente eficaz, uma vez que não requer investimentos adicionais e os benefícios podem ser percebidos em um curto prazo. No entanto, a motivação de estratégias operacionais que promovem a redução dos custos energéticos sem comprometer a qualidade do serviço prestado aos clientes é uma tarefa complexa. Nesse processo, estão envolvidos objetivos distintos, como a utilização eficiente da tarifa energética e a manutenção das variáveis hidráulicas dentro dos limites

preestabelecidos. Para lidar com essa complexidade, é necessário utilizar modelos que considerem todos esses elementos envolvidos. Esses modelos permitem simular diferentes cenários operacionais, avaliando o impacto nos custos de energia elétrica e garantindo que os reguladores hidráulicos sejam mantidos em níveis adequados. Dessa forma, é possível encontrar um equilíbrio entre a eficiência energética e a qualidade do serviço, otimizando o desempenho do sistema de abastecimento de água.

Segundo Botelho (2014), as estimativas de custo iniciadas por meio da modelagem de custos devem ser intuitivas de forma clara, compreensível, controlável e verificável, a fim de evitar falhas graves nas decisões adquiridas nesses valores. O conhecimento das estimativas de custos é, portanto, uma premissa fundamental para o planejamento, seleção de investimentos e apoio a decisões a médio e longo prazo. No contexto específico do sistema de abastecimento de água, a modelação de custos funciona um papel crucial ao se tornar uma via para alcançar metas de redução de custos e maximização de eficiência. Ela serve como ponto de partida para o desenvolvimento de modelos de otimização do sistema de abastecimento de água, permitindo uma análise mais precisa e abrangente dos clientes envolvidos. Com base nessas estimativas de custos, é possível tomar decisões controladas e embasadas, visando a alocação eficiente de recursos, a busca por soluções mais fáceis e a otimização geral do sistema de abastecimento de água.

Para Botelho (2014) a tecnologia dos equipamentos utilizados no sistema de abastecimento de água, a dimensão da área a ser atendida, a topografia e a densidade populacional são alguns dos indicadores que estão associados aos encargos relativos aos serviços de abastecimento de água. O capital relacionado aos sistemas de abastecimento de água pode ser dividido em duas vertentes principais: custos de investimento em infraestruturas e custos de exploração.

A estimativa do custo de fornecimento de água é essencial para uma gestão sustentável da água. Entretanto, há alguns fatores comuns que contribuem para o custo total do abastecimento de água, incluindo manutenção e operações, investimentos em infraestrutura, custos de energia e conformidade regulamentar. De acordo com Benedito (2019), a divisão e classificação dos custos envolvidos no abastecimento de água não têm consenso atualmente. No entanto, Kanakoudis (2013), mencionado na pesquisa de Benedito, descreve possíveis divisões dos custos envolvidos:

- **Custo Direto:** Refere-se aos custos incorridos pela companhia de saneamento para fornecer água em quantidade e qualidade suficientes para os clientes. Esses custos incluem despesas de operação e manutenção, custos administrativos e outros custos relacionados à prestação do serviço.

- **Custo de Recurso:** Esse custo está relacionado ao dano causado aos estoques naturais de água devido ao consumo excessivo em relação à capacidade do aquífero. É conceitualmente definido como a diferença entre a alocação ideal de recursos naturais e a alocação existente, considerando os aspectos financeiros e a economia de água.
- **Custo Ambiental:** Refere-se aos custos associados aos danos ambientais causados pela atividade humana, quando essa atividade ou os produtos relacionados a eles causam a deterioração da qualidade do meio ambiente. Esses custos podem incluir medidas de mitigação, recuperação ambiental e preservação dos recursos naturais.

É importante ressaltar que essas categorias são apenas exemplos das possíveis divisões dos clientes envolvidos no abastecimento de água e que a sua aplicação pode variar dependendo do contexto e dos critérios adotados por cada estudo ou sistema de gestão.

Segundo Cabreira (2013), apud Benedito (2019) os custos de água são divididos em cinco categorias:

- **Custos de Recurso:** composto pelo custo de compra de água bruta, custo de oportunidade e custos gerados por elementos externos.
- **Custo de Operação e Manutenção (O&M):** Inclui custo de pessoal e custos relacionados a produção e distribuição da água (energia, produtos químicos etc.)
- **Custos de Capital:** Correspondem ao montante que deve ser reservado para renovação das infraestruturas quando elas atingirem o fim de vida útil.
- **Custos Ambientais:** Incluem as taxas impostas pelas leis ambientais referentes a minimização dos impactos ambientais gerados pela extração de água.
- **Custos Sociais:** São custos referentes a compensação que deve ser oferecida às pessoas que sofreram alguma inconveniência devido às atividades da concessionária.

De modo geral, o custo dos sistemas de abastecimento de água e os custos associados às perdas de água são questões complexas que exigem uma cuidadosa consideração por parte das concessionárias e dos formuladores de políticas.

Segundo Lucena (2020), os custos energéticos gerados na operação dos sistemas de abastecimento de água devem ser considerados desde a fase de projeto. O autor ressalta que a eficiência energética dos sistemas está diretamente relacionada não apenas ao projeto inicial, mas também à implementação de programas de manutenção, redução de perdas de água e garantia da qualidade do serviço prestado. Portanto, atenção aos custos energéticos deve ser uma preocupação contínua ao longo de todo o ciclo de vida do sistema.

É viável uma avaliação de custo-benefício para quantificar os gastos associados à implementação dessas medidas em comparação com as possíveis economias resultantes da redução de perdas de água. A adoção de tecnologias avançadas de medição, sistemas inteligentes de distribuição de água e análise contínua de dados em tempo real podem desempenhar um papel fundamental na detecção e resolução eficaz das perdas de água de maneira ágil e eficiente. Essa análise deve incluir uma avaliação dos custos iniciais de implementação das tecnologias, assim como os custos operacionais e de manutenção contínuos. Deve também considerar as economias potenciais decorrentes da redução das perdas de água, incluindo os custos evitados por vazamentos e a perda de receitas decorrentes do uso de água não faturada.

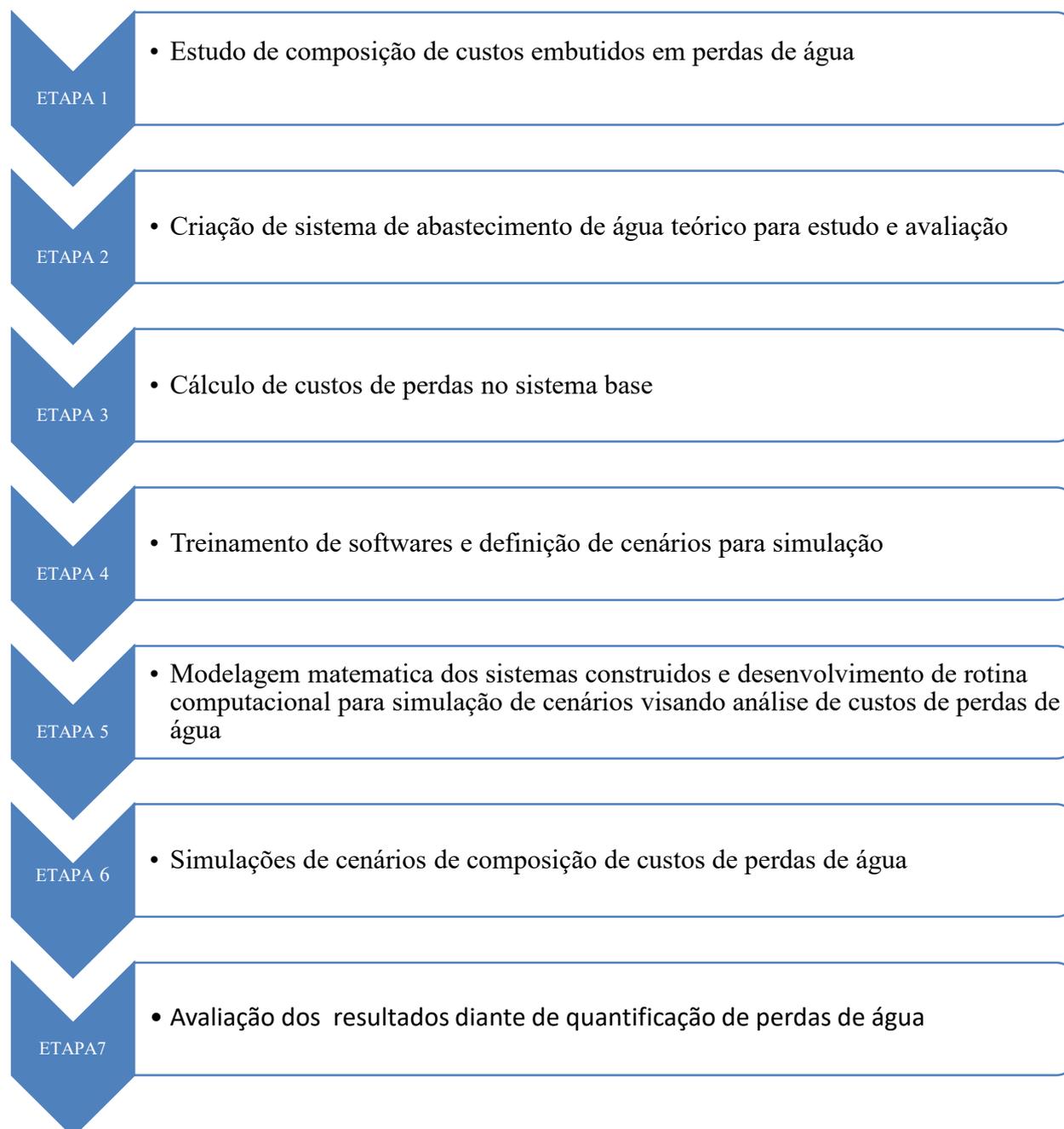
Em geral, uma análise de custo-benefício é uma ferramenta essencial para avaliar a viabilidade e os benefícios potenciais da adoção de infraestrutura avançada de medição, redes inteligentes de água e análise de dados em tempo real para reduzir as perdas de água e melhorar as práticas de gestão da água. Ao avaliar cuidadosamente os custos, benefícios e riscos dessas tecnologias, os tomadores de decisão podem tomar decisões mais informadas sobre as medidas a serem implementadas para reduzir as perdas de água. Além de reduzir a água sem receita, essas tecnologias também podem melhorar a eficiência operacional, o atendimento ao cliente e a gestão de ativos.

Diante da complexidade dos sistemas de abastecimento de água e das diversas variáveis que influenciam seus custos, a literatura revela uma lacuna significativa na avaliação abrangente dos custos associados às perdas de água. Embora existam estudos que abordam aspectos individuais, como custos de energia, manutenção e impactos ambientais, há uma evidente necessidade de pesquisas que integrem essas variáveis de forma mais holística. Autores como Benedito (2019) e Botelho (2014) destacam a importância da modelagem de custos e da análise de custo-benefício para a gestão eficiente e sustentável dos sistemas de abastecimento de água. No entanto, a literatura disponível ainda é limitada e carece de um aprofundamento maior para fornecer uma base mais robusta para a tomada de decisões estratégicas. Essa limitação ressalta a importância de futuros estudos que considerem a avaliação de custos de maneira integrada, levando em conta não apenas os aspectos financeiros, mas também os socioambientais e operacionais dos sistemas de abastecimento de água. Portanto, é crucial alinhar essas observações com o escopo da dissertação em questão, avaliando como ela aborda essas lacunas e contribui para uma compreensão mais completa do tema.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em etapas enfatizando o estudo sobre custos e perdas no sistema de abastecimento de água. Seguem as etapas de desenvolvimento de acordo com a Figura 4 ilustrada:

Figura 4- Fluxograma das etapas de trabalho



Fonte: autora (2023)

## **Etapas do trabalho**

### **Etapa 1: Estudo de composição de custos embutidos em perdas de água**

Essa etapa iniciou-se com o levantamento de dados teóricos sobre o tema. Buscou-se fazer uma revisão da literatura, onde foram abordados tópicos como:

- ✓ Sistema de abastecimento de água;
- ✓ Perdas de água no sistema de abastecimento;
- ✓ Análise do ciclo de vida da água;
- ✓ Custos do sistema de abastecimento e custos associados as perdas de água.

Nessa etapa foi feita uma análise da composição dos custos envolvidos em perdas de água no sistema de abastecimento. O foco da análise é identificar os principais problemas que afetam a eficiência dos sistemas de abastecimento de água. Serão pesquisadas diversas fontes das quais dados podem ser coletados, tais como relatórios das empresas de água, registros públicos e estudos acadêmicos.

A análise considerou vários custos envolvidos nas perdas de água, incluindo custos diretos, como o custo da própria água perdida, o custo de reparos e manutenção da infraestrutura e o custo da energia utilizada para produzir e distribuir água. Custos indiretos, como o custo dos danos à propriedade e ao meio ambiente, também podem ser considerados. A análise envolveu o exame de dados sobre produção, consumo e perdas de água, bem como informações sobre as condições da infraestrutura e a eficácia das práticas de gerenciamento.

No trabalho assumiu-se como referência o trabalho de Benedito (2019) que utilizou a referência do trabalho de Cabrera (2012) para avaliar a natureza de custos da água considerados como técnicos. Entretanto buscou-se construir uma composição de análise de custos e simulação de valores específica. Cabrera (2012) considerou em seus estudos os seguintes custos: C21 – Custo de sistema de Operação e Manutenção, independente de produção de água, principalmente associado a funcionários. C31 – Custo anual da depreciação das infraestruturas, calculado com base no tempo de vida útil estimado. C41 – Custos fixos econômicos/ambientais, com base nos impactos ambientais causados pela construção das infraestruturas. C32 – Variação (positiva ou negativa) no tempo de vida útil da infraestrutura, alterando o valor estimado para ela inicialmente. C42 – Mudança no custo ambiental resultado de uma mudança no tempo de vida útil. C13 – Custo do recurso em seu estado natural. C23 – Custo Variável de Produção de água em diferentes processos (como potabilização), desinfetantes gerais (como cloro) e reagentes. C43 – Custo Ambiental, ou seja, basicamente custo político do recurso. C24 – Custos Energéticos associados a produção da água. C44 – Custo Ambiental associado a emissões de gases do efeito estufa por

metro cúbico de água injetado no sistema. C35 – Aumento na depreciação anual da infraestrutura por unidade de volume resultado do decréscimo do tempo de vida útil devido a vazamentos. C45 – Custo Ambiental associado a emissão de gases do efeito estufa por volume de vazamento de água devido a reabilitação precoce.

Neste estudo, a avaliação dos custos relacionados aos recursos hídricos foi fundamental para compreender a importância econômica, ambiental e sociopolítica da água. Para isso, foram feitas adaptações baseadas nos termos propostos por Benedito (2019), para incorporá-los de maneira significativa nesta análise.

O cálculo dos custos associados às perdas de água no sistema de sistema de abastecimento pode variar dependendo da disponibilidade de dados e das particularidades do sistema em questão. Abaixo estão alguns passos gerais que serão seguidos para calcular esses custos:

- **Coleta de dados:** O primeiro passo é coletar dados relevantes sobre o sistema de abastecimento de água. Isso inclui informações sobre a quantidade de água tratada, a quantidade de água efetivamente entregue aos consumidores, os custos de tratamento e distribuição, entre outros.
- **Definição das perdas:** é importante diferenciar as perdas reais das perdas aparentes no final. As perdas reais são a diferença entre a quantidade de água tratada e a quantidade realmente entregue aos consumidores. As perdas aparentes, por outro lado, são a diferença entre a água tratada e a água registrada como consumida.
- **Custos de tratamento e distribuição:** O cálculo dos custos de tratamento e distribuição de água para o volume total fornecida aos consumidores. Isto inclui custos com energia, produtos químicos, mão-de-obra, manutenção de infraestrutura, entre outros.
- **Custos operacionais das perdas:** Determinar os custos operacionais associados às perdas de água, incluindo os custos de reparo de vazamentos e falhas na infraestrutura.
- **Custos financeiros:** considerar os efeitos financeiros como uma receita perdida devido às perdas de água não faturadas. Isso envolve calcular o valor da água não consumida que deveria ter sido faturado aos consumidores.
- **Custos sociais e ambientais:** embora esses custos possam ser mais difíceis de quantificar em termos monetários, é importante considerar os impactos sociais e ambientais das perdas de águas para ter uma visão completa dos custos envolvidos.
- **Análise comparativa:** Foi feita uma análise comparativa dos custos associados às perdas de água em diferentes cenários, como o custo atual com as perdas versus o custo potencial com a redução de perdas.

- **Identificação de medidas de redução de perdas:** Com base nos resultados da análise, foram indicadas medidas de redução de perdas que possam ser implementadas para melhorar a eficiência do sistema de abastecimento de água.

## **Etapa 2: Criação de sistema de abastecimento de água teórico para estudo e avaliação**

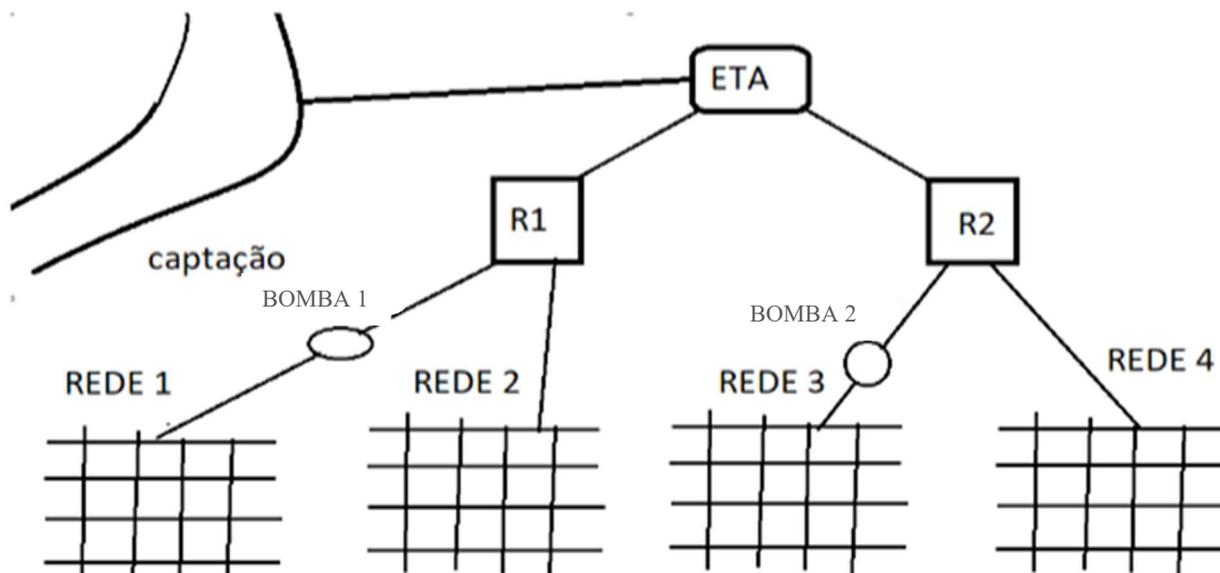
Foi criado um sistema de abastecimento de água *benchmark* para desenvolvimento do estudo e para avaliação dessas perdas. A escolha do sistema de abastecimento de água benchmark para este estudo se justifica pela sua capacidade de representar, de forma simplificada e eficiente, as características essenciais de sistemas reais de distribuição de água. Ele fornece uma base sólida para a realização de simulações detalhadas que abrangem uma ampla gama de condições operacionais e configurações de rede, permitindo testar diferentes cenários e hipóteses de maneira controlada, sem os custos e riscos associados a experimentos em sistemas reais. Além disso, o uso de um sistema benchmark facilita a comparação dos resultados com outros estudos semelhantes, promovendo a consistência metodológica e a validação dos resultados obtidos.

O sistema de abastecimento de água benchmark é uma ferramenta poderosa para avaliar o desempenho de diversas configurações e estratégias de gerenciamento, como a otimização do consumo energético, a minimização de perdas e a melhoria da qualidade da água. Sua flexibilidade permite ajustar parâmetros e variáveis de entrada, como demandas de consumo, pressões, diâmetros de tubulação e configurações de rede, de forma a analisar o impacto dessas alterações em diferentes condições de operação, adaptando-se a contextos específicos. Essa abordagem é especialmente relevante para o desenvolvimento de políticas públicas, pois possibilita a formulação de diretrizes e estratégias sustentáveis baseadas em evidências, auxiliando na tomada de decisões informadas e na definição de estratégias eficientes de operação e investimento.

A escolha desse modelo bem-estabelecido garante maior robustez e credibilidade aos resultados, alinhando-se aos objetivos do estudo, que busca compreender melhor os desafios e oportunidades na gestão de sistemas de distribuição de água de maneira eficiente, segura e economicamente viável. Para efeito de estudo o sistema proposto tem as seguintes características:

O sistema é composto por uma captação de água bruta, a partir daí a água é enviada para uma adutora para uma estação de tratamento de água que distribui para 2 reservatórios de distribuição. Estes enviam a água para 4 redes de distribuição de água, sendo que 2 delas são por meio de bombeamento. A partir da captação, a água é transportada por uma adutora até uma estação de tratamento de água. Após o tratamento, a água é enviada para dois reservatórios de distribuição, que têm a função de armazená-la e regulá-la. Conforme indicado na Figura 5:

Figura 5- Sistema de Abastecimento de Água Teórico



Fonte: autora (2023)

Isto ajudou a estabelecer uma estrutura para compreender as complexidades dos sistemas de abastecimento de água e as questões relacionadas às perdas de água e custos. O benchmark de abastecimento de água considerou vários fatores, como previsão de demanda, dimensionamento de dutos e projeto de rede, para criar um sistema de distribuição de água eficiente e sustentável. O objetivo foi avaliar as perdas de água devido a vazamentos, evaporação e outras causas, ao mesmo tempo em que garantiu que o sistema fosse econômico e atendesse à demanda de água da comunidade que serve. Esse benchmark de abastecimento de água foi projetado para simular cenários do mundo real e avaliar diferentes estratégias para a gestão da água. Ele considerou fatores como demanda de água, projeto de rede de tubulações e medidas de controle de qualidade para garantir que o sistema fosse sustentável e resiliente.

Esses reservatórios são responsáveis por fornecer a água para as redes de distribuição. No total, são quatro redes de distribuição de água nesse sistema. Duas das redes de distribuição são abastecidas diretamente pelos reservatórios, enquanto as outras duas são abastecidas por meio de bombeamento como método de transporte da água, garantindo que a água chegue aos locais mais altos e distantes. Essas redes são essenciais para que todas as áreas sejam abastecidas de maneira adequada, mesmo em lugares de difícil acesso. Isso significa que a água é impulsionada por bombas para chegar às redes de distribuição, garantindo que a pressão adequada seja mantida ao longo do sistema.

As bombas são instaladas em pontos estratégicos ao longo das adutoras, a fim de garantir o fluxo contínuo de água. As redes de distribuição são responsáveis por levar a água tratada para os pontos de consumo, como residências, comércios e indústrias. Elas são compostas por uma rede de

tubulações interligadas, que se ramificam em diferentes direções, levando água para diferentes áreas.

A estação de tratamento de água executa um papel central nesse sistema, localizada a uma distância de 5 km do manancial de água. Neste manancial, uma bomba de 80 CV é utilizada para realizar a captação hídrica. A distância entre a estação de tratamento e o reservatório 1 é de 250 m servindo como ponto de distribuição primária. A extensão da linha de distribuição até a rede 1 é de 2 km e nesse percurso, uma bomba pressurizadora de 40 CV é empregada situada a 1 km de distância da rede 1. O reservatório 1 também supre a rede 2, que atende uma população de 4000 pessoas e está localizado a 1 km de distância do reservatório.

Simultaneamente, a estação de tratamento se encontra a 250 m do reservatório 2, responsável por abastecer a rede 3. A rede 3 distante 1,2 km do reservatório 2, atende uma população de 4500 pessoas. No trajeto até a rede 3 encontra-se uma bomba pressurizadora de 50 CV, situada a 1 km de distância da rede. Adicionalmente, o reservatório 2 também é responsável pelo abastecimento da rede 4, que serve 2000 pessoas e está localizado a uma distância de 1,3 km do abastecimento. No contexto desta infraestrutura hídrica, uma equipe composta por 17 indivíduos é responsável por operar e manter o sistema, garantindo sua funcionalidade e eficiência.

É importante ressaltar que essa descrição é fictícia e se refere a um benchmark que pode variar significativamente de acordo com os sistemas de abastecimento de água reais. As características dos sistemas reais podem diferir dependendo da região, dos recursos disponíveis e das necessidades específicas. Para ilustrar como diferentes variáveis podem ser aplicadas a cenários diversos, considere os seguintes exemplos do benchmark:

- População da Rede 1: 4.000 pessoas
- População da Rede 2: 6.000 pessoas
- População da Rede 3: 7.000 pessoas
- População da Rede 4: 5.000 pessoas

Cada rede do benchmark possui bombas com capacidades específicas para atender à demanda de água:

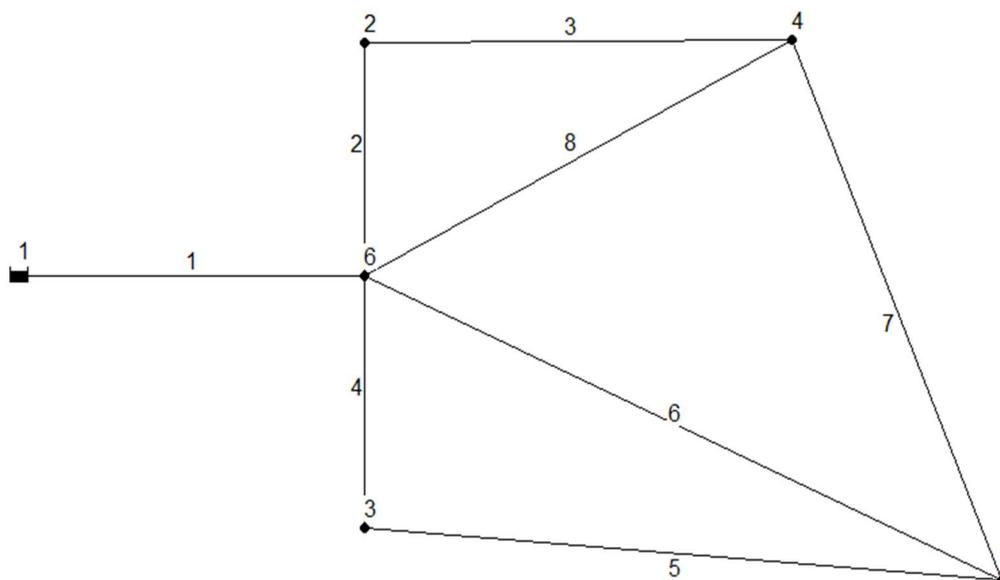
- Bomba 1: 30 Cv
- Bomba 2: 30 Cv
- Bomba da Captação: 40 Cv

Além disso, a equipe envolvida na operação e manutenção das redes é composta por 17 pessoas.

A Figura 6 ilustra a Rede 1 com as informações correspondentes. Esta é composta de 6 nós e 8 trechos, os comprimentos variam de 150 m a 330 m e os as tubulações componentes têm diâmetros de 50 mm, 75 mm e 100 mm. Os consumos nos nós variam entre 0, 5 e 1,0 l / s. Na

simulação base realiza observa-se pressões variando entre 19,78 m e 74,51 mca, demonstrando uma variação considerável entre pressões baixas e altas, comuns em sistemas reais encontrados.

Figura 6 - Rede 1



Fonte: autora (2024)

A tabela 1 apresentada trata-se dos resultados da simulação hidráulica da rede 1 de distribuição de água usando o software EPANET 2.0. Considerando os principais pontos da tabela tem-se:

**1- Tabela de Trecho - Nó:** Mostra os segmentos da rede, com informações como:

- **Início e Fim dos Nós:** Conexões entre diferentes pontos.
- **Comprimento e Diâmetro:** Medidas dos trechos (em metros e milímetros).

**2- Resultados nos Nós:** Exibe dados de consumo e pressão em cada ponto da rede:

- **Consumo:** Volume de água utilizado no nó (em L/s).
- **Carga e Pressão:** Nível de água e pressão disponível.

**3- Resultados nos Trechos:** Indica a vazão e a perda de carga em cada trecho:

- **Vazão:** Quantidade de água que flui por trecho (em L/s).
- **Velocidade e Perda de Carga:** Rapidez do fluxo e perda de pressão ao longo do trecho.

As vazões negativas nos trechos 6 e 7 por exemplo, indicam que a direção do fluxo de água é oposta à direção assumida na modelagem original. Isso pode ocorrer devido a mudanças nas condições da rede, como variações de consumo ou pressões em diferentes pontos. O valor negativo no nó 1 indica que este nó é um ponto de entrada de água na rede, como por exemplo, uma estação de bombeamento ou ponto de suprimento, fornecendo água para o restante da rede.

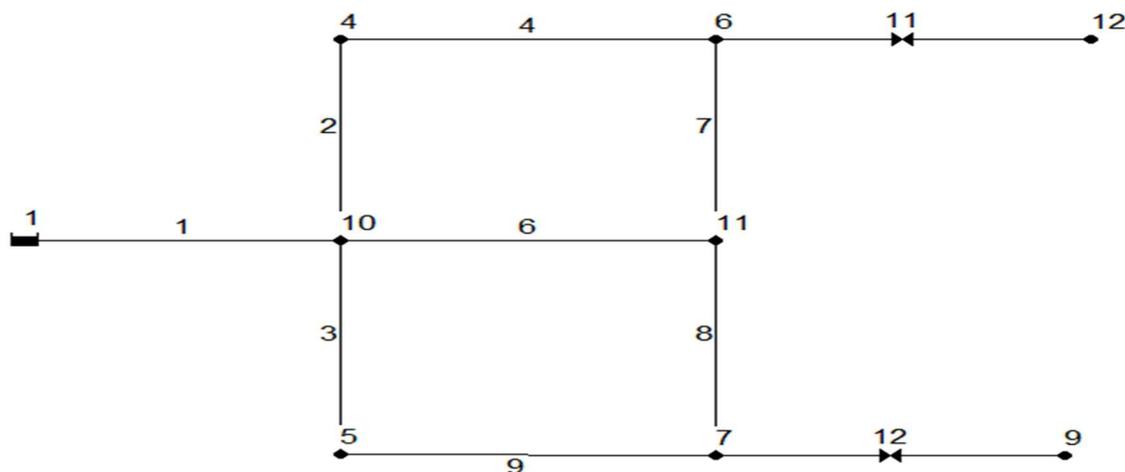
Tabela 1- Simulação Hidráulica da Rede 1

EPANET 2.0 Brasil					
Hidráulica e Qualidade da Água					
Simulação da Rede					
Versão 2.00.11					
Arquivo de Rede: redel.net					
Tabela de Trecho - Nó:					
-----					
Trecho:	Início:	Fim:	Comprimento	Diâmetro	
ID	Nó	Nó	m	mm	
-----					
1	1	6	200	100	
2	6	2	150	100	
3	2	4	220	50	
4	6	3	140	75	
5	3	5	290	50	
6	5	6	330	50	
7	4	5	320	50	
8	6	4	240	50	
Resultados nos Nós:					
-----					
Nó	Consumo	Carga	Hidráulica	Pressão	Qualidade
ID	LPS	m	m		
-----					
2	0.50	999.75	29.75	0.00	
3	0.50	999.70	29.70	0.00	
4	1.00	999.47	59.47	0.00	
5	0.50	999.51	74.51	0.00	
6	0.00	999.78	19.78	0.00	
1	-2.50	1000.00	0.00	0.00	RNF
Resultados nos Trechos:					
Trecho:	Vazão	Velocidade	Perda de Carga	Estado	
ID	LPS	m/s	m/km		
-----					
1	2.50	0.32	1.12	Open	
2	0.93	0.12	0.18	Open	
3	0.43	0.22	1.28	Open	
4	0.80	0.18	0.55	Open	
5	0.30	0.15	0.64	Open	
6	-0.34	0.17	0.79	Open	
7	-0.13	0.07	0.14	Open	
8	0.43	0.22	1.28	Open	

Fonte: autora (2024)

A Figura 7 ilustra a Rede 2 com as informações correspondentes, esta é composta por 9 nós e 10 trechos. Os comprimentos dos trechos variam de 300 m a 400 m, e os diâmetros das tubulações são de 50 mm, 75 mm e 150 mm. Os consumos nos nós variam entre 0,5 e 1,0 L/s. Na simulação base, observa-se pressões variando entre 9,83 m e 40,00 mca, refletindo uma variação significativa, característica de sistemas de abastecimento de água reais.

Figura 7- Rede 2



Fonte: autora (2024)

A tabela 2 apresentada indica os resultados da simulação hidráulica da rede 2, com algumas diferenças em relação à tabela anterior da rede 1. Alguns destaques da tabela:

- **Trechos com Válvulas:** Os trechos 11 e 12 contêm válvulas, identificadas como "Active Válvula". Esses trechos mostram altas perdas de carga (37,44 m/km e 57,97 m/km), indicando que as válvulas estão regulando o fluxo de água, criando maior resistência ao movimento.
- **Valores de Vazão e Consumo:** O nó 1 apresenta um consumo negativo (-5,00 LPS), indicando um ponto de entrada de água na rede, enquanto nos outros nós o consumo é positivo, refletindo saídas de água nos pontos de demanda.
- **Pressões e Cargas Variadas:** A carga e a pressão variam entre os nós, com diferenças notáveis como no nó 12, que apresenta uma pressão de 40,00 metros, sugerindo variações significativas de altura e perda de pressão ao longo da rede.
- **Comprimento Não Aplicável (#N/A):** Trechos 11 e 12 têm o comprimento marcado como "#N/A", o que é típico para trechos controlados por válvulas onde o comprimento não é um parâmetro relevante para a perda de carga.

Essa tabela enfatiza os comportamentos dinâmicos e as condições específicas de operação, como o controle de fluxo através de válvulas e a distribuição das vazões e pressões na rede. Além disso, ela destaca a influência das válvulas na regulação da pressão e da vazão em pontos críticos, o que pode afetar a eficiência e a segurança do sistema de distribuição de água. As variações de carga e pressão observadas sugerem a necessidade de ajustes finos para otimizar o desempenho hidráulico, garantir a estabilidade do fornecimento de água e minimizar perdas ao longo da rede.

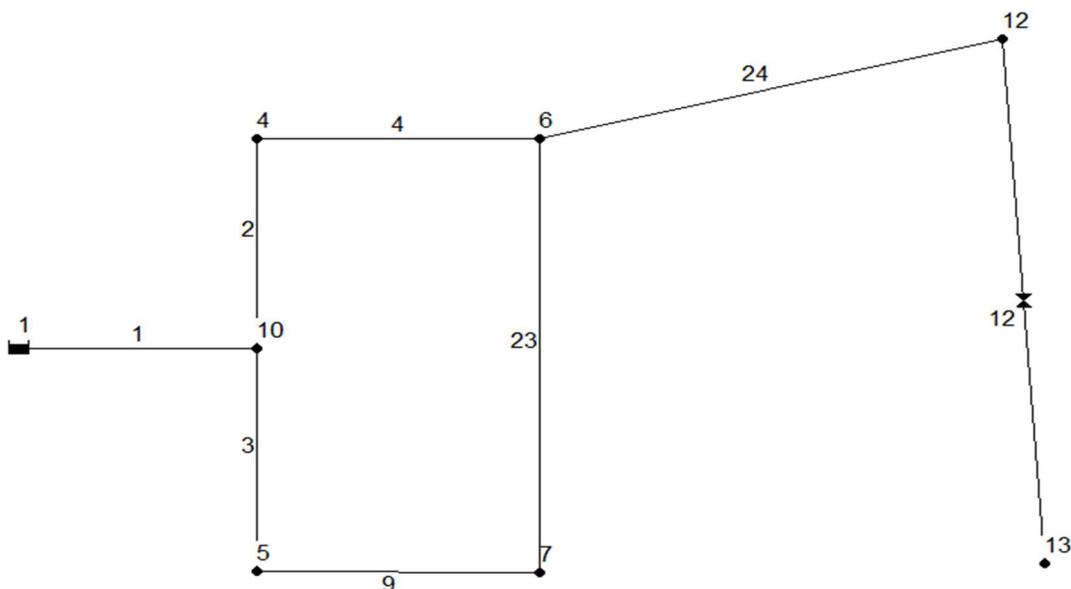
Tabela 2- Simulação Hidráulica da Rede 2

EPANET 2.0 Brasil					
Hidráulica e Qualidade da Água					
Simulação da Rede					
Versão 2.00.11					
Arquivo de Rede: REDE2.NET					
Tabela de Trecho - Nó:					
Trecho:	Início:	Fim:	Comprimento	Diâmetro	
ID	Nó	Nó	m	mm	
-----					
1	1	10	300	150	
2	10	4	400	75	
3	10	5	400	75	
4	4	6	400	50	
6	10	11	400	75	
7	11	6	400	50	
8	11	7	400	50	
9	5	7	400	50	
11	6	12	#N/A	50	Válvula
12	7	9	#N/A	100	Válvula
-----					
Resultados nos Nós:					
-----					
Nó	Consumo	Carga	Hidráulica	Pressão	Qualidade
ID	LPS	m	m		
-----					
4	1.00	998.88	18.88	0.00	
5	1.00	998.46	23.46	0.00	
6	0.50	997.44	27.44	0.00	
7	0.50	997.97	37.97	0.00	
9	0.50	940.00	35.00	0.00	
10	0.00	999.83	9.83	0.00	
11	0.50	998.82	33.82	0.00	
12	1.00	960.00	40.00	0.00	
1	-5.00	1000.00	0.00	0.00	RNF
-----					
Resultados nos Trechos:					
-----					
Trecho:	Vazão	Velocidade	Perda de Carga	Estado	
ID	LPS	m/s	m/km		
-----					
1	5.00	0.28	0.56	Open	
2	1.76	0.40	2.37	Open	
3	1.43	0.32	3.42	Open	
4	0.76	0.39	3.60	Open	
6	1.81	0.41	2.52	Open	
7	0.74	0.38	3.46	Open	
-----					
Resultados nos Trechos: (continuação)					
-----					
Trecho:	Vazão	Velocidade	Perda de Carga	Estado	
ID	LPS	m/s	m/km		
-----					
8	0.57	0.29	2.14	Open	
9	0.43	0.22	1.24	Open	
11	1.00	0.51	37.44	Active	Valvula
12	0.50	0.06	57.97	Active	Valvula

Fonte: autora (2024)

A Figura 8 ilustra a Rede 3 com as informações correspondentes, esta é composta por 8 nós e 8 trechos. Os comprimentos dos trechos variam de 300 m a 1100 m, e os diâmetros das tubulações são de 50 mm, 75 mm e 150 mm. Os consumos nos nós variam entre 0,5 e 1,0 L/s. Na simulação base, observa-se pressões variando entre 9,83 m e 50,00 mca, refletindo uma variação significativa, característica de sistemas de abastecimento de água reais. As perdas de carga ao longo dos trechos e as velocidades também são apresentadas, fornecendo um panorama detalhado do comportamento hidráulico da rede.

Figura 8 - Rede 3



Fonte: autora (2024)

A tabela apresenta os resultados da simulação hidráulica da rede 3 de distribuição de água utilizando o software EPANET 2.0. Este cenário inclui dados de trechos, nós e a presença de uma válvula ativa, que afeta o comportamento hidráulico da rede. Destacando os pontos principais da tabela:

- **Trechos da Rede:** Mostram as conexões entre nós com diferentes diâmetros e comprimentos de tubos. O trecho 12 possui uma válvula, impactando o controle do fluxo de água.
- **Resultados nos Nós:** Indicam o consumo, carga hidráulica e pressão em cada nó. O nó 1 tem um consumo negativo (-4,50 LPS), representando um ponto de entrada de água, enquanto os demais nós apresentam saídas positivas.
- **Resultados nos Trechos:** Mostram a vazão, velocidade do fluxo e perda de carga. Trechos como o 23 têm vazões negativas, indicando fluxo reverso, enquanto o trecho 24 apresenta alta perda de carga, sugerindo resistência ao fluxo.

Tabela 3- Simulação Hidráulica da Rede 3

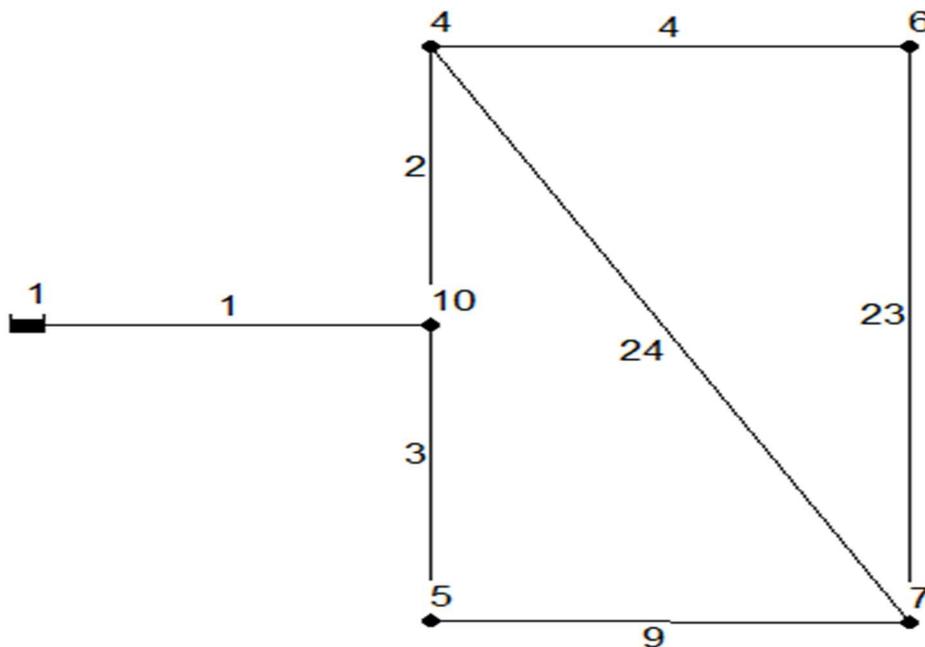
EPANET 2.0 Brasil				
Hidráulica e Qualidade da Água				
Simulação da Rede				
Versão 2.00.11				
Arquivo de Rede: REDE3.net				
Tabela de Trecho - Nó:				
-----				
Trecho:	Início:	Fim:	Comprimento	Diâmetro
ID	Nó	Nó	m	mm
-----				
1	1	10	300	150
2	10	4	400	75
3	10	5	400	75
4	4	6	400	50
9	5	7	400	50
23	6	7	800	50
24	6	12	1100	50
12	12	13	#N/A	50 Válvula
Resultados nos Nós:				
-----				
Nó	Consumo	Carga Hidráulica	Pressão	Qualidade
ID	LPS	m	m	
-----				
4	1.00	998.18	18.18	0.00
5	1.00	998.53	23.53	0.00
6	0.50	993.73	23.73	0.00
7	0.50	995.63	35.63	0.00
10	0.00	999.86	9.86	0.00
12	0.50	964.02	44.02	0.00
13	1.00	940.00	50.00	0.00
1	-4.50	1000.00	0.00	0.00 RNF
Resultados nos Trechos:				
-----				
Trecho:	Vazão	Velocidade	Perda de Carga	Estado
ID	LPS	m/s	m/km	
-----				
1	4.50	0.25	0.46	Open
2	2.39	0.54	4.20	Open
3	2.11	0.48	3.32	Open
4	1.39	0.71	11.12	Open
9	1.11	0.56	7.25	Open
23	-0.61	0.31	2.38	Open
24	1.50	0.76	27.01	Open
12	1.00	0.51	24.02	Active Válvula

Fonte: autora (2024)

A Figura 9 ilustra a Rede 4 com as informações correspondentes, esta é composta por 7 trechos e 6 nós. Os comprimentos dos trechos variam de 300 m a 1000 m, enquanto os diâmetros das tubulações são de 50 mm, 75 mm, 100 mm e 150 mm. A seguir, é apresentado um resumo das

informações e resultados obtidos na simulação da rede. Na simulação base, os consumos nos nós variam entre 0,5 e 1,0 L/s. As pressões variam entre 9,93 m e 39,02 mca, refletindo uma variação significativa, característica de sistemas de abastecimento de água reais. As perdas de carga ao longo dos trechos e as velocidades também são apresentadas, fornecendo um panorama detalhado do comportamento hidráulico da rede.

Figura 9 - Rede 4



Fonte: autora (2024)

A tabela 4 apresenta os resultados da simulação hidráulica da rede 4 do sistema de abastecimento de água. Revela uma rede de distribuição com pontos de entrada e saída de água bem definidos. As diferenças de carga e vazão entre os trechos refletem variações na demanda e nas características físicas das tubulações. A presença de um fluxo reverso em um dos trechos (23) indica uma possível inversão de direção do fluxo, o que pode ser relevante para o controle operacional.

Destacando-se as características dos trechos, os comportamentos nos nós e o desempenho geral da rede.

### 1- Trechos da Rede:

- A rede é composta por diferentes trechos que conectam nós, variando em comprimento (300 a 1000 metros) e diâmetro (50 a 150 mm).
- O trecho 24 possui o maior diâmetro (100 mm) e comprimento (1000 m), o que pode indicar sua importância para o fluxo principal na rede.
- Os trechos apresentam diferentes características de comprimento e diâmetro, impactando diretamente a perda de carga e o fluxo de água.

## 2- Resultados nos Nós:

### Consumo de Água:

- Nó 1 apresenta um consumo negativo (-3,00 LPS), indicando que é um ponto de entrada de água na rede (como uma estação de bombeamento).
- Outros nós (4, 5, 6, 7) apresentam consumo positivo, indicando pontos de demanda de água na rede.

## 3- Carga Hidráulica e Pressão:

- A carga hidráulica varia ligeiramente entre os nós, mostrando como a altura da água afeta a distribuição de pressão. Por exemplo, o nó 7 tem a maior pressão (39,02 m), enquanto o nó 10 tem uma pressão mais baixa (9,93 m), sugerindo diferentes níveis de elevação ou consumo de água ao longo da rede.

## 4- Resultados nos Trechos:

### Vazão (LPS) e Velocidade (m/s):

- A vazão varia entre os trechos, de -0,19 LPS no trecho 23 (indicando fluxo reverso) até 3,00 LPS no trecho 1, sugerindo variações de demanda e fluxo na rede.
- A velocidade do fluxo também varia, com a maior velocidade observada no trecho 2 (0,37 m/s), o que pode indicar uma tubulação de menor diâmetro e maior vazão.

## 5- Perda de Carga (m/km):

- A perda de carga varia significativamente, de 0,06 m/km no trecho 24 a 2,12 m/km no trecho 2. Menores perdas de carga indicam uma melhor eficiência hidráulica ou menos resistência ao fluxo, enquanto maiores perdas de carga sugerem maior fricção ou resistência ao movimento da água.

## 6- Estado dos Trechos:

- Todos os trechos estão abertos ("Open"), indicando que não há obstruções ou controle de válvulas interferindo no fluxo.

A tabela revela uma rede de distribuição com pontos de entrada e saída de água bem definidos. As diferenças de carga e vazão entre os trechos refletem variações na demanda e nas características físicas das tubulações. A presença de um fluxo reverso em um dos trechos (23) indica uma possível inversão de direção do fluxo, o que pode ser relevante para o controle operacional.

Tabela 4- Simulação Hidráulica da Rede 4

EPANET 2.0 Brasil					
Hidráulica e Qualidade da Água					
Simulação da Rede					
Versão 2.00.11					
Arquivo de Rede: REDE4.net					
Tabela de Trecho - Nó:					
-----					
Trecho:	Início:	Fim:	Comprimento	Diâmetro	
ID	Nó	Nó	m	mm	
-----					
1	1	10	300	150	
2	10	4	400	75	
3	10	5	400	75	
4	4	6	400	50	
9	5	7	400	50	
23	6	7	800	50	
24	4	7	1000	100	
Resultados nos Nós:					
-----					
Nó	Consumo	Carga Hidráulica	Pressão	Qualidade	
ID	LPS	m	m		
-----					
4	1.00	999.08	19.08	0.00	
5	1.00	999.36	24.36	0.00	
6	0.50	998.81	28.81	0.00	
7	0.50	999.02	39.02	0.00	
10	0.00	999.93	9.93	0.00	
1	-3.00	1000.00	0.00	0.00 RNF	
Resultados nos Trechos:					
-----					
Trecho:	Vazão	Velocidade	Perda de Carga	Estado	
ID	LPS	m/s	m/km		
-----					
1	3.00	0.17	0.22	Open	
2	1.66	0.37	2.12	Open	
3	1.34	0.30	1.44	Open	
4	0.31	0.16	0.70	Open	
9	0.34	0.18	0.83	Open	
23	-0.19	0.10	0.27	Open	
24	0.34	0.04	0.06	Open	

Fonte: autora (2024)

Em síntese o esquema simulou estes sistemas de abastecimento de água com todos os elementos envolvidos como em um esquema real de abastecimento de água, com suas complexidades. A localização estratégica das bombas pressurizadoras, reservatórios e redes de distribuição desempenham um papel fundamental na garantia do abastecimento de água potável a diferentes comunidades. Uma análise detalhada desses componentes permitirá identificar possíveis perdas de água nas redes de distribuição, as consequências dessas perdas, no caso o trabalho em questão considera os custos embutidos nessas perdas.

Considerando os passos gerais mencionados na etapa 2 para aplicação nesse sistema benchmark de rede de abastecimento será levado em conta diversos fatores que serão os principais passos para os cálculos de custos de perdas de água:

- **Identificação das perdas de água:** identificar e quantificar as perdas de água em cada rede de abastecimento, detectando vazamentos, entre outras fontes de perda.
- **Classificação das perdas: reais ou aparentes**
- **Volume de água perdida:** calcular o volume ( $m^3$ ) de água perdida em cada rede, esse volume perdido pode ser obtido através de medições de fluxo e pressão.

### **Etapa 3: Cálculo de custos de perdas no sistema base**

A partir dos custos calculados, foram determinados os valores aplicáveis ao sistema de abastecimento de água proposto. Utilizando-se a modelagem matemática, foram desenvolvidos cálculos específicos para estimar os custos das perdas no sistema base, permitindo uma compreensão mais abrangente dos fatores que impactam o abastecimento de água e sua contribuição para os custos gerais do sistema. Essa abordagem empregou dados sobre variáveis como uso de água, custos de manutenção da infraestrutura, consumo de energia e despesas de tratamento, de modo a identificar as soluções mais econômicas para mitigar as perdas no sistema.

Ao quantificar os custos de desperdício no sistema, estratégias eficazes podem ser desenvolvidas para reduzir perdas e minimizar despesas. Benedito (2019), em seu trabalho, considerou que a estrutura de custos proposta divide os custos associados às perdas de água em fixos e variáveis. Os custos fixos estão ligados à estrutura da concessionária (custos estruturais), enquanto os custos que dependem do volume produzido de água são tratados como variáveis. Esse método assume que os custos são linearmente proporcionais ao volume produzido para efeitos de simplificação do problema. No entanto, na realidade, existem vários fatores que afetam o abastecimento de água e levam a perdas no sistema. Alguns desses fatores incluem a idade e condição da tubulação, a pressão da água e a frequência de detecção de vazamentos. Ao desenvolver um modelo matemático baseado nesses fatores, foi possível determinar uma estimativa de custo mais precisa das perdas no sistema.

Para quantificar os custos envolvidos nas perdas de água no sistema de abastecimento, é crucial iniciar a análise com uma série de cálculos preliminares que servirão como pressuposto para a estimativa posterior dos custos. Cálculos como capacidade dos reservatórios, potência das bombas, taxa de vazamento, custo médio da água e custos de energia são alguns dos principais fatores que devem ser considerados.

Segundo Cabrera e outros (2013), a proposta de estrutura de custos divide os conceitos exigidos em custos fixos e custos variáveis como a única maneira de determinar o valor econômico das perdas

de água. Cabrera também esclarece que os custos fixos estão diretamente relacionados à praticidade da entrega, sendo também conhecidos como custos estruturais. Por outro lado, os custos que dependem do volume de produção de água são denominados custos variáveis. Este trabalho considera que a variação de custos é proporcional ao produto produzido, implicando que as variações de custos aumentam ou diminuem em consonância com a quantidade de água produzida.

- **Custo de sistema de Operação e Manutenção no Sistema de abastecimento de água**

Segundo dados da ARSAE (Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais), os custos operacionais são os dispêndios realizados pelo prestador com as atividades de operação e manutenção dos sistemas de água e esgoto, assim como atividades comerciais e administrativas. Estes tipos de custos incluem os gastos com energia elétrica, material de tratamento, combustíveis, pessoal, serviços terceirizados, comercialização, dentre outros itens rotineiros necessários à prestação dos serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário

Benedito (2019) Esses custos são parte integrante dos custos operacionais associados à operação e manutenção do sistema e inclui os seguintes componentes: Despesas de Manutenção: Isso inclui os custos associados à manutenção preventiva e corretiva das instalações, equipamentos e infraestrutura do sistema. Esses custos podem incluir mão de obra, peças de reposição, serviços de terceiros, e assim por diante. Despesas Administrativas: Isso engloba os custos relacionados à gestão e administração do sistema. Pode incluir despesas de pessoal administrativo, custos de escritório, software de gerenciamento, despesas de treinamento de pessoal, entre outros. O Cálculo das despesas de operação e manutenção pode ser feito pela soma dos valores totais referente aos gastos de com despesas de manutenção e despesas administrativas.

- **C1- Custo de operação do SAA:** Para calcular o custo operacional do fornecimento da água, levou-se em conta o volume diário de água consumido por pessoa por dia, em seguida o volume total consumido pelos 22000 habitantes, sendo 4000 habitantes relativos a rede 1, 6000 habitantes para a rede 2, 7000 habitantes para a rede 3 e 5000 habitantes para a rede 4. Foi adotado o consumo médio de água no país é de 250 litros por habitante ao dia.

A Tabela 5 resume os dados de consumo diário de água das quatro redes de água em questão, juntamente com os custos associados à operação de um sistema de abastecimento de água para uma população de 22.000 habitantes. Destaca-se o consumo diário total de 5.500.000 litros, os custos unitários por litro de água, o custo inicial e o custo final diário da operação do sistema. Esses dados são essenciais para a análise dos custos operacionais do sistema, que incluem o cálculo do custo unitário por litro de água, o custo inicial e o custo final diário da operação. A fonte desses dados é

o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), e essa informação deve ser destacada claramente no texto para garantir a transparência e a credibilidade dos resultados apresentados.

Tabela 5- Custo de operação considerando o total de pessoas atendidas

<b>CUSTO 01- CUSTO DIÁRIO DA OPERAÇÃO</b>	
<b>TOTAL DE HABITANTES= 22000</b>	<b>Valores</b>
CONSUMO DIÁRIO R1	1.000.000 litros
CONSUMO DIÁRIO R2	1.500.000 litros
CONSUMO DIÁRIO R3	1.750.000 litros
CONSUMO DIÁRIO R4	1.250.000 litros
<b>CONSUMO DIÁRIO TOTAL</b>	<b>5.500.000 litros</b>
CUSTO/L	R\$0,00398
CUSTO/INICIAL	R\$21.890,00
CUSTOAPÓSAJUSTE	R\$4.378,00
CUSTOFINALDIÁRIO	R\$437,80

Fonte: própria autora baseado em dados do SNIS

- **C2- Custo de Infraestrutura**

A Tabela 6 apresenta uma análise detalhada dos custos associados à construção da rede de distribuição de água, com foco nos custos das tubulações de diferentes diâmetros para as quatro redes distintas (REDE1, REDE2, REDE3 e REDE4) em estudo. Com o preço/m das tubulações considerando seus diâmetros foi possível calcular o investimento total em tubulações nesse sistema de abastecimento. Considerando uma variação de 10% para mais ou para menos, valores que representam possíveis ajustes de custo durante a construção da infraestrutura. Os preços e códigos dos materiais foram estimados com base na tabela do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) de julho de 2023.

Tabela 6 - Custo associado à construção da rede de distribuição (tubulações)

<b>CUSTO 02 - CUSTO DA INFRAESTRUTURA - C2</b>							
<b>CUSTO DAS TUBULAÇÕES</b>							
<b>CUSTOTUB50mm= R\$ 14.15/m</b>							
<b>CUSTOTUB75mm= R\$45.32/m</b>							
<b>CUSTOTUB100mm = R\$89.48/m</b>							
<b>CUSTTUB150= R\$140.48/m</b>							
<b>REDE 1</b>							
<b>COMPRIMENTO TOTAL POR DIAMETRO (TRECHOS)</b>							<b>CUSTO TUBULAÇÕES</b>
50mm	220	290	330	320	240	1400	R\$19.810,00
75mm	140					140	R\$6.344,80
100mm	200	150				350	R\$31.318,00
<b>REDE 2</b>							
<b>COMPRIMENTO TOTAL POR DIAMETRO</b>							<b>CUSTO TUBULAÇÕES</b>
50mm	400	400	400	400		1600	R\$22.640,00
75mm	400	400	400			1200	R\$50.820,00
150mm	300					300	R\$42.144,00
<b>REDE 3</b>							
<b>COMPRIMENTO TOTAL POR DIAMETRO</b>							<b>CUSTO TUBULAÇÕES</b>
50mm	400	400	800	1100		2700	R\$38.205,00
75mm	400	400				800	R\$36.256,00
150mm	300					300	R\$42.144,00
<b>REDE 4</b>							
<b>COMPRIMENTO TOTAL POR DIAMETRO</b>							<b>CUSTO TUBULAÇÕES</b>
50mm	400	400	800			1600	R\$22.640,00
75mm	400	400				800	R\$36.256,00
100mm	1000					1000	R\$89.480,00
150	300					300	R\$42.144,00
<b>CUSTO TOTAL DAS TUBULAÇÕES</b>							<b>R\$480.201,80</b>
Porcentagem de variação até 10%				Valor máximo da variação			Valor mínimo da variação
R\$48.020,18				R\$528.221,98			R\$432.181,62

Fonte: Própria autora (2024)

A Tabela 7 detalha os custos associados à instalação de válvulas redutoras de pressão nas redes de distribuição de água. Os preços das válvulas variam de acordo com o diâmetro das válvulas. As redes 1 e 4 não possuem válvulas redutoras de pressão, o que não gera custo relacionado. Considerou-se uma variação de preço de 30% para mais ou para menos.

Tabela 7- Custo associado à válvula redutora de pressão

<b>CUSTO 02 - CUSTO DA INFRAESTRUTURA - C2</b>			
<b>CUSTO DAS VALVULAS REDUTORA DE PRESSAO</b>			
<b>Válvula de 50mm</b>		R\$4.761,00	
<b>Válvula de 75mm</b>		R\$5.600,00	
<b>Válvula 100mm</b>		R\$9.600,00	
<b>Válvula de 150mm</b>		R\$16.980,00	
<b>REDE 1</b>	NÃO TEM VALVULA	<b>CUSTO REDE 1</b>	R\$0
<b>REDE 2</b>	1 VALVULA DE 50mm	<b>CUSTO REDE 2</b>	R\$4.761,00
	1 VALVULA DE 100 mm		R\$9.600,00
<b>REDE 3</b>	1 VALVULA DE 50 MM	<b>CUSTO REDE 3</b>	R\$4.761,00
<b>REDE 4</b>	NÃO TEM VALVULA	<b>CUSTO REDE 4</b>	R\$0
		<b>CUSTO TOTAL: R\$19.122,00</b>	
Porcentagem de variação até 30%	Valor máximo da variação	Valor mínimo da variação	
R\$5.736,60	R\$5.736,60	R\$13.385,40	

Fonte: própria autora (2024)

A Tabela 8 detalha os custos das bombas utilizadas no sistema de abastecimento de água, detalhando o custo de cada bomba em diferentes capacidades (15CV, 20CV, 25CV e 30CV) considerando uma variação de custo de até 30%.

Tabela 8- Custo das bombas utilizadas no sistema de estudo

<b>CUSTO 02 - CUSTO DA INFRAESTRUTURA - C2</b>		
<b>CUSTO DAS BOMBAS</b>		
<b>BOMBA 15CV</b>		R\$9.600,00
<b>BOMBA 20CV</b>		R\$15.600,00
<b>BOMBA 25CV</b>		R\$17.000,00
<b>BOMBA 30CV</b>		R\$30.000,00
<b>CUSTO TOTAL DAS BOMBAS</b>		R\$72.200,00
Porcentagem de variação até 30%	Valor máximo da variação	Valor mínimo da variação
R\$21.660,00	R\$72.200,00	R\$50.540,00

Fonte: autora (2024)

A Tabela 9, intitulada detalha os custos dos reservatórios conforme a capacidade de armazenamento em litros. Essa tabela oferece uma visão detalhada dos custos associados à infraestrutura de armazenamento de água, permitindo uma análise precisa dos investimentos necessários para garantir uma capacidade de armazenamento adequada no sistema de abastecimento de água

Tabela 9- Custo dos reservatórios no sistema de estudo

<b>CUSTO 02 - CUSTO DA INFRAESTRUTURA - C2</b>		
<b>CUSTO DO RESERVATORIO POR LITRO</b>		
<b>VOLUME RESERVATÓRIOS</b>		<b>CUSTO POR REDE</b>
RESERVATÓRIO REDE 1	1.000.000 L	R\$205.000,00
RESERVATÓRIO REDE 1	1.500.000 L	R\$307.500,00
RESERVATÓRIO REDE 1	1.750.000 L	R\$358.750,00
RESERVATÓRIO REDE 1	1.250.000 L	R\$256.250,00
<b>CUSTO TOTAL:</b>		<b>R\$1.127.500,00</b>

Fonte: autora (2024)

A Tabela 10, resume os custos totais de diferentes componentes da infraestrutura do sistema. Esta tabela fornece uma visão consolidada dos custos totais associados à infraestrutura do sistema de abastecimento de água, permitindo uma compreensão clara dos investimentos necessários para implementar e manter a infraestrutura adequada.

Tabela 10- Somatório de custos de Infraestrutura

<b>C2 - CUSTOS TOTAIS</b>	
TUBULAÇÃO	R\$480.201,80
VALVULA	R\$19.122,00
BOMBA	R\$72.200,00
RESERVATÓRIO	R\$1.127.500,00
<b>TOTAL:</b>	<b>R\$1.699.023,80</b>

Fonte: autora (2024)

Pelo estudo de Cabrera et al., (2013) este enfatiza a importância de calcular o custo anual de amortização das infraestruturas (C31) com base no valor inicial estimado da vida útil dos ativos. Ele destaca que, se a vida útil real das instalações se estender além do previsto inicialmente, a estimativa de depreciação anual excederá a depreciação real. Por outro lado, se a vida útil real for mais curta do que o esperado, a situação será inversa. A implicação central dessa afirmação é que a manutenção adequada desempenha um papel crítico na gestão de ativos de infraestrutura. Quando a manutenção é realizada de maneira eficaz e prolonga a vida útil dos ativos, ela tende a reduzir os custos a longo prazo, já que a depreciação anual é distribuída ao longo de um período mais longo. Por outro lado,

a falta de manutenção necessária aumenta os custos, uma vez que a vida útil real dos ativos será encurtada, resultando em depreciação mais rápida. Portanto, a citação destaca a importância de um planejamento adequado de manutenção e gestão de ativos para garantir a eficiência operacional e econômica das infraestruturas ao longo do tempo.

- **C3- Custo da água em seu estado natural**

Segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a cobrança pelo uso da água, conforme estabelecido pela Lei nº 9.433/97 da Política Nacional de Recursos Hídricos, desempenha um papel crucial na gestão sustentável dos recursos hídricos no Brasil. Essa cobrança não é equivalente a uma tarifa ou imposto aplicado por distribuidoras de água urbanas; em vez disso, ela representa uma remuneração pelo uso de um bem público — a água em seu estado natural — e não se relaciona diretamente à regulação das tarifas de serviços de saneamento básico aplicadas nas residências.

No contexto deste estudo, pode-se considerar que o custo da água em seu estado natural é, inicialmente, zero para a companhia de abastecimento. No entanto, os custos começam a ser gerados a partir do momento em que a água é captada nas bacias hidrográficas e entra na cadeia de tratamento e distribuição. Na formulação deste modelo de custos, assume-se que a água, enquanto recurso natural, tem um custo inicial nulo. Portanto, apenas os custos decorrentes do tratamento, distribuição e outros processos subsequentes são contabilizados. Essa abordagem destaca que a análise de custos focada nas etapas operacionais visa proporcionar uma estimativa mais precisa dos custos diretamente controláveis pela companhia de abastecimento, sem confundir com taxas que representam políticas públicas de gestão de recursos hídricos.

- **C4- Custo da produção da água**

Para Botelho (2014), o consumo de reagentes durante o tratamento da água nas ETA é de acordo com o volume e quantidade de água recolhida. Desta forma, os encargos que correspondem à parcela dos reagentes diz respeito aos custos variáveis, pois varia consoante o tipo de reagentes a utilizar. Estes custos podem ser calculados com base nas variáveis de produção de água em diferentes processos da produção de água tratada.

A Tabela 11 apresenta uma análise detalhada dos custos associados ao processo de tratamento químico da água nas quatro redes de distribuição (R1, R2, R3 e R4). O cálculo do custo diário de produção da água considera um valor base de R\$ 0,00409 por litro, a variação adotada foi de 20%. Os resultados mostram que o custo diário do tratamento químico varia conforme o volume de água tratada. Com base nos custos diários, é possível verificar custos anuais.

Tabela 11- Custo de produção da água no processo de tratamento químico

Rede	Volume Diário(L)	RAND	Custo/Litro	Custo Prod. Água	Custo Total/dia
R1	1.000.000	0,2	0,00409	0,004908	R\$4.908,00
R2	1.500.000	0,2	0,00409	0,004908	R\$7.362,00
R3	1.750.000	0,2	0,00409	0,004908	R\$8.589,00
R4	1.250.000	0,2	0,00409	0,004908	R\$6.135,00

Fonte: própria autora com base em dados do SNIS (2021)

A Tabela 12 apresenta uma análise detalhada dos custos de produção da água por diferentes elementos de despesa ao longo de 25 anos para as quatro redes de distribuição (R1, R2, R3 e R4). Os custos estão segmentados em várias categorias: apoio administrativo, técnico e operacional (2,02%), energia (22,10%), materiais de consumo (7,49%), manutenção de equipamentos (0,95%), serviços terceirizados (61,53%) e outros custos gerais (5,90%). Estes custos foram adaptados de Araujo et al. (2019) e refletem a estrutura de despesas necessária para a operação sustentável do sistema de tratamento de água.

Tabela 12- Custo de produção da água por elementos de despesa

DESCRIÇÃO CUSTOS R1,R2,R3 e R4	PORCENTAGEM
Custos de Apoio Administrativo, Técnico e Operacional	2,02%
Custos de Energia no Tratamento de Água	22,10%
Custos de Material de Consumo no Tratamento de Água	7,49%
Custos de Manutenção de Equipamentos no Tratamento de Água	0,95%
Custos de Serviços Terceirizados no Tratamento de Água	61,53%
Custos Gerais e Outros Custos	5,90%

Fonte: própria autora adaptada de Araujo (2019)

#### • C5- Custos energéticos

Bouzon e Taboada Rodriguez (2013), destacam que o custo operacional de um sistema de distribuição de água está essencialmente relacionado ao consumo de energia elétrica, medido em quilowatts-hora (kWh), durante o período de faturamento. Nesse contexto, o tarifário adotado pela gestão de energia elétrica é o horário sazonal verde, o qual apresenta duas faixas de preços que variam de acordo com a hora do dia. A otimização dos custos energéticos associados ao funcionamento das bombas é o principal objetivo deste estudo. Para alcançar essa otimização, a variável de decisão escolhida é aquela que influencia diretamente o custo de energia elétrica. Nesse sentido, a variável escolhida é o tempo de operação de cada bomba ao longo de um dia, que

determina o consumo de kWh. É importante ressaltar que, no contexto deste estudo, a potência das bombas é considerada fixa, ou seja, elas estão desligadas (sem consumo) ou ligadas (consumindo energia) a uma taxa constante. A Tabela 13 apresenta os valores de cada rede de distribuição de água em relação ao desnível, à vazão e à potência da bomba, considerando um rendimento de 85% para os cálculos. O custo de energia elétrica utilizado é de R\$ 0,85 por kWh, que corresponde à tarifa comercial/industrial fornecida pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). Essa tarifa foi verificada por meio de dados obtidos na plataforma NGSOLAR, uma fonte reconhecida por fornecer informações atualizadas sobre tarifas de energia elétrica e soluções de energia solar. A NGSOLAR utiliza dados oficiais de concessionárias de energia, como a CPFL, para oferecer uma referência precisa e confiável sobre os custos de energia elétrica em diferentes modalidades tarifárias.

Tabela 13- Custos de energia

Rede	Desnível(m)	Vazão(L/s)	Potência da Bomba (Kwh)	Eficiência da bomba	Consumo de energia (KWh)
R1	82,5	11,57	14,96	85%	38,37
R2	80,2	17,36	21,83	85%	38,38
R3	90,2	20,25	28,64	85%	38,38
R4	75,2	14,46	17,05	85%	38,38
				<b>TOTAL:</b>	<b>153,52</b>

Fonte: própria autora

Esta tabela fornece informações detalhadas sobre os custos energéticos de cada rede, incluindo o desnível, a vazão, a potência da bomba, a eficiência da bomba, o consumo de energia e o custo total de energia.

#### • C6- Custos ambientais

O Custo Ambiental associado à emissão de gases do efeito estufa por volume de vazamento (C44) foi calculado com base na análise do ciclo de vida realizada por Silva (2019), com o auxílio do *software WEST Web*. Segundo essa análise da autora citada, a emissão de CO<sub>2</sub> equivalente resultante da perda de água na rede de distribuição é de 0,000187 toneladas por metro cúbico de água produzida. Além disso, para estimar o custo econômico associado a essas emissões, foi utilizado o preço do Crédito de Carbono Futuro em 30/08/2023, que era de R\$ 96,00. Portanto, o valor de C44 pode ser calculado multiplicando a emissão de CO<sub>2</sub> equivalente por metro cúbico de água produzida pelo preço do Crédito de Carbono Futuro. A Tabela 14 apresenta os custos associados aos créditos de carbono e à tarifa de água para o Sistema de Abastecimento de Água (SAA), com base na análise do ciclo de vida realizada por Silva (2019).

Tabela 14- Custos dos créditos de carbono

DESCRIÇÃO	UNIDADE	VALOR
Emissão de CO2	toneladas/ m <sup>3</sup>	0,000187 toneladas/m <sup>3</sup>
Preço do Crédito de Carbono Futuro	R\$/tonelada	R\$ 96,00/tonelada
Custo das emissões (C44)	R\$/m <sup>3</sup>	R\$ 18.432/m <sup>3</sup> =18,43
Custo da tarifa de água	R\$/m <sup>3</sup>	R\$ 3,98/m <sup>3</sup> =0,00398
<b>Custo total por m<sup>3</sup>de água bombeada:</b>		<b>R\$22,41</b>

Fonte: adaptada de SILVA, (2019)

De acordo com Benedito (2019), os custos fixos econômicos e ambientais relacionados aos impactos ambientais da construção das infraestruturas podem ser calculados com base no custo ambiental associado à emissão de CO<sub>2</sub> gerado durante a construção da rede de distribuição. Para estimar a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida, foi utilizada a ferramenta online *EIO-LCA (Environmental Input-Output Life-Cycle Assessment)*, que é um método para calcular os materiais, recursos energéticos necessários e as emissões ambientais resultantes de atividades econômicas. A avaliação do custo econômico vinculado à emissão de CO<sub>2</sub> envolve a utilização do preço do crédito de carbono futuro necessário para compensar as emissões.

No entanto, a estimativa específica de emissões adotada neste estudo considerou o valor de 0,000187 t/m<sup>3</sup>, conforme originalmente estimado por Silva (2019). Esse valor foi assumido com base na metodologia descrita por Silva, que se refere a uma média de emissões associadas ao processo de construção de infraestruturas de distribuição de água. Assim, a estimativa utilizada reflete um dado previamente calculado e validado por literatura relevante, garantindo coerência e respaldo científico à análise de custos ambientais.

- **C7- Custos de pessoal- recursos humanos e administrativo**

A Tabela 15 apresenta a distribuição de funcionários por capacidade de produção mensal de água. Com base na experiência do orientador deste estudo o critério utilizado foi a alocação de 01 funcionário para cada 9705 m<sup>3</sup> de água produzida por mês. Adicionalmente, foi considerado um custo estimado de 3500 unidades monetárias por pessoa.

Tabela 15- Custos de pessoal

Rede	Habitantes	Nº de Funcionários Necessários
1	4000	3
2	6000	5
3	7000	6
4	5000	3
<b>Total:</b>	<b>22000</b>	<b>17</b>

Fonte própria autora (2024)

- **C8- Custo de veículos**

A Tabela 16 resume os custos mensais associados à operação de veículos. São considerados 10 veículos para cada tipo de custo: seguro, combustível e manutenção. O custo mensal por veículo para seguro é de R\$ 300,00, para combustível é de R\$ 1.200,00 e para manutenção é de R\$ 200,00. O custo total mensal estimado para todos os veículos é de R\$ 17.000,00. Esses valores foram definidos com base na experiência do orientador deste trabalho.

Tabela 16- Custos de veículos

Descrição	Número de Veículos	Custo Mensal por Veículo (R\$)
Seguro	10	R\$300,00
Combustível	10	R\$1.200,00
Manutenção	10	R\$200,00
<b>Total:</b>		<b>R\$17.000,00</b>

Fonte: autora (2024)

- **C9- Custo de depreciação**

A depreciação dos componentes de um sistema de abastecimento de água, como tubos, válvulas, bombas, reservatórios e veículos, é um fator crucial na avaliação dos custos operacionais, pois representa a perda de valor desses ativos ao longo do tempo devido ao uso, desgaste e envelhecimento. Esses custos de depreciação são importantes para garantir que os recursos necessários para a substituição e manutenção dos equipamentos estejam devidamente planejados e alocados ao longo da vida útil do sistema. Esses custos de depreciação podem ser calculados utilizando a equação (1):

$$C9 = CDEPTUBO + CDEPVALV + CDEPBOMB + CDEPRES + CDEVEI$$

onde:

- **CDEPTUBO** representa o custo de depreciação dos tubos;
- **CDEPVALV** representa o custo de depreciação das válvulas;
- **CDEPBOMB** representa o custo de depreciação das bombas;
- **CDEPRES** representa o custo de depreciação dos reservatórios;
- **CDEVEI** representa o custo de depreciação dos veículos.

A depreciação é geralmente calculada usando métodos como a depreciação linear, que assume que o valor do ativo diminui de maneira uniforme ao longo do tempo, ou métodos baseados na intensidade de uso ou eficiência decrescente do ativo. A consideração desses custos na análise operacional é essencial para a gestão financeira e a sustentabilidade do sistema de abastecimento de água, permitindo um planejamento adequado para a reposição de ativos ao final de sua vida útil.

#### **Etapa 4: Treinamento de softwares e definição de cenários para simulação**

Durante as etapas de treinamento de software e definição de cenários para simulação foram utilizadas algumas ferramentas computacionais para a simulação hidráulica e proposição de redes de distribuição água. Para esta finalidade utilizou-se o EPANET que se trata do software de simulação hidráulica mais utilizado no mundo para esta finalidade. O EPANET também possui uma extensão chamada Toolkit, que corresponde a uma biblioteca de vínculo dinâmico (DLL) de funções. Essa ferramenta possibilita a customização e o aprimoramento do motor computacional do EPANET conforme as necessidades de simulação do programador. Além disso, ela pode ser associada a programas escritos em linguagem C/C++, Delphi Pascal, Visual Basic ou outras linguagens que possam chamar as funções do arquivo DLL Costa e Frota (2018) apud Marques (2023). Segundo Araujo et al. (2020), para a simulação de rede, alguns dados de entrada são necessários, como o traçado da rede, a posição dos trechos e a cota dos nós que a representam, o consumo base, o diâmetro das tubulações e informações dos reservatórios, como cota e nível de água. Para desenvolvimento da rotina computacional realizou-se o estudo de diversas linguagens computacionais entre elas: Python e R, além de outras linguagens clássicas para esta finalidade. Embora o registro das linguagens consideradas seja relevante, a linguagem efetivamente empregada para a implementação e condução das simulações foi o Python, devido à sua acessibilidade, versatilidade e ampla disponibilidade de bibliotecas específicas para análise e visualização de dados. Outros recursos de software também foram utilizados para definir os cenários de simulação, levando em conta diferentes fatores para a análise de dados... A construção de rotina computacional foi extremamente útil pela complexidade dos componentes das redes de distribuição de água da composição dos custos envolvidos. Além disso, a rotina computacional foi usada para calcular os custos associados a vazamentos, permitindo o gerenciamento da água sobre alocação de recursos e contenção de custos. Levando em consideração essas utilidades alguns cenários podem ser modelados como análise de demanda no fornecimento de água, análise de infraestrutura nesse fornecimento, onde é possível criar modelos que prevejam possíveis falhas em equipamentos, vazamentos etc., análise de rotas entre outros (SILVA, 2023)

#### **Etapa 5: Modelagem matemática dos sistemas construídos e desenvolvimento de rotina computacional para simulação de cenários visando análise de custos de perdas de água**

Com a proposição das 4 redes de distribuição de água, foi necessário fazer a modelagem matemática destes sistemas. Esta foi feita tentando compreender e reproduzir as situações reais encontradas em campo em termos por exemplo de topografia, materiais, idade das tubulações e perfis de pressão e vazão.

A rotina computacional foi construída com o objetivo de calcular os diversos custos influenciados por parâmetros específicos de cada componente. O detalhamento dessa rotina será apresentado nos resultados e foi desenvolvida com as seguintes etapas:

- a) Entrada de informações das 4 redes de distribuição de água propostas, considerando principalmente para a composição dos custos: comprimentos, diâmetros, rugosidades, idades da tubulação, existência de bombas, válvulas e demais acessórios hidráulicos;
- b) Foi considerado uma população total de 22000 habitantes e um consumo de água de 250 litros por habitante por dia;
- c) Foram compostos e caracterizados todos os 9 custos envolvidos:
  - Custo 1- Operação
  - Custo 2- Infraestrutura
  - Custo 3- Água Natural
  - Custo 4- Produção de água
  - Custo 5 – Custos energéticos
  - Custo 6 - Custos ambientais
  - Custo 7 – Custos de Recursos humanos
  - Custo 8- Custos de veículos
  - Custo 9 – Custos de depreciação.
- d) Realizou o cálculo destes custos individuais e totais considerando valores diários, mensais, anuais e em 25 anos. Foram considerados também variações de preço ao longo dos cálculos;
- e) Calculou-se valores financeiros associados a perdas de água considerando diferentes cenários temporais e diferentes índices de perdas

Com base nas etapas descritas, a modelagem matemática dos sistemas de distribuição de água foi desenvolvida de forma abrangente, considerando diversos parâmetros e cenários variáveis. Isso permitiu não apenas calcular os custos operacionais e de infraestrutura, mas também analisar impactos financeiros de longo prazo, incluindo variações nos preços e diferentes níveis de perdas de água ao longo do tempo. A flexibilidade da rotina computacional construída possibilita ajustar os parâmetros conforme necessário.

#### **Etapa 6: Simulação de cenários de composição de custos de perdas de água**

Através de softwares foram feitas simulações dessas perdas para diferentes cenários. Os resultados dos modelos de simulação de perda foram analisados para identificar áreas onde podem ser feitas melhorias no sistema de abastecimento de água para reduzir a perda de água e os custos associados. Para tais simulações foram consideradas algumas situações:

- 1) Definição do cenário: níveis de consumo de água por exemplo, perdas na rede de distribuição, tecnologias de redução de perdas etc.
- 2) Simulação de dados(coletas): volume de água disponível, números de clientes, extensão da rede de abastecimento, equipamentos utilizados, serviços agregados ao sistema, entre outros.
- 3) Modelagem da rede de distribuição: A próxima etapa consistiu em modelar a rede de distribuição de água utilizando ferramentas de simulação hidráulica. Isso envolveu a criação de um modelo digital da rede, com informações sobre as tubulações, válvulas, bombas e outros equipamentos utilizados. Com essa modelagem, foi possível simular o comportamento da rede sob diferentes cenários, como variações de vazão, pressão e perda.
- 4) Simulação de perdas: Com o modelo da rede de distribuição criado, foram simulados diferentes níveis de perda na rede para cada um dos cenários definidos. Isso foi feito utilizando ferramentas de simulação de perdas, que permitiram avaliar as perdas reais e aparentes em diferentes trechos da rede.
- 5) Quantificação de custos: Por fim, foram quantificados os custos associados a cada cenário, considerando os custos de operação e manutenção da rede de distribuição, os custos de produção e tratamento de água, os custos com perdas de água, entre outros.

Ao simular esses cenários, foi possível quantificar as perdas de água no sistema e os custos associados a essas perdas. Por exemplo, estimou-se a quantidade de água perdida devido a vazamentos nas tubulações e calculou-se o custo associado a essa perda, incluindo o custo da água perdida, o custo da energia necessária para bombear a água e o custo da reparação da tubulação. Um modelo de otimização foi elaborado utilizando algoritmos genéticos para minimizar os custos diante dos diferentes cenários.

### **Etapa 7: Avaliação dos resultados diante da quantificação de perdas de água**

Foi realizada uma análise da viabilidade metodológica aplicada neste trabalho. Esse processo identificou a importância de combater as perdas de água em sistemas de abastecimento e forneceu soluções práticas para melhorar sua eficiência. A análise de viabilidade metodológica foi conduzida através da avaliação de dados coletados durante as simulações, da revisão de literatura relevante e da comparação dos resultados obtidos com estudos anteriores. Essa abordagem permitiu avaliar a eficácia do método empregado, considerando tanto a redução das perdas quanto a otimização dos custos operacionais.

## 5. RESULTADOS

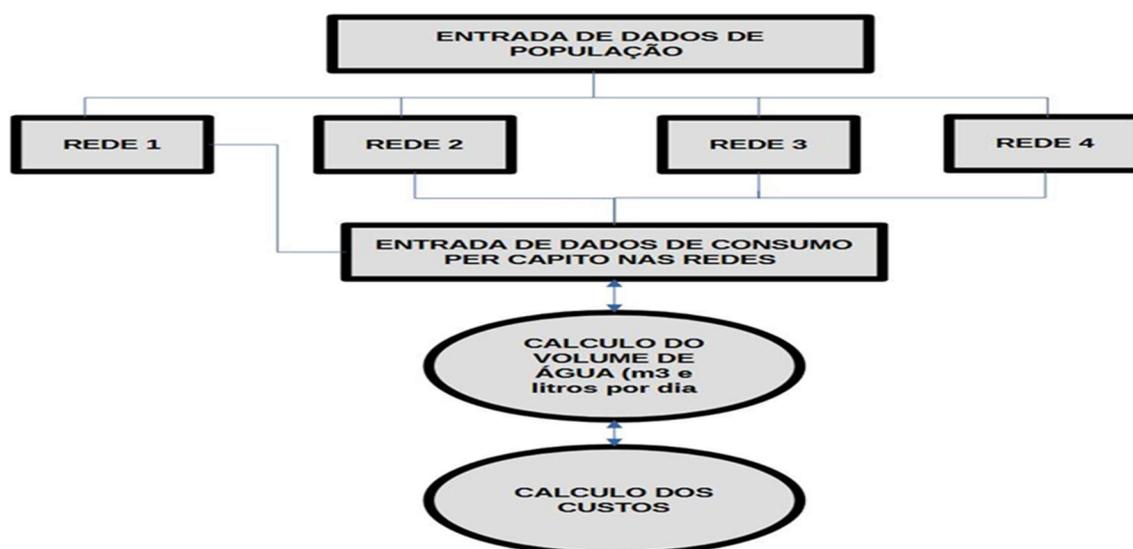
Como primeiro resultado do trabalho apresenta-se a rotina computacional desenvolvida que serviu de base para gerar resultados de valores de custos associados a perdas de água, diante de cenários diversos e complexidade dos dados de entrada.

### A) Rotina Computacional desenvolvida

Os fluxogramas aqui elaborados, oferecem uma visão sistemática do processo de quantificação de custos e perdas em sistemas de distribuição de água

A Figura 10 baixo ilustra a etapa de entrada de dados no processo de quantificação de custos e perdas no sistema de abastecimento de água.

Figura 10- Entrada de dados



Fonte: autora (2024)

Detalhando os componentes do fluxograma foram consideradas:

#### Entrada de dados populacionais:

- Esta etapa envolve a estimativa de dados populacionais para cada uma das redes de distribuição de água (Rede 1, Rede 2, Rede 3 e Rede 4). Esses dados são importantes para entender a demanda de água em cada rede, propiciando calcular o consumo total de água.

#### Entrada de dados de consumo per capita nas redes:

- Esses dados se referem a quantidade de água consumida por pessoa em cada rede de distribuição. Esta informação é importante para calcular o volume de água necessário para atender a população em cada rede específica.

### Cálculo do volume de água:

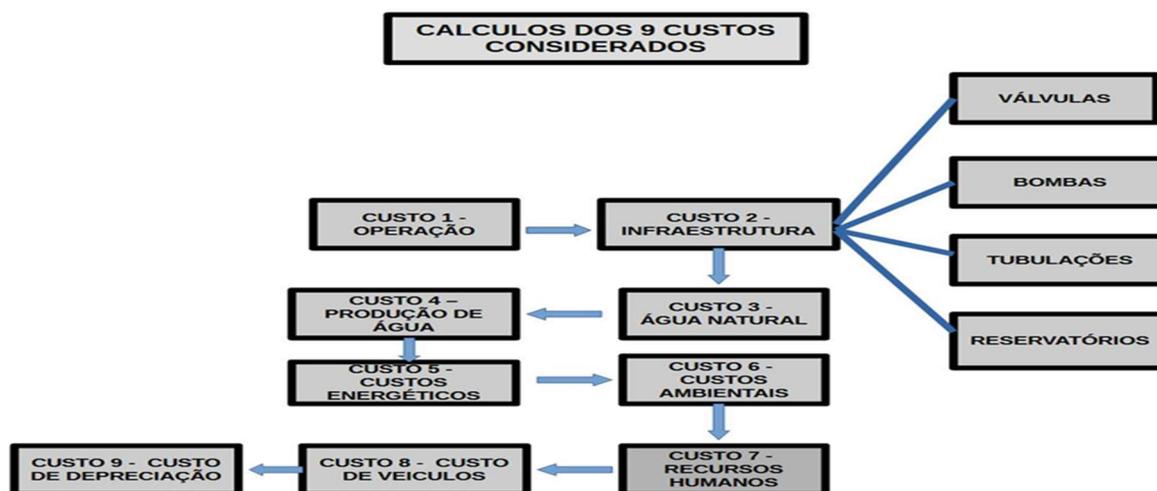
- Com base nos dados populacionais e de consumo per capita, foi possível calcular o volume total de água. Com o cálculo do volume foi possível identificar as necessidades de abastecimento e a capacidade de infraestrutura de distribuição.

### Cálculo de custos:

- Utilizando de cálculos do volume de água, foi possível estimar os custos associados ao fornecimento de água, considerando fatores como custos operacionais, manutenção de rede e perdas de água. Essa quantificação de custos é essencial para avaliar o impacto financeiro das perdas de água e planejar intervenções que possam minimizar esses custos.

A Figura 11 envolve a avaliação dos cálculos dos custos considerados. Esta etapa ilustra uma visão abrangente dos diferentes custos envolvidos na gestão de um sistema de distribuição de água. A identificação e o cálculo precisos desses custos são essenciais para a avaliação financeira completa do sistema e para o desenvolvimento de estratégias de redução de custos.

Figura 11- Cálculos dos custos considerados



Fonte própria autora (2024)

A Figura 11 detalha os principais custos considerados na análise de um sistema de distribuição de água, que foram divididos em categorias específicas que contribuem para o custo total do sistema. Detalhadamente cada componente do fluxograma envolve:

#### Custo 1- Operação:

- Refere-se aos custos associados à operação diária do sistema de distribuição de água. Inclui despesas operacionais como monitoramento, controle e manutenção regular do sistema.

**Custo 2- Infraestrutura:**

- Envolve os custos relacionados aos componentes físicos do sistema, como válvulas, bombas, tubulações e reservatórios.
- A infraestrutura é a base do sistema de distribuição, e seus custos incluem instalação, reparo e substituição dos componentes.

**Custo 3- Água Natural:**

- Este custo cobre a aquisição e o tratamento da água bruta extraída de fontes naturais, como rios, lagos, aquíferos e mananciais. É importante para a garantia da qualidade e disponibilidade da água para distribuição.

**Custo 4- Produção de água:**

- Envolve os custos de processos necessários para transformar a água natural em água potável.
- Inclui tratamento, purificação e todas as operações necessárias para garantir que a água atenda os padrões de qualidade.

**Custo 5 – Custos energéticos:**

- Refere-se aos gastos com energia elétrica e outras formas de energia necessárias para operar bombas, estações de tratamento e outros equipamentos.
- A energia é um componente significativo do custo operacional devido à necessidade constante de energia para o funcionamento do sistema.

**Custo 6 - Custos Ambientais:**

- Inclui os custos associados às práticas sustentáveis e ao cumprimento de regulamentos ambientais, além de medidas de mitigação de impactos ambientais.

**Custo 7 - Recursos Humanos:**

- Envolve os salários, benefícios e outros custos relacionados ao pessoal necessário para operar e manter o sistema de distribuição de água.

**Custo 8 - Custo de Veículos:**

- Refere-se aos custos de aquisição, manutenção e operação de veículos utilizados para transporte de equipe, equipamentos e materiais.

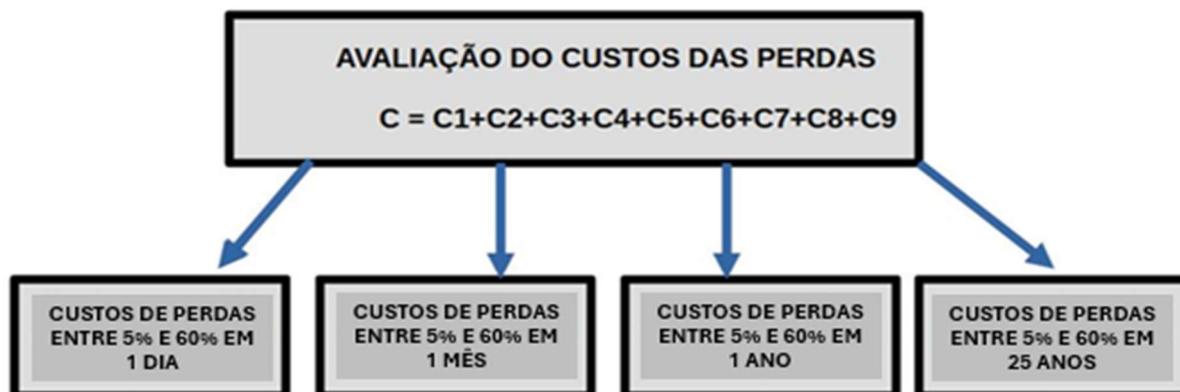
**Custo 9 - Custo de Depreciação:**

- Este custo envolve a depreciação de ativos físicos ao longo do tempo, incluindo infraestrutura e equipamentos.

O detalhamento dos principais custos e suas inter-relações é fundamental para a gestão eficaz do sistema de distribuição de água.

A Figura 12 lustra o processo de avaliação dos custos associados às perdas em sistemas de distribuição de água, considerando diferentes períodos. A fórmula apresentada mostra a soma dos nove custos principais para calcular o custo total das perdas.

Figura 12- Avaliação dos custos das perdas



Fonte própria autora (2024)

**Avaliação do Custo das Perdas ( $C = C1 + C2 + C3 + C4 + C5 + C6 + C7 + C8 + C9$ ):**

- Esta etapa envolve a agregação de todos os custos individuais (C1 a C9) para calcular o custo total das perdas no sistema de distribuição de água.

**Custos de Perdas entre 5% e 60% em 1 Dia:**

- Avalia os custos das perdas de água que variam entre 5% e 60% durante um período de um dia.

**Custos de Perdas entre 5% e 60% em 1 Mês:**

- Avalia os custos das perdas de água que variam entre 5% e 60% ao longo de um mês.
- A análise mensal permite observar tendências e variações sazonais, oferecendo uma perspectiva intermediária que ajuda a planejar ações corretivas no curto e médio prazo.

**Custos de Perdas entre 5% e 60% em 1 Ano:**

- Avalia os custos das perdas de água que variam entre 5% e 60% durante um ano.
- Esta análise de longo prazo fornece uma visão abrangente do impacto financeiro anual das perdas de água, facilitando o planejamento estratégico e orçamentário.

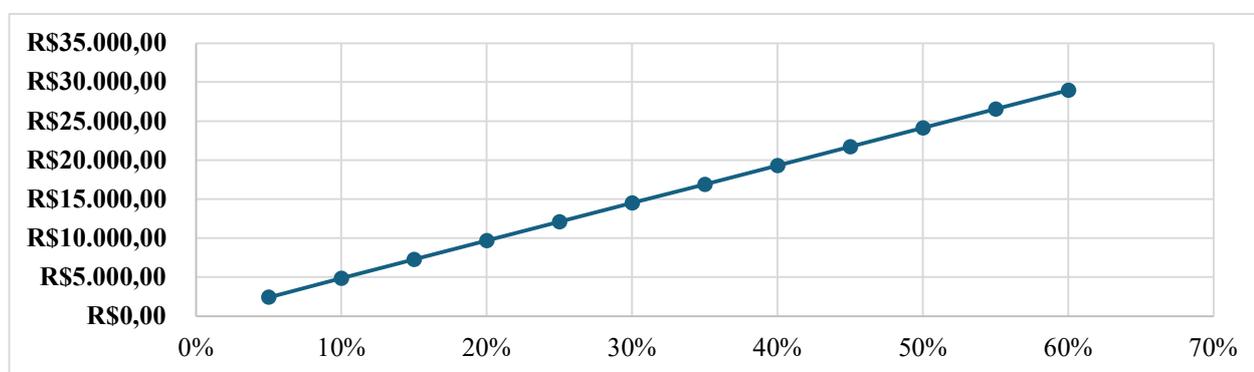
**Custos de Perdas entre 5% e 60% em 25 Anos:**

- Avalia os custos das perdas de água que variam entre 5% e 60% ao longo de 25 anos.
- A análise no decorrer dos anos é essencial para o planejamento de infraestrutura e políticas públicas, ajudando a garantir a sustentabilidade financeira e operacional do sistema de distribuição de água.

Este fluxograma oferece uma ferramenta importante na avaliação desses custos, permitindo tomada de decisões estratégicas que buscam a redução de perdas e a otimização dos recursos financeiros e operacionais.

A Figura 13 demonstra de forma clara e visual o impacto direto das porcentagens de perdas no sistema de tratamento de água nos custos diários. À medida que a taxa de perda aumenta, os custos aumentam de forma significativa de maneira linear. Por exemplo, com 5% de perdas, os custos diários são aproximadamente R\$ 2.413,57, enquanto com 60% de perdas, esses custos aumentam para cerca de R\$ 28.962,84. Os números revelam que mesmo pequenas variações nas taxas de perda têm impactos financeiros significativos.

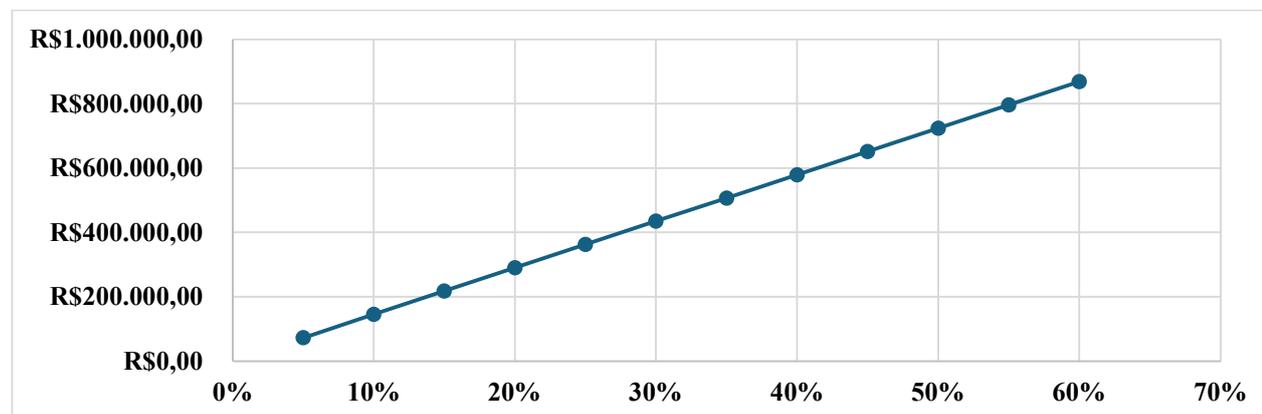
Figura 13- Custos e perdas em 1 dia



Fonte: autora (2024)

A Figura 14 mostra a relação entre a porcentagem de perdas em um sistema de distribuição de água e os custos associados a essas perdas ao longo de um mês. A Figura 14 ilustra uma linha de tendência ascendente, indicando que os custos aumentam de forma linear com a porcentagem de perdas. Cada ponto na Figura 14 indica um valor específico de custo associado a uma determinada porcentagem de perda. Por exemplo, uma perda de 10% resulta em um custo aproximado de R\$ 144.814,17, enquanto uma perda de 60% implica um custo de cerca de R\$ 868.885,06.

Figura 14- Custos e perdas em 1 mês



Fonte: própria autora (2024)

Os dados mostram que as perdas de água têm um impacto significativo nos custos operacionais mensais, aumentando à medida que a porcentagem de perdas aumenta. Por exemplo, com 60% de perdas, os custos podem alcançar R\$ 868.885,06 por mês, enquanto com 20% de perdas, esses custos são reduzidos para R\$ 289.628,34.

A Tabela 17 apresenta os custos associados às diferentes porcentagens de perdas no sistema de tratamento de água ao longo de um ano. Os valores mostram claramente que quanto maior a porcentagem de perdas, maiores são os custos operacionais, conforme ilustrado nos dados. Por exemplo, com 60% de perdas, os custos podem chegar a R\$ 10.426.621,00 por ano, enquanto reduzir as perdas para 20% diminuiria esses custos para R\$ 3.475.540,30.

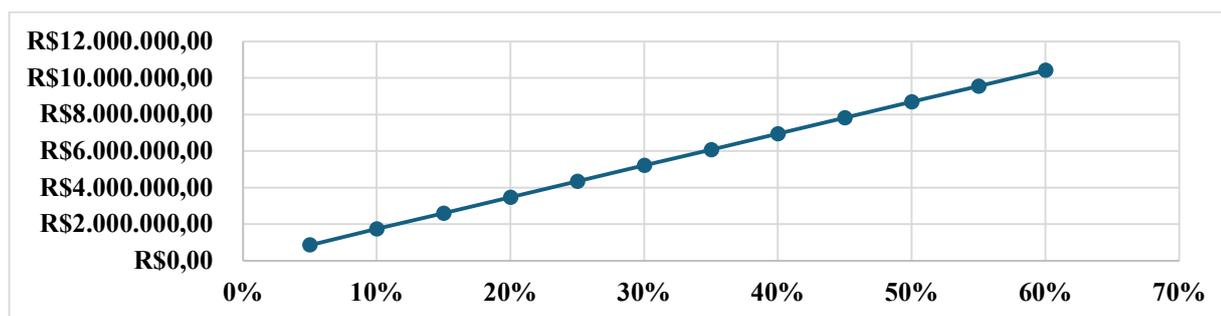
Tabela 17- Porcentagens de perdas e custos em 1 ano

Perdas	Custos
5%	R\$ 868.885,06
10%	R\$ 1.737.770,10
15%	R\$ 2.606.655,30
20%	R\$ 3.475.540,30
25%	R\$ 4.344.425,50
30%	R\$ 5.213.310,50
35%	R\$ 6.082.195,00
40%	R\$ 6.951.080,50
45%	R\$ 7.819.965,50
50%	R\$ 8.688.851,00
55%	R\$ 9.557.736,00
60%	R\$ 10.426.621,00

Fonte: própria autora (2024)

A Figura 15 ilustra claramente a relação direta entre a porcentagem de perdas no sistema de tratamento de água e os custos associados ao longo de um ano. A análise desses dados pode ajudar na tomada de decisões estratégicas e na alocação de recursos para melhorar a infraestrutura e a operação do sistema.

Figura 15- Custos e perdas em 1 ano



Fonte: autora (2024)

A Tabela 18 apresenta os custos das perdas de água ao longo de 25 anos, com diferentes porcentagens de perda. A tabela mostra que mesmo pequenas porcentagens de perda resultam em custos significativos, como R\$ 21.722.126,00 para 5% de perda, aumentando até R\$ 260.665.520,00 para 60% de perda. Esses valores ilustram a importância de reduzir as perdas de água para evitar custos elevados. Investir em tecnologias e práticas de gestão eficazes pode resultar em economias substanciais a longo prazo e promover a sustentabilidade ambiental e a eficiência operacional do sistema de abastecimento de água.

Tabela 18- Porcentagens de perdas e custos em 25 anos

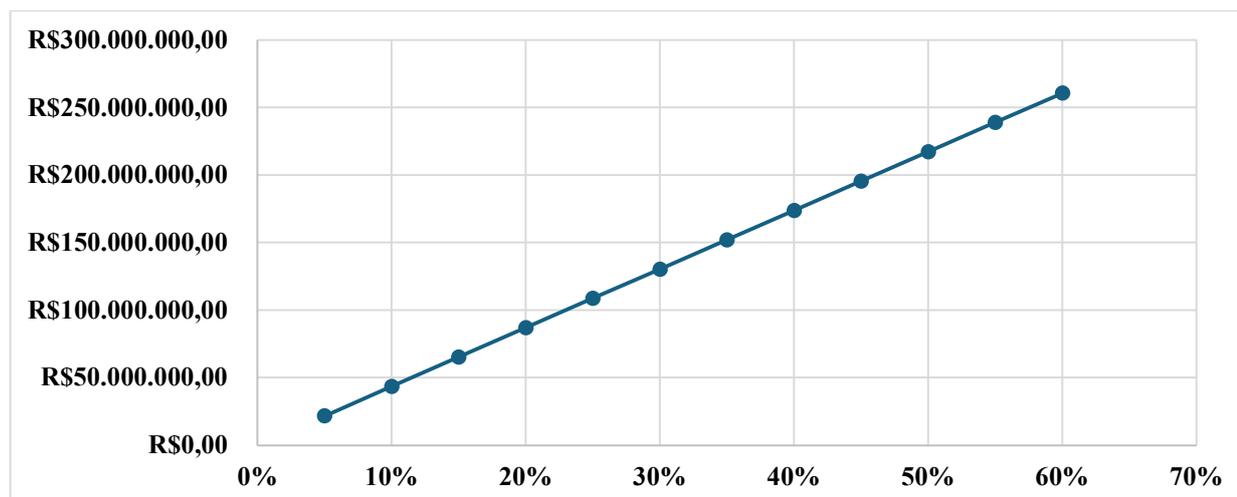
<b>Perdas</b>	<b>Custo</b>
5%	R\$ 21.722.126,00
10%	R\$ 43.444.252,00
15%	R\$ 65.166.380,00
20%	R\$ 86.888.504,00
25%	R\$ 108.610.632,00
30%	R\$ 130.332.760,00
35%	R\$ 152.054.880,00
40%	R\$ 173.777.008,00
45%	R\$ 195.499.136,00
50%	R\$ 217.221.264,00
55%	R\$ 238.943.392,00
60%	R\$ 260.665.520,00

Fonte própria autora (2024)

Reduzir as perdas de água de 60% para 20% pode resultar em uma economia significativa de aproximadamente R\$ 173.777.008,00 ao longo de 25 anos, conforme demonstrado na Tabela 14. Isso equivale a economias diárias, mensais e anuais substanciais, destacando a importância de investir em medidas eficazes para redução de perdas no sistema de abastecimento de água.

A Figura 16 mostra uma tendência ascendente linear. À medida que a porcentagem de perdas aumenta, o custo associado a essas perdas também aumenta. Mesmo pequenas porcentagens de perdas resultam em custos significativos, o que torna o impacto financeiro mais substancial com o aumento das porcentagens de perdas. A Figura ilustra claramente a relação direta entre a porcentagem de perdas no sistema de tratamento de água e os custos associados ao longo de um período de 25 anos.

Figura 16- Custos e perdas em 25 anos



Fonte: própria autora (2024)

A Tabela 19 mostra os custos associados em diferentes períodos (1 dia, 1 mês, 1 ano e 25 anos) para nove categorias (C1 a C9). Os valores variam significativamente entre as categorias em todos os períodos. Essa Tabela, oferece uma visão abrangente dos custos associados a diferentes componentes do sistema ao longo de múltiplos períodos, desde 25 anos até um único dia. Cada categoria de custo (C1 a C9) é representada, destacando a magnitude das despesas envolvidas em diferentes aspectos do funcionamento do sistema.

Esses custos são representativos de várias facetas operacionais e de manutenção do sistema. Por exemplo, os custos variam desde despesas diárias menores, como C1 e C2, até grandes investimentos de longo prazo, como C4 e C9, que têm impacto significativo ao longo de períodos mais extensos, como 1 ano ou 25 anos. A representação em várias escalas temporais permite uma compreensão detalhada dos custos, desde investimentos de longo prazo até despesas operacionais diárias.

Com esses dados, é possível planejar intervenções específicas para reduzir custos e melhorar a eficiência operacional, garantindo a longevidade e a qualidade dos serviços prestados. A representação ao longo de diferentes escalas temporais não apenas destaca a distribuição dos custos ao longo do tempo, mas também ajuda a planejar investimentos futuros e garantir a sustentabilidade financeira do sistema. Essa abordagem detalhada permite uma gestão mais eficaz dos recursos, essencial para a operação eficiente e duradoura de qualquer infraestrutura complexa.

Tabela 19- Relação de custos

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
<b>1 DIA</b>	R\$ 180,40	R\$ 109	0	R\$ 16.218	R\$ 783	R\$ 42	R\$ 929,10	R\$ 242	R\$ 805
<b>1 MÊS</b>	R\$ 5.411	R\$ 3.270	0	R\$ 486.550	R\$ 23.498	R\$ 1.261	R\$ 27.874	R\$ 7.250	R\$ 24.144
<b>1 ANO</b>	R\$ 162.325	R\$ 162.325	0	R\$ 14.596.493	R\$ 704.939	R\$ 37.841	R\$ 836.193	R\$ 217.496	R\$ 724.311
<b>25 ANOS</b>	R\$ 4.058.118	R\$ 2.452.614	0	R\$ 364.912.320	R\$ 17.623.462	R\$ 946.027	R\$ 20.904.822	R\$ 5.437.406	R\$ 18.107.766

Fonte: própria autora (2024)

A Tabela 20 apresenta uma análise detalhada dos custos associados à operação e infraestrutura da estação de tratamento de água. Ela inclui custos como operacionais, infraestruturais (como redes, válvulas, reservatórios e bombas), custos específicos de energia para bombeamento, bem como custos ambientais, administrativos, de recursos humanos e de depreciação. Além disso, são detalhadas porcentagens de gastos relacionados a redes, válvulas, bombas e reservatórios, oferecendo uma visão abrangente dos diferentes componentes que compõem os custos totais de operação e manutenção dessa instalação.

Esta mesma tabela fornece uma estrutura clara dos diversos elementos de custo envolvidos na gestão e operação de uma instalação de tratamento de água. Ela permite uma análise detalhada das despesas diretas, como energia para bombeamento e custos de produção de água, além de custos indiretos, como administração, recursos humanos, depreciação e custos ambientais.

Tabela 20- Análise comparativa de custos

	(%)
<b>CUSTO 01 - CUSTO DA OPERACAO</b>	<b>0,93</b>
<b>CUSTO 02 - CUSTO DA INFRAESTRUTURA - REDE, VALVULA RESERVATORIO E BOMBA</b>	<b>0,56</b>
PORCENTAGEM GASTO REDES	0,132
PORCENTAGEM GASTO VALVULAS	0,0047
PORCENTAGEM GASTO BOMBAS	0,0191
PORCENTAGEM GASTO RESERVATORIO	0,41
<b>CUSTO 03 - CUSTO DA ÁGUA ESTADO NATURAL</b>	<b>0</b>
<b>CUSTO 04 - CUSTO DA PRODUCAO DE ÁGUA</b>	<b>84,00</b>
PORCENTAGEM GASTO CUSTO APOIO ADMINISTRATIVO, TECNICO OPERACIONAL (TRATAMENTO DE ÁGUA)	1,70
PORCENTAGEM ENERGIA (TRATAMENTO DE ÁGUA)	35,37
PORCENTAGEM CUSTO DE MATERIAL DE CONSUMO (TRATAMENTO DE ÁGUA)	6,29
PORCENTAGEM CUSTO MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS (TRATAMENTO DE ÁGUA)	0,80
CUSTO SERVICOS TERCEIROS (TRATAMENTO DE ÁGUA)	34,88
CUSTO GERAIS (TRATAMENTO DE ÁGUA)	4,96
<b>CUSTO 05 - CUSTO DE ENERGIA PARA BOMBEAMENTO</b>	<b>4,06</b>
<b>CUSTO 06 - CUSTOS AMBIENTAIS</b>	<b>0,22</b>
<b>CUSTO 07 - PESSOAS - RECURSOS HUMANOS E ADMINISTRATIVO</b>	<b>4,81</b>
<b>CUSTO 08 - CUSTO DE VEICULOS</b>	<b>1,25</b>
<b>CUSTO 09 - CUSTO DE DEPRECIACÃO</b>	<b>4,17</b>

Fonte: própria autora (2024)

Os custos de energia para a produção de água e bombeamento desempenham um papel crucial no sistema de abastecimento. O custo de energia no tratamento de água, que é de 35,37%, cobre a energia utilizada no processo de purificação e preparação da água para distribuição. Este é um dos componentes mais significativos dos custos operacionais, o que indica que a eficiência energética das instalações de tratamento é fundamental para a sustentabilidade financeira do sistema.

Por outro lado, o custo de energia para bombeamento, representando 4,06%, abrange a energia necessária para bombear a água tratada para os reservatórios e, posteriormente, para os pontos de distribuição. Apesar de ser menor que o custo de tratamento, continua a ser uma parte importante dos custos operacionais, especialmente em áreas com relevo acidentado ou grandes distâncias entre a fonte de água e os consumidores. Somados os valores totais de energia no processo chegam a 39,42% indicando destaca para este componente associado a perdas de água.

Quando comparados esses custos de energia com os demais, vê-se que o custo de produção de água é o mais elevado, alcançando 84,00%. Este custo inclui todos os processos necessários para transformar a água bruta em água potável e reflete a complexidade e a intensividade de recursos

desses processos. O custo da operação, que representa 0,93%, inclui todos os custos operacionais diários, exceto aqueles especificados separadamente, como energia e infraestrutura, sendo relativamente baixo em comparação com os custos de produção de água e energia. O custo da infraestrutura, que cobre a manutenção e operação das infraestruturas físicas como redes, válvulas, reservatórios e bombas, é de 0,56%, menor que os custos de energia e produção de água, mas essencial para a entrega segura e eficiente de água.

Além disso, os custos ambientais, que representam 0,22%, incluem despesas associadas ao cumprimento de regulamentações ambientais e medidas de mitigação. Embora seja uma pequena fração do total, é crucial para a sustentabilidade e conformidade regulatória. Os custos com pessoal, que representam 4,81%, referem-se aos salários e custos administrativos, destacando a importância do fator humano na operação do sistema. O custo de veículos, que é de 1,25%, cobre os custos de operação e manutenção dos veículos utilizados no sistema de abastecimento, sendo pequeno, mas importante para a logística e manutenção do sistema. O custo de depreciação, representando 4,17%, indica a perda de valor dos ativos físicos ao longo do tempo, refletindo a necessidade de renovação e manutenção contínua da infraestrutura.

Quando analisados os custos de infraestrutura, pode-se verificar que o gasto com redes fica em torno de 0,132%. O gasto com válvulas, que é de 0,0047%, cobre a manutenção e substituição dessas componentes críticas para o controle do fluxo de água. O gasto com bombas, representando 0,0191%, refere-se à manutenção e operação desses equipamentos essenciais para o funcionamento eficiente do sistema de abastecimento. Finalmente, o gasto com reservatórios, que é de 0,41%, cobre os custos associados aos reservatórios de armazenamento de água, refletindo a importância do armazenamento adequado de água tratada.

Em conclusão, os custos de energia para produção de água e bombeamento, que juntos representam cerca de 39% do total dos custos operacionais, destacam a importância de focar na eficiência energética para reduzir os custos gerais do sistema. Melhorias tecnológicas, otimização dos processos de tratamento e bombeamento, e o uso de fontes de energia renovável podem ser estratégias eficazes para alcançar essa meta. Comparativamente, outros custos, como a produção de água e a infraestrutura, também são substanciais, mas a energia continua sendo um dos maiores componentes que podem ser otimizados para melhorar a eficiência e sustentabilidade do sistema de abastecimento de água.

A Tabela 21 de custo de depreciação e custo de energia, reflete os valores associados ao longo de diferentes períodos (1 dia, 1 mês, 1 ano e 25 anos) para nove categorias (C1 a C9). A depreciação é calculada com base na vida útil dos ativos, assumindo um período de 25 anos para todos os casos

listados. Isso evidencia a necessidade de planejamento estratégico e gestão eficiente dos recursos para minimizar impactos financeiros e garantir a sustentabilidade operacional ao longo do tempo.

Tabela 21- Custo de depreciação e custo de energia

<b>Período</b>	<b>Depreciação (R\$)</b>	<b>Energia (R\$)</b>
1 Dia	R\$805	R\$7.611
1 Mês	R\$24.144	R\$228.335
1 Ano	R\$724.311	R\$ 6.850.062
25 Anos	R\$18.107.766	R\$171.251.536

Fonte: própria autora (2024)

Os dados da Tabela 21 destacam os custos significativos associados à depreciação ao longo de diferentes períodos (1 dia, 1 mês, 1 ano e 25 anos) para nove categorias (C1 a C9), assumindo uma vida útil de 25 anos para todos os casos. A análise revela a importância do planejamento estratégico e da gestão eficiente dos recursos para mitigar os impactos financeiros e assegurar a sustentabilidade operacional a longo prazo.

Essa análise revela que, embora o custo de depreciação seja significativo, o custo de energia é predominantemente mais alto, especialmente em prazos mais longos, como 25 anos, refletindo a importância da gestão eficiente de energia para a redução dos custos.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Poucos estudos na literatura abordaram a quantificação dos custos das perdas em sistemas de distribuição de água. A utilização de modelagem e simulação computacional para essa quantificação foi relativamente incomum, especialmente em um contexto de crescente atenção aos marcos regulatórios de saneamento. Este estudo forneceu dados sobre o estado atual dos sistemas de distribuição de água, identificando áreas com potencial para redução das perdas físicas de água e dos custos associados.

A compreensão dos custos das perdas nos sistemas de distribuição de água possibilitou um planejamento mais eficaz e a alocação precisa de recursos para mitigar essas perdas. As análises realizadas por meio de modelagem e simulação computacional permitiram identificar as áreas da rede de distribuição mais propensas a perdas, permitindo a implementação de medidas corretivas. O trabalho demonstrou a utilidade de estratégias baseadas em dados para otimizar a eficiência operacional e reduzir custos relacionados ao desperdício de água.

A integração de dados demográficos e de consumo foi importante para entender a demanda e o uso da água em diferentes redes de distribuição, o que contribuiu para o planejamento e a gestão mais eficazes da distribuição de água e facilitou a identificação de áreas críticas suscetíveis a perdas, permitindo intervenções mais direcionadas.

A quantificação dos custos das perdas nos sistemas de distribuição de água ajudou a avaliar o impacto financeiro dessas perdas para as empresas de serviços públicos e para os consumidores. Essas informações podem apoiar o desenvolvimento de políticas e regulamentos voltados para a redução da carga financeira causada pelas perdas de água.

Os custos associados às perdas de água incluem tanto os custos diretos, como os custos de produção da água perdida antes de chegar ao consumidor, quanto os custos indiretos, como danos à infraestrutura, perda de receita e custos ambientais relacionados ao desperdício de água. As variações nos custos podem ser significativas, desde perdas diárias até projeções de perdas em períodos longos, como 25 anos. Considerando as perdas contínuas ao longo desse período, os custos podem ser substancialmente elevados devido à degradação acumulativa da infraestrutura e outras perdas.

A aplicação de rotinas de simulação computacional permitiu uma análise detalhada das perdas na rede de distribuição. Essas rotinas foram implementadas com ferramentas como o EPANET e Python, que contribuíram de forma única para a eficiência e precisão do Sistema de Abastecimento

de Água (SAA) desenvolvido. O EPANET foi utilizado para modelar e simular o comportamento hidráulico nas redes de distribuição de água, permitindo a criação de um modelo detalhado da rede e facilitando a simulação de diversos cenários e a identificação de áreas com maior propensão a perdas. O Python auxiliou na modelagem matemática dos tipos de custos associados às perdas de água, automatizando e facilitando a análise dos dados gerados pelo EPANET e permitindo uma análise eficiente e detalhada dos resultados das simulações.

Os resultados deste estudo incluem uma melhor compreensão dos custos das perdas nos sistemas de distribuição de água e o desenvolvimento de estratégias para mitigar essas perdas. As informações geradas podem auxiliar na formulação de políticas e regulamentos que visem reduzir a carga financeira causada pelas perdas de água, beneficiando tanto as empresas de serviços públicos quanto os consumidores finais. Este estudo contribui para a literatura existente ao oferecer uma análise detalhada dos custos das perdas de água e ao demonstrar o uso de ferramentas de simulação computacional na gestão de redes de distribuição de água, incentivando futuras pesquisas e práticas de gestão mais eficientes e sustentáveis.

Observou-se que grande parte dos custos das perdas de água está relacionada ao consumo de energia, representando aproximadamente 39,41% dos custos, enquanto a produção de água corresponde a 84% do total do custo, incluindo a energia consumida.

Para futuras pesquisas, sugere-se aprimorar o uso do algoritmo e da rotina computacional propostos para análises de otimização e aprendizado de máquina, ajustando parâmetros hidráulicos e avaliando ações de controle de perdas de água. Também é recomendável investigar os impactos econômicos a longo prazo das perdas de água, incluindo custos indiretos, e desenvolver modelos econômicos que apoiem a tomada de decisões sobre investimentos em infraestrutura. Além disso, explorar a relação entre perdas de água e consumo de energia, implementando estratégias para melhorar a eficiência energética e reduzir custos operacionais, é essencial para a sustentabilidade.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Dispõe sobre o enquadramento das águas do Rio Verde. Deliberação Normativa COPAM n.33, 18 de dezembro de 1998. Lex: Diário executivo Minas Gerais. 24 de dezembro de 1998.

ANDRADE SOBRINHO, R.; BORJA, P. C. *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, dez. 2016. Artigo de periódico.

BARRETO, D. de Oliveira. *Planejamento e Operação do Sistema de Abastecimento de Água da Cidade de Petrolina-PE Utilizando Sistemas de Informações Geográficas*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

BENEDITO, W. J. *Estudo de Custos de Perdas em Sistema Real de Distribuição de Água*. Itajubá: 2019. Monografia – Universidade federal de Itajubá.

BOTELHO, A. J. da S. B. *Modelação de custos associados aos sistemas de abastecimento de água*. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1822/36075>>. Acesso em: 20 mar. 2023. Documento online.

BOUZON, M.; TABOADA RODRIGUEZ, C. M. *Determinação do padrão de operação ótimo para o custo energético de um sistema de distribuição de água*. Optimization of Pump Operation Patterns for Reducing the Energetic Cost of a Water Distribution System. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://producaoonline.org.br/rpo/article/download/1108/1013/5106>>. Acesso em: 5 set. 2023. Artigo de periódico.

CABRERA, E. et al. Tap Water Costs and Service Sustainability, a Close Relationship. *Water Resources Management*, v. 27, n. 1, p. 239–253, 1 jan. 2013. Artigo de periódico.

CARVALHO, P. S. O. de. *Controle para bombeamento distribuído com vistas à minimização dos custos energéticos aplicado a sistemas de abastecimento de água*. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H. de; RAMOS, H. *Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 15, n. 2, p. 187–196, jun. 2010. Artigo de periódico.

COSTA, L. H. M.; FROTA, A. F. *Tutorial da ferramenta toolkit do Epanet para programadores*. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL-SIBESA, XIV., 18 a 20 jun. 2018, Foz do Iguaçu/PR. Anais [...], Foz do Iguaçu/PR, 2018. Disponível em: <[https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/54702/1/2018\\_eve\\_lhmcosta.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/54702/1/2018_eve_lhmcosta.pdf)>. Artigo de evento.

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

GUMIER, C. C. *Aplicação de Modelo Matemático de Simulação-Otimização na Gestão de Perda de Água em Sistemas de Abastecimento*. Campinas, SP: [s.n.], [s.d.]. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual de Campinas.

LUCENA, K. F. M. de. *Aplicação de modelos de otimização na operação de sistemas elevatórios em redes de abastecimento de água*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MARQUES, Sara Maria. *Aplicação de algoritmos genéticos em operação de redes de distribuição de água com o uso de softwares R e EPANET visando ao controle de perdas de água – estudo em uma rede teórica*. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

MARTINS, V. R. A. *Análise de perdas de água dos sistemas de captação, tratamento e adução dos subsistemas de abastecimento de água de Andorinhas, Queimadela e Rabagão*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Minho, Portugal.

MEDEIROS, E. L. C. de. *Hierarquização das principais alternativas de controle de perdas de água em sistemas de distribuição de água*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MORAIS, D. C.; ALMEIDA, A. T. de. *Modelo de decisão em grupo para gerenciar perdas de água*. Pesquisa Operacional, 2006. Artigo de periódico.

MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. de. *Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água*. Pesquisa Operacional, v. 30, n. 1, p. 15–32, abr. 2010. Artigo de periódico.

MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. de. *Prioritization of areas of loss control in water distribution networks | Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água*. Pesquisa Operacional, v. 30, n. 1, 2010. Artigo de periódico.

MOURA, A. N. D. *Sistema de informações geográficas aplicado a sistemas de abastecimento de água*. dez. 2009. Relatório técnico.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S.; VAIRAVAMOORTHY, K. *Gestão de perdas de água em países em desenvolvimento: desafios e perspectivas*. American Water Works Association Journal, v. 101, n. 12, p. 57-68, 2009. Artigo de periódico.

PEREIRA, S. F.; TINÔCO, J. D. *Avaliação das perdas de água em sistema de abastecimento de água: estudo no setor Parque das Nações, Parnamirim/RN*. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, 2022. Artigo de periódico.

PÓVOAS, R. de A. M. S. *Avaliação dos Custos e Benefícios das Medidas de Redução de Perdas nos Sistemas de Abastecimento de Águas*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Técnica de Lisboa.

SILVA, A. T. Y. L. *Aplicação de redes neurais multicamadas associadas a algoritmos genéticos aplicadas a operação de redes de distribuição de água com vistas a eficiência hidroenergética em*

*ciudades inteligentes*. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, A. C. da. *Estudo Comparativo entre Métodos de Perda de Água e Parâmetros Hidráulicos – Análise do Ciclo de Vida e Aplicação em rede do Sul de Minas Gerais*. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILVA, R.; CONEJO, L. *Programa nacional de combate ao desperdício de água: Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água*. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento/Secretaria de Política Urbana. 1999. Relatório técnico.

SILVA JUNIOR, J. F. da. *Detecção de perdas em sistemas de distribuição de água através de rede de sensores sem fio*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Brasília, Brasília.

SILQUERIA, M. G. *Estudo de correlação de parâmetros hidráulicos e elétricos aplicado ao setor de rede de água no sul de Minas Gerais*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia)- Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.