

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA

**METODOLOGIA BASEADA EM ALGORITMOS GENÉTICOS PARA ANÁLISE DE
AÇÕES DE COMBATE ÀS PERDAS DE ÁGUA: APLICAÇÃO EM SISTEMA
BENCHMARK COM CARACTERÍSTICAS DO NORDESTE BRASILEIRO.**

Vitor Affonso Sandes Lira

Itajubá - MG

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA

Vitor Affonso Sandes Lira

**METODOLOGIA BASEADA EM ALGORITMOS GENÉTICOS PARA ANÁLISE DE
AÇÕES DE COMBATE ÀS PERDAS DE ÁGUA: APLICAÇÃO EM SISTEMA
BENCHMARK COM CARACTERÍSTICAS DO NORDESTE BRASILEIRO.**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação profissional em Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Hídrica.

Área de Concentração: Gestão de Sistemas Hídricos.

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

Itajubá - MG

2025

Dedico este trabalho a Satoshi Nakamoto, por ter mostrado ao mundo que uma ideia bem executada pode mudar o curso da história, sem a necessidade de aplausos ou reconhecimento público.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois sem Ele não existiria o universo, muito menos a água, tema central deste trabalho.

Aos meus pais Linjonhudson e Sandra, minha mais profunda gratidão pelo amor, apoio e por serem meus primeiros (e melhores) professores na vida. Agradeço também ao Gustavo e ao Diogo, por serem os melhores irmãos que eu tenho.

Agradeço a Louise, minha mulher, que chegou em minha vida de forma alegre e repentina.

Agradeço ao meu filho Kael, que mesmo antes de nascer me motivava a ser um homem mais esforçado.

Agradeço ao meu mentor (e grande amigo) Roberto Henrique Guimarães Teixeira, sua paixão pela engenharia, dedicação ao trabalho e generosidade em compartilhar conhecimento foram fundamentais para o meu desenvolvimento.

Agradeço ao magnata Renato Amoedo Nadier Rodrigues, seus ensinamentos sobre princípios de liberdade são uma inspiração constante, minha honra!

Agradeço aos meus amigos Cláudio, Kristhyno, Magno, Ravick e Lucius pelos bons momentos de amizade.

Agradeço ao meu orientador Fernando das Graças Braga da Silva, que depositou confiança em meu trabalho, mesmo quando o caminho para os resultados se mostrava obscuro e incerto.

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

Por fim, agradeço a todas as pessoas que representaram obstáculos, dificuldades e problemas em minha vida, pois sem elas o aprendizado não seria completo, tampouco haveria superação.

“Assim como nas alturas, seja nas profundezas!”

Patrick Rothfuss
O temor do sábio

RESUMO

A distribuição sustentável de água potável em áreas urbanas representa um desafio crítico, especialmente diante das elevadas perdas em sistemas de abastecimento causadas por vazamentos, fraudes e ineficiências operacionais. Este estudo apresenta uma metodologia inovadora de otimização para reduzir as perdas de água em redes de distribuição, em seguida a metodologia apresentada é aplicada em uma rede de referência com características do estado do Maranhão. O trabalho inicia com uma revisão da literatura sobre o tema, seguida de uma análise das características gerais das redes de distribuição da região nordeste do Brasil, em especial do estado do Maranhão. A partir dessas informações, foi elaborado um modelo *benchmark* de sistema de distribuição de água que representa as condições locais da região de estudo. Em seguida o autor propôs, também como contribuição original, equações que correlacionam o investimento financeiro à redução de perdas em diferentes ações de combate às perdas. Por fim, utilizando os dados do sistema de referência, bem como as equações que correlacionam investimento e redução de perdas, juntamente com algoritmos genéticos, foi realizada a análise e identificação da solução ótima para combater as perdas no sistema modelado. Os resultados obtidos apoiam o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de gestão de recursos hídricos, visto que a solução apresentada pelo método proposto foi mais eficiente do que outras soluções obtidas sem a aplicação do método.

Palavras Chave: Perdas de água, Metodologia de otimização, Algoritmos genéticos.

ABSTRACT

The sustainable distribution of drinking water in urban areas represents a critical challenge, especially given the high losses in supply systems caused by leaks, fraud, and operational inefficiencies. This study presents an innovative optimization methodology to reduce water losses in distribution networks, and the presented methodology is then applied to a reference network with characteristics of the state of Maranhão. The work begins with a literature review on the subject, followed by an analysis of the general characteristics of the distribution networks in the Northeast region of Brazil, particularly in the state of Maranhão. Based on this information, a benchmark model of a water distribution system was developed to represent the local conditions of the study area. Next, the author proposed, also as an original contribution, equations that correlate financial investment with the reduction of losses in various actions to combat these losses. Finally, using the data from the reference system, as well as the equations that correlate investment with loss reduction, combined with genetic algorithms, the analysis and identification of the optimal solution to combat losses in the modeled system were carried out. The results obtained support the development of more effective strategies for water resource management, as the solution presented by the proposed method was more efficient than other solutions obtained without applying the method.

Keywords: Water losses, Optimization Methodology, Genetic algorithms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Concepção de um SAA com captação de água superficial.	15
Figura 2: Rede de distribuição de água em planta.	16
Figura 3: Rede de distribuição de água.....	16
Figura 4: IN058 e consumo de energia em sistemas de abastecimento de água por região do Brasil. ..	18
Figura 5: Energia elétrica consumida por sistemas de SAA por m ³ de água produzida.	19
Figura 6: Origens e magnitudes das perdas reais de água.	21
Figura 7: Tipos de vazamentos.	21
Figura 8: Origens e magnitudes das perdas aparentes de água.	22
Figura 9: Perdas de água no Brasil por região.	24
Figura 10: Índice de perdas por ligação (l/ligação/dia) por macrorregião em 2022.	25
Figura 11: Exemplo de setorização em um SAA.	30
Figura 12: Método do balanço hídrico proposto pela IWA/AWWA.	32
Figura 13: Variação da vazão com a pressão em um orifício.	34
Figura 14: Método das vazões mínimas noturnas.	36
Figura 15: Registros de vazões mínimas noturnas em um setor.	37
Figura 16: Exemplo de cálculo do fator noite-dia.	39
Figura 17: Balanço de água e esgoto.	41
Figura 18: Critérios controle e mitigação de perdas de água por vazamentos.	43
Figura 19: Ações para redução e controle de perdas.	43
Figura 20: Utilização de hidrômetros inteligentes em sistema de telemetria de dados.	45
Figura 21: Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético.	51
Figura 22: Etapas da metodologia de redução otimizada de perdas de água.	53
Figura 23: Abrangência de atuação da CAEMA no Maranhão.	55
Figura 24: Concepção do sistema <i>benchmark</i>	57
Figura 25: Modelo do sistema <i>benchmark</i>	59
Figura 26: Planilha de cálculo da rede fictícia – Parte 1.	61
Figura 27: Planilha de cálculo da rede fictícia – Parte 2.	62
Figura 28: Planilha de cálculo da rede fictícia – Parte 3.	63
Figura 29: Pressões nos nós da rede <i>benchmark</i>	64
Figura 30: Fluxograma de aplicação das ações diretas e indiretas.	67
Figura 31: Localização das instalações de cada DMC.	70
Figura 32: Proporção de ocorrências de vazamentos.	73
Figura 33: Desempenho da medição em função do tempo de instalação dos hidrômetros.	77
Figura 34: Fluxograma de aplicação do algoritmo genético (evolucionário).	81
Figura 35: Metodologia de análise e otimização de perdas proposta.	84
Figura 36: Investimento em controle passivo de vazamentos x redução de perdas reais.	86
Figura 37: Investimento em controle ativo de vazamentos x redução de perdas reais.	86
Figura 38: Investimento em controle de pressões x redução de perdas reais.	87
Figura 39: Investimento em substituição de hidrômetros x redução de perdas aparentes.	87
Figura 40: Investimento em instalação de hidrômetros x redução de perdas aparentes.	88
Figura 41: Investimento anti-fraudes e atualização cadastral x redução de perdas aparentes.	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Atividades, origem e ação hidráulica determinante de rupturas em tubulações.	26
Quadro 2: Principais parâmetros dos tubos relacionados a vazamentos segundo autores.	28
Quadro 3: Áreas de atuação no controle de perdas.	42
Quadro 4: Tipos de otimização para redes de distribuição de água.	49
Quadro 5: Principais fatores relacionados com perdas reais em sistemas de distribuição.	52
Quadro 6: Principais fatores relacionados com perdas aparentes em sistemas de distribuição.	53
Quadro 7: Características dos sistemas de abastecimento do estado do Maranhão.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição entre as parcelas de perdas em função da perda total.....	23
Tabela 2: Estimativas de vazamentos evitáveis.	40
Tabela 3: Características das redes de distribuição do sistema <i>benchmark</i>	57
Tabela 4: Rugosidade da tubulação.	60
Tabela 5: Volume de Perda Total Anual por rede.	65
Tabela 6: Volume de perdas reais totais, evitáveis e inevitáveis por rede.	66
Tabela 7: Volume de perdas aparentes totais, evitáveis e inevitáveis anuais por rede.	66
Tabela 8: Volume de vazamentos visíveis e não visíveis para cada rede.	72
Tabela 9: Ocorrências típicas de vazamentos em rede e ramais.	73
Tabela 10: Número de ocorrências de vazamentos visíveis em rede e ramais.	73
Tabela 11: Custos de investigação, ocorrências e perdas evitáveis por controle ativo de vazamentos.	74
Tabela 12: Ocorrências de vazamentos e perdas evitáveis por controle ativo de vazamentos.	74
Tabela 13: Perdas evitáveis por controle ativo e número de ocorrências de vazamentos por classe.	75
Tabela 14: Pressão nas redes e custos de implantação de VRRP's.	76
Tabela 15: Redução de perda real por controle de pressões.	77
Tabela 16: Desempenho da medição em função do tempo de instalação dos hidrômetros.	78
Tabela 17: Perda de água por falta de micro-medição.	79
Tabela 18: Perda de água por fraudes e falhas de cadastro.	80
Tabela 19: Investimento em investigação de fraudes e atualização cadastral.	80
Tabela 20: Exemplos de soluções iniciais.....	82
Tabela 21: Orçamento de treinamento de funcionários do sistema benchmark, por rede.....	85
Tabela 22: Orçamento do serviço de elaboração de inventário por rede.	85
Tabela 23: Orçamento do serviço de implantação de instalações de DMC por rede.....	85
Tabela 24: Custo mensal do corpo técnico de engenharia para monitoramento de redes.	85
Tabela 25: Distribuição ótima do investimento.	89
Tabela 26: Redução de perda de água ótima para cada rede.	90

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AESBE	Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento
AWWA	American Water Works Association
BABE	Background And Bursts Estimates
BCB	Banco Central do Brasil
CAEMA	Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CMMS	Computerized Maintenance Management System
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
DAE	Departamento de Águas e Esgotos
DMC	Distrito de Medição e Controle
FAVAD	Fixed And Variable Area Discharge
FGV	Fundação Getúlio Vargas
EPA	Environmental Protection Agency
ESG	Environmental, Social and Governance
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FCI	Fator de Condição de Infraestrutura
F°F°	Ferro Fundido
FND	Fator Noite-Dia
FP	Fator de Pesquisa
FR	Fator de Redução
IBNET	International Benchmarking Networking
IPCA	Índice nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IWA	International Water Association
MOGA	Multi Objective Genetic Algorithm
NPGA	Niched Pareto Genetic Algorithm
NSGA	Nondominated Sorting Genetic Algorithm
PAES	Pareto Archived Evolution Strategy
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PVC	Policloreto de Vinila
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SIG	Sistemas de informações geográficas
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNISA	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
VRP	Válvula Redutora de Pressão
WWTP	Waste Water Treatment Plant

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1.	Objetivo geral.....	15
2.2.	Objetivos específicos.....	15
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1.	Sistemas de abastecimento de água	15
3.2.	Eficiência hidro energética	17
3.3.	Perdas de água em sistemas de abastecimento.....	21
3.3.1.	Indicadores de perda de água no Brasil e no mundo.....	23
3.3.2.	Causas de perda de água.....	26
3.4.	Setorização	30
3.5.	Métodos de análise quantitativa de perdas de água.....	31
3.5.1.	Balço hídrico (<i>Top-down balance</i>).....	32
3.5.2.	<i>Fixed and variable area discharge</i> (FAVAD)	34
3.5.3.	Vazão mínima noturna (<i>Minimum night flow</i>)	36
3.5.4.	<i>Background and bursts estimates</i> (BABE)	39
3.5.5.	<i>Water and wastewater balance</i>	41
3.6.	Ações para controle de perdas de água	42
3.7.	Tecnologias utilizadas no combate de perdas de água	44
3.7.1.	Equipamentos	44
3.7.1.1.	Hidrômetros inteligentes.....	44
3.7.1.2.	Geofones e hastes de escuta.....	46
3.7.1.3.	Loggers e correlacionadores de ruído	46
3.7.2.	Softwares de simulação hidráulica e gerenciamento de redes.....	47
3.7.3.	Técnicas de otimização.....	49
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1.	Proposição de metodologia para análise de ações de combate a perdas de água.....	52
4.2.	Sistema de referência (<i>benchmark</i>).....	55
4.2.1.	Proposição de sistema de referência	56
4.2.2.	Estimativa de perdas totais, evitáveis e inevitáveis do sistema.....	65
4.3.	Ações de combate às perdas e relações de investimento versus redução de perdas	66
4.3.1.	Ações indiretas	68
4.3.1.1.	Ação A - Capacitação de funcionários	68
4.3.1.2.	Ação B - Inventário do sistema	69
4.3.1.3.	Ação C – Setorização	70
4.3.1.4.	Ação D – Monitoramento de parâmetros	71
4.3.2.	Ações diretas (Perdas reais).....	72
4.3.2.1.	Ação 1 – Controle passivo de vazamentos.....	72
4.3.2.2.	Ação 5 – Pesquisa e controle ativo de vazamentos	74
4.3.2.3.	Ação 6 – Gerenciamento de pressões	76
4.3.3.	Ações diretas (Perdas aparentes)	77
4.3.3.1.	Ação 2 – Redução de erros de micro-medição.....	77
4.3.3.2.	Ação 3 – Universalização da micro-medição.....	78
4.3.3.3.	Ação 4 – Combate às fraudes e atualização de cadastro comercial.....	79
4.4.	Implementação do modelo de otimização e simulação das ações	81
4.5.	Avaliação dos resultados	83
5.	RESULTADOS	84
5.1.	Metodologia proposta para análise de ações de combate a perdas de água.....	84
5.2.	Custos e relações de investimento versus redução de perdas do sistema por ação	85
5.3.	Resultados da análise do sistema <i>benchmark</i>	89
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	93
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
	APÊNDICE A.....	106
	APÊNDICE B.....	107

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de importância inestimável para a vida humana, o desenvolvimento socioeconômico e a manutenção dos ecossistemas, sendo sua gestão eficiente um dos principais desafios enfrentados pelas sociedades atuais. No contexto urbano, a distribuição de água potável é uma atividade de fundamental importância, que requer sistemas bem planejados e operados para que a disponibilidade e qualidade do recurso seja garantida de forma eficiente e sustentável.

A eficiência hidro-energética é um aspecto crucial na gestão eficiente dos sistemas de distribuição de água. O consumo energético destes sistemas representa uma parcela significativa dos custos operacionais das companhias de abastecimento, tornando-se um desafio tanto econômico quanto ambiental. Melhorar a eficiência hidro-energética significa não apenas otimizar o uso de energia em operações como bombeamento, pressurização e tratamento, mas também implica em minimizar perdas de água, que podem ocorrer devido a uma variedade de causas, incluindo vazamentos, fraudes e ineficiências operacionais.

A água perdida não representa apenas o simples desperdício do recurso, mas também significa impactos econômicos consideráveis. Do ponto de vista econômico, a água perdida é água que foi captada, tratada e transportada sem gerar receita para a empresa de abastecimento, ocasionando um consumo desnecessário de energia do sistema. Já do ponto de vista ambiental, as perdas contribuem para o uso insustentável dos recursos hídricos e aumentam a demanda por fontes adicionais de água, muitas vezes implicando na exploração do recurso natural de forma mais intensiva.

No Brasil, os problemas de perdas de água em sistemas de distribuição são combatidos por meio de um conjunto de estratégias que combinam ações técnicas, operacionais e administrativas. Empresas de saneamento têm investido em tecnologias como sensores de detecção de vazamentos, sistemas de telemetria e automação para monitorar e controlar o desempenho das redes de distribuição. Além disso, políticas públicas e regulamentações estabelecem metas de eficiência que incentivam melhorias nos sistemas, enquanto parcerias com instituições acadêmicas e privadas promovem o desenvolvimento de novas ferramentas e metodologias. Apesar dos avanços, os desafios permanecem significativos, especialmente em regiões com infraestrutura mais precária ou acesso limitado a recursos financeiros.

No estado do Maranhão, os índices de perda de água em sistemas de distribuição encontram-se significativamente acima tanto da média nacional quanto da média da região

Nordeste, evidenciando um cenário de ineficiência que resulta em prejuízos econômicos e ambientais consideráveis (SNIS, 2022). As elevadas taxas de perdas comprometem a capacidade de atendimento às demandas da população, ao mesmo tempo em que aumentam os custos operacionais das empresas de abastecimento.

Os problemas relacionados às perdas de água em sistemas de distribuição podem ser enfrentados com a adoção de estratégias de gestão eficientes, que integrem abordagens tecnológicas avançadas, ações estruturais e operacionais. Entre as soluções promissoras, destaca-se a aplicação de algoritmos genéticos, uma técnica computacional inspirada na teoria de seleção natural, que tem demonstrado grande potencial em problemas de otimização complexos. Essa tecnologia permite analisar um problema considerando suas diversas variáveis e restrições, com o objetivo de identificar a melhor solução possível.

Neste contexto, o presente estudo propõe uma metodologia inovadora para otimização do combate às perdas de água em sistemas de distribuição. Para isto foi modelado um sistema *benchmark* contemplando as características de sistemas presentes no estado do Maranhão, além disso, foram desenvolvidas curvas que expressam a relação de investimento versus redução de perdas no sistema. Tanto os dados do sistema *benchmark* quanto as equações desenvolvidas foram utilizadas na aplicação de algoritmos genéticos, com o objetivo de determinar qual a solução ótima no combate às perdas de água no sistema analisado.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Propor uma metodologia para análise de ações de combate a perdas de água baseada em otimização com algoritmos genéticos, aplicando-a em um sistema de distribuição de água modelado de acordo com as características regionais do nordeste brasileiro.

2.2. Objetivos específicos

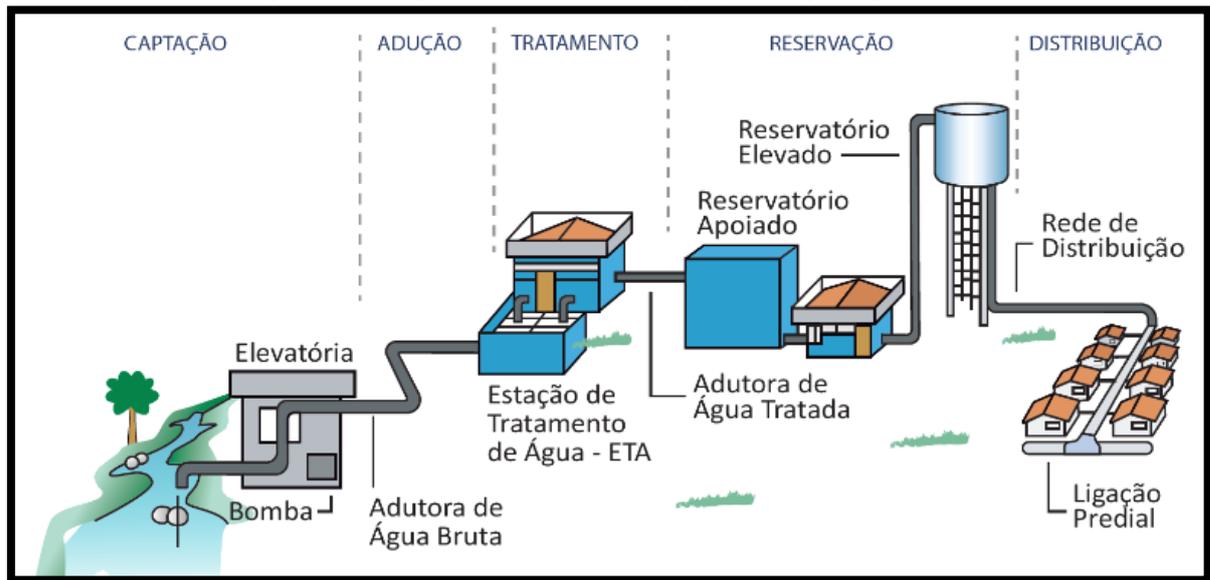
- Propor um sistema de abastecimento teórico de referência (*Benchmark*) que represente as características de um sistema típico regional do Nordeste brasileiro, mais especificamente do estado do Maranhão;
- Propor uma ordem de aplicação de ações de combate às perdas, assim como desenvolver, para cada ação, curvas que representem a relação do investimento versus redução de perdas no sistema analisado;
- Implementar algoritmos genéticos para encontrar a solução ótima de combate às perdas de água no sistema *benchmark* analisado, levando em conta os dados do sistema, as curvas de investimento versus redução de perdas e o orçamento disponível definido.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Sistemas de abastecimento de água

Um sistema de abastecimento de água (SAA) pode ser compreendido como o conjunto de obras e instalações que envolvem a sua captação (superficial ou subterrânea), adução, tratamento, reservação e distribuição para atender uma determinada população (CODEVASF, 2023). A Figura 1 exemplifica a concepção de um SAA com captação de água superficial.

Figura 1: Concepção de um SAA com captação de água superficial.



Fonte: UFCG (2019).

A etapa de **distribuição** de água é a parte do sistema de abastecimento público localizada normalmente à jusante do reservatório, sendo composta, segundo Tsutiya (2006), por tubulações e órgãos acessórios responsáveis por canalizar a água à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade, qualidade e pressões adequadas.

Segundo Tsutiya (2006), os tubos são os condutos de seção circular pelos quais a água escoar no sentido do abastecimento, em geral os tubos principais das redes são fabricados com comprimento de 6m e diâmetros acima de 50mm. Já os acessórios de uma rede de distribuição têm a função de permitir a operação do sistema, bem como a alteração da trajetória ou diâmetro dos tubos, tais como: tês, reduções, registros, válvulas, hidrantes, hidrômetros e etc.

O traçado da tubulação de distribuição de água acompanha o caminhamento das ruas da cidade, formando uma “rede” que coincide com a malha de viária (Azevedo Netto, 2015). Por conta disso, é necessário que se disponha do projeto de urbanização para determinar o traçado do sistema de distribuição em um projeto de abastecimento. A Figura 2 exemplifica em cores o traçado de projeto que acompanha o perímetro das quadras urbanas.

Figura 2: Rede de distribuição de água em planta.



Fonte: SAAEC (2020).

A NBR 12218 (2017) preconiza que durante a concepção do projeto, devem ser previstas válvulas em pontos estratégicos de forma a criar setores de manobra, que permitam isolar o abastecimento de uma área sem afetar a distribuição no restante da rede. De forma similar também devem ser previstos setores de medição, onde se faça uso de medidores de pressão e vazão com o objetivo de mensurar a evolução do consumo e monitorar o fluxo de água na rede.

Todas estas peças que compõem a rede devem oferecer resistência suficiente para suportar as pressões internas estáticas/dinâmicas, golpes de aríete e esforços externos provenientes do solo/pavimento. Por conta disso, Shammas (2013) defende a ideia de que a escolha dos materiais adequados das tubulações deve se basear na resistência, durabilidade, viabilidade econômica e segurança. Atualmente os materiais que mais são utilizados na composição dos tubos de redes de distribuição no Brasil são o Policloreto de Vinila (PVC), Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e o Ferro Fundido (F^oF^o). A Figura 3 apresenta o corte de uma rua com a tubulação da rede de distribuição de água.

Figura 3: Rede de distribuição de água.



Fonte: Es hoje (2020).

Em geral, o processo construtivo convencional das redes de distribuição de água é realizado após as etapas de terraplenagem do terreno e demarcação de ruas, assim, segue-se as etapas de escavação mecanizada de vala, contenção do solo das paredes da vala, preparo do fundo da vala com lastro de areia, assentamento da tubulação de forma manual ou mecanizada e, por fim, reaterro da vala (Ministério das Cidades, 2008).

3.2. Eficiência hidro energética

A eficiência hidro energética em sistemas de abastecimento de água é uma preocupação crescente à medida que se busca maneiras mais sustentáveis de gerenciar recursos hídricos. Esse conceito refere-se à otimização do uso de energia nos processos de captação, tratamento, distribuição e operação dos sistemas de abastecimento de água, visando a redução do consumo energético e a maximização da eficiência operacional (Pereira; Condurú, 2014).

Para manter um sistema de abastecimento de água em pleno funcionamento, a consideração dos gastos com energia são fundamentais para a viabilidade econômica do mesmo, visto que, segundo ASE (2002), o consumo de energia elétrica no setor de abastecimento de água representa cerca de 2% a 3% de toda energia gerada no mundo.

Assim, os sistemas de abastecimento de água consomem uma quantidade significativa de energia, principalmente para a operação de estações elevatórias. Segundo Manzi (2020), cerca de 90% do consumo de energia elétrica de uma empresa de saneamento é ocasionado pelos serviços de bombeamento de água e esgoto. De acordo com Luz et al. (2016), tal consumo exagerado de energia em estações elevatórias de água e esgoto ocorrem, em muitos casos, por conta dos equipamentos que são obsoletos e que não são dimensionados conforme a necessidade. Em muitas situações, a simples substituição do equipamento por outro mais eficiente e moderno já é capaz de reduzir bastante o gasto com energia elétrica a longo prazo (Luz et al., 2016).

Um indicador de eficiência hidro energética bastante utilizado é o IN058, que segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2022), é expresso em kWh/m³ através da relação entre o consumo total de energia elétrica do sistema dividido pelo volume de água produzido e importado, conforme a equação 1.

$$IN058 = \frac{\text{Consumo Total de Energia Elétrica do SAA}}{\text{Volume de água produzido e importado}} \quad (1)$$

Observa-se que a partir de 2024 o SINISA (Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico) sucedeu ao SNIS.

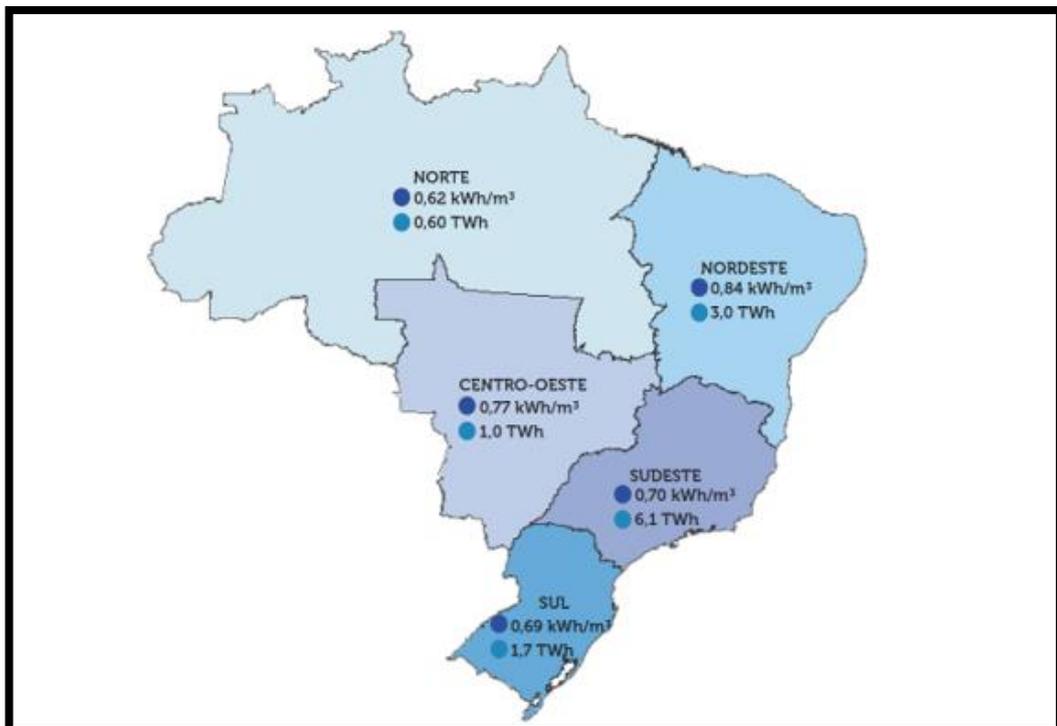
Segundo Agir (2018), os intervalos de referência com base na média deste indicador nos municípios são:

- Ideal: $IN058 \leq 0,43 \text{ kWh/m}^3$;
- Satisfatório: $0,43 < IN058 < 0,58 \text{ kWh/m}^3$;
- Insatisfatório: $IN058 \geq 0,58 \text{ kWh/m}^3$.

Segundo dados da International Benchmarking Networking – IBNET (2024), a eficiência hidro energética em sistemas de abastecimento de água no Brasil ainda se encontra aquém do restante do mundo. A falta de investimentos e aplicação de tecnologias adequadas podem ser apontadas como principais causas desse cenário preocupante.

A Figura 4 apresenta o panorama brasileiro em relação ao IN058.

Figura 4: IN058 e consumo de energia em sistemas de abastecimento de água por região do Brasil.

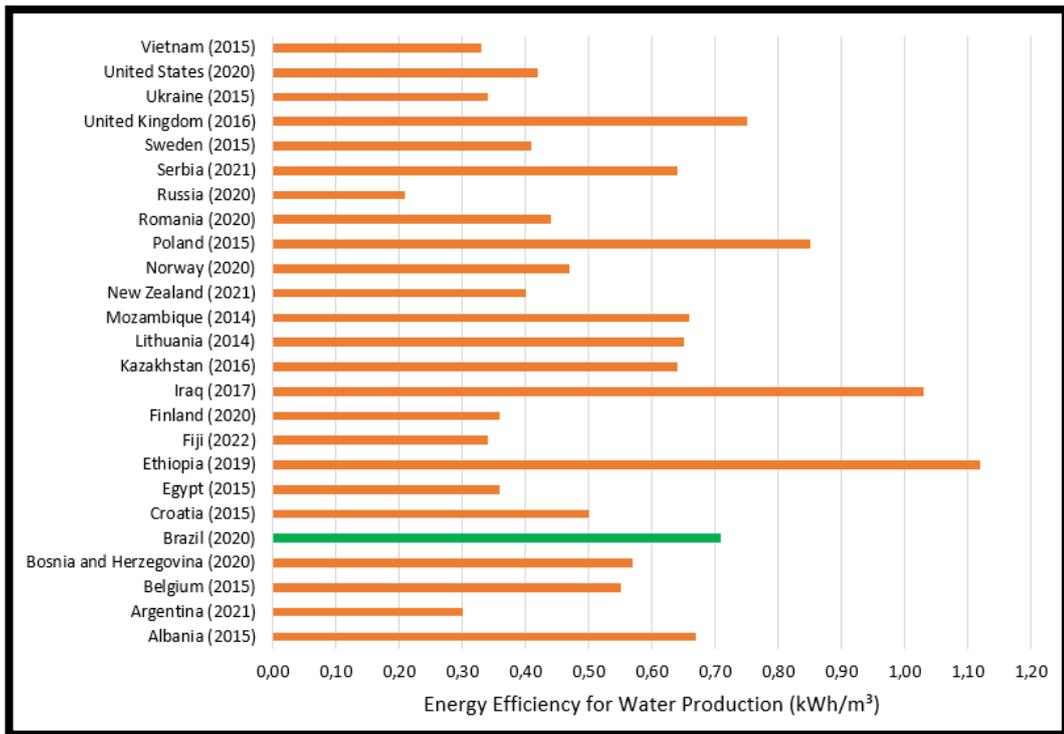


Fonte: Adaptado de SNIS (2022).

Observa-se que pela classificação proposta em Agir (2018) apresentada anteriormente, todas as regiões brasileiras possuem índices IN058 insatisfatórios. No Nordeste do Brasil a realidade é ainda mais crítica, pois segundo SNIS (2022), o índice IN058 regional é igual a 0,84 kWh/m³.

Segundo IBNET (2024), o Brasil apresenta índice médio de 0,71 kWh/m³ em eficiência hidro energética de sistemas de abastecimento de água, sendo considerado ineficiente quando comparado a outros países. A Figura 5 apresenta, em vários países, a relação entre a quantidade de energia elétrica consumida pelos sistemas de abastecimento para cada m³ de água produzida:

Figura 5: Energia elétrica consumida por sistemas de SAA por m³ de água produzida.



Fonte: Adaptado de IBNET (2024).

Neste sentido, melhorar a eficiência hidro energética destes sistemas resulta em benefícios ambientais e econômicos significativos. Segundo Tsutiya (2006) existem práticas administrativas e operacionais que podem ser implementadas para aumentar a eficiência hidro energética nos sistemas de abastecimento de água, sendo algumas delas:

Ações administrativas - São aquelas em que não há intervenção nas unidades do SAA ou em seus arranjos de operação de forma direta, sendo normalmente o primeiro tipo de ação adotada, como por exemplo:

- Correção da classe de faturamento;
- Revisão da estrutura tarifária;
- Desativação das instalações sem utilização;
- Conferência de leitura da conta de energia elétrica;
- Entendimentos com as companhias energéticas para redução de tarifas.

Ações operacionais - São ações que influenciam diretamente no funcionamento de rotina do sistema, como por exemplo:

- Ajustes e melhorias no rendimento dos equipamentos;
- Diminuição da potência dos equipamentos;
- Alteração no sistema de bombeamento-reservação;

- Utilização de inversores de frequência;
- Automação do SAA;
- Uso de geradores nos horários de ponta;
- Gestão das perdas de água.

Nesse contexto, a substituição ou ajuste de rendimento de bombas tem se mostrado uma estratégia promissora para melhorar a eficiência energética nesses sistemas. A substituição de bombas antigas por modelos mais modernos/eficientes em sistemas de abastecimento público pode gerar uma economia significativa de 10 a 30% da energia consumida, além de reduzir as perdas de água decorrentes do mau funcionamento dos equipamentos mais antigos (Coelho e Campos, 2014).

A utilização de inversores de frequência também tem se mostrado uma alternativa eficiente para otimizar a eficiência hidro energética em sistemas de abastecimento de água. Os inversores de frequência são dispositivos capazes de controlar a velocidade dos motores elétricos, permitindo um ajuste preciso da potência demandada pela bomba de água de acordo com a necessidade do sistema (Marques et al., 2006).

De acordo com Marques et al. (2006), a aplicação de inversores de frequências resulta em uma redução significativa no consumo de energia elétrica durante o processo de bombeamento da água, isso ocorre porque os inversores permitem que a velocidade do motor seja ajustada para atender à demanda real do sistema, evitando desperdícios e garantindo a máxima eficiência energética.

Segundo Rodrigues (2007), utilizando a estratégia ideal (rotações ótimas) no gerenciamento energético de bombas, o uso dos inversores de frequência pode reduzir o consumo dos sistemas de abastecimento na ordem de 25%.

Porém, além da melhoria em condições de equipamentos, Cheung et al. (2009) estabelece uma relação direta entre a eficiência hidráulica e a eficiência energética para o bom gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água, visto que a diminuição das **perdas de água** nos sistemas de abastecimento tem o potencial de melhorar os índices de eficiência hidro energética de maneira significativa.

O capítulo seguinte aborda de forma detalhada o assunto das perdas de água em sistemas de abastecimento.

3.3. Perdas de água em sistemas de abastecimento

Segundo Alegre et al. (2017), as perdas de água correspondem à diferença entre o volume de água entregue ao sistema de abastecimento e o volume de água efetivamente consumido e autorizado, sendo classificadas como “reais” ou “aparentes”.

Segundo o Ministério das Cidades (2003), as **perdas reais** (ou físicas) são definidas como o volume de água que entrou no sistema de abastecimento, mas não chegou ao consumidor final por conta de vazamentos em tubulações e reservatórios, impactando diretamente em custos adicionais para a produção da água necessária para o abastecimento. Na Figura 6, são apresentadas as principais origens e as proporções das perdas reais para as diferentes etapas de um sistema de abastecimento.

Figura 6: Origens e magnitudes das perdas reais de água.

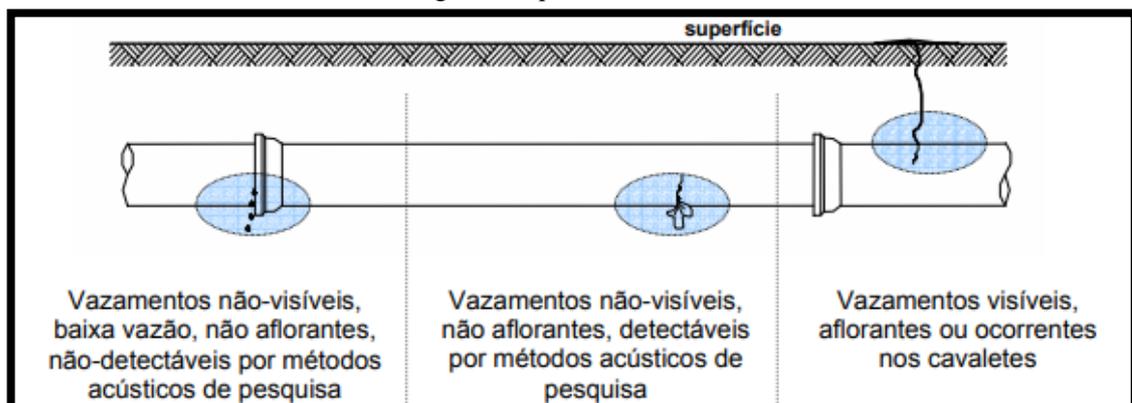
Perdas Reais (Físicas)	Subsistemas	Origens	Magnitudes
	Adução de Água Bruta	Vazamento nas tubulações Limpeza do poço de sucção*	Variável, em função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Tratamento	Vazamentos estruturais Lavagem de filtros* Descarga de lodo*	Significativa, em função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Reserva	Vazamentos estruturais Extravasamentos Limpeza*	Variável, em função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Adução de Água Tratada	Vazamentos nas tubulações Limpeza do poço de sucção* Descargas	Variável, em função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Distribuição	Vazamentos na rede Vazamentos em ramais Descargas	Significativa, em função do estado das tubulações e principalmente das pressões

* Considera-se perdido apenas o volume excedente ao necessário para a operação.

Fonte: Adaptado de Instituto Trata Brasil (2022).

Manzi (2020) sugere que a maior parte das perdas reais, cerca de 80% a 90%, ocorrem em forma de vazamentos nos ramais prediais. Na Figura 7 são apresentados os principais tipos de vazamentos em redes de distribuição.

Figura 7: Tipos de vazamentos.



Fonte: Sabesp (2004).

Segundo SABESP (2004), existem duas categorias de vazamentos: aqueles que são visíveis e os que não são. Os vazamentos visíveis são prontamente identificados e geralmente são reportados pelos consumidores à concessionária, pois a perda de água é perceptível e facilmente identificada. Denomina-se "controle passivo" a atividade das concessionárias que se concentram apenas em resolver os vazamentos visíveis.

Por outro lado, lidar com os vazamentos não-visíveis é um desafio maior, já que normalmente não se pode contar com a colaboração do consumidor final para detectá-los. Segundo a Associação Brasileira de Empresas Estaduais de Saneamento - AESBE (2015), é preciso ter uma equipe especializada em campo para reconhecer a existência e a relevância desses vazamentos, além de equipamentos específicos para identificá-los. As atividades de detecção e reparos de vazamentos não-visíveis, além dos visíveis, são chamadas de "controle ativo". Nesse caso, deve haver uma abordagem proativa e sistemática para resolver ambos os tipos de vazamentos.

As **perdas aparentes** consistem no consumo não-autorizado, caracterizado por fraudes (ligações clandestinas), falhas de cadastro e imprecisões ligadas à medição, que refletem na redução do faturamento das concessionárias. Manzi (2020) sugere que na maioria dos sistemas as perdas de água aparentes inevitáveis representam cerca de 5% do total de água produzida, onde 4% seriam ocasionados por erros de medição e 1% derivam de fraudes no sistema, alguns outros autores sugerem que este índice inevitável pode chegar próximos da faixa dos 10% a 12%. Na Figura 8, são apresentadas as principais origens e proporções das perdas aparentes.

Figura 8: Origens e magnitudes das perdas aparentes de água.

	Origens	Magnitude
Perdas Aparentes (Comerciais)	Ligações clandestinas/irregulares	Podem ser significativas, dependendo de:
	Ligações sem hidrômetros	
	Hidrômetros parados	
	Hidrômetros que subestimam o volume consumido	
	Ligações inativas reabertas	
	Erros de leitura	
	Número de economias errado	

Fonte: Adaptado de Instituto Trata Brasil (2022).

Segundo Manzi (2020), a distribuição entre as parcelas de perdas reais e aparentes varia em função das condições de infraestrutura, operação e gestão comercial da localidade. Porém, a tendência é que a porcentagem de perdas reais seja maior à medida que a perdas totais sejam mais elevadas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Distribuição entre as parcelas de perdas em função da perda total.

Perdas totais	Perdas Reais	Perdas Aparentes
Maior que 500 L/ligação.dia	60% — 70%	40% — 30%
De 200 a 499 L/ligação.dia	50%	50%
Menor que 199 L/ligação.dia	30% — 40%	60% — 70%

Fonte: Adaptado de Manzi (2020).

Tanto as perdas reais quanto as perdas aparentes possuem uma parcela denominada “inerente” ou “inevitável”, este conceito se refere ao fato de que por melhores que sejam as condições do sistema de abastecimento, sempre haverá problemas de vazamentos ou erros de medições em algum grau (mesmo que mínimo). A perda de água inevitável ocorre em todos os sistemas de distribuição de água do mundo, não existindo nenhum país com índice zero de perda de água (Winarni, 2009).

Sob o ponto de vista ambiental a perda de água representa o desperdício de um recurso natural, que será captado de um manancial, mas não será destinado à atividade que justifica sua extração da natureza. Já sob a ótica financeira as perdas de água representam gastos desnecessários com toda a infraestrutura presente nas etapas do sistema de abastecimento de água, a qual não chegará em sua totalidade ao consumidor final, e, portanto, parte do volume não será faturado e nem dará retorno financeiro para a concessionária que presta o serviço de abastecimento (Giffoni, 2021).

3.3.1. Indicadores de perda de água no Brasil e no mundo

Segundo SABESP (2017), no Brasil, é bastante difundido o uso do indicador de perdas na rede de distribuição por porcentagem (IP %), principalmente por conta do seu fácil entendimento, conforme mostra a Equação 2:

$$IP \% = \text{Volume de perdas} / \text{Volume produzido} \quad (2)$$

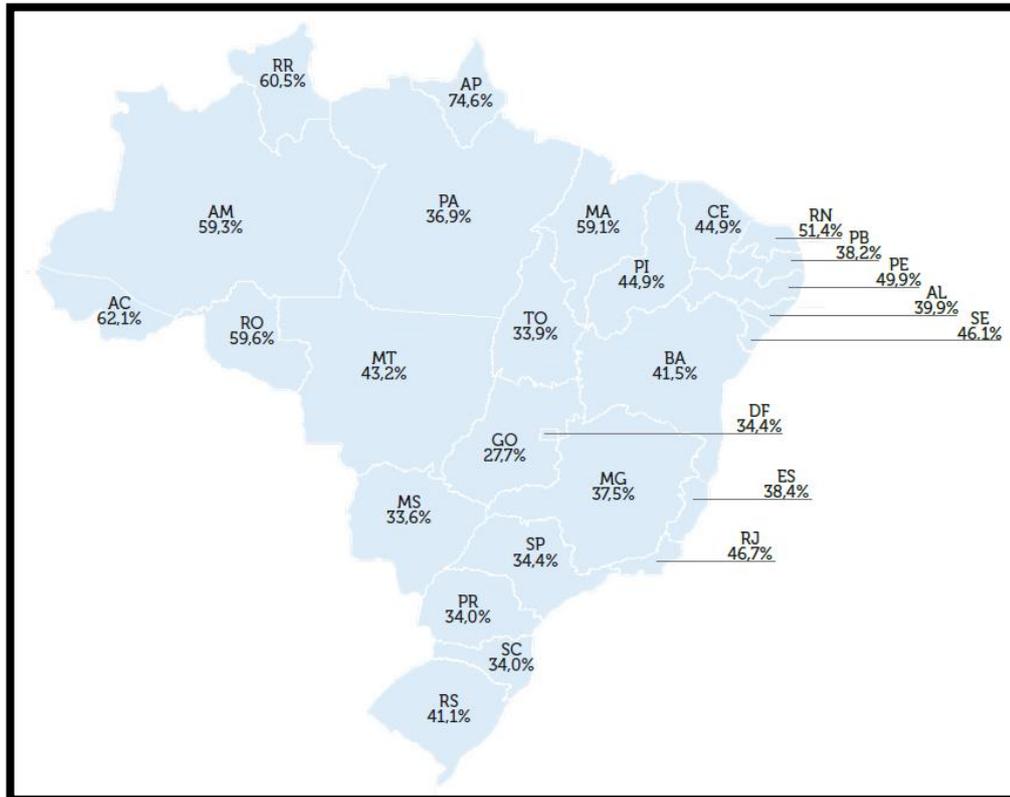
Segundo relatórios do SNIS (2022), o índice de perda de água médio no Brasil é cerca de 40,1%, ou seja, esta porcentagem de água potável é perdida entre o tratamento e a distribuição doméstica, antes de chegar ao consumidor final. Tal índice é considerado alto, visto que o índice médio de perda de água no mundo é da ordem de 35%, que representam 48,6 bilhões de metros cúbicos por ano (Farley et al, 2008). Dados do Instituto Trata Brasil (2022) apresentam índices de perda de água de vários países, como por exemplo:

- Venezuela: 62,48% (2006);
- Turquia: 58,92% (2008);
- Camarões: 39,52% (2009);
- Peru: 35,60% (2014);
- África do Sul: 33,73% (2017);
- Rússia: 26,59 % (2020);

- México: 24,08% (2012);
- China: 20,54% (2012);
- EUA: 13,58% (2020);
- Reino Unido: 20,58 % (2016);
- Coreia do Sul: 16,58% (2014);
- Austrália: 10,25% (2013).

A Figura 9 apresenta o índice de perda de água em porcentagem para cada região do Brasil no ano de 2022.

Figura 9: Perdas de água no Brasil por região.



Fonte: SNIS (2022).

Localizado na região nordeste do Brasil, o estado do **Maranhão** apresenta índice de perdas na distribuição da ordem de 59,1%, sendo assim o 6º estado brasileiro que mais perde água, sendo superado neste quesito somente pelos estados do Amapá (74,6%), Roraima (60,5%), Acre (62,1%), Rondônia (59,6%) e Amazonas (59,3%).

Apesar de bastante utilizado, o índice de perdas em porcentagem, segundo a SABESP (2017), não é o mais adequado ao comparar a performance de diferentes sistemas, visto que redes de distribuição com um mesmo volume perdido, mas com diferentes características específicas (como diferentes taxas de consumo per-capita), podem apresentar índices de perdas percentuais diferentes.

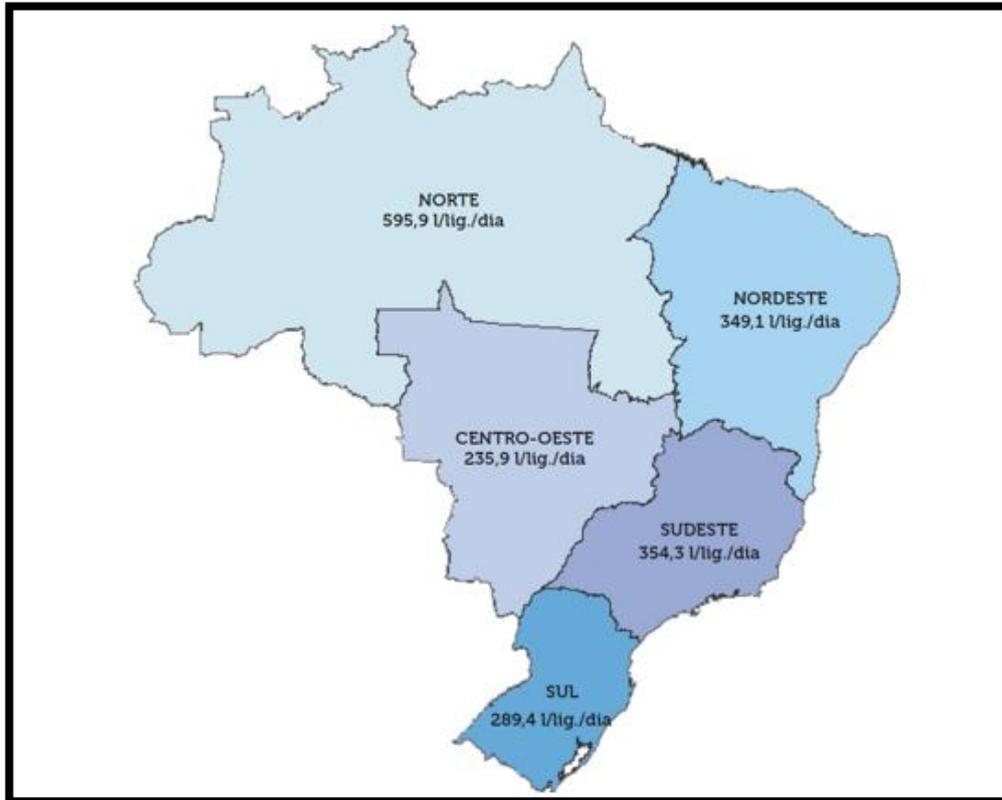
Por conta disso, segundo a SABESP (2017), alguns profissionais da área de sistemas de abastecimento consideram mais adequado utilizar o índice de perdas em volume por ligação (IP Lig), conforme Equação 3, já que, além de não sofrer a influência da taxa de consumo per-

capita, tal índice considera a dimensão da infraestrutura relacionando o volume de perdas ao número de ramais das ligações de água dos clientes.

$$\text{IP Lig (L/ligação/dia)} = \text{Volume de perdas} / \text{N}^\circ \text{ de ligações} \quad (3)$$

Na Figura 10 é apresentada a média do índice de perdas por ligação no país e em cada uma de suas regiões.

Figura 10: Índice de perdas por ligação (l/ligação/dia) por macrorregião em 2022.



Fonte: SNIS (2022).

Considerando que o volume anual de água tratada consumido no Brasil é cerca de 17,83 bilhões de m³, o Instituto Trata Brasil (2022) estima que o volume anual de água não-faturada no território nacional é a cerca de 7,3 bilhões de m³, o que equivale ao volume necessário para o abastecimento de 67 milhões de brasileiros em um ano (número que corresponde a quase o dobro de habitantes sem acesso ao abastecimento de água no país atualmente, que é cerca de 33 milhões).

De acordo com o mesmo relatório, existe um potencial de ganho bruto total de aproximadamente R\$ 54,8 bilhões levando-se em consideração o cenário realista onde as perdas de água no Brasil sejam reduzidas para 25% até o ano de 2034, conforme proposto pela portaria nº 490/2021 de Brasil (2021).

3.3.2. Causas de perda de água

Conforme Tsutiya (2006) observa, uma parcela significativa das perdas pode ser atribuída à operação e manutenção inadequadas das tubulações, bem como à gestão comercial deficiente das empresas de saneamento. O Quadro 1 mostra algumas causas de **perdas reais** por conta de danos em tubulações.

Quadro 1: Atividades, origem e ação hidráulica determinante de rupturas em tubulações.

Atividade original da falha	Origem técnica da falha	Causa da ruptura na tubulação (ação hidráulica)
Planejamento e projeto	Subdimensionamento	Sobrepessão
	Ausência de ventosas	Subpessão
	Cálculo incorreto de transientes	Sub e sobrepessão
	Regras de operação mal planejadas	Sub e sobrepessão
	Falta de articulação entre setores	Sobrepessão
	Corpo técnico sem treinamento ou deficiente	Sub e sobrepessão
Construção	Construtivas	Não aplicável
	Materiais	
	Peças Equipamentos	
	Corpo técnico sem treinamento ou deficiente	
Operação	Enchimento	Sub e sobrepessão
	Esvaziamento	Subpessão
	Manobras	Sub e sobrepessão
	Ausência de regras de operação	Sub e sobrepessão
	Corpo técnico sem treinamento ou deficiente	Sub e sobrepessão
Manutenção	Sem manutenção	Não aplicável
	Mal feita	
	Corpo técnico sem treinamento ou deficiente	
	Interação deficiente entre operação e usuário	
	Tempo de resposta	
Expansão	Inexistência de projeto	Sub e sobrepessão
	Ausência de visão conjunta da rede existente e a que será expandida	Sub e sobrepessão

Fonte: SILVA et al. (2004).

Observa-se que as causas de rupturas descritas como “Não aplicável” no Quadro 1 referem-se aos rompimentos de tubulação que não são provocados por conta de fenômenos hidráulicos, mas sim por conta de outros fatores.

Estudos conduzidos por Jing e Zhi-Hong (2012) demonstraram que o tipo de material utilizado nos tubos pode ser um determinante no índice de vazamentos de água. Os tubos feitos de diferentes materiais apresentam falhas distintas devido às propriedades do material que o compõe. Por exemplo, os tubos de amianto geralmente sofrem fissuras longitudinais, enquanto

os de aço e ferro fundido podem vaziar por causa de corrosão (Greyvenstein e Van Zyl, 2007). Entre os diversos materiais utilizados na fabricação de tubos, os de ferro apresentam o maior número de incidentes de vazamentos, enquanto os de amianto registram os menores.

A idade avançada das tubulações é um fator de grande influência no aumento dos casos de rupturas, pois quanto mais antiga é a tubulação maiores as chances do material que a compõe apresentar falhas. Portanto, é fundamental monitorar de forma eficaz o estado de conservação do material e a progressão da sua deterioração (Salamoni et al., 2014). Estudos de Saghi e Ansariaval (2015) recomendam que o tempo de manutenção ou substituição para tubos galvanizados é de 15 anos e para tubulações de polietileno é cerca de 16 anos.

O diâmetro dos tubos também é um dos elementos determinantes na taxa de vazamentos, pois quanto maior for o diâmetro do tubo, mais espessa será a parede do mesmo. Tubos com paredes mais espessas apresentam vantagens em termos de rigidez, resultando em um aumento da resistência do tubo quanto a deteriorações e pressões internas ou externas (Saghi e Ansariaval, 2015). Embora o uso de tubos de maior diâmetro envolva custos adicionais, esse investimento pode diminuir as perdas de água decorrentes de vazamentos em um programa de longo prazo (Saghi e Ansariaval, 2015).

Além disso, é essencial fornecer treinamento ao operador da rede, para que o mesmo adote procedimentos que evitem rupturas causadas por manobras inadequadas na rede, que podem desencadear múltiplos vazamentos por conta de efeitos de transientes hidráulicos (Werdine, 2002). O efeito do golpe de aríete (ou transiente hidráulico) pode ocorrer devido a manobras inadequadas na rede que provoquem aumentos bruscos de pressões internas. Tal aumento repentino de pressões pode danificar juntas e conexões da rede, resultando em vedação inadequada e, por consequência, vazamentos na tubulação. Portanto, é importante levar em consideração o efeito do golpe de aríete durante o projeto e a operação de redes para prevenir danos nas tubulações (Saghi e Ansariaval, 2015).

Pressões excessivas na rede é fator que provoca o aumento de vazamentos e o número de rompimentos na rede (Nazif et al., 2010). Segundo Thornton e Lambert (2005), em casos de pressões elevadas, a probabilidade de ruptura do tubo e a formação de rachaduras no sistema aumentam, colocando em risco o desempenho de estabilidade e os reparos adequados da rede. A incidência de pressões elevadas na rede pode ser resultado da ausência de válvulas redutoras de pressões, ventosas e válvulas de alívio (Salamoni et al, 2014). A relação matemática entre a pressão na rede e o volume de vazamentos é abordada no item 3.5.2 deste trabalho.

A locação de tubos com profundidade menor que a adequada pode resultar em maiores interferência de pressões e vibrações externas oriundas das cargas que ocorrem na superfície,

possibilitando vazamentos em maior ou menor grau (Saghi e Ansariaval, 2015). Os estudos realizados por Jing e Zi-Hong (2012) mostraram que a profundidade de colocação dos tubos no solo pode ter influência nos vazamentos, mesmo que tal influência seja de menor importância em relação a fatores como o material, diâmetro do tubo e a pressão.

A etapa de construção de redes de abastecimento de água, quando realizada sem a devida qualidade na execução dos serviços, também pode ser apontada como causa de vazamentos, pois a instalação de tubos realizada por mão-de-obra desqualificada, a falta de supervisão e o uso de técnicas não padronizadas podem resultar em vedação inadequada das juntas da canalização. Assim, é importante realizar testes de pressão hidráulica logo após a construção de tubulações para atestar o bom funcionamento da rede antes de seu uso efetivo (Saghi e Ansariaval, 2015).

Em tubulações compostas por materiais metálicos, é importante que a água que flui dentro do tubo não seja corrosiva, sendo devidamente tratada para que se previna a corrosão e enfraquecimento dos tubos. A corrosão ocasiona a erosão do material do tubo, até que pequenos furos se desenvolvam ao longo do tempo e se tornem grandes vazamentos (Saghi e Ansariaval, 2015).

O Quadro 2 sintetiza quais são as principais causas de vazamentos, de acordo com alguns autores.

Quadro 2: Principais parâmetros dos tubos relacionados a vazamentos segundo autores.

Autor	Principais parâmetros dos tubos relacionados a vazamentos
Jing e Zhi-Hong (2012)	Material, idade do tubo, pressão, diâmetro e recobrimento do tubo.
Li et al. (2011)	Material, idade do tubo, pressão e diâmetro.
Perez et al. (2011)	Pressão.
Marunga et al. (2006)	Pressão.
Nicolini et al. (2011)	Pressão.
Berardi et al. (2007)	Material, idade do tubo e comprimento.
Araujo et al. (2006)	Pressão.

Fonte: Adaptado de Saghi e Ansariaval (2015).

A redução das **perdas aparentes**, que incluem fraudes nas ligações (consumo não autorizado), ausência de hidrômetros e problemas de medição, tem como principal impacto a diminuição do volume faturado e, por conseguinte, diminuição da receita obtida pela concessionária de abastecimento (ABES, 2013).

Conforme observado pela AWWA (2016), a determinação do consumo não autorizado, resultante de furtos e fraudes, deve ser estimada utilizando dados validados pela concessionária, um processo que demanda tempo e recursos.

Os furtos compreendem as ligações clandestinas na rede de distribuição sem o usuário estar devidamente cadastrado no banco de dados comerciais da companhia, já as fraudes compreendem as alterações clandestinas em hidrômetros ou o desvio de água (*By-pass*) antes do medidor em si (SNSA, 2018). Ambos os casos (furtos e fraudes) são ocasionados devido à falta de fiscalização do consumo e falhas de cadastro por parte da concessionária.

A ausência de hidrômetros nas residências também provoca a perda de água aparente devido à falta de dados de consumo para cobrança, pois nesses casos, em alguns estados brasileiros, a cobrança é realizada conforme a tarifa mínima do serviço de abastecimento de água (TJRJ, 2019).

Já em casos em que a companhia dispõe de hidrômetros instalados nas residências, existe o problema da manutenção e substituição do aparelho. Pois à medida que o tempo passa e os componentes dos hidrômetros sofrem desgaste natural, a capacidade de registrar com precisão o volume real de água consumida acaba prejudicada, sendo, portanto, necessária a substituição do aparelho. O período para a troca dos medidores pode ser determinado com base nas especificações técnicas fornecidas pelo fabricante, no entanto, de acordo com a INMETRO (2022), é exigido que a precisão dos hidrômetros seja verificada dentro de um prazo máximo de 7 anos, a partir do qual é recomendada a sua substituição. Assim, os erros de medição estão relacionados com a falta de manutenção e substituição de hidrômetros por parte das concessionárias.

A falta de investimentos no setor do saneamento urbano também pode ser apontado como uma das causas para os altos índices de perdas reais e aparentes, segundo estudo lançado pela Confederação Nacional da Indústria – CNI (2021) o Brasil precisaria investir R\$ 42,7 bilhões para reduzir o índice de perdas de água para níveis satisfatórios, sendo este montante distribuído ao longo de 12 anos, configurando um esforço inédito de investimentos aplicados exclusivamente no combate às perdas de água, uma vez que representa o dobro do valor empreendido no setor durante todo o período de 2001 a 2020 somado.

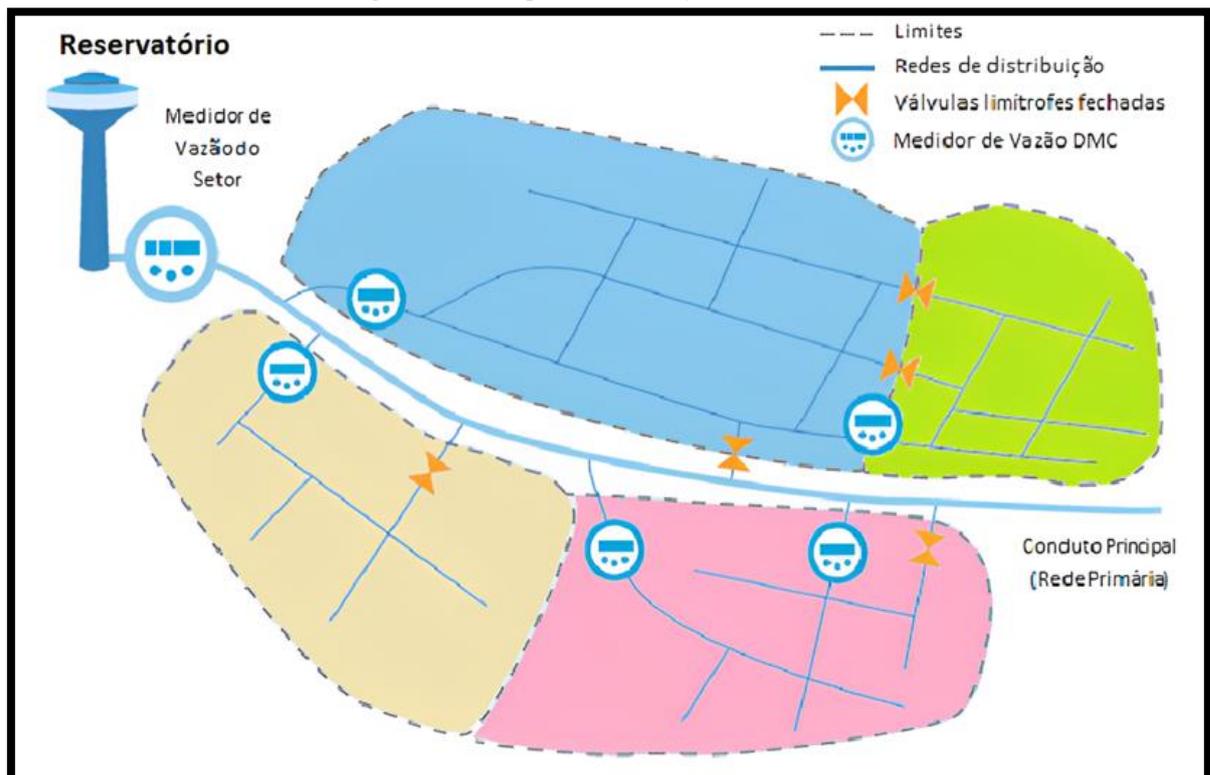
3.4. Setorização

Para que a análise de perdas seja possível, antes de mais nada deve-se dispor de dados consistentes de medição. Segundo Manzi (2020), sem dados de medições confiáveis torna-se impossível mensurar com precisão as perdas de água em um sistema, daí vem a importância da setorização. A **setorização** das redes de distribuição de água é reconhecida como uma metodologia consolidada para o controle operacional, que consiste na delimitação de áreas que podem ser parcialmente isoladas do restante da rede.

A introdução do conceito de setorização em redes de distribuição de água tem origem no início dos anos 80, onde as concessionárias de abastecimento de água do Reino Unido designaram setores como áreas no sistema delimitadas pelo fechamento de válvulas e medidores de vazão. (Farley, 2001; Di Nardo et al, 2013).

A setorização pode ser feita através da instalação de medidores de vazão (hidrômetros) e válvulas em pontos estratégicos da rede, onde através da operação das mesmas seja possível isolar o abastecimento em determinadas áreas do sistema que são denominadas como Distritos de Medição e Controle (DMC's), de forma que seja possível monitorar e controlar a vazão/pressão em cada distrito (Campbell et al., 2016; Zhang et al., 2019). A Figura 11 apresenta um exemplo de setorização em um SAA em uma área urbanizada, onde cada cor representa um DMC.

Figura 11: Exemplo de setorização em um SAA.



Fonte: Adaptado de Klingel e Knobloch (2011).

Segundo Tsutiya (2006), para fins de manutenções do sistema ou durante a própria operação da rede, o isolamento do setor deve ser feito com o menor número de válvulas de fechamento possível. Além das válvulas de manobra, utilizam-se Válvulas Redutoras de Pressão (VRP's) para controle de pressão, além de medidores de vazão (Hidrômetros), de forma que se registre os dados de vazão acumulada.

Segundo Giffoni (2021) não há manutenção adequada em redes de distribuição sem a correta setorização que viabilize manobras operacionais necessárias. A divisão de uma rede original em setores apropriados representa um desafio significativo para as concessionárias de abastecimento, principalmente devido à complexidade intrínseca da rede. Porém, apesar de ser uma tarefa trabalhosa, Di Nardo et al. (2013) e Saldarriaga et al. (2019) destacam que setorizar a rede em DMC's traz uma série de benefícios, tais como:

- Maior facilidade em investigar vazamentos para redução de perdas de água;
- Melhor gerenciamento de pressão por conta das VRP's;
- Redução da frequência de rupturas da tubulação ocasionada pelo melhor controle de pressão na rede;
- Melhor segurança do sistema contra eventos de contaminação acidental ou criminosa por meio do isolamento dos setores;
- Possibilidade de DMC's independentes que sejam abastecidos por fonte única.

3.5. Métodos de análise quantitativa de perdas de água

A partir dos dados de medição obtidos pela setorização, o índice de perdas pode ser estimado através de diferentes métodos, onde em geral objetiva-se mensurar a quantidade de água perdida em todo sistema ou em apenas um setor. Segundo Al-Washali et al (2020) a magnitude das perdas de água em um determinado sistema pode ser analisada através vários métodos, dentre eles:

- Balanço hídrico (*Top-down Balance*);
- *Fixed and Variable Area Discharge Paths (F.A.V.A.D)*;
- Vazão mínima noturna (*Minimum night flow*);
- *Background and Bursts Estimates (BABE)*;
- *Water and wastewater balance*.

Cada um dos métodos possui particularidades de utilização, onde por vezes são utilizadas duas ou mais metodologias em conjunto para a determinação das perdas de água em um sistema (Thornton et al., 2008). Segue o detalhamento de cada um dos métodos.

3.5.1. Balanço hídrico (*Top-down balance*)

O método do **Balanço Hídrico** (*Top-down Balance*), proposto pela *International Water Association* - IWA e pela *American Water Works Association* – AWWA, fornece uma visão abrangente das perdas em seus sistemas, ajudando na identificação de áreas críticas, estabelecimento de metas de redução de perdas e direcionamento de esforços para melhorar a eficiência operacional e reduzir desperdícios de água (Bezerra e Cheung, 2013).

A Figura 12 apresenta um esquema de balanço hídrico, onde os dados de volumes do sistema podem ser obtidos através de medições ou estimada através de referências bibliográficas e investigações no sistema.

Figura 12: Método do balanço hídrico proposto pela a IWA/AWWA.

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

Fonte: Alegre et al. (2017).

Neste método, de acordo com AL-Washali et al. (2018), inicialmente são estimados os índices de **perdas aparentes / *Apparent losses* (AL)** de acordo com a Equação 4.

$$AL = MI + UC \quad (4)$$

Onde:

Perdas aparentes / *Apparent losses* (AL): Perdas relacionadas a fraudes, falhas de cadastro e imprecisões ligadas à medição.

Erros de medição / *Meter inaccuracies* (MI): Podem ser estimados de acordo com especificações técnicas dos medidores utilizados, de acordo com análises de tendências no histórico dos dados de faturamento por um determinado período, e por fim através de

testes em medidores (utilizando parâmetros de diferentes vazões) de modo a representar o uso típico de água pelo cliente (Arregui et al., 2007; AWWA, 2016).

Consumo não autorizado / *Unauthorised consumption* (UC): Deve ser estimado com base na experiência da concessionária com dados validados, cujo levantamento requer tempo e recursos (AWWA, 2016). No entanto, uma prática comum é assumir o volume de UC como sendo 0,1% a 0,25% da água fornecida (Lambert e Taylor, 2010; Vermersch et al., 2016). Para países em desenvolvimento, Mutikanga et al. (2011) sugere assumir o UC como 10% do Consumo autorizado (AC).

Em seguida, de acordo com AL-Washali et al. (2018), calcula-se o **Volume não faturado / *Non-revenue water* (NRW)** através da Equação 5:

$$NRW = SIV - BC \quad (5)$$

Onde:

Volume não faturado / *Non-revenue water* (NRW): Quantidade de água que não é devidamente faturada pela empresa de abastecimento de água.

Volume de água que entra no sistema / *System input volume* (SIV): É o volume obtido através da macromedição na saída da etapa de tratamento.

Consumo autorizado / *Billed consumption* (BC): É o volume obtido através das informações de micromedição, faturamento da concessionária e volume estimado para atividades operacionais ou de caráter social.

Após isto, segundo AL-Washali et al. (2018), utiliza-se a Equação 6 para calcular a **Perda de água / *Water Loss* (WL)**.

$$WL = NRW - UAC = AL + RL \quad (6)$$

Onde:

Volume não faturado / *Non-revenue water* (NRW): Quantidade de água que não é devidamente faturada pela empresa de abastecimento de água.

Consumo autorizado não faturado / *Unbilled authorised consumption* (UAC): É o volume utilizado para atividades operacionais ou de caráter social, como atividades de combate à incêndios.

Perdas aparentes / *Apparent losses* (AL): Perdas relacionadas a fraudes, falhas de cadastro e imprecisões ligadas à medição.

Perdas reais / *Real Losses* (RL): Perdas relacionadas a vazamentos em tubulações e ligações prediais.

Por fim, de posse dos dados calculados, elaborase uma tabela de balanço hídrico semelhante ao ilustrado na Figura 12, porem com a adição dos dados obtidos em cada parcela de água do sistema. Com base nesse balanço, obtêm-se o índice de perdas, que são comparados com parâmetros de referência, de forma que seja possível avaliar a situação real do sistema, além de definir metas realistas e planos de ações efetivas para diminuição dos índices de perdas de água. (Alegre et al., 2017; Lambert and Hirner, 2000).

3.5.2. Fixed and variable area discharge (FAVAD)

Uma outra forma de se mensurar perdas reais, segundo AESBE (2015) é através da correlação entre as perdas e a pressão na rede. Neste sentido, a vazão de água sob pressão através de um orifício pode ser demonstrada pela Equação 7 como sendo:

$$Q = V \cdot A = Cd \cdot (2gh)^{0.5} \cdot A \quad (7)$$

Onde:

Q = vazão (m³/s);

Cd = coeficiente de descarga;

A = Área do orifício (m²);

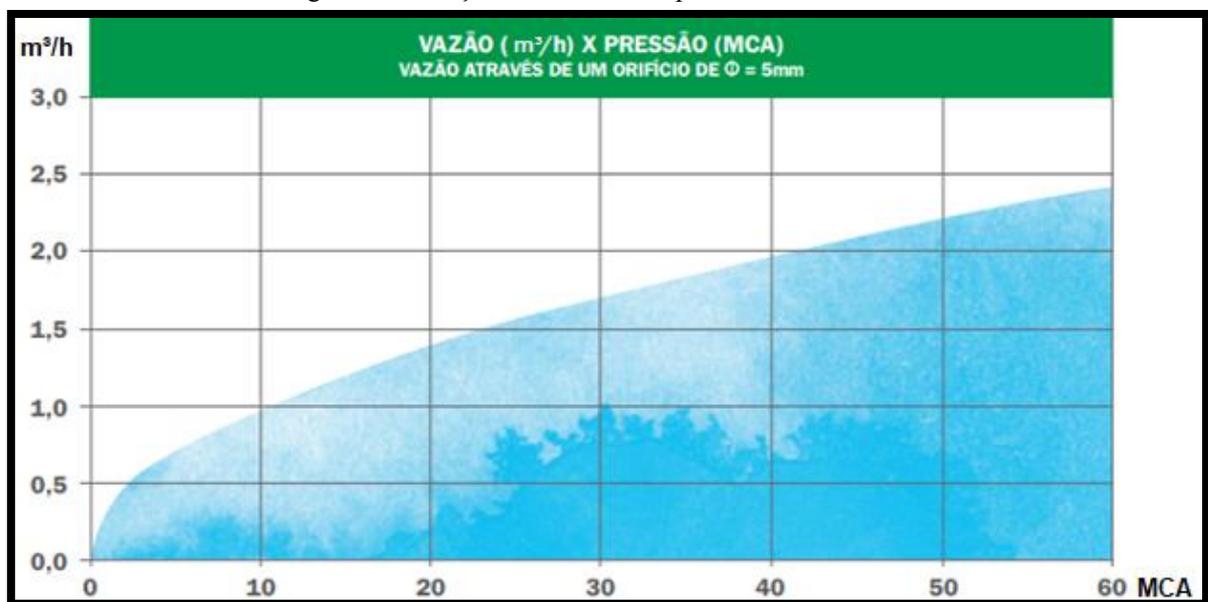
V = Velocidade da água no orifício (m/s);

g = 9,81 m/s² (aceleração da gravidade);

h = pressão (m.c.a).

A Figura 13 expressa a vazão através de um orifício de 5mm variando conforme a pressão:

Figura 13: Variação da vazão com a pressão em um orifício.



Fonte: Adaptado de AESBE (2015).

A partir do princípio hidráulico de orifícios, May (1994) equacionou a relação entre pressão e vazamentos nas redes de distribuição, criando o método FAVAD (*Fixed and Variable Area Discharge*), onde considera-se que o formato dos furos e orifícios por onde ocorrem os vazamentos são irregulares, além de que o tamanho dos orifícios varia com a pressão e o tipo de material, conforme Equação 8.

$$\frac{Q1}{Q0} = \left(\frac{P1}{P0}\right)^{N1} \quad (8)$$

Onde:

Q1 = vazão final de vazamentos (m³/s);

Q0 = vazão inicial de vazamentos (m³/s);

P1 = Pressão média da rede final (m.c.a);

P0 = Pressão média da rede inicial (m.c.a);

N1 = Fator de escala que varia conforme a composição dos materiais utilizados na infraestrutura do sistema.

A obtenção do valor de N1 pode ser realizada através de bibliografia, onde geralmente adota-se:

N1 = 0,5 para tubulações metálicas;

N1 = 1,5 para juntas e conexões;

N1 = 1,5 a 2,5 para orifícios com grandes perdas de água e em tubulações plásticas.

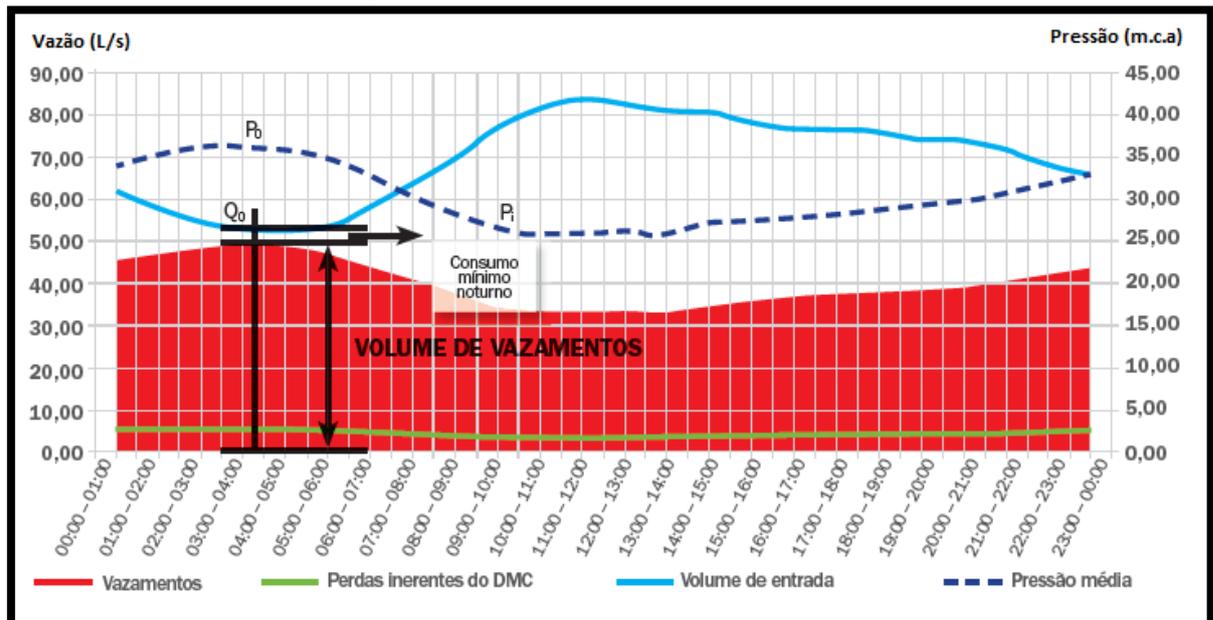
N1 = 1,0 a 1,15 grandes redes com materiais diversificados.

Segundo AESBE (2015), outra maneira de obtenção do valor de N1 é isolar seu valor na Equação 8 e substituir na fórmula as variáveis de pressões e vazões com os dados obtidos através de medições *in-loco*, que devem ser realizadas em um ambiente de distribuição isolado e com apenas uma entrada, onde uma válvula redutora de pressão está posicionada. É crucial a área de estudo esteja adequadamente pressurizada e que não haja interrupções no fornecimento de água, também é recomendável que seja realizado o teste durante a madrugada, para evitar impactos no abastecimento, já que o consumo está em seu nível mais baixo.

3.5.3. Vazão mínima noturna (*Minimum night flow*)

O método da vazão mínima noturna, também conhecido como método do coeficiente noturno de vazão, é definido por Gonçalves e Alvin (2007) como uma abordagem eficiente para avaliar as perdas de água em sistemas de abastecimento. Os autores destacaram que as vazões noturnas são um indicador adequado para identificar as perdas, uma vez que, durante a madrugada, a demanda de água é baixa e o consumo é mais estável. A Figura 14 exemplifica o volume de vazamentos durante o horário noturno.

Figura 14: Método das vazões mínimas noturnas.



Fonte: Adaptado de AESBE (2015).

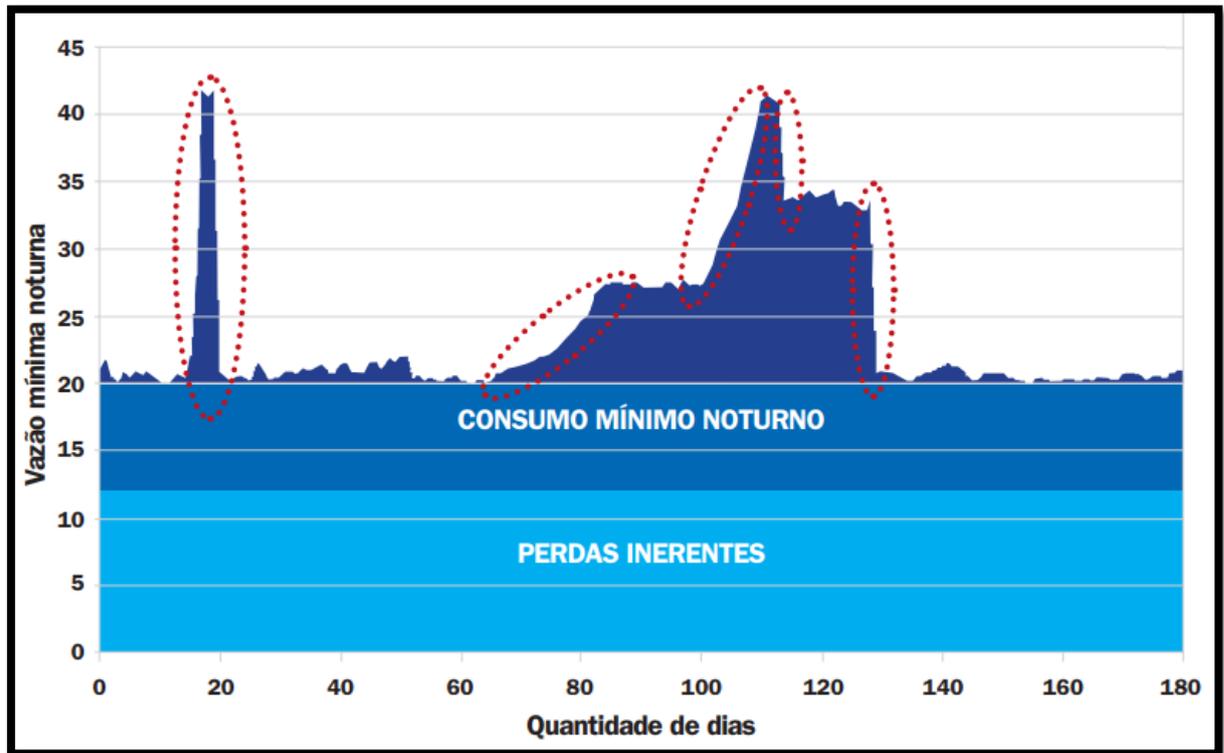
Lambert (1994) / Lambert e Bessey (1994) fornecem uma ampla gama de informações teóricas e práticas sobre o assunto, não só definindo o conceito, mas também apresentando o roteiro básico para utilização do método da vazão mínima noturna.

Segundo os autores, a avaliação de perdas por este método inicia a partir da medição hidrométrica em pontos estratégicos do sistema de abastecimento, onde durante períodos de baixa demanda (geralmente durante a madrugada) são registradas as vazões noturnas nos medidores instalados. Esses dados são coletados ao longo de um período de tempo adequado para garantir uma amostragem representativa. Ao interpretar os resultados, é necessário levar em conta fatores externos que podem afetar as vazões mínimas noturnas, como condições climáticas, feriados, dias da semana e etc.

Os dados de vazão mínima noturna podem ser comparados com valores de referência para o consumo noturno, que podem ser obtidos por meio de dados históricos do sistema ou de padrões de referencial teórico, permitindo assim a identificação de desvios significativos que

por sua vez indicam a presença de perdas de água na região analisada. Variações repentinas de medições em áreas onde há registros e controle da vazão mínima noturna sugerem fortemente a existência de perdas, como exemplificado por AESBE (2015) na Figura 15, onde apresenta-se o gráfico de uma sequência de medições durante 180 dias de vazões mínimas noturnas em um setor.

Figura 15: Registros de vazões mínimas noturnas em um setor.



Fonte: AESBE (2015).

Segundo AESBE (2015), o pico à esquerda destacado em vermelho representa um vazamento visível, que surgiu e logo foi detectado e consertado. O segundo e o terceiro destaques no gráfico correspondem a dois vazamentos não visíveis que surgiram, onde as equipes de detecção acústica foram acionadas até que os vazamentos foram encontrados e reparados, o que se refletiu na diminuição da curva de vazões até o patamar mínimo noturno (quarto e quinto destaques no gráfico).

Outro exemplo são casos de altas vazões noturnas em locais com baixos índices de perdas (que sejam previamente conhecidos), indicando vazamentos nas redes internas dos consumidores. Por outro lado, casos que apresentem pequenas vazões no horário noturno combinado com altos índices de perdas podem apontar para consumos não registrados (clandestinos) significativos ou imprecisões nas medições de entrada e consumo (Gonçalves e Koide, 1999).

Segundo Manzi (2020), um dos indicadores para que seja acionada a pesquisa de vazamentos em um determinado setor se dá através do Fator de Pesquisa (FP) demonstrado na Equação 9.

$$FP = \frac{\text{Vazão Mínima Noturna}}{\text{Vazão Média Diária}} \quad (9)$$

Ainda segundo o autor, valores de FP superiores a 0,25 sugerem a existência de vazamentos que justificam tecnicamente a investigação no local. Tal investigação usualmente envolve pesquisa acústica, utilização de escutas e geofones associados à levantamentos de pressão na rede.

De acordo com Paracampos (2002), o método da vazão mínima noturna tem sido bastante utilizado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) na análise das perdas de água, além disso, diversas pesquisas reconhecem o monitoramento contínuo da vazão mínima noturna como a melhor ferramenta para estimar as perdas reais.

Mesmo apresentando diversas vantagens, este método não é indicado para avaliação de perdas em regiões cujo funcionamento do sistema aconteça de forma intermitente, em que a falta de água durante o dia ocasione o abastecimento durante a noite, tornando os dados de consumo noturno pouco confiáveis para análise de perdas (Gonçalves e Koide, 1999).

Segundo AESBE (2015), uma vez obtido o volume de água perdida em vazamentos no horário noturno, pode-se calcular o volume diário perdido, através do fator noite-dia (FND), que pode ser expresso pela Equação 10:

$$FND = \sum \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{N1} \quad (10)$$

Onde:

P_i é a pressão média da rede em um horário qualquer do dia (m.c.a);

P_0 é a pressão média na hora em que ocorre a vazão mínima noturna (m.c.a);

$N1$ é o fator de escala que varia conforme os materiais utilizados no sistema.

A Figura 16 apresenta um exemplo de cálculo do fator noite-dia realizado conforme a Equação 10, em que:

- O sistema é constituído em sua maioria de tubulações plásticas (Portanto $N1 = 1,5$);
- O registro das pressões médias por faixa de horário foi obtido através de medições em campo.

Dessa forma, para que seja calculado o volume perdido diário, o valor do FND deverá ser multiplicado pelo volume de vazamentos no horário de vazão mínima noturna.

Figura 16: Exemplo de cálculo do fator noite-dia.

N1 ADOPTADO:								1,50
Ordem	Horário	Pressões médias mca	$FND = \sum (P_i/P_{3,4})^{N1}$	Ordem	Horário	Pressões médias mca	$FND = \sum (P_i/P_{3,4})^{N1}$	
1	00:00 - 01:00	22,00	0,88	14	13:00 - 14:00	17,00	0,60	
2	01:00 - 02:00	23,00	0,94	15	14:00 - 15:00	18,00	0,65	
3	02:00 - 03:00	24,00	1,00	16	15:00 - 16:00	18,00	0,65	
4	03:00 - 04:00	24,00	1,00	17	16:00 - 17:00	19,00	0,70	
5	04:00 - 05:00	23,00	0,94	18	17:00 - 18:00	19,00	0,70	
6	05:00 - 06:00	23,00	0,94	19	18:00 - 19:00	20,00	0,76	
7	06:00 - 07:00	22,00	0,88	20	19:00 - 20:00	20,00	0,76	
8	07:00 - 08:00	21,00	0,82	21	20:00 - 21:00	21,00	0,82	
9	08:00 - 09:00	20,00	0,76	22	21:00 - 22:00	21,00	0,82	
10	09:00 - 10:00	19,00	0,70	23	22:00 - 23:00	22,00	0,88	
11	10:00 - 11:00	18,00	0,65	24	23:00 - 00:00	22,00	0,88	
12	11:00 - 12:00	17,00	0,60	PMS - TOTAIS:		20,38		
13	12:00 - 13:00	16,00	0,54	FND			18,86	

Fonte: Adaptado de AESBE (2015).

3.5.4. Background and bursts estimates (BABE)

A metodologia BABE (*Background and bursts estimates*) que pode ser traduzida como “Estimativa de Vazamentos Inerentes e Rompimentos” é uma forma de avaliação das perdas físicas proposta por Bessey e Lambert (1994), cujo princípio consiste na identificação dos parâmetros e processos que influenciam tais perdas, considerando três tipos distintos:

- **Vazamentos inerentes:** Ocorrendo normalmente em juntas e, na maioria dos casos, não detectáveis. Além disso, são caracterizados por vazões muito pequenas, porém contínuas (geralmente menores que 0,25 m³/h);
- **Rompimentos e vazamentos comunicados:** Usualmente reportados através de reclamações dos consumidores e notificação dos próprios funcionários operadores da rede. Caracterizam-se por vazões elevadas, mas geralmente de curta duração;
- **Rompimentos e vazamentos não comunicados:** Sendo detectáveis, na maioria das vezes, somente por intermédio de pesquisas regulares de vazamentos. Normalmente apresentam vazões moderadas cuja duração é função da eficiência de pesquisa e do controle ativo de vazamentos.

Tal classificação de vazamentos foi ilustrada anteriormente na Figura 7.

Segundo AL-Washali et al. (2018), este método é mais frequentemente utilizado para a análise de “subcomponentes” de perdas reais, que consistem em inúmeros eventos de

vazamento onde o volume de perda de cada evento é calculado pela multiplicação da vazão média pela duração do vazamento até o momento do reparo. Com base nesse conceito, parte do vazamento é evitável e o restante é inevitável, conforme mostra a Equação 11.

$$Vazamentos\ totais = Vazamentos\ evitáveis + Vazamentos\ inevitáveis \quad (11)$$

Os **Vazamentos Evitáveis / Avoidable Leakage (AVL)** em tubulações principais e ramais prediais podem ser estimados, segundo Farley et al. (2008), com base nos fatores apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Estimativas de vazamentos evitáveis.

Local do vazamento	Vazão de vazamentos reportados [litros · Pressão (m.c.a) / horas]	Vazão de vazamentos não-reportados [litros · Pressão (m.c.a) / horas]
Tubulação principal	240	120
Ramais prediais	32	32

Fonte: Adaptado de Farley et al. (2008).

Já os **Vazamentos Inevitáveis / Unavoidable Leakage (UVL)** podem ser estimados através de diversas metodologias. Segundo AESBE (2015), a Equação 12 correlaciona o comprimento da tubulação, número de ramais prediais e pressão de média de operação da rede para o cálculo dos vazamentos inevitáveis adaptados à realidade dos sistemas brasileiros.

$$UVL = (9,6 Lm + 0,6 Nc) * Pm \quad (12)$$

Onde:

UVL são os vazamentos inevitáveis (l/dia);

Lm é o comprimento da tubulação principal (Km);

Nc é o número de ramais prediais;

Pm é pressão média de operação da rede (m.c.a).

Após calculadas as perdas inevitáveis, Fanner e Thornton (2005) recomendam a aplicação de um Fator de Condição de Infraestrutura (FCI) ao valor calculado de vazamentos inevitáveis, modo a considerar as diferenças entre as condições para os quais este modelo foi desenvolvido em relação a outros casos.

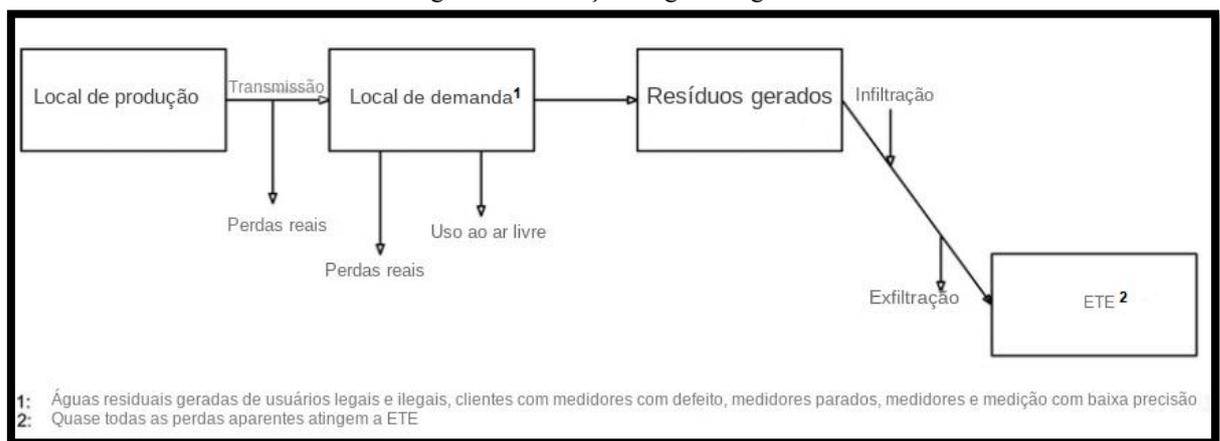
Segundo Thornton et al. (2008), a metodologia BABE é mais eficaz quando aplicada em conjunto com a metodologia FAVAD (*Fixed and Variable Area Discharge*), já abordada no item 3.5.2 deste trabalho.

3.5.5. Water and wastewater balance

O método *Water and Wastewater Balance* é uma abordagem utilizada para analisar as perdas de água em sistemas de abastecimento que se baseia no princípio do balanço de água- esgoto, onde se assume que a água efetivamente consumida pelos usuários eventualmente entra nos sistemas de esgotos e alcança a estação de tratamento de esgotos (Al-Washali et al.,2018).

Na Figura 17 é apresentado um balanço teórico de água e esgoto que pode ser usado para estimar as perdas aparentes, desde a captação de água até a chegada do efluente na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) / *Wastewater Treatment Plant* (WWTP).

Figura 17: Balanço de água e esgoto.



Fonte: Adaptado de AL-Washali et al. (2018).

Ao contrário do sistema de consumo autorizado, a vazão de esgotos não é afetada ou reduzida por imprecisões nos medidores dos clientes ou erros no manuseio de dados, assim, a vazão do esgoto representa o consumo real, incluindo o consumo de ligações fraudulentas. Segundo AL-Washali et al. (2018), o volume de perdas aparentes pode ser determinado analisando a vazão de entrada da ETE ou através da Equação 13:

$$Q_{pa} = (\alpha + 1) Q_{ete} - (\beta - \gamma + 1) Q_{cft} \quad (13)$$

Onde;

Q_{pa} – Vazão de perdas aparentes (m³/ano);

Q_{ete} – Vazão de chegada na estação de tratamento de esgoto (m³/ano);

Q_{cft} – Vazão de consumo faturado e medido no sistema (m³/ano);

α , β e γ – Fatores adimensionais relacionados com as características do sistema, que são exemplificados com maiores detalhes no trabalho de AL-Washali et al. (2018).

Tal método é mais indicado para localidades que possuam uma boa cobertura de redes de coleta de esgoto sanitário, que infelizmente, não é o caso da maioria das cidades brasileiras.

3.6. Ações para controle de perdas de água

Uma vez que sejam identificadas as principais causas de perdas de água em um sistema de distribuição, procede-se com ações para minimizar tais índices de perda. O Quadro 3 identifica as principais áreas de atuação no controle de perdas.

Quadro 3: Áreas de atuação no controle de perdas.

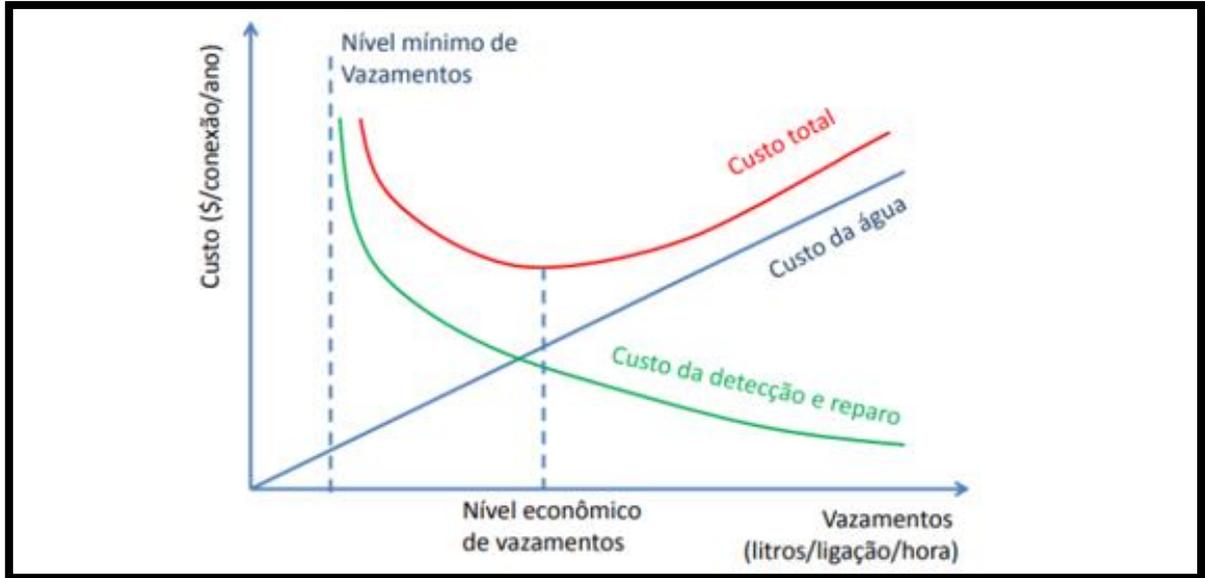
Tipo de Perda	Áreas de atuação	Comentário
Aparente	Macromedição	Não se controla o que não se mede. Não se controla bem o que não se mede bem. Quanto mais macro medidores necessários para um mesmo sistema, maior a incerteza (que não deve ser superior a 2%).
Aparente	Erros de leitura e manipulação dos dados	Erros não metrológicos no processo de faturamento podem chegar a até 2% do volume faturado.
Aparente	Comparação permanente entre volumes macro e micro medidos	A simples análise gráfica permite identificar aumentos de perdas reais (vazamentos) ou aparentes (envelhecimento de medidores e fraudes).
Aparente	Determinação de erro médio dos medidores	Além das características gerais, como tipo, idade e volume acumulado, aspectos locais de uso e qualidade da água podem ter grande influência sobre o desgaste dos medidores.
Aparente	Fiscalização	Muitas instalações já nascem com grandes perdas por fraudes. Diversos erros de instalação - medidores inclinados ou vazamentos na instalação - contribuem para o aumento das perdas aparentes.
Aparente	Grandes consumidores	Grandes receitas merecem grande atenção, bom dimensionamento e uma “visita” de vez em quando.
Aparente	Usos não hidrometrados	Usos comuns como hidrantes, prédios públicos, lavagem de ruas e pontos de taxi podem não ser arrecadados, mas devem ser contabilizados.
Real	Controle ativo de vazamentos	Vazamentos reportados (visíveis) representam menos de 10% do total de perdas reais.
Real	Histórico de vazamentos	Frequências elevadas ou em elevação do número de rompimentos pedem controle de pressão. Mapeamento dos eventos orienta programa de renovação de ativos (trocas de redes e ligações).
Real	Avaliação de transientes hidráulicos	Mais frequente em adutoras e linhas de recalque, os efeitos transitórios de manobras em redes podem ser danosos devido a topologia da rede e ondas de reflexão.
Real	Velocidade e qualidade dos reparos	Realizar reparos com rapidez e qualidade (evitando retrabalhos) é tão importante quanto localizar vazamentos ocultos. As equipes de reparo requerem atenção, treinamentos e recursos tanto quanto as de pesquisa.
Real	Monitoramento da Vazão Mínima Noturna (VMN)	Novos vazamentos ou manobras inadequadas podem ser identificadas rapidamente apenas com o acompanhamento sistemático da V.M.N.

Fonte: Adaptado de Manzi (2020).

É importante observar que é inviável eliminar completamente as perdas de água. Nesse contexto, Lambert e Hirner (2000) propõem o estabelecimento de limites/critérios técnicos e econômicos eficientes para a redução de perdas, levando em consideração suas características

específicas de cada sistema analisado. A Figura 18 relaciona graficamente critérios controle e mitigação de perdas de água por vazamentos.

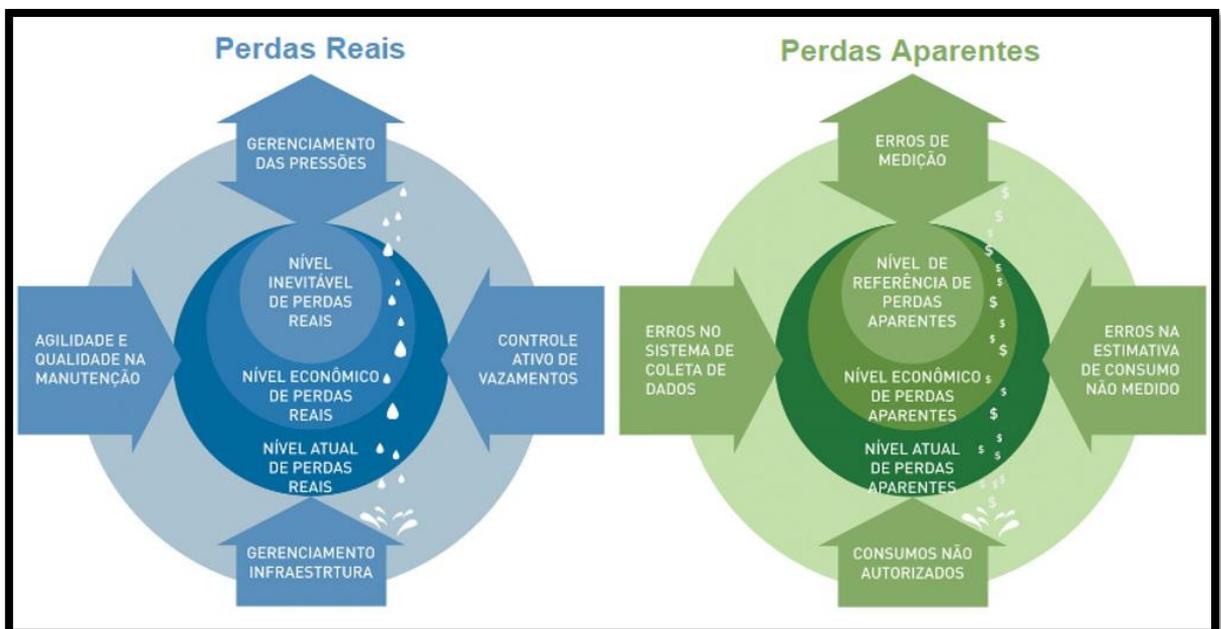
Figura 18: Critérios controle e mitigação de perdas de água por vazamentos.



Fonte: Adaptado de EPA (2010).

A decisão sobre quais ações serão prioritárias para reduzir o índice de perdas em cada sistema depende da avaliação do profissional responsável pela gestão local. Porém, ABES (2015) destaca que dentre todas as ações, as que em geral apresentam melhor relação custo-benefício são: Gerenciamento de pressões, controle ativo de vazamentos, agilidade e qualidade na manutenção, gerenciamento de infraestrutura, redução de erros de medição e redução de fraudes, conforme é apresentado na Figura 19.

Figura 19: Ações para redução e controle de perdas.



Fonte: Adaptado de Boletim do Saneamento (2023).

3.7. Tecnologias utilizadas no combate de perdas de água

Nos itens a seguir são listadas algumas tecnologias utilizadas no combate às perdas de água, sendo neste trabalho subdivididas em:

- Equipamentos;
- *Softwares* de Simulação Hidráulica e Gerenciamento de redes;
- Técnicas de otimização.

3.7.1. Equipamentos

Além dos equipamentos já citados anteriormente (Hidrômetros, Válvulas de controle e V.R.P's) utilizados para avaliação e diminuição dos índices de perdas de água, existem outros equipamentos que também podem ser utilizados no dia a dia das concessionárias de abastecimento de água (ABES, 2015). dentre eles:

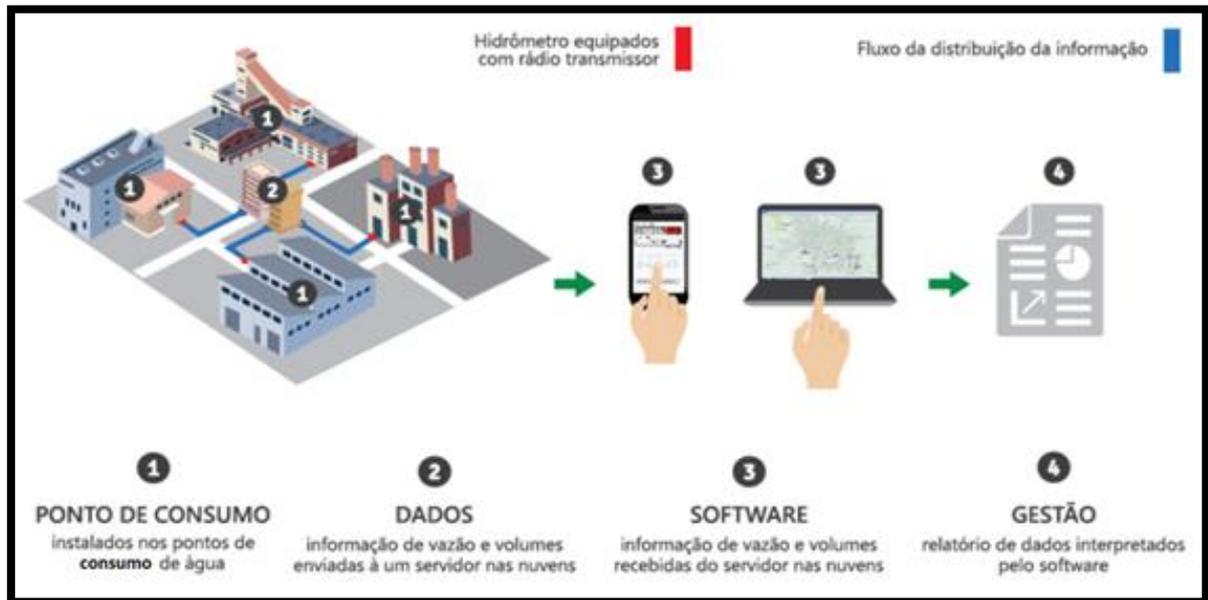
3.7.1.1. Hidrômetros inteligentes

Os **Hidrômetros inteligentes** (Medidores inteligentes) são dispositivos utilizados para medir o consumo de água em propriedades residenciais, comerciais ou industriais de forma mais precisa e eficiente do que os hidrômetros tradicionais (Sonderlund, 2014). Tais dispositivos fazem parte do conceito de redes inteligentes de distribuição de água, apresentando várias funcionalidades avançadas, tais como:

- **Monitoramento remoto da vazão:** Permitem a leitura do consumo de água à distância, eliminando a necessidade de visitas manuais para coleta de dados. Isso não só economiza tempo e recursos como também proporciona dados em tempo real ou em intervalos regulares e sem atrasos. Do ponto de vista dos usuários, a leitura remota assegura a precisão do valor medido, pois ao realizar a leitura manual de um hidrômetro podem ocorrer "erros de leitura", nos quais o profissional responsável se engana e troca algarismos semelhantes (Mattos, 2018).
- **Identificação de padrões de vazões:** Através do monitoramento contínuo, os hidrômetros inteligentes são capazes de identificar padrões de fluxo inconsistentes que podem indicar vazamentos e fraudes na rede doméstica, alertando a companhia de água para possíveis problemas. (SABESP, 2019).
- **Comunicação "Two-way":** Alguns modelos de medidores inteligentes oferecem recursos como a capacidade de suspender e religar remotamente o fornecimento de água, detecção automática de fraudes e controle da vazão fornecida (Brears, 2022).

Apesar de demandar maiores investimentos, a implementação de hidrômetros inteligentes faz parte da modernização das infraestruturas de abastecimento de água, com o objetivo de enfrentar desafios relacionados à escassez de água, eficiência energética e sustentabilidade ambiental. Na Figura 20 é apresentado um esquema de utilização de hidrômetros inteligentes em sistema de telemetria de dados:

Figura 20: Utilização de hidrômetros inteligentes em sistema de telemetria de dados.



Fonte: Adaptado de Smartintec (2019).

Outro benefício destes aparelhos é que, em casos de escassez hídrica, a distribuição poderia ser limitada por unidade consumidora, evitando a necessidade de deixar regiões inteiras sem abastecimento ou recorrer a esquemas de rodízio. A possibilidade de limitar o consumo por residência em tempos de escassez de água é uma ação que promoveria justiça, mas está sujeita à transparência e clareza na escolha de critérios dos limites de consumo para cada unidade. (Mattos, 2018).

Os medidores inteligentes de água também possibilitam a implementação de cobranças diferenciadas conforme o horário, de forma análoga às bandeiras tarifárias aplicadas na cobrança de energia elétrica. Projetos-piloto realizados na Austrália e no Reino Unido introduziram a tarifação baseada no horário de uso (Boyle et al., 2013).

Uma revisão mais detalhada sobre os benefícios e desafios da utilização de medidores inteligentes podem ser encontrada no trabalho de Cominola et al. (2015), além disto, o trabalho de Turner et al. (2010) apresenta em detalhes a maneira que as informações e dados obtidos através destes aparelhos podem ser utilizadas em conjunto com outras ferramentas para um gerenciamento e planejamento integrado de um sistema de distribuição de água.

3.7.1.2. Geofones e hastes de escuta

Os vazamentos em tubulações produzem sons em uma gama de frequências, com intensidades que variam dependendo de fatores como o tamanho do orifício, a pressão da água, tipo de solo e a profundidade da tubulação. Desta forma, os vazamentos podem ser localizados pelo uso de **geofones e hastes de escuta**, aparelhos que utilizam princípios acústicos para detectar os ruídos emitidos por um vazamento de água em tubulações subterrâneas, de forma que técnicos treinados possam interpretar os sinais e determinar a presença e a localização aproximada de um vazamento (ABENDI, 2003).

Em geral, o uso de geofones se dá após a constatação que determinado setor do sistema possui índices elevados de perdas de água, onde são enviadas equipes ao setor investigado para que seja feita a pesquisa de vazamentos *in-loco*. Durante a pesquisa, com o auxílio destes equipamentos, o operador lentamente faz a escuta dos ruídos acústicos nas ruas da região investigada, pressupondo que a localização dos vazamentos são os pontos imediatamente acima dos locais que apresentem maiores intensidades de ruídos. (Hamilton; Charalambous, 2020).

Por reduzir a necessidade de escavações exploratórias e fornecer dados precisos, estes dispositivos ajudam a aumentar a eficiência operacional das companhias de água (Diniz, 2012). Isso se traduz em economia de custos e recursos, bem como em um serviço mais confiável para os clientes.

3.7.1.3. Loggers e correlacionadores de ruído

Os **Loggers** de ruído são aparelhos utilizados para monitorar constantemente os ruídos em pontos estratégicos rede de distribuição de água, permitindo a detecção de variações anormais (principalmente durante a noite, quando o consumo de água é mais baixo e os ruídos de vazamento podem ser mais audíveis) associadas a vazamentos ou outros problemas, como obstruções e falhas na tubulação. (Loureiro; Álvares; Coelho, 2007).

Já os **Correlacionadores acústicos** (ou correlacionadores de ruídos) são equipamentos que determinam a localização aproximada de um vazamento a partir do posicionamento de *Loggers* em locais separados da rede de distribuição (geralmente em hidrantes, válvulas ou pontos de acesso conhecidos). Segundo ABENDI (2019), os correlacionadores acústicos oferecem uma abordagem eficaz e não destrutiva para a detecção e localização de vazamentos em redes de distribuição de água.

3.7.2. Softwares de simulação hidráulica e gerenciamento de redes

Atualmente, a tecnologia computacional vem sendo largamente utilizada para gestão eficiente dos recursos hídricos. Nesse contexto, *softwares* de modelagem e simulação de redes de abastecimento de água desempenham um papel fundamental ao oferecerem ferramentas avançadas para o planejamento, operação e manutenção dessas infraestruturas complexas.

Segundo Costa (2010), a partir da inserção de dados e modelagem da rede, os simuladores hidráulicos possibilitam a análise e identificação de pressões insuficientes ou excedentes na rede, identificação das perdas nos sistemas e problemas de qualidade da água, além de estudos dos sistemas de bombeamento (com a finalidade de otimização energética) e diagnóstico dos efeitos da operação de válvulas para intervenções de rotina (manutenções, interligações, reparos etc.).

Dentre vários *softwares* de modelagem e simulação de redes de abastecimento de água que existem no mercado, destaca-se o uso do **Epanet**, *software* gratuito que foi desenvolvido por meio da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S. Environmental Protection Agency - EPA*) e apresenta, segundo UFPB (2020), as funcionalidades de realizar:

- Simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico da rede;
- Simulações de qualidade e idade da água em diferentes pontos da rede;
- Cálculos dos valores da vazão e pressão em diversos nós da rede;
- Cálculos do nível de água em reservatórios;
- Simulação de cenários (Exemplo: expansão ou alteração de uma rede existente);
- Análise do decaimento do cloro residual;
- Avaliação dos consumos.

Outros exemplos de *softwares* de modelagem e simulação de redes de abastecimento de água com funcionalidades semelhantes são o Watercad, Sistema UFC, Credes, Urbano 11 e Aquarede.

Uma vez elaborado o modelo da rede, é de grande importância proceder com sua **calibração**, de modo que a simulação hidráulica realize previsões com precisão adequada. No caso de redes novas a calibração consiste na determinação dos parâmetros de rugosidade, e no caso de redes antigas ou com cadastro desatualizado, além dos parâmetros de rugosidade determina-se os comprimentos dos trechos, diâmetros e materiais (Silva, 2003).

Uma vez que o modelo da rede esteja calibrado, é possível simular alternativas de modificações no sistema existente que resultariam em melhores parâmetros de pressões e,

consequentemente, melhores índices de perda de água. Segundo Zanfei et al (2020) Um gerenciamento confiável pode ser alcançado apenas com um modelo corretamente calibrado.

Além da funcionalidade de modelagem e simulação hidráulica, alguns *softwares* fornecem aplicações voltadas à gestão eficiente da rede de distribuição para uso das concessionárias de abastecimento, exemplo disso são as aplicações que utilizem:

- **SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*):** *Softwares* utilizados em sistemas de automação industrial para monitoramento, controle e aquisição de dados em tempo real. Em sistemas de abastecimento de água, *softwares* SCADA permitem monitorar continuamente variáveis operacionais, como níveis de reservatórios, pressão na rede, vazões e qualidade da água. Dessa maneira, são criadas as condições para aprimorar a eficiência operacional, fornecer um atendimento mais eficaz e disponibilizar informações de forma mais ágil às empresas, tanto para a tomada de decisões operacionais quanto administrativas. (Elipse Knowledgebase, 2019).
- **SIG (Sistemas de informações geográficas):** SIG's são utilizados para a visualização e análise geoespacial de dados da rede de abastecimento, fornecendo informações cruciais para o planejamento e a gestão eficiente. Por meio da aplicação SIGNOS (baseada em Sistema de Informações Geográficas), a SABESP começou a consolidar informações diversas do negócio em uma única base de dados. Essas informações incluem o cadastro de redes e ligações, setorização, integração com sistemas comerciais, dados de manobras, entre outros (Ridolpho et al., 2009).
- **CMMS (*Computerized Maintenance Management System*):** Sistema aplicado para o gerenciamento da manutenção preventiva e corretiva da infraestrutura da rede, ajudando a garantir a integridade e o desempenho adequado dos ativos. Tal controle é feito a partir do registro detalhado de todos os componentes da rede, sua vida útil estimada, histórico de manutenção e custos associados. A partir de tais dados computados, *softwares* CMMS podem realizar o planejamento de investimentos em infraestrutura, garantindo a modernização e expansão da rede de maneira estratégica (Crisan, 2018).

A capacidade de integrar dados de diferentes sistemas é um diferencial na eficácia do gerenciamento de redes, dessa forma, *softwares* modernos podem integrar sistemas de simuladores hidráulicos, Sistemas SCADA, SIG's e CMMS, fornecendo uma visão abrangente dos sistemas de abastecimento e facilitando a tomada de decisões informadas.

3.7.3. Técnicas de otimização

O conceito de otimização de um sistema de distribuição de água implica em maximizar ou minimizar uma ou mais funções objetivo, conforme as restrições operacionais estabelecidas. Sendo a meta alcançar a solução ótima do sistema, o que se torna desafiador devido à complexidade das redes de distribuição de água. Tal complexidade surge devido ao considerável número de variáveis envolvidas no processo de otimização, assim como às restrições e objetivos que muitas vezes entram em conflito entre si (Sousa et al., 2013).

Segundo Boschetti e Massaron (2018), dentre as diversas linguagens de programação existentes capazes de trabalhar com técnicas de otimização, a linguagem Python destaca-se por ser capaz de realizar o multiprocessamento em grandes conjuntos de dados, reduzindo o tempo necessário para analisá-los. Além de linguagens de programação, alguns *softwares* de planilhas (como o Microsoft Excel) também possuem função de aplicação de algoritmos genéticos.

O Quadro 4 detalha diversos tipos de otimização que podem ser aplicados em uma rede de distribuição de água, bem como os objetivos, variáveis e restrições que podem ser consideradas no processo.

Quadro 4: Tipos de otimização para redes de distribuição de água.

Tipo de Otimização	Objetivo	Possíveis Variáveis	Principais Restrições
Design	Minimização de custo de tubos; Localização ideal de válvulas	Layout da tubulação; Diâmetro dos tubos; Reabilitação de tubos	Mínimo nível de serviço; Diâmetros disponíveis; Opções de reabilitação; Orçamento disponível
Operação	Minimização de perdas de água; Minimização de custos de energia de bombeamento	Controle da bomba; Níveis de reservatório; Fontes; Capacidade	Mínimo nível de serviço; Número de interruptores da bomba; Capacidade de origem; Capacidade da bomba
Calibração	Minimização das diferenças entre o modelo e valores reais (Rugosidade, vazamentos, perdas, pressão)	Rugosidade do tubo; Diâmetro do tubo; Configuração da válvula; Vazamentos; Demandas	Layout do sistema; Dados disponíveis
Nível de Serviço	Maximização da pressão; Qualidade da água; Reabilitação	Todas já citadas	Configuração do sistema; Despesas
Sistema de Monitoramento	Minimização de custos de monitoramento; Determinação dos pontos ideais de monitoramento	Número e posição dos pontos de monitoramento	Configuração do sistema; Despesas
Teste de Rede	Maximização da confiabilidade da rede; Encontrar conjuntos críticos de eventos que podem causar falhas no sistema	Incêndio; Falhas nos tubos; Falhas de energia; Eventos de contaminação	Configuração do sistema; Número de eventos simultâneos

Fonte: Adaptado de Van Dijk et al. (2008).

A otimização multiobjetivo busca identificar o conjunto ótimo de soluções que satisfazem restrições dentro de um espaço de decisões, considerando simultaneamente dois ou mais objetivos definidos. Normalmente, esses objetivos estão em conflito entre si, resultando em não apenas uma solução ótima, mas sim em um conjunto de soluções eficientes que atendem às funções a serem otimizadas, conhecido como conjunto Pareto-ótimo (Hashimoto, 2004). Por conta disso, é necessário um decisor com conhecimento do problema para realizar a análise da solução dentro do conjunto gerado pelo *software* (Delinski; Colmenero, 2017)

Existem várias ferramentas de otimização multiobjetivo que podem ser empregadas por meio da computação (HOJJATI et al., 2018). Um exemplo aplicado em redes de distribuição de água é o artigo de Lence et al. (2017), que propõe um modelo de programação multiobjetivo para minimizar o custo da rede e maximizar sua confiabilidade. Outro exemplo do uso de ferramentas de otimização é apresentado por Saldarriaga e Salcedo (2015), onde buscou-se minimizar as pressões excessivas dentro da tubulação (consequentemente minimizando vazamentos) através da determinação da solução ótima para a localização de VRP's.

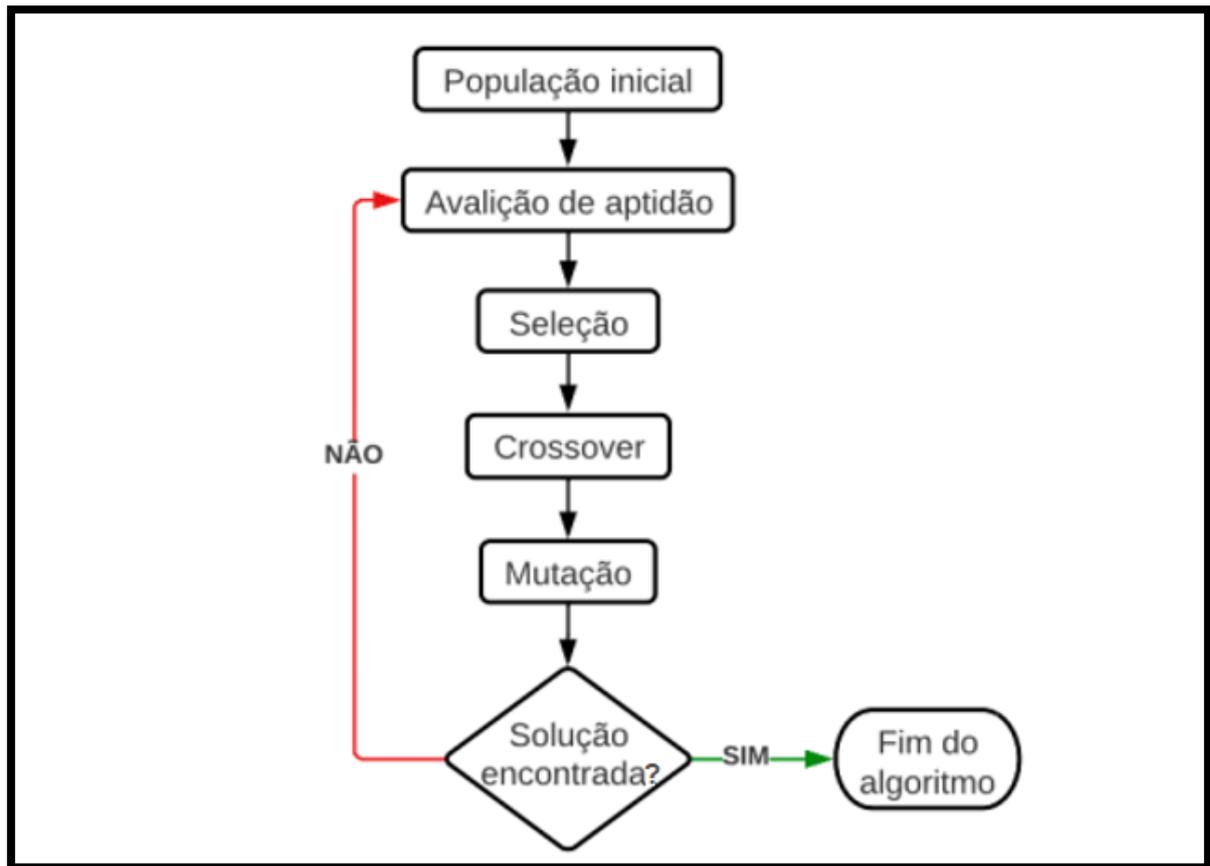
Dentre as várias técnicas de otimização existentes, destaca-se o uso dos **algoritmos genéticos**.

Os algoritmos genéticos são uma técnica de otimização desenvolvida por John Holland em 1975, têm suas raízes na teoria da evolução apresentada pelo naturalista Charles Darwin. Segundo essa teoria, os indivíduos mais adaptados ao seu ambiente têm maior probabilidade de sobreviver e transmitir suas características para a próxima geração. No processo de reprodução dos algoritmos genéticos, ocorrem mutações nos genes dos indivíduos, que são armazenados nos cromossomos, promovendo assim a variabilidade na população (Silva, 2019).

O funcionamento do algoritmo genético na resolução de problemas inicia-se com uma população inicial de indivíduos (soluções) que é avaliada. Os indivíduos que demonstram valores mais promissores do ponto de vista da otimização são então selecionados e combinados entre si utilizando operadores genéticos predefinidos de cruzamento e mutação. Essa combinação gera uma nova população de soluções, que é avaliada novamente de acordo com a função objetivo previamente definida no algoritmo. Este processo de seleção, reprodução e criação de uma nova geração continua iterativamente até que um critério de parada seja alcançado ou até que uma solução satisfatória seja encontrada. (Tebcharani, 2007; Van Dijk et al., 2008).

A Figura 21 exemplifica o fluxograma de funcionamento do algoritmo genético.

Figura 21: Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético.



Fonte: Marques (2023).

A primeira geração de algoritmos genéticos surgiu entre 1989 e 1998, tendo como exemplos o NSGA (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*), o NPGA (*Niched-Pareto Genetic Algorithm*) e o MOGA (*Multi-Objective Genetic Algorithm*). Por outro lado, os algoritmos da segunda geração, caracterizados pelo elitismo e maior eficiência, destacam-se por sua maior relevância, incluindo o SPEA e SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*), PAES (*Pareto Archived Evolution Strategy*) e NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*). Cada um desses algoritmos possui suas próprias vantagens e desvantagens, sendo a aplicação de cada um mais indicada a depender situação que deseja avaliar (Delinski; Colmenero, 2017).

Segundo Marques (2023) o uso de algoritmos genéticos em estudos relacionados a problemas complexos, como os das redes de distribuição, tem sido adotado devido à sua eficácia em solucionar problemas, especialmente quando comparado com métodos convencionais. Essa ferramenta demonstra-se capaz de lidar com a complexidade inerente a tais problemas, oferecendo soluções robustas, o que a torna uma escolha atrativa para pesquisadores e profissionais que buscam otimizar sistemas complexos de distribuição.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho é apresentado em cinco seções. A primeira seção (Item 4.1) consiste na proposição da metodologia para análise de ações de combate às perdas de água, **configurando-se como uma contribuição original desta pesquisa**. Tal metodologia é apresentada de forma conceitual nesta seção para facilitar a compreensão do processo antes de avançar para as etapas posteriores do trabalho.

Da seção segunda (Item 4.2) à seção quinta (Item 4.5) é apresentada a aplicação prática da metodologia proposta em um sistema de referência modelado, cujo objetivo é demonstrar de forma detalhada a aplicação do método e, posteriormente, seus resultados.

4.1. Proposição de metodologia para análise de ações de combate a perdas de água

O desenvolvimento da metodologia para análise de ações de combate a perdas de água foi embasado através do desenvolvimento do referencial teórico do trabalho, na qual os principais conceitos sobre a temática foram esclarecidos, destacando-se o item 3.3.2, que aborda diretamente as causas do fenômeno das perdas de água em sistemas de distribuição.

O Quadro 5 resume os principais fatores relacionados com perdas de água reais em sistemas de distribuição, ordenado por ordem de relevância com base no referencial teórico deste trabalho e a experiência profissional do autor.

Quadro 5: Principais fatores relacionados com perdas reais em sistemas de distribuição.

Fator de perdas reais	Relevância
Pressões excessivas	Alta relevância: Pressões excessivas aumentam a probabilidade de rompimentos na rede, além disso, aumentam a vazão da água perdida durante o vazamento.
Idade da tubulação	Alta relevância: Quanto maior a idade da tubulação, maior a tendência da mesma em apresentar falhas.
Controle ativo de vazamentos	Média relevância: Sem controle ativo de vazamentos, pequenas falhas podem passar despercebidas e se tornarem grandes problemas, levando a grandes volumes de perdas de água ao longo do tempo.
Material da tubulação	Média relevância: Diferentes materiais apresentam diferentes durabilidades e padrões de rompimentos, devido às propriedades do material.
Profundidade do tubo	Baixa relevância: A profundidade de instalação das tubulações pode influenciar na pressão exercida sobre os tubos devido ao peso do solo e do pavimento.
Diâmetro do tubo	Baixa relevância: Tubos com diâmetros maiores possuem paredes mais espessas, resultando em maior rigidez.
Treinamento de operadores	Baixa relevância: A falta de treinamento dos operadores pode ocasionar manobras de rede realizadas de maneira incorreta, que podem causar rupturas. Além disso, operadores mal treinados podem não detectar ou corrigir vazamentos adequadamente.

Fonte: O autor (2025).

De forma análoga, o Quadro 6 resume os principais fatores relacionados com perdas de água aparentes em sistemas de distribuição, por ordem de relevância.

Quadro 6: Principais fatores relacionados com perdas aparentes em sistemas de distribuição.

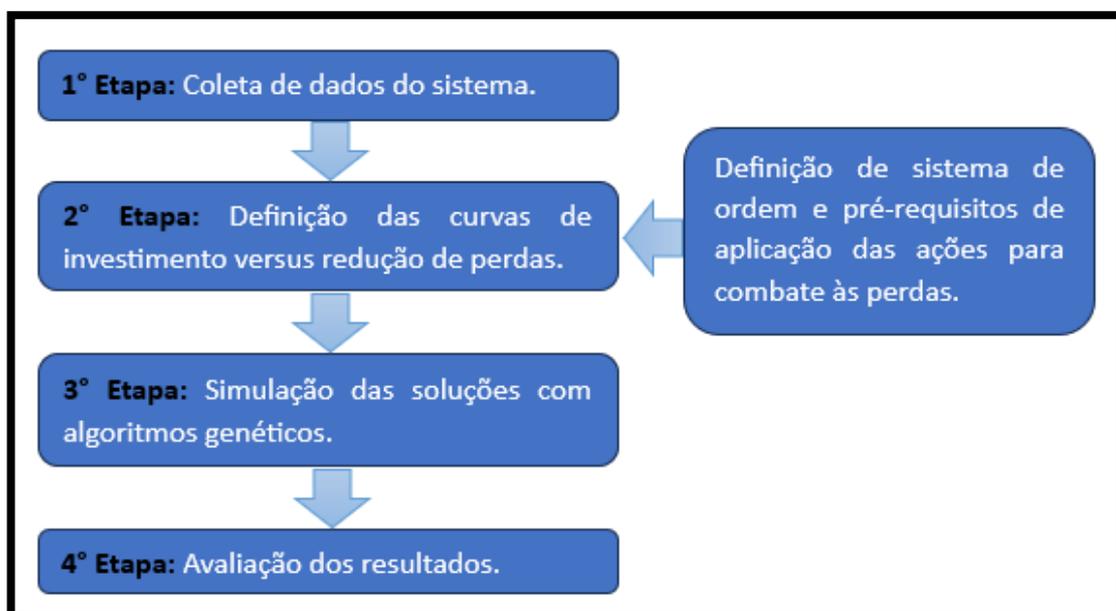
Fator de perdas aparentes	Relevância
Ligações clandestinas	Alta relevância: Ligações clandestinas resultam em consumo de água não autorizado e não contabilizado, representando uma perda direta e significativa para o sistema de distribuição.
Falhas de cadastro	Alta relevância: Falhas de cadastro podem levar a erros na gestão e cobrança do consumo de água. Por exemplo, imóveis não cadastrados corretamente podem não ser faturados, resultando em perdas aparentes significativas.
Medição defeituosa	Alta relevância: Medidores defeituosos ou imprecisos subestimam ou não registram o consumo real de água, resultando em perdas aparentes significativas e contínuas até que sejam identificados e substituídos.
Erros de leitura	Média relevância: Erros de leitura podem causar discrepâncias entre o consumo real e o registrado, mas podem ser identificados e corrigidos em ciclos subsequentes de faturamento.

Fonte: O autor (2025).

De acordo com a pesquisa do autor, os fatores de perdas aparentes que apresentam maiores impactos são as ligações clandestinas, falhas de cadastro e problemas relacionados à medição do consumo.

Com base na pesquisa bibliográfica realizada, nos quadros 5/6 e na experiência profissional do autor, foi proposta uma **metodologia original** para análise de ações de combate a perdas de água baseada em otimização com algoritmos genéticos, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22: Etapas da metodologia de redução otimizada de perdas de água.



Fonte: O autor (2025).

O conceito de cada uma das etapas é relatado a seguir.

- **Etapa 1 – Coleta de dados do sistema.**

A primeira etapa da metodologia proposta consiste na coleta de todas as informações do sistema de distribuição de água, tais como: população atendida, número de economias, pressão média na rede (m.c.a), número de nós, consumo per capita ($L \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$), extensão total da rede (m), consumo máx. horário por nó (l/s), índice de perdas (%), idade da tubulação (anos), material da tubulação, nível de manutenção da rede e nível de treinamento da equipe.

Além destes, outros dados relacionados a orçamento dos serviços prestados pela concessionária são necessários, como por exemplo custo de substituição de hidrômetros, custos de instalação de VRP's, custo do centro de controle de operações, custos relacionados à recursos humanos e custos de reparo de vazamentos.

O balanço hídrico do sistema também deve ser obtido por meio de dados disponíveis, inclusive segregando o volume de perda anual em categorias de perdas reais e aparentes. Além disso, também deve-se dispor da proporção de ocorrências de rupturas na rede entre vazamentos visíveis e não visíveis.

A relação de todos os dados necessários é exemplificada na aplicação da metodologia proposta (item 4.2).

- **Etapa 2 – Definição das curvas de investimento versus redução de perdas.**

Dispondo-se dos dados da rede, é possível correlacionar, para cada ação de combate às perdas, a relação entre o investimento (R\$) e a redução de perdas (m^3/ano) provocada pela aplicação do investimento naquela ação específica. Para isto, é necessário um sistema de ordem e pré-requisitos de aplicação das ações para combate às perdas, que é proposto e aplicado pelo autor conforme explicitado no item 4.3 (Figura 30).

- **Etapa 3 – Simulação das soluções com algoritmos genéticos.**

A partir dos dados das etapas anteriores, utiliza-se de algoritmos genéticos para simular e verificar qual a solução (Distribuição do investimento entre as ações) ótima no combate de perdas de água para cada rede do sistema *benchmark*. No caso deste estudo, adotou-se como premissa um orçamento limitado a ser aplicado entre as diversas ações de combate às perdas, de forma que o algoritmo calcule a melhor solução possível.

- **Etapa 4 – Avaliação dos resultados.**

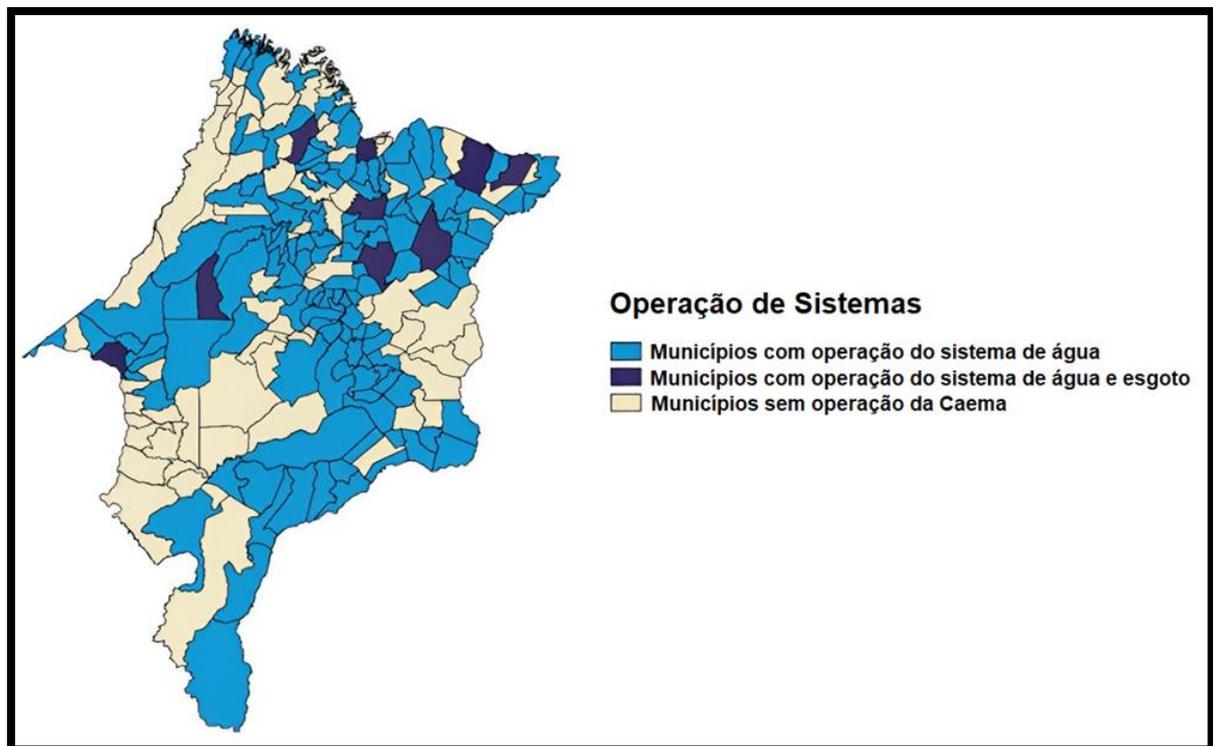
Por fim, é realizada a avaliação do resultado ótimo em termos de redução de perdas no sistema.

4.2. Sistema de referência (*benchmark*).

Para modelar o sistema *benchmark* procedeu-se a coleta de informações a respeito das características comuns dos sistemas de abastecimento de água do estado do Maranhão, além das particularidades específicas da região Nordeste do Brasil. Tais dados foram consultados através de informações públicas encontradas no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, além de dados obtidos junto a concessionárias prestadores de serviços de saneamento no estado do Maranhão.

No estado do Maranhão, a principal prestadora de serviços de abastecimento de água é a Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA, que possui atuação em 140 dos 217 municípios do estado (64,5%), conforme ilustra a Figura 23.

Figura 23: Abrangência de atuação da CAEMA no Maranhão.



Fonte: CAEMA (2021).

Nos municípios não atendidos pela CAEMA, o gerenciamento dos serviços de saneamento urbano é realizado por empresas públicas (autarquias municipais criadas para prestação de Serviço Autônomo de Água e Esgoto – SAAE) ou mesmo empresas privadas com a concessão dos serviços de saneamento do local.

O Quadro 7 destaca as características mais comuns dos sistemas de abastecimento do estado do Maranhão.

Quadro 7: Características dos sistemas de abastecimento do estado do Maranhão.

Características dos SAA's do estado do Maranhão	Fontes
Consumo <i>per capita</i> : 150 a 200 l . hab ⁻¹ . dia ⁻¹	CAEMA (2022); SILVA (2014); BRK (2022)
Coefficiente K1: 1,2	NBR 12218 (2017); CAEMA (2022)
Coefficiente K2: 1,5	NBR 12218 (2017); CAEMA (2022)
Média de 3,23 moradores por domicílio	IBGE (2024)
Média populacional por município: 31.229 habitantes	IBGE (2024)
Relevo predominantemente plano a suave ondulado	IMESC (2019)
Índice de perda de água: 59,1%	SNIS (2022)
Índice de hidrometração (CAEMA): 30%	SNIS (2022)
Redes de distribuição em PVC e ramais prediais em PEAD	CAEMA (2022); BRK (2022)
Controle ativo de vazamentos inexistente / ineficaz	O autor (2025); SILVA (2020)

Fonte: O autor (2025).

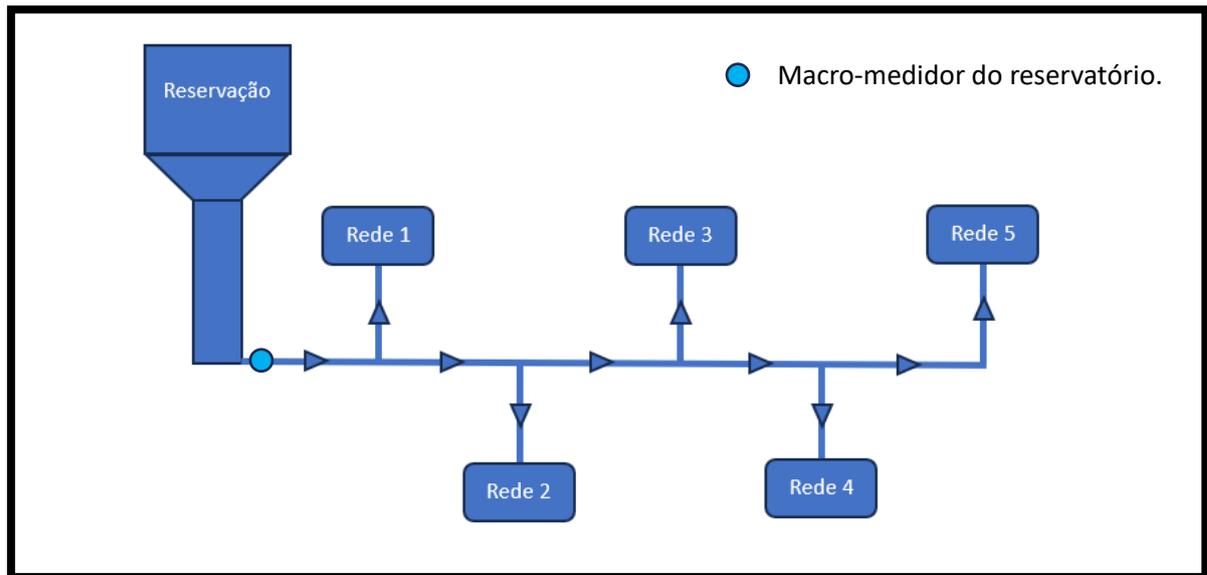
Uma prática comum na região é adotar valores de 150 a 200 l . hab⁻¹ . dia⁻¹ para consumo *per capita* em projetos de abastecimento de água, visto que, segundo CAEMA (2022), BRK (2022) e SILVA (2014) tais valores encontram-se dentro da faixa de consumo que realmente ocorre na região.

Segundo observações do autor deste trabalho, que é atuante na área de projetos de SAA, os sistemas Maranhenses de distribuição de água para consumo apresentam grandes deficiências em ações para combate às perdas de água, sendo poucos os municípios que possuem programas de controle ativo de vazamentos. Tal observação é confirmada pelo estudo de SILVA (2020), que apontou ineficiência por parte da gestão de perdas de água da CAEMA, indicando que seus sistemas de distribuição de água necessitam de ações para diminuição das perdas e abastecimento contínuo.

4.2.1. Proposição de sistema de referência

A partir das informações coletadas, foi proposto um sistema teórico de referência (*benchmark*) que represente um sistema de abastecimento típico regional. O sistema proposto compreende 5 redes de distribuição alimentadas por um mesmo reservatório, cada rede possui características distintas como pressão, população, consumo *per capita*, extensão, índice de perdas, idade da tubulação, material da tubulação, nível de manutenção e nível de treinamento da equipe.

A Figura 24 mostra a concepção do sistema *benchmark*.

Figura 24: Concepção do sistema *benchmark*.

Fonte: O autor (2025).

A ideia é que, de forma simplificada, este sistema proposto contemple as características e particularidades presentes na maioria de sistemas de distribuição de água existentes no estado do Maranhão e no Nordeste brasileiro.

A Tabela 3 apresenta as características de cada rede de distribuição do sistema *benchmark*.

Tabela 3: Características das redes de distribuição do sistema *benchmark*.

	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Pressão na rede (m.c.a)	10 a 20	30 a 40	50 a 60	70 a 80	10 a 80
Número de nós	11	10	11	12	15
População (Habitanes)	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500
Consumo <i>per capita</i> (L . hab⁻¹ . dia⁻¹)	130	140	150	160	170
Extensão total da rede (m)	2.950	2.782	3.250	6.180	4.500
Consumo máx. horário por nó (l/s)	0,369	0,583	0,710	0,833	0,826
Índice de perdas (%)	45	52	60	62	75
Idade da tubulação (anos)	0	10	20	30	40
Material da tubulação	100% PVC 0% F°F°	100% PVC 0% F°F°	50% PVC 50% F°F°	35% PVC 65% F°F°	35% PVC 65% F°F°
Nível de manutenção	Excelente	Bom	Médio	Ruim	Péssimo
Nível de treinamento da equipe	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim

Fonte: O autor (2025).

A primeira característica mostrada na tabela é a faixa de pressão em cada rede, que é consequência da cota do terreno e perdas de carga ao longo da tubulação. Buscou-se estabelecer, para cada rede, faixas de pressões distintas. A rede 1 apresenta pressões mais baixas, a rede 2 apresenta pressões intermediárias, a rede 3 apresenta pressões elevadas que estão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 12218 (2017), enquanto que a rede 4 apresenta pressões

elevadas acima do limite normativo. Por fim, a rede 5 é caracterizada por uma faixa de pressões mais abrangente, que vão desde valores mínimos de pressão (10 m.c.a) até valores que ultrapassam os limites normativos (80 m.c.a).

A população abastecida por cada rede fictícia é de 1.500 a 3.500 habitantes, de forma que a população total do sistema some 12.500 habitantes. Neste sentido, o sistema de referência adotado teria capacidade de abastecer um pouco menos da metade do número médio de habitantes por cidade no Maranhão (31.229 habitantes)

O consumo *per capita* é a quantidade média de litros de água que um habitante da região consome por dia, variando neste estudo de 150 a 200 l . hab⁻¹ . dia⁻¹. A extensão total de cada rede fictícia foi determinada adotando-se trechos de 100 a 330 metros, de forma que se equipare aos comprimentos de redes usuais adotados em sistemas de abastecimento de água.

Cada rede é caracterizada por uma quantidade de nós, que variam de 10 a 15. De forma a simplificar o estudo a ser realizado, as vazões em cada rede foram distribuídas igualmente entre os nós, sendo considerando o consumo máximo horário por nó através da Equação 14.

$$C_{nó} = \frac{C \cdot P \cdot K1 \cdot K2}{N \cdot 86.400} \quad (14)$$

Onde:

C_{nó} – Consumo máximo horário por nó, utilizado para o dimensionamento de rede (l/s);

C – Consumo *per capita* de água (l . hab⁻¹ . dia⁻¹);

P – População a ser abastecida;

K1 e K2 – Coeficientes de consumo, preconizados pela NBR 12218 (2017);

N – Número de nós da rede.

Os índices de perdas de água adotados neste estudo variam entre 45% a 75%, de forma que a média seja os 60% já evidenciados por SNIS (2022). Outro fator considerado foi a idade da tubulação, que neste estudo varia de 0 a 40 anos em cada rede fictícia.

O nível de manutenção da rede foi classificado neste estudo em 3 grupos:

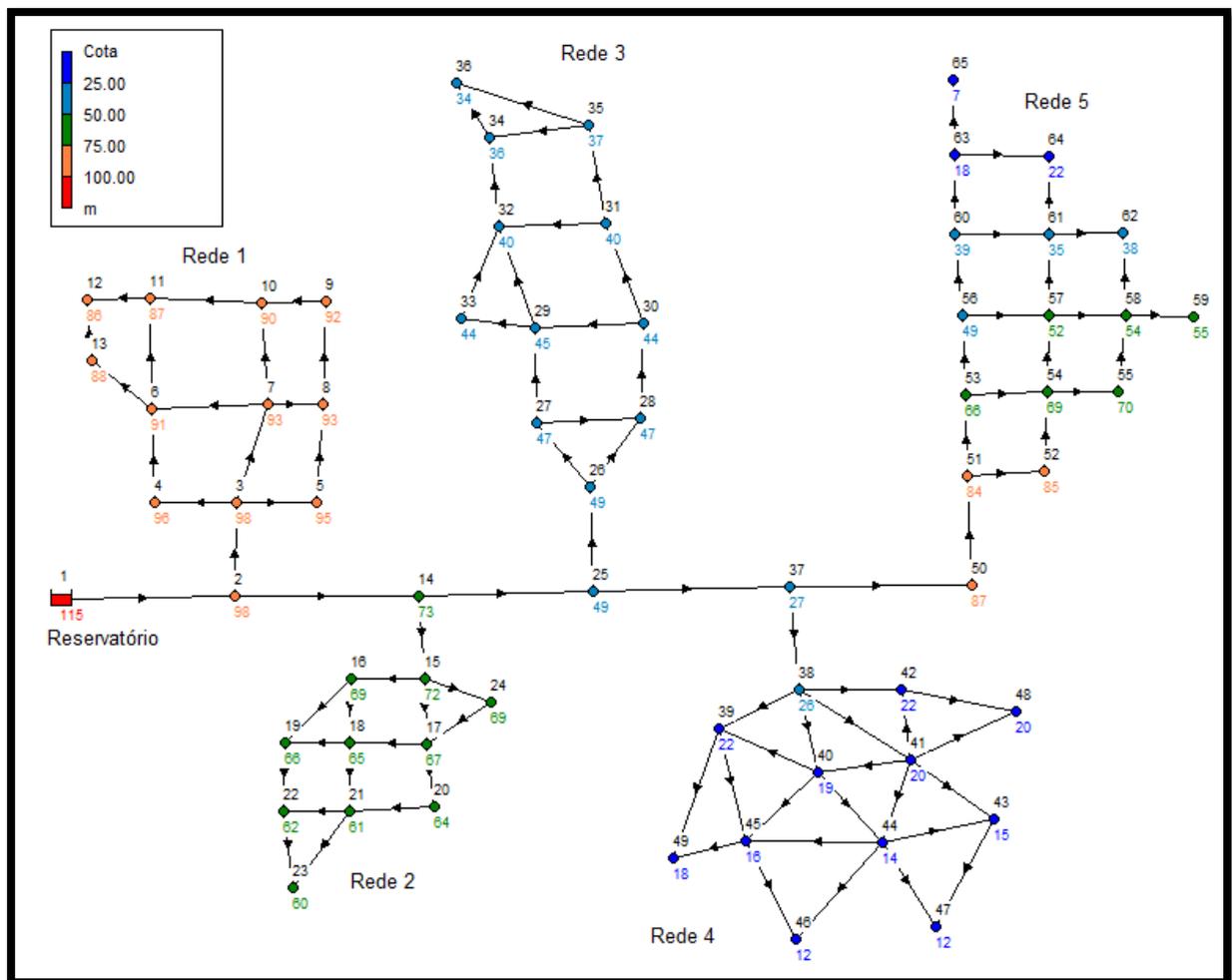
- Excelente – A rede é nova (Fator de Condição de Infraestrutura - FCI = 1).
- Bom – A rede passa por manutenções preventivas e regulares, apresentando em geral um bom estado de conservação para a sua idade (FCI = 2).
- Regular – A rede passa por manutenções esporádicas, apresentando um estado de conservação razoável para a sua idade, mas com pontos a serem melhorados (FCI = 3).
- Ruim – A rede passa apenas por manutenções corretivas, apresentando em geral um estado de conservação ruim para a sua idade (FCI = 4).
- Péssimo – A rede não por manutenções, apresentando em geral um péssimo estado de conservação para a sua idade (FCI = 5).

De forma análoga, o nível de treinamento de equipes foi classificado em 3 grupos neste estudo:

- Bom – Equipes cujos funcionários de operação e manutenção de redes passam por treinamentos de forma regular.
- Regular – Equipes cujos funcionários de operação e manutenção de redes passam por treinamentos de forma esporádica.
- Ruim – Equipes cujos funcionários de operação e manutenção de redes não recebem treinamentos.

A Figura 25 ilustra o modelo de referência adotado para as 5 redes, onde os valores em preto representam a numeração de cada nó e os valores em cores representam as cotas de terreno estabelecidas como base para o estudo.

Figura 25: Modelo do sistema *benchmark*.



Fonte: O autor (2025).

A cota do nível de água mínimo do reservatório foi fixada em 115 metros de altitude em relação ao nível do mar, influenciando na pressão disponível nas redes 1 a 5. A partir do reservatório, a água percorre a tubulação principal, que por sua vez abastece todas as 5 redes por meio de derivações individuais.

O dimensionamento do sistema *benchmark* foi realizado através do *software* EPANET, que utiliza o método dos gradientes para realizar a simulação da rede de acordo com os dados inseridos. Neste modelo, foi utilizada a equação universal para o cálculo da perda de carga distribuída em cada trecho, conforme exemplificado pela Equação 15.

$$H_f = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \quad (15)$$

Onde:

H_f – Perda de carga no trecho (m.c.a); L – Comprimento do trecho (m);
 f – Fator de atrito (adimensional); g – Aceleração da gravidade (9,81 m/s²);
 Q – Vazão (m³/s); D – Diâmetro da tubulação (m).

O fator de atrito (f) pode ser determinado pela Equação 16, proposta por Swamee (1993).

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{e}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right) \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (16)$$

Onde:

f – Fator de atrito (adimensional); e – Rugosidade do material do tubo (mm);
 Re – N° de Reynolds (adimensional); D – Diâmetro da tubulação (m).

A rugosidade (e) considerada nos tubos é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4: Rugosidade da tubulação.

Material da tubulação	Rugosidade (mm)				
	Novo	10 anos	20 anos	30 anos	40 anos
Policloreto de Vinila (PVC)	0,0015	0,0030	0,0050	0,0075	0,0100
Ferro Fundido (F°F°)	0,5000	1,0000	1,5000	2,0000	3,0000

Fonte: Adaptado de Porto (2006).

Observa-se que foi adotado DN150 e material de PVC (novo) para a tubulação principal, além disso, o consumo de água ocorre somente a partir das derivações que alimentam cada rede fictícia.

No dimensionamento buscou-se atender a todos os requisitos estipulados pela NBR 12218 (2017), exceto a limitação de pressões acima de 50 m.c.a, visto que este estudo tem por objetivo avaliar a perda de água em situações de pressões elevadas que estejam acima do limite normativo. Todos os resultados do dimensionamento podem ser consultados na planilha de cálculo da rede fictícia apresentada em 3 partes por meio da Figura 26, Figura 27 e Figura 28.

Figura 26: Planilha de cálculo da rede fictícia – Parte 1.

PLANILHA DE CÁLCULO DA REDE FICTÍCIA											
NÓ A MON.	NÓ A JUS.	EXT. (m)	COTA DO TERRENO MON. (m)	COTA DO TERRENO JUS. (m)	VAZÃO (l/s)	DN (mm)	VEL. (m/s)	RUG. (mm)	PERDA DE CARGA UNITÁRIA (m/km)	PRESSÃO DINÂMICA MON. (m)	PRESSÃO DINÂMICA JUS. (m)
1	2	250	100,00	98,00	40,08	150	2,27	0,0015	24,85	15,00	10,79
2	3	200	98,00	98,00	4,06	100	0,52	0,0015	2,83	10,79	10,22
3	4	200	98,00	96,00	0,87	50	0,44	0,0015	5,05	10,22	11,21
3	5	200	98,00	95,00	0,72	50	0,37	0,0015	3,69	10,22	12,48
5	8	200	95,00	93,00	0,36	50	0,18	0,0015	1,07	12,48	14,27
8	7	150	93,00	93,00	-0,47	50	0,24	0,0015	1,72	14,27	14,53
7	3	200	93,00	98,00	-2,10	75	0,47	0,0015	3,46	14,53	10,22
4	6	200	96,00	91,00	0,50	50	0,25	0,0015	1,92	11,21	15,83
7	6	250	93,00	91,00	0,62	50	0,32	0,0015	2,81	14,53	15,83
8	9	200	93,00	92,00	0,45	50	0,23	0,0015	1,64	14,27	14,94
9	10	150	92,00	90,00	0,09	50	0,04	0,0015	0,06	14,94	16,93
10	7	200	90,00	93,00	-0,64	50	0,33	0,0015	2,98	16,93	14,53
10	11	250	90,00	87,00	0,36	50	0,18	0,0015	1,08	16,93	19,66
11	6	200	87,00	91,00	-0,30	50	0,16	0,0015	0,82	19,66	15,83
11	12	100	87,00	86,00	0,29	50	0,15	0,0015	0,77	19,66	20,59
12	13	100	86,00	88,00	-0,08	50	0,04	0,0015	0,05	20,59	18,59
13	6	150	88,00	91,00	-0,44	50	0,23	0,0015	1,58	18,59	15,83
2	14	250	98,00	73,00	36,03	150	2,04	0,0015	20,47	10,79	30,67
14	15	200	73,00	72,00	5,83	100	0,74	0,0030	5,41	30,67	30,59
15	16	200	72,00	69,00	1,80	75	0,50	0,0030	3,87	30,59	32,81
15	24	150	72,00	69,00	0,82	50	0,37	0,0030	3,79	30,59	33,02
24	17	150	69,00	67,00	0,24	50	0,08	0,0030	0,25	33,02	34,98
15	17	150	72,00	67,00	2,62	75	0,52	0,0030	4,04	30,59	34,98
17	18	200	67,00	65,00	1,45	100	0,41	0,0030	4,51	34,98	36,08
18	16	150	65,00	69,00	-0,55	50	0,43	0,0030	4,89	36,08	32,81
16	19	212	69,00	66,00	0,67	50	0,41	0,0030	4,35	32,81	34,89
19	22	150	66,00	62,00	0,64	50	0,31	0,0030	2,66	34,89	38,49
22	23	200	62,00	60,00	0,26	50	0,13	0,0030	0,58	38,49	40,38
23	21	200	60,00	61,00	-0,32	50	0,17	0,0030	0,97	40,38	39,57
21	18	150	61,00	65,00	-0,86	50	0,35	0,0030	3,40	39,57	36,08
18	19	150	65,00	66,00	0,56	50	0,20	0,0030	1,25	36,08	34,89
22	21	150	62,00	61,00	-0,20	50	0,12	0,0030	0,51	38,49	39,57
21	20	220	61,00	64,00	-0,25	50	0,23	0,0030	1,66	39,57	36,94
17	20	150	67,00	64,00	0,83	50	0,53	0,0030	6,98	34,98	36,94
14	25	250	73,00	49,00	30,20	150	1,71	0,0015	14,85	30,67	50,96
25	26	250	49,00	49,00	7,81	150	0,44	1,5000	2,60	50,96	50,31
26	27	150	49,00	47,00	3,17	100	0,40	1,5000	3,77	50,31	51,74
27	28	150	47,00	47,00	0,35	50	0,18	1,5000	1,97	51,74	51,45
26	28	150	49,00	47,00	3,93	100	0,50	1,5000	5,73	50,31	51,45

Fonte: O autor (2025).

Figura 27: Planilha de cálculo da rede fictícia – Parte 2.

PLANILHA DE CÁLCULO DA REDE FICTÍCIA											
NÓ A MON.	NÓ A JUS.	EXT. (m)	COTA DO TERRENO MON. (m)	COTA DO TERRENO JUS. (m)	VAZÃO (l/s)	DN (mm)	VEL. (m/s)	RUG. (mm)	PERDA DE CARGA UNITÁRIA (m/km)	PRESSÃO DINÂMICA MON. (m)	PRESSÃO DINÂMICA JUS. (m)
28	30	200	47,00	44,00	3,56	100	0,45	1,5000	4,74	51,45	53,50
30	29	200	44,00	45,00	0,31	50	0,16	1,5000	1,61	53,50	52,18
29	27	200	45,00	47,00	-2,12	75	0,48	1,5000	7,82	52,18	51,74
29	33	150	45,00	44,00	0,73	50	0,37	1,5000	8,46	52,18	51,91
33	32	200	44,00	40,00	0,02	50	0,01	1,5000	0,02	51,91	55,91
32	29	200	40,00	45,00	-0,99	50	0,50	0,0050	6,36	55,91	52,18
30	31	200	44,00	40,00	2,54	75	0,58	0,0050	4,91	53,50	56,52
31	32	200	40,00	40,00	0,65	50	0,33	0,0050	3,06	56,52	55,91
32	34	200	40,00	36,00	0,95	50	0,48	0,0050	5,95	55,91	58,72
31	35	200	40,00	37,00	1,18	50	0,60	0,0050	8,78	56,52	57,76
34	35	200	36,00	37,00	-0,15	50	0,07	0,0050	0,23	58,72	57,76
34	36	150	36,00	34,00	0,38	50	0,20	0,0050	1,23	58,72	60,53
36	35	250	34,00	37,00	-0,33	50	0,17	0,0050	0,92	60,53	57,76
25	37	250	49,00	27,00	22,39	150	1,27	0,0015	8,63	50,96	70,80
37	38	250	27,00	26,00	10,00	150	0,57	2,0000	4,65	70,80	70,64
38	39	250	26,00	22,00	2,07	75	0,47	2,0000	8,36	70,64	72,55
39	49	330	22,00	18,00	0,63	50	0,32	2,0000	7,05	72,55	74,22
49	45	200	18,00	16,00	-0,20	50	0,10	2,0000	0,78	74,22	76,38
45	39	300	16,00	22,00	-0,64	50	0,33	2,0000	7,24	76,38	72,55
39	40	300	22,00	19,00	-0,03	50	0,01	2,0000	0,02	72,55	75,55
45	40	250	16,00	19,00	-0,70	50	0,36	2,0000	8,71	76,38	75,55
45	46	300	16,00	12,00	0,42	50	0,21	0,0075	1,43	76,38	79,95
46	44	330	12,00	14,00	-0,41	50	0,21	0,0075	1,40	79,95	78,41
44	40	250	14,00	19,00	-0,70	50	0,35	2,0000	8,57	78,41	75,55
44	47	250	14,00	12,00	0,44	50	0,22	0,0075	1,57	78,41	80,02
47	43	300	12,00	15,00	-0,39	50	0,20	0,0075	1,27	80,02	77,40
43	41	250	15,00	20,00	-1,17	50	0,59	0,0075	8,64	77,40	74,56
41	48	300	20,00	20,00	0,48	50	0,25	2,0000	4,19	74,56	73,30
38	40	220	26,00	19,00	2,21	75	0,50	2,0000	9,48	70,64	75,55
38	41	300	26,00	20,00	4,10	100	0,52	2,0000	6,92	70,64	74,56
41	40	250	20,00	19,00	0,05	50	0,03	2,0000	0,03	74,56	75,55
45	44	300	16,00	14,00	-0,11	50	0,06	0,0075	0,11	76,38	78,41
44	41	250	14,00	20,00	-1,16	50	0,59	0,0075	8,61	78,41	74,56
38	42	250	26,00	22,00	0,78	50	0,40	2,0000	10,67	70,64	71,97
42	48	300	22,00	20,00	0,35	50	0,18	2,0000	2,22	71,97	73,30
42	41	200	22,00	20,00	-0,40	50	0,21	2,0000	2,96	71,97	74,56
44	43	250	14,00	15,00	0,06	50	0,03	0,0075	0,04	78,41	77,40
37	50	250	27,00	87,00	12,39	150	0,70	0,0015	2,97	70,80	10,06
50	51	250	87,00	84,00	12,39	150	0,70	0,0100	3,03	10,06	12,30

Fonte: O autor (2025).

Figura 28: Planilha de cálculo da rede fictícia – Parte 3.

NÓ A MON.	NÓ A JUS.	EXT. (m)	COTA DO TERRENO MON. (m)	COTA DO TERRENO JUS. (m)	VAZÃO (l/s)	DN (mm)	VEL. (m/s)	RUG. (mm)	PERDA DE CARGA UNITÁRIA (m/km)	PRESSÃO DINÂMICA MON. (m)	PRESSÃO DINÂMICA JUS. (m)
51	53	200	84,00	66,00	6,77	100	0,92	0,0100	8,09	12,30	28,68
53	56	200	66,00	49,00	5,18	100	0,77	0,0100	5,84	28,68	44,51
56	60	200	49,00	39,00	3,81	100	0,54	0,0100	3,07	44,51	53,90
60	63	200	39,00	18,00	2,16	75	0,53	3,0000	12,64	53,90	72,37
63	65	200	18,00	7,00	0,83	75	0,42	3,0000	14,38	72,37	80,49
63	64	200	18,00	22,00	0,51	50	0,36	3,0000	10,29	72,37	66,31
64	61	200	22,00	35,00	-0,31	50	0,07	3,0000	0,28	66,31	53,37
61	60	200	35,00	39,00	-0,82	50	0,53	3,0000	22,64	53,37	53,90
56	57	200	49,00	52,00	0,54	50	0,50	3,0000	20,26	44,51	37,46
57	61	200	52,00	35,00	0,71	50	0,26	3,0000	5,45	37,46	53,37
53	54	200	66,00	69,00	0,77	50	0,19	0,0100	1,14	28,68	25,45
54	57	200	69,00	52,00	1,67	75	0,56	3,0000	24,96	25,45	37,46
51	52	200	84,00	85,00	4,79	100	0,55	0,0100	3,25	12,30	10,65
52	54	200	85,00	69,00	3,96	100	0,45	3,0000	5,98	10,65	25,45
54	55	200	69,00	70,00	2,24	75	0,45	3,0000	8,94	25,45	22,66
57	58	200	52,00	54,00	0,68	50	0,38	3,0000	11,60	37,46	33,14
55	58	200	70,00	54,00	1,41	75	0,58	3,0000	27,61	22,66	33,14
58	59	200	54,00	55,00	0,83	50	0,42	3,0000	14,38	33,14	29,26
58	62	200	54,00	38,00	0,44	50	0,12	3,0000	1,23	33,14	48,89
62	61	200	38,00	35,00	-0,39	50	0,30	3,0000	7,38	48,89	53,37
Σ =		20662									

Fonte: O autor (2025).

Onde:

NÓ A MON. – Identificação do Nó a montante do trecho;

NÓ A JUS. – Identificação do Nó a jusante do trecho;

EXT. – Extensão da rede (m);

DN. – Diâmetro nominal do tubo (mm);

VEL. – Velocidade do fluxo de água (m/s);

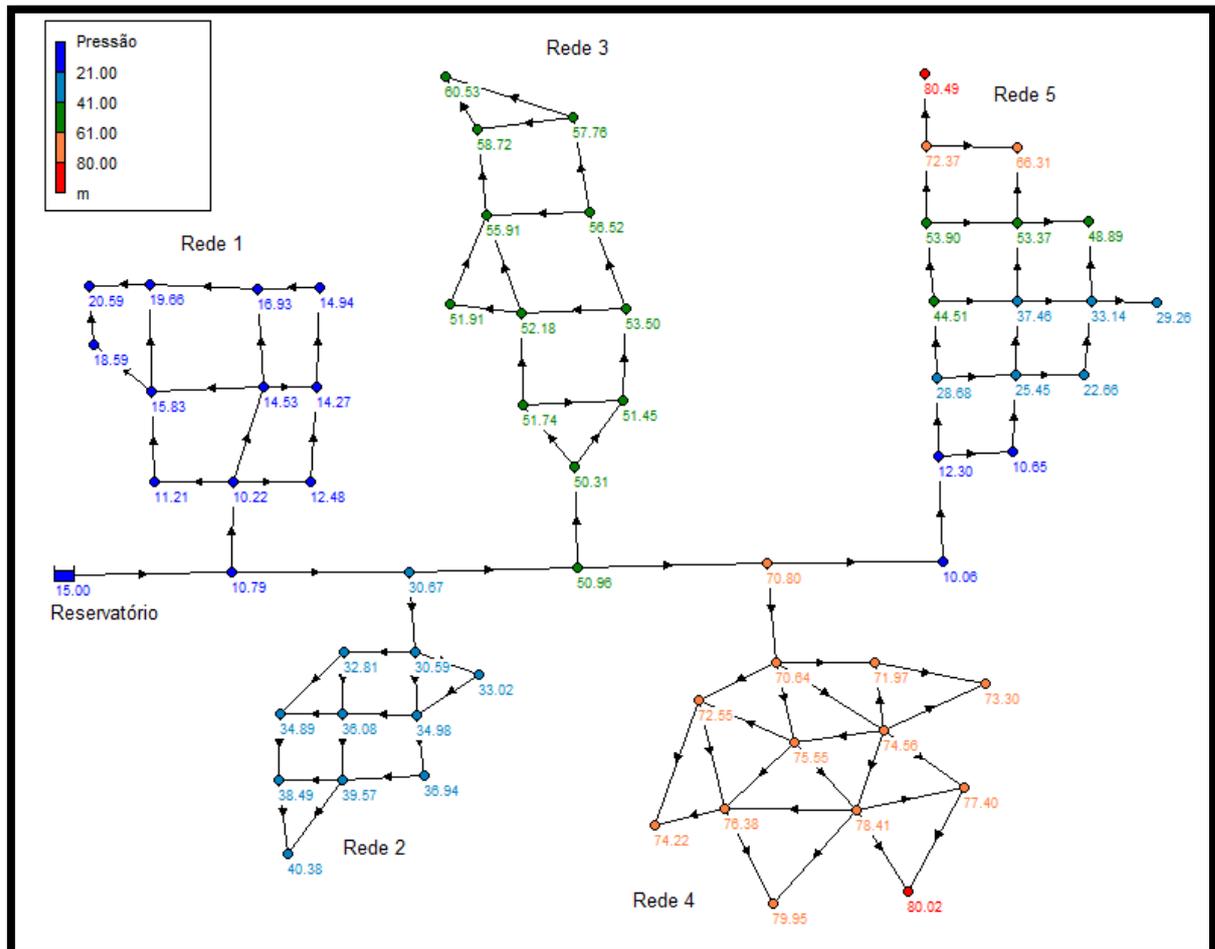
RUG. – Rugosidade do material do tubo (mm).

Os valores de vazões negativos nas planilhas indicam apenas que o sentido de escoamento se dá na direção contrária ao símbolo de seta exibido na interface do *software* EPANET.

Além disso, observa que alguns valores da coluna velocidade ficaram abaixo de 0,4m/s preconizados pela NBR 12218 (2017), isto pode acontecer quando o diâmetro do trecho for o mínimo (50mm) ou em situações em que se opta por justificar tais velocidades abaixo do parâmetro normativo nos casos em que o trecho apresente perdas de carga unitárias muito acima do parâmetro de norma (10 m/km).

Observa-se também que, alguns nós do sistema de referência apresentam pressões acima dos limites previstos pela NBR 12218 (2017), como por exemplo as redes 3 e 4, que apresentam pressões acima de 50 m.c.a. Tais valores foram propositalmente permitidos na rede, de forma que o estudo avalie as melhores ações para combates de perdas até mesmo em sistemas que estejam mal dimensionados e excedam os limites de pressão normativos. A Figura 29 mostra em cores as pressões em cada nó da rede.

Figura 29: Pressões nos nós da rede *benchmark*.



Fonte: O autor (2025).

Desta forma, a variação de 10 m.c.a. de pressão nas redes fictícias 1 a 4 refletem a pouca variação topográfica que é característica do estado do Maranhão. No caso da rede 5, a elevada variação do relevo e pressão simulam parâmetros de sistemas que, apesar de não serem regra no estado do Maranhão, ainda sim podem ocorrer em determinadas localidades dentro dos limites regionais.

4.2.2. Estimativa de perdas totais, evitáveis e inevitáveis do sistema

Para realizar o balanço hídrico do sistema, o cálculo do Consumo Autorizado Faturado (CAF) para cada rede foi realizado conforme mostra a Equação 17.

$$CAF = \frac{P * C * 365}{1000} \quad (17)$$

Onde:

CAF = Consumo autorizado faturado (m³/ano);

P = População (Habitantes);

C = Consumo *per capita* (l . hab⁻¹ . dia⁻¹).

Em seguida, o consumo autorizado não-faturado foi estimado como 5% do CAF. A partir destes dados, calculou-se o consumo autorizado, volume de perdas e volume total do sistema. Conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Volume de Perda Total Anual por rede.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Consumo autorizado faturado (m ³ /ano)	71.175,00	102.200,00	136.875,00	175.200,00	217.175,00
Consumo autorizado não-faturado (m ³ /ano)	3.558,75	5.110,00	6.843,75	8.760,00	10.858,75
Consumo autorizado (m ³ /ano)	74.733,75	107.310,00	143.718,75	183.960,00	228.033,75
Perda de água (%)	45%	52%	60%	62%	75%
Volume de perdas (m ³ /ano)	61.145,80	116.252,50	215.578,13	300.145,26	684.101,25
Volume total do sistema (m ³ /ano)	135.879,55	223.562,50	359.296,88	484.105,26	912.135,00
Perda de água (l . Lig ⁻¹ . Dia ⁻¹)	446,73	637,00	945,00	1096,42	2142,00
Perda de água real (% de perdas totais)	50%	70%	70%	70%	70%
Perda de água aparente (% de perdas totais)	50%	30%	30%	30%	30%

Fonte: O autor (2025).

Observa-se que a distribuição (%) de perdas reais e aparentes foi estimada de acordo com o Quadro 1.

Os vazamentos (perdas reais) inerentes de cada rede foram calculados conforme a Equação 12 utilizando os dados da Tabela 3 e considerando o comprimento de cada ramal predial igual à 6 metros. Além disso, os volumes de vazamentos inerentes foram multiplicados pelos Fatores de Condição de Infraestrutura (FCI), cujos módulos variam de 1 a 5 conforme a idade e o material da tubulação. Por fim, os vazamentos (perdas reais) evitáveis foram calculados subtraindo-se o volume de vazamentos inevitáveis (inerentes) do volume de perda de água total, conforme Equação 11.

Os resultados de cálculo do volume de perda real, volume de vazamentos inerentes e evitáveis para cada rede são mostrados na Tabela 6. Destaca-se também que todos os dados expressos em porcentagens fazem referência ao volume total do sistema (100%).

Tabela 6: Volume de perdas reais totais, evitáveis e inevitáveis por rede.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Perda de água real total (%)	22,50%	36,40%	42,00%	43,40%	52,50%
Volume de perda real (m ³ /ano)	30.572,90	81.376,75	150.904,69	210.101,68	478.870,88
Fator de Condição de Infraestrutura	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Pressão média (m.c.a)	15	35	55	75	35
Perdas reais inerentes (m ³ /ano)	1.386,93	8.347,37	24.463,40	55.771,42	36.293,78
Perdas reais inerentes (%)	1,02%	3,73%	6,81%	11,52%	3,98%
Perdas reais evitáveis (m ³ /ano)	29.185,97	73.029,38	126.441,29	154.330,27	442.577,10
Perdas reais evitáveis (%)	21,48%	32,67%	35,19%	31,88%	48,52%

Fonte: O autor (2025).

Destaca-se que no cálculo das perdas reais inerentes, o valor de pressão média do sistema é extremamente importante para a magnitude dos resultados, de forma que os mesmos devem ser interpretados como “perdas reais inerentes em situação onde a pressão média do sistema permaneça inalterada”. Caso seja realizada alguma ação de controle de pressão em tais sistemas, os valores de perdas reais inerentes devem ser recalculados, de forma a estimar os novos parâmetros do sistema em função da redução de pressão média na rede.

Em seguida, foi estimado o volume de perdas aparentes inevitáveis como sendo 5% do consumo autorizado faturado, conforme sugerido por Manzi (2020). Logo, o volume de perdas aparentes evitáveis é a diferença entre o volume de perdas aparentes total e o volume de perdas aparentes inevitáveis. Os resultados de cálculo do volume de perda aparente, inevitáveis e evitáveis para cada rede são mostrados na Tabela 7:

Tabela 7: Volume de perdas aparentes totais, evitáveis e inevitáveis anuais por rede.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Volume de perda aparente total (m ³ /ano)	30.572,90	34.875,75	64.673,44	90.043,58	205.230,38
Perda de água aparente (%)	22,50%	15,60%	18,00%	18,60%	22,50%
Perdas aparentes inevitáveis (m ³ /ano)	3.558,75	5.110,00	6.843,75	8.760,00	10.858,75
Perdas aparentes inevitáveis (%)	2,62%	2,29%	1,90%	1,81%	1,19%
Perdas aparentes evitáveis (m ³ /ano)	27.014,15	29.765,75	57.829,69	81.283,58	194.371,63
Perdas aparentes evitáveis (%)	19,88%	13,31%	16,10%	16,79%	21,31%

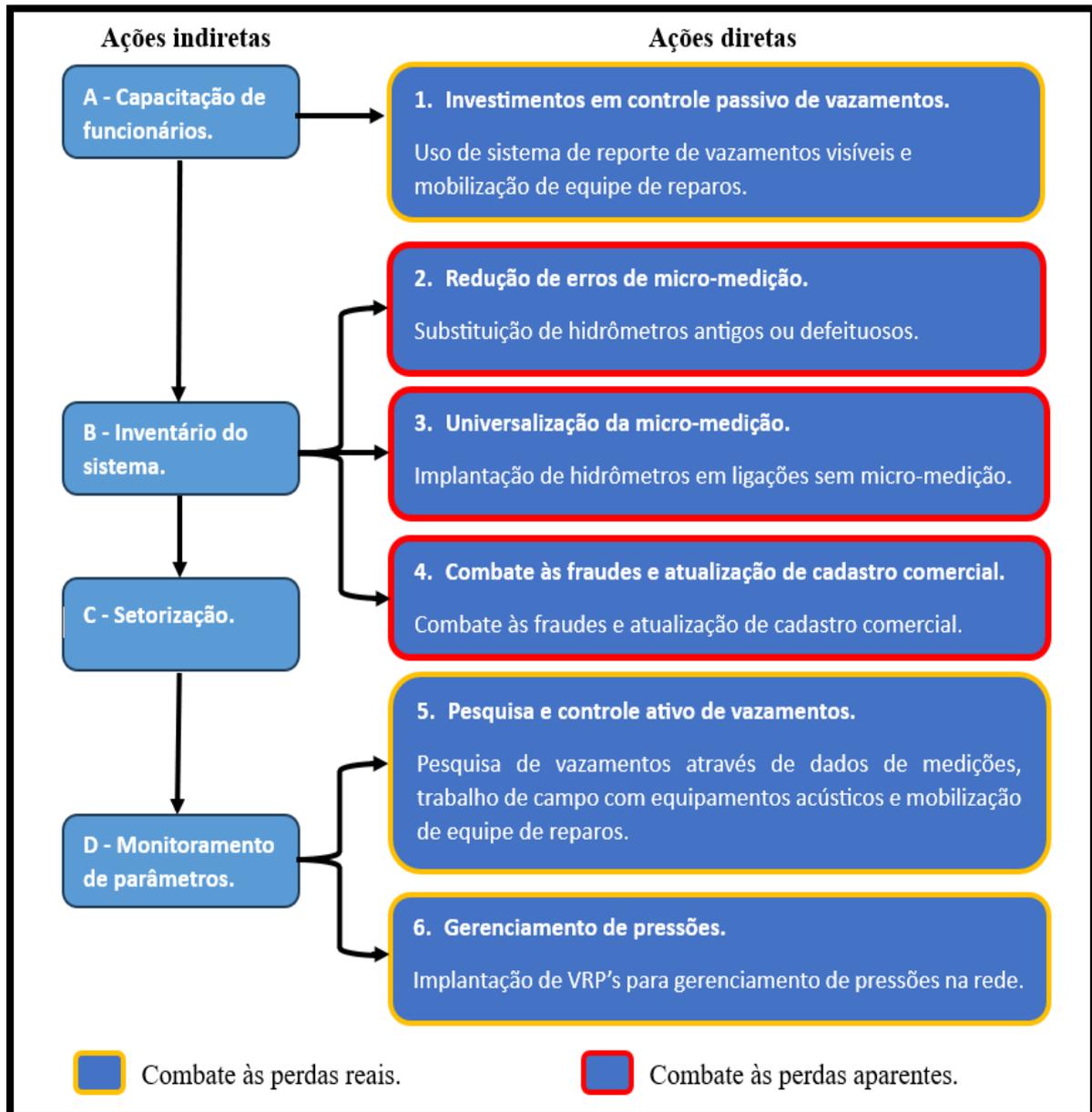
Fonte: O autor (2025).

4.3. Ações de combate às perdas e relações de investimento versus redução de perdas

Nesta etapa serão definidas quais ações para o combate de perdas de água serão simuladas no sistema *benchmark*, bem como seu orçamento técnico para implantação e curvas de retorno em termos de melhoria do índice de perdas de água dos sistemas. Tais ações foram divididas entre indiretas, aquelas que por si só não reduzem os índices de perda de água, e diretas, aquelas que influenciam diretamente no índice de perda de água de um sistema.

A escolha de quais ações serão aplicadas em um sistema para o controle de perdas pode ser bastante complexa, de forma que em muitos casos a aplicação de determinadas ações indiretas são pré-requisito para aplicação de ações diretas. Na Figura 30 o autor propõe o fluxograma de aplicação de ações diretas e indiretas, bem como a relação de dependência entre elas.

Figura 30: Fluxograma de aplicação das ações diretas e indiretas.



Fonte: O autor (2025).

Cada ação oferece diferentes níveis de retorno em forma de redução de perdas sobre o investimento, cada qual representada por uma curva de investimento/retorno em termos de melhoria nos índices de perdas. A escolha da solução (combinação de ações) com o melhor custo-benefício dependerá das necessidades específicas do sistema analisado, dos recursos disponíveis e da urgência na melhoria da eficiência do uso da água.

Observa-se que todos os dados de custos de ações para combate às perdas e seu retorno em termos redução de perdas de água abordados nos itens a seguir são estimativas simplificadas baseadas em dados e estudos reais. Tais dados servem como “ponto de partida” para a análise realizada nesta dissertação, de forma que não podem ser aplicados em sistemas avulsos sem que sejam consideradas as características específicas dos sistemas reais de forma precisa.

Destaca-se também que, na prática, antes de realizar ações pontuais para resolução do problema da perda de água, a concessionária local deve avaliar se há vantagem econômica em simplesmente substituir todas as tubulações existentes (ou grande parte delas) por tubulações novas, especialmente em locais com tubos muito antigos e com elevados índices de perda.

4.3.1. Ações indiretas

As ações indiretas são definidas como aquelas que são necessárias para o combate às perdas de água, mas que por si só não impactam diretamente na redução dos índices de perdas, sendo em geral pré-requisitos de ações diretas.

4.3.1.1. Ação A - Capacitação de funcionários

Tal ação consiste em organizar equipe funcional para controle de perdas, assim como realizar programas de capacitação para funcionários técnicos e operacionais. Segundo o DAE Jundiaí (2017) o treinamento de funcionários é ferramenta indispensável para o combate às perdas, pois está diretamente relacionado com o índice de retrabalho e qualidade dos serviços prestados.

A Equação 18 descreve os custos estimados com capacitação de funcionários.

$$CCF = NF * CTF * FT \quad (18)$$

Onde:

CCF = Custo de capacitação de funcionários (R\$);

NF = Número de funcionários da companhia;

CTF = Custo médio de treinamento de um funcionário (R\$);

FT = Fator de treinamento - Parâmetro adimensional relacionado ao nível de treinamento atual da equipe existente. Neste estudo o autor utilizou como hipótese o coeficiente de 1,00 para nível de treinamento “Ruim”, coeficiente de 0,60 para nível de treinamento “Regular” e coeficiente de 0,20 para nível de treinamento “Bom”.

Para estimar o orçamento com treinamento de funcionários, utilizou-se como base o plano diretor de perdas de água do DAE Jundiaí (2017), que contempla a implantação de um centro

de treinamento próprio, onde ocorrerão treinamentos, reciclagens e capacitação dos trabalhadores da prestadora de serviços de saneamento em suas atividades diárias. De acordo com os dados do estudo, foram previstos investimentos da ordem de R\$ 805.000,00. Ao corrigir este valor pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA do período de outubro de 2017 até agosto de 2024, que segundo o Banco Central do Brasil - BCB (2024) é de 43,31%, obtém-se o orçamento atualizado de R\$ 1.153.645,50. Tal orçamento (R\$ 1.153.645,50) dividido pelo número de funcionários da companhia (530) apontam para um orçamento de treinamento de R\$2.176,69 por funcionário da companhia.

Ainda utilizando os dados do plano diretor de DAE Jundiaí (2017), calculou-se que o índice de funcionários da companhia por consumidor de água atendido é de 0,0013484. Tal índice pode ser utilizado para estimar uma quantidade de funcionários atuantes no sistema *benchmark* multiplicando-o pela população total (12.500 pessoas), de forma que a estimativa total de funcionários atuantes no sistema de referência seja de aproximadamente 17 pessoas.

Assim, o orçamento de treinamento de funcionários do sistema pode ser obtido por meio da multiplicação do custo de treinamento por funcionário (R\$2.176,69) pelo número de funcionários de cada rede do sistema de referência (0,0013484 * população atendida) e pelo fator de treinamento (Nível ruim: 1,00).

4.3.1.2. Ação B - Inventário do sistema

Tal ação consiste no levantamento de inventário do sistema, tais como cadastro de mapas de redes e estrutura existente. Segundo o DAE Jundiaí (2017) a eficiência dos trabalhos realizados pelas equipes de obras novas e manutenção de redes e instalações depende em parte da situação do cadastro de redes.

A Equação 19 descreve os custos estimados com inventário do sistema.

$$CIS = ER * CIR \quad (19)$$

Onde:

CIS = Custo de inventário do sistema (R\$);

ER = Extensão da rede não inventariada (m);

CIR = Custo médio de levantamento de inventário da rede (R\$/m).

Para estimar o orçamento com serviços de inventário do sistema *benchmark*, utilizou-se como base o plano diretor de perdas de água do DAE Jundiaí (2017), que prevê um orçamento da ordem de R\$ 1.880.000,00. Ao corrigir este valor pelo IPCA do período de outubro de 2017

até agosto de 2024, que segundo o BCB (2024) é de 43,31%, obtém-se o orçamento atualizado de R\$2.694.228,00. Tal orçamento para realização de inventário de rede (R\$2.694.228,00) dividido pelo comprimento de rede do sistema (1.861,40 Km) apontam para um orçamento do serviço de elaboração de inventário de rede de R\$1,45 por metro linear de rede.

Excluindo-se o comprimento da adutora principal, a soma de comprimento das 5 redes do sistema é de 19.662,00 metros, de forma que, multiplicando-se tal comprimento por R\$1,45, o custo total do serviço de elaboração de inventário das redes seria de R\$ 28.509,90.

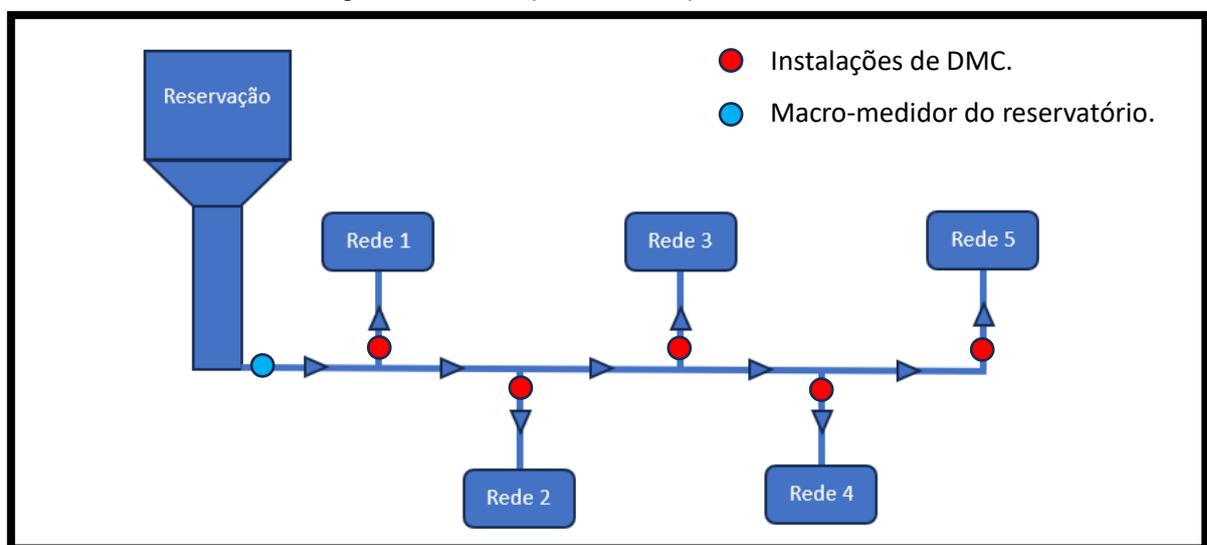
4.3.1.3. Ação C – Setorização

Tal ação consiste na instalação de macro medidores em pontos estratégicos do sistema de distribuição para criação de DMC's, de forma a monitorar grandes volumes de água e identificar as áreas com maiores perdas.

Para estimar o orçamento com implantação de DMC's, utilizou-se como base o plano diretor de perdas de água do DAE Jundiá (2017), que contempla um orçamento de R\$6.000.000,00 para implantação de 98 DMC's. Assim, o custo de implantação de instalações de um DMC é estimado como R\$ 61.224,49. Ao corrigir este valor pelo IPCA do período de outubro de 2017 até agosto de 2024, que segundo o BCB (2024) é de 43,31%, obtém-se o orçamento atualizado de R\$ 87.740,81 para cada DMC implantado.

Na Figura 31 a seguir é destacado em vermelho a localização da implantação de instalações de cada DMC no sistema de referência.

Figura 31: Localização das instalações de cada DMC.



Fonte: O autor (2025).

Por fim, destaca-se que este item não engloba implantação de VRP's (que serão consideradas no item 4.3.2.3).

4.3.1.4. Ação D – Monitoramento de parâmetros

Esta ação consiste na implantação de corpo técnico e sistema de monitoramento de parâmetros de rede, de forma a avaliar o índice de perdas do sistema e indicar anomalias no comportamento do consumo de água por setor.

A Equação 20 descreve os custos estimados do serviço de monitoramento de parâmetros.

$$CMP = CET + CCO \quad (20)$$

Onde:

CMP = Custo de monitoramento de parâmetros (R\$);

CET = Custo anual de equipe técnica para monitoramento de perdas (R\$/ano);

CCO = Custo estimado para implantação de CCO (R\$).

Para este estudo foi estimado um corpo técnico de um engenheiro civil pleno dedicado exclusivamente em monitoramento de dados da rede, análise de padrões de consumo, elaboração de plano diretor de metas e definição de ações prioritárias para o combate de perdas em todas as 5 redes analisadas. De acordo com o sistema CREA-SP (2023) o piso salarial mensal de um engenheiro que trabalhe 8 horas diárias é de 8,5 salários-mínimos, que em 2024 é de R\$1.412,00. Portanto, o salário mensal do engenheiro pleno seria de R\$ 12.002,00 em regime de contrato CLT. Em um estudo publicado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), Souza et al. (2012) esclarece que por conta de encargos sociais, encargos trabalhistas e outras despesas, estima-se que o custo efetivo da empresa com o funcionário pode chegar a 2,83 vezes o salário registrado em carteira. Assim, nesta dissertação, o custo total mensal da companhia em relação ao profissional analista de perdas foi estimado como o dobro de seu salário, totalizando R\$24.004,00 mensais, ou R\$288.048,00 anuais.

Observa-se que, além do corpo técnico de engenharia, necessita-se da implementação de um Centro de Controle de Operações (CCO) juntamente com a implantação de *software* para monitoramento de dados da rede. O custo relacionado a esta etapa foi estimado através do plano diretor de combate as perdas de água no sistema de abastecimento de água de Jaguariúna – SP, realizado pela empresa Novaes Engenharia e Construções (2013). Segundo tal estudo, o custo para implantação do CCO e implementação de *software* de controle de parâmetros do SAA local (com população atendida de 43.880 pessoas) foi de R\$ 32.200,00. Realizando a correção deste valor pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) do período de outubro de 2013 até agosto de 2024, que segundo o BCB (2024) é de 86,32%, obtemos orçamento atualizado de R\$ 59.995,05.

4.3.2. Ações diretas (Perdas reais)

As perdas reais ocorrem por conta de vazamentos, que são classificados como visíveis, não-visíveis detectáveis e não-visíveis inerentes. Neste trabalho foi considerado que os vazamentos visíveis, tanto na tubulação principal quanto nos ramais, significam 50% do volume de perdas reais no sistema, conforme explicita Lambert (2001) para casos onde não existam dados do sistema, além disso, considerou-se que metade do volume de vazamentos visíveis são reportados à companhia de saneamento local.

Já os vazamentos não-visíveis detectáveis foram calculados como o volume total de perdas reais menos o volume de vazamentos visíveis, menos o volume de vazamentos não-visíveis inerentes (já calculado na Tabela 6). Na Tabela 8 são mostrados os resultados por rede.

Tabela 8: Volume de vazamentos visíveis e não visíveis para cada rede.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Volume de perda real (m ³ /ano)	30.572,90	81.376,75	150.904,69	210.101,68	478.870,88
Perda de água real (%)	22,50%	15,60%	18,00%	18,60%	22,50%
Vazamentos visíveis (m ³ /ano)	15.286,45	40.688,38	75.452,34	105.050,84	239.435,44
Vazamentos visíveis (%)	11,25%	18,20%	21,00%	21,70%	26,25%
Vazamentos visíveis reportados (m ³ /ano)	7.643,22	20.344,19	37.726,17	52.525,42	119.717,72
Vazamentos visíveis reportados (%)	5,63%	9,10%	10,50%	10,85%	13,13%
Vazamentos visíveis não-reportados (m ³ /ano)	7.643,22	20.344,19	37.726,17	52.525,42	119.717,72
Vazamentos visíveis não-reportados (%)	5,63%	9,10%	10,50%	10,85%	13,13%
Vazamentos não-visíveis inerentes (m ³ /ano)	1.386,93	8.347,37	24.463,40	55.771,42	36.293,78
Vazamentos não-visíveis inerentes (%)	1,02%	3,73%	6,81%	11,52%	3,98%
Vazamentos não-visíveis detectáveis (m ³ /ano)	13.899,52	32.341,01	50.988,95	49.279,43	203.141,66
Vazamentos não-visíveis detectáveis (%)	10,23%	14,47%	14,19%	10,18%	22,27%

Fonte: O autor (2025).

Neste trabalho, as ações diretas de combate às perdas reais são:

- Ação 1 – Investimento em controle passivo de vazamentos;
- Ação 4 – Pesquisa e controle ativo de vazamentos;
- Ação 5 – Gerenciamento de pressões.

4.3.2.1. Ação 1 – Controle passivo de vazamentos

Esta ação consiste no funcionamento de sistema de avisos de vazamentos visíveis, para que a população, por meio de canais oficiais de contato da concessionária, tenha condições de informar as ocorrências de vazamentos. Assim, este item inclui os custos de mobilização de equipes especializadas para realização dos reparos de vazamentos reportados.

A Tabela 9 mostra a frequência de ocorrências típicas de vazamentos em rede e ramais.

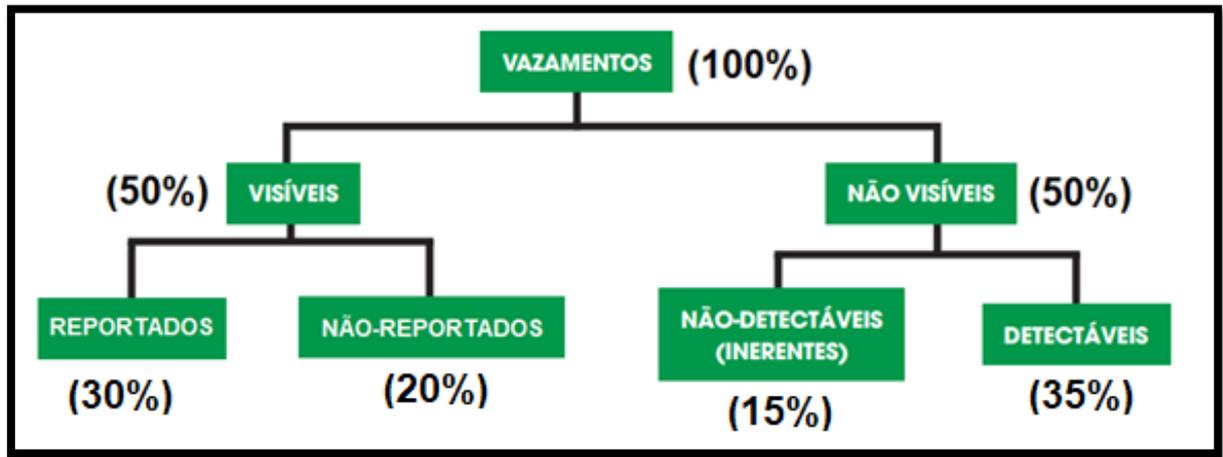
Tabela 9: Ocorrências típicas de vazamentos em rede e ramais.

Ocorrências típicas de vazamentos	Comprimento médio de rede com um vazamento por ano (km)	Frequência usual (vazamento/km de rede ou ramal)
Vazamento na rede	15	0,066
Vazamento em ramal	25	0,400

Fonte: Adaptado de GIZ (2021).

Para este estudo, considerou-se que os vazamentos visíveis reportados ocorrem somente por conta de rompimentos em redes principais. Além disso, por ausência de dados precisos, estimou-se a proporção média de ocorrência de vazamentos conforme mostra a Figura 32.

Figura 32: Proporção de ocorrências de vazamentos.



Fonte: Adaptado de AESBE (2015).

Considerando que o número de ocorrências de vazamentos visíveis reportados anualmente na rede principal represente 30% das ocorrências totais de vazamentos, foi calculada a perda de água média anual por conta de vazamentos visíveis reportados, conforme mostram os resultados da Tabela 10.

Tabela 10: Número de ocorrências de vazamentos visíveis em rede e ramais.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Extensão total da rede (m)	2.950,00	2.782,00	3.250,00	6.180,00	4.500,00
Ocorrências de vazamentos total – Rede principal	195,00	184,00	215,00	408,00	297,00
Ocorrências de vazamentos visíveis reportados	59,00	56,00	65,00	123,00	90,00
Perda média por vazamento visível reportado (m³)	129,55	363,29	580,40	427,04	1.330,20

Fonte: O autor (2025).

Segundo GIZ (2021), o custo médio de reparo de um vazamento em redes é de R\$684,64. Tal valor, corrigido pelo IPCA do período de março de 2021 até agosto de 2024, que segundo o BCB (2024) é de 23,90%, resulta no orçamento atualizado de R\$848,27 para reparação de ocorrências de vazamentos reportados.

Dessa forma, a relação entre investimento em controle passivo de vazamentos e redução da perda de água por vazamentos visíveis reportados pode ser expressa através da Equação 21, proposta pelo autor.

$$RPCP = \frac{INVCP * POVV}{CRV * 1 \text{ ano}} \leq \Sigma POVV \quad (21)$$

Onde:

RPCP = Redução de perdas com controle passivo de vazamentos (m³/ano);

INVCP = Investimento em controle passivo de vazamentos (R\$);

POVV = Perda de água por ocorrência de vazamentos visíveis reportados (m³);

CRV = Custo de reparo de um vazamento (R\$).

4.3.2.2. Ação 5 – Pesquisa e controle ativo de vazamentos

Esta ação consiste na investigação contínua de vazamentos visíveis não-reportados e vazamentos não-visíveis detectáveis da rede para redução de perdas. Segundo GIZ (2021), o custo de pesquisa de vazamentos no Maranhão é de aproximadamente R\$646,31 por Km. Tal valor, corrigido pelo IPCA do período de março de 2021 até agosto de 2024, que segundo o BCB (2024) é de 23,90%, resulta no orçamento atualizado de R\$800,78 por Km de rede para pesquisas de vazamentos visíveis não-reportados e vazamentos não-visíveis detectáveis, tanto em ramais quanto em redes principais.

A Tabela 11 mostra os custos de investigação de vazamentos visíveis não-reportados e vazamentos não-visíveis detectáveis por cada rede.

Tabela 11: Custos de investigação, ocorrências e perdas evitáveis por controle ativo de vazamentos.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Custo de investigação de vazamento	R\$2.362,30	R\$2.227,77	R\$2.602,54	R\$4.948,82	R\$3.603,51

Fonte: O autor (2025).

A quantidade de ocorrências de vazamentos visíveis não-reportados e vazamentos não-visíveis detectáveis podem ser estimadas de acordo com a Figura 32, além disso, os volumes destes vazamentos também já são conhecidos, conforme apresentado na Tabela 8. A Tabela 12 mostra o número de ocorrências e volumes de perdas evitáveis por conta do controle ativo de vazamentos para cada rede.

Tabela 12: Ocorrências de vazamentos e perdas evitáveis por controle ativo de vazamentos.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Nº de vazamentos visíveis não-reportados	136,00	128,00	150,00	285,00	207,00
Extensão total dos ramais (m)	2.250,00	3.000,00	3.750,00	4.500,00	5.250,00
Nº de vazamentos não-visíveis detectáveis	1.180,00	1.113,00	1.300,00	2.472,00	1.800,00
Vazamentos visíveis não-reportados (m ³ /ano)	7.643,22	20.344,19	37.726,17	52.525,42	119.717,72
Vazamentos não-visíveis detectáveis (m ³ /ano)	13.899,52	32.341,01	50.988,95	49.279,43	203.141,66
Perdas evitáveis por controle ativo (m ³ /ano)	21.542,75	52.685,19	88.715,12	101.804,85	322.859,38
Perdas totais evitáveis por controle ativo (%)	15,85%	23,57%	24,69%	21,03%	35,40%

Fonte: O autor (2025).

Tais volumes de perdas por vazamentos foram divididos em 3 classes de magnitudes, de modo a simular que a pesquisa de vazamentos comece em áreas mais críticas (onde poucas ocorrências de vazamentos provocam um grande volume de perdas) e finalize em áreas menos críticas (onde muitas ocorrências de vazamentos provocam um pequeno volume de perdas).

- Classe 1 – Representa cerca de 15% das ocorrências e 50% do volume total;
- Classe 2 – Representa cerca de 35% das ocorrências e 35% do volume total;
- Classe 3 – Representa cerca de 50% das ocorrências e 15% do volume total.

A Tabela 13 mostra os volumes de perdas evitáveis por controle ativo e número de ocorrências de vazamentos por cada classe de magnitude, para cada rede.

Tabela 13: Perdas evitáveis por controle ativo e número de ocorrências de vazamentos por classe.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Perda evitável por controle ativo - Classe 1 (m ³ /ano)	10.771,37	26.342,60	44.357,56	50.902,42	161.429,69
Perda evitável por controle ativo - Classe 1 (%)	7,93%	11,78%	12,35%	10,51%	17,70%
Ocorrências de vazamentos - Classe 1	198,00	187,00	218,00	414,00	302,00
Perda média por vazamento - Classe 1 (m ³)	54,40	140,87	203,48	122,95	534,54
Perda evitável por controle ativo - Classe 2 (m ³ /ano)	7.539,96	18.439,82	31.050,29	35.631,70	113.000,78
Perda evitável por controle ativo - Classe 2 (%)	5,55%	8,25%	8,64%	7,36%	12,39%
Ocorrências de vazamentos - Classe 2	461,00	435,00	508,00	965,00	703,00
Perda média por vazamento - Classe 2 (m ³)	16,36	42,39	61,12	36,92	160,74
Perda evitável por controle ativo - Classe 3 (m ³ /ano)	3.231,41	7.902,78	13.307,27	15.270,73	48.428,91
Perda evitável por controle ativo - Classe 3 (%)	2,38%	3,53%	3,70%	3,15%	5,31%
Ocorrências de vazamentos - Classe 3	657,00	619,00	724,00	1.378,00	1.002,00
Perda média por vazamento - Classe 3 (m ³)	4,92	12,77	18,38	11,08	48,33

Fonte: O autor (2025).

Observa-se que, neste trabalho, foi suposto que o controle ativo de vazamentos inicia em áreas mais críticas (Classe 1), em seguida é realizado em áreas regulares (Classe 2) e finaliza em áreas com menor fator de pesquisa de vazamentos (Classe 3). Portanto, uma vez identificado cada vazamento, o custo estimado para seu reparo é de R\$848,27 por ocorrência, mesmo valor adotado para reparo de vazamentos por controle passivo no item 4.4.2.1.

Dessa forma, a relação entre investimento em controle ativo de vazamentos e redução da perda de água por vazamentos visíveis não-reportados e vazamentos não-visíveis detectáveis pode ser expressa através da Equação 22, proposta pelo autor.

$$RPCA = \frac{(INVCA - CIV) * POV(C)}{CRV * 1 \text{ ano}} \leq \sum POV(C) \quad (22)$$

Onde:

RPCA = Redução de perdas com controle ativo de vazamentos (m^3/ano);

INVCA = Investimento em controle ativo de vazamentos (R\$);

POV (C) = Perda de água por ocorrência de vazamento – por Classe (m^3);

CRV = Custo de reparo de um vazamento (R\$);

CIV = Custo de investigação de vazamentos (R\$).

Utilizou-se como restrição para esta equação a condição de que RPCA seja maior que o dobro do valor de CIV.

4.3.2.3. Ação 6 – Gerenciamento de pressões

Esta ação consiste na implantação de VRP's para melhor controle de pressão em cada rede. O controle de pressão na rede influencia na redução das perdas por vazamentos visíveis, perdas por vazamentos não-visíveis detectáveis e perdas por vazamentos não-visíveis não-detectáveis (inerentes).

Neste trabalho, as redes 1, 2, 3 e 4 possuem variação de pressão de aproximadamente 10 m.c.a, enquanto a rede 5 possui variação de pressão de 70 m.c.a. Nas redes 2, 3 e 4 será simulada a instalação de uma VRP, de forma que as pressões locais sejam reduzidas para a faixa de 10 a 20 m.c.a. Já na rede 5, foi estimado a necessidade de instalação de 4 VRP's para que as pressões fossem reduzidas a valores de 10 a 20 m.c.a.

Além disso, foi considerado o orçamento de R\$ 5.000,00 por instalação de cada VRP. A Tabela 14 mostra a pressão inicial em cada rede, custo de implantação de VRP's e pressão na rede após implantação das VRP's.

Tabela 14: Pressão nas redes e custos de implantação de VRP's.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Pressão inicial na rede (m.c.a)	10 a 20	30 a 40	50 a 60	70 a 80	10 a 80
N° de VRP's adotadas	0	1	1	1	4
Custo de implantação de VRP's (R\$)	R\$ 0	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00	R\$ 20.000,00
Pressão na rede após VRP's (m.c.a)	10 a 20	10 a 20	10 a 20	10 a 20	10 a 20

Fonte: O autor (2025).

A porcentagem de redução de perdas reais devido ao controle de pressões foi calculada com base nas perdas reais inerentes, onde primeiramente calculou-se as perdas reais inerentes utilizando as novas pressões (Após implantação das VRP's) e, em seguida, dividiu-se os valores encontrados pelas perdas reais inerentes antigas (Antes da implantação das VRP's). A porcentagem de redução de perdas reais inerentes foi extrapolada para todos os vazamentos, de forma que a Tabela 15 mostra os resultados para cada rede.

Tabela 15: Redução de perda real por controle de pressões.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Pressão média no sistema antes das VRP's	15	35	55	75	35
Perdas reais inerentes iniciais (m ³ /ano)	1.386,93	8347,36896	24463,395	55771,416	36293,775
Pressão média no sistema após VRP's	15	15	15	15	15
Perdas reais inerentes finais (m ³ /ano)	1386,927	3577,44384	6671,835	11154,2832	15554,475
Redução de perda real (% de perdas reais)	0,00%	57,14%	72,73%	80,00%	57,14%

Fonte: O autor (2025).

4.3.3. Ações diretas (Perdas aparentes)

As perdas aparentes ocorrem por conta de erros de medição, consumos não medidos, falhas de cadastro comercial e fraudes. Neste trabalho, as ações diretas de combate às perdas aparentes foram divididas em:

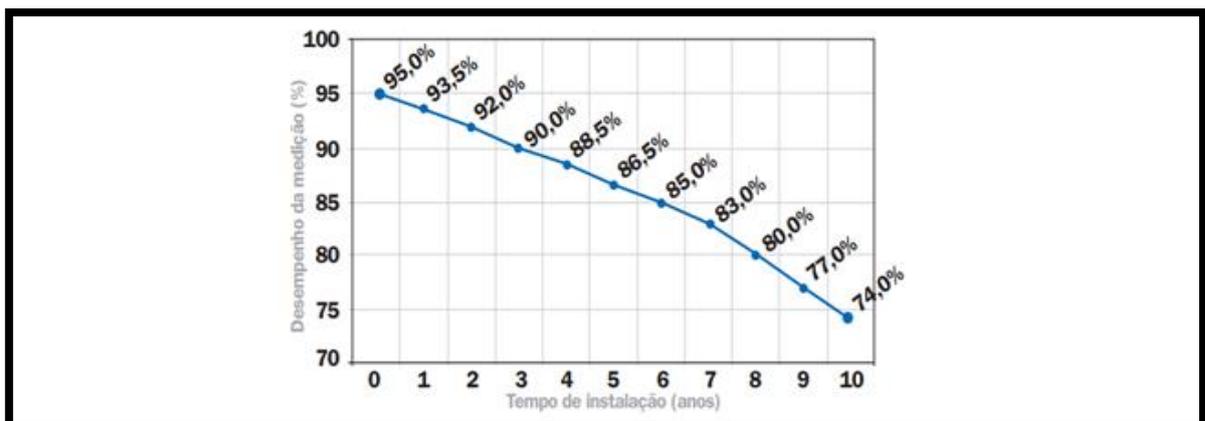
- Ação 2 – Redução de erros de micro-medição;
- Ação 3 – Universalização da micro-medição;
- Ação 4 – Atualização de cadastro comercial e combate às fraudes.

4.3.3.1. Ação 2 – Redução de erros de micro-medição

Consiste na implantação de programa de substituição de micro medidores defeituosos ou fora do prazo de validade, de forma a melhorar a precisão da medição e cobrança pelo uso da água. Adotou-se como premissas de cálculo que, conforme o Quadro 7, o índice de hidrometração nas redes seja de 30%, além disso, adotou-se a hipótese de que as fraudes representem 10% do volume de perdas aparentes totais. Outra estimativa realizada como ponto de partida do estudo foi a da idade média do parque de hidrômetros do sistema, sendo considerado 10 anos.

A Figura 33 mostra o desempenho da medição em função do tempo de instalação dos hidrômetros.

Figura 33: Desempenho da medição em função do tempo de instalação dos hidrômetros.



Fonte: AESBE (2015).

Observa-se que é admitido um erro de 5% de sub-medição em equipamentos novos, sendo neste estudo considerado como sub-medição efetiva os índices abaixo de 95% de eficiência. Dessa forma, com a substituição de hidrômetros antigos por novos, considerou-se que a longo prazo a idade média dos equipamentos reduzisse de 10 anos para 3 anos, reduzindo o índice de sub-medição médio do sistema de 21% para 5%.

Assim, a partir das hipóteses anteriores e do volume de perda aparente total foram calculadas as perdas por sub-medição, conforme mostra a Tabela 16.

Tabela 16: Desempenho da medição em função do tempo de instalação dos hidrômetros.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Volume de perda aparente total (m ³ /ano)	30.572,90	34.875,75	64.673,44	90.043,58	205.230,38
Perda de água aparente (%)	22,50%	15,60%	18,00%	18,60%	22,50%
Nº de ligações hidrometradas	113	150	188	225	263
Volume micro-medido (m ³ /ano)	21.352,50	30.660,00	41.062,50	52.560,00	65.152,50
Erros de micro-medição evitáveis (m ³ /ano)	3.416,40	4.905,60	6.570,00	8.409,60	10.424,40
Erros de micro-medição evitáveis (%)	2,51%	2,19%	1,83%	1,74%	1,14%
Erros de micro-medição evitáveis (m ³ /medidor)	30,23	32,70	34,95	37,38	39,64

Fonte: O autor (2025).

Utilizando os dados do plano diretor de DAE Jundiaí (2017), calculou-se que o custo médio de substituição de um hidrômetro residencial é de, aproximadamente R\$302,17. Tal valor, corrigido pelo IPCA do período de outubro de 2017 até agosto de 2024, que segundo o BCB (2024) é de 43,31%, resulta no orçamento atualizado de R\$433,04.

Dessa forma, a relação entre investimento em substituição de hidrômetros e redução da perda de água aparente pode ser expressa através da Equação 23, proposta pelo autor.

$$RPSH = \frac{INVSH * PESM}{CSHR * 1 \text{ ano}} \leq \sum PESM \quad (23)$$

Onde:

RPSH = Redução de perdas com substituição de hidrômetros (m³/ano);

INVSH = Investimento em substituição de hidrômetros (R\$);

PESM = Perda de água anual evitável por sub-medição (m³/Hida);

CSHR = Custo de substituição de hidrômetro residencial (R\$).

4.3.3.2. Ação 3 – Universalização da micro-medição

Considerando que o percentual de residências sem hidrometração seja de 70% (Quadro 7), além de que o volume mensal cobrado em economias sem micro-medição seja de 10m³ (Tarifa mínima), calculou-se a perda de água por falta de micro-medição através da diferença entre o consumo autorizado não-medido (Com 5% de erro, considerando que a longo prazo a

idade média do parque de hidrômetros será de 3 anos) e o volume cobrado em economias sem hidrômetros, conforme mostra a Tabela 17.

Tabela 17: Perda de água por falta de micro-medição.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Nº de ligações não-hidrometradas	262	350	437	525	612
Volume consumido aut. não-medido (m³/ano)	49.822,50	71.540,00	95.812,50	122.640,00	152.022,50
Cobrança em economias sem Hida. (m³/ano)	45.000,00	60.000,00	75.000,00	90.000,00	105.000,00
Perdas por falta de Hida. (m³/ano)	4.822,50	11.540,00	20.812,50	32.640,00	47.022,50
Perdas evitáveis por falta de hid. (m³/ano)	4.581,38	10.963,00	19.771,88	31.008,00	44.671,38
Perdas evitáveis por falta de hid. (%)	3,37%	4,90%	5,50%	6,41%	4,90%
Perdas evitáveis por falta de hid. (m³/hid.ano)	17,49	31,32	45,24	59,06	72,99

Fonte: O autor (2025).

Utilizando o mesmo orçamento para instalação de hidrômetro do item anterior (R\$433,04), a relação entre investimento em instalação de hidrômetros e redução da perda de água aparente pode ser expressa através da Equação 24, proposta pelo autor.

$$RPIH = \frac{INVIH * PEFM}{CIHR * 1 \text{ ano}} \leq \sum PEFM \quad (24)$$

Onde:

RPIH = Redução de perdas com instalação de hidrômetros (m³/ano);

INVIH = Investimento em instalação de hidrômetros (R\$);

PEFM = Perda de água anual evitável por falta de medição (m³/hid);

CIHR = Custo de instalação de hidrômetro residencial (R\$).

4.3.3.3. Ação 4 – Combate às fraudes e atualização de cadastro comercial

Esta ação consiste no combate às fraudes de ligações de água através de aquisição/utilização de equipamento específico de investigação e atualização do cadastro comercial de consumidores.

Adotou-se a hipótese de que as perdas por fraudes foram calculadas como sendo 10% do consumo faturado, sendo que somente 90% delas foram consideradas evitáveis neste estudo. Já as falhas de cadastro foram contabilizadas, neste estudo, como sendo o volume de perda aparente total, menos as perdas aparentes inevitáveis, menos as perdas por erros de micro-medição evitáveis, menos as perdas por falta de hidrômetros evitáveis, menos as perdas por fraudes evitáveis.

Os resultados são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18: Perda de água por fraudes e falhas de cadastro.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Volume de perda aparente total (m ³ /ano)	30.572,90	34.875,75	64.673,44	90.043,58	205.230,38
Perda de água aparente (%)	22,50%	15,60%	18,00%	18,60%	22,50%
Perdas por fraudes (m ³ /ano)	7.117,50	10.220,00	13.687,50	17.520,00	21.717,50
Perdas por fraudes evitáveis (m ³ /ano)	6.405,75	9.198,00	12.318,75	15.768,00	19.545,75
Perdas por fraudes evitáveis (%)	4,71%	4,11%	3,43%	3,26%	2,14%
Perdas por fraudes evitáveis (m ³ /lig.ano)	17,08	18,40	19,71	21,02	22,34
Falhas de Cadastro (m ³ /ano)	12.610,62	4.699,15	19.169,06	26.097,98	119.730,10
Falhas de Cadastro (%)	9,28%	2,10%	5,34%	5,39%	13,13%
Falhas de Cadastro (m ³ /lig.ano)	33,63	9,40	30,67	34,80	136,83
Perdas por fraudes evitáveis e falhas de cadastro (m ³ /ano)	19.016,37	13.897,15	31.487,81	41.865,98	139.275,85
Perdas por fraudes evitáveis e falhas de cadastro (m ³ /lig.ano)	50,71	27,79	50,38	55,82	159,17

Fonte: O autor (2025).

Para que seja possível identificar fraudes, é necessário primeiramente a aquisição de equipamentos específicos para a investigação (R\$ 100.000,00 na cotação realizada pelo autor). Uma vez equipados, os funcionários podem investigar a ocorrência de fraudes e, além disso, a concessionária poderá realizar a atualização cadastral de acordo com a inspeção realizada. O custo de atualização cadastral por ligação foi estipulado através do plano diretor de perdas de água do DAE Jundiá (2017), resultando em R\$22,44 por ligação. Tal valor, corrigido pelo IPCA do período de outubro de 2017 até agosto de 2024, que segundo o BCB (2024) é de 43,31%, resulta no orçamento atualizado de R\$32,16.

O orçamento estimado para aquisição de equipamento de detecção de fraudes para cada rede, além do orçamento para investigação de fraudes e atualização cadastral são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Investimento em investigação de fraudes e atualização cadastral.

Parâmetro	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Investimento em equipamento detector de fraudes (R\$)	R\$100.000,00	R\$100.000,00	R\$100.000,00	R\$100.000,00	R\$100.000,00
Combate às fraudes e atualização cadastral (R\$)	R\$12.060,00	R\$16.080,00	R\$20.100,00	R\$24.120,00	R\$28.140,00
Custo de combate às fraudes e atualização cadastral total (R\$)	R\$112.060,00	R\$116.080,00	R\$120.100,00	R\$124.120,00	R\$128.140,00
Custo de combate às fraudes e atualização cadastral (R\$/lig)	R\$298,83	R\$232,16	R\$192,16	R\$165,49	R\$146,45

Fonte: O autor (2025).

Dessa forma, a relação entre investimento em combate a fraudes e atualização cadastral versus a redução da perda de água aparente pode ser expressa através da Equação 25, proposta pelo autor.

$$RPFC = \frac{INVFC * PEFC}{CFC * 1 \text{ ano}} \leq \sum PEFC \quad (25)$$

Onde:

RPFC = Redução de perdas com combate a fraudes e atualização cadastral (m³/ano);

INVFC = Investimento em combate a fraudes e atualização cadastral (R\$);

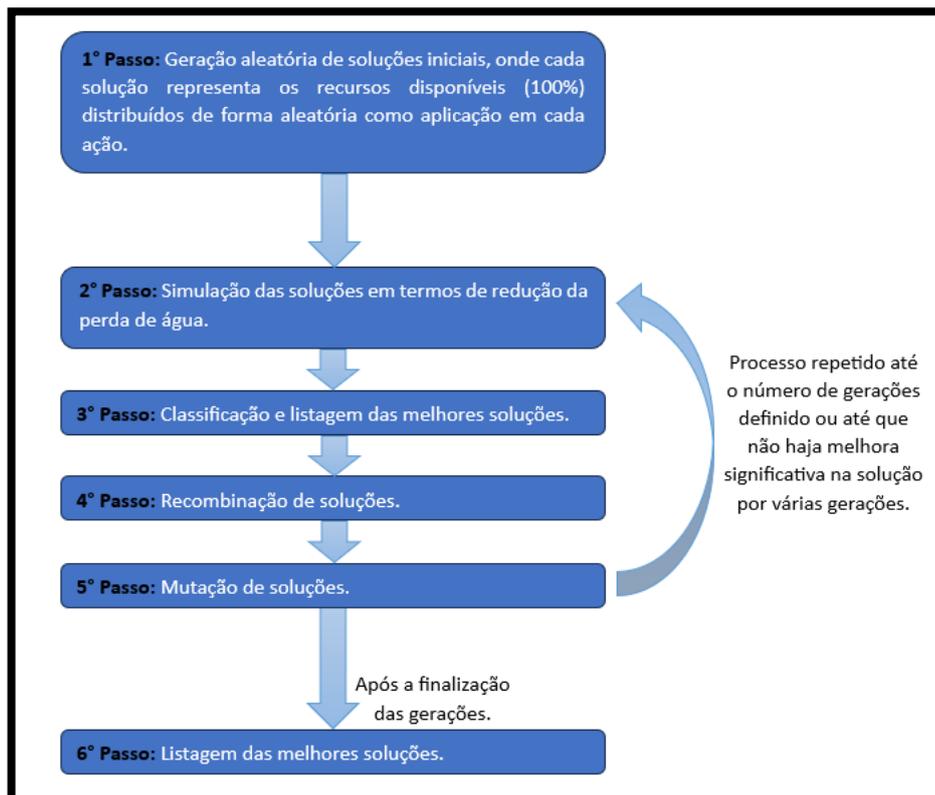
PEFC = Perda de água anual evitável por fraudes e atualização cadastral (m³/lig);

CFC = Custo de combate a fraudes e atualização cadastral (R\$/lig).

4.4. Implementação do modelo de otimização e simulação das ações

Nesta etapa, utilizou-se a ferramenta de algoritmos genéticos do *software Microsoft Excel* para simular e verificar qual a solução (Distribuição do investimento entre as ações) ótima no combate de perdas de água para cada rede do sistema *benchmark*. Para isto, todo o equacionamento e curvas de investimentos versus redução de perdas por ação foram organizados em uma planilha, de forma que, de acordo com o investimento definido para cada ação o *software* retorne como resultado a redução de perdas correspondente em uma célula posterior. A Figura 34 demonstra o fluxograma de aplicação do algoritmo genético (evolucionário) utilizado para determinar a solução ótima para combate das perdas de água do sistema *benchmark* em termos de redução do índice de perdas.

Figura 34: Fluxograma de aplicação do algoritmo genético (evolucionário).



Fonte: O autor (2025).

- **1º Passo** – Foram programadas 200 soluções iniciais aleatórias, onde cada solução representa a distribuição do total do recurso financeiro (neste trabalho definido como R\$ 250.000,00) em parcelas aplicadas entre as ações de combate às perdas de água. A Tabela 20 apresenta exemplos de possíveis soluções iniciais.

Tabela 20: Exemplos de soluções iniciais.

	Ação A	Ação 1	Ação B	Ação 2	Ação 3	Ação 4	Ação C	Ação D	Ação 5	Ação 6	Σ
Solução 1	4 %	15 %	4 %	15 %	15 %	10 %	15 %	2 %	10 %	10 %	100%
Solução 2	4 %	20 %	4 %	0 %	10 %	20 %	15 %	2 %	15 %	10 %	100%
Solução 3	4 %	40 %	4 %	20 %	0 %	0 %	15 %	2 %	10 %	5 %	100%
Solução 4	4 %	0 %	4 %	15 %	20 %	20 %	15 %	2 %	15 %	5 %	100%
Solução 5	4 %	32 %	4 %	20 %	20 %	20 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100%
Solução 6	4 %	96 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100%

Fonte: O autor (2025).

Para o funcionamento do algoritmo genético, observam-se as seguintes restrições:

Restrição 1 - A distribuição do investimento é realizada nas ações diretas 1,2,3,4,5 e 6 (em azul escuro), de forma que o custo de qualquer ação indireta A, B, C e D (Em azul claro) só seja contabilizado caso haja algum pré-requisito relacionado, conforme já explicitado na Figura 30.

Restrição 2 - A porcentagem do investimento dedicada a cada ação pode variar de 0 a 100%;

Restrição 3 - Para cada solução, o somatório do investimento nas ações deve equivaler a 100%;

- **2º Passo** – Cada uma das soluções iniciais é simulada de acordo com o equacionamento de investimento/retorno definidas na seção 4.3 deste estudo. Após a simulação, para cada solução, o *software* obtém a redução de perdas de água, em unidade de m³/ano. Observa-se também a seguinte restrição:

Restrição 4 - Caso haja redução de perdas proveniente da ação 6 (controle de pressão), a redução de perdas obtida pela ação 1 (Controle passivo) e ação 5 (Controle ativo) deverá ser multiplicada pelo Fator de Redução (FR) mostrado na Equação 22:

$$FR = 100\% - \% \text{ de redução de perdas reais obtida na ação 6} \quad (22)$$

Tal Fator de Redução simula que, após aplicado o controle de pressão, o volume de perdas por vazamento diminuirá nas redes, porém o número de ocorrências de vazamentos permanecerá inalterado, diminuindo assim o custo benefício das ações 1 e 5 em termos de investimento versus redução de perdas. Destaca-se que este artifício é uma simplificação realizada para simular a relação de eficiência do controle de vazamentos após a realização da ação de controle de pressão nas redes.

- **3º Passo** – Após o cálculo da redução de perdas de todas as soluções iniciais, o algoritmo lista as melhores soluções.
- **4º Passo** – Aplicando os conceitos de algoritmos genéticos, o *software* realiza a recombinação das melhores soluções selecionadas (*Cross-over*), dando origem à geração seguinte de soluções.
- **5º Passo** – Além da recombinação de genes, também é realizada a mutação de algumas soluções (Taxa de mutação = 0,05), a fim de garantir a diversidade dos genes, prevenindo que todas as soluções fiquem estagnadas em um ponto ótimo local.

Uma vez definida a nova geração, os passos 2 a 5 são executados de modo cíclico, tendo como **função objetivo** maximizar o valor da célula que expressa a redução de perda de água na rede de referência analisada, o processamento é realizado que até não haja melhoria significativa na solução por várias gerações (Convergência = 0,001) durante um determinado tempo de processamento (100 segundos).

- **6º Passo** – Após atingido o critério de parada, o *software* retorna como resultado a solução ótima de distribuição do investimento para a rede analisada, que representa a redução ótima de perda de água (expressa em m³/ano e em porcentagem do volume total do sistema).

4.5. Avaliação dos resultados

A etapa final consiste na avaliação das melhores soluções apresentadas durante a simulação computacional, ou seja, é recomendada a solução que possui melhor relação custo-benefício em termos de redução de perdas para cada rede do sistema de referência. Tal avaliação é realizada no item 5.3 deste trabalho.

5. RESULTADOS

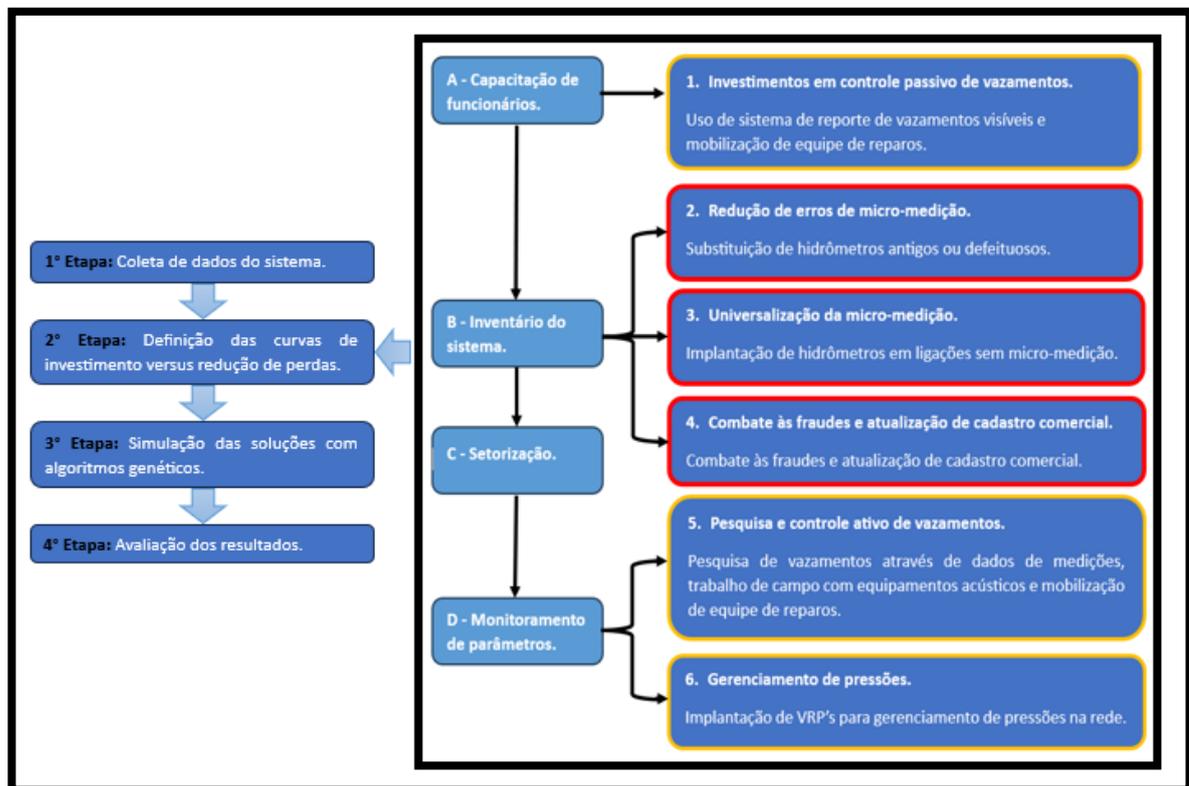
5.1. Metodologia proposta para análise de ações de combate a perdas de água

Apesar de compor um resultado deste trabalho, o fluxograma da metodologia de análise e otimização de perdas **proposta pelo autor** foi apresentada no item 4.1 (Figura 22) para facilitar ao leitor a compreensão do método aplicado à rede de referência.

De forma análoga, o sistema de pré-requisitos de aplicação das ações para combate às perdas (Figura 30), que foi proposto pelo autor, também constitui resultado deste trabalho, sendo apresentado anteriormente para facilitar o entendimento da aplicação do método proposto nos itens que o seguiram.

Neste sentido, a Figura 35 traz o fluxograma do método proposto integrado com a ordem de aplicação das ações também proposta pelo autor, representando assim toda a metodologia de otimização de análise de perdas apresentada e aplicada neste estudo.

Figura 35: Metodologia de análise e otimização de perdas proposta.



Fonte: O autor (2025).

Da mesma maneira são os dados da rede de distribuição de água *benchmark* modelada, os dados de balanço hídrico do sistema e as equações de investimento versus redução de perdas que foram apresentados no item 4. Todos estes são resultados obtidos pelo autor, sendo apresentados conforme o desenvolvimento metodológico para melhor compreensão do processo.

5.2. Custos e relações de investimento versus redução de perdas do sistema por ação

A partir das equações desenvolvidas para cada ação, foram calculados os custos e relações de investimento versus redução de perdas do sistema *benchmark*, que são apresentadas a seguir.

- **Ação A - Capacitação de funcionários.**

Na Tabela 21 é apresentado o orçamento de treinamento de funcionários do sistema *benchmark*, calculado para cada uma das redes.

Tabela 21: Orçamento de treinamento de funcionários do sistema benchmark, por rede.

Item	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5	Total
Treinamento de funcionários do sistema	R\$ 4.402,57	R\$ 5.870,10	R\$ 7.337,62	R\$ 8.805,15	R\$ 10.272,67	R\$ 36.688,11

Fonte: O autor (2025).

- **Ação B - Inventário do sistema.**

Na Tabela 22 é apresentado o orçamento de elaboração de inventário em cada rede.

Tabela 22: Orçamento do serviço de elaboração de inventário por rede.

Item	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5	Total
Elaboração de inventário do sistema	R\$ 4.277,50	R\$ 4.033,90	R\$ 4.712,50	R\$ 8.961,00	R\$ 6.525,00	R\$ 28.509,90

Fonte: O autor (2025).

- **Ação C – Setorização.**

Na Tabela 23 é apresentado o orçamento da implantação de instalações de instalações de DMC para cada rede.

Tabela 23: Orçamento do serviço de implantação de instalações de DMC por rede.

Item	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Implantação de DMC	R\$ 87.740,81				

Fonte: O autor (2025).

- **Ação D – Monitoramento de parâmetros.**

A Tabela 24 apresenta o custo para implantação de sistema de monitoramento de rede.

Tabela 24: Custo mensal do corpo técnico de engenharia para monitoramento de redes.

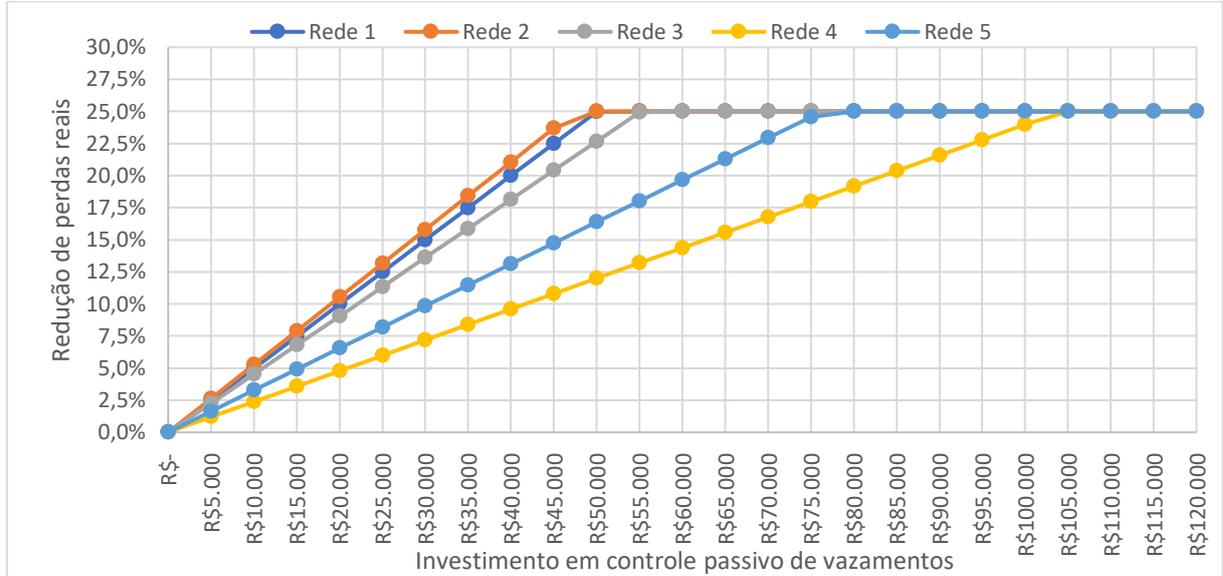
Item	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5	Total
Corpo técnico de engenharia	R\$57.609,60 (anual)	R\$288.048,00 (anual)				
Implantação de CCO e software monitor	R\$11.999,01	R\$11.999,01	R\$11.999,01	R\$11.999,01	R\$11.999,01	R\$59.995,05

Fonte: O autor (2025).

- **Ação 1 – Controle passivo de vazamentos.**

A Figura 36 mostra a representação gráfica da Equação 21 para cada rede do sistema.

Figura 36: Investimento em controle passivo de vazamentos x redução de perdas reais.



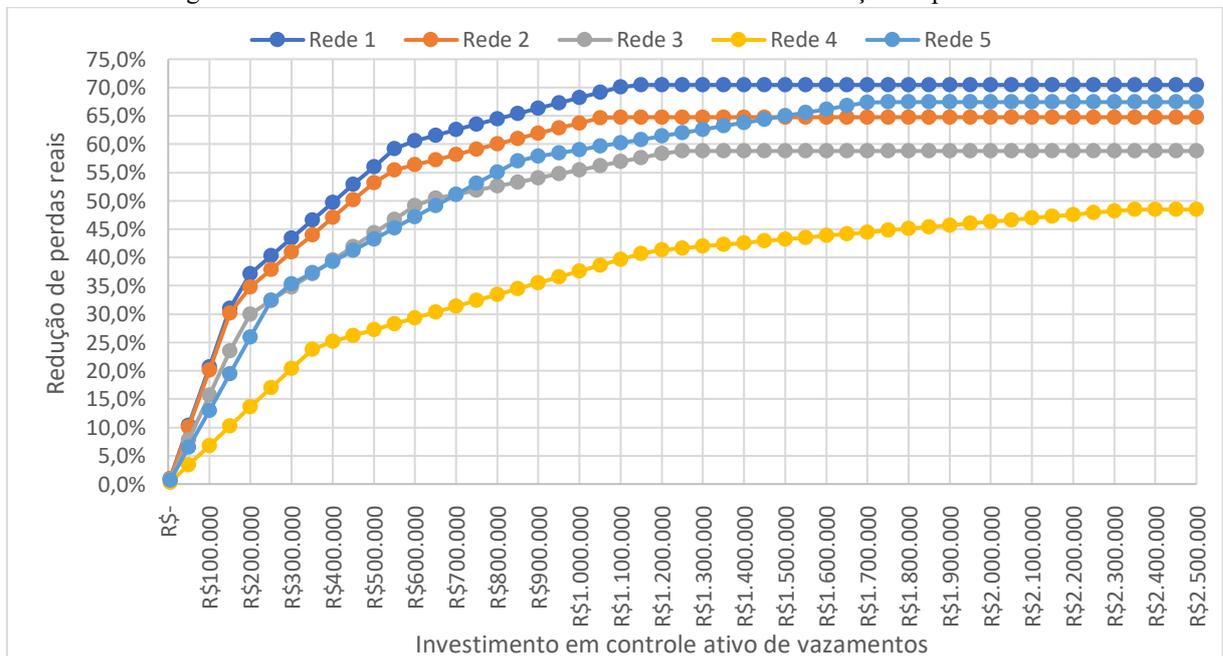
Fonte: O autor (2025).

Observa-se que o volume de vazamentos visíveis reportados representa 25% das perdas reais, de forma que este seja o limite para investimentos nesta ação, pois investimentos além desta faixa não produzirão retornos em termos de redução da perda de água real.

- **Ação 5 – Pesquisa e controle ativo de vazamentos.**

A Figura 37 mostra a representação gráfica da Equação 22 para cada rede do sistema.

Figura 37: Investimento em controle ativo de vazamentos x redução de perdas reais.

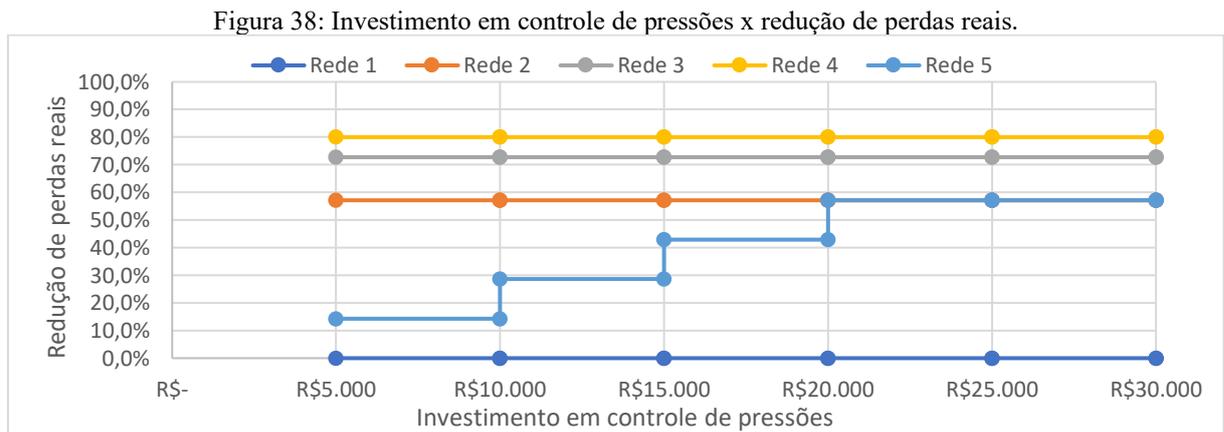


Fonte: O autor (2025).

Nota-se que, para cada rede, os vazamentos combatidos com controle ativo representam diferentes porcentagens das perdas reais, de forma que para cada rede este seja o limite de investimentos nesta ação, pois investimentos além desta faixa não produzirão retornos em termos de redução da perda de água real.

• **Ação 6 – Gerenciamento de pressões.**

A Figura 38 mostra a relação aproximada entre investimentos em controle de pressões e redução do índice de perdas reais para cada rede do sistema.

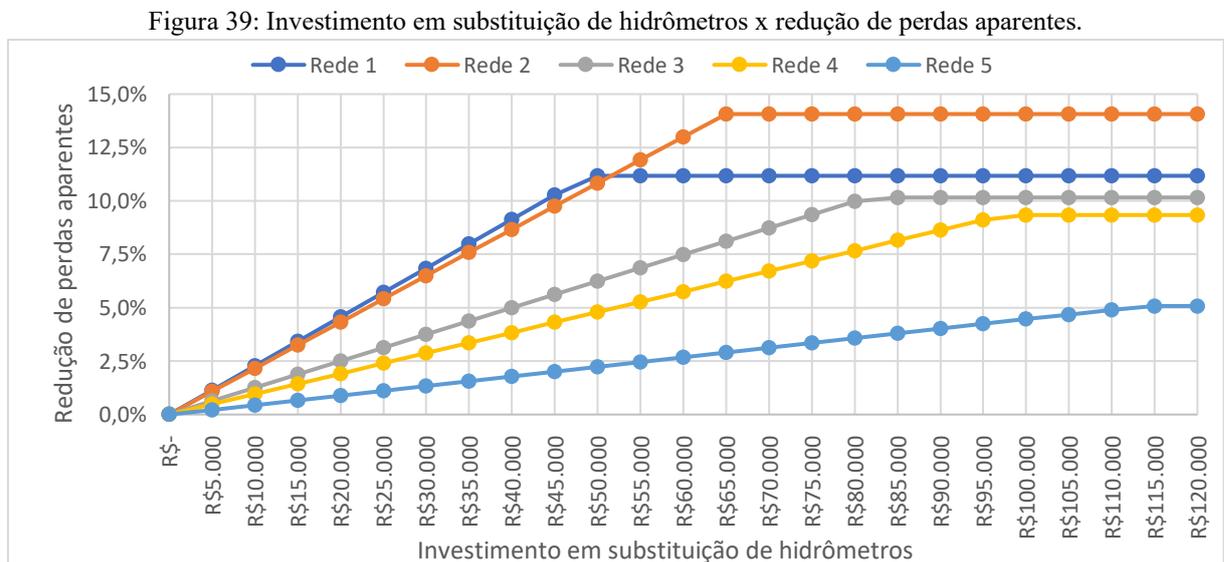


Fonte: O autor (2025).

Por fim, destaca-se que a ação de controle de pressão deve ser a primeira a ser implementada nos sistemas, visto que sua aplicação reduz os vazamentos inerentes e ocasiona uma nova configuração de balanço hídrico no sistema.

• **Ação 2 – Redução de erros de micro-medição.**

A Figura 39 mostra a representação gráfica da Equação 23 para cada rede do sistema.



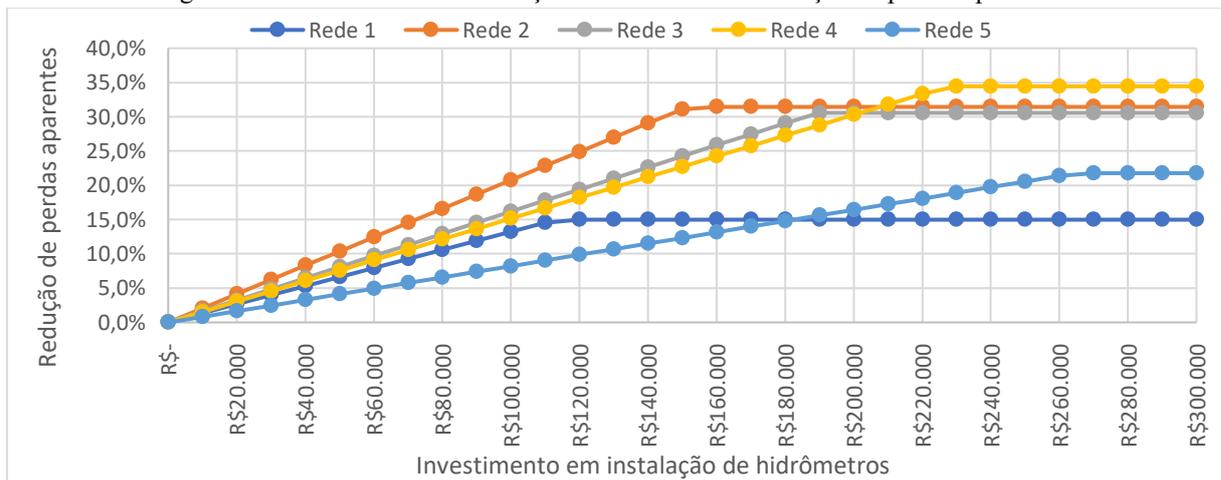
Fonte: O autor (2025).

Observa-se que as perdas por erros de medição representam diferentes porcentagens das perdas aparentes totais em cada rede, de forma que este seja o limite para investimentos nesta ação, pois investimentos além desta faixa não produzirão retornos em termos de redução da perda de água aparente em cada rede.

- **Ação 3 – Universalização da micro-medição.**

A Figura 40 mostra a representação gráfica da Equação 24 para cada rede do sistema.

Figura 40: Investimento em instalação de hidrômetros x redução de perdas aparentes.



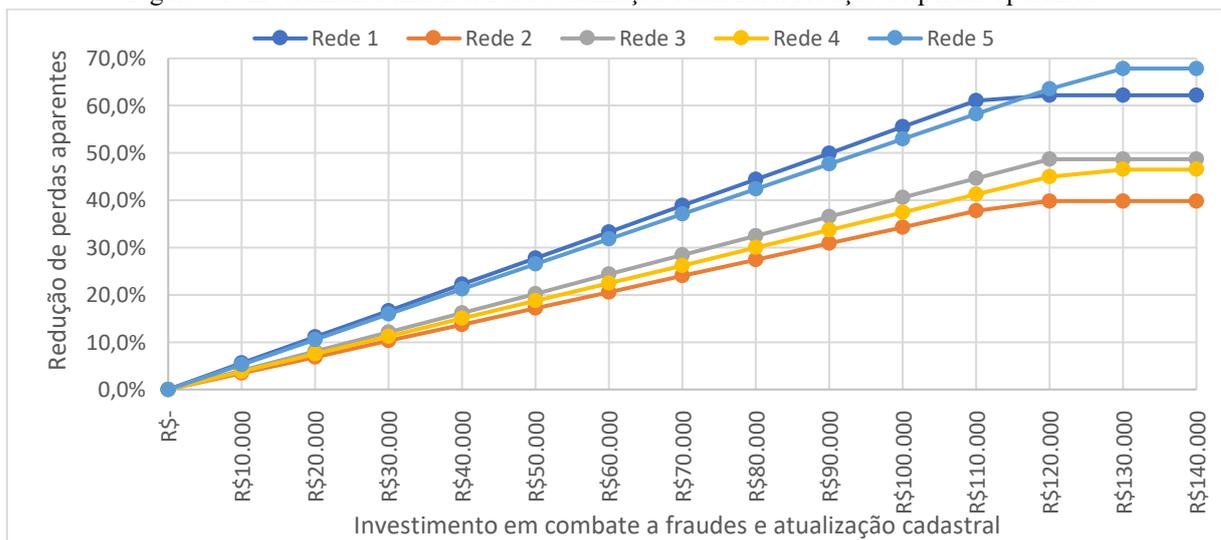
Fonte: O autor (2025).

Observa-se que as perdas por falta de micro-medição representam diferentes porcentagens das perdas aparentes totais em cada rede, sendo este o limite para investimentos nesta ação, pois investimentos além desta faixa não reduzirão a perda de água aparente na rede.

- **Ação 4 – Combate às fraudes e atualização de cadastro comercial.**

A Figura 41 mostra a representação gráfica da Equação 25 para cada rede do sistema.

Figura 41: Investimento anti-fraudes e atualização cadastral x redução de perdas aparentes.



Fonte: O autor (2025).

Observa-se que, neste estudo, os retornos financeiros da concessionária por conta de multas por fraudes não foram contabilizados.

5.3. Resultados da análise do sistema *benchmark*

Após a execução do algoritmo genético, o *software* retornou como resultado a distribuição ótima do investimento total entre cada ação. Os resultados são exibidos na Tabela 25, onde é mostrada a distribuição do investimento em porcentagem e também o valor em reais correspondente ao investimento em cada ação.

Tabela 25: Distribuição ótima do investimento.

	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Ação A	1,7610% R\$ 4.402,57	2,3480% R\$ 5.870,10	2,9350% R\$ 7.337,62	3,5221% R\$ 8.805,15	4,1091% R\$ 10.272,67
Ação 1	20,0192% R\$ 50.047,93	19,0012% R\$ 47.503,12	0,0000% R\$ 0,00	0,0000% R\$ 0,02	0,0000% R\$ 0,00
Ação B	1,7110% R\$ 4.277,50	1,6136% R\$ 4.033,90	1,8850% R\$ 4.712,50	3,5844% R\$ 8.961,00	2,6100% R\$ 6.525,00
Ação 2	19,5734% R\$ 48.933,57	0,0000% R\$ 0,00	0,0000% R\$ 0,00	0,0000% R\$ 0,00	0,0000% R\$ 0,00
Ação 3	12,1133% R\$ 30.283,22	0,0000% R\$ 0,01	0,0000% R\$ 0,00	0,0000% R\$ 0,01	0,0000% R\$ 0,00
Ação 4	44,8240% R\$ 112.060,00	12,0983% R\$ 30.245,83	30,2400% R\$ 75.600,00	27,9547% R\$ 69.886,73	22,3429% R\$ 55.857,29
Ação C	0,0000% R\$ 0,00	35,0963% R\$ 87.740,81	35,0963% R\$ 87.740,81	35,0963% R\$ 87.740,81	35,0963% R\$ 87.740,81
Ação D	0,0000% R\$ 0,00	27,8434% R\$ 69.608,61	27,8434% R\$ 69.608,61	27,8434% R\$ 69.608,61	27,8434% R\$ 69.608,61
Ação 5	0,0000% R\$ 0,00	0,0000% R\$ 0,00	0,0000% R\$ 0,00	0,0000% R\$ 0,01	0,0000% R\$ 0,00
Ação 6	0,0000% R\$ 0,00	2,0000% R\$ 5.000,00	2,0000% R\$ 5.000,00	2,0000% R\$ 5.000,02	8,0000% R\$ 20.000,00
Σ	100,00% R\$ 250.004,79	100,00% R\$ 250.002,38	100,00% R\$ 249.999,54	100,00% R\$ 250.002,34	100,00% R\$ 250.004,38

Fonte: O autor (2025).

Percebe-se então que o algoritmo cumpre com todas as restrições de forma satisfatória, apresentando uma variação irrisória em relação à restrição de investimento total (definido como R\$ 250.000,00). Em alguns casos, como por exemplo na ação 3 da rede 2, o algoritmo (durante seu processamento) define valores irrisórios de investimento (Neste caso R\$ 0,01). Tais observações não representaram, neste trabalho, problemas significantes na análise dos resultados.

A partir dos resultados da distribuição ótima do investimento, considerando também as relações de investimento/redução de perdas para cada ação, a Tabela 26 expressa o volume de

redução de perda de água ótimo para cada rede, tanto em unidade de m³/ano quanto em unidade de porcentagem do volume total anual do sistema.

Tabela 26: Redução de perda de água ótima para cada rede.

	Rede 1	Rede 2	Rede 3	Rede 4	Rede 5
Ação A	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %
Ação 1	7.643,22 m ³ /ano 5,63%	8.718,94 m ³ /ano 3,90%	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %
Ação B	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %
Ação 2	3.416,40 m ³ /ano 2,51%	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %
Ação 3	1.222,84 m ³ /ano 0,90%	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %
Ação 4	19.016,37 m ³ /ano 14,00%	3.621,04 m ³ /ano 1,62%	19.820,80 m ³ /ano 5,52%	23.572,96 m ³ /ano 4,87%	60.711,50 m ³ /ano 6,66%
Ação C	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %
Ação D	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %
Ação 5	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %	0,00 m ³ /ano 0,00 %
Ação 6	0,00 m ³ /ano 0,00 %	46.501,00 m ³ /ano 20,80%	109.748,86 m ³ /ano 30,55%	168.081,35 m ³ /ano 34,72%	273.640,50 m ³ /ano 30,00%
Σ	31.298,83 m³/ano 23,03%	58.840,98 m³/ano 26,32%	129.569,67 m³/ano 36,06%	191.654,31 m³/ano 39,59%	334.352,00 m³/ano 36,66%

Fonte: O autor (2025).

Observa-se novamente que, as ações indiretas (A, B, C e D) foram consideradas apenas como pré-requisito para investimento nas ações diretas (1, 2, 3, 4, 5 e 6), não apresentando retorno em termos de redução de perdas.

O **Apêndice A** mostra os resultados na planilha desenvolvida, contendo os dados mostrados nas Tabelas 25 e 26. Assim, com base nos resultados obtidos, percebe-se que:

Na **rede 1**, caracterizada por uma pressão média baixa (15 m.c.a), o algoritmo encontrou a solução ótima investindo principalmente nas ações 1 (Controle passivo de vazamentos), 2 (Redução de erros de micro-medição), 3 (Universalização da micro-medição) e 4 (Atualização de cadastro comercial e combate às fraudes). Destaca-se que esta distribuição do investimento resultou na redução de perdas de 23,03% em relação ao volume total do sistema (100%).

Na **rede 2**, o algoritmo encontrou a solução ótima investindo principalmente nas ações 1 (Controle passivo de vazamentos), 4 (Atualização de cadastro comercial e combate às fraudes) e 6 (Controle de pressão). Destaca-se que esta distribuição do investimento resultou na redução de perdas de 26,32% em relação ao volume total do sistema (100%).

Na **rede 3**, o algoritmo encontrou a solução ótima investindo principalmente nas ações 4 (Atualização de cadastro comercial e combate às fraudes) e 6 (Controle de pressão). Destaca-

se que esta distribuição do investimento resultou na redução de perdas de 36,06% em relação ao volume total do sistema (100%).

Na **rede 4**, o algoritmo encontrou a solução ótima investindo principalmente nas ações 4 (Atualização de cadastro comercial e combate às fraudes) e 6 (Controle de pressão). Destaca-se que esta distribuição do investimento resultou na redução de perdas de 39,59% em relação ao volume total do sistema (100%).

Na **rede 5**, o algoritmo encontrou a solução ótima investindo principalmente nas ações 4 (Atualização de cadastro comercial e combate às fraudes) e 6 (Controle de pressão). Destaca-se que esta distribuição do investimento resultou na redução de perdas de 36,66% em relação ao volume total do sistema (100%).

De modo geral, a ação 6 (Controle de pressão) se mostrou extremamente interessante devido à sua excelente relação de investimento/redução de perdas, sendo aplicada com prioridade em todas as redes, exceto a rede 1, cuja pressão já se encontrava em nível considerado baixo.

Foi observado que, na rede 1, a Ação 4 (Atualização de cadastro comercial e combate às fraudes) representou uma grande parcela da redução de perdas, isso se deve ao fato de que, tanto o controle de pressão quanto o controle ativo de vazamentos se tornaram inviáveis nesta rede. Além disso, a forma como a relação de investimento versus redução de perdas devido à ação 4 foi calculada (sendo o volume de perda aparente total, menos as perdas aparentes inevitáveis, menos as perdas por erros de micro-medição evitáveis, menos as perdas por falta de hidrômetros evitáveis, menos as perdas por fraudes evitáveis) também influenciou no resultado, tornando a aplicação desta ação interessante na rede 1.

Outra observação feita, é que a ação 5 (Controle ativo de vazamentos) se mostrou pouco eficiente no combate às perdas de água, não sendo aplicada pelo algoritmo em nenhuma das redes analisadas. Isto se deve ao fato de que os seus pré-requisitos (Ação C e D) requerem uma porcentagem expressiva do orçamento total, e além disso, mesmo que as ações C e D sejam implantadas, a ação 6 (Controle de pressão) apresenta uma relação de investimento versus redução de perdas muito mais interessante. Outro fator que inviabiliza a aplicação da ação 5 nas redes simuladas é que, neste trabalho, considerou-se que a concessionária não dispunha dos equipamentos de detecção de vazamentos, portanto a curva de investimento versus redução de perdas considerou o valor de aquisição destes equipamentos no cálculo de aplicação desta ação.

Destaca-se que neste trabalho não foram computados os limites econômicos de investimentos em ações para redução de perdas, também não foi considerado o aumento da perda de água natural do sistema com o passar do tempo, além disso as redes de referência não

apresentam *boosters* e outras complexidades que ocorrem em sistemas reais. Neste sentido, o **Apêndice B** apresenta estas e outras considerações que devem ser realizadas em função das diferenças entre o modelo de referência adotado neste trabalho e sistemas de distribuição reais.

Com a intenção de simular a maneira tradicional de distribuição de recursos para combate à perda de água em sistemas brasileiros, foram realizadas algumas dezenas de distribuições do recurso financeiro entre as ações de forma “manual” (Respeitando-se todas as restrições do sistema), porém em todas tentativas realizadas de forma “manual” (sem a aplicação da metodologia proposta) o autor obteve resultados inferiores à solução apontada pela análise utilizando a metodologia proposta, que faz uso da técnica de algoritmos genéticos.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste estudo, inicialmente foi proposta uma metodologia para análise de ações de combate a perdas de água baseada em algoritmos genéticos, em seguida, tal metodologia foi aplicada em um sistema de distribuição de água modelado de acordo com as características regionais do nordeste brasileiro.

Diante dos resultados de distribuição do investimento obtido pelo algoritmo e, considerando que as tentativas de distribuição do investimento realizadas de forma “manual” se mostraram inferiores, confirma-se que a metodologia de otimização de combate às perdas de água proposta neste trabalho se mostra promissora em indicar estratégias para o combate eficiente das perdas de água. Tal metodologia apresentada neste estudo constitui então uma inovação que pode contribuir para melhoria dos indicadores de ESG (*Environmental, Social and Governance*) das companhias de saneamento, desde que aprimorada e implementada como uma ferramenta de análise econômica otimizada da aplicação de investimentos para redução de perdas em sistemas de abastecimento de água.

De maneira geral, para as redes analisadas, a Ação 6 (Controle de pressão) se mostrou como a ação de melhor custo-benefício em termos de redução de perdas, exceto em casos onde a pressão média inicial da rede já se encontrava em níveis considerados como baixos (Rede 1). Em situações onde não haja recurso financeiro suficiente para implantar as ações que dependam da ação C (Setorização) e D (Monitoramento de parâmetros de rede), o método de análise proposto é útil na avaliação de outras soluções eficientes e viáveis no combate às perdas. Dessa forma, observa-se que a solução ótima de combate às perdas depende muito dos dados do sistema e do investimento disponível, de maneira que uma solução genérica adotada para redes diferentes dificilmente representará a melhor solução possível.

Observou-se também que qualquer tentativa de solução diferente daquela proposta pelo algoritmo genético resulta em uma redução de perdas inferior àquela apresentada pelo modelo de otimização.

A análise realizada neste trabalho considerou as 5 redes separadamente, mas nada impede que uma análise global do sistema possa ser realizada, de forma que o algoritmo genético defina a melhor solução de combate às perdas considerando o sistema como um todo. Outro ponto interessante é que, caso o investimento necessário para redução de perdas (apontado pela metodologia proposta) seja maior que o investimento necessário para a completa substituição da rede, o gestor do sistema pode simplesmente substituir a rede existente por uma nova, economizando assim uma parte do recurso financeiro.

Em caso de aplicação da metodologia proposta em sistemas reais, reitera-se que todas as hipóteses e simplificações adotadas neste trabalho (que resultam nas curvas de investimento versus redução de perdas), devem ser reavaliadas de acordo com a situação local. Ainda sobre a aplicação do método proposto neste trabalho em redes reais, um avanço natural em sua utilização seria a “calibração” de todas as curvas de investimentos versus redução de perdas considerando dados e medições de uma concessionária em uma região específica, de forma que as curvas “calibradas” sejam estatisticamente representativas, tornando assim a análise do algoritmo genético passível de ser aplicada naquela região de estudo com um nível de confiabilidade elevado.

Como recomendação de trabalhos futuros, indica-se testar a metodologia de otimização de combate às perdas de água proposta neste trabalho em outras redes teóricas (ou reais), inclusive mais complexas do que a aqui apresentada, desde que realizadas as devidas considerações pertinentes. Outra recomendação seria a de segregar a Ação 4 (Atualização de cadastro comercial e combate às fraudes) em dois equacionamentos/curvas distintas, bem como contabilizar o retorno financeiro por conta das multas aplicadas ao consumidor que pratica fraude ou furto de água. Além desta, uma terceira recomendação é a de implementar todo o equacionamento, curvas e algoritmo genético aplicados neste trabalho em um *software* próprio desenvolvido em linguagem de programação (Preferencialmente a linguagem Python).

Por fim, conclui-se que a metodologia proposta de otimização do combate às perdas de água não apenas contribui para a redução do desperdício de recursos hídricos, mas também viabiliza os investimentos para implementar as ações de mitigação. Tal abordagem apresentada tem grande potencial de contribuição para a viabilidade financeira dos serviços de redução de perdas, desde que devidamente aprimorada e aplicada. Tendo em vista que os investimentos em redução de perdas em sistemas de abastecimento necessitam de orçamentos da ordem de milhões (ou muitas vezes bilhões) de reais, uma otimização de 5% ou 10% do investimento já representaria uma economia massiva de recursos financeiros e hídricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Detecção de Vazamentos Não-Visíveis: Métodos Acústicos.** Apostila de Treinamento para Profissionais níveis 1, 2 e 3 (CETRE). São Paulo. 2003.

ABENDI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. (São Paulo). **Guia ABENDI de END & Inspeção.** São Paulo, 2019. Disponível em: http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/GUIA_ABENDI_2019.pdf. Acesso em: 13 fev. 2024.

ABES - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água:** posicionamento e contribuições técnicas da abes. Revisão 1. São Paulo, 2015. Disponível em: https://abes-dn.org.br/pdf/28Cbesa/Perdas_Abes.pdf. Acesso em: 12 dez. 2023.

ABES - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Perdas em sistemas de abastecimento de água:** diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate. São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.abes-sp.org.br/arquivos/perdas.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro. 2017. 4 p.

AESBE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS ESTADUAIS DE SANEAMENTO. **Série Balanço Hídrico:** Guia Prático de procedimentos para estimativa de submedição no parque de hidrômetros. Volume 3. Brasília, 2015. Disponível em: https://aesbe.org.br/novo/wp-content/uploads/2018/04/GUIA-3_V5-.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

AESBE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS ESTADUAIS DE SANEAMENTO. **Série Balanço Hídrico:** Guia Prático para método direto de quantificação de perdas reais em sistemas de abastecimento. Volume 6. Brasília, 2015. Disponível em: https://aesbe.org.br/novo/wp-content/uploads/2018/04/GUIA-6_V5-.pdf. Acesso em: 19 set. 2023.

AGIR - AGÊNCIA INTERMUNICIPAL DE REGULAÇÃO DO MÉDIO VALE DO ITAJAÍ. **Metodologia para Avaliação dos Indicadores de Desempenho.** Blumenau, 2018. Disponível em: https://www.agir.sc.gov.br/uploads/documento/3200/SiAVvytkcUXuVE-LKb4FtxwTNDJe_6zP.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

AL-WASHALI, Taha; SHARMA, Saroj; LUPOJA, Robert; AL-NOZAILY, Fadhl; HAIDERA, Mansour; KENNEDY, Maria. Assessment of water losses in distribution networks: methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 152, n. 1, p. 1-11, 2020. Doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104515.

ALEGRE, H; HIRNER, W; BAPTISTA, J; PARENA, Renato. **Performance indicators for water supply services**. 3° ed. Londres: IWA Publishing, 2017.

ARAUJO, L. S.; RAMOS, H.; COELHO, S. T. Pressure Control for Leakage Minimization in Water Distribution Systems Management. **Water Resources Management**, Vol 20, p. 133-149, 2006.

ARREGUI, F.; CABRERA JUNIOR, E.; COBACHO, R. **Integrated Water Meter Management**. Londres: Iwa Publishing, 2007.

ASE - ALLIANCE TO SAVE ENERGY. **Watergy: taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems**. Washington: Alliance To Save Energy, 2002. Disponível em: https://ecoclubrivne.org/files/3_watergy.pdf. Acesso em: 21 jan. 2024.

AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **M36 Water Audits and Loss Control Programs**. 4° ed. Amherst: American Water Works Association, 2016. (Manual of Practice).

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNADEZ, M. Manual de Hidráulica. 9° ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015.

BCB – BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do cidadão**. 2024. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>>. Acesso em: 24 set. 2024.

BERARDI, L.; GIUSTOLISI, O.; PRIMATIVO, F. Exploiting multi-objective strategies for optimal rehabilitation planning. In: **Proceedings of Computer and Control in Water Industry (CCWI), Water Management Challenges in Global Changes**. Londres, p. 23-30, 2007.

BESSEY, S.G.; LAMBERT, A. **Managing Leakage - Report B - Reporting Comparative Leakage Performance**. Water Research Centre, Water Services Association, Water Companies Association, Londres, 1994.

BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de Água: Tecnologias de controle**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013.

BOSCHETTI, A.; MASSARON, L. **Python Data Science Essentials: A Practitioner's Guide Covering Essential Data Science Principles, Tools, and Techniques**. 3. ed. Birmingham, UK, Packt Publishing, 2018. 472 p.

BOYLE, T.; GIURCO, D.; MUKHEIBIR, P.; LIU, A.; MOY, C.; WHITE, S.; STEWART, R. Intelligent Metering for Urban Water: A Review. **Water**, 2013, 1052-1081. <https://doi.org/10.3390/w5031052>

BOYLE, T.; GIURCO, D.; MUKHEIBIR, P.; LIU, A.; MOY, C.; WHITE, S.; STEWART, R. Intelligent Metering for Urban Water: a review. **Water**, Basel, v. 5, n. 3, p. 1052-1081, jul. 2013. <http://dx.doi.org/10.3390/w5031052>.

BOLETIM DO SANEAMENTO. **Gestão de Perdas**. 2023. Disponível em: <<https://boletimdosaneamento.com.br/gestao-de-perdas/>>. Acesso em: 28 nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Portaria nº 490, de 22 de março de 2021**. Estabelece os procedimentos gerais para o cumprimento do disposto no inciso IV do caput do art. 50 da Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007, e no inciso IV do caput do art. 4º do Decreto n. 10.588, de 24 de dezembro de 2020. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 55, p. 30, 23 mar. 2021.

BREARS, R. C. **Smart Meters Equals a Smarter Water Future**. Medium, 2022. Disponível em: <https://medium.com/mark-and-focus/smart-meters-equals-a-smarter-water-future-1c72b1623146>. Acesso em: 28 mar. 2024.

BRK. **Manual do empreendedor**. 3º ed. São Luís – Ma. 116 p. 2022.

CAEMA – COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO MARANHÃO. **Abrangência**. 2021. Disponível em: <https://www.caema.ma.gov.br/index.php/a-caema/institucional/abrangencia>. Acesso em: 11 jun. 2024.

CAEMA – COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO MARANHÃO. **Manual do empreendedor**. 2022. Disponível em: <<https://www.caema.ma.gov.br/index.php/empreendedores/manuais>>. Acesso em: 03 jun. 2024.

CAMPBELL, E.; IZQUIERDO, J.; MONTALVO, I.; PÉREZ-GARCÍA, R. A Novel Water Supply Network Sectorization Methodology Based on a Complete Economic Analysis, Including Uncertainties. **Water**, v. 8, p. 179, 2016.

CHEUNG, P.B. et al. Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água. In: Gonçalves, Ricardo Franci (Coordenador). **Uso racional de água e energia**. Projeto PROSAB Capítulo 2. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 36-98.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Saneamento básico: a relevância do setor para o crescimento econômico e a melhoria do bem-estar**. Brasília, 2021. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/6c/65/6c65c400-bd1a-476c-a6da-868776bc8b8c/22_03_-_estudocni_saneamento_basico.pdf. Acesso em: 08 abr. 2024.

CODEVASF - COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA. **Sistemas de abastecimento de água**. 2023. Disponível em: <<https://www.codevasf.gov.br/linhas-de-negocios/seguranca-hidrica/revitalizacao-de-bacias-hidrograficas/sistemas-de-abastecimento-de-agua>>. Acesso em: 21 nov. 2023.

COELHO, B.; CAMPOS, A. A. Efficiency achievement in water supply systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 59-84. 2014.

COMINOLA, A.; GIULIANI, M.; PIGA, D.; CASTELLETTI, A.; RIZZOLI, A. E. Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A review. **Environmental Modelling & Software**, v. 72, p. 198-214, 2015.

COSTA, L. H. M. **Utilização de um algoritmo genético híbrido na operação de sistemas de abastecimento de água com ênfase na eficiência energética**. 146 p. Tese (Doutorado), Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2010.

CREA SP – CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Salário Mínimo Profissional**. 2023. Disponível em: <<https://www.creasp.org.br/salario-minimo-profissional/>>. Acesso em: 24 set. 2024.

CRISAN, L.M. et al. Computerized Maintenance Management Software. **Bulletin of the transilvania university of Brasov**. Brasov, v. 11, n. 1, p. 325-332, 2018. Disponível em: https://webbut.unitbv.ro/index.php/Series_I/article/view/2393/1908. Acesso em: 25 mar. 2024.

DAE JUNDIAÍ – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ESGOTOS DE JUNDIAÍ. **Plano diretor de controle de perdas de água**. Jundiaí, 2017.

DELINSKI, L. M. M.; COLMENERO, J. C. Otimização multiobjetivo: uma abordagem conceitual. **VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**. Ponta Grossa, 2017.

DINIZ, Aldo Roberto Silva. **Avaliação do controle de perdas físicas em redes de distribuição de água na região metropolitana de São Paulo**. 2012. 95 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

DI NARDO, A.; DI NATALE, M.; DI MAURO, A. **Water Supply Network District Metering: Theory and Case Study**. CISM Courses and Lectures. Springer: Wien, Austria; New York, USA, 2013.

ELIPSE KNOWLEDGEBASE. **Sistemas SCADA na Automação do Saneamento**. 2019. Disponível em: <https://kb.elipse.com.br/sistemas-scada-na-automacao-do-saneamento/>. Acesso em: 12 ago. 2023.

ES HOJE. **Maior loteadora capixaba planeja cinco novos lançamentos para 2021**. 2020. Disponível em: <https://eshoje.com.br/economia/2020/12/maior-loteadora-capixaba-planeja-cinco-novos-lancamentos-para-2021/>. Acesso em: 26 jan. 2024.

EPA - UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Control and Mitigation Drinking Water Losses Distribution Systems**. Washington DC. 2010. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-05/documents/epa816r10019.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2024.

FARLEY, M. **Leakage management and control: A best practice training manual** Operation & Maintenance Working Group. World Health Organization (WHO), Geneva, 2001.

FARLEY, M.; WYETH, G.; GHAZALI, Z.; SINGH, S. **The Manager's Non Revenue Water Handbook: A Guide to Understanding Water Losses**. Londres, 2008. 110 p.

FANNER, P.; THORNTON, J. **The Importance of Real Loss Component Analysis for Determining the Correct Intervention Strategy**. In: Proceedings of IWA Water Loss 2005 Conference, 2005. Halifax, Nova Scotia, Canada.

GIFFONI, T. F. **Setorização em redes de distribuição de água: uma revisão bibliográfica sistemática**. 90 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/2388/Dissertação_2021100.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 09 mar. 2024.

GIZ - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. **Perdas de água: Guia para determinar o nível econômico e metas progressivas de controle para municípios, reguladores e prestadores de serviço**. Brasília, 2021.

GONÇALVES, E.; ALVIM, P. R. A. **Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água: Pesquisa e Combate a Vazamentos não Visíveis**. Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água – PNCDA. Secretária Especial de Desenvolvimento Urbano. Brasília. 2007.

GONÇALVES, E.; KOIDE, S. **Estudos sobre determinação de perdas e indicadores de desempenho do controle de perdas na distribuição de água**. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 1999.

GREYVENSTEIN, B.; VAN ZYL, J.E. An experimental investigation into the pressure leakage relationship of some failed water pipes. **Aqua**, v. 56, n. 2, p. 117-124. 2007. <https://doi.org/10.2166/aqua.2007.065>

HAMILTON, S.; CHARALAMBOUS, B. **Leak detection: technology and implementation**. IWA Publishing, 2020.

HASHIMOTO, K. **Técnicas de Otimização Combinatória Multiobjetivo Aplicadas na Estimção do Desempenho Elétrico de Redes de Distribuição**. 2004. 114p. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

HOJJATI, A.; MONADI, M.; FARIDHOSSEINI, A.; MOHAMMADI, M. Application and comparison of NSGA-II and MOPSO in multiobjective optimization of water resources systems. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 66, n. 3, p. 323–329, 2018. <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0006>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022: Características da população e dos domicílios**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

IBNET - INTERNATIONAL BENCHMARKING NETWORKING. **Energy Efficiency for Water Production**. 2024. Disponível em: <https://database.ib-net.org/Reports/Indicators/HeatMap?itemId=100>. Acesso em: 25 jan. 2024.

INMETRO. **Portaria nº 155, de 30 de março de 2022**. 2022. Publicação disponível em: < <http://sistema-sil.inmetro.gov.br/rtac/RTAC002971.pdf> > Acesso em 24/03/2024.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Estudo de perdas de água do Instituto Trata Brasil de 2022 (SNIS 2020):** Desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico no Brasil. 2022. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/Relatorio_Completo.pdf. Acesso em: 12 jun. 2023.

IMESC - INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS CARTOGRÁFICOS. **Relatório Técnico de Recursos Hídricos Superficiais:** hidrografia e hidrologia do Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Maranhão - Etapa Bioma Amazônico. São Luís. 2019. Disponível em: <http://homologacao.zee.ma.gov.br/wp-content/uploads/2021/11/recursosHidricos.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2024.

JING, K; ZHI-HONG, Z. Time Prediction Model for Pipeline Leakage Based on Grey Relational Analysis. **Physics Procedia**, vol. 25, p. 2019-2024, 2012.

KLINGEL, P; KNOBLOCH, A. Methods and Instruments for Reducing Real Water Losses. In: **Guidelines for Water Loss Reduction. A Focus on Pressure Management**. Germany. Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (GIZ) and VAG Armaturen. 236p, 2011.

LAMBERT, A. **Managing Leakage – REPORT E – Interpreting measured night flows**. Water Research Centre, Water Services Association, Water Companies Association, 1994.

LAMBERT, A.; BESSEY, S. G. **Managing Leakage – REPORT F– Using night flow data**. Water Research Centre, Water Services Association, Water Companies Association, 1994.

LAMBERT, A; HIRNER, W. **Losses from Water Supply Systems: Standart Terminology and Recommended Performance Measures**. London: International Water Association, 2000.

LAMBERT, A; MCKENZIE, R. Econoleak: Economic model for leakage management for water suppliers in South Africa. Pretoria - Republic of South Africa. **South African Water Research Commission**, 2001.

LAMBERT, A; TAYLOR, R. **Water Loss Guidelines: Water New Zealand**. New Zealand, 2010.

LENCE, B. J.; MOOSAVIAN, N.; DALIRI, H. Fuzzy Programming Approach for Multiobjective Optimization of Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 7, p. 1–9, 2017.

LI, Weifeng et al. Development of system for detection, early warning, and control of pipeline leakage in drinking water distribution: A case study. **Journal of Environmental Sciences**, vol. 23, p. 1816-1822, 2011.

LOUREIRO, D; ÁLVARES, A; COELHO, S. T. **Aplicação de sistemas de telemetria domiciliária em sistemas de distribuição de água.** In: 1º Conferência INSSAA - Modelação de Sistemas de Abastecimento de Água. Barcelos, Portugal, 2007.

LUZ, E. et al. **Economia de Energia no Sistema de Abastecimento de Água:** Uma Abordagem Usando Algoritmos Genéticos. v. 4, n. 1. Natal: DINCON, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.5540/03.2016.004.01.0108>>. Acesso em: 24 abr. 2023.

MANZI, D. **A hidráulica de todo dia no saneamento.** 1.ed. Curitiba: Appris, 2020.

MARQUES, S. M. **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. Orientador: Fernando das Graças Braga da Silva. 2023. 93 p. Dissertação (Mestrado Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

MARQUES, M.C.S.; HADDAD, J.; MARTINS, A.R.S. **Conservação de Energia:** Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações. Procel Educação, Editora da Eletrobras, 3º edição, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

MARUNGA, A.; HOKO, Z.; KASEKE, E. Pressure management as a leakage reduction and water demand management tool: The case of the City of Mutare, Zimbabwe. **Physics and Chemistry of the Earth**, vol. 31, pp. 763-770, 2006.

MAY, J. **Pressure Dependent Leakage.** World water and Environmental Engineering, 1994.

MATTOS, A. C. H. **Cidades Inteligentes:** Motivações e desafios da adoção de medidores Inteligentes de Água. 2018. Publicado em: https://itsrio.org/wp-content/uploads/2018/03/agatha_mattos-agua.pdf. Acesso em: 20 dez. 2023.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água.** Programa Nacional de Combate ao desperdício de água. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília - DF. 80 p. 2003.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Abastecimento de água:** construção, operação e manutenção de redes de distribuição de água: guia do profissional em treinamento: nível 1. Belo Horizonte: ReCESA, 2008. 68p.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Assessment of apparent losses in urban water systems. **Water and Environment Journal**, v. 25, n. 3, p. 327-335, 2011.

NAZIF, S. et al. Pressure management model for urban water distribution networks. **Water Resources Management**, v. 24, n. 3, p. 437-458, 2010.

NICOLINI, M.; GIACOMELLO, C.; DEB, K. Calibration and Optimal Leakage Management for a Real Water Distribution Network. **Water Resources Planning and Management**, p. 134-142, 2011.

NOVAES ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES. **Plano diretor de combate as perdas de água no sistema de abastecimento de água de Jaguariúna – SP**. São Carlos, 2013. Disponível em: <<https://www.jaguariuna.sp.gov.br/portais/licitacoes/wp-content/uploads/2015/09/Tomada-de-Preços-012-2015-Anexo-II-Plano-Diretor-de-Combate-a-Perdas-no-Abastecimento-de-Água-de-Jaguariúna-FEHIDRO-2014.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2024.

PARACAMPOS, F. J. F. Indicadores de Perdas na Região Metropolitana de São Paulo: A Aplicação da Proposta da IWA. In: SEDU/PR-PMSS & BANCO MUNDIAL. **Anais do Encontro Técnico Sobre Redução e Controle de Perdas de Água em Sistemas de Abastecimento de Água**. Salvador/BA: TIPOD LTDA, 2002. CD-ROM.

PEREIRA, J. A. R.; CONDURÚ, M. T. **Abastecimento de Água**: Informação para Eficiência Hidroenergética. João Pessoa: Editora Universitária - UFPB, 2014.

PEREZ, R.; PUIG, V.; PASCUAL, J.; QUEVEDO, J.; LANDEROS, E.; PERALTA, A. Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks. **Control Engineering Practice**, vol. 19, p. 1157-1167, 2011.

RIDOLPHO, C. F.; DIAS, A. L. A.; ABRAHÃO, N. C.; RODRIGUES, J. C. Ações para redução de perdas com a utilização de sistema de informações geográficas (SIG) em área de válvula redutora de pressão. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 25., 2009, Recife. Anais... Recife: ABES, 2009.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC/USP, 2006.

RODRIGUES, W. **Critérios para o uso eficiente de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água**. 2007. 208 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SAAEC. **SAAEC Implanta Sistema de Informação Geográfica (GIS)**. 2020. Disponível em: <https://www.saaec.com.br/saaec-implanta-sistema-de-informacao-geografica-gis/>. Acesso em: 08 maio. 2023.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Programa de Controle e Redução de Perdas**: Diretoria Metropolitana de Distribuição – M. Apresentação em Powerpoint, São Paulo - SP, 2004. Disponível em: https://www.comitespcj.org.br/images/Download/SABESP_Debora_Soares_29-01-04.pps. Acesso em: 08 ago. 2023.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **O que são perdas de água?** Inadequação do índice de perdas por porcentagem e vantagens da notação de perdas em litros por ligação por dia. São Paulo, 2017. Disponível em: https://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/cartilha_perdas_dez2017.pdf. Acesso em: 24 jan. 2024.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Hidrômetros Inteligentes**: Medição do consumo com leitura remota. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=732>. Acesso em: 30 jan. 2024.

SAGHI, H.; ANSARIAVAL, A. Effective Factors in Causing Leakage in Water Supply Systems and Urban Water Distribution Networks. **American Journal of Civil Engineering**. V 3, Pag 60-63, EUA, 2015. doi: 10.11648/j.ajce.s.2015030202.22.

SALAMONI, S. S.; DELLA, J. P.; BACK, A. J. **Avaliação das perdas na distribuição de água**: Estudo de caso em São Bento Baixo, Nova Veneza-sc. **Tecnologia e Ambiente**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 93-106, 19 maio 2014. Fundação Educacional de Criciúma - FUCRI. doi: 10.18616/ta.v20i0.1563

SALDARRIAGA, J.; SALCEDO, C. A. Determination of optimal location and settings of pressure reducing valves in water distribution networks for minimizing water losses. **Procedia Engineering**, v. 119, n. 1, p. 973–983, 2015.

SALDARRIAGA, J. et al. Battle of the water networks district metered areas. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 145, n. 4, p. 1–12, 2019. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001035.

SHAMMAS, N. K.; WANG, L. K. **Abastecimento de Água e Remoção de Resíduos**. 3° Ed. Rio de Janeiro, Editora Ltda (LTC), Grupo Editorial Nacional, 2013.

SILVA, Fernando das Graças Braga da. **Estudos de calibração de redes de Distribuição de água através de Algoritmos Genéticos**. 2003. 234 p. Tese (Doutorado) - Curso de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2003.

SILVA, F. C. et al. Panorama de perdas em sistemas de abastecimento de água. In: **Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 7., 2004, São Luís. Anais... São Luís: ABRH, 2004.

SILVA, Raimundo Nonato Medeiros da. **Avaliação do consumo per capita de água no município de Itapecuru Mirim (MA)**. 2014. 99 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia e Ambiente, CCET, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - Ma, 2014. Disponível em: <<https://tede2.ufma.br/jspui/bitstream/tede/690/1/Dissertacao%20Raimundo%20Nonato.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2024.

SILVA, Alex Takeo Yasumura Lima. **Proposição de estratégia operacional ótima em rede de distribuição de água**. 2019. 81 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

SILVA, F. A. M.; SILVA, R. C.; DZIEDZIC, M. **Avaliação de perdas de água em redes de abastecimento com escassez de dados**. ENGEMA: Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, São Paulo, v. 22. 2020. Disponível em: <https://engemausp.submissao.com.br/22/anais/arquivos/380.pdf?v=1718701131>. Acesso em: 16 jun. 2024.

SMARTINTEC. **Como funciona sistema de telemetria de dados**. 2019. Disponível em: <https://www.smartintec.com.br/blog/como-funciona-sistema-de-telemetria-de-dados/>. Acesso em: 12 jan. 2024.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto 2022: Gestão Técnica de Água ano de referência 2020.** Gestão Técnica de Água: ano de referência 2020. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Brasília. 2022.

SNSA - SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Ministério das Cidades. **Planejamento e Gestão:** Ações de assistência técnica em redução e controle de perdas de água e uso eficiente de energia elétrica. 2018. (Caderno temático 3).

SØNDERLUND, A.L.; SMITH, J.R.; HUTTON, C.; KAPELAN, Z. Using Smart Meters for Household Water Consumption Feedback: knowns and unknowns. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 89, n. 1, p. 990-997, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.216>.

SOUSA, A. C.; SOARES, A. K.; ABE, N. Modelo para Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo, In: **XXXIV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (XXXIV CILAMCE)**, Pirenópolis-GO, 2013.

SOUZA, A. P.; FIRPO, S. P.; PONCZEK, V. P.; ZYLBERSTAJN, E.; RIBEIRO, F. G. **Custo do Trabalho no Brasil:** proposta de uma nova metodologia de mensuração. Relatório Final. Fundação Getúlio Vargas, 2012.

SWAMEE, P. K. Design of a submarine oil pipeline. **Journal of Transportation Engineering**, New York, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.

TEBCHARANI, G. J. **Projeto Ótimo de redes de distribuição de água via algoritmos genéticos multiobjetivos.** 2007. 117 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2007.

THORNTON, J.; LAMBERT, A. O. Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: Consumption relationships. **IWA Leakage 2005 Specialized Conference - Conference Proceedings.** Halifax, Canadá, 2005.

THORNTON, J.; STURM, R.; KUNKEL, G. Water Loss Control. 2º ed. EUA. **McGraw-Hill.** 2008.

TJRJ - TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Tarifa de água. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.tjrj.jus.br/documents/10136/31404/tarifa-agua.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2024.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água.** 3º ed. São Paulo: Escola Politécnica da USP. 2006.

TURNER, A.; WILLETS, J.; FANE, S.; GIURCO, D.; CHONG, J.; KAZAGLIS, A.; WHITE, S. **Guide to Demand Management and Integrated Resource Planning.** Prepared by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney for the National Water Commission and the Water Services Association of Australia, Inc. 2010.

UFCG – UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE. **Saneamento Básico**. 2019. Disponível em: <<https://pmsb-funasa.uaec.ufcg.edu.br/index.php/saneamento-basico>>. Acesso em: 26 jan. 2024.

UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA. **EPANET**. 2020. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - LENHS/UFPB. Disponível em: <https://ct.ufpb.br/lenhs/contents/menu/assuntos/epanet>. Acesso em: 02 fev. 2024.

VAN DIJK, M. VAN; VUUREN, S. J. VAN; ZYL, J. E. VAN. Optimising water distribution systems using a weighted penalty in a genetic algorithm. **Water SA**, v. 34, n. 5, p. 537– 548, 2008.

VERMERSCH, M.; CARTEADO, F.; RIZZO, A.; JOHNSON, E.; ARREGUI, F.; LAMBERT, A. **Guidance Notes on Apparent Losses and Water Loss Reduction Planning**. Malta College of Arts Science and Technology: Malta, 2016.

WERDINE, Demarcus. **Perdas de água em sistemas de abastecimento**. 129 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2002.

WINARNI, W. Infrastructure leakage index (ILI) as water losses indicator. **Civil Engineering Dimension**, v. 11, n. 2, p. 126, 2009.

ZANFEI, Ariele; MENAPACE, Andrea; SANTOPIETRO, Simone; RIGHETTI, Maurizio. Calibration Procedure for Water Distribution Systems: Comparison among Hydraulic Models. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1421, 2020.

ZHANG, K. et al. A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network. **Science of the Total Environment**, v. 656, p. 1401–1412, 2019.

APÊNDICE A
Planilha de análise de redução de perdas através da metodologia proposta

REDE 1	Ação A	Ação 1	Ação B	Ação 2	Ação 3	Ação 4	Ação C	Ação D	Ação 5	Ação 6	
Proporção do investimento por ação (%)	1,7610%	20,0192%	1,7110%	19,5734%	12,1133%	44,8240%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	100,00%
Valor investido por ação (R\$)	R\$ 4.402,57	R\$ 50.047,93	R\$ 4.277,50	R\$ 48.933,57	R\$ 30.283,22	R\$ 112.060,00	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ 250.004,79
Perdas reduzidas por ação (m³/ano)		7.643,22		3.416,40	1.222,84	19.016,37			0,00	0,00	31.298,83
Perdas reduzidas por ação (%)		5,63%		2,51%	0,90%	14,00%			0,00%	0,00%	23,03%

REDE 2	Ação A	Ação 1	Ação B	Ação 2	Ação 3	Ação 4	Ação C	Ação D	Ação 5	Ação 6	
Proporção do investimento por ação (%)	2,3480%	19,0012%	1,6136%	0,0000%	0,0000%	12,0983%	35,0963%	27,8434%	0,0000%	2,0000%	100,00%
Valor investido por ação (R\$)	R\$ 5.870,10	R\$ 47.503,12	R\$ 4.033,90	R\$ 0,00	R\$ 0,01	R\$ 30.245,83	R\$ 87.740,81	R\$ 69.608,61	R\$ 0,00	R\$ 5.000,00	R\$ 250.002,38
Perdas reduzidas por ação (m³/ano)		8.718,94		0,00	0,00	3.621,04			0,00	46.501,00	58.840,98
Perdas reduzidas por ação (%)		3,90%		0,00%	0,00%	1,62%			0,00%	20,80%	26,32%

REDE 3	Ação A	Ação 1	Ação B	Ação 2	Ação 3	Ação 4	Ação C	Ação D	Ação 5	Ação 6	
Proporção do investimento por ação (%)	2,9350%	0,0000%	1,8850%	0,0000%	0,0000%	30,2400%	35,0963%	27,8434%	0,0000%	2,0000%	100,00%
Valor investido por ação (R\$)	R\$ 7.337,62	R\$ 0,00	R\$ 4.712,50	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 75.600,00	R\$ 87.740,81	R\$ 69.608,61	R\$ 0,00	R\$ 5.000,00	R\$ 249.999,54
Perdas reduzidas por ação (m³/ano)		0,00		0,00	0,00	19.820,80			0,00	109.748,86	129.569,67
Perdas reduzidas por ação (%)		0,00%		0,00%	0,00%	5,52%			0,00%	30,55%	36,06%

REDE 4	Ação A	Ação 1	Ação B	Ação 2	Ação 3	Ação 4	Ação C	Ação D	Ação 5	Ação 6	
Proporção do investimento por ação (%)	3,5221%	0,0000%	3,5844%	0,0000%	0,0000%	27,9547%	35,0963%	27,8434%	0,0000%	2,0000%	100,00%
Valor investido por ação (R\$)	R\$ 8.805,15	R\$ 0,02	R\$ 8.961,00	R\$ 0,00	R\$ 0,01	R\$ 69.886,73	R\$ 87.740,81	R\$ 69.608,61	R\$ 0,01	R\$ 5.000,02	R\$ 250.002,34
Perdas reduzidas por ação (m³/ano)		0,00		0,00	0,00	23.572,96			0,00	168.081,35	191.654,31
Perdas reduzidas por ação (%)		0,00%		0,00%	0,00%	4,87%			0,00%	34,72%	39,59%

REDE 5	Ação A	Ação 1	Ação B	Ação 2	Ação 3	Ação 4	Ação C	Ação D	Ação 5	Ação 6	
Proporção do investimento por ação (%)	4,1091%	0,0000%	2,6100%	0,0000%	0,0000%	22,3429%	35,0963%	27,8434%	0,0000%	8,0000%	100,00%
Valor investido por ação (R\$)	R\$ 10.272,67	R\$ 0,00	R\$ 6.525,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 55.857,29	R\$ 87.740,81	R\$ 69.608,61	R\$ 0,00	R\$ 20.000,00	R\$ 250.004,38
Perdas reduzidas por ação (m³/ano)		0,00		0,00	0,00	60.711,50			0,00	273.640,50	334.352,00
Perdas reduzidas por ação (%)		0,00%		0,00%	0,00%	6,66%			0,00%	30,00%	36,66%

APÊNDICE B

Simplificações adotadas no equacionamento de ações para combate às perdas

Ação	Comentário
Todas	<p>Neste trabalho não foram computados os limites econômicos de investimentos em ações para redução de perdas, também não foram considerados o aumento da perda de água natural do sistema com o passar do tempo, além disso as redes de referência não apresentam <i>boosters</i> e outras complexidades que ocorrem em sistemas reais. Todos estes fatores devem ser considerados na análise de sistemas reais.</p> <p>Algumas relações de volumes de perdas foram obtidas através de equações estimativas e hipóteses, que podem ou não ser condizentes as perdas de água em algum sistema brasileiro específico, em caso de uso da metodologia deste trabalho para análise de sistemas reais recomenda-se o uso de dados que representem o sistema local correspondente.</p>
A, B e C	<p>Orçamento realizado de acordo com a proporção de tamanho do sistema descrito no plano diretor de perdas de água do DAE Jundiaí (2017) e o sistema de referência. Para aplicação em sistemas reais deve ser utilizado orçamento específico do sistema local.</p>
D	<p>Por se tratar de um sistema de pequeno porte, o autor estimou equipe de um engenheiro atuando como analista de perdas na rede. Além disso, o orçamento de equipe técnica de combate a perdas foi estimado de acordo com o piso salarial corrente. Para aplicação em sistemas reais o orçamento deve ser realizado com base na equipe técnica necessária no sistema local.</p> <p>O orçamento de implantação de software de monitoramento de parâmetros foi estimado segundo o plano diretor de combate as perdas de água no sistema de abastecimento de água de Jaguariúna – SP, realizado pela empresa Novaes Engenharia e Construções (2013). Para aplicação em sistemas reais devem ser utilizados dados de aquisição de softwares atualizados.</p>
1	<p>Por escassez de dados, o volume de vazamentos visíveis foi estimado em 50% das perdas reais conforme sugerido por Lambert (2001), além disso, o número de ocorrências de vazamentos foi arbitrado para a rede analisada conforme a Figura 32 e o custo de reparo de vazamentos foi estimado de acordo com GIZ (2021). Para aplicação em sistemas reais devem ser utilizados dados que representem o sistema local.</p>
2 e 3	<p>O orçamento para substituição de hidrômetros deve ser atualizado de acordo com a realidade de custos da região estudada, bem como a proporção de ligações não-hidrometradas deve ser sempre considerada para cada sistema.</p> <p>Neste trabalho não foram considerados os custos para substituição de hidrômetros após alguns anos de instalação, que devem ser considerados para manutenção da idade média do parque de hidrômetros a longo prazo.</p>
4	<p>A proporção de perdas por fraudes e falhas de cadastro pode variar muito entre sistemas, bem como os custos para aquisição de equipamentos detectores de fraudes, portanto, recomenda-se que em análise de sistemas reais sejam utilizados dados e orçamentos que melhor representem os sistemas em questão.</p>
5	<p>Além das questões mencionadas na ação 1, em caso de aplicação da metodologia deste trabalho em casos reais, o orçamento para pesquisa de vazamentos deve ser atualizado de acordo com os custos locais do sistema. Outro ponto importante é que as classes de magnitudes de vazamentos não-visíveis detectáveis devem ser atualizadas com números representativos do sistema real em questão.</p>
6	<p>Em casos reais, as pressões na rede nem sempre podem ser reduzidas para a faixa de 10 a 20 m.c.a conforme foi aplicado neste trabalho, portanto a relação entre investimentos em controle de pressão e o a redução do índice de perdas deve ser analisada caso a caso. Além disso, considerou-se que a porcentagem de redução de perdas inerentes seja a mesma das perdas reais.</p>