

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Desenvolvimento de metodologia com integração de QGISRed e WNTR para gestão e eficiência hidroenergética em sistemas de distribuição de água em regiões montanhosas

Matheus David Guimarães Barbedo

Itajubá (MG)

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Matheus David Guimarães Barbedo

Desenvolvimento de metodologia com integração de QGISRed e WNTR para gestão e eficiência hidroenergética em sistemas de distribuição de água em regiões montanhosas

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

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

Itajubá (MG)

2025

Dedico este trabalho a meus pais Benedito Carlos Barbedo e Luiza Maria Guimarães Barbedo, que foram a minha base em todos os momentos desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me permitiu estar concluindo esta etapa.

A minha esposa, Thayná Barbedo, meu mais profundo agradecimento por sua fé inabalável e por acreditar em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores. Sua paciência, apoio e compreensão foram pilares fundamentais durante todo este processo mim.

Aos meus pais, por serem meu alicerce em todos os momentos. Sou profundamente grato por serem meu porto seguro e por acreditarem em mim incondicionalmente. Grande parte do que sou e das conquistas que alcancei é resultado do exemplo de dedicação e dos valores inestimáveis que vocês me transmitiram ao longo da vida.

Aos meus irmãos, minha profunda gratidão pelo apoio irrestrito e por estarem sempre ao meu lado, independentemente das circunstâncias. Vocês foram uma fonte constante de força, encorajamento e companheirismo ao longo desta jornada.

Às minhas sobrinhas, minha gratidão por serem uma fonte constante de alegria e inspiração em minha vida.

Ao NUMMARH – Núcleo de modelagem em simulação em meio ambiente e recursos hídricos e ao LHC, Laboratório de Hídrica Computacional da UNIFEI.

Minha profunda gratidão ao Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva, cuja orientação foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Os ensinamentos recebidos não apenas contribuíram para o progresso deste trabalho, mas também me proporcionaram uma compreensão mais ampla e profunda na área de estudo, sendo uma inspiração para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos amigos da UNIFEI, minha mais sincera gratidão pelo, companheirismo e pelas valiosas trocas de experiências ao longo desta jornada

Agradeço aos professores da UNIFEI pelo conhecimento transferido ao longo de minha trajetória acadêmica, contribuindo diretamente para minha formação.

Ao Projeto REDECOPE Finep – MCT (Ref. 0983/10) Ministério da Ciência e Tecnologia intitulado “Desenvolvimento de tecnologias eficientes para a gestão hidro energética em sistemas de abastecimento de água” e Programa Pesquisador Mineiro da FAPEMIG pelo PPM - 00755-16.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior(CAPES) pelo apoio financeiro, através da bolsa de estudos n ° 88887.695230/2022-00 pois esta pesquisa foi elaborada com o seu apoio

“Porque dele, por ele, e para ele são todas as coisas; A ele seja aglória eternamente amém.” Apóstolo Paulo, Epístola aos Romanos. Capítulo 11, verso 36.

RESUMO

A gestão eficiente de sistemas de distribuição de água é crucial para assegurar a continuidade do fornecimento e a sustentabilidade desse recurso essencial. Este estudo apresenta uma abordagem inovadora e pioneira ao integrar ferramentas avançadas, como os plugins QGISRed e Processing R Provider, bibliotecas PyQGIS, Wntr, Numpy, Pandas, Matplotlib, Seaborn e Os'', em redes de água em região montanhosa, destinadas a analisar, modelar e otimizar sistemas de distribuição de água, e fornece subsídios para a tomada de decisões mais embasadas dos gestores da água, com o propósito de aprimorar a eficiência na relação do nexo água-energia e com isso combater perdas de água e energia. A metodologia aborda a gestão dos recursos hídricos e energéticos em regiões montanhosas, empregando uma abordagem de geoprocessamento e análises estatísticas avançadas, com o intuito de fomentar uma gestão, operação e manutenção mais eficaz e sustentável dos sistemas de distribuição de água. A aplicação foi feita para um Sistema Benchmark proposto. A modelagem no plugin QGISRed mostrou-se uma ferramenta eficaz e promissora para a análise e simulação de sistemas de distribuição de água, revelando ser mais avançada do que a modelagem no EPANET, software mais utilizado para esta finalidade atualmente no mundo. O QGISRed e o R foram acoplados por meio do plugin Processing R Provider, que gerou percepções valiosas através dos gráficos do histograma, média, mediana e box plot das pressões na rede modelada pelo QGISRed. Os resultados obtidos nesta pesquisa revelam o potencial da integração de ferramentas e técnicas avançadas propostas para a gestão dos recursos hídricos, com o enfoque para o controle de perdas e redução do desperdício de energia. Avalia-se que o estudo contribui para as pesquisas no campo de sistemas de informação geográficas e gestão em saneamento, oferecendo um entendimento mais profundo e possibilidades inovadoras para a gestão eficiente de sistemas de distribuição de água em regiões montanhosas.

Palavras-chave: Redes de água, *Software QGIS, Plugin QGISRed, Software R, Software Python, PyQGIS*

ABSTRACT

Efficient management of water distribution systems is crucial to ensure continuity of supply and sustainability of this essential resource. This study presents an innovative and pioneering approach to integrating advanced tools, such as the plugins, QGISRed and Processing R Provider, PyQGIS, "Wntr, numpy, pandas, matplotlib, seaborn and os", into water networks in mountainous regions, aimed at analyzing, modeling and optimizing water distribution systems, and provides subsidies for more informed decision-making by water managers, with the aim of improving efficiency in the water-energy nexus and thereby combating water and energy losses. The methodology addresses the management of water and energy resources in mountainous regions, using a geoprocessing approach and advanced statistical analysis, with the aim of promoting more effective and sustainable management, operation and maintenance of water distribution systems. Modeling in the QGISRed plugin proved to be an effective and promising tool for analyzing and simulating water distribution systems, proving to be more advanced than modeling in EPANET, the most widely used software for this purpose in the world today. QGISRed and R were coupled through the Processing R Provider plugin, which generated valuable insights through the histogram, mean, median and box plot pressure graphs in the network modeled by QGISRed. The partial results obtained in this research reveal the potential of integrating advanced tools and techniques proposed for water resource management, with a focus on controlling losses and reducing energy waste. The study contributes to research in the field of geographic information systems and sanitation management, offering a deeper understanding and innovative possibilities for the efficient management of water distribution systems in mountainous regions.

Keywords: Water networks, QGIS Software, QGISRed Plugin, R Software, Python Software, PyQGIS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução das perdas na distribuição no Brasil em porcentagem de 2017 até 2021	22
Figura 2 – Balanço hídrico pelo modelo IWA.....	23
Figura 3 – Simulação hidráulica no Epanet.....	25
Figura 4 – Apresentação da tela do RStudio.....	26
Figura 5 – Estrutura de classes OGR no QGIS.....	30
Figura 6 – Exemplo de simulação hidráulica com o plugin QGISRed	38
Figura 7 – Exemplo de simulação hidráulica com o plugin QGISRed	38
Figura 8 – Exemplo de simulação hidráulica com o plugin QGISRed	39
Figura 9 – Terminal Phyton do QGIS	42
Figura 10 – Fluxograma das etapas da metodologia	44
Figura 11 – Fluxograma das etapas que fundamentam a metodologia.....	50
Figura 12 – Etapas de construção da metodologia desenvolvida na Tese.....	52
Figura 13 – Configuração do R no QGIS	56
Figura 14 – Configuração de Script R no QGIS	57
Figura 15 – Configuração do PATH e outras variáveis de ambiente.....	57
Figura 16 – Exemplo de script Análise Quadrática no Processing R Provider	59
Figura 17 – Dados de entrada para aplicação de script na camada.....	59
Figura 18 – Registro de mensagens após rodar o script	60
Figura 19 – Exemplo de Análise quadrática gerado em formato .html.....	61
Figura 20 – Localização da área de estudo.....	64
Figura 21 – Informações inseridas na tabela de atributos da camada tubos para a modelagem da rede no QGISRed	67
Figura 22 – Informações inseridas na tabela de atributos da camada nós para a modelagem da rede no QGISRed.....	68
Figura 23 – Opções de análise de propriedades do projeto	68
Figura 24 – Opções de análise de propriedades do projeto	69

Figura 25 – Opções de análise de propriedades do projeto	69
Figura 26 – Opções de análise de propriedades do projeto	70
Figura 27 – Janela de resultados de simulação do plugin	70
Figura 28 – Inserção da demanda nos nós através do gerenciador de demanda	72
Figura 29 – Gráfico de projeção populacional para o município de estudo	73
Figura 30 – Mapa hipsométrico da área de estudo	81
Figura 31 – Mapa topográfico da área de estudo	82
Figura 32 – Análise de pressão em cada nó (Cenário Real)	83
Figura 33 – Cenário Real – Simulação estática da rede com legenda	84
Figura 34 – Histograma das pressões dos 115 nós no cenário Real	86
Figura 35 – Gráfico de frequência das pressões no cenário Real	87
Figura 36 – Gráfico box plot das pressões do cenário Real	88
Figura 37 – Análise de pressão em cada nó (Cenário otimizado 1)	89
Figura 38 – Histograma das pressões dos 115 nós no cenário otimizado 1	90
Figura 39 – Gráfico de frequência das pressões do cenário otimizado 1	91
Figura 40 – Gráfico box plot das pressões no cenário otimizado 1	92
Figura 41 – Análise de pressão em cada nó (Cenário otimizado 2)	93
Figura 42 – Histograma das pressões dos 115 nós no cenário otimizado 2	94
Figura 43 – Gráfico de frequência das pressões dos 115 nós no cenário otimizado 2	95
Figura 44 – Gráfico de frequência das pressões dos 115 nós no cenário otimizado 2	96
Figura 45 – Gráfico do comprimento do IEE considerando o tempo de projeto	100
Figura 46 – Distribuição dos comprimentos dos tubos da rede de estudo	106
Figura 47 – Distribuição dos comprimentos dos tubos menores de 100 m da rede de estudo	107
Figura 48 – Distribuição dos comprimentos dos tubos maiores de 100 m da rede de Estudo	109
Figura 49 – Distribuição dos comprimentos dos tubos do ID 1 até o ID 45	112
Figura 50 – Distribuição dos comprimentos dos tubos do ID 45 até o ID 90	113
Figura 51 – Distribuição dos comprimentos dos tubos do ID 90 até o ID 135	114
Figura 52 – Histograma da distribuição percentual dos comprimentos dos tubos	115
Figura 53 – Distribuição dos comprimentos dos tubos de acordo com cada material ..	117
Figura 54 – Porcentagem total do comprimentos em função do material	119

Figura 55 – Distribuição dos comprimentos dos tubos em função da idade em anos de uso	121
Figura 56 – Distribuição percentual dos comprimentos dos tubos pela idade.....	124
Figura 57 – Distribuição dos diâmetros das tubulações do ID 1 até o ID 45	127
Figura 58 – Distribuição dos diâmetros das tubulações do ID 45 até o ID 90.....	128
Figura 59 – Distribuição dos diâmetros das tubulações do ID 90 até o ID 132.....	129
Figura 60 – Distribuição das altimetrias dos nós do ID 1 até o ID 38 PG 132.....	132
Figura 61 – Distribuição das altimetrias dos nós do ID 38 até o ID 76	133
Figura 62 – Distribuição das altimetrias dos nós do ID 76 até o ID 116.....	134
Figura 63 – Distribuição das altimetrias dos reservatórios.....	136
Figura 64 – Distribuição da velocidade nos tubos por seu comprimento.....	137
Figura 65 – Distribuição da velocidade nos tubos do ID 1 até o ID 45.....	139
Figura 66 – Distribuição da velocidade nos tubos do ID 45 até o ID 90.....	140
Figura 67 – Distribuição da velocidade nos tubos do ID 90 até o ID 135	141
Figura 68 – Distribuição da perda de carga em função do comprimento da tubulação.....	143
Figura 69 – Distribuição da perda de carga em função do ID 1 até o ID 45	145
Figura 70 – Distribuição da perda de carga em função do ID 45 até o ID 90	146
Figura 71 – Distribuição da perda de carga em função do ID 90 até o ID 135.....	147
Figura 72 – Gráfico de frequência de rugosidades dos tubos da rede	148
Figura 73 – Distribuição da rugosidade em função do ID 1 até o ID 45.....	150
Figura 74 – Distribuição da rugosidade em função do ID 45 até o ID 90.....	151
Figura 75 – Distribuição da rugosidade em função do ID 90 até o ID 135.....	152
Figura 76 – Gráfico de dispersão das rugosidades por comprimento do tubo	153
Figura 77 – Gráfico de dispersão entre os valores de rugosidade e velocidade nos tubos	156
Figura 78 – Gráfico de Distribuição da pressão nos nós do ID 1 até o ID 38	159
Figura 79 – Distribuição da velocidade nos tubos do ID 38 até o ID 76	160
Figura 80 – Distribuição da velocidade nos tubos do ID 76 até o ID 116.....	161
Figura 81 – Gráfico de Distribuição da vazão nos tubos do ID 2 até o ID 45.....	163
Figura 82 – Gráfico de Distribuição da vazão nos tubos do ID 45 até o ID 90.....	164
Figura 83 – Gráfico de Distribuição da vazão nos tubos do ID 91 até o ID 135.....	165
Figura 84 – Distribuição da eficiência energética do ID 2 até o ID 38.....	167

Figura 85 – Distribuição da eficiência energética do ID 38 até o ID 76	168
Figura 86 – Distribuição da eficiência energética do ID 76 até o ID 116	159
Figura 87 – Distribuição da carga hidráulica do ID 2 até o ID 38.....	172
Figura 88 – Distribuição da carga hidráulica do ID 38 até o ID 76	173
Figura 89 – Distribuição da carga hidráulica do ID 76 até o ID 116	174
Figura 90 – Gráfico de dispersão entre a perda de carga e a carga hidráulica média da rede.....	176
Figura 91 – Gráfico de dispersão entre Eficiência Energética e Carga Hidráulica	178

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pressão média e índice teórico de Perdas nos cenários Real e Otimizados 1 e 2	99
Tabela 2 – Cálculo do fator de demanda dos nós.....	100
Tabela 3 – Comportamento do IEE para a rede de estudo	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estrutura e integração do QGIS de acordo com Menke (2016).....	32
Quadro 2 – Comparativo de plugins de acordo com Ninõ (2021).....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAA	Sistema de abastecimento de água
SIG	Sistema de informação geográfica
GIS	Geographic information system
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
OGR	Simple features library
IIAMA UPV	Instituto de engenharia de Água e Meio Ambiente da Universidade Politécnica de Valência
MDE	Modelo digital de elevação
MDT	Modelo digital de terreno
VRP	Válvula redutora de pressão
WNTR	Water Network Tool for Resiliense
CAD	Computer Aided Design
ID	Identificação
PVC	Policloreto de Vinila
ETA	Estação de tratamento de água
SRC	Sistema de Referência de Coordenadas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
UTM	Universal Transversa de Mercator
MCA	Metros de coluna d'água
DN	Diâmetro nominal
IEE	Indicador de Eficiência Energética
IED	Índice de energia dissipada
CPVC	Cloreto de polivinila Clorado
FF	Ferro Fundido
PE	Polietileno
FIB	Fibra de vidro
PP	Polipropileno
FOR	Ferro fundido dúctil
CO	Cobre

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
2.	OBJETIVOS.....	19
2.1	Objetivo geral.....	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Eficiência hídrica e energética em sistemas de abastecimento de água.....	20
3.2	Perdas de água em sistemas de abastecimento	21
3.3	Software Epanet e suas funcionalidades.....	24
3.4	Software R aplicado a Recursos Hídricos.....	27
3.5	Aplicações de ferramentas de informação geográfica (IG) em Recursos Hídricos	29
3.6	Aplicações do software QGIS no abastecimento de água	30
3.7	Comparativo do QGISRed e EPANET para a modelagem e simulação hidráulica ..	36
3.8	Potencialidades do QGIS e QGISRed acoplados ao softwares R e bibliotecas Python.....	41
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	44
5.	RESULTADOS	50
5.1	Descrição da metodologia proposta	50
5.2	Aplicação da metodologia proposta.....	52
5.3	Preparação dos dados e configuração de ferramentas.....	56
5.3.1	Dados de entrada (Shapefile, Geopackage)	56
5.3.2	Configuração do Processing R Provider no QGIS.....	56
5.4	Descrição do Benchmark	61
5.5	Descrição detalhada da área de estudo.....	63
5.6	Resultado da aplicação da metodologia.....	65
5.6.1	Representação e simulação do sistema de abastecimento e parâmetros hidráulicos do local de estudo com o plugin QGISRed.....	65
5.6.2	Projeção de população futura.....	72

5.6.3	Mapa hipsométrico e topográfico da área de estudo, mapas (Cenário Real, Otimizado 1 e Otimizado 2) e Análise estatística de valores de pressão com o Processing R Provider.....	77
5.6.4	Análise de eficiência energética dos cenários ótimos 1 e 2.....	99
5.6.5	Análise estatística dos ativos da rede e parâmetros hidráulicos com os módulos WNTR, Pandas, Matplotlib, Seaborn e OS.....	100
5.	CONCLUSÕES	179
6.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	185
	REFERÊNCIAS.....	186

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital para a vida na Terra, tanto do ponto de vista biológico quanto dos sistemas produtivos de bens de consumo final e intermediário (ESPINOSA-ORTIZ, et al. 2023). Na visão de Jabbour et al. (2018) o abastecimento de água é um dos pilares essenciais da sociedade moderna, sendo vital para a saúde pública, a produção industrial e o desenvolvimento sustentável.

No entanto, o uso descontrolado dos recursos hídricos culmina no seu esgotamento, resultando no surgimento de problemas ambientais, sociais e econômicos. A crescente conscientização sobre a importância da gestão sustentável dos recursos hídricos impulsiona a busca por soluções inovadoras que promovam a eficiência do nexo água-energia.

Estudos sobre o controle de perdas de água em sistemas de distribuição são de grande valor para uma gestão sustentável dos recursos hídricos, pois oferecem subsídio para preservar o meio ambiente e o bem-estar social. A perda de água nos sistemas de distribuição é uma preocupação crítica, especialmente em um cenário de eventos climáticos extremos e aumento da demanda (BANDARA et al, 2023)

Neste contexto, devido a necessidade de garantir o seu acesso adequado e reduzir as perdas, a elaboração de modelos e análises comportamentais dos sistemas hídricos é uma área de pesquisa em constante desenvolvimento. Para Arandia e Eck (2018) estudos atuais abordam a utilização do EPANET acoplado a outras linguagens de programação bem como o uso de ferramentas estatísticas e gráficas para se obter uma melhor resposta da modelagem hidráulica.

No entanto, para solucionar problemas específicos ou para integrar a modelagem hidráulica com outras funcionalidades, acopla-se o EPANET a outras ferramentas como linguagens de programação e softwares de geoprocessamento como QGIS, ArcGIS, Spring e outros. (MARTINHO et al. 2020)

Uma das principais vantagens de se acoplar o EPANET a outras ferramentas é a possibilidade de obter uma visão mais abrangente do sistema hídrico. Por exemplo, o QGIS pode ser usado para visualizar os dados do EPANET em um mapa, o que pode facilitar a identificação de áreas com alto potencial de perdas de água. (TITTLE, 2019)

Diante disso, o acoplamento dos softwares EPANET, QGIS (através do plugin QGISred) e R pode oferecer benefícios significativos para a modelagem hidráulica, oferecendo uma combinação poderosa para aprimorar a operação de redes, permitindo análises estatísticas avançadas, otimização da operação, visualização de resultados em formas de gráficos e integração com outros dados e modelos, e dessa forma pode ajudar os operadores a tomar decisões mais informadas, e melhorar o desempenho global da rede de distribuição.

Neste contexto, este estudo utilizou a ferramenta QGISRed para realizar uma metodologia de integração entre o QGIS, Epanet e o R para a análise de redes teóricas, tendo como diferencial a aplicação dessas 3 ferramentas em regiões montanhosas com topografia acidentada, com o objetivo de encontrar os cenários ideais de altimetria da rede, rugosidade, diâmetro, demanda nodal e nível dos reservatórios de nível fixo e nível variável, que gerem valores de pressão adequados, considerando os limites da NBR 12218 – 2017 (Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público) para cada um dos sistemas estudados.

Nenhum dos trabalhos encontrados que utilizaram o QGISRed abordou a integração com o Processing R Provider. Isso reforça a originalidade da presente pesquisa, que explora essa integração de maneira inovadora. A pesquisa busca preencher essa lacuna, combinando o potencial do QGISRed com as funcionalidades avançadas do R. Essa abordagem permite realizar análises mais aprofundadas e personalizadas para o gerenciamento de sistemas de distribuição de água. Ao propor essa nova metodologia, espera-se oferecer uma ferramenta mais eficaz para o controle de perdas e a eficiência hidroenergética. A originalidade está na aplicação conjunta dessas tecnologias em um contexto inédito.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia integrada de suporte à gestão de sistemas de abastecimento de água (SAA), utilizando ferramentas geoespaciais e linguagens de programação, incluindo QGIS, Python, e os plugins QGISRed e Processing R Provider para análise avançada de dados hidráulicos e suporte ao controle de perdas, permitindo a modelagem hidráulico-espacial de redes de distribuição de água, considerando aspectos como pressões, vazões, diâmetros de tubulações, demandas, rugosidade, perda de carga, carga hidráulica, velocidade do fluido e dados de altimetria, visando a redução de perdas em sistemas de abastecimento.

2.2 Objetivos específicos

- a) Propor um sistema de abastecimento de água benchmark baseado em sistemas reais do Sul de Minas Gerais para que seja aplicada a metodologia desenvolvida;
- b) Aplicar a metodologia proposta em áreas com considerável variação topográfica para avaliar a influência dessas condições no comportamento do sistema. A análise deve contemplar como as perdas, pressões, vazões e demais variáveis operacionais são impactadas pelas variações altimétricas, identificando padrões e correlações que possam subsidiar melhorias na gestão operacional do sistema;
- c) Avaliar a potencialidade da metodologia para aplicar em sistemas mais abrangentes

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Eficiência hídrica e energética em sistemas de abastecimento de água

A busca pela eficiência hídrica e energética no contexto do "nexo água-energia" é fundamental para enfrentar os desafios da segurança hídrica e energética no futuro. (RAI. 2023). O "nexo água-energia" refere-se à interdependência entre os recursos hídricos e energéticos, onde as ações que produziram um recurso têm impacto direto sobre o outro, e neste cenário, a otimização da relação entre água e energia torna-se essencial para garantir um abastecimento confiável e sustentável desses recursos necessários.(PULIGHE e PIRELLI, 2023; WANG et al. 2022, DAI et al. 2018)

A produção de energia elétrica, seja por meio de usinas hidrelétricas, termelétricas ou de fontes renováveis, demanda grandes volumes de água para resfriamento e geração. (JAFARINEJAD et al. 2023; LOHRMANN et al. 2023; CEGLIA et al 2023; SESMA-MARTIN, et al. 2022; SIMOES et al. 2021; XIE et al. 2020; NOURI et al. 2019). Por outro lado, tratar, distribuir e transportar a água requer energia para purificar, pressurizar e bombear.

Para Tsutiya (2001), o consumo de energia tem relação direta com as perdas de água, pois é necessário cerca de 0,6 a 0,7 kWh para produzir 1 m³ de água potável. Dessa forma, fica estabelecida uma relação direta entre a necessidade da eficiência hidráulica e energética para o bom gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água (CHEUNG et al., 2009).

No Brasil, os sistemas de abastecimento ainda apresentam altos índices de perdas de água e baixa eficiência energética (SOBRINHO e BORJA, 2016).

A perda de água é considerada como um dos principais indicadores de desempenho operacional dos prestadores de serviço de abastecimento em todo o mundo. As perdas ocorrem em todos os componentes de um sistema de abastecimento de água, desde a captação até a distribuição, entretanto a magnitude dessas perdas depende de cada unidade (BRASIL, 2008).

Sob a visão econômica, as perdas de água nos sistemas de abastecimento geram desperdício de recursos, com produtos químicos, horas de bombas, mão de obra de funcionários, horas de máquinas e equipamentos, o que implica também em perdas de energia, pois para a água chegar em determinados locais ela tem que ser bombeada.

3.2 Perdas de água em sistemas de abastecimento

O crescimento populacional, aliado à crescente escassez de recursos hídricos nas últimas décadas, tem exercido uma pressão significativa sobre as empresas de abastecimento. Isso as leva a adotar medidas para reduzir as perdas de água, garantindo a oferta adequada para atender à demanda do sistema, sem agravar ainda mais a degradação desses recursos essenciais (CHINI e STILLWELL, 2018).

Nesse contexto desafiador, as empresas de abastecimento estão enfrentando a necessidade de implementar estratégias inovadoras e sustentáveis para lidar com a demanda crescente por água e o combate as perdas. (COSGROVE e LOUCKS, 2015). A gestão eficiente dos recursos hídricos se tornou uma prioridade, não apenas para garantir o acesso contínuo à água potável, mas também para preservar os ecossistemas aquáticos e minimizar os impactos ambientais negativos.

Uma das abordagens adotadas é a implementação de tecnologias avançadas de monitoramento e controle. A utilização de sistemas de telemetria, sensores inteligentes e análise de dados em tempo real permite que as empresas detectem vazamentos, identifiquem áreas de desperdício e monitorem o fluxo de água ao longo de toda a rede de distribuição. Essa informação precisa ajuda a otimizar o sistema de abastecimento, reduzindo as perdas e economizando recursos.

De acordo com Madani et al. (2016) ao longo das últimas décadas, o campo da distribuição de água potável experimentou um notável avanço. O crescimento de centros urbanos e setores industriais desencadeou uma expansão rápida das redes de distribuição, porém boa parte sem planejamento.(HUANG et al. 2023; YU et al. 2023)

Neste sentido, as empresas de saneamento estão investindo em infraestruturas mais eficientes e resilientes, de modo que a modernização das redes de distribuição, a manutenção regular das tubulações e a utilização de materiais duráveis contribuem para reduzir as perdas de água ao longo do sistema.

Segundo Rusli et al. (2017); Meijer et al. (2021) apud LaBrecque (2015), perdem-se diariamente 46 bilhões de litros de água tratada em todo o mundo e anualmente cerca de 16,79 trilhões de litros.

Citando o Brasil, De acordo com Oliveira et al (2019) países com padrão de excelência em distribuição de água como EUA e Austrália têm indicadores de perdas menores do que 15%. No Brasil, em 2021 o índice de perdas de faturamento total foi 40,90 % e o índice de perdas na distribuição, de 40,3 %. Como resultado disso, de acordo com o relatório de perdas da Empresa Go Associados (2023) as perdas de água ocorridas em 2021 representaram 7,3 bilhões de m³ e se esse volume fosse faturado geraria uma receita de aproximadamente 14 bilhões de Reais.

A Figura 1 ilustra a evolução nas perdas na distribuição no Brasil através do indicador mais comumente utilizado para a análise geral de perdas no país, o Índice de Perdas na Distribuição, que tem apresentado, ano após ano, uma piora, inclusive de modo mais incisivo nos anos recentes, evidenciando a necessidade de maiores esforços nesse sentido. Entre 2017 e 2021, houve um aumento de dois pontos percentuais no indicador, situação preocupante.

Figura 1 - Evolução das perdas na distribuição no Brasil em porcentagem de 2017 até 2021



Fonte: Adaptado de Go associados (2023)

As perdas de água em sistemas de abastecimento constituem uma preocupação central quando se trata de garantir o uso sustentável e eficiente desse recurso vital. Essas perdas representam a diferença entre a quantidade de água fornecida ao sistema e o volume de água realmente consumido pelos usuários autorizados (ReCESA, 2008). Uma compreensão mais aprofundada das perdas é essencial para desenvolver estratégias eficazes de redução e controle.

Conforme destacado por Kanakoudis e Muhammetoglu (2014), as perdas de água podem ser classificadas em dois principais tipos: perdas físicas e perdas não físicas, também conhecidas como perdas reais e aparentes, respectivamente.

Perdas Físicas ocorrem devido a vazamentos ao longo de todo o sistema de distribuição, desde a captação da água bruta até a distribuição final. Os vazamentos podem surgir devido ao desgaste e envelhecimento das tubulações, falta de manutenção, variações de pressão e outros fatores. Além disso, o consumo excessivo e desnecessário de água devido a práticas operacionais inadequadas, como a limpeza frequente de filtros em Estações de Tratamento de Água (ETA) ou descargas para a limpeza da rede de distribuição, também contribuem para essas perdas

Perdas aparentes envolvem situações em que a água é utilizada de maneira não registrada ou não autorizada. Isso pode ocorrer através de ligações clandestinas, uso ilegal de água e outros métodos não autorizados de acesso. Além disso, a presença de medidores descontinuados ou submedidos, bem como fraudes nos medidores, também contribuem para essas perdas. O fato de não serem registradas nos sistemas de medição tradicionais faz com que essas perdas sejam denominadas "aparentes".

A Figura 2 mostra que as perdas de água podem ocorrer em diferentes etapas do sistema de abastecimento de água. As perdas físicas podem ocorrer nas redes de distribuição, nas redes de coleta e nos reservatórios. As perdas não físicas podem ocorrer nos hidrômetros, nas ligações de serviço e nos sistemas de medição.

Figura 2 – Balanço hídrico pelo modelo IWA



Fonte: Adaptado de Funasa (2014)

Dado isso, o tema perdas de água é objeto de estudos realizados em diversas instituições de pesquisa e companhias de saneamento, que visam quantificar, classificar e determinar padrões para os processos das empresas de saneamento, citando os mais recentes:

Wan et al. (2023) propuseram uma técnica de detecção precoce de vazamentos em tempo real baseada em uma estratégia de previsão em múltiplas etapas, através de um modelo de previsão de fluxo em várias etapas para capturar os padrões diurnos, semanais e sazonais nos dados históricos do consumo de água.

Alzarooni et al. (2023) apresentaram um método de sistemas de informações geográficas para determinar locais nas redes de água que são vulneráveis a vazamentos, combinando seis fatores condicionantes de vazamento.

Li et al (2022) Pesquisaram sobre uma estrutura para localização precisa de vazamentos na rede de abastecimento de água com base na Rede Residual (ResNet) e com isso propuseram uma ideia de localização de vazamentos com um processo paralelo de classificação e regressão que permite identificar a posição exata dos pontos de vazamento na tubulação

Ayad et al. (2021) desenvolveram uma abordagem integrada para calibração de redes de tubulações de água e quantificação de água perdida, de modo que a abordagem proposta fornece um procedimento prático que mescla medições de campo e modelagem matemática para quantificação de vazamentos e calibração de rede através sistemas de informações geográficas e algoritmos genéticos evolutivos (EA).

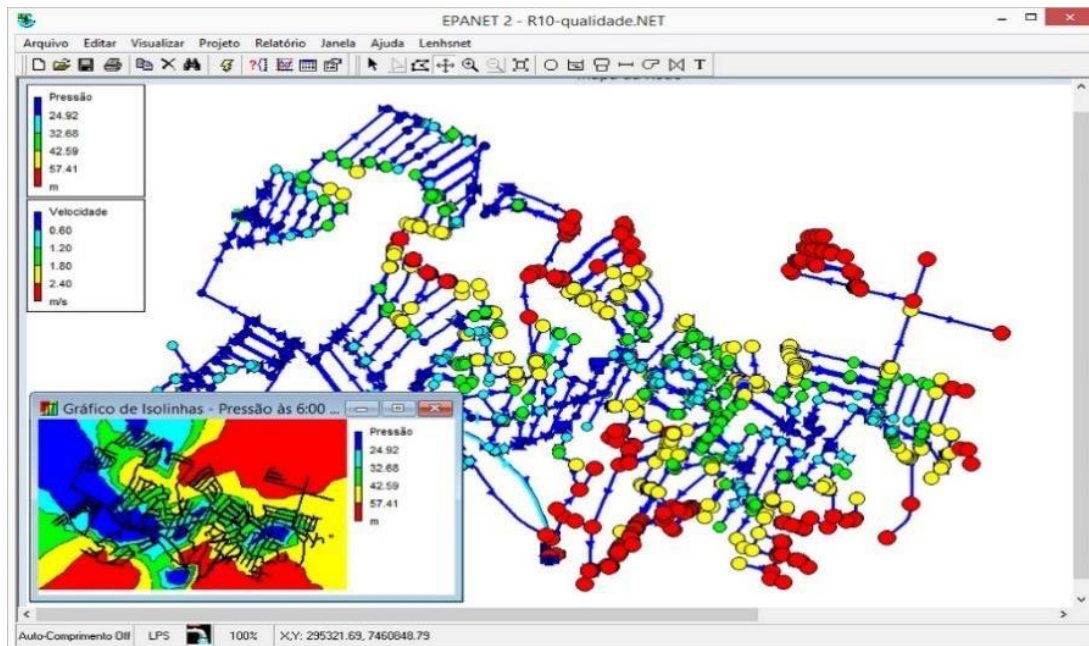
3.3 Software Epanet e suas funcionalidades

US EPA (2023) O EPANET é uma ferramenta amplamente aceita e consolidada para a modelagem hidráulica estática e dinâmica de sistemas de distribuição de água. É um software de código aberto que está disponível gratuitamente para todos os usuários, e é desenvolvido e mantido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA)

Ele apresenta uma gama diversificada de funcionalidades que o tornam uma ferramenta versátil para modelagem hidráulica em redes de distribuição. De acordo com Awe et al. (2019), o software oferece recursos como modelagem hidráulica, simulação de fluxo de água, análise de pressão, modelagem de qualidade da água e análise de vazamentos.

Essas funcionalidades permitem aos usuários analisar o desempenho de sistemas de abastecimento de água em diferentes cenários operacionais e condições de demanda. A Figura 3 ilustra uma simulação hidráulica no Epanet.

Figura 3 – Simulação hidráulica no Epanet



Fonte: EDS engenharia (2020)

A aplicabilidade do EPANET é vasta e abrange várias etapas do ciclo de vida de uma rede de distribuição de água. Conforme Rossman (2000), o software é amplamente empregado no planejamento de novas redes, ajudando os engenheiros a dimensionar adequadamente tubulações, bombas, reservatórios e outros componentes. Além disso, o EPANET é utilizado na operação e manutenção, permitindo aos operadores monitorar o sistema em tempo real e tomar decisões informadas para otimizar o fluxo de água e minimizar as perdas.

A precisão dos resultados obtidos com o EPANET depende da entrada precisa de dados SAYYED et al. (2015). Os principais dados de entrada incluem informações sobre a rede de distribuição, características hidráulicas dos componentes, demandas de água e padrões de consumo. De acordo com Rossman (2000), a definição das tubulações, bombas, válvulas, reservatórios, pontos de demanda e fontes de água é essencial.

Além disso, são necessários dados como diâmetros das tubulações, comprimentos, elevações, coeficientes de resistência e características das bombas e válvulas. Caso a modelagem de qualidade da água seja requerida, também são inseridos dados relacionados à concentração de substâncias químicas e taxas de injeção. (ROSSMAN, 2000)

De acordo com Batmaz e Kayaalp (2023) ele possui a EPANET Toolkit, que é uma biblioteca de programação de código aberto que fornece acesso às funcionalidades do software EPANET para modelagem hidráulica de redes de abastecimento de água. Ela permite que os desenvolvedores criem suas próprias aplicações, plugins ou ferramentas que utilizem as capacidades de simulação e análise do EPANET.

O EPANET Toolkit é desenvolvida em linguagem C, e é disponibilizada por arquivos de cabeçalho (.h) e bibliotecas compiladas (.dll no Windows, .so no Linux), que contêm as funções necessárias para criar e manipular redes hidráulicas, realizar simulações personalizadas e acessar resultados.

Com isso, o software EPANET desempenha um papel fundamental na modelagem hidráulica de redes de distribuição de água, oferecendo funcionalidades essenciais para o planejamento, operação e manutenção eficientes desses sistemas complexos. Suas capacidades de simulação, análise e otimização tornam-no uma ferramenta valiosa para o planejamento, operação e manutenção no campo de recursos hídricos.

Dado isso, muitos estudos são elaborados com a ferramenta EPANET, podendo citar os mais recentes:

Vaidya et al. (2023) simularam o desempenho de uma rede de distribuição de água com pressão deficiente usando uma sequência de elementos artificiais e examinaram os valores de pressão e vazão para nós com deficiência de pressão, no qual uma metodologia baseada na opção DDA (análise orientada por demanda) com a utilização de elementos artificiais, nomeadamente, válvula de controle de fluxo, válvula de retenção e emissor foi proposta utilizando o EPANET 2.2.

Lewis et al. (2023) desenvolveram abordagens para integração e visualização de informações para apoiar a gestão da água, desenvolvendo especificamente uma simulação e visualização EPANET baseada na web para grandes redes de água (cerca de 30.000 nós e links EPANET) e uma visualização baseada na web de inundações regionais e shapefiles de dados para Trieste e regiões vizinhas.

Tao et al. (2022) criaram um algoritmo de otimização baseado na genética evolutiva em ambiente Python para determinar a seleção ideal do diâmetro do tubo na rede de água, juntamente com o software de simulação hidráulica EPANET.

Hassanvand et al. (2021) investigaram o controle de pressão e velocidade através do EPANET para evitar problemas na rede de abastecimento de água e também as características hidráulicas foram previstas pelo Adaptive Neuro Fuzzy Inference System.

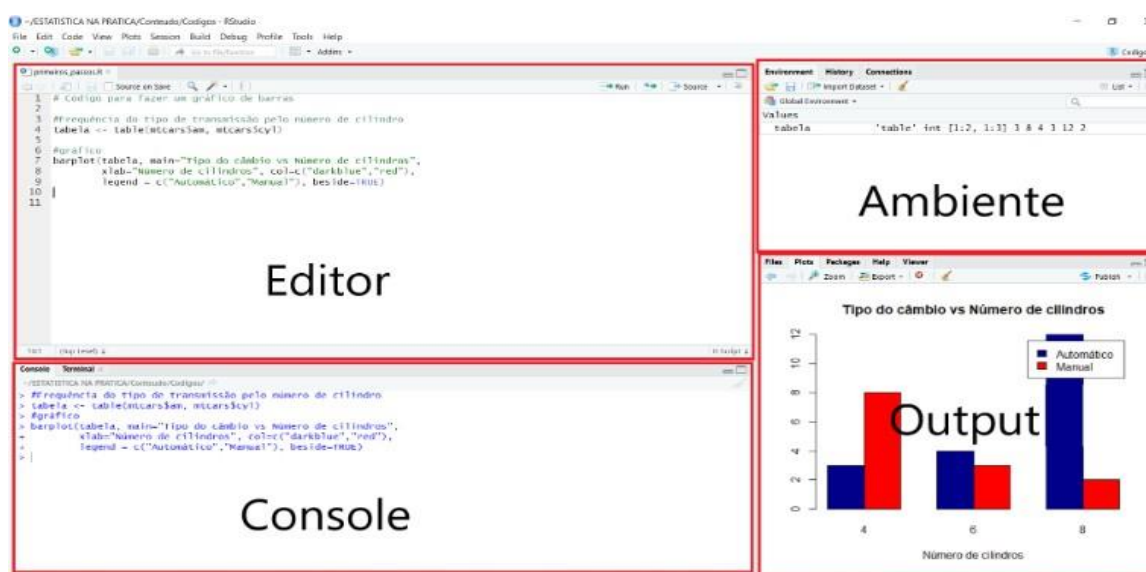
3.4 Software R aplicado a Recursos Hídricos

Na visão de Xu et al (2022) o uso do software R em aplicações relacionadas a recursos hídricos tem se tornado cada vez mais proeminente devido à sua capacidade de análise, modelagem e visualização de dados complexos.

De acordo com Slater et al. (2019) o R é uma linguagem de programação de código aberto e ambiente de desenvolvimento que oferece uma ampla gama de recursos para explorar, compreender e gerenciar problemas relacionados à água, desde análises estatísticas até modelagem hidráulico- hidrológica detalhada.

Ainda para Slater et al. (2019) o RStudio é uma ferramenta de desenvolvimento integrado (IDE) projetada para melhorar a experiência de trabalhar com a linguagem de programação R. Ele oferece uma interface mais amigável e organizada para análise de dados, modelagem estatística e outras tarefas relacionadas a recursos hídricos como é ilustrado na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Apresentação da tela do RStudio



Fonte: Adaptado de Editora UFPB (2020)

Segundo Konrath et al (2018) e Stiglic et al. (2019) a tela do programa é composta em 4 ítems, representadas na Figura 4.

O ítem Editor corresponde ao Editor de Código, onde são inseridos os scripts de programação; O item Console, que gera os principais resultados, sendo a mesma janela apresentada no R; O item Ambiente armazena o histórico dos comandos que foram utilizados na programação; e o ítem Output possui os pacotes do R, o gerenciador de arquivos, a visualização de gráficos e a ação ajuda

A utilização do RStudio é enriquecida por uma ampla coleção com mais de 10.000 pacotes adicionais, cada um projetado para oferecer funcionalidades específicas e soluções práticas para uma variedade de desafios. (BERG e HAWILA, 2021)

Essa vasta coleção de pacotes adicionais é hospedada principalmente no servidor CRAN (The Comprehensive R Archive Network), que serve como um repositório central para o compartilhamento e distribuição desses pacotes (CRAN, 2021). Muitos estudos são realizados para desenvolver os pacotes com as mais diversas aplicações, e também melhorias nos pacotes existentes, podendo citar os de maior relevância:

Lahjouj et al (2023) citam o pacote *Hydrus*, que pode ser utilizado para modelar o fluxo de água no solo e no subsolo, simular o impacto de mudanças climáticas e atividades humanas no fluxo de água, projetar e gerenciar sistemas de irrigação e drenagem, Prever inundações e secas e pesquisar o comportamento da água no solo e no subsolo.

Hosszejni e Kastner (2021) criaram o *Stochvol*, pacote que pode ser aplicado à hidráulica para modelar a volatilidade da vazão em rios e lagos, projetar barragens, reservatórios sistemas de irrigação e sistemas de drenagem superficial.

Leutnant et al (2019) desenvolveram o pacote *Swmm*, uma ferramenta que permite aos usuários interagir com o modelo de gerenciamento de águas pluviais do software SWMM da US - EPA, além de realizar análises hidrológicas detalhadas e avaliar o impacto do escoamento pluvial em ambientes urbanos. Slater e al. (2019) menciona o *R-hydro*, um pacote abrangente que fornece uma ampla gama de funções para análise e modelagem hidrológica, no que tange a gerenciamento de recursos hídricos, previsão de áreas alagáveis, controle de enchentes. Duursma e Choat (2017) criaram o *Fitplc*, pacote que fornece funções para ajustar curvas de condutividade hidráulica do solo, sistemas de irrigação, sistemas de drenagem, sistemas de controle de inundações, comportamento da água no solo.

Eck (2016) criou o pacote *Epanetreader*, que fornece funções para ler e analisar dados do modelo EPANET.

Arandia e Eck (2018) criaram o *Epanet2toolkit* que fornece funções para ler e analisar e simular dados do modelo EPANET.

3.5 Aplicações de ferramentas de informação geográfica (IG) em Recursos Hídricos

Na visão de Tu e Hoang (2023) o GIS é um sistema baseado em computador usado para coletar, armazenar, analisar e visualizar dados geográficos ou espaciais.

Ele combina diferentes tipos de dados de várias fontes, como imagens de satélite, fotografias aéreas, mapas e pesquisas, e os integra a dados não espaciais, como numéricos e quantitativos. Ao combinar essas diferentes fontes de informação, o SIG pode fornecer uma visão abrangente de uma determinada área ou situação geográfica. No geral, o SIG é uma ferramenta poderosa para entender e gerenciar as complexas relações espaciais que existem no mundo ao nosso redor.

De acordo com Thakuriah (2023) as ferramentas de Informação Geográfica (SIG) têm desempenhado um papel crucial na gestão e análise de Recursos Hídricos, permitindo a integração de dados geoespaciais e a visualização de padrões complexos de distribuição e uso da água.

Por meio de sua capacidade de analisar, modelar e representar geograficamente informações relacionadas a Recursos Hídricos, as ferramentas SIG têm impulsionado avanços significativos nas abordagens de gestão sustentável e tomada de decisões informadas. Além disso o GIS pode ser aplicado para auxiliar na prática da gestão inteligente da água fornecendo uma representação mais clara do sistema geral e localização de ativos.

De acordo com Sharvelle et al (2017) a principal vantagem de um SIG é a simulação de características reais, com base em sistemas de dados projetados para coletar, armazenar, receber, partilhar, manipular, analisar e apresentar informação geograficamente referenciada.

Muitos estudos são realizados para desenvolver ferramentas SIG aplicadas a recursos hídricos, podendo citar os de maior relevância a seguir.

Asli e Asli (2022) desenvolveram um trabalho para aprimorar as técnicas avançadas, incluindo sensoriamento remoto (SR), e a internet das coisas (IoT) para controlar as repetidas quebras de tubos de água.

Nahwani e Husin (2021) desenvolveram um estudo que teve como objetivo determinar Índice de Vazamento de Infraestrutura (ILI) apoiado por Sistema de Informação Geográfica (GIS) para facilitar a estratégia determinação, mapear problemas e determinar potenciais receita para ações para resolver vazamentos de forma realista.

Santos et al (2017) avaliaram a capacidade do Sistema de Informação Geográfica (SIG) na análise do desempenho hidroenergético de Sistemas de abastecimento de água.

3.6 Aplicações do software QGIS em sistemas de abastecimento de água

De acordo com Novo et al. (2022) o QGIS, (anteriormente chamado de Quantum GIS) é um software de SIG de código aberto, no qual o seu núcleo é escrito em C++, enquanto a interface gráfica do usuário é escrita em Python. Ele desempenha um papel fundamental na análise, gerenciamento e visualização de dados geoespaciais. Desde sua criação, o QGIS tem conquistado espaço como uma ferramenta de geoprocessamento versátil e poderosa, amplamente utilizada por profissionais e pesquisadores para entender e representar padrões geográficos complexos. (Documentação QGIS, 2023)

O QGIS, assim como a grande maioria dos softwares de geoprocessamento e processamento digital de imagens, admite basicamente três tipos de arquivos, a saber: vetoriais, matriciais e tabulares. Os dados vetoriais cumprem a função de representar os elementos do espaço geográfico (mundo real) através das feições geométricas ponto, linha ou polígono, dentre os tipos de arquivos vetoriais estão: Shapefile, Arcinfo coverages, Mapinfo, GRAS GIS e etc.. Os dados matriciais, por sua vez, representam modelos contínuos (imagens georreferenciadas ou rasters), dentre os tipos de arquivos raster suporta diferentes formatos de arquivos rasters como: GRASS GIS, GEOTIFF, TIFF, JPG e etc. Os arquivos tabulares (forma de tabela) são usados para armazenar dados sobre entidades geográficas, como população, economia, infraestrutura, extensão territorial, e etc. (Documentação QGIS, 2023)

O QGIS oferece uma ampla gama de funcionalidades, desde a importação e visualização de diferentes formatos de dados geoespaciais até a realização de tarefas avançadas possibilitando a criação de mapas temáticos e a realizando análises espaciais.(BIPU, 2019; MENKE et al. 2016).

Ele também oferece ferramentas de análise espacial, como sobreposições de camadas, análises de proximidade e interpolação, permitindo explorar padrões geográficos e relações complexas.

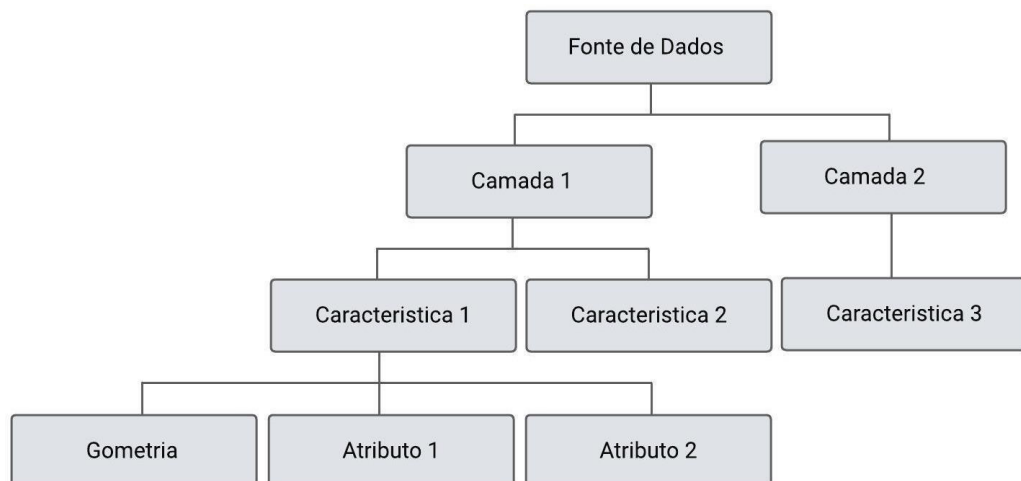
Sua versatilidade, acessibilidade e recursos avançados têm levado a uma ampla adoção em diversos setores desde planejamento urbano até conservação ambiental. (MEADEN e AGUILAR MANJARREZ, 2013)

Além disso, o QGIS permite trabalhar com dados em formato raster e vetor utilizando as bibliotecas GDAL e OGR. A OGR é uma biblioteca de código aberto que fornece acesso e manipulação de dados geográficos vetoriais e possibilita criar e manipular geometrias; editar valores de atributos; filtrar dados vetoriais com base em valores de atributos ou localização espacial; e também oferece recursos de análise de dados.

A OGR é parte da GDAL, que é uma biblioteca de código aberto extremamente popular para leitura e gravação de dados espaciais no QGIS.(BIPU, 2019; MENKE et al. 2016)

A Figura 5, extraída da obra de Menke et al. (2016) apresenta a estrutura de classes OGR, que é uma biblioteca de código aberto que fornece acesso e manipulação de dados geográficos.

Figura 5 – Estrutura de classes OGR no QGIS



Fonte: Menke (2016)

A estrutura e integração do QGIS é explicada no quadro a seguir de acordo com Menke et al.(2016) conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Estrutura e integração do QGIS de acordo com Menke (2016)

Categoria	Elemento	Descrição
Classes Principais	OGRDataSource	Representa uma fonte de dados vetorial, como um arquivo shapefile, um arquivo KML ou um banco de dados espacial. (MENKE et al. 2016)
Classes Principais	OGRLayer	Representa uma camada vetorial em uma fonte de dados. (MENKE et al. 2016)
Classes Principais	OGRFeature	Representa uma feição vetorial em uma camada. (MENKE et al. 2016)
Estrutura Hierárquica	Fonte de dados, camadas e recursos	Cada fonte de dados pode ter diversas camadas. Cada camada pode ter diversos recursos. Cada recurso contém uma geometria e um ou mais atributos. (MENKE et al. 2016)
Integração com SGBDs	PostgreSQL com PostGIS	SGBD relacional com extensão PostGIS, eficiente para armazenamento, análises e consultas espaciais complexas. (MENKE et al. 2016)
Integração com SGBDs	SQLite	SGBD embutido e portátil, ideal para projetos menores, com suporte a dados espaciais. (MENKE et al. 2016)
Integração com SGBDs	MySQL	SGBD relacional integrado ao QGIS para análise e exploração de dados geoespaciais. (MENKE et al. 2016)
Integração com SGBDs	Oracle Database	Permite análises espaciais avançadas ao integrar dados geoespaciais do Oracle Database ao QGIS. (MENKE et al. 2016)
Integração com SGBDs	SQL Server	Proporciona integração para visualização e análise de dados geoespaciais no ambiente do SQL Server. (MENKE et al. 2016)
Integração com SGBDs	Outros SGBDs	Compatível com Firebird, SpatiaLite e outros, ampliando as opções para projetos geoespaciais. (MENKE et al. 2016)
Integração com SGBDs	QGIS	Plataforma SIG que integra sistemas de gerenciamento de bancos de dados geoespaciais de maneira eficaz e flexível. (MENKE et al. 2016)

Fonte: O autor (2024)

Com todas essas funcionalidades, muitos estudos são realizados por meio do software QGIS, com as mais diversas aplicações, podendo citar os mais atuais:

Freitas et al.(2022) realizaram um estudo de uma rede real de distribuição de água em uma região montanhosa do sul de Minas Gerais, com o uso do QGIS e em seguida realizaram três simulações com o uso do *software* Epanet 2.0, sendo uma delas o cenário-base de referência para comparação com os cenários onde se realizaram melhorias na rede.

Em estudos de uso do solo, o QGIS pode ser empregado para delinear áreas de diferentes categorias de ocupação e avaliar mudanças ao longo do tempo (RAHAYU et al., 2020)

Na gestão ambiental, o QGIS auxilia na análise de riscos, como áreas propensas a deslizamentos de terra ou inundações (RAHAYU et al., 2020). Além disso, é amplamente utilizado em pesquisa arqueológica para mapear sítios, analisar padrões de distribuição e modelar paisagens passadas (SLÁVIK et al., 2019).

Uma característica distintiva do QGIS é sua extensibilidade por meio de plugins. Esses complementos personalizados expandem as funcionalidades do software, atendendo às necessidades específicas dos usuários de maneira eficaz e flexível (GRASER, 2016). Os plugins do QGIS oferecem um leque diversificado de recursos adicionais que podem ser facilmente integrados ao ambiente de trabalho, proporcionando soluções sob medida para tarefas complexas de análise e visualização de dados geoespaciais.

Através dos plugins, os usuários podem aprimorar a funcionalidade do QGIS de acordo com suas demandas individuais (VITALIS et al 2020). Como exemplo, o plugin "Processing" oferece uma ampla gama de algoritmos de geoprocessamento avançados, permitindo a execução de análises detalhadas e personalizadas. Outro exemplo é o plugin "QuickMapServices", que simplifica o acesso a serviços de mapas online, agilizando o processo de aquisição de informações geográficas de diversas fontes.

A extensibilidade dos plugins também reflete a natureza colaborativa da comunidade QGIS. Os desenvolvedores de plugins, muitas vezes membros da comunidade de código aberto, contribuem com suas habilidades e conhecimentos para criar ferramentas que abordem problemas específicos e ampliem as capacidades do QGIS. Isso resulta em uma expansão e evolução constante dos plugins, proporcionando aos usuários um conjunto diversificado de ferramentas para enfrentar desafios geoespaciais únicos. (DABIRIAN et al. 2023).

Quando aplicado, o QGIS tem se estabelecido como um recurso valioso para otimizar a gestão, operação dos sistemas de abastecimento de água ao integrar dados geoespaciais com informações atributivas, as aplicações de SIG têm impactado positivamente diversas áreas da gestão hídrica, desde o planejamento, até a operação, manutenção e reabilitação de redes de água e órgãos acessórios. (MULLER et al. 2020)

Devido a este fato os pesquisadores tem se esforçado para criar diversos plugins para elaborar e simular modelos de redes hidráulicas com o Epanet. De acordo com Martinez e Lerma (2019) o plugin QGISRed foi lançado em 2004 possuindo o nome de GISRed, que permite a integração perfeita da interface gráfica do EPANET com sistemas de informação geográfica para gerir alguns elementos da rede.

Porém com o intuito de atualiza-lo em um plugin atual e inovador para modelagem hidráulica, foi feita uma busca completa nos plugins existentes para a funcionalidade, de modo que como resultado disso, Ninõ (2021) realizou um Estudo comparativo de plugins para elaborar e simular modelos de redes hidráulicas com Epanet, para verificar os pontos positivos e negativos dos mesmos, conforme é ilustrado na Figura 7.

Segundo o estudo de Ninõ (2021) para a realização do estudo, o primeiro passo foi a busca de plugins que foram desenvolvidos através da toolkit do Epanet.

Os plugins encontrados foram:

- Demands in distribution networks
- ImportEpanetinpFiles
- GHydraulics
- Giswater
- QGISRed
- QWater
- Water Network Tools
- QEPANET
- QWAT
- Qgis_epanet

O segundo passo do estudo de Ninõ (2021) foi explorar as potencialidades de cada plugin de simulação de redes hidráulicas no QGIS.

Os plugins foram avaliados em ordem cronológica de lançamento, começando pelo GHydraulics em 2012 e terminando pelo QGISRed em 2019, como é visto no Quadro 2.

Quadro 2 – Comparativo de plugins de acordo com Ninõ (2021)

Plugin	Limitações
GHydraulics (2012)	Não permite importar arquivos no formato de texto com as informações da rede (.inp). Não tem componentes ou recursos de interface de usuário que permitem aos usuários interagirem e editar dados ou configurações dentro do contexto do plugin.
QWAT (2014)	Não tem componentes ou recursos de interface de usuário que permitem aos usuários interagirem e editar dados ou configurações dentro do contexto do plugin. Não permite fazer simulações.
Qgis_epanet (2014)	Possui a limitação de somente poder ser usado em modelos EPANET que não sejam muito grandes.
<u>ImportEpanetInpFiles</u> (2016)	Não tem componentes ou recursos de interface de usuário que permitem aos usuários interagirem e editar dados ou configurações dentro do contexto do plugin. Não permite realizar simulações.
QEPANET (2017)	Permite inserir reservatórios e reservatórios em nós, mas o tubo que conecta às fontes é removido, impossibilitando assim uma correta simulação hidráulica.
Qwater (2018)	Não tem componentes ou recursos de interface de usuário que permitem aos usuários interagirem e editar dados ou configurações dentro do contexto do plugin.
Demands in distribution networks (2019)	Não tem componentes ou recursos de interface de usuário que permitem aos usuários interagirem e editar dados ou configurações dentro do contexto do plugin. Não permite fazer simulações.
Giswater (2019)	Não tem restrições, porém é um plugin mais voltado para a gestão do ciclo da água.
Water Network Tools (2019)	Não tem componentes ou recursos de interface de usuário que permitem aos usuários interagirem e editar dados ou configurações dentro do contexto do plugin
QGISRed (2019)	Não possui restrições

Fonte: Ninõ (2021)

Os resultados da avaliação mostraram que os plugins Giswater e QGISRed são os mais completos e versáteis dos plugins estudados, sendo que o Giswater é mais voltado para a gestão do ciclo da água. Os outros plugins apresentaram limitações que restringem seu uso pleno. (NINÕ, 2021).

Ninõ (2021) finaliza o estudo mencionando que os plugins foram desenvolvidos com diversos objetivos e que cada um cumpre o que foi projetado para realizar.

A elaboração da modelagem hidráulica é essencial para obtenção do valor dos parâmetros hidráulicos do sistema de abastecimento de água. Porém, na prática, as pressões do sistema não se comportam como no modelo hidráulico teórico. A utilização do plugin QGISRed permite a operação da modelagem hidráulica dentro do QGIS associado a visualização de dados, como por exemplo os pontos de pressão medidos em campo.

Através das plataformas de banco de dados que o QGIS é acoplado, atuando junto com o QGISRed oferece a possibilidade de verificar qual era a pressão esperada pelo modelo e qual a pressão que está sendo detectada em campo, podendo até mesmo ser em tempo real, com isso torna-se uma ferramenta de gestão, avaliação e tomada de decisão sem igual.

3.7 Comparativo do EPANET e QGISRed para a modelagem e simulação hidráulica

Segundo a IIAMA UPV (2022) O plugin QGISRed foi criado em 2014 pelo Instituto de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental da Universidade Politécnica de Valência (IIAMA-UPV).

De acordo com a IIAMA UPV (2023) ele tem os seguintes arquivos EPANET na sua configuração, de modo que esses arquivos são necessários para que o QGISRed possa interagir com o EPANET. Sem esses arquivos a seguir, o QGISRed não seria capaz de executar simulações EPANET ou acessar os dados do EPANET:

- ✓ Epanet.exe: Este é o executável do EPANET. Ele é usado para executar simulações EPANET.
- ✓ Epanet.dll: Esta é uma DLL que é usada pelo QGISRed para interagir com o EPANET.
- ✓ Epanet.lib: Esta é uma biblioteca que é usada pelo QGISRed para compilar programas que interagem com o EPANET.
- ✓ Epanet.h: Este é um cabeçalho que é usado pelo QGISRed para acessar as funções do EPANET.

- ✓ Qgisredad.ini: Este arquivo contém as configurações do QGISRed. Essas configurações incluem a localização do executável do EPANET, a localização das bibliotecas do EPANET e as configurações das ferramentas do QGISRed.
- ✓ Qgisredad.db: Este arquivo é um banco de dados que armazena os dados do QGISRed. Esses dados incluem os modelos EPANET, as redes de distribuição de água e os resultados das simulações

Segundo a Universidade Politécnica de Valência (2023) le possui um manual, que fornece uma visão geral do plugin, incluindo seus recursos, instalação e uso. É um plugin gratuito e de código aberto que permite aos usuários construir e analisar modelos hidráulicos de redes de distribuição de água de qualquer complexidade, até o nível de detalhe exigido por gêmeos digitais.

Essa complexidade inclui redes com uma grande variedade de elementos, como tubulações, reservatórios, bombas e válvulas e oferece suporte a uma variedade de condições de contorno, e para isso utiliza um banco de dados relacional de arquivos SHP e DBF baseado no modelo de dados EPANET, que foi estendido para adicionar novas capacidades, já o EPANET é limitado a redes de distribuição de água simples, com um pequeno número de elementos de rede. (MARTINEZ e LERMA 2019; ROSSMAN, 2000).

O QGISRed não apenas integra todos os recursos do EPANET ao QGIS, mas também adiciona funcionalidades que o EPANET sozinho não possui. Ele permite a utilização de serviços de conexão, válvulas de corte, sensores de medição, Áreas Distritais Medidoras, controle de água não faturada e diferenciação entre vazamentos latentes e específicos.

Além disso, possibilita o georreferenciamento dos elementos da rede, sobreposição aos fundos geográficos, edição de informações gráficas e alfanuméricas, visualização por camadas, personalização de simbologia, operações de geoprocessamento, definição de propriedades dos elementos, construção de cenários de cálculo e análise de resultados, tudo dentro de um único ambiente QGIS. (MARTINEZ e LERMA 2019; ROSSMAN, 2000).

Novos elementos podem ser conectados com pontos de clientes ou leituras de medidores automatizados, medições SCADA, operações de manutenção, vazamentos etc. O QGISRED pode ser usado para Visualização de redes, Simulação de fluxo, Análise de desempenho e Gerenciamento de dados de redes de distribuição de água. (UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE VALÊNCIA; 2023)

Além disso, todas as capacidades do QGIS para edição e análise de dados geográficos podem ser usadas para melhorar a qualidade dos dados do modelo.

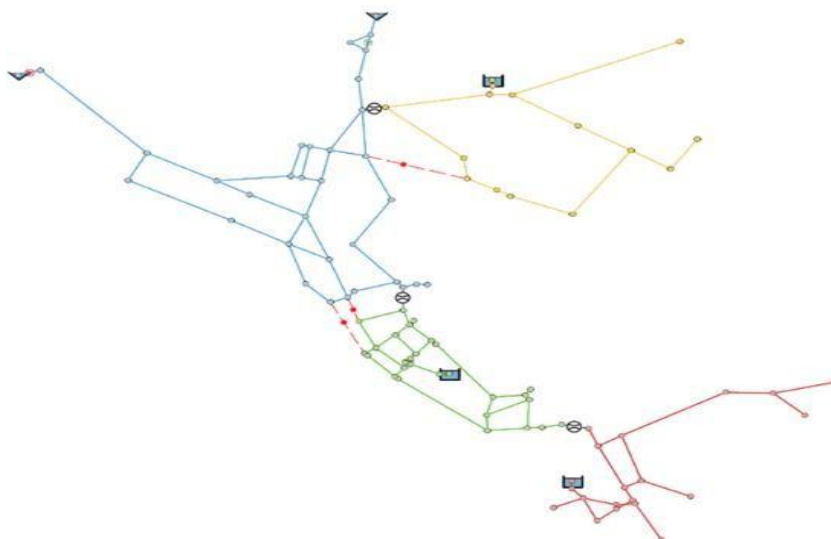
O QGISRED pode ser usado para modelar uma variedade de condições de contorno, incluindo fontes, drenos e demandas, já o EPANET é limitado a fontes e drenos. (MARTINEZ e LERMA 2019; ROSSMAN, 2000).

O QGISRED oferece Suporte a uma variedade de métodos de simulação, e pode ser usado para simular uma variedade de métodos, incluindo análise de tempo decorrido, análise de equilíbrio e análise de estado estacionário, já o EPANET é limitado a análise de tempo decorrido. (UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE VALÊNCIA, 2023; ROSSMAN, 2000)

O QGISRED pode ser usado para gerar uma variedade de relatórios e gráficos, incluindo gráficos de pressão, vazão, consumo, nível, temperatura, turbidez, Ph, cloro e outros parâmetros de qualidade da água, já O EPANET é limitado a relatórios de pressão e vazão. (UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE VALÊNCIA, 2023; ROSSMAN, 2000)

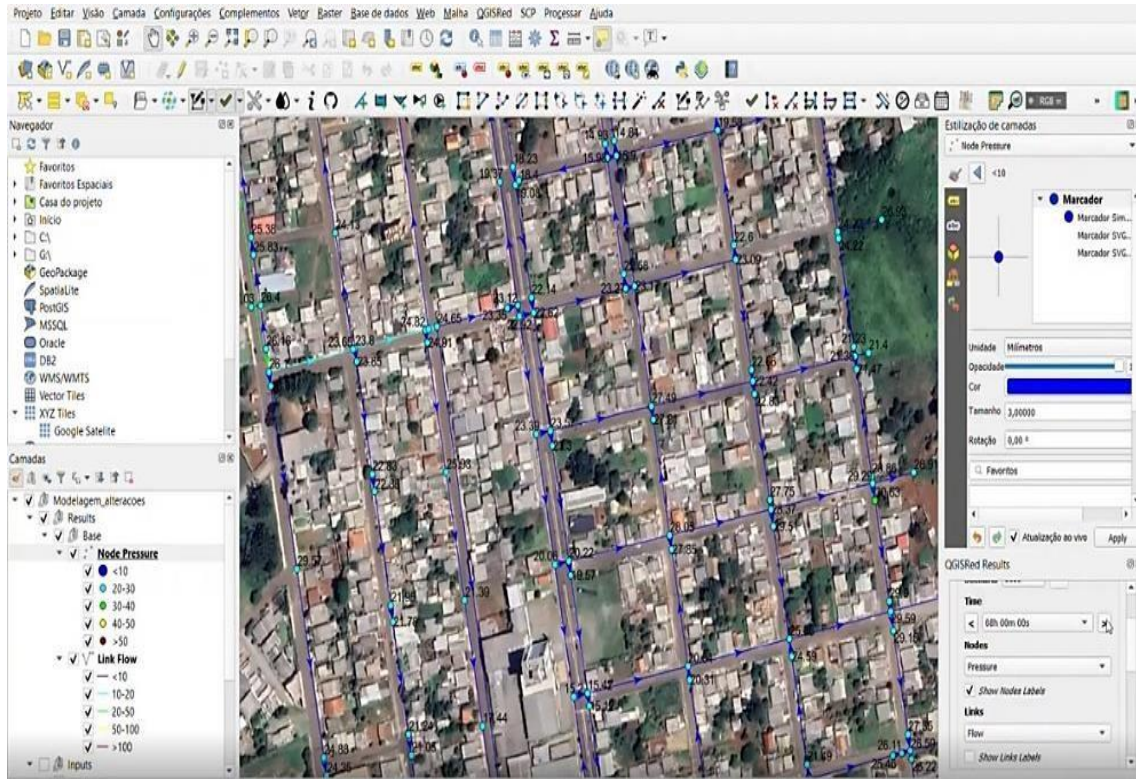
Também para operar uma rede de distribuição de água, o QGISRED pode ser usado para monitorar a pressão e o fluxo da água em toda a rede, identificar e resolver problemas, como vazamentos e obstruções, planejamento e cronograma de manutenção das tubulações e outros ativos da rede, além de também pode ser usado para documentar as alterações feitas na rede ao longo do tempo, já o Epanet não possui esse recurso. (UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE VALÊNCIA, 2023; ROSSMAN, 2000). A Figuras 6, 7 e 8 a seguir ilustram uma simulação hidráulica com o QGISRed.

Figura 6 – Exemplo de simulação hidráulica com o plugin QGISRed



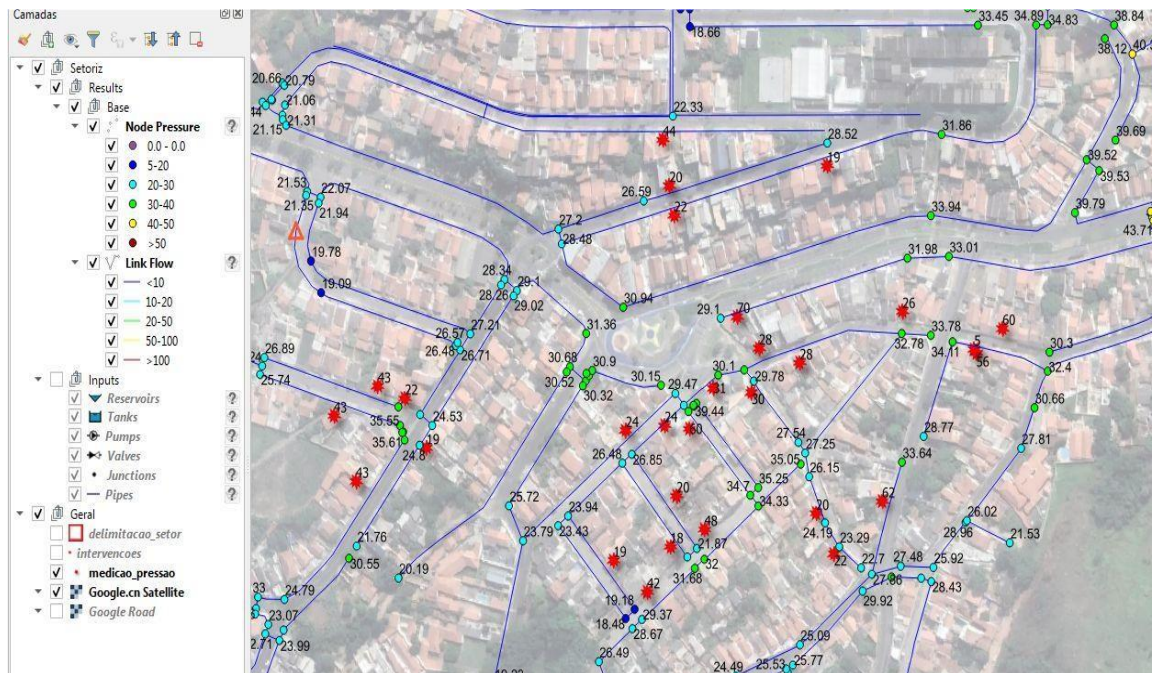
Fonte: Universidade Politécnica de Valência (2023)

Figura 7 – Exemplo de simulação hidráulica com o plugin QGISRed



Fonte: Universidade Politécnica de Valência (2023)

Figura 8 – Exemplo de simulação hidráulica com o plugin QGISRed



Fonte: Universidade Politécnica de Valência (2023)

A ferramenta QGISRed já foi aplicada em várias pesquisas, listadas a seguir:

Milićević et al. (2024) investigaram os principais obstáculos relacionados à gestão de perdas em sistemas de abastecimento de água na Eslováquia, destacando o QGISRed como uma ferramenta promissora para o controle dessas perdas.

Nunes et al. (2023) apresentaram um modelo simplificado para avaliação de risco utilizando o plugin QGISRed, identificando tubulações mais vulneráveis a falhas e analisando suas consequências, como impactos financeiros e no índice de qualidade da água, com base em um estudo de caso real.

Nibi et al. (2022) desenvolveram um modelo baseado em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) no QGISRed para analisar a variação entre oferta e demanda em uma área urbana. O estudo resultou na digitalização e modelagem de uma rede de abastecimento real em Kochi, Índia.

MRŠA (2022) utilizou o QGISRed para avaliar os fluxos e pressões na rede de abastecimento de água em Glavan, Croácia. O estudo incluiu análises sobre o abastecimento de um novo assentamento e as necessidades de combate a incêndios, demonstrando que a rede existente pode atender a essas demandas com eficácia.

Pietrobon (2022) realizou análises e otimizações na gestão de um sistema complexo de água potável por meio do plugin QGISRed.

Ferreira (2022) investigou, com o suporte do QGISRed, os impactos no abastecimento de água devido à desocupação de residências em três bairros de Maceió-AL, ocasionada pela instabilidade do solo.

Santana (2022) aplicou o QGISRed para modelar hidraulicamente o sistema de abastecimento de água da vila Montemor-o-Velho, em Coimbra, Portugal, e identificar possíveis soluções para melhorar seu funcionamento.

Fontes (2022) utilizou o QGISRed para estudar uma Zona de Medição e Controle (ZMC) afetada por perdas e fugas, avaliando a extensão do problema e propondo estratégias para reduzir os valores dessas perdas.

Giudicianni et al. (2020) empregaram o QGISRed para explorar a instalação de microturbinas e bombas atuando como turbinas no lugar de válvulas redutoras de pressão, demonstrando métodos de recuperação de energia em redes de água particionadas em Distritos de Medição e Controle.

Castaño (2020) elaborou uma metodologia no QGISRed voltada para melhorar a operação e gestão de sistemas de distribuição de aquedutos rurais, facilitando a interação dos operadores com os componentes do sistema por meio de modelagens computacionais e geoespaciais.

3.8 Potencialidades do QGIS e QGISRed acoplados ao Software R e bibliotecas Python

O campo da geoinformação é dinâmico e cheio de desafios complexos. Para enfrentá-los, é essencial utilizar ferramentas robustas e versáteis de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) em conjunto com ferramentas estatísticas avançadas como o R. A integração entre R e QGIS, seja executando o QGIS no ambiente R ou incorporando o R no QGIS para combinar análises estatísticas avançadas com geoprocessamento tem se mostrado um verdadeiro desafio para os pesquisadores.

Muenchow et al. (2017) desenvolveram o pacote RQGIS, descrito no artigo “RQGIS: Integrating R with QGIS for Statistical Geocomputing”, que permitia rodar o QGIS dentro do R. No entanto, o RQGIS dependia do pacote rgdal, que deixou de ser atualizado em 2017 no repositório CRAN devido a mudanças nas bibliotecas subjacentes e à evolução do ecossistema de pacotes R para análise espacial. Com a descontinuação do rgdal, o RQGIS também parou de ser mantido e não pode mais ser instalado.

Posteriormente, surgiu o RQGIS3, mas enfrentou problemas semelhantes de falta de manutenção e questões técnicas não resolvidas, levando ao desencorajamento de seu uso. Em 2019, o Processing R Provider foi lançado como uma solução para executar o R dentro do QGIS, permitindo o acesso às funcionalidades do R no ambiente do QGIS, e se tornou a única opção disponível para integrar essas ferramentas até então.

A integração entre o R e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), conforme destacado por Muenchow et al. (2017), oferece várias vantagens ao combinar as capacidades estatísticas do R com as ferramentas de geoprocessamento dos SIG. Essa combinação resulta em uma abordagem mais abrangente e poderosa para a análise e visualização de dados geoespaciais.

O uso do R dentro do QGIS permite um processamento de dados geográficos mais sofisticado e integrado. O Processing R Provider é um componente crucial dessa integração, facilitando a interação entre QGIS e R e permitindo que os usuários aproveitem as funcionalidades avançadas do R para análises estatísticas e visualizações.

Essa integração é particularmente útil para dados geoespaciais complexos, onde análise estatística e aspectos espaciais são igualmente importantes. Ao utilizar essa integração, os pesquisadores podem aproveitar a flexibilidade e a variedade de pacotes estatísticos do R, criando fluxos de trabalho mais integrados e eficientes, enquanto se beneficiam das ferramentas de geoprocessamento e visualização oferecidas pelo QGIS. A integração entre QGIS e Processing R Provider representa uma abordagem poderosa e abrangente para a análise e visualização de dados geoespaciais.

Deste modo foram encontrados dois trabalhos que utilizaram o Processing R Provider, sendo de Zaf et al (2021) que implementou um algoritmo de mapeamento de área Queimadas através do Processing R Provider e Demoraes (2019) que criou o FactoQGIS é um algoritmo que permite a implementação de uma análise geométrica de dados multidimensionais

O plugin QGISRed, junto com o "R Processes Provider", exemplifica como essa integração pode ser realizada na prática, permitindo que os usuários aproveitem o melhor de ambos dos dois softwares, a análise estatística avançada do R e as capacidades de geoprocessamento dos SIG. Isso, por sua vez, pode levar a percepções mais profundas e informados a partir dos dados geoespaciais. (QGIS, 2023)

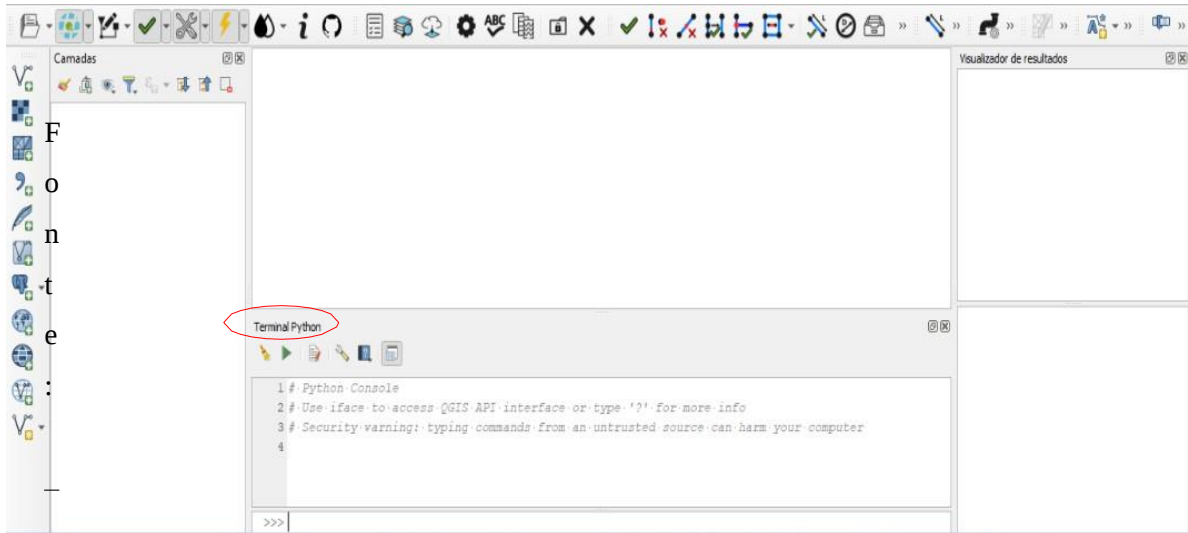
Além desses recursos, O QGIS quando é instalado vem com o QGIS OS Shell, que é uma ferramenta para instalar pacotes Python na biblioteca do QGIS chamada PyQGIS, (QGIS, 2023)

O QGIS também possui o terminal Python conforme é ilustrado na Figura 9, que é uma ferramenta poderosa que permite aos usuários interagir com o QGIS e seus dados usando a linguagem de programação Python e todos os pacotes, como por exemplo o pacote Rpy2 permite chamar funções R dentro de scripts Python (QGIS, 2023)

O terminal possui como principais funcionalidades seguintes de acordo com (QGIS, 2023):

- Executar comandos Python para manipular dados e camadas
- Importar e exportar dados para formatos diferentes
- Criar e executar scripts Python para automatizar tarefas
- Interagir com a interface gráfica do usuário do QGIS

Figura 9 – Terminal Python do QGIS



QGIS (2023)

A aplicação desses softwares e plugins (QGIS, QGISRed, Python, R e Processing R Provider) para as redes de distribuição de água não é explorada na área acadêmica, pois foram realizadas buscas sem êxito nas principais bases de periódicos científicos como Scopus (elservier), Web of Science, ScienceDirect, Google Acadêmico, Scielo.

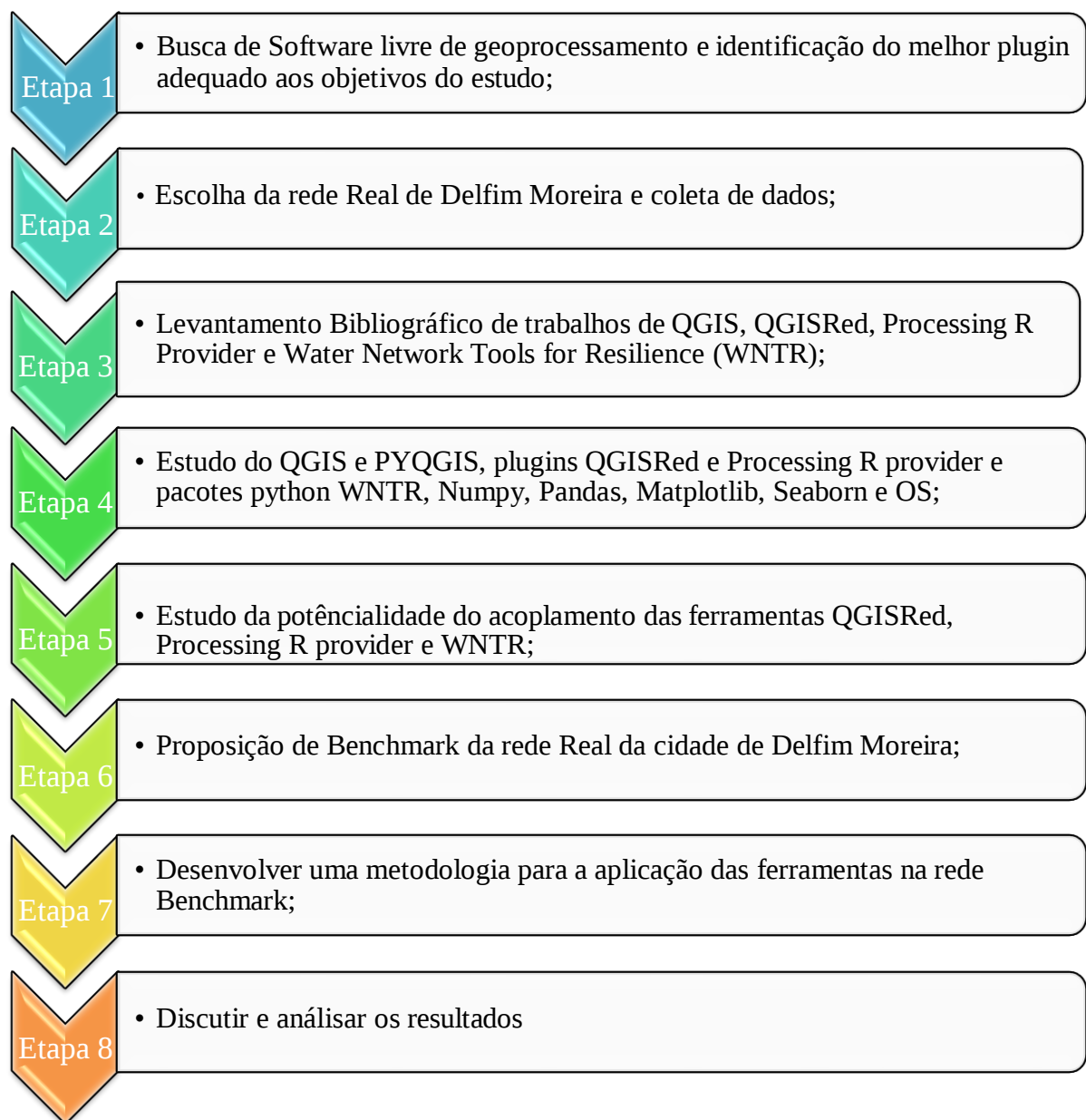
Deste modo, a utilização dos plugins apresentados é vantajosa, pois permite ampliar o conhecimento sobre as redes. Além disso, possibilita a interação com vários outros pacotes do R disponíveis na comunidade, reforçando sua utilização e contribuição na resolução de problemas hidráulicos.

Com isso, o estudo desenvolvido se torna relevante por tratar de uma ferramenta nova para o estudar o comportamento de redes de distribuição de água e fazer a contribuição em termos metodológicos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo faz uso de uma variedade de softwares, plugins, bibliotecas de programação e bancos de dados para modelar, simular e otimizar o desempenho de sistemas de distribuição de água em regiões montanhosas. Os principais materiais e ferramentas empregados são descritos nas etapas da Figura 10 a seguir.

Figura 10 – Fluxograma etapas da metodologia



Fonte: O autor (2024)

A primeira etapa consistiu na busca por um software de geoprocessamento livre e plugin que atendesse os objetivos da pesquisa. A utilização de software livre é essencial para garantir acessibilidade, flexibilidade e personalização das ferramentas no ambiente acadêmico e em estudos sobre redes de distribuição de água.

Além de permitir modificações personalizadas, o software livre oferece vantagens significativas em termos de custo, pois elimina a necessidade de aquisição de licenças onerosas, o que pode ser um obstáculo para muitos projetos. O processo de escolha do software envolveu a análise de diversos fatores, tais como:

1. A capacidade de integração do software com outras ferramentas, especialmente para simulações hidráulicas;
2. A facilidade de uso e o suporte da comunidade, visto que uma base ativa de usuários pode ser crucial para resolver problemas durante a implementação;
3. A disponibilidade de plugins que otimizem e expandam a funcionalidade do software.

Após explorar diversas opções de softwares de geoprocessamento, a etapa seguinte consistiu na avaliação criteriosa dessas ferramentas. O objetivo era identificar o software que oferecesse o melhor conjunto de funcionalidades para atender aos requisitos da pesquisa. Um fator determinante foi que o software escolhido permitisse não apenas o mapeamento e a análise de dados geoespaciais, mas também a integração com ferramentas externas, como plugins com motores de cálculo hidráulico. As opções encontradas foram: Spring ®, QGIS®, Terra View ®, Generic Mapping Tools ®, gvSIG ®, GRASS-GIS ®, Whitebox Geospatial Analysis Tools ®, SNAP ® e OS GEO ®.

O QGIS foi selecionado como a melhor opção devido à sua flexibilidade e compatibilidade com uma ampla variedade de ferramentas e plugins especializados. O QGIS (Sistema de Informação Geográfica de Código Aberto) é uma plataforma amplamente usada para manipulação, análise e visualização de dados geoespaciais. Sua escolha foi impulsionada pela capacidade de integrar diversos plugins que facilitam a modelagem e análise de redes de distribuição de água. No contexto deste estudo, o QGIS foi utilizado para mapear a infraestrutura da rede de abastecimento, incluindo tubulações, reservatórios e nós de abastecimento.

A partir de dados vetoriais, como linhas representando tubulações e pontos representando-nos, foi possível criar uma representação espacial detalhada da rede em áreas montanhosas. Dados raster, como curvas de nível e modelos digitais de elevação (MDE) e modelos digitais de terreno (MDT), foram empregados para avaliar a influência da topografia sobre a distribuição de pressão e vazão ao longo da rede.

Essa integração possibilitou a simulação de cenários operacionais em áreas com grandes diferenças de altitude, facilitando a visualização de pontos críticos e a identificação de oportunidades de melhoria.

O QGIS é uma plataforma robusta que permite a integração com scripts em Python e pacotes que possibilitam a execução de análises avançadas de redes de distribuição de água.

Além disso, por ser um software livre, facilita o uso em projetos de pesquisa acadêmica, onde os custos podem ser uma limitação significativa.

Ao optar pelo QGIS, a pesquisa contou com uma ferramenta que não só atende às necessidades de geoprocessamento, mas também permite a realização de simulações hidráulicas avançadas por meio de plugins como o QGISRed, garantindo que o software esteja apto a realizar todas as funções necessárias durante o desenvolvimento da metodologia.

Com o QGIS escolhido como a principal plataforma de geoprocessamento, a próxima fase envolveu a busca por um plugin que possibilitasse a integração do motor de cálculo Epanet ao ambiente QGIS. O Epanet é uma ferramenta amplamente utilizada para simulações hidráulicas em redes de distribuição de água, oferecendo funcionalidades para calcular pressão, vazão, velocidade nos tubos e perdas de carga, entre outras variáveis.

A integração do Epanet com o QGIS é fundamental para que a modelagem da rede de distribuição de água seja feita de maneira eficiente, permitindo simulações dentro do ambiente geoespacial. Isso facilita a visualização dos resultados diretamente no mapa da rede, tornando o processo mais intuitivo e eficiente. O plugin QGISRed se revelou uma das melhores opções para essa integração.

A segunda etapa do estudo foi dedicada à seleção e análise da rede Real de Delfim Moreira, acompanhada pela coleta dos dados necessários para o desenvolvimento da pesquisa. A escolha dessa rede não foi aleatória, mas sim embasada em critérios específicos relacionados às características geográficas e topográficas da região. A base de dados incluiu informações sobre a infraestrutura da rede de abastecimento de água e dados topográficos, como curvas de nível e elevações dos nós e reservatórios.

A rede Real de Delfim Moreira se destaca por sua topografia marcadamente acidentada, que inclui áreas com relevo irregular, declividades acentuadas e um traçado complexo. Esses fatores apresentam desafios significativos para estudos de modelagem e simulação de sistemas hidráulicos, tornando-a uma opção ideal para uma análise mais detalhada e abrangente. Ao mesmo tempo, a complexidade da topografia oferece a oportunidade de aplicar metodologias robustas para superar as dificuldades impostas, o que confere um caráter dinâmico e desafiador à pesquisa.

A coleta de dados foi realizada de maneira sistemática e criteriosa, com o objetivo de garantir a precisão e a confiabilidade das informações utilizadas nas etapas subsequentes do estudo. Esse processo envolveu a utilização de diferentes ferramentas e técnicas de coleta, incluindo levantamentos topográficos, análise de imagens de satélite e consulta a bancos de dados geográficos disponíveis.

Um dos principais aspectos considerados durante a seleção foi a representação de diferentes cenários e condições hidráulicas, o que permite uma abordagem mais ampla para os cálculos necessários.

A terceira etapa foi a de levantamento bibliográfico de trabalhos de QGIS, QGISRed, Processing R Provider e WNTR. Após o levantamento bibliográfico, destacando o estudo de Oscar Viegas Ninõ (2021), foram identificados dois plugins principais: QGISRed e GISWater. O QGISRed foi escolhido por suas funcionalidades técnicas voltadas para análises hidráulicas, permitindo simular o Epanet diretamente no ambiente QGIS, sem a necessidade de exportação da rede. Em contraste, o GISWater é mais focado na gestão cadastral das redes, exigindo exportação da rede para o Epanet e posterior importação dos resultados. Como a pesquisa prioriza a análise técnica do desempenho hidráulico, optou-se pelo QGISRed.

A quarta etapa foi a de estudo do QGIS e PyQGIS, plugins QGISRed e Processing R provider e pacotes Python WNTR, Numpy, Pandas, Matplotlib, Seaborn e OS.

O terminal Python é essencial para explorar a biblioteca PyQGIS, que oferece ferramentas para manipulação de camadas, edição de atributos, execução de geoprocessamento e consultas espaciais, tudo de forma automatizada. O QGIS também possibilita a instalação de pacotes Python via OSGeo4W Shell, facilitando o uso de ferramentas externas no ambiente de trabalho. Os pacotes Python utilizados nesta pesquisa foram: WNTR, Pandas, Matplotlib, Seaborn e Os.

O estudo da biblioteca PyQGIS se deu por meio do livro de Lawhead (2015) intitulado "Python Programming Cookbook", além do QGIS Python API documentation project (2023), QGIS Desktop 3.22 User Guide (2023) e PyQGIS Developer Cookbook (2023). De acordo com Lawhead (2015), a biblioteca PyQGIS é uma extensão do Python que permite aos desenvolvedores interagirem com o QGIS, um software de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) amplamente utilizado. Para implementar o QGISRed, foi necessário realizar um estudo detalhado de suas funcionalidades, utilizando o manual de Martinez e Lerma (2022) como guia.

O manual forneceu instruções essenciais sobre a instalação, configuração e uso do plugin no QGIS, o que foi fundamental para garantir a correta integração com o sistema de informação geográfica. Após essa etapa inicial de aprendizado, começou a aplicação prática do plugin para modelar redes de abastecimento de água georreferenciadas na região de estudo.

O QGISRed permite ajustar esses parâmetros dinamicamente, facilitando a simulação de diferentes condições operacionais e o teste de intervenções na rede, como ajustes em válvulas redutoras de pressão (VRPs) e a instalação de novos reservatórios.

A capacidade de ajustar parâmetros e simular cenários variados é crucial para avaliar a eficiência operacional do sistema de abastecimento, especialmente em regiões montanhosas, onde as variações de pressão impactam diretamente a distribuição de água. O QGISRed se mostrou, portanto, uma ferramenta flexível e eficaz para a análise hidráulica integrada ao ambiente de SIG.

Além disso, o QGISRed oferece uma interface gráfica que facilita a visualização dos resultados no mapa, tornando o processo mais intuitivo. O QGISRed foi selecionado pela sua simplicidade de uso e pela perfeita integração com o QGIS e o Epanet, tornando-o ideal para as simulações necessárias no desenvolvimento da metodologia.

A quinta etapa foi a de Estudo da potencialidade do acoplamento das ferramentas QGISRed, Processing R provider e WNTR.

Com o acoplamento do QGISRed com o Processing R Provider e o uso dos pacotes Python WNTR, pandas, matplotlib, seaborn, a pesquisa teve acesso a uma poderosa ferramenta para executar simulações hidráulicas avançadas.

O terminal Python do QGIS, embora menos popular do que outras plataformas como Google Colab ou PyCharm, oferece uma vantagem única para atividades de geoprocessamento.

Ele permite o desenvolvimento de scripts que interagem diretamente com dados e camadas geoespaciais, facilitando a automação das tarefas de geoprocessamento e a visualização em tempo real dos resultados no mapa

A sexta etapa consistiu na Proposição de Benchmark da rede Real da cidade de Delfim Moreira. A proposta dos cenários descritos na metodologia que se segue tem como objetivo materializar o conceito de benchmark, aplicando-o de forma prática ao controle de perdas de água em redes de abastecimento.

A sétima etapa descrita refere-se ao desenvolvimento de uma metodologia para a aplicação de ferramentas modernas em uma rede de abastecimento denominada rede Benchmark. O objetivo principal dessa metodologia foi solucionar problemas relacionados à baixa eficiência operacional e ao elevado índice de perdas de água na rede. Seguindo a definição de Agarwal et al. (1996), uma metodologia é caracterizada como um conjunto estruturado de procedimentos, processos e técnicas projetados para alcançar um objetivo ou resolver um problema, assegurando a possibilidade de replicação em diferentes localidades e contextos.

No caso da rede Benchmark, a proposta metodológica foi concebida com foco na aplicação de novas tecnologias, aproveitando avanços recentes no campo da gestão de recursos hídricos. O desenvolvimento dessa abordagem considerou a utilização de ferramentas como modelagem hidráulica, sensores inteligentes, análise de dados em tempo real e sistemas de monitoramento avançados. Essas tecnologias foram integradas de forma a permitir a identificação precisa de falhas operacionais, como vazamentos ou rupturas, além de otimizar o desempenho geral da rede. A metodologia desenvolvida baseou-se em uma abordagem sistemática, visando não apenas a resolução dos problemas específicos da rede Benchmark, mas também a criação de uma referência que pudesse ser adaptada e aplicada em diferentes cenários. O uso de tecnologias modernas foi um diferencial significativo, oferecendo soluções práticas e inovadoras para enfrentar desafios tradicionais do setor, como perdas de água e distribuição ineficiente.

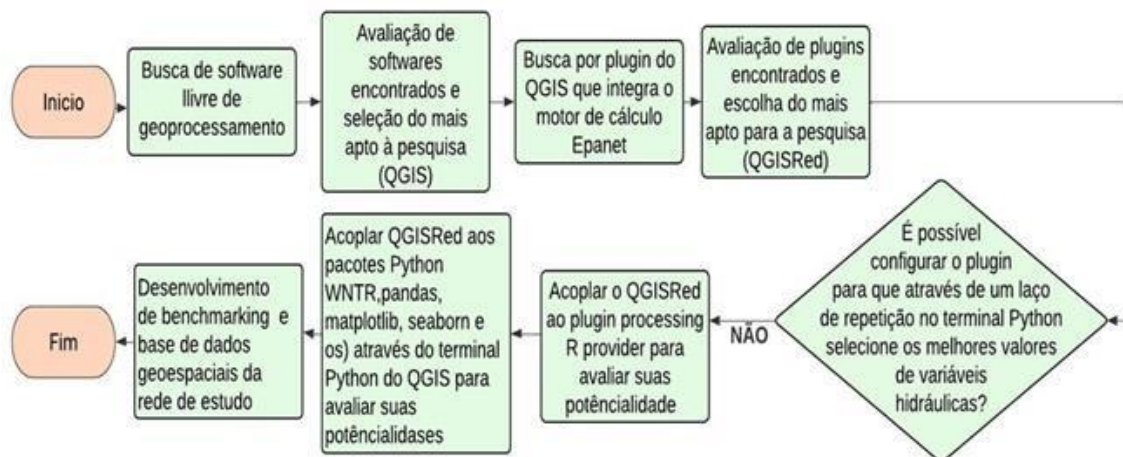
A oitava e última etapa consistiu na análise e discussão dos resultados. Durante essa etapa, os dados coletados foram analisados com o objetivo de identificar melhorias na eficiência operacional da rede e reduções no índice de perdas de água.

5. RESULTADOS

5.1 Descrição da metodologia proposta

O produto do trabalho é uma metodologia, e neste capítulo será apresentada a fundamentação para descrição de detalhamento geral desta. O fluxograma a seguir da Figura 11, ilustra as principais etapas desse processo, desde a escolha do software até a aplicação de técnicas avançadas de análise, visualização e benchmark da rede. Este fluxo de trabalho não apenas orienta o desenvolvimento da pesquisa, mas também oferece uma base estruturada para a integração de novas ferramentas e metodologias que possam aprimorar o desempenho e a eficiência dos sistemas de distribuição de água.

Figura 11 – Fluxograma das etapas que fundamentam a metodologia



Fonte: O autor (2024)

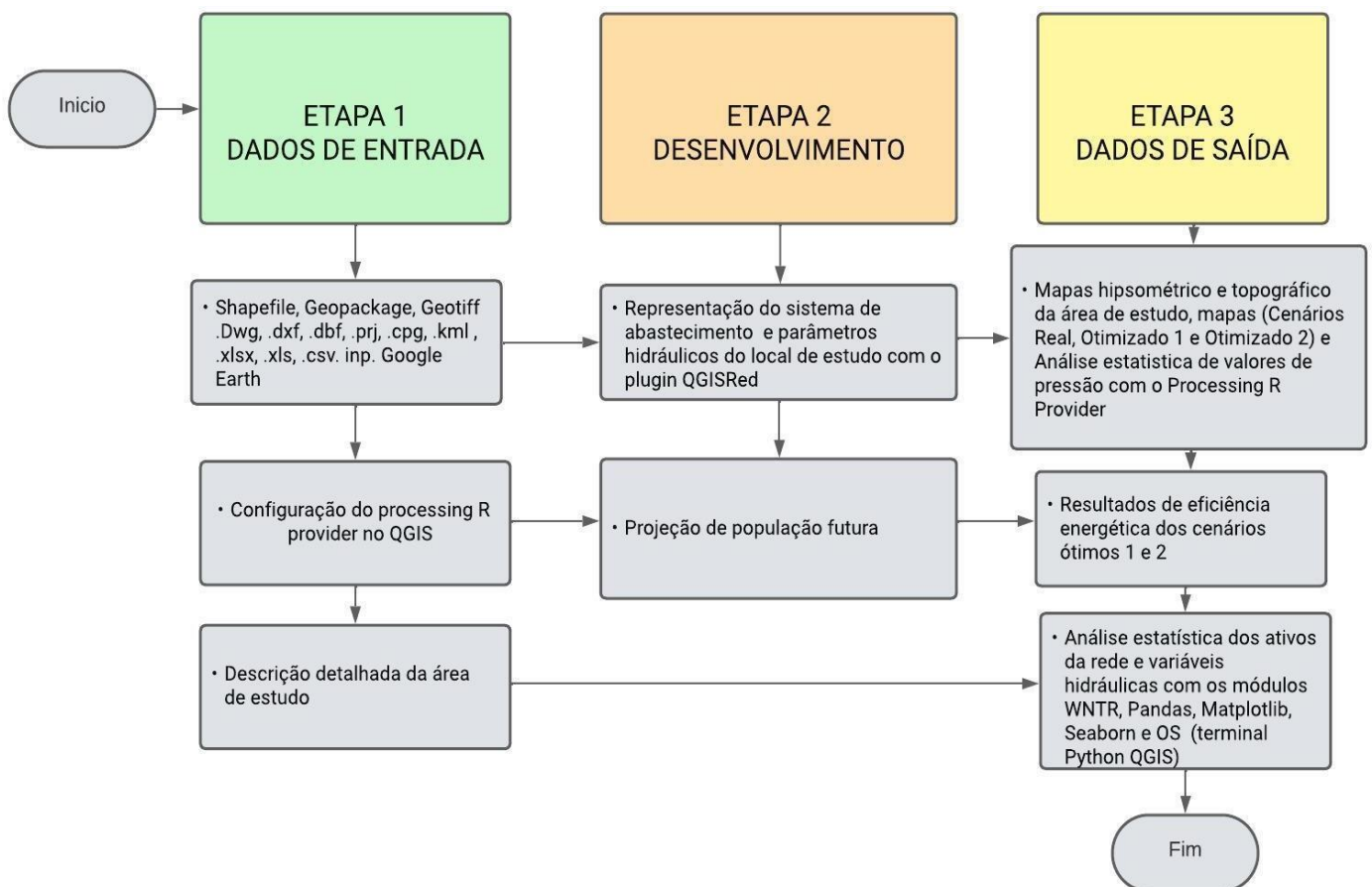
O objetivo da metodologia primeiramente seria criar scripts para rotinas computacionais no terminal Python do QGIS utilizando laços de repetição para automatizar o processo de otimização dentro do modelo QGISRed. O código alteraria parâmetros, executaria simulações, retornaria os resultados, ajustaria os parâmetros e repetiria o processo milhares de vezes para identificar os valores ótimos dos parâmetros hidráulicos.

No entanto, ao tentar implementar essa estrutura de repetição, foi verificado que não seria possível chamar o QGISRed no código Python do QGIS. Após tentativas de contato com os autores do plugin, descobriu-se que não havia como invocar o plugin diretamente no terminal Python.

O presente trabalho resultou no desenvolvimento de uma metodologia cujos passos estão representados na figura a seguir. Esta metodologia está dividida em três etapas principais: Dados de Entrada, Desenvolvimento, e Dados de Saída. Conforme a Figura 12 a seguir, que representa as etapas para a construção da metodologia, na Etapa 1, são definidos os dados de entrada, que incluem formatos de arquivos geoespaciais, a configuração do Processing R Provider no QGIS e a descrição detalhada da área de estudo.

Na Etapa 2, ocorre o desenvolvimento da análise, que envolve a simulação do sistema de abastecimento com o plugin QGISRed, projeções populacionais futuras e análises estatísticas dos valores de pressão com o Processing R Provider. Por fim, a Etapa 3 apresenta os dados de saída, com a criação de mapas para diferentes cenários e a análise estatística dos ativos da rede utilizando bibliotecas como WNTR, Pandas, Matplotlib, Seaborn e OS no terminal Python do QGIS, resultando em uma análise detalhada e abrangente do comportamento dos ativos da rede de abastecimento.

Figura 12 – Etapas de construção da metodologia desenvolvida na Tese



5.2 Aplicação da metodologia proposta

A metodologia proposta, foi idealizada como um produto para apoio ao gestor da água, para que possa tomar decisões mais acertivas na gestão dos recursos hídricos. A primeira etapa, denominada Dados de Entrada foi o ponto inicial da metodologia. Nesta fase, ocorreu a coleta e integração de dados que foram utilizados como base para as etapas seguintes de modelagem e análise. No primeiro passo da Etapa 1, são mencionados os dados que alimentam o sistema são variados em termos de formatos e proveniência. Cada um desses formatos tem um papel específico no processo. O Shapefile, por exemplo, é muito comum para o armazenamento de dados vetoriais em SIG, sendo composto por uma série de arquivos que, juntos, formam uma representação espacial de linhas, pontos e polígonos. Já o Geopackage é um formato moderno que permite a integração de diferentes camadas de dados em um único arquivo, facilitando o compartilhamento e a manipulação dos dados.

Os arquivos como .dwg e .dxf são amplamente utilizados em ambientes CAD, enquanto arquivos .prj trazem informações de projeção, fundamentais para garantir que os dados geográficos estejam na coordenada correta.

Os formatos .kml e .kmz, que são utilizados para exibição de dados geográficos em plataformas como o Google Earth. Eles oferecem uma interface mais realista para a modelagem e simulação hidráulica e de fácil visualização, o que pode ser útil para a apresentação de resultados ou verificação visual de áreas de estudo. Além disso, arquivos em formatos tabulares como .csv, .xlsx, e .xls são cruciais para a inserção de dados não espaciais que podem ser integrados ao SIG. Por exemplo, tabelas de demanda, pressão, ou informações sobre materiais e idades das tubulações podem ser facilmente armazenadas nesses formatos e posteriormente integradas ao modelo geoespacial. O formato .inp, utilizado pelo software Epanet, é outro componente fundamental, uma vez que é amplamente utilizado na modelagem hidráulica de redes de distribuição de água, contendo informações sobre as características físicas da rede, como nós e conexões, além de simulações de escoamento.

O segundo passo da Etapa 1 é mencionada a configuração do plugin Processing R Provider no QGIS é outro ponto destacado na etapa de entrada de dados.

Este passo é essencial para garantir que as ferramentas de análise estatística e hidráulica baseadas em R estejam acessíveis no ambiente do QGIS, permitindo uma integração fluida entre análises hidráulico espaciais e estatística. O QGIS, como plataforma SIG, oferece uma vasta gama de funcionalidades de visualização e processamento de dados geoespaciais. No entanto, para uma análise mais robusta, como a projeção de cenários e a execução de estatísticas avançadas, o processamento via R se torna uma ferramenta complementar poderosa.

O terceiro passo da Etapa 1 foi, a descrição detalhada da área de estudo. Neste passo, foram coletadas e organizadas todas as informações que caracterizam o local onde o sistema de abastecimento de água está inserido. Isso inclui dados geográficos da região, dados sobre a população atendida, características da topografia, e informações sobre o sistema de infraestrutura de abastecimento de água existente.

Já no primeiro passo da etapa 2, foi onde ocorreu a modelagem propriamente dita do sistema de abastecimento de água. O objetivo principal foi representar o sistema físico e suas variáveis operacionais de maneira fiel à realidade, utilizando o plugin QGISRed, e lançando mão de todos os recursos do QGIS. A partir dessa representação, o sistema pode ser simulado em diferentes cenários, permitindo avaliar o comportamento hidráulico da rede em diferentes condições operacionais, como variações de demanda ou falhas no sistema. O plugin QGISRed também permite a integração de variáveis temporais, como padrões de uso ao longo do dia, o que possibilita uma análise mais detalhada sobre como o sistema se comporta em diferentes cenários.

O segundo passo da Etapa 2 foi caracterizado pela projeção da população para a análise dos valores de eficiência energética dos cenários otimizados 1 e 2. Esses cenários otimizados, projetados para minimizar perdas e aumentar a eficiência energética, consideram não apenas as condições hidráulicas atuais do sistema, mas também a carga adicional esperada devido ao aumento populacional. A eficiência energética, por sua vez, está diretamente ligada ao consumo de energia pelas bombas e outros componentes do sistema, que precisam ser otimizados para funcionar de forma eficiente, mesmo sob demandas mais elevadas. Ao prever essas variações e ajustar os cenários, os gestores podem tomar decisões mais informadas sobre onde investir em melhorias na infraestrutura, como aumentar a capacidade de reservatórios, trocar tubulações antigas, ou melhorar o desempenho de bombas.

Assim, a projeção da população garante que o planejamento do sistema não seja apenas eficaz a curto prazo, mas também sustentável e preparado para o futuro.

No primeiro passo da Etapa 3, o foco esteve na geração de resultados detalhados, como os mapas hipsométricos e topográficos da área de estudo, que são fundamentais para a compreensão da influência da elevação do terreno no comportamento do sistema de distribuição de água. Além dos mapas topográficos e hipsométricos, outros resultados importantes foram gerados, como histogramas, gráficos de frequência e gráficos do tipo box plot. Esses gráficos oferecem uma análise estatística mais profunda das variáveis envolvidas. Os histogramas, por exemplo, são úteis para visualizar a distribuição de uma variável específica, permitindo identificar padrões como a concentração de valores em determinadas faixas, o que pode ajudar a detectar possíveis problemas no sistema, como variações bruscas de pressão.

Já os gráficos de frequência foram úteis para entender a regularidade com que certos eventos ou valores ocorrem, auxiliando no diagnóstico de pontos críticos da rede.

Por outro lado, o gráfico box plot ofereceu uma representação gráfica dos valores mínimos, máximos, medianos e quartis, e isso permitiu obter uma visão clara de outliers e variações extremas, que podem indicar áreas do sistema que necessitam de atenção especial, como pressões muito baixas ou muito altas, ou mesmo tubulações com diâmetros que destoam da média, o que pode afetar o desempenho geral do sistema.

No segundo passo da Etapa 3 foram colhidos os resultados da análise da eficiência energética dos cenários, e por fim no terceiro passo da etapa 3, trouxe avanços significativos na análise estatística dos ativos da rede e das variáveis hidráulicas do sistema de distribuição de água. Essa fase foi fundamental para consolidar os resultados obtidos e aprofundar a compreensão dos diferentes parâmetros que afetam o desempenho da rede.

Utilizando ferramentas avançadas de processamento de dados, como os módulos WNTR, Pandas, Matplotlib, Seaborn e OS, integrados ao terminal Python no QGIS, foi possível realizar uma análise detalhada e precisa das condições operacionais da rede.

O avanço mais significativo nessa etapa foi a capacidade de contabilizar e analisar de forma integrada os diversos ativos da rede, permitindo a visualização de todos os valores de saída de forma simultânea com base no ID correspondente.

Isso possibilitou a análise completa das informações da rede em conjunto, ao invés de analisar cada componente individualmente, como ocorre no Epanet. Assim, foi possível visualizar as características de tubulações, válvulas, bombas e nós, bem como variáveis como pressão, velocidade do fluxo, diâmetro e rugosidade das tubulações, de maneira abrangente e eficiente. Com o uso do WNTR, foi possível simular e analisar a resiliência da rede sob diferentes condições operacionais, o que permitiu não apenas identificar áreas com maior vulnerabilidade, mas também sugerir melhorias estruturais para garantir maior robustez e confiabilidade ao sistema.

Os gráficos gerados com as bibliotecas Matplotlib e Seaborn permitiram uma visualização clara e intuitiva dos dados. Por exemplo, gráficos de dispersão e de linhas foram usados para identificar tendências na pressão ao longo do tempo e em diferentes pontos da rede, enquanto gráficos de barras e histogramas mostraram a distribuição de diâmetros, comprimentos e materiais das tubulações. O uso dessas ferramentas gráficas facilitou a identificação de pontos críticos, como áreas com pressões excessivamente altas ou baixas, que podem resultar em perda de eficiência.

Além disso, a integração com o Pandas possibilitou uma manipulação eficiente de grandes volumes de dados, permitindo que fossem realizadas operações como filtragem, agrupamento e cálculo de estatísticas descritivas de maneira rápida e eficaz. Com isso, foi possível explorar a correlação entre diferentes variáveis, como pressão e diâmetro das tubulações, e entender melhor como esses fatores influenciam a eficiência do sistema.

5.3 Preparação dos dados e configuração das ferramentas

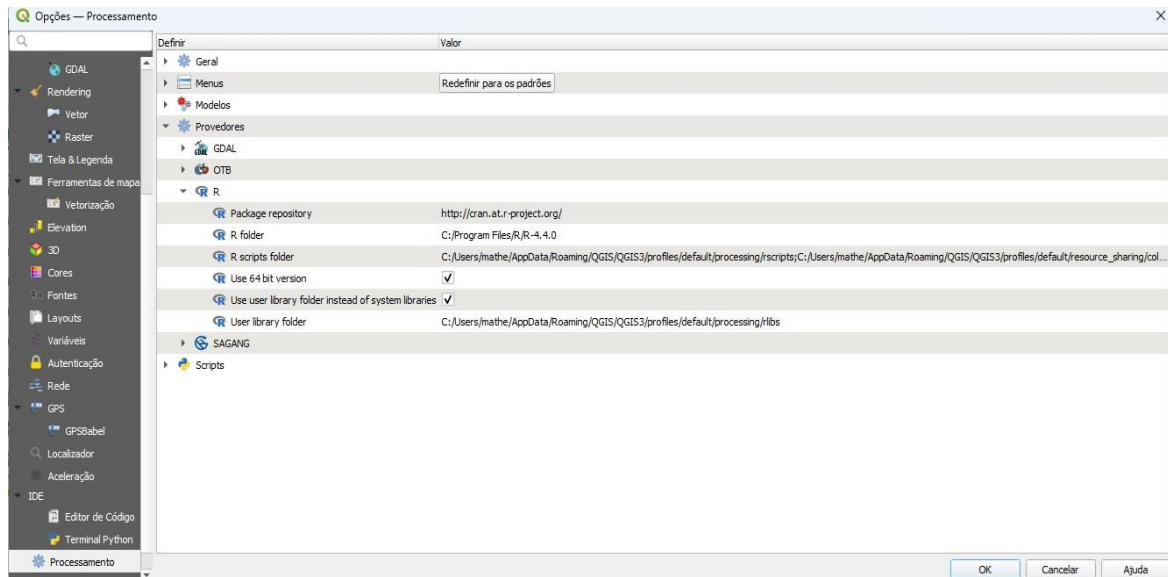
5.3.1 Dados de entrada (Shapefile, Geopackage)

Na primeira etapa do estudo, foram inseridas e configuradas no software QGIS as camadas necessárias para criar a base geoespacial do projeto. Essas camadas incluíram dados vetoriais, raster e dados tabulares.

5.3.2 Configuração do processing R provider no QGIS

O processamento com o plugin torna possível escrever e executar scripts R dentro do QGIS. Para isso, o R precisa estar instalado no seu computador e o PATH e outras variáveis de ambiente precisam ser configuradas corretamente conforme as Figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18

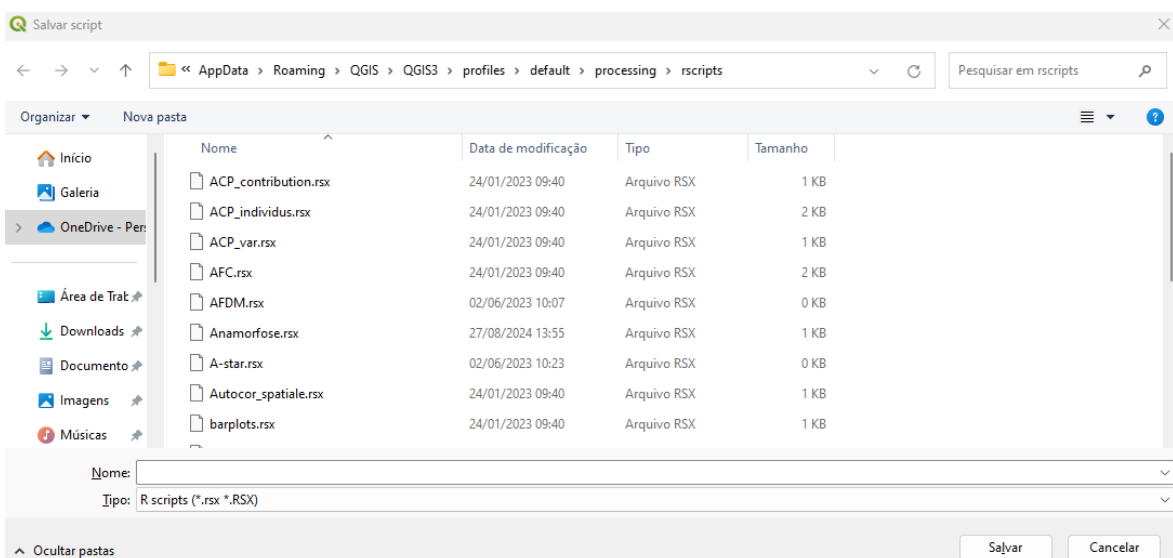
Figura 13 – Configuração do R no QGIS



Fonte: QGIS versão 3.34.9

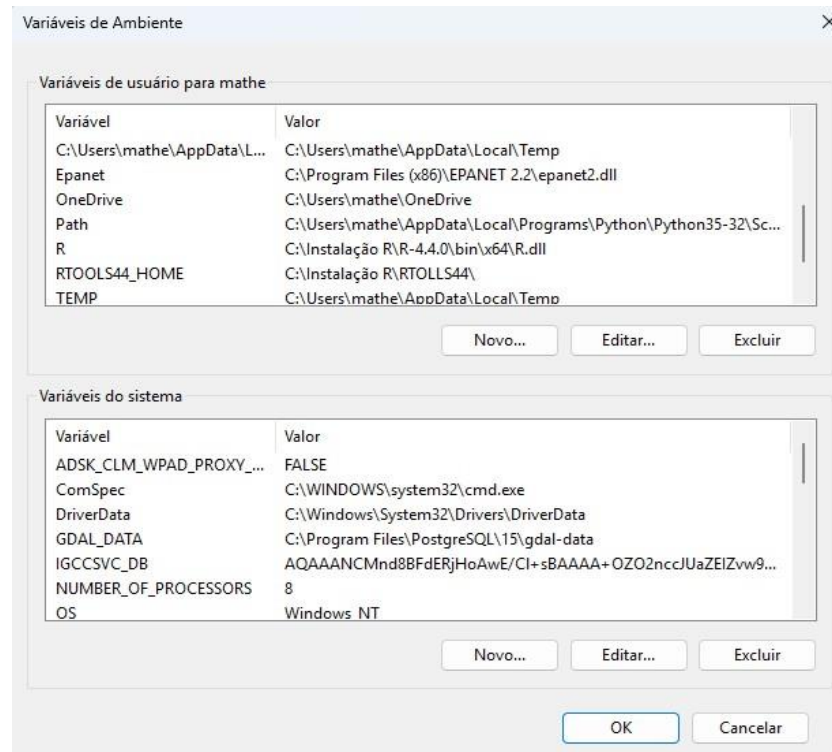
O próximo passo é também configurar a pasta de scripts, salvando todos os em formato.rsx para os mesmos aparecerem ao acionar o processing R Provider conforme mostra a Figura 14. Em seguida na Figura 15 é mostrado como configurar as variáveis de ambiente do sistema.

Figura 14 – Configuração de Script R no QGIS



Fonte: – O autor (2024)

Figura 15 – Configuração do PATH e outras variáveis de ambiente



Fonte: – O autor (2024)

Configurar as variáveis de ambiente ao usar o Processing R Provider no QGIS foi fundamental para garantir que o sistema operacional saiba onde localizar os recursos essenciais do R, permitindo a execução correta de scripts e pacotes. Essas variáveis asseguram que o QGIS e o Processing R Provider possam se comunicar adequadamente com a instalação do R.

Quando executado um script R no QGIS por meio do Processing R Provider, o QGIS depende do sistema operacional para localizar os componentes necessários do R, como o interpretador (R ou Rscript) e os pacotes instalados. Caso as variáveis de ambiente não estejam configuradas corretamente, o QGIS pode enfrentar dificuldades para localizar esses recursos, o que pode resultar em erros como "R não encontrado" ou "pacote não carregado".

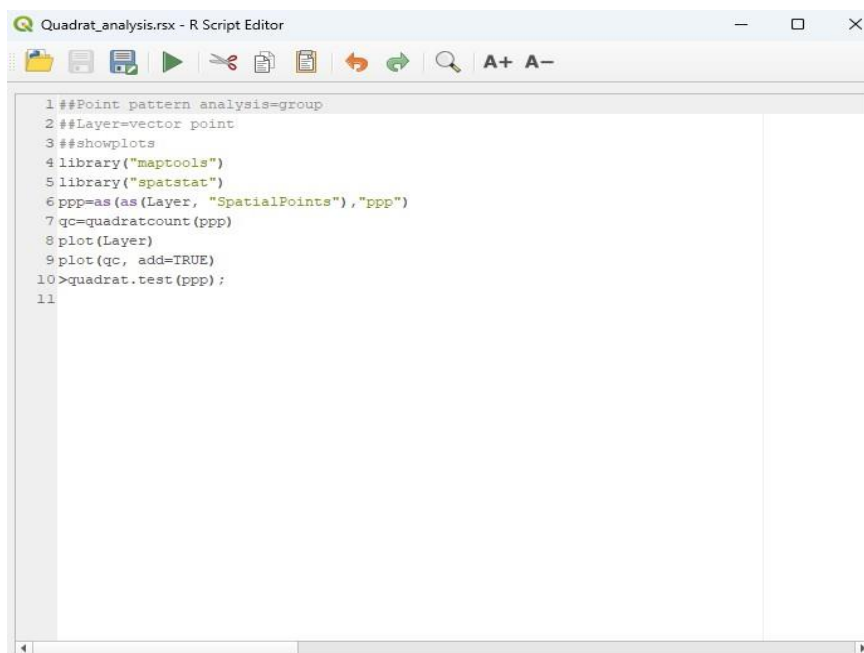
Uma das variáveis de ambiente mais importantes é o PATH, que contém uma lista de diretórios onde o sistema busca os executáveis. Ao executar um comando, como chamar o R no QGIS, o sistema verifica os diretórios indicados no PATH para localizar o arquivo correspondente. Assim, ter o caminho para o executável do R corretamente adicionado ao PATH é essencial para que o QGIS consiga acessar e executar o R corretamente.

Uma característica intrigante do Processing R Provider no QGIS é que ele não funciona apenas como um simples interpretador de código R. Em vez disso, ele age como uma interface que conecta o processamento em R diretamente com as camadas geoespaciais do QGIS. Isso significa que os scripts R são executados em estreita integração com as camadas de entrada selecionadas no ambiente do QGIS, como dados vetoriais, raster ou tabulares.

Essa abordagem pode, em alguns casos, gerar confusão para usuários que estão acostumados a rodar scripts R em um ambiente mais flexível, como o RStudio, onde se tem liberdade para manipular qualquer tipo de dado sem necessariamente estar vinculado a uma camada geoespacial específica. No Processing R Provider, para executar scripts, é necessário que os dados estejam vinculados às camadas do QGIS, o que limita a execução de códigos que não estejam relacionados às camadas selecionadas no projeto.

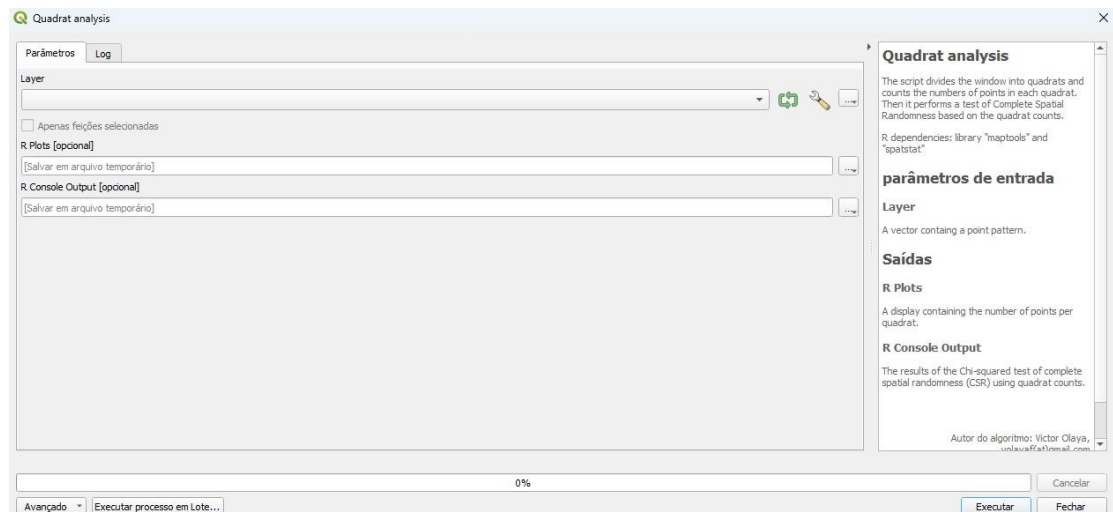
Por isso, o fluxo de trabalho no QGIS usando o Processing R Provider envolve primeiro garantir que seus dados de interesse estejam corretamente organizados e carregados como camadas no projeto. Somente a partir dessas camadas é possível processar os dados através de scripts R. A Figura 16 a seguir mostra um exemplo de linhas de código para gerar uma Análise Quadrática.

Figura 16 – Exemplo de script Análise Quadrática no Processing R Provider



Assim que iniciado o código, abre a tela a seguir, mostrado na Figura 17 que pede para inserir os parâmetros de entrada.

Figura 17 – Dados de entrada para aplicação de script na camada



Fonte: – O autor (2024)

A interface apresentada no QGIS, utilizando o Processing R Provider, permite a criação de análises estatísticas, como o boxplot, diretamente a partir dos dados espaciais.

Para configurar essa análise, é necessário selecionar uma camada que contenha os atributos que serão usados para gerar o gráfico. No contexto de redes de abastecimento de água, essa camada pode incluir dados como pressão nos nós, diâmetro das tubulações, altimetria dos reservatórios, entre outros parâmetros relevantes para o desempenho da rede.

O campo Layer é onde é possível escolher a camada de dados que será usada na análise. Para a análise de uma rede de abastecimento de água, variáveis como valores de pressão em diferentes pontos da rede ou altura dos reservatórios pode fornecer percepções importantes sobre o comportamento do sistema e identificar possíveis áreas críticas, como pontos com pressão muito alta ou muito baixa.

Além disso, a área R Plots permite a escolha de um local para salvar o gráfico gerado, seja temporariamente ou de forma definitiva para uso em relatórios ou apresentações.

Após configurar os campos, o processo é iniciado ao clicar em Executar, e o script R gera o boxplot, que exibirá a distribuição dos dados de forma clara, mostrando as variações e possíveis outliers nos valores. Assim que executado o código, se clicar em log, é gerado o registro detalhado das mensagens, avisos, erros e informações do processamento, como exemplificado nas Figuras 18 e 19 a seguir e por fim é gerado o gráfico de resultado.

Figura 18 – Registro de mensagens após rodar o script

```
Versão do QGIS: 3.34.1-Prizren
Código de revisão do QGIS: 133927424d
Versão do Qt: 5.15.3
Versão do Python: 3.9.5
Versão do GDAL: 3.8.0
Versão do GEOS: 3.12.1-CAPI-1.18.1
Versão do PROJ: Rel. 9.3.0, September 1st, 2023
Versão PDAL: 2.6.0 (git-version: e4d82c)
R versão: QGIS R Provider version 4.1.0, R version 4.3.3 (2024-02-29 ucrt) -- "Angel Food Cake"

Algoritmo iniciado as: 2024-07-29T14:56:38

Entrada de parâmetros:
{ 'Layer' : 'C:\Users\User\Desktop\APPIA\PC\NR\shapa\
\augezAnalisados.shp', 'RPLOTS' : 'C:/Users/User/Documents/
teste.html', 'X' : 'td' }

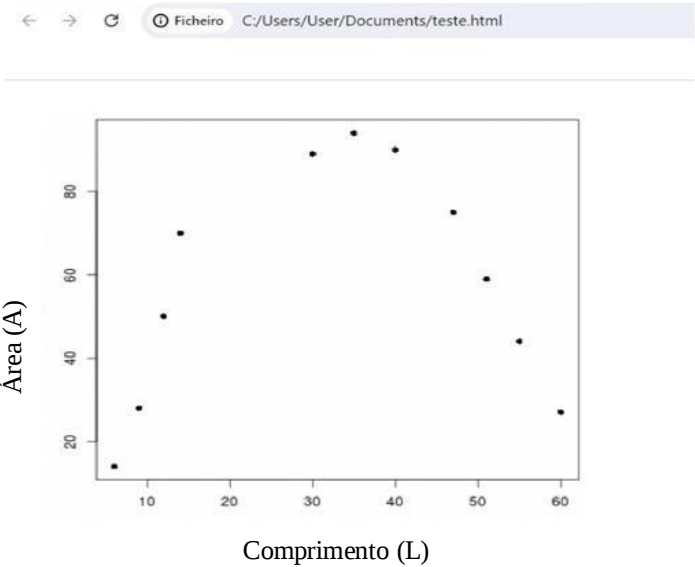
R execution commands
options("repos"="https://cran.r-project.org/")
tryCatch(find.package("sf"), error = function(e)
install.packages("sf", dependencies=TRUE))
library("sf")
tryCatch(find.package("raster"), error = function(e)
install.packages("raster", dependencies=TRUE))
library("raster")
Layer <- st_read("C:/Users/User/Desktop/APPIA/PC\NR/shapa/
augezAnalisados.shp", quiet = TRUE, stringsAsFactors = FALSE)
X <- "td"
RPLOTS <- "C:/Users/User/Documents/teste.html"
png("C:/Users/User/Documents/teste.png")
boxplot(Layer[[X]])
dev.off()

R execution console output
[1] "C:/Users/User/AppData/Local/R/win-library/4.3/sf"
Linking to GEOS 3.11.2, GDAL 3.8.2, PROJ 9.3.1; sf_use_s2() is TRUE
[1] "C:/Users/User/AppData/Local/R/win-library/4.3/raster"
Carregando pacotes exigidos: sp
null device
1
Execution completed in 3.25 segundos
Resultados:
{ 'RPLOTS' : 'C:/Users/User/Documents/teste.html' }

Carregando camada resultante
Algoritmo 'boxplot' finalizado
Saída HTML foi gerada por este algoritmo.
Abra o diálogo de resultados para verificá-lo.
```

Fonte: – O autor (2024)

Figura 19 – Exemplo de Análise quadrática gerado em formato .html



Fonte: O autor (2024)

5.4 Descrição do Benchmark

Krishnamoorthy e D'lima (2014) definem o benchmark como um padrão de referência a ser alcançado, utilizado para orientar processos em direção a níveis ideais de desempenho. No contexto de sistemas de abastecimento de água, sua aplicação foi focada em identificar os valores ideais de pressão, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 18280.

O benchmark foi utilizado para analisar e ajustar a pressão em pontos críticos da rede de abastecimento, por meio de simulações realizadas no QGISRed. A NBR 12.218-2017 fornece diretrizes detalhadas sobre a pressão nas tubulações distribuidoras, especificando uma pressão dinâmica mínima de 10 m.c.a (100 kPa), que corresponde à pressão necessária para que o fluido atinja uma velocidade de escoamento capaz de atender à demanda nas condições de pico de consumo. Já a pressão estática máxima, que corresponde à pressão do fluido em repouso no sistema, é limitada a 50 m.c.a (500 kPa), com o objetivo de assegurar que os componentes da rede, como tubulações e válvulas, operem de forma eficiente e mantenham o controle das perdas físicas.

Entretanto, a aplicação prática dessas diretrizes enfrenta obstáculos, como a falta de fiscalização adequada, limitações orçamentárias e resistência a mudanças operacionais.

A implementação eficaz do benchmark exige superar esses desafios para garantir que as redes de distribuição operem de acordo com os parâmetros ideais estabelecidos. Este estudo explora a utilização do benchmark na análise e otimização de variáveis hidráulicas em sistemas de abastecimento de água, utilizando ferramentas como o QGISRed. Por meio de simulações computacionais, o objetivo é entender as interações entre pressão, vazão, velocidade, diâmetro e rugosidade das tubulações, ajustando esses fatores para garantir eficiência, segurança e sustentabilidade no sistema.

A NBR 12.218-2017 é uma norma fundamental para o dimensionamento e a operação de sistemas de abastecimento de água, estabelecendo limites para parâmetros como pressão, vazão, velocidade de escoamento, diâmetro e rugosidade das tubulações.

A norma diz que a velocidade de escoamento deve variar entre 0,6 m/s e 2,0 m/s, e o diâmetro das tubulações deve ser dimensionado com base na vazão, perda de carga e custos operacionais. A rugosidade dos materiais também é um fator relevante nas perdas de carga, com materiais como PVC apresentando menor resistência ao escoamento quando comparados ao ferro fundido ou concreto.

O benchmark, aplicado ao contexto hidráulico, serve como uma ferramenta para avaliar e ajustar as variáveis críticas da rede, permitindo a otimização do desempenho.

No contexto da pesquisa, os dados de materiais e idade dos tubos foram gerados sinteticamente, uma vez que os dados reais da rede apresentavam falhas temporais significativas. Essas falhas, muitas vezes decorrentes de registros históricos incompletos, inconsistentes ou inexistentes, representam um desafio comum em sistemas de infraestrutura mais antigos, onde a documentação das características dos componentes não foi realizada de forma sistemática.

A geração sintética de dados permitiu contornar essas limitações, fornecendo uma base de informações plausível para análises e simulações. Esse processo envolve o uso de métodos computacionais, como algoritmos estatísticos e modelos probabilísticos, que criam dados artificiais representativos das condições reais do sistema. Por exemplo, para os materiais dos tubos, foram atribuídas probabilidades a diferentes tipos de materiais com base em padrões típicos de uso na época de instalação. Já a idade dos tubos foi modelada usando distribuições estatísticas que refletissem a vida útil esperada de cada material em condições operacionais semelhantes.

Embora esses dados sejam artificiais, eles seguem premissas realistas, sendo ajustados para refletir tanto as características conhecidas da rede quanto as condições ambientais e operacionais. Esse cuidado é essencial para garantir que as análises realizadas com base nesses dados mantenham a relevância e a confiabilidade científica. Entre as aplicações desses dados sintéticos estão a modelagem hidráulica, a análise de falhas e o planejamento de substituições ou intervenções na rede.

A utilização de dados sintéticos também possibilitou a avaliação de cenários hipotéticos, o que seria inviável com os dados originais devido às lacunas existentes. Esse tipo de abordagem fortalece a capacidade preditiva da pesquisa, permitindo explorar diferentes estratégias de gestão e manutenção da rede.

Ainda no contexto da pesquisa o benchmark foi utilizado para ajustar a pressão, vazão, e a velocidade de escoamento, escolher os diâmetros das tubulações e calcular a rugosidade dos materiais, sempre com o objetivo de garantir a conformidade com as normas e melhorar o desempenho do sistema

5.5 Descrição detalhada da área de estudo

As principais fontes de informações relativas ao município foram obtidas a partir dos trabalhos de Marcondes (2019) e Marcondes (2023). O município possui uma área de 409,2 Km², está inserido na Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, à 1200 metros do nível do mar, possuindo uma altimetria mínima de 859 m e máxima de 2055. (IBGE, 2022)

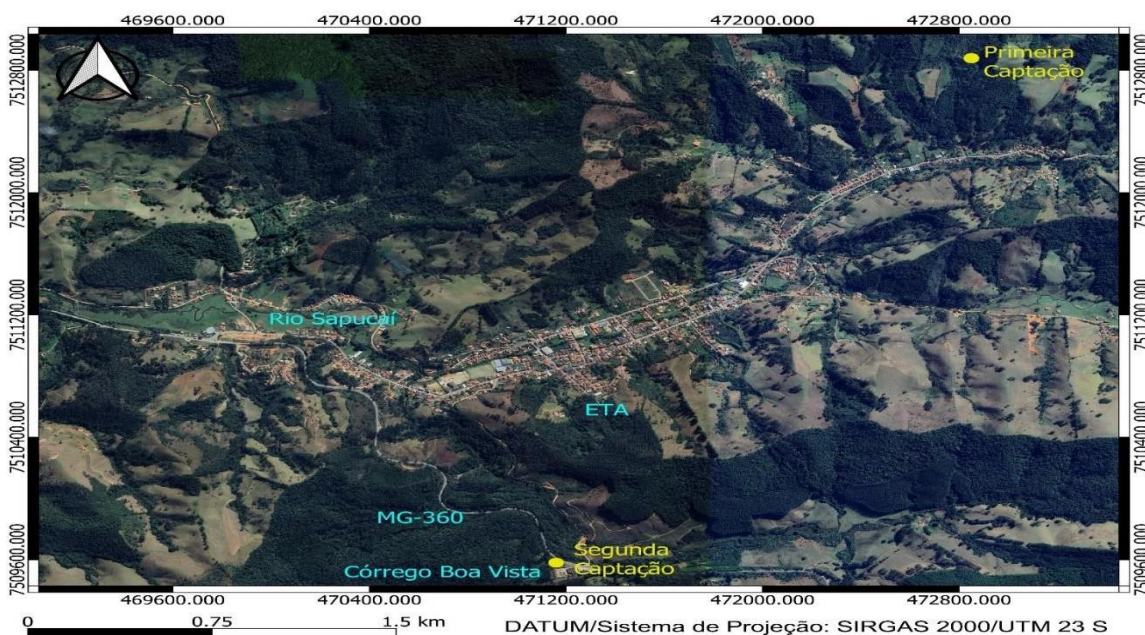
Foram realizadas visitas de campo no período de maio a setembro de 2022 para obtenção de informações relevantes do sistema realizando registros fotográficos e observação direta para a melhor descrição do sistema e caracterização das condições das captações, aduções, tratamento, reservatórios e rede de distribuição.

O setor de rede de distribuição em estudo se encontra em uma cidade localizada no sul de Minas Gerais, com 7.952 habitantes, em 2022, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022).

Conforme a Figura 20 a seguir, o primeiro ponto de captação analisado consiste em um corpo d'água, está inserido na bacia do Rio Grande, aproximadamente à 3,3 km da estação de tratamento.

O segundo ponto de captação entrou em funcionamento no ano de 2018, no córrego Boa Vista. Este está localizado às margens da rodovia estadual MG-360 como mostrado na Figura 19.

Figura 20 – Localização da área de estudo



Fonte: O autor (2024)

O mapa da área de análise da rede de distribuição de água apresenta uma visão abrangente da infraestrutura hídrica da região, destacando pontos essenciais como as estruturas de captação e a ETA. São identificadas duas captações principais: a Primeira Captação, localizada no canto nordeste do mapa, e a Segunda Captação, posicionada ao sul, nas proximidades do Córrego Boa Vista. Ambas desempenham a função de retirar água diretamente de fontes naturais para o tratamento posterior.

A Primeira Captação encontra-se em uma região mais afastada da área urbana, exigindo um sistema de tubulações mais extenso para transportar a água até a rede. Em contrapartida, a Segunda Captação está situada em uma área de fácil acesso, próxima à rodovia MG-360, o que simplifica tanto a logística de transporte quanto as operações de manutenção. A ETA, localizada estrategicamente no centro da área de estudo, favorece a eficiência no tratamento da água e sua posterior distribuição, reduzindo perdas de pressão e aumentando a confiabilidade do sistema.

O Rio Sapucaí, que atravessa a região urbana, pode ser usado como uma fonte secundária de abastecimento, dependendo das condições locais, além de atuar como elemento-chave para drenagem.

A geografia montanhosa da região, particularmente nas áreas de captação, representa desafios significativos para o transporte de água, exigindo o uso de sistemas de bombeamento para garantir pressão suficiente na rede de distribuição. Apesar disso, o posicionamento central da ETA e a distribuição estratégica das captações indicam um planejamento eficaz, assegurando a continuidade do abastecimento mesmo em situações adversas, como períodos de estiagem. Contudo, a distância maior da Primeira Captação pode resultar em custos adicionais relacionados ao bombeamento e à manutenção da infraestrutura.

O mapa oferece uma visão clara e estratégica do sistema hídrico, destacando a importância de cada ponto de captação e da ETA na manutenção do abastecimento urbano. O segundo ponto de captação entrou em funcionamento no ano de 2018, no córrego Boa Vista localizado às margens da rodovia estadual MG-360, como mostrado na Figura 11. Situa-se na Bacia do Rio Grande nas coordenadas Latitude: 22°31'11.62'' Sul e Longitude: 45°16'51.03'' Oeste, contendo área de drenagem de 15,2 Km² e vazão Q_{7,10} de 104,88 litros por segundo com base no relatório técnico de captação em corpo de água disponível no Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM, 2018).

A rede conta com quatro reservatórios que desempenham um papel essencial no abastecimento de água. Um desses reservatórios é de nível fixo e possui capacidade para armazenar 720 m³ de água tratada, sendo o maior em volume. Os outros três, de nível variável, têm capacidade individual de 47 m³. Esses dados são respaldados pelos trabalhos de Marcondes (2019) e Marcondes (2023).

5.6 Resultado da aplicação da metodologia

5.6.1 Representação e simulação do sistema de abastecimento e parâmetros hidráulicos do local de estudo com o plugin QGISRed

Nesta etapa, foi realizada a representação detalhada do sistema de abastecimento de água do local de estudo, utilizando o QGISRed, um plugin do QGIS voltado para modelagem e simulação de redes de distribuição de água. O QGISRed permite a integração de dados espaciais e hidráulicos, o que facilita a criação e análise de modelos precisos de sistemas de abastecimento de água.

Durante a implementação, surgiram alguns "bugs" que demandaram tempo para resolução. Um exemplo específico envolveu problemas com o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) do Brasil, o SIRGAS 2000 em graus decimais, que causava o desaparecimento dos elementos da rede no mapa.

Para resolver isso, foi necessário identificar um SRC adequado para a região do Sul de Minas Gerais. Após várias tentativas, encontrou-se que o SRC SIRGAS 2000 UTM Zone 23 S funcionava corretamente.

Outro desafio foi a incapacidade do plugin de ler automaticamente as altitudes dos elementos da rede a partir do MDE usando a função "Interpolate elevation from .asc files".

Após contato com os desenvolvedores do plugin, foi identificado um bug que foi corrigido na versão 0.16, lançada em 14 de julho de 2022.

Inicialmente, foi feita a coleta de dados georreferenciados da rede de distribuição de água, como localização de nós, tubulações e reservatórios. Esses dados foram importados para o QGIS, onde foram processados e integrados com as camadas temáticas de elevação, uso do solo e infraestrutura existente.

Além disso, foram utilizadas bases de dados fornecidas pelas concessionárias de água locais, contendo informações detalhadas sobre as características das tubulações (material, diâmetro, idade), nós (altimetria, demanda) e reservatórios (capacidade, níveis). Com a base georreferenciada importada, iniciou-se a configuração do modelo hidráulico no QGISRed.

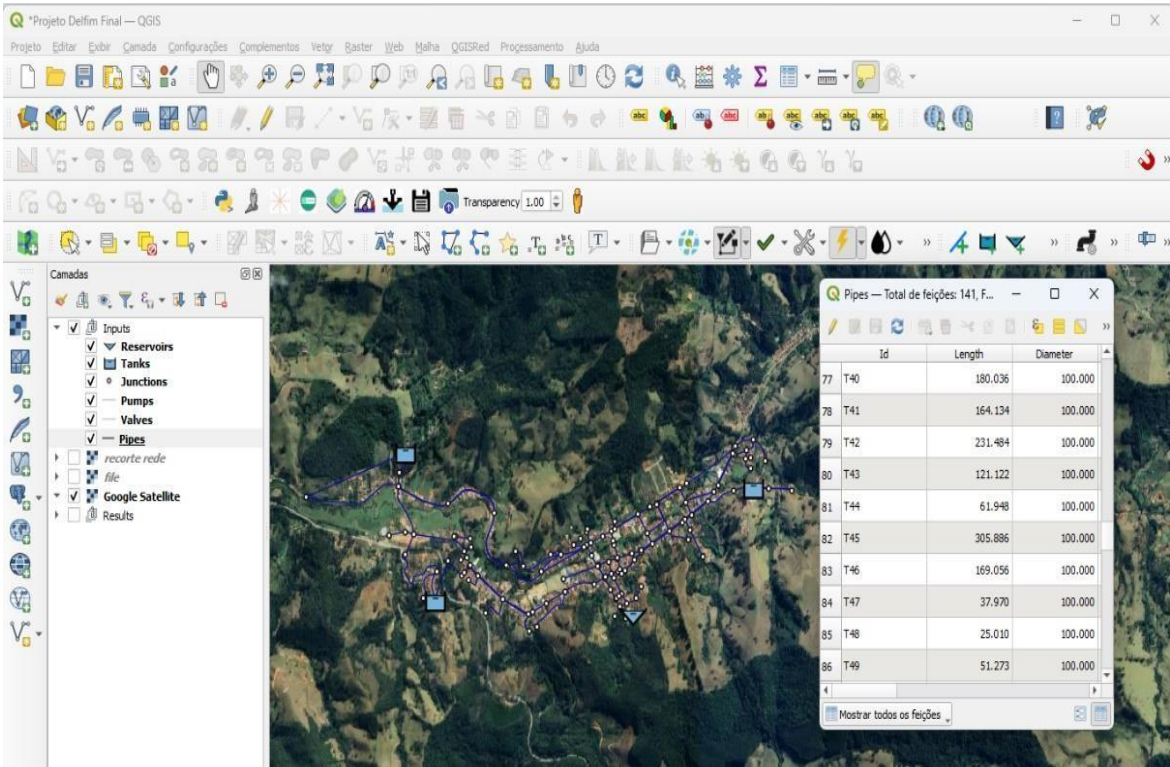
Esse processo envolveu a definição das propriedades hidráulicas dos elementos da rede, como rugosidade, condições dos tubos e padrões de demanda nos nós. A ferramenta de simulação do QGISRed permite associar as características de cada elemento diretamente às camadas espaciais, garantindo que as análises considerem tanto os aspectos geográficos quanto hidráulicos do sistema.

Foram atribuídas demandas aos nós com base em categorias específicas. Essas demandas foram multiplicadas pelos padrões de consumo definidos para diferentes períodos, permitindo uma simulação dinâmica e adaptada às variações de consumo ao longo do tempo. A integração dessas informações foi feita utilizando a ferramenta de geoprocessamento de união vetorial do QGIS, que possibilita a vinculação direta das tabelas de demanda com as propriedades dos nós.

Após a configuração do modelo, o QGISRed foi utilizado para realizar as simulações hidráulicas do sistema de distribuição de água.

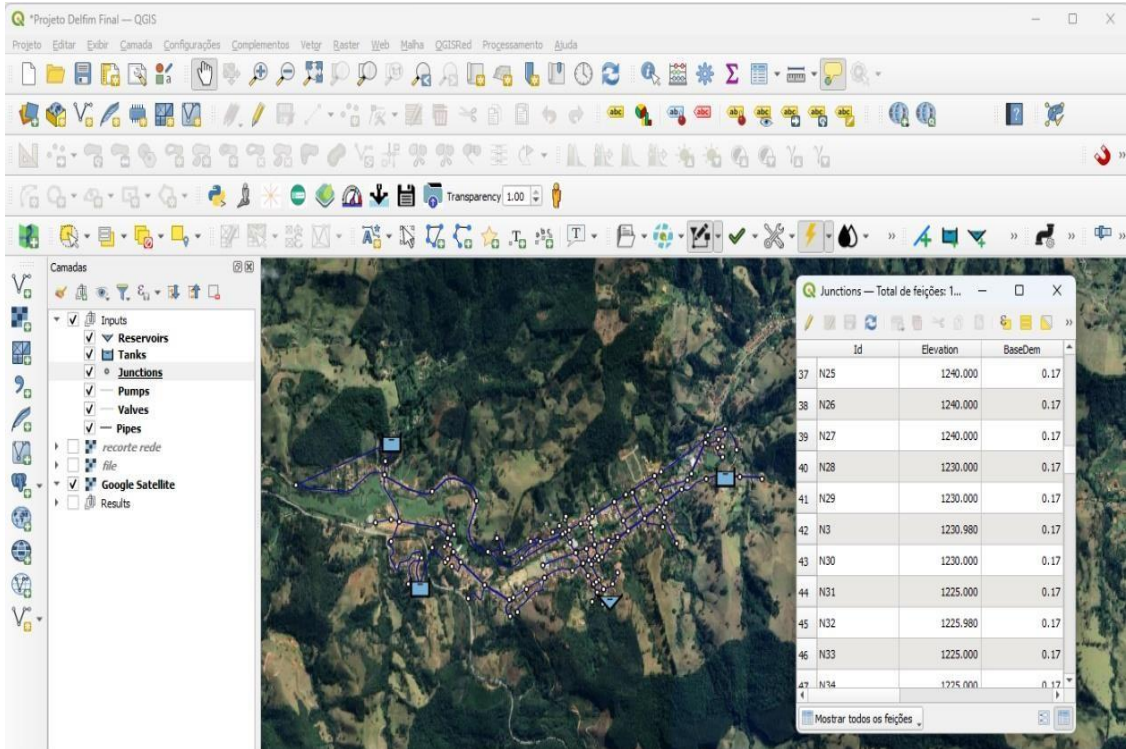
As simulações permitiram analisar parâmetros essenciais, como pressões, vazões, velocidade nos tubos e níveis dos reservatórios, proporcionando uma visão abrangente do comportamento do sistema sob diferentes cenários operacionais. Para isso, foram criados diversos cenários, explorando variações nas condições de operação, como alterações nas demandas, mudanças na rugosidade dos tubos e simulação de vazamentos. As Figuras 21 e 22 a seguir mostram a representação do sistema de abastecimento no plugin.

Figura 21 – Informações inseridas na tabela de atributos da camada tubos para a modelagem da rede no QGISRed



Fonte: – O autor (2024)

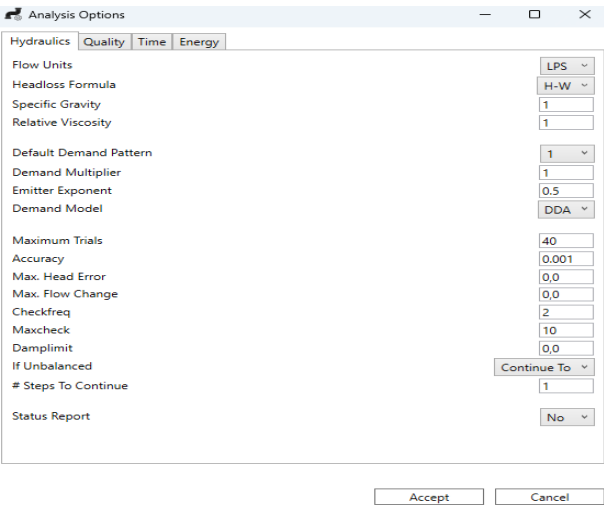
Figura 22 – Informações inseridas na tabela de atributos da camada nós para a modelagem da rede no QGISRed



Fonte: O autor (2024)

Assim como o Epanet, o QGISRed utiliza métodos reconhecidos, como Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning, para o cálculo de perda de carga. Neste estudo, a escolha foi o método Hazen-Williams, alinhando-se às características específicas do sistema e aos objetivos da pesquisa, conforme ilustra a Figura 23.

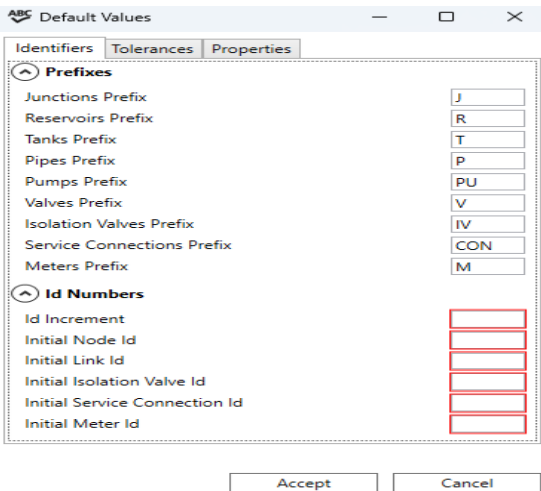
Figura 23 – Opções de análise de propriedades do projeto



Fonte: O autor (2024)

Durante a construção do modelo, detalhes cruciais da rede foram incorporados manualmente, garantindo uma representação precisa. Informações como altimetria dos nós, diâmetro dos tubos, rugosidade, consumo base e comprimento dos tubos foram inseridas na tabela de atributos, estabelecendo uma base sólida para simulações subsequentes conforme as Figuras a seguir 24 e 25 e 26. E por fim na Figura 27 mostra o resultado da simulação hidráulica no plugin com a geração do arquivo RPT.

Figura 24 – Opções de análise de propriedades do projeto



Fonte: O autor (2024)

Figura 25 – Opções de análise de propriedades do projeto

The screenshot shows the 'Default Values' dialog box with the 'Properties' tab selected. The 'Spatial' section is expanded, showing three parameters with their default values in SI units:

Parameter	Value
Node Tolerance	0.01
Min Length for splitting Pipe	1
Max Length for splitting Pipe	3

At the bottom of the dialog are 'Accept' and 'Cancel' buttons.

Fonte: O autor (2024)

Figura 26 – Opções de análise de propriedades do projeto

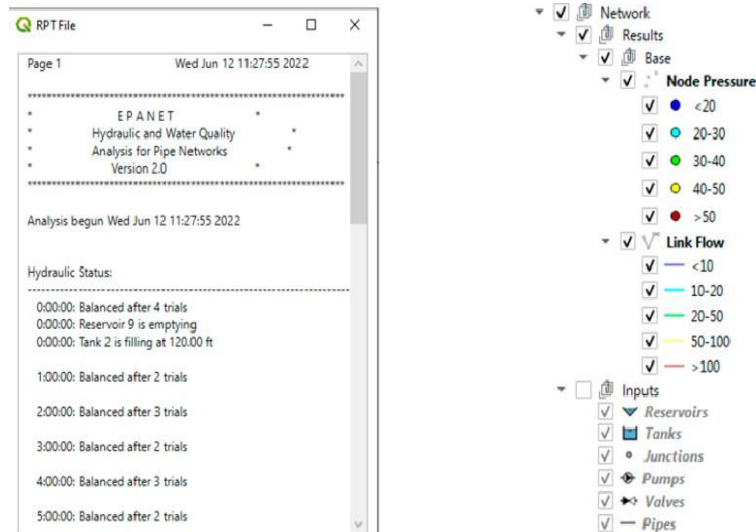
The screenshot shows the 'Default Values' dialog box with the 'Properties' tab selected. The 'Elements' section is expanded, showing a list of parameters with their default values in SI units. The 'Headloss Formula' is set to 'H-W'.

Parameter	Value
Roughness	120
Junction Elevation	0
Reservoir Elevation	50
Tank Elevation	50
Tank Max Level	4
Tank Diameter	20
Pipe Length	100
Pipe Diameter	200
Pipe Min Diameter	5
Pipe Max Diameter	5000
Pump Nominal Power	50
Valve Diameter	200
Service Connection Diameter	25
Service Connection Length	5

At the bottom of the dialog are 'Accept' and 'Cancel' buttons.

Fonte: O autor (2024)

Figura 27 – Janela de resultados de simulação do plugin



Fonte: O autor (2024)

No cálculo do consumo diário (C_d) e vazão em cada nó ($Q_{nó}$) envolve a análise estatística dos dados de consumo, pressão e demanda em cada nó da rede de distribuição. O objetivo é entender o comportamento dessas variáveis ao longo do sistema e detectar possíveis anomalias ou padrões relevantes para a eficiência do abastecimento e controle de perdas.

Para o estudo do município em questão utilizando a metodologia de Scherer et al. (2021), foi feito um levantamento junto a prefeitura, ao qual foram verificadas a existência de 600 economias no município. Dessa forma, cada nó é composto de um agrupamento.

$$C_d = \frac{n^{\circ} \text{ economias} \times \text{média moradores por residência} \times Q_{hab}}{86400} = 2,91 \text{ l/s} \quad (1)$$

Onde:

- **nº de economias:** Número total de unidades habitacionais
- **moradores por residência:** Média de moradores por residência (dados obtidos através do censo ou estatísticas locais). 4 moradores
- **Q_{hab}:** Consumo médio diário por habitante (geralmente em litros/dia). 105 l/dia
- **86400:** Fator de conversão para transformar segundos em dias.

$$K1 = \frac{\text{maior vazão diária registrada em um dia (m}^3\text{)}}{\text{Vazão média do sistema (m}^3\text{)}} = 1,11 \quad (2)$$

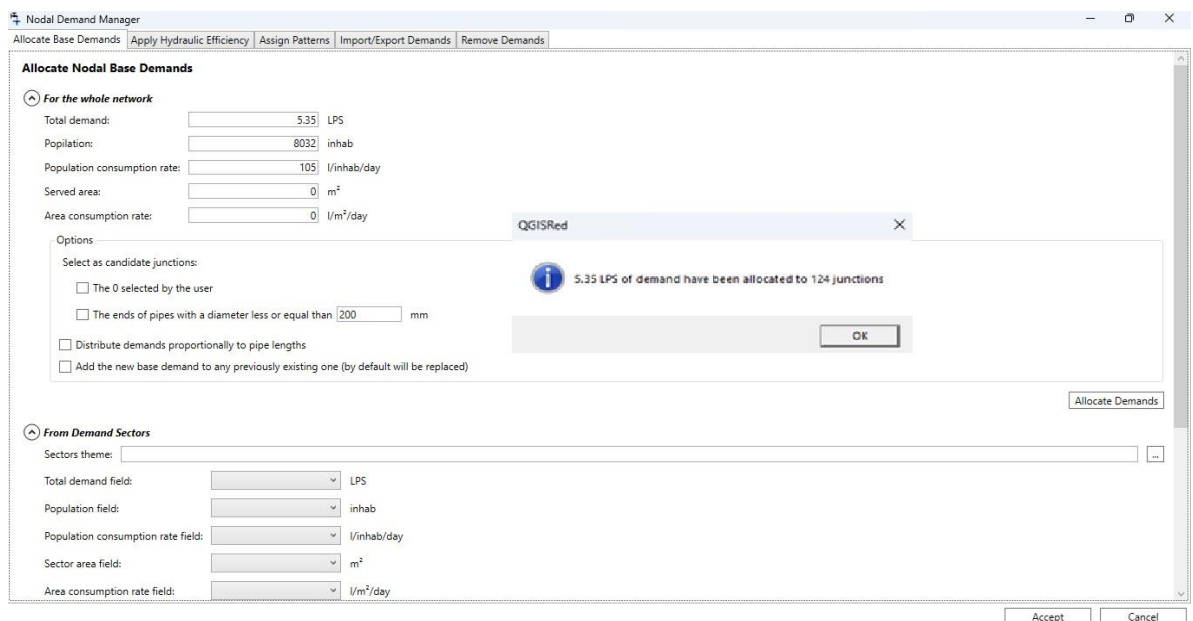
$$Q_{med} (\text{horária}) = \frac{\text{maior vazão registrada em um dia (m}^3\text{)}}{24} = 33,33 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K2 = \frac{\text{maior consumo horário}}{Q_{med} (\text{horária})} = 1,23 \quad (3)$$

$$Q_{nó} = \frac{Cd}{n^{\circ} \text{ de nós da rede de abastecimento}} \times K1 \times K2 = 1,02 \text{ l/s} \quad (4)$$

Como a rede de abastecimento de água foi realizada com o agrupamento de nós, contendo ao todo 114 nós. Em média cada nó é um agrupamento de 5,26 economias, portanto foram inseridos em cada nó da rede a vazão em média de 5,35 l/s conforme a Figura 28.

Figura 28 – Inserção da demanda nos nós através do gerenciador de demanda

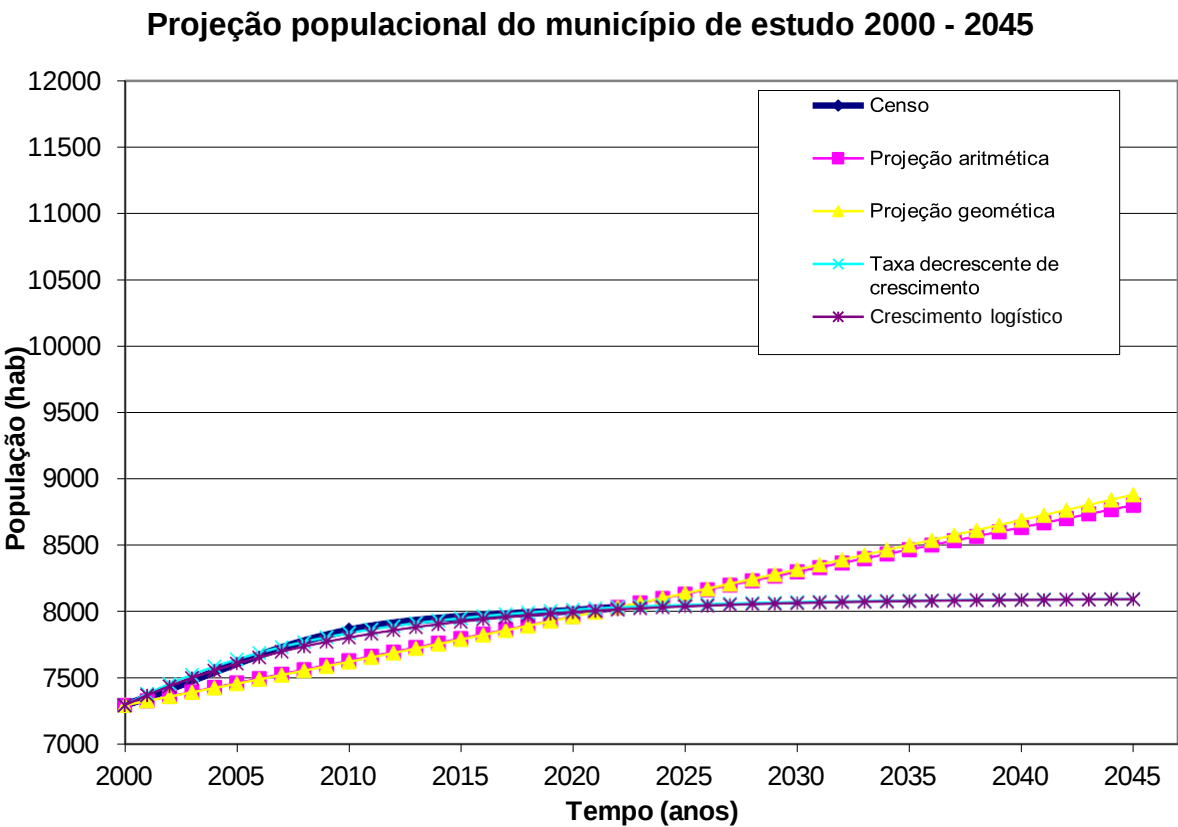


Fonte: O autor (2024)

5.6.2 **Projeção de população futura**

A Figura 29 a seguir ilustra as projeções de crescimento populacional do município de Delfim Moreira, no Sul de Minas Gerais, para o período de 2023 a 2043, com base em diferentes modelos de projeção. As tendências populacionais são mostradas a partir de 2000, considerando dados históricos do censo, e utilizam diferentes abordagens matemáticas para prever o crescimento futuro da população até 2043. O gráfico foi elaborado a partir dos dados do censo, que são representados pela linha azul. Com base nesses dados históricos, foram aplicados quatro diferentes métodos de projeção para estimar a evolução populacional do município.

Figura 29 – Gráfico de projeção populacional para o município em Estudo



Fonte: O autor (2024)

A linha azul do censo representa os dados populacionais reais obtido pelo censo realizado em 2022. Nesse período, o gráfico mostra um aumento gradual e constante da população, que começou com cerca de 7.300 habitantes em 2000 e atingiu aproximadamente 8.000 habitantes em 2023.

Esse crescimento histórico, ainda que moderado, serve como uma base de referência para os cenários projetados a partir de 2023, fornecendo uma visão clara sobre o comportamento populacional no passado e no futuro.

A Projeção Aritmética (linha em rosa): Utiliza um crescimento linear da população, onde se assume que o incremento populacional em cada período é constante. Essa projeção considera que o crescimento populacional ocorre de forma uniforme ao longo do tempo.

A projeção aritmética prevê um crescimento populacional linear, com a população aumentando de forma constante ao longo do tempo. De acordo com esse modelo, a população do município ultrapassaria 10.000 habitantes até 2065.

Essa projeção assume que o município continuará crescendo a uma taxa constante, adicionando um número fixo de habitantes a cada ano. Esse tipo de projeção é útil em cenários onde o crescimento populacional é impulsionado por fatores consistentes, como uma taxa de natalidade estável, imigração controlada e poucas variações nas condições econômicas e sociais

A Projeção Geométrica (linha em amarelo): Baseia-se em uma taxa de crescimento constante, onde a população aumenta a uma taxa proporcional ao seu tamanho. Isso resulta em um crescimento exponencial, que pode ser observado pela curva ascendente que cresce de forma mais acelerada ao longo do tempo. A projeção geométrica, por outro lado, apresenta uma visão mais acelerada do crescimento populacional. Esse modelo considera que a população cresce a uma taxa proporcional ao seu tamanho atual, resultando em um crescimento exponencial. Com essa abordagem, a população do município ultrapassaria os 10.000 habitantes até 2065, crescendo a um ritmo mais acelerado do que na projeção aritmética.

O crescimento geométrico reflete cenários onde o município experimenta um rápido desenvolvimento econômico, migração em massa ou políticas urbanas favoráveis à expansão populacional. Esse modelo é particularmente relevante em regiões que passam por fases de rápido crescimento, como áreas urbanas com forte atração de migrantes ou regiões que recebem investimentos significativos em infraestrutura e desenvolvimento econômico.

A Taxa Decrescente de Crescimento (linha em ciano): Nesse modelo, a taxa de crescimento da população diminui ao longo do tempo, refletindo a tendência de estabilização populacional. Esse modelo é comum em regiões onde a natalidade ou a imigração diminui gradualmente, resultando em um crescimento mais moderado em longo prazo. A projeção com taxa decrescente de crescimento apresenta um cenário mais conservador, no qual o ritmo de crescimento da população diminui gradualmente ao longo do tempo.

A projeção de crescimento logístico, representada pela linha em ciano, prevê que a população se estabilize em torno de 8.100 habitantes até 2065. O método assume que o município, ao longo do tempo, enfrenta fatores que restringem seu crescimento, como saturação de infraestrutura, limitações econômicas ou políticas de controle populacional. Esse modelo é comumente observado em áreas onde a taxa de natalidade diminui à medida que a população envelhece ou em municípios onde a migração é controlada e os recursos são limitados, o que impede um crescimento contínuo.

A projeção do Crescimento Logístico (linha em roxo): Este modelo reflete uma projeção onde o crescimento populacional segue uma curva em formato de "S". Inicialmente, o crescimento é acelerado, mas com o tempo se estabiliza à medida que a população atinge um limite máximo imposto por fatores como recursos limitados e infraestrutura local. Esse é um modelo comum quando se considera que o crescimento populacional atinge uma capacidade de suporte ambiental ou econômica.

A projeção de crescimento logístico, representada pela linha roxa, prevê que a população se estabilize em torno de 8.100 habitantes até 2065. Esse modelo assume que há um "limite de carga" ou um ponto de saturação populacional, além do qual o crescimento adicional é dificultado por fatores limitantes, como recursos naturais, espaço físico, infraestrutura urbana ou capacidade econômica. O crescimento logístico reflete um cenário de estabilização, onde o crescimento populacional começa a desacelerar à medida que o município atinge seu potencial máximo de desenvolvimento. Esse modelo é útil para regiões que já estão bem desenvolvidas ou que enfrentam restrições de espaço e recursos, e ele permite planejar o futuro de maneira a manter a sustentabilidade dos recursos existentes.

Essas diferentes projeções populacionais têm implicações diretas no planejamento de infraestrutura, especialmente no setor de abastecimento de água e saneamento. O crescimento acelerado, como indicado pela projeção geométrica, exigiria uma expansão significativa da infraestrutura existente para atender a uma população crescente. Isso inclui a construção de novos sistemas de abastecimento de água, redes de saneamento, além de garantir que a capacidade dos reservatórios e sistemas de captação seja suficiente para atender à demanda futura. Por outro lado, projeções mais conservadoras, como a de crescimento logístico ou a de taxa decrescente de crescimento, indicam que o foco deve ser em manter e otimizar a infraestrutura atual, com expansões pontuais para atender a um crescimento populacional mais modesto.

Se a projeção aritmética ou geométrica se provar mais precisa, as autoridades municipais precisarão preparar-se para um aumento substancial na demanda por serviços básicos, como habitação, energia, transporte e, claro, água e saneamento. O aumento populacional exigirá investimentos contínuos em redes de distribuição de água, estações de tratamento e sistemas de esgoto, além de estratégias para gerenciar o consumo de água e minimizar perdas no sistema. Além disso, esses cenários de crescimento acelerado também podem trazer desafios ambientais, como a pressão sobre os recursos hídricos disponíveis e o aumento da poluição gerada pelo esgoto doméstico.

Cenários de crescimento mais lento ou estabilizado, como os sugeridos pela projeção de crescimento logístico ou a de taxa decrescente de crescimento, permitem um planejamento mais conservador. Nesse caso, o município poderia concentrar seus esforços em manter a infraestrutura existente e garantir que ela continue funcionando de forma eficiente. Isso pode incluir medidas como a modernização de sistemas antigos, a implementação de tecnologias de gestão de água mais eficientes e o foco em programas de sustentabilidade para garantir que a população existente e futura tenha acesso adequado aos serviços essenciais, sem sobrecarregar os recursos naturais.

Essas projeções populacionais também oferecem uma base para o planejamento a longo prazo de políticas públicas. O conhecimento das tendências de crescimento ajuda os gestores a alocarem recursos de forma eficiente, priorizar investimentos em áreas que enfrentarão maior pressão populacional e garantir que a infraestrutura urbana se desenvolva de forma sustentável. No contexto de planejamento hidráulico, a escolha entre investir em grandes expansões de infraestrutura ou em estratégias de gestão e otimização dos recursos existentes depende diretamente de qual projeção populacional é considerada mais provável para o futuro do município.

O gráfico de projeção populacional de 2000 a 2045 oferece uma visão clara de cinco cenários distintos, que variam desde o crescimento acelerado até uma estabilização populacional. Cada uma dessas projeções tem implicações significativas para o planejamento urbano e para a gestão de recursos, especialmente no setor de água e saneamento. Os cenários de crescimento mais rápido indicam a necessidade de expansão agressiva da infraestrutura, enquanto os cenários de crescimento mais lento sugerem que o foco deva ser em manter e melhorar a eficiência dos sistemas existentes.

A escolha do modelo mais adequado para prever o crescimento populacional depende de vários fatores, como as políticas públicas, a infraestrutura, e a economia local.

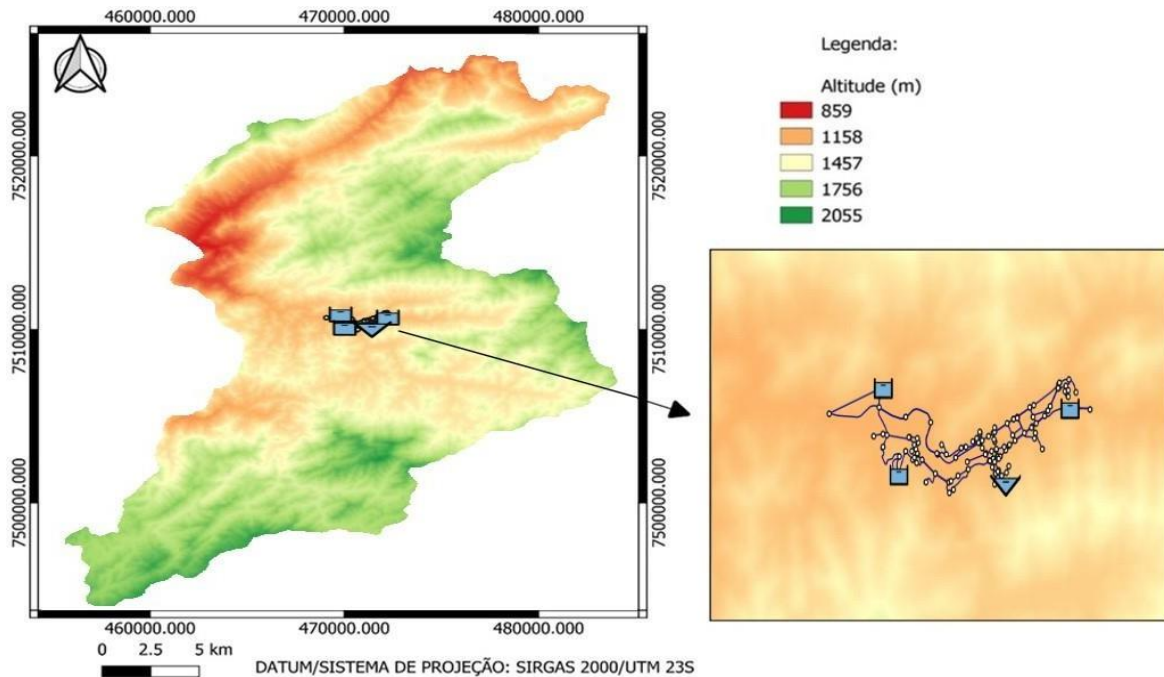
O crescimento geométrico pode ser irrealista em áreas onde há limitações estruturais, enquanto o modelo logístico oferece uma abordagem mais cautelosa ao considerar a capacidade de suporte da região. Para um município pequeno como Delfim Moreira, o modelo logístico ou de taxa decrescente de crescimento pode oferecer previsões mais próximas da realidade, caso as condições atuais de crescimento populacional permaneçam inalteradas. Caso haja um incentivo significativo para o crescimento, como novos investimentos ou melhorias em infraestrutura, o crescimento aritmético ou geométrico pode se tornar mais relevante.

A Figura 29 de projeção populacional do município entre os anos de 2000 e 2045 apresenta diferentes cenários de crescimento, oferecendo uma visão abrangente sobre como a população pode evoluir ao longo das próximas duas décadas. Esses cenários são baseados em diferentes métodos de projeção, que variam de modelos simples, como a projeção aritmética, até modelos mais complexos, como o crescimento logístico e o de taxa decrescente de crescimento. Cada um desses modelos apresenta implicações diretas para o planejamento urbano, infraestrutura e, especialmente, para o setor de abastecimento de água e saneamento.

5.6.3 Mapas hipsométrico e topográfico da área de estudo, mapas (Cenários Real, Otimizado 1 e Otimizado 2) e Análise estatística de valores de pressão com o Processing R Provider

O estudo teve início com o recebimento dos arquivos contendo dados simulados e calibrados no Epanet referentes ao trabalho de Marcondes (2022) para uso posterior nas simulações. O sistema de abastecimento a ser estudado está localizado na área urbana como é verificado na Figura 30.

Figura 30 – Mapa hipsométrico da área de estudo



Fonte: O autor (2024)

O desenvolvimento do modelo georreferenciado no QGISRed foi essencial nesta pesquisa, fornecendo uma base sólida para análises detalhadas do sistema de distribuição de água avaliado. Seguindo as diretrizes do IIAMA UPV (2023), optou-se pela utilização da versão gratuita do QGISRed, em conformidade com os objetivos do estudo e visando a melhor utilização dos recursos disponíveis. Assim como o software Epanet, o QGISRed emprega métodos consagrados, como Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning, para realizar os cálculos de perda de carga. Neste trabalho, o método Hazen-Williams foi escolhido, sendo mais adequado às características específicas do sistema analisado e aos propósitos do estudo (Martinez-Alzamora et al., 2022).

Além disso, o autor destaca que, na construção do modelo, elementos críticos da rede foram inseridos manualmente, assegurando uma representação fiel da infraestrutura. Informações como elevações dos nós, diâmetros das tubulações, coeficientes de rugosidade, demanda base e comprimentos das tubulações foram cuidadosamente adicionadas à tabela de atributos, formando a base para as simulações posteriores.

O mapa hipsométrico do sistema de abastecimento destaca as diferenças de altimetria na área de estudo, evidenciando como a topografia interfere no comportamento da pressão ao longo da rede. As cores do mapa variam de vermelho, representando as áreas de menor elevação, a verde escuro, que indica os pontos mais altos. Essa variação altimétrica exerce uma influência significativa na distribuição da pressão da água.

Nas regiões mais baixas, a gravidade naturalmente aumenta a pressão, podendo ser necessário instalar válvulas reguladoras para evitar sobrepressões, que podem causar danos às tubulações, como vazamentos e desgaste. Por outro lado, nas áreas mais elevadas, onde a pressão é naturalmente mais baixa, é essencial instalar bombas de reforço para garantir que a água atinja esses locais com a pressão adequada.

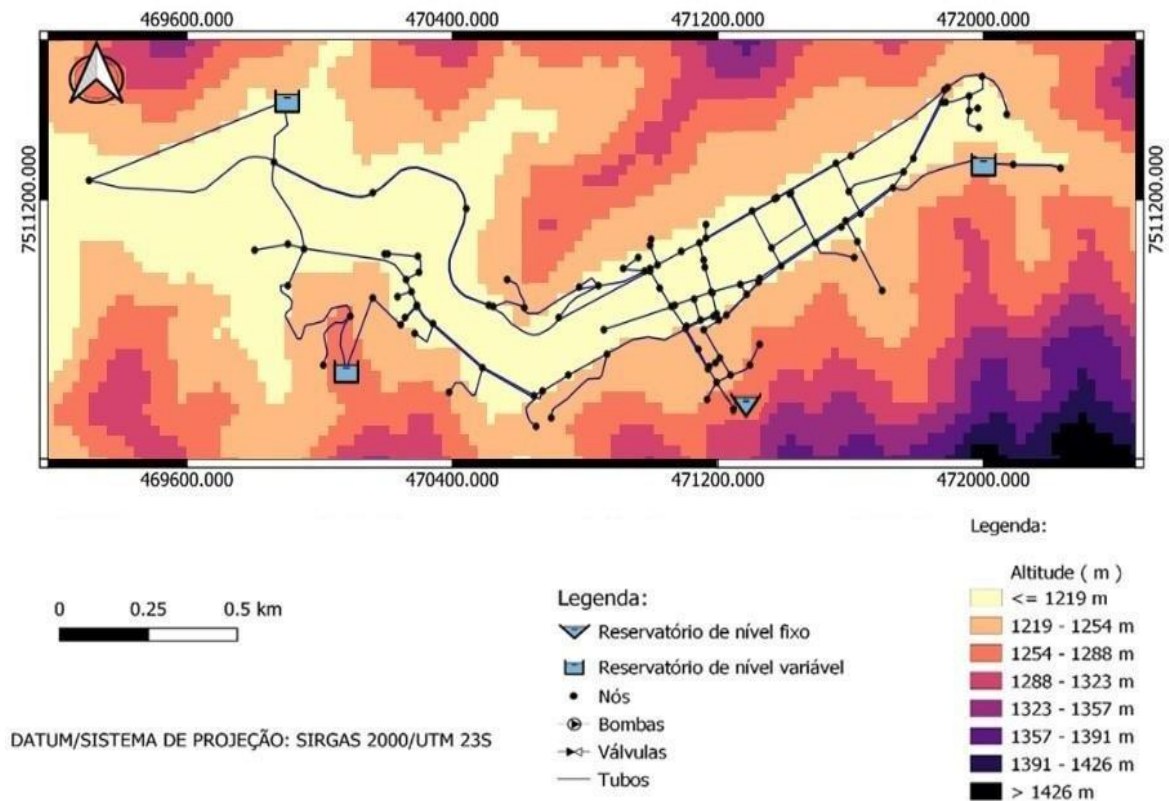
O mapa também ilustra a distribuição da rede de tubulações e a localização dos reservatórios, que desempenham um papel crucial no controle da pressão. Reservatórios localizados em áreas altas podem auxiliar no abastecimento de regiões mais baixas, utilizando a gravidade para uma distribuição eficiente da água. Contudo, assegurar que as áreas mais elevadas sejam abastecidas adequadamente requer o posicionamento estratégico de bombas.

A topografia montanhosa do local apresenta desafios para o dimensionamento da rede, a seleção de materiais e a definição de pontos de bombeamento. As regiões mais altas, representadas em verde, demandam um planejamento criterioso para evitar problemas de pressão insuficiente que possam comprometer o abastecimento.

A análise do mapa reforça a necessidade de realizar ajustes na rede para maximizar seu desempenho. Nas áreas de maior altimetria, torna-se indispensável instalar bombas de alta capacidade e revisar os diâmetros das tubulações para compensar a perda de pressão. Já nas regiões mais baixas, identificadas em tons de vermelho e amarelo, válvulas redutoras de pressão podem ser necessárias para evitar pressões excessivas. Além disso, a variação de altimetria impacta diretamente o consumo energético do sistema, uma vez que áreas de menor elevação demandam menos energia para o transporte de água devido à ação gravitacional, enquanto as regiões mais altas requerem maior gasto de energia para o bombeamento.

O mapa topográfico, apresentado na Figura 31, é uma ferramenta indispensável para o planejamento e otimização do sistema de abastecimento de água, permitindo a identificação de áreas críticas que demandam intervenções específicas.

Figura 31 – Mapa topográfico da área de estudo



Fonte: O autor (2024)

A Figura 31 ilustra a rede de abastecimento de água de uma área montanhosa, com altimetrias variando de 1219 metros a mais de 1426 metros, conforme indicado pela legenda de cores. A rede de distribuição de água é composta por nós, tubulações, bombas, válvulas e reservatórios, todos dispostos de forma estratégica para garantir que o sistema opere de forma eficiente, apesar dos desafios impostos pela topografia variada. As diferentes faixas de altimetria representadas por uma escala de cores que vai do amarelo (zonas de baixa elevação) ao roxo e preto (zonas de alta elevação), influenciam diretamente o comportamento da pressão ao longo da rede.

As áreas mais baixas, em amarelo, tendem a ter uma pressão naturalmente mais elevada devido à força da gravidade. No entanto, a alta pressão pode representar um problema para a rede, aumentando o risco de falhas nas tubulações, como vazamentos e desgaste prematuro dos materiais.

Para lidar com esse excesso de pressão, são utilizadas válvulas ao longo da rede, que têm o papel de regular o fluxo de água, garantindo que a pressão se mantenha dentro dos limites operacionais adequados.

Nas áreas mais elevadas, representadas por tons de roxo e preto, a pressão tende a ser menor, já que a água precisa ser bombeada para essas zonas. Isso exige o uso de bombas, posicionadas em locais estratégicos da rede, para garantir que a água alcance essas áreas com a pressão adequada. Essas bombas são essenciais para superar o desafio de transportar água para locais mais altos, onde a gravidade não favorece o fluxo.

O mapa também destaca a presença de reservatórios de nível fixo (triângulos invertidos) e reservatórios de nível variável (quadrados), que desempenham um papel fundamental no armazenamento de água e na regulação da distribuição. Reservatórios localizados em zonas elevadas são vantajosos, pois permitem a utilização da gravidade para distribuir água para áreas mais baixas, economizando energia e minimizando a necessidade de bombeamento constante. No entanto, reservatórios em áreas mais baixas podem requerer o uso adicional de bombas para transportar a água para zonas mais altas, o que pode aumentar os custos operacionais.

Outro aspecto importante é o gerenciamento da pressão em toda a rede. A variação de altimetria impõe a necessidade de um ajuste fino, onde bombas e válvulas trabalham em conjunto para garantir que a água chegue a todos os consumidores, independentemente da elevação.

As válvulas controlam a pressão nas áreas mais baixas, evitando sobrecargas, enquanto as bombas ajudam a garantir a pressão suficiente nas áreas mais altas. A combinação de elementos, como tubulações interligadas, nós, bombas e reservatórios, garante que o sistema seja eficiente, adaptando-se às diferentes necessidades de pressão impostas pela topografia da região.

O sistema de tubulações mostrado no mapa conecta todos os nós e reservatórios, formando uma rede interligada que permite o fluxo contínuo de água. A localização estratégica dos elementos da rede, como as bombas e as válvulas, garante que o sistema seja capaz de lidar com a variação de elevação.

A análise topográfica é crucial para o planejamento e a operação de um sistema de abastecimento de água em regiões montanhosas, pois permite a identificação de áreas críticas e o planejamento de soluções adequadas para garantir a eficiência do sistema.

O mapa topográfico revela uma rede de abastecimento de água que enfrenta desafios significativos devido à variação de altimetria na região. As áreas mais baixas podem sofrer com pressão excessiva, enquanto as áreas mais altas requerem o uso intensivo de bombas para manter a pressão. O uso de reservatórios, bombas e válvulas ajuda a mitigar esses desafios, permitindo um abastecimento eficiente em toda a área.

Um planejamento meticuloso e a gestão adequada da pressão são fundamentais para garantir que o sistema funcione de forma eficiente, atendendo às necessidades dos consumidores em diferentes elevações, ao mesmo tempo em que reduz os custos operacionais e o desgaste da infraestrutura.

A topografia desempenha um papel crucial nos desafios relacionados à manutenção e reparo da rede. Em terrenos montanhosos ou acidentados, o acesso a certas partes da infraestrutura pode ser dificultado. No entanto, um conhecimento detalhado das características topográficas permite desenvolver estratégias de manutenção mais eficazes, assegurando que problemas sejam resolvidos de maneira ágil e eficiente.

Conforme apontado por Bonilla et al. (2023), a elaboração de mapas topográficos é essencial para uma análise aprofundada da modelagem hidráulica e do funcionamento do sistema de abastecimento. Em áreas de relevo irregular, esses mapas evidenciam as variações altimétricas, permitindo a identificação estratégica de locais para a instalação de estações de bombeamento e possibilitando o aperfeiçoamento do traçado da rede de distribuição.

De acordo com Argaw et al. (2023), considerar as variações altimétricas no planejamento da rede facilita a tomada de decisões fundamentadas. A análise da topografia contribui para a instalação estratégica de estações de bombeamento, otimizando o consumo de energia para superar as elevações do terreno.

A otimização da rede, nesse contexto, reduz significativamente as perdas de carga, promovendo economia nos custos operacionais e assegurando uma distribuição eficiente de água (Reis et al., 2023; Tian et al., 2023; Vieira et al., 2020).

O estudo de caso realizado na Serra da Mantiqueira ilustra a superação de desafios impostos pelas condições topográficas. A integração entre o conhecimento detalhado da topografia e a análise hidráulica representa uma abordagem resiliente e eficaz na operação de redes de abastecimento (Shekofteh et al., 2023; Assad et al., 2022; Liu e Song, 2020; Shuang et al., 2019; Agathokleous et al., 2017; Herrera et al., 2016).

Nas Figuras 32 e 33 a seguir são representados os mapas das simulações da rede.

Figura 32 – Análise de pressão em cada nó (Cenário Real)

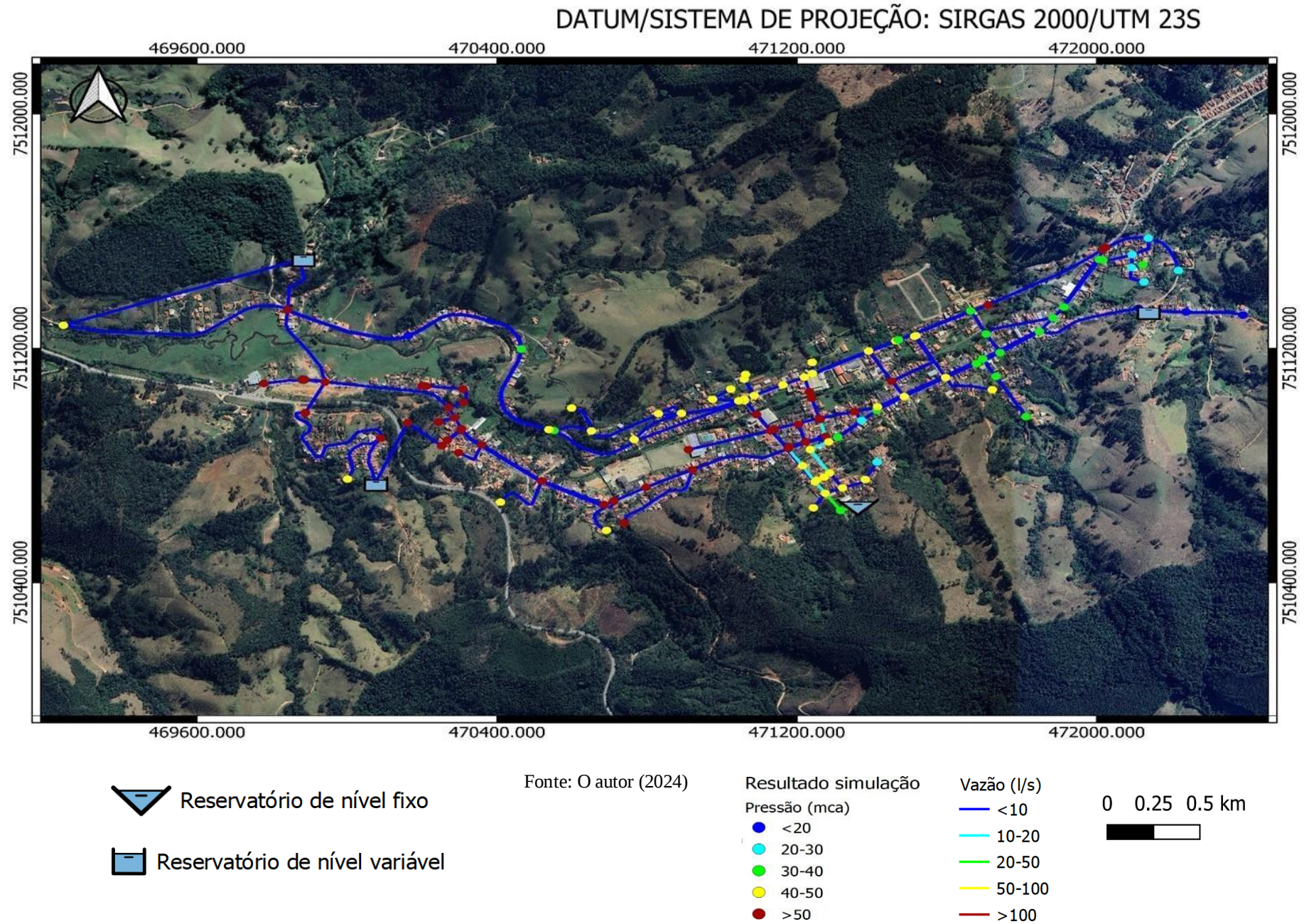
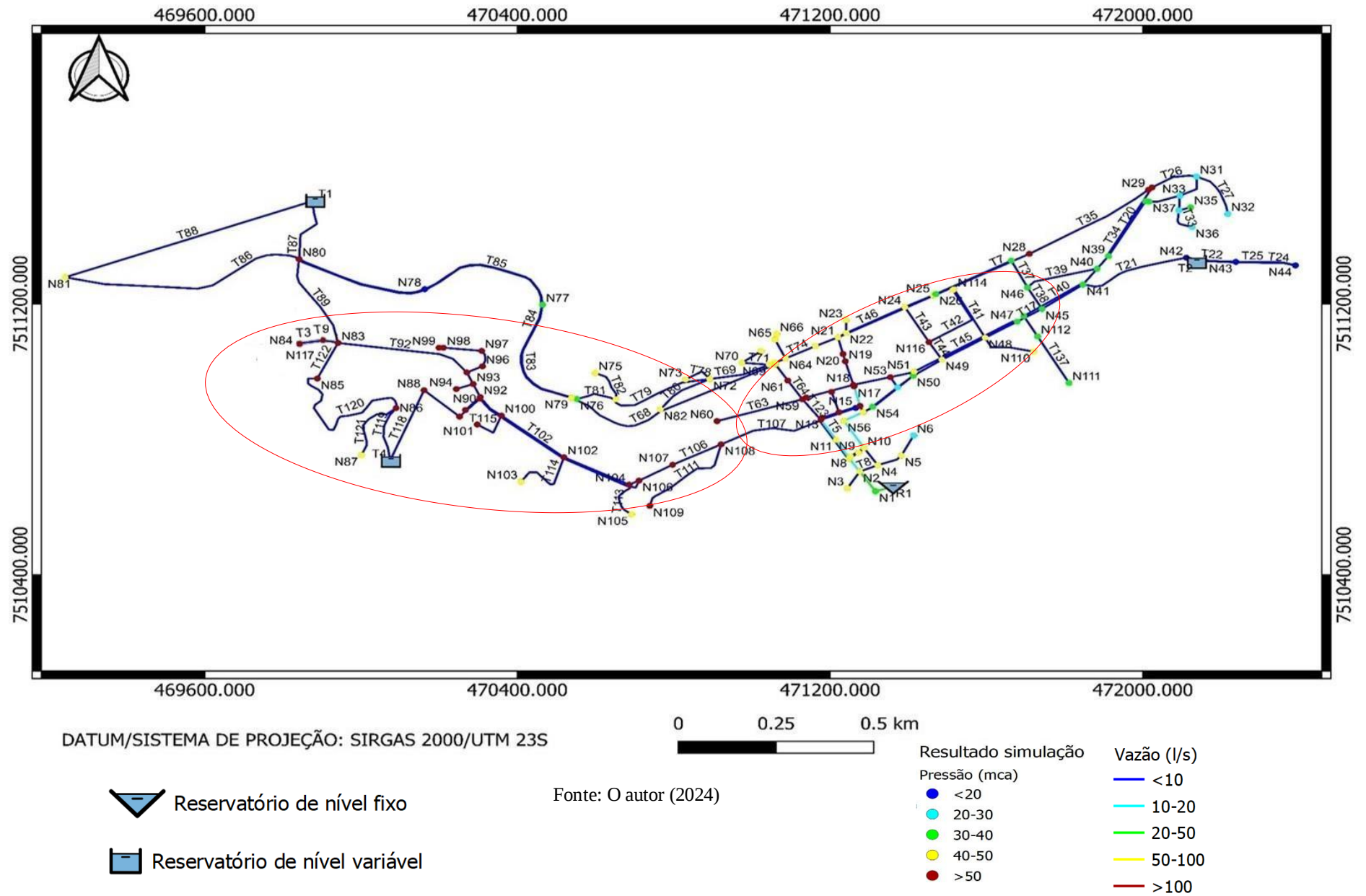


Figura 33 – Cenário Real – Simulação estática da rede com legenda



O mapa apresentado na Figura 32 mostra uma visualização geoespacial da rede de abastecimento, destacando as variações de pressão nos diferentes pontos (nós) da rede e suas respectivas conexões de tubulação. A utilização de cores para representar os níveis de pressão facilita a identificação de áreas críticas. Tons mais frios (verde, azul) indicam baixas pressões, enquanto tons mais quentes (vermelho) sugerem altas pressões. Essa representação permite uma análise rápida das zonas de pressão ao longo da rede, auxiliando na identificação de áreas que podem necessitar de ajustes operacionais.

Regiões com pressões mais baixas, geralmente em áreas elevadas, podem enfrentar dificuldades de abastecimento devido à gravidade e à topografia. Já as áreas com pressões mais altas podem estar próximas a reservatórios ou estações de bombeamento, onde a água é distribuída com maior força.

Uma análise detalhada do mapa sugere a necessidade de intervenções em áreas com pressão insuficiente, como o aumento da pressão ou a substituição de tubulações por outras de maior diâmetro, garantindo que a água chegue com a força adequada. Por outro lado, áreas com pressões elevadas podem precisar de válvulas redutoras de pressão, evitando sobrecarga nas tubulações que pode causar vazamentos ou rupturas.

Além disso, a sobreposição da rede em um Modelo Digital de Elevação permite correlacionar a topografia do terreno com os níveis de pressão, evidenciando que regiões montanhosas tendem a ter menor pressão devido à elevação. O mapa é uma ferramenta essencial para o planejamento de manutenção e otimização da rede, ajudando a identificar as áreas de maior risco e sugerindo ações corretivas para melhorar a eficiência e a segurança do sistema de abastecimento. A análise permite planejar melhor o uso de recursos, prevenindo problemas e garantindo um abastecimento de água mais uniforme e eficiente.

A geração desses resultados exigiu a inserção de dados fundamentais, incluindo informações sobre diâmetro, rugosidade e consumo base, no modelo.

A camada de Pressão, derivada da simulação hidráulica, fornece uma visão abrangente da distribuição de pressões ao longo da rede de água.

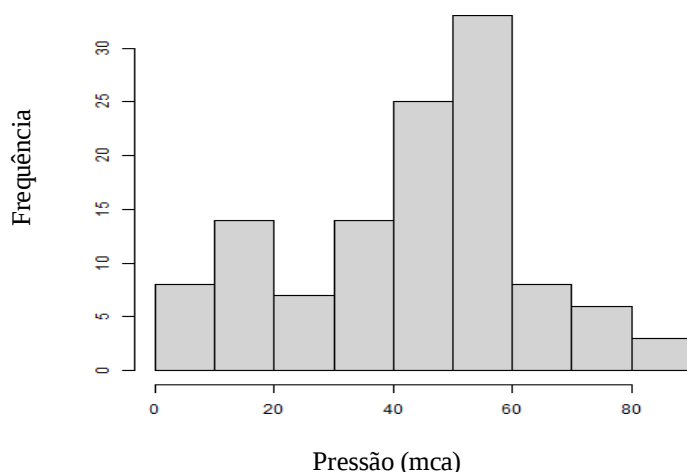
Essa representação visual é crucial para compreender as variações de pressão em diferentes seções da rede, apresentando informações valiosas para otimizar o desempenho hidráulico.

A camada vazão apresenta os padrões de fluxo de água resultantes da simulação hidráulica, permitindo a identificação de possíveis áreas problemáticas e contribuindo para uma abordagem proativa na gestão do sistema.

A área circulada da Figura 34 evidencia claramente um problema de sobrepressão, localizado principalmente na zona baixa da rede. Uma característica distintiva que emerge dessas análises é a localização estratégica dos reservatórios na zona alta da rede, de modo que cria uma carga hidráulica significativa, impondo pressões adicionais nas tubulações e gerando desafios operacionais.

O histograma apresentado na Figura 34, oferece uma visão da distribuição dos valores de pressão na rede de abastecimento de água do cenário Real, evidenciando como a pressão está distribuída em diferentes intervalos. A maior parte dos valores de pressão estática está concentrada entre 40 e 60 mca, com um pico de frequência em torno de 30 ocorrências, o que representa a faixa de pressão mais frequente na rede. Esse intervalo indica que a rede opera predominantemente dentro dessa faixa, que é considerada elevada, considerando a NBR 18280 - 2017

Figura 34 – Histograma das pressões dos 115 nós no cenário Real



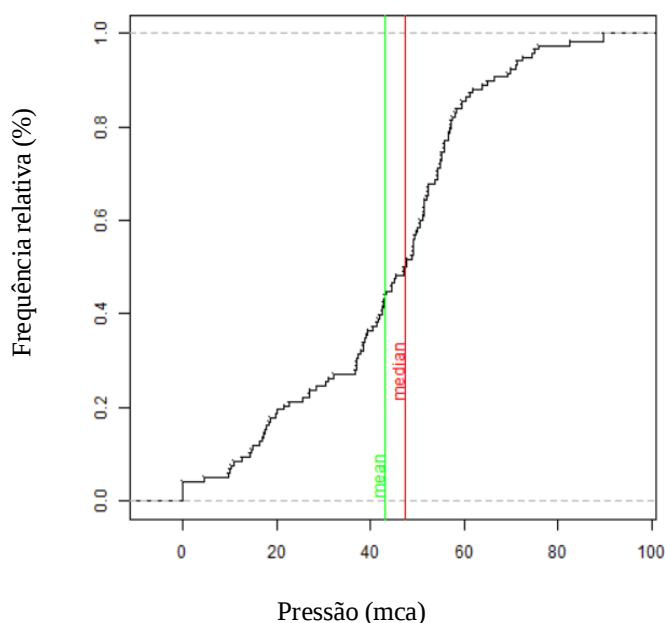
Fonte: O autor (2024)

Há também uma variação significativa de pressão observada no gráfico. Embora as pressões mais baixas, abaixo de 20 mca, tenha uma frequência moderada, elas ainda ocorrem em alguns pontos da rede. Essas pressões baixas podem indicar problemas de perda de pressão, vazamentos, ou ineficiências em áreas específicas, o que pode comprometer a distribuição adequada de água. Além disso, as pressões entre 20 e 40 mca também aparecem com frequência moderada, o que sugere uma transição entre as áreas de baixa pressão e os setores onde a pressão é mais elevada.

Do outro lado do espectro, pressões acima de 60 mca são menos comuns, mas estão presentes em algumas partes da rede. Essas áreas de alta pressão podem exigir atenção especial, pois pressões muito altas podem causar desgaste nas tubulações e aumentar o risco de falhas, como vazamentos ou rupturas, principalmente em tubulações envelhecidas ou em tubulações que não foram projetadas para lidar com esses níveis de pressão.

A Figura 35 exibe a distribuição dos valores de pressão em uma rede de abastecimento de água, mostrando como a pressão se acumula ao longo de diferentes intervalos. O eixo horizontal representa os valores de pressão, enquanto o eixo vertical mostra a frequência relativa dos dados, variando de 0 a 1 (ou 0% a 100%). A curva crescente reflete o aumento gradual da pressão ao longo da rede.

Figura 35 – Gráfico de frequência das pressões no cenário Real



Fonte: O autor (2024)

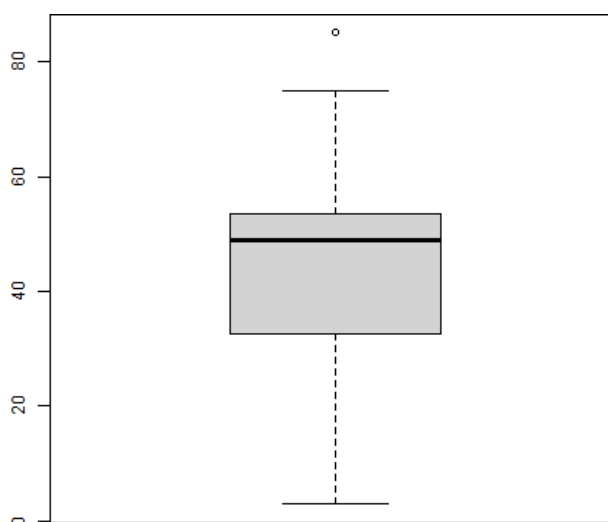
O gráfico da Figura 35 que a maioria das pressões está concentrada entre 40 e 60 mca, com a curva subindo de forma mais acentuada nessa faixa, o que indica que uma grande parte da rede opera dentro desse intervalo. A curva se aproxima de 1 (ou 100%) em torno de 80 mca, sugerindo que poucas pressões estão além desse ponto, o que é consistente com uma distribuição relativamente controlada e equilibrada.

As linhas verticais indicam a média (verde) e a mediana (vermelha) dos valores de pressão. A mediana, próxima de 40 mca, sugere que metade das pressões na rede estão abaixo desse valor. A média, também em torno de 40 a 45 mca, indica que a distribuição é simétrica, sem desvios significativos.

A parte inicial da curva, que sobe lentamente, mostra que há relativamente poucas pressões baixas (abaixo de 20 mca), o que pode indicar pontos específicos na rede com perda de pressão ou ineficiências que precisam ser investigadas. Esses trechos com pressão baixa podem exigir ajustes operacionais para aumentar a eficiência e melhorar a distribuição de água. No entanto, existem alguns pontos com pressões muito baixas, que podem exigir intervenção para garantir a uniformidade e a eficiência do sistema. As pressões muito altas, acima de 80 mca, são raras, indicando que o sistema, em geral, está bem equilibrado em termos de distribuição de pressão.

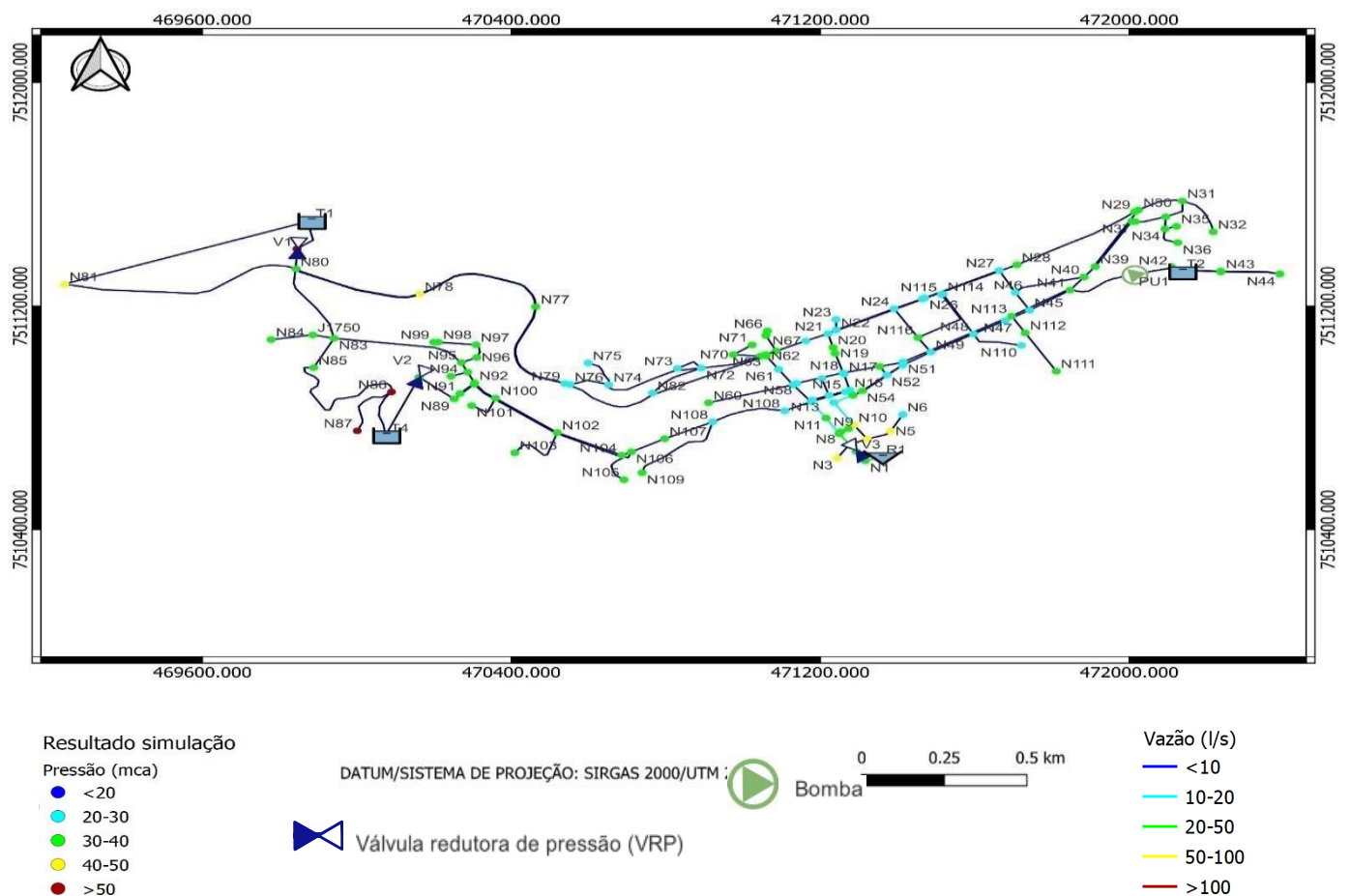
O gráfico de box plot apresentado na Figura 36 mostra a distribuição dos valores de pressão na rede de abastecimento de água. A linha central preta na caixa representa a mediana, que está em torno de 40 mca, indicando que metade dos valores de pressão está abaixo desse valor e a outra metade acima. A caixa cinza representa os quartis: o primeiro quartil (Q1) está em torno de 30 mca, indicando que 25% dos valores de pressão são menores que esse valor, enquanto o terceiro quartil (Q3) está em 60 mca, mostrando que 75% dos valores estão abaixo desse nível.

Figura 36 – Gráfico box plot das pressões do cenário Real



As linhas verticais que se estendem da caixa indicam os valores extremos da pressão, com o mínimo próximo de 10 mca e o máximo em torno de 80 mca. Isso sugere que há uma variação significativa nas pressões dentro da rede, com alguns trechos operando com pressões muito baixas e outros com pressões bastante elevadas. Essa variação pode estar relacionada a diferentes fatores operacionais, como o diâmetro das tubulações, a demanda de água ou variações de altimetria especialmente em redes montanhosas. Após o estudo do cenário Real, foram elaborados cenários de otimização, para o enquadramento das pressões na NBR 12218 de 2017 conforme mostra o Cenário otimizado 1 da rede de estudo, na Figura 37.

Figura 37 - Análise de pressão em cada nó (Cenário otimizado 1)



Fonte: O autor (2024)

De acordo com Gupta et al. (2018), as válvulas redutoras de pressão têm como função principal diminuir a pressão em pontos específicos da rede. Essa medida é essencial para evitar vazamentos, danos à infraestrutura e assegurar um fluxo de água adequado em todo o sistema.

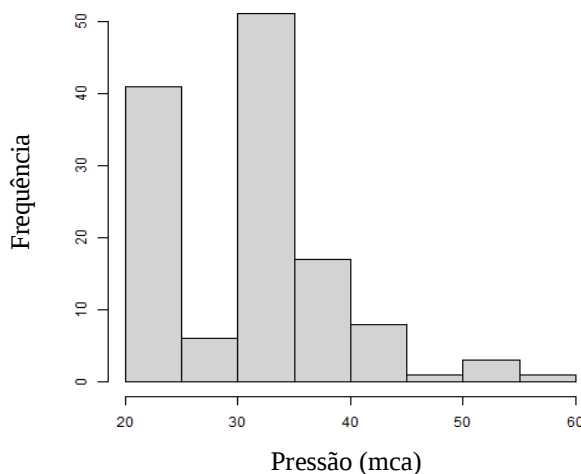
As válvulas redutoras de pressão atuam em conjunto com a bomba centrífuga, permitindo a uniformização da pressão ao longo da rede (Sales e Souza et al., 2023; Garcia et al., 2021). Em regiões onde a pressão da água é naturalmente baixa, especialmente em áreas montanhosas ou afastadas das fontes de abastecimento, podem ser instaladas bombas para aumentar a pressão e garantir que a água alcance todos os pontos da rede de distribuição. No cenário otimizado 1, foram instaladas 3 válvulas redutoras de pressão e 1 bomba centrífuga. A válvula 1 foi colocada no trecho 87, com um diâmetro nominal (DN) de 50 mm e seu parâmetro de controle foi ajustado para 35 m.c.a. A válvula 2 foi posicionada no trecho 118, também com DN de 50 mm, com controle fixado em 35 m.c.a. Por fim, a válvula 3 foi instalada no trecho 107, com DN de 50 mm e controle ajustado para 45 m.c.a.

Outro componente fundamental para a melhoria do sistema foi a inserção de uma bomba centrífuga modelo TH-16, com potência de 3 cavalos (cv), operando a 3500 rotações por minuto (rpm) e alimentada por corrente trifásica, instalada no trecho 21.

A definição das localizações das válvulas redutoras de pressão e da bomba centrífuga foi feita com base em documentação técnica e verificações realizadas in loco, juntamente com os funcionários da prefeitura responsáveis pela operação da rede de água.

O histograma apresentado na Figura 38 oferece uma visão clara da distribuição dos valores de pressão na rede de abastecimento de água no cenário otimizado 1, destacando a frequência com que diferentes intervalos de pressão ocorrem. A maior parte da rede está operando em pressões entre 30 e 40 mca, sendo esse o intervalo mais comum. Isso sugere que a rede está funcionando de maneira relativamente estável dentro dessa faixa, o que pode ser considerado um bom indicativo se essas pressões estiverem dentro dos níveis adequados para a operação do sistema.

Figura 38 – Histograma das pressões dos 115 nós no cenário otimizado 1



Fonte: O autor (2024)

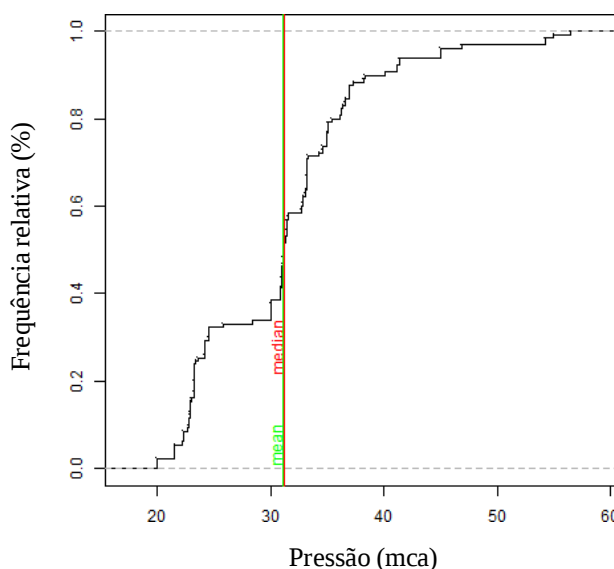
O gráfico revela uma frequência significativa de pressões entre 20 e 30 mca, o que aponta para áreas com pressões mais baixas. Essas regiões podem estar localizadas em pontos mais elevados ou em áreas com maior demanda, onde a pressão diminui devido à topografia ou ao desgaste das tubulações. Baixas pressões podem comprometer a eficiência do abastecimento, resultando em um fluxo de água insuficiente para os consumidores dessas regiões.

Por outro lado, pressões mais altas, acima de 40 mca, são menos frequentes no gráfico, o que sugere que a rede não sofre com pressões excessivas na maioria de seus trechos, o que é positivo, pois pressões muito altas podem causar desgaste prematuro das tubulações e aumentar o risco de vazamentos ou rupturas. Ainda assim, é importante monitorar as áreas que apresentam pressões elevadas para garantir que o sistema não esteja sobrecarregado.

Com base nesses resultados, é possível concluir que, embora a maior parte da rede opere dentro de uma faixa aceitável de pressão, há algumas áreas que podem necessitar de ajustes operacionais.

O gráfico de frequência cumulativa apresentado mostra a distribuição dos valores de pressão em uma rede de abastecimento de água, com a curva indicando a frequência acumulada dos diferentes intervalos de pressão. A curva se eleva de forma mais rápida entre 20 e 30 mca, sugerindo que a maior parte da rede opera com pressões nessa faixa conforme a Figura 39.

Figura 39 – Gráfico de frequência das pressões do cenário otimizado 1



A média e a mediana, representadas pelas linhas verde e vermelha, estão ambas em torno de 30 mca, indicando que a distribuição de pressão é relativamente simétrica. Isso significa que os valores de pressão estão concentrados próximos à mediana, o que é um bom indicativo de que a rede está equilibrada em termos de distribuição de pressão.

Apesar da predominância de pressões entre 20 e 30 mca, a curva continua a subir, embora mais lentamente, até alcançar valores de pressão de 60 mca, onde se estabiliza. Isso mostra que há alguns pontos da rede com pressões mais elevadas, mas essas são menos frequentes.

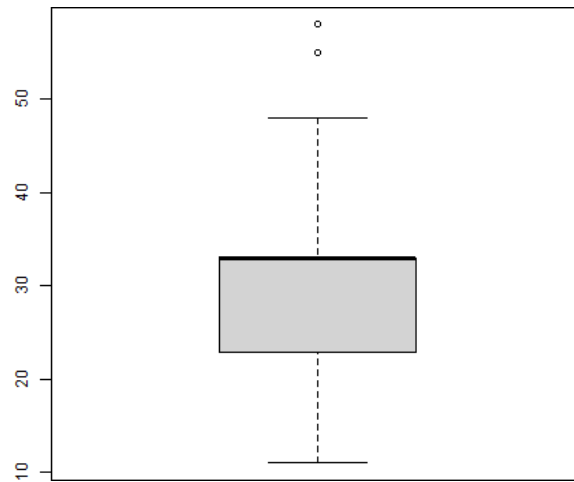
A distribuição equilibrada de pressão sugere que a rede está funcionando de maneira eficiente em termos de balanceamento de pressão, mas pressões mais baixas, próximas de 20 mca, podem ser uma preocupação em áreas mais distantes ou com maior elevação, onde a perda de pressão é mais comum. Esses pontos podem necessitar de ajustes operacionais, como o aumento da pressão local ou o redimensionamento das tubulações, para garantir um abastecimento de água adequado e eficiente.

Em contrapartida, a baixa frequência de pressões elevadas é um bom sinal, já que pressões muito altas podem causar desgaste nas tubulações e aumentar o risco de falhas. No entanto, o foco deve ser nas áreas com pressões mais baixas, garantindo que todos os pontos da rede recebam água com pressão suficiente para atender à demanda dos consumidores.

A análise da curva de frequência cumulativa mostra que a maior parte da rede opera em pressões moderadas, com uma distribuição simétrica e poucos valores extremos. A rede está equilibrada, mas áreas com baixa pressão podem requerer intervenção para otimizar o desempenho geral.

O gráfico de box plot apresentado na Figura 40 fornece uma visão da distribuição dos valores de pressão na rede de abastecimento de água. A mediana, representada pela linha preta dentro da caixa, está em torno de 35 mca, indicando que metade dos valores de pressão está abaixo desse nível e a outra metade acima. A caixa cinza, que mostra o intervalo interquartil, revela que 50% dos valores de pressão estão entre 30 e 40 mca, com o primeiro quartil (Q1) em 30 e o terceiro quartil (Q3) em 40 mca.

Figura 40 – Gráfico box plot das pressões no cenário otimizado 1



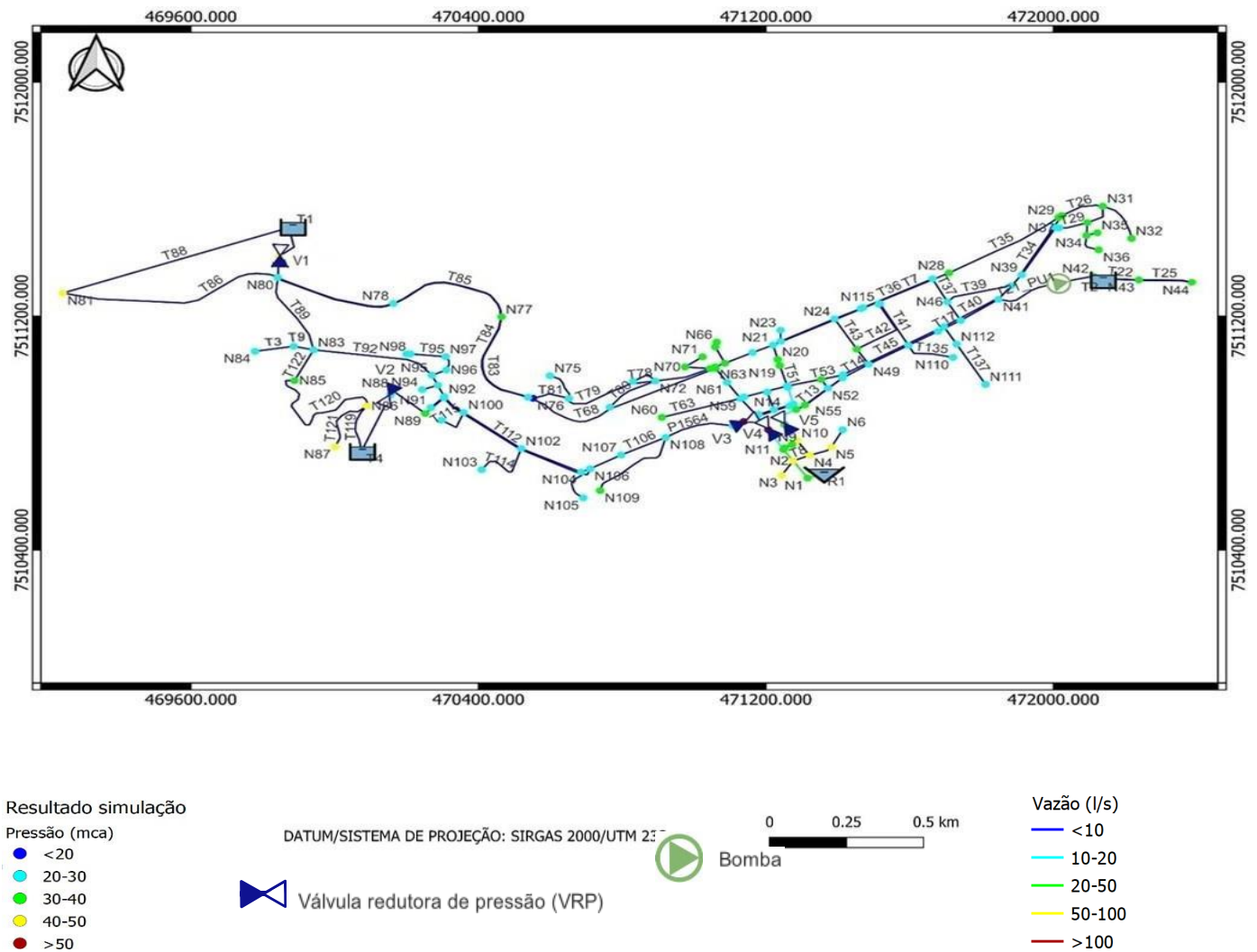
Fonte: O autor (2024)

As linhas verticais se estendem até o valor mínimo, próximo de 22 mca, e até o valor máximo, em torno de 57 mca. Isso sugere uma variação moderada de pressões dentro da rede, com a maioria dos valores concentrados em uma faixa relativamente estreita, mas com alguns trechos operando em pressões mais elevadas, próximos de 55 mca.

A ausência de outliers ou valores extremos fora desse intervalo indica que a rede está funcionando de forma relativamente estável. No entanto, pressões mais baixas, em torno de 25 mca, podem representar áreas onde há perda de pressão ou necessidade de reforço, enquanto as pressões mais altas, próximas de 55 mca, podem indicar trechos de alta pressão, que exigem atenção para evitar desgaste nas tubulações.

Dependendo das características da rede e das faixas de pressão recomendadas, pode ser necessário fazer ajustes operacionais, como instalar válvulas reguladoras para controlar a pressão em áreas críticas. A análise do box plot sugere que a distribuição de pressões é equilibrada, mas ajustes localizados podem otimizar o desempenho da rede e reduzir riscos operacionais. Após o Estudo do Cenário otimizado 1, foi realizado o estudo do cenário otimizado 2 com alterações mais abrangentes conforme Figura 41.

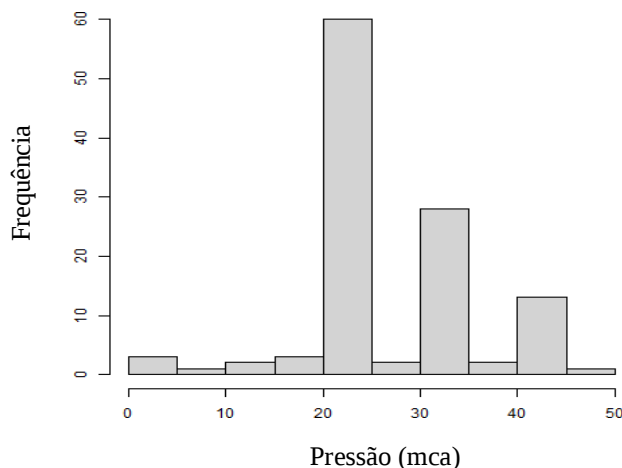
Figura 41 - Análise de pressão em cada nó (Cenário otimizado 2)



Fonte: O autor (2024)

O gráfico de frequência de pressões do cenário otimizado 2, ilustrado na Figura 42, com sua pressão média de 25,2 m.c.a. contrasta notavelmente com o Cenário Real, que registrava 44,3 m.c.a. O histograma apresentado na Figura 42 oferece uma visão clara da distribuição dos valores de pressão na rede de abastecimento de água, destacando que a maior parte da rede opera com pressões em torno de 20 mca, sendo esse o intervalo mais comum e o de maior frequência no gráfico.

Figura 42 – Histograma das pressões dos 115 nós no cenário otimizado 2

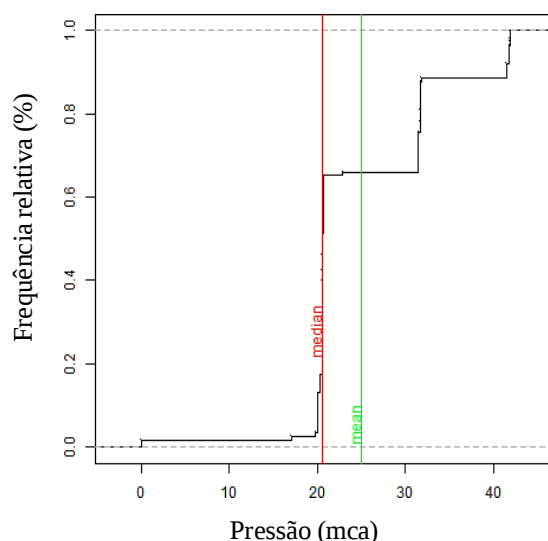


Fonte: O autor (2024)

Além do pico em torno de 20 mca, há uma concentração de pressões na faixa de 30 a 40 mca, o que indica que parte da rede opera com pressões intermediárias, mais próximas dos valores recomendados para uma distribuição eficiente. Esses pontos intermediários podem representar áreas mais centrais ou próximas de bombas, onde o fornecimento de água é mais estável e robusto. A instalação de 5 válvulas redutoras de pressão e uma bomba busca corrigir essas irregularidades e promover uma distribuição equilibrada ao longo da rede. A válvula 1 foi posicionada no trecho 87 com DN de 50 mm e teve seu parâmetro de controle fixado em 26 m.c.a. Da mesma maneira a válvula 2 foi posicionada no trecho 118 com DN de 50 mm, com parâmetro de controle fixado em 40 mca. Já as válvulas 3,4 e 5 instalada nos trechos 107, 5 e 8 de DN 50 mm, 100 mm e 100 mm, com parâmetro de controle fixado em 40 mca. Essa estratégia permitiu uma gestão precisa e adaptativa da pressão em diferentes segmentos da rede.

Da mesma maneira que o cenário otimizado 1, foi a inserção da bomba centrífuga TH-16, no trecho 21. Essa adição estratégica das válvulas VRP's e Bomba proporcionou uma redução da carga hidráulica na zona baixa e um impulso energético ao sistema na zona alta, contribuindo para superar resistências e garantir a adequada circulação do fluido em toda a rede. Em conjunto, essas modificações resultaram em uma distribuição de pressão mais uniforme e dentro dos limites da NBR 12 218 ao longo da rede. O gráfico de frequência dos valores de pressão na rede do cenário otimizado 2 revela a distribuição desses valores, com a curva mostrando a proporção de ocorrências em função do aumento das pressões. A curva cresce de forma mais acentuada entre 20 e 30 mca, indicando que a maior parte da rede opera com pressões dentro desse intervalo conforme a Figura 43.

Figura 43 – Gráfico de frequência das pressões dos 115 nós no cenário otimizado 2



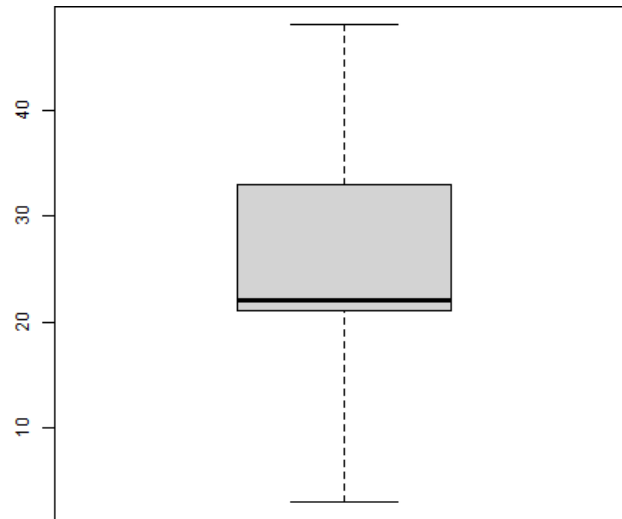
Fonte: O autor (2024)

As linhas verticais verde e vermelha indicam a média e a mediana, ambas situadas próximas de 20 mca. A mediana aponta que 50% dos pontos da rede têm pressões abaixo de 20 mca e 50% acima desse valor, o que sugere uma distribuição simétrica em torno da mediana. No entanto, o fato de a maior parte dos pontos estar próxima a 20 mca pode ser um indicador de que algumas áreas da rede estão operando com pressões mais baixas do que o ideal, o que pode impactar o desempenho em zonas distantes ou com maior demanda.

A curva de frequência cumulativa mostra que a rede opera principalmente com pressões entre 20 e 30 mca, com a média e a mediana em torno de 20 mca, indicando uma distribuição equilibrada. No entanto, áreas com pressões mais baixas podem exigir intervenções para melhorar o abastecimento e garantir que a pressão seja adequada para toda a rede. A ausência de pressões muito altas é benéfica, pois minimiza os riscos de sobrecarga e falhas nas tubulações.

O box plot apresentado pela Figura 44 a seguir fornece uma visão clara da distribuição dos valores de pressão na rede de abastecimento de água. A mediana, representada pela linha preta dentro da caixa, está em torno de 30 mca de pressão, indicando que metade dos valores está abaixo desse nível e a outra metade acima. A caixa cinza mostra o intervalo interquartil, com o primeiro quartil (Q1) em torno de 25 mca e o terceiro quartil (Q3) em aproximadamente 35 mca. Isso significa que 50% dos valores de pressão estão concentrados entre 25 e 35 mca.

Figura 44 – Gráfico de frequência das pressões dos 115 nós no cenário otimizado 2



Fonte: O autor (2024)

As linhas verticais se estendem até o valor mínimo e o valor máximo, com o mínimo em torno de 10 mca e o máximo em torno de 45 mca. De modo geral, o gráfico revela que a pressão está relativamente equilibrada na maior parte da rede, com a maioria dos valores de pressão dentro de um intervalo aceitável.

Com a finalização das otimizações dos cenários, para tornar tangíveis os resultados calculou-se as perdas por pressão a partir da equação (6) de adaptações de Tucciarelli et al. (1999) e Silva (2003) :

$$\sum_{i=1}^{nodes} = Pmean^{0,5} * 7,27 \quad (6)$$

Em que:

- $\sum$ é a soma das perdas
- $nodes$ é o número de nós na rede
- i é o índice do nó
- $Pmean$ é a pressão média no nó i

Como resultado da aplicação da Equação na tabela a seguir, pode-se perceber um índice de vazamentos de 48,39 % no cenário real da rede de abastecimento. Já no cenário ótimo 2 observamos o índice de vazamentos no valor de 36,49%, contabilizando uma redução de 11,9 % no índice de perdas de água tratada por vazamentos, como é ilustrado na tabela 1.

Tabela 1 – Pressão média e índice teórico de Perdas nos cenários Real e Otimizados 1 e 2

	Pressão média (mca)	Índice de vazamentos (%)
Cenário Real	44,3	48,39
Cenário otimizado 1	31,8	40,99
Cenário otimizado 2	25,2	36,49

Fonte: O autor (2024)

5.6.4 Análise de eficiência energética dos cenários ótimos 1 e 2

Com o crescimento populacional, os fatores de demanda dos nós são calculados em intervalos de 5 anos. Por ser mais alinhado com o perfil do crescimento populacional do município, foram escolhidos os valores da projeção pelo método aritmético para calcular a eficiência energética dos três cenários propostos sendo eles Real, otimizado 1 e otimizado 2. Conforme a metodologia de Gomes et al (2017), o ano de 2000 é adotado como fator 1, pois representa o ponto de eficiência máxima ao longo de um horizonte de projeto de 45 anos. Os demais valores são obtidos com base em uma variação proporcional em relação a 2045, conforme apresentado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Cálculo do fator de demanda dos nós

ANO	TEMPO DE PROJETO (ACUMULADO)	POPULAÇÃO ESTIMADA	FATOR DE DEMANDA
2000	0	7297	1
2005	5	7457	1,02
2010	10	7622	1,04
2015	15	7790	1,07
2020	20	7962	1,09
2025	25	8137	1,11
2030	30	8317	1,14
2035	35	8500	1,17
2040	40	8688	1,19
2045	45	8879	1,22

Fonte: O autor (2024)

A partir do cálculo do fator de demanda é possível aplicar a metodologia proposta por Gomes et al. (2017) para a obtenção dos índices de energia dissipada e o indicador de eficiência energética da rede. Desta forma:

$$i_{ED} = \frac{h_{f_{total}}}{L_{total}} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) \right]_i}{L_{total}} \right\} \quad (7)$$

Onde:

- i_{ED} é o índice de energia dissipada da rede;
- h_f total é o valor referente à perda de carga hidráulica total da rede;
- i é o trecho (tubulação) em análise;
- n é a quantidade de trechos (tubulações) da rede;
- p_1/γ é a parcela de energia de pressão do nó de montante do trecho;
- p_2/γ é a parcela da energia de pressão do nó de jusante do trecho;
- z_1 e z_2 são as cotas topográficas dos nós de montante e juzante do trecho, respectivamente
- L_{total} é o comprimento total da rede.

O Indicador de Eficiência Energética (IEE), consiste na aplicação do índice i_{ED} , em duas situações distintas: a primeira, como referencial, corresponde ao cenário efetivamente previsto para a vida útil do projeto, direcionado para um horizonte futuro de operação. A segunda situação corresponde ao cenário em que, efetivamente, deseja-se aferir a eficiência de operação da rede, em um determinado tempo (seja antes ou depois do horizonte de projeto inicialmente concebido).

$$IEE = [(i_{ED} \text{ Cenário real}) / (i_{ED} \text{ cenário otim})] \quad (8)$$

Onde:

- IEE é o indicador de eficiência energética da rede;
- IED, referência é o índice de energia dissipada da rede para o cenário do projeto original da rede;
- IED, cenário é o índice de energia dissipada da rede para o cenário que se deseja aferir a eficiência energética

Segundo Gomes et al (2017), Um valor de 100% do IEE indica, no limite, que a rede analisada está em boas condições operacionais, com relação a sua capacidade de transporte de água, em comparação ao seu projeto original. Por outro lado, um valor acima de 100% indica que a rede está operando com “folga” de carga hidráulica ou perda de carga a ser consumida, em relação às condições operacionais previstas no projeto original.

Já um valor inferior a 100% indica que a rede está ineficiente hidraulicamente, uma vez que está consumindo mais carga hidráulica do que foi inicialmente prevista no cenário de referência, nas condições originais do projeto. Como consequência, nesse último caso, as pressões efetivas disponíveis nos nós da rede caem abaixo dos valores pré-estabelecidos no projeto, prejudicando a qualidade do serviço do abastecimento aos consumidores do sistema de distribuição de água.

Dessa forma, será possível comparar a evolução da eficiência de uma determinada rede, ao longo do tempo, e obter conclusões sobre eventuais necessidades de reabilitação da rede. A diminuição da eficiência da rede pode ser causada pelo aumento, não inicialmente previsto, das demandas de água, provocadas pelo incremento não previsto do consumo na rede e/ou aumento das perdas reais de água, além do aumento da perda de carga nas tubulações devido ao incremento das rugosidades das tubulações da rede ao longo do tempo.

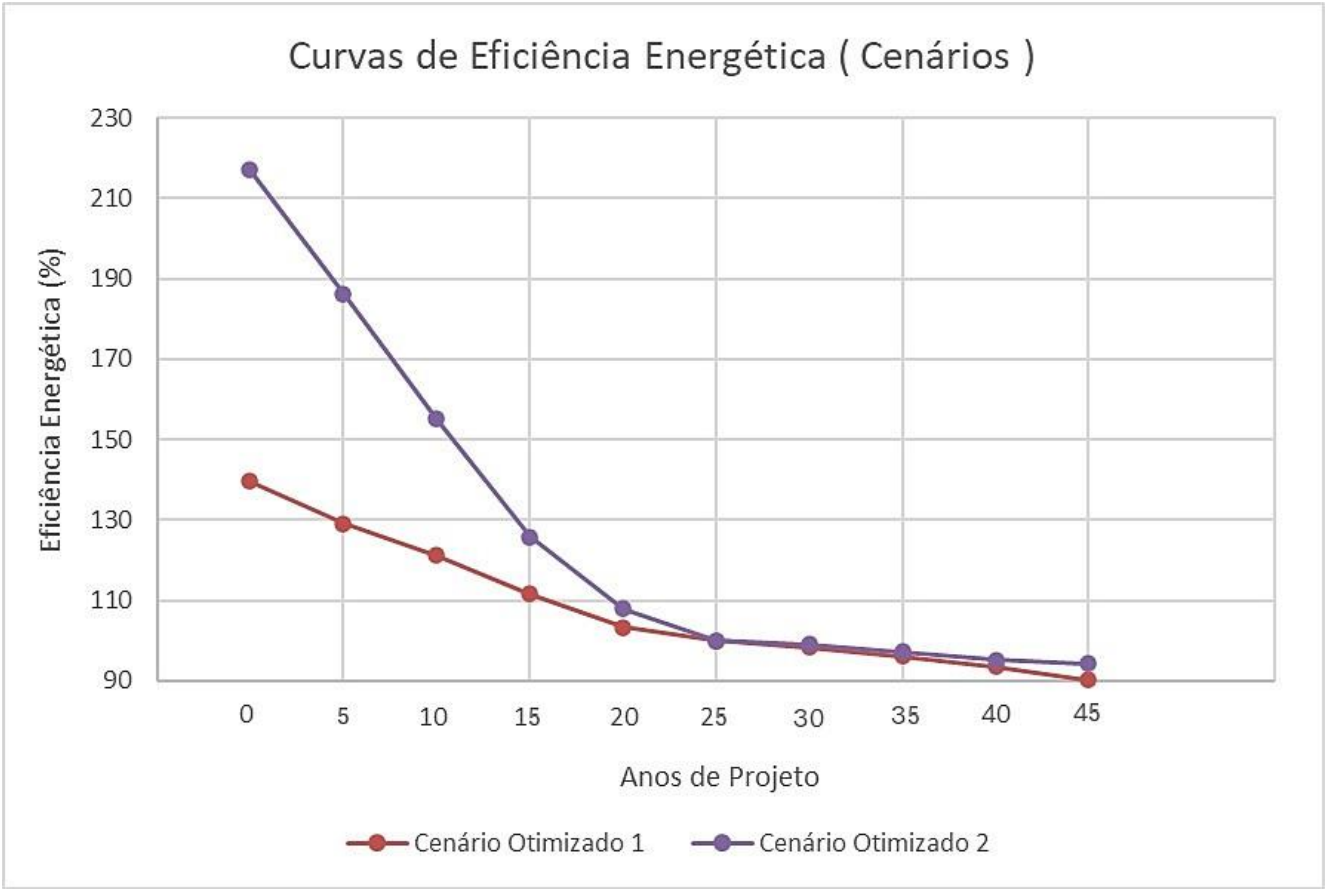
Na tabela 3 a seguir é calculado o índice de eficiência energética para a rede de estudo nos cenários otimizado 1 e otimizado 2.

Tabela 3 – Comportamento do IEE para a rede de estudo

		Ano 0	Ano 5	Ano 10	Ano 15	Ano 20	Ano 25	Ano 30	Ano 35	Ano 40	Ano 45
índice de energia dissipada - IED (m/km)	$i_{ED} = \frac{h_{f_{total}}}{L_{total}} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{P_i}{V} + z_1 \right) - \left(\frac{P_i}{V} + z_2 \right) \right] l_i}{L_{total}} \right\}$	0,58	1,22	1,83	2,2	3,19	4,77	6,02	8,1	10,5	12,4
Indicador de eficiência energética - IEE (%)	IEE = [(IED Cen real) / (IED Cen otim 1)]	139,5	129,0	121,1	111,5	103,18	100	98,25	96,1	93,5	90,1
Indicador de eficiência energética - IEE (%)	IEE = [(IED Cen real) / (IED Cen otim 2)]	217,0	186,2	155,1	125,7	107,9	100	99,05	97,1	95,1	94,2

Fonte: O autor (2024)

Figura 45 – Gráfico do comportamento do IEE considerando o tempo de projeto



Fonte: O autor (2024)

A análise das curvas de eficiência energética apresentadas no gráfico da Figura 45 permitem identificar a dinâmica de desempenho de dois cenários otimizados ao longo de um período de 45 anos.

Podemos observar uma tendência geral de queda na eficiência energética em ambos os casos, com uma diminuição significativa ao longo do tempo. Inicialmente, há uma diferença considerável entre os dois cenários: o Cenário Otimizado 2 apresenta uma eficiência energética inicial superior, começando acima de 210%, enquanto o Cenário Otimizado 1 parte de um valor mais modesto, próximo a 130%. Essa disparidade inicial sugere que o Cenário Otimizado 2 adota estratégias mais robustas ou tecnologias mais avançadas que garantem um melhor desempenho no início da operação.

No entanto, a queda acentuada e progressiva da eficiência no Cenário Otimizado 2 revela que essas estratégias podem estar associadas a limitações significativas que emergem com o tempo. Por outro lado, o Cenário Otimizado 1, embora com uma eficiência inicial mais baixa, exibe uma curva de queda mais gradual, sugerindo uma abordagem mais sustentável ou menos suscetível a degradações rápidas.

A análise revela que, embora o Cenário Otimizado 2 ofereça vantagens claras em eficiência energética no curto prazo, sua curva de declínio mais acentuada implica a necessidade de maior atenção a medidas de manutenção ou intervenções corretivas ao longo do tempo.

As causas dessa queda rápida podem incluir o desgaste de materiais, a falha de componentes mais complexos, ou a maior sensibilidade desse sistema a fatores externos. Em contrapartida, o Cenário Otimizado 1, mesmo começando de uma base mais baixa, pode ser mais resiliente e ter uma durabilidade melhor.

Assim, torna-se evidente que uma abordagem equilibrada que combine melhorias iniciais com uma estratégia de longo prazo para mitigação de perdas seria ideal. É crucial que gestores de projetos em recursos hídricos considerem esses aspectos ao implementar otimizações, para garantir que as soluções sejam eficazes não apenas inicialmente, mas também sustentáveis durante todo o ciclo de vida do sistema.

5.6.5 Análise estatística dos ativos da rede e parâmetros hidráulicos com os módulos WNTR, Pandas, Matplotlib, Seaborn e OS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, com foco na análise das redes de distribuição de água utilizando o QGISRED, várias questões surgiram, direcionando a investigação da estrutura da rede e suas características operacionais.

O QGISRED é uma ferramenta poderosa, usada no gerenciamento e análise de redes de infraestrutura, incluindo sistemas de distribuição de água. Ele permite a visualização espacial dos dados e a integração com modelos como o EPANET, facilitando a análise de parâmetros como pressão, vazão, e eficiência do sistema. No entanto, à medida que a pesquisa avançava, surgiram várias perguntas específicas que ajudaram a moldar a investigação.

A primeira pergunta que surgiu foi sobre a quantidade de tubos que possuem mais de 100 metros de comprimento. Esta dúvida foi levantada devido à importância de entender como os diferentes segmentos da rede são distribuídos em termos de comprimento, especialmente em relação aos trechos mais longos. Tubos maiores podem ter um impacto considerável no controle de pressão e no fluxo de água, já que, geralmente, as áreas distantes ou com tubos de maior extensão estão mais sujeitas a variações de pressão. Além disso, esses trechos podem exigir sistemas de bombeamento mais robustos ou ajustes na operação da estação de tratamento.

Assim, entender quantos tubos ultrapassam 100 metros fornece percepções importantes sobre os desafios operacionais enfrentados pela rede em termos de controle e distribuição da água. Redes com tubos de grande extensão podem também apresentar mais problemas de manutenção, devido à complexidade de acessar e reparar trechos longos, além de uma maior necessidade de monitoramento para evitar perdas de água ou falhas no sistema.

Juntamente com essa questão, surgiu a dúvida sobre a quantidade de tubos com menos de 100 metros. Embora os tubos mais curtos representem uma parte menor da rede em termos de extensão, eles são mais numerosos em quantidade. Esses trechos menores são essenciais para a distribuição final da água, estando geralmente localizados em áreas residenciais ou na extremidade da rede, onde a água já percorreu longas distâncias antes de alcançar os consumidores.

A eficiência desses tubos é essencial, pois a água precisa manter uma pressão adequada até o ponto de consumo, o que implica que tubos curtos e bem dimensionados podem reduzir perdas e aumentar a eficiência do sistema.

Além disso, tubos menores tendem a ser mais baratos para manutenção e substituição, o que pode ser um fator positivo em termos operacionais. O entendimento da distribuição entre tubos longos e curtos também tem implicações financeiras, pois trechos mais curtos podem demandar menos recursos para a operação, enquanto tubos longos podem implicar em maiores custos de energia e manutenção.

Outro aspecto relevante levantado foi sobre a identificação e a extensão total de tubos de diferentes materiais.

O material utilizado nos tubos da rede de distribuição de água tem um impacto direto na durabilidade, resistência e eficiência do sistema. Tubos de PVC, ferro fundido, aço e outros materiais apresentam comportamentos distintos quando expostos ao longo tempo à água, pressão e agentes corrosivos. Por exemplo, tubos de ferro fundido são conhecidos por sua robustez, mas podem ser suscetíveis à corrosão, o que pode prejudicar a qualidade da água e a durabilidade do sistema. Já os tubos de PVC, mais modernos, são resistentes à corrosão, mas podem ser vulneráveis a outros tipos de danos. A análise da extensão de tubos de cada material ajuda a identificar os pontos mais críticos da rede, onde podem ocorrer falhas ou a necessidade de reparos. Ao saber qual a extensão total de cada material, é possível planejar melhor a manutenção e até mesmo decidir sobre a substituição de materiais antigos ou danificados, garantindo que a rede de distribuição se mantenha funcional e eficiente.

A identificação e quantificação dos materiais também têm uma importância econômica, pois podem influenciar diretamente nos custos de manutenção e operação. Materiais mais resistentes podem ter custos iniciais mais elevados, mas garantem uma vida útil mais longa, enquanto materiais mais baratos podem ter um custo inicial inferior, mas podem exigir mais manutenção ao longo do tempo. Além disso, a análise da distribuição dos materiais pode revelar áreas onde certos materiais predominam, ajudando os gestores a focarem esforços nas regiões que mais necessitam de intervenções.

Outro fator essencial para a análise da rede de distribuição de água é a idade dos nós e dos trechos da rede. A idade dos elementos da rede influencia diretamente sua confiabilidade e eficiência. Sistemas mais antigos podem apresentar problemas como vazamentos, entupimentos e falhas estruturais, que podem comprometer o fornecimento de água. A identificação da idade dos nós e dos trechos permite antecipar problemas e agir preventivamente, evitando falhas no sistema e melhorando a eficiência da gestão.

A análise da idade pode ajudar a planejar a substituição de partes da rede que estão chegando ao fim de sua vida útil. Esses dados podem ser fundamentais para o planejamento estratégico da renovação e ampliação da infraestrutura de distribuição de água.

Após o início do estudo, foi possível perceber que a informação sobre a rede, tanto os dados de entrada quanto os de saída, poderiam ser representados de maneira mais clara e eficiente por meio de gráficos. Em vez de os gestores precisarem buscar manualmente informações específicas sobre o diâmetro dos tubos, por exemplo, em modelos como o QGISRED ou EPANET, essas informações poderiam ser apresentadas de forma rápida e concisa, através de gráficos dinâmicos e interativos. A utilização de gráficos permite que os gestores obtenham uma visão rápida e precisa do estado da rede, identificando facilmente as áreas que necessitam de mais atenção, seja em termos de manutenção, renovação ou ampliação da infraestrutura. Além disso, ao representar esses dados graficamente, facilita-se a comunicação com outros membros da equipe e a tomada de decisões mais informadas.

Essa abordagem visual dos dados também permite que os gestores identifiquem rapidamente tendências e padrões, como o aumento de falhas em determinadas áreas ou a concentração de problemas em segmentos com determinado material ou comprimento de tubo. Os gráficos podem fornecer uma visão mais intuitiva e acessível, ajudando na priorização das ações corretivas e na alocação eficiente de recursos.

Além disso, a utilização de gráficos no gerenciamento da rede de distribuição de água pode facilitar o monitoramento contínuo do sistema, uma vez que os gráficos podem ser atualizados em tempo real, à medida que novos dados são coletados. Isso permite que os gestores acompanhem o desempenho da rede ao longo do tempo e possam agir rapidamente diante de mudanças nas condições operacionais. A representação visual também facilita o processo de planejamento, pois permite que os gestores visualizem o impacto de possíveis modificações na rede, como a instalação de novos tubos, a substituição de materiais ou a expansão do sistema.

A análise das redes de distribuição de água utilizando o QGISRED, aliada à criação de gráficos dinâmicos, proporciona uma visão mais precisa, rápida e eficiente do estado da infraestrutura. Através de respostas a perguntas específicas sobre comprimento, material, idade e outras características dos tubos, é possível obter informações cruciais para o gerenciamento e a manutenção da rede, além de planejar de forma mais eficaz as futuras intervenções. Essa abordagem ajuda a otimizar recursos, reduzir custos operacionais e garantir a continuidade do fornecimento de água com qualidade e eficiência para a população.

A partir disso, para contabilizar os ativos da rede dentro do terminal Python do QGIS, realizamos um estudo dos módulos (bibliotecas) do Python, que seriam capazes de realizar este estudo.

De acordo com o manual do WNTR - Water Network Tool for Resilience (2020) o pacote WNTR é uma biblioteca de software em Python desenvolvida pelo U.S. Environmental Protection Agency (EPA) dos Estados Unidos da América, para modelagem, análise e simulação de redes de distribuição de água. Ele foi lançado através da publicação do artigo intitulado como “ A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study”, publicado na renomada revista Environmental Modelling & Software, de autoria de Klise et al. (2017). Ele foi projetado para ajudar engenheiros, pesquisadores e planejadores a avaliar a resiliência das redes de abastecimento de água frente a diversos cenários, como falhas de componentes, mudanças climáticas, desastres naturais e outros distúrbios.

Através do WNTR, foi possível calcular o comportamento hidráulico da rede, a pressão nos nós, a vazão em diferentes trechos e até mesmo simular cenários de falha.

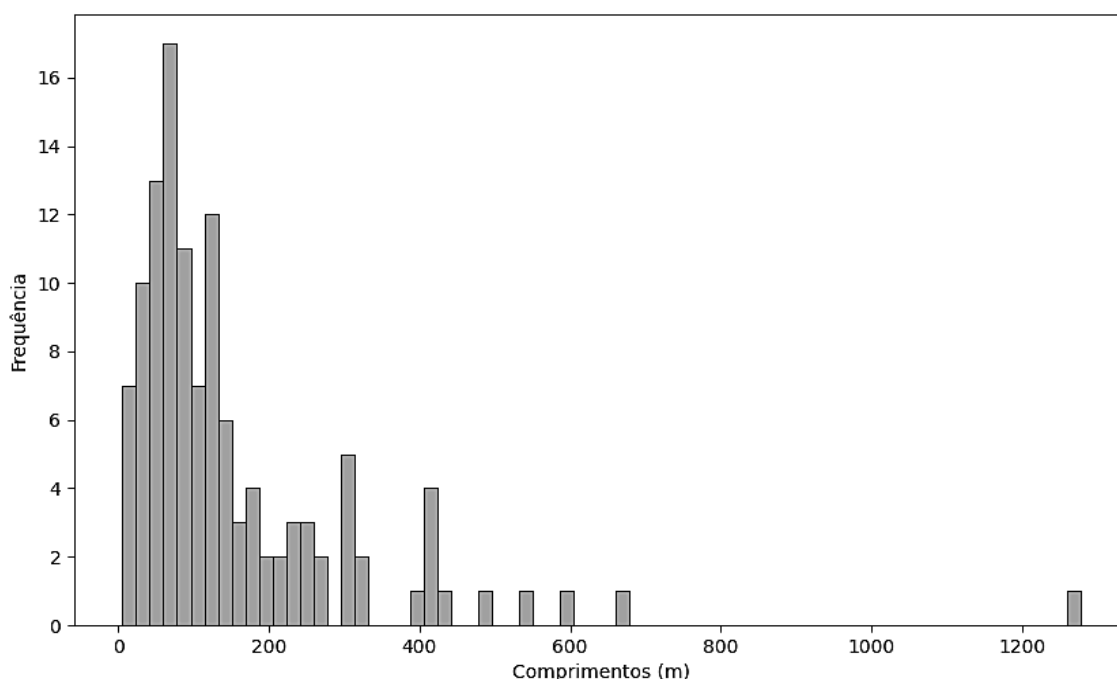
Associado ao WNTR, para ler os arquivos com informações da rede, optamos por utilizar o pacote python Pandas. O Pandas é uma das bibliotecas mais utilizadas para manipulação e análise de dados em Python. Ele permite a leitura de arquivos CSV, Excel e outros formatos, que podem ser utilizados para importar dados dos ativos da rede, como o material, comprimento, idade, diâmetro, entre outros.

Para plotar os gráficos foram utilizados os pacotes Matplotlib e Seaborn, que são bibliotecas de visualização de dados em Python. Enquanto Matplotlib é mais versátil e permite criar gráficos de diversos tipos, o Seaborn é uma camada de abstração sobre Matplotlib, tornando mais fácil a criação de gráficos estatísticos complexos com menos código.

Por fim, para automatizar tarefas como carregar arquivos de dados, organizar diretórios de saída para resultados de simulação e acessar caminhos específicos no seu projeto dentro do QGIS foi utilizado o pacote OS.

Conforme a Figura 46, foi feita uma distribuição dos tubos da rede por classe de tamanho, essa análise geral é feita para descobrir as características dos tubos de abastecimento de água da rede.

Figura 46 – Distribuição dos comprimentos dos tubos da rede de estudo



Fonte: O autor (2024)

Podemos inferir da Figura 46, que faz uma análise dos comprimentos dos tubos de maneira geral, que a grande maioria dos tubos tem o seu comprimento limitado a 200 metros, e que a rede possui um tubo com mais de 1200 metros de comprimento.

A maior concentração de tubos está na faixa de 0 a 200 metros, com destaque para o intervalo entre 50 e 150 metros, que apresenta o maior número de ocorrências. Tubos mais curtos são característicos de redes em áreas urbanas ou densamente povoadas, onde há uma maior concentração de nós, facilitando a distribuição da água com pressões mais controladas e minimizando as perdas de carga ao longo da rede.

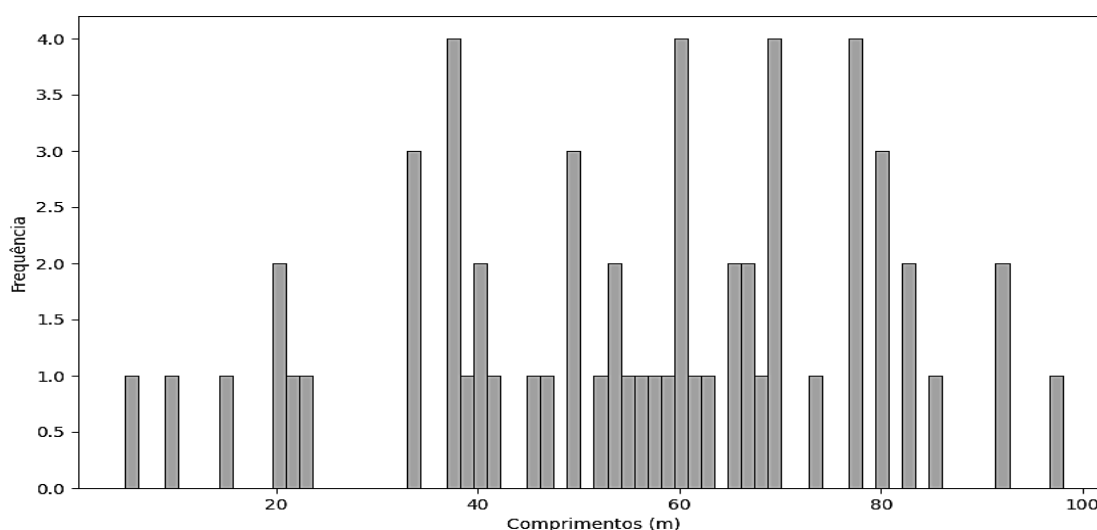
A redução na frequência de tubos conforme o comprimento aumenta indica que a rede possui poucos tubos longos, o que é comum em redes de distribuição que atendem a áreas maiores ou conectam pontos distantes, como estações de bombeamento ou reservatórios. Tubos com comprimentos acima de 400 metros são raros, sendo possivelmente utilizados em regiões periféricas ou rurais. Um tubo destacado com comprimento em torno de 1200 metros pode representar uma exceção dentro da rede, possivelmente relacionado ao transporte de água em trechos de longa distância ou em áreas com desafios geográficos, como montanhas ou vales.

Tubos mais longos, apesar de serem necessários em algumas situações, trazem desafios adicionais, como maiores perdas de pressão e maior complexidade na manutenção e operação da rede. Eles exigem um planejamento mais detalhado, especialmente em relação à necessidade de estações de bombeamento ou pontos de reforço de pressão. Em contrapartida, tubos curtos, embora mais fáceis de manter e controlar em termos de pressão, podem aumentar a quantidade de conexões e juntas, que, por sua vez, podem elevar o risco de vazamentos e falhas ao longo do tempo.

A interpretação desse gráfico também pode ser relevante para estudos voltados à otimização energética da rede. A predominância de tubos mais curtos pode resultar em menor necessidade de energia para bombeamento, uma vez que as perdas de carga são reduzidas, mas o aumento da quantidade de componentes na rede (como nós e conexões) pode impactar na eficiência geral.

A configuração da rede refletida no gráfico sugere que o sistema está otimizado para áreas com desafios geográficos significativos, como variações de altimetria, onde o controle de pressão é fundamental. Já a Figura 47 retrata a distribuição dos comprimentos de tubos menores que 100 metros na rede, fornecendo informações importantes sobre os ativos da rede, com nível de detalhe avançado. A distribuição não segue um padrão uniforme, apresentando variação significativa entre os comprimentos. Observa-se uma predominância de tubos nos intervalos de 20, 40, 60 e 80 metros, que são os mais frequentes. Esses picos sugerem que há uma padronização de trechos intermediários na rede, potencialmente para otimizar o gerenciamento de pressão e a cobertura de áreas urbanas.

Figura 47 – Distribuição dos comprimentos dos tubos menores de 100 m da rede de estudo



Fonte: O autor (2024)

Em contrapartida, comprimentos mais curtos, como entre 10 e 30 metros, ocorrem com menos frequência, o que pode indicar que esses tubos são usados em situações mais específicas, como conexões curtas ou ramificações secundárias. Tubos maiores, entre 90 e 100 metros, também têm uma frequência baixa, o que sugere que a rede privilegia segmentos mais curtos para facilitar o controle de pressão e reduzir as perdas por atrito.

A predominância de comprimentos moderados, especialmente entre 40 e 80 metros, reflete uma rede configurada para atender áreas urbanas ou densamente povoadas, onde há uma necessidade de conexões frequentes entre nós de distribuição. Essa configuração também pode ser ideal para evitar perdas significativas de pressão, que são mais comuns em tubos mais longos.

Além disso, a variação de comprimento pode indicar a existência de diferentes tipos de zonas na rede, cada uma com demandas e características de distribuição distintas.

A presença de muitos tubos curtos também pode indicar uma rede com alta densidade de nós e interseções, o que facilita o controle local de pressão, mas aumenta a complexidade de manutenção. Redes com muitas ramificações curtas podem apresentar mais pontos de vazamento ou falha, exigindo uma gestão mais atenta e regular.

Por outro lado, tubos mais longos tendem a ser usados em trechos principais ou para ligar áreas mais distantes, mas a baixa frequência desses tubos no gráfico sugere que a rede foi projetada de maneira a minimizar o uso de segmentos longos.

A variação nos comprimentos dos tubos pode estar associada à necessidade de adaptar a rede às condições geográficas desafiadoras, como altimetrias variáveis e terrenos irregulares. Tubos mais curtos podem ser usados em áreas com maior elevação ou declive, onde o controle de pressão é mais difícil, enquanto tubos mais longos podem atravessar áreas planas ou menos desafiadoras.

Em termos de impacto operacional, a variedade de comprimentos reflete uma estratégia de planejamento que busca equilibrar a eficiência e o controle de pressão com a facilidade de manutenção. Redes com muitos tubos curtos podem ser mais fáceis de controlar em termos de pressão, mas apresentam maior complexidade no que diz respeito à manutenção e monitoramento. O estudo dessa distribuição também pode ajudar a identificar pontos críticos de perda de pressão ou de ineficiência energética, oferecendo subsídios para melhorias no desempenho da rede como um todo.

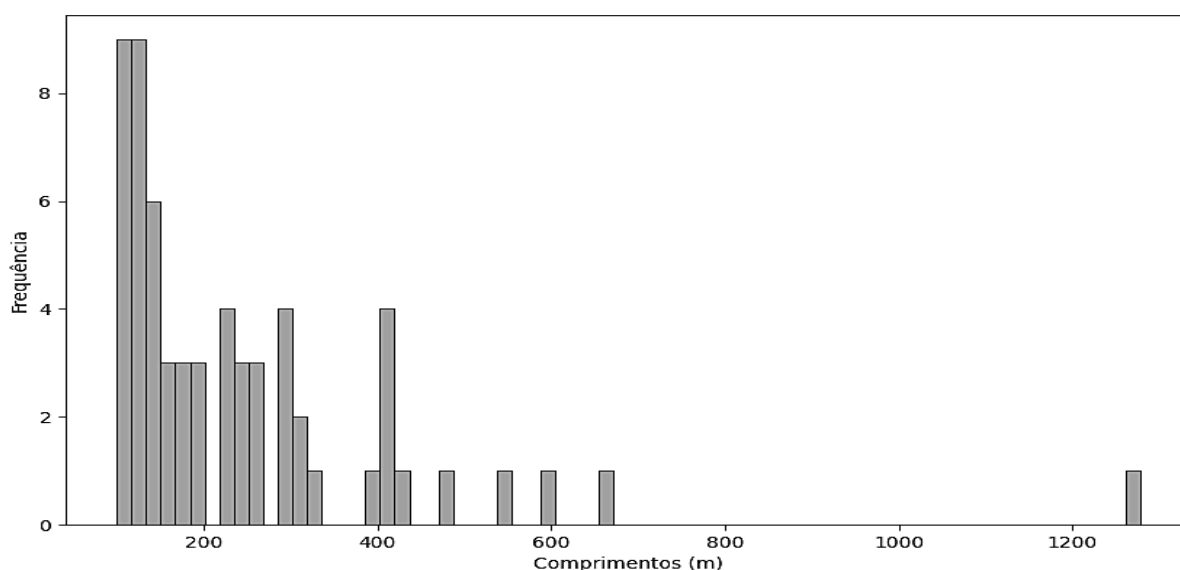
O gráfico da Figura 47 oferece um panorama detalhado da estrutura da rede de abastecimento de água, indicando uma predominância de tubos com comprimentos moderados e uma variação significativa que reflete uma adaptação às necessidades locais e às condições topográficas. Esses dados são fundamentais para otimizar o controle de pressão e a eficiência energética da rede, principalmente em regiões de geografia complexa, como montanhas. A análise detalhada dessa distribuição pode orientar futuras intervenções, tanto no desenho de novos segmentos quanto na manutenção e operação da rede existente.

Por outro lado, o gráfico da Figura 48 a seguir mostra a distribuição de tubos com comprimentos superiores a 100 metros em uma rede de abastecimento de água, revelando tendências e padrões importantes para a análise do desempenho e da eficiência hidráulica da rede.

Em uma análise mais detalhada, dentro dos trechos de até 100 m de comprimento podemos observar que os comprimentos estão bem distribuídos dentro do intervalo.

Este gráfico mostra a distribuição de tubos com comprimentos superiores a 100 metros em uma rede de abastecimento de água, revelando tendências e padrões importantes para a análise do desempenho e da eficiência hidráulica da rede. A maioria dos tubos longos se concentra na faixa de 100 a 200 metros, com um pico de frequência em torno de 100 metros, indicando que, mesmo entre os trechos maiores, há uma preferência por comprimentos relativamente curtos.

Figura 48 – Distribuição dos comprimentos dos tubos maiores de 100 m da rede de estudo



Fonte: O autor (2024)

À medida que o comprimento dos tubos aumenta, a frequência de ocorrência diminui, sugerindo que tubos mais longos são utilizados de forma esporádica e pontual na rede.

Tubos na faixa de 200 a 400 metros aparecem com menor frequência, e aqueles com mais de 400 metros são ainda menos comuns. Essa diminuição acentuada sugere que a rede foi projetada para evitar o uso excessivo de tubos longos, possivelmente para minimizar perdas de pressão e reduzir a complexidade da operação e manutenção.

Tubos de grandes comprimentos, como os que ultrapassam 400 metros, geralmente são encontrados em áreas menos densas ou onde há a necessidade de conectar zonas mais distantes do sistema.

Um ponto de destaque no gráfico da Figura 48, é a presença de um outlier significativo em 1200 metros, representando um tubo de comprimento excepcional dentro da rede. Esse tubo pode ter sido usado para contornar desafios geográficos, como a travessia de grandes áreas de difícil acesso ou com grandes variações de elevação, que são típicas em regiões montanhosas. Este caso específico sugere que, apesar da preferência por tubos mais curtos, há situações onde o uso de tubos mais longos se torna necessário para otimizar o desempenho da rede em áreas remotas ou para reduzir a necessidade de estações de bombeamento intermediárias.

A distribuição de tubos mais longos, embora limitada, implica na necessidade de considerar fatores como perdas de pressão ao longo desses trechos e a importância de sistemas de bombeamento adequados para garantir a eficiência operacional. Tubos longos, se mal planejados, podem exigir maiores investimentos em manutenção e em sistemas auxiliares, como bombas para manter a pressão adequada nos nós distantes. Por outro lado, tubos de 100 a 200 metros, que são predominantes, oferecem uma solução mais eficiente em termos de controle de pressão e operação de rotina.

Em termos de implicações para a operação da rede, essa configuração sugere que o sistema foi projetado para atender tanto áreas densamente povoadas, onde comprimentos menores são mais viáveis, quanto áreas mais distantes, que exigem tubos longos para manter a conectividade. A predominância de tubos curtos permite uma melhor gestão de pressão, enquanto os tubos longos, embora menos frequentes, desempenham um papel importante em ligar áreas mais afastadas da rede principal.

Essa variação nos comprimentos de tubos pode refletir as adaptações necessárias para lidar com elevações e terrenos irregulares.

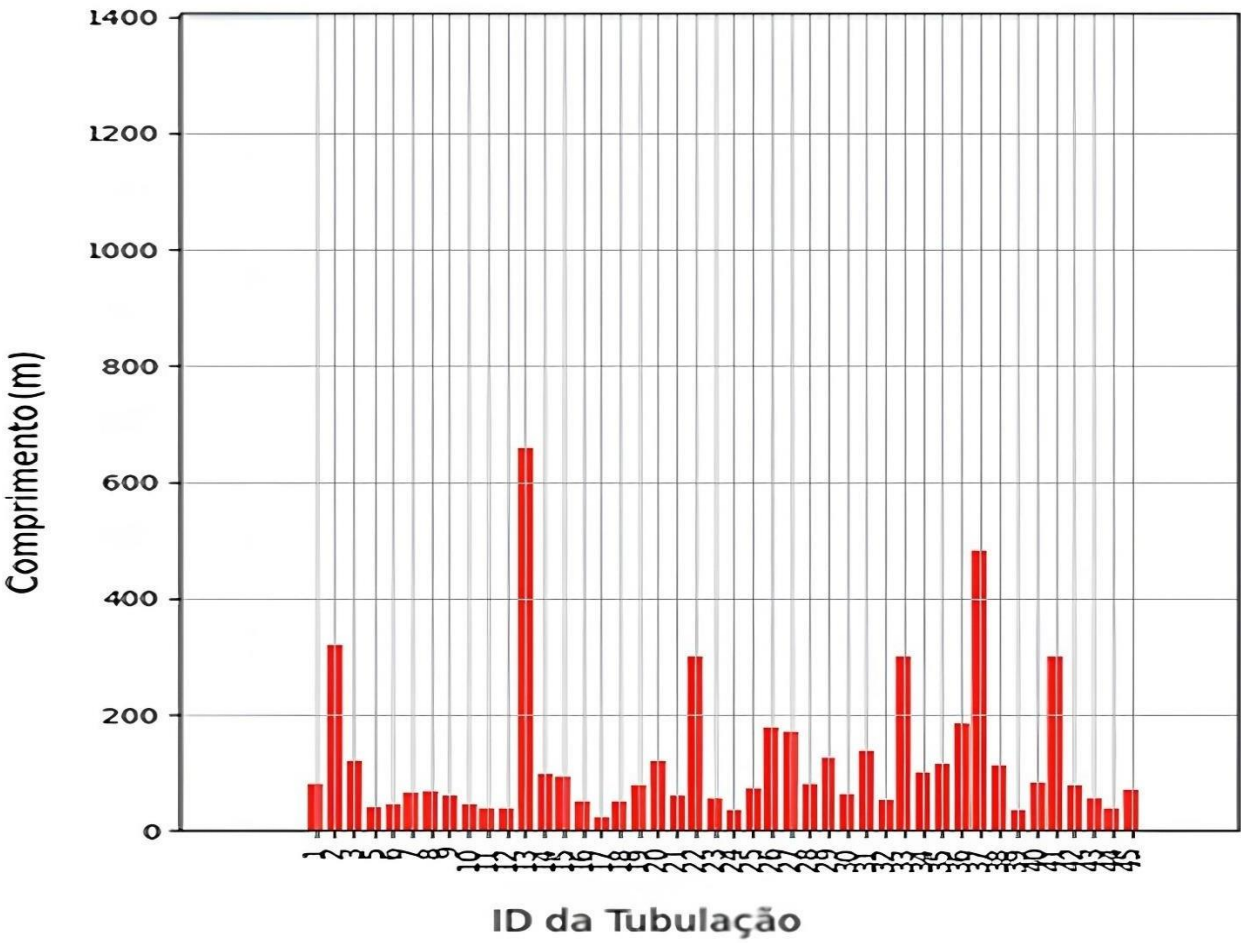
Tubos mais curtos são eficazes para o controle de pressão em terrenos acidentados, enquanto os mais longos são necessários para atravessar vales ou conectar áreas mais remotas sem a necessidade de estações intermediárias.

A análise dessa distribuição também pode ser utilizada para otimizar a rede, especialmente em relação à eficiência energética.

O gráfico da Figura 48, evidencia uma predominância de tubos moderadamente longos (100 a 200 metros), com uma queda acentuada na frequência de tubos mais longos, além de um outlier importante em 1200 metros. Esses dados sugerem uma rede que prioriza o equilíbrio entre eficiência hidráulica e necessidade de conectar áreas distantes, especialmente em regiões desafiadoras como áreas montanhosas. A interpretação dessas informações é crucial para ajustes e otimizações futuras, visando tanto a redução de perdas de pressão quanto a melhora na eficiência energética da rede.

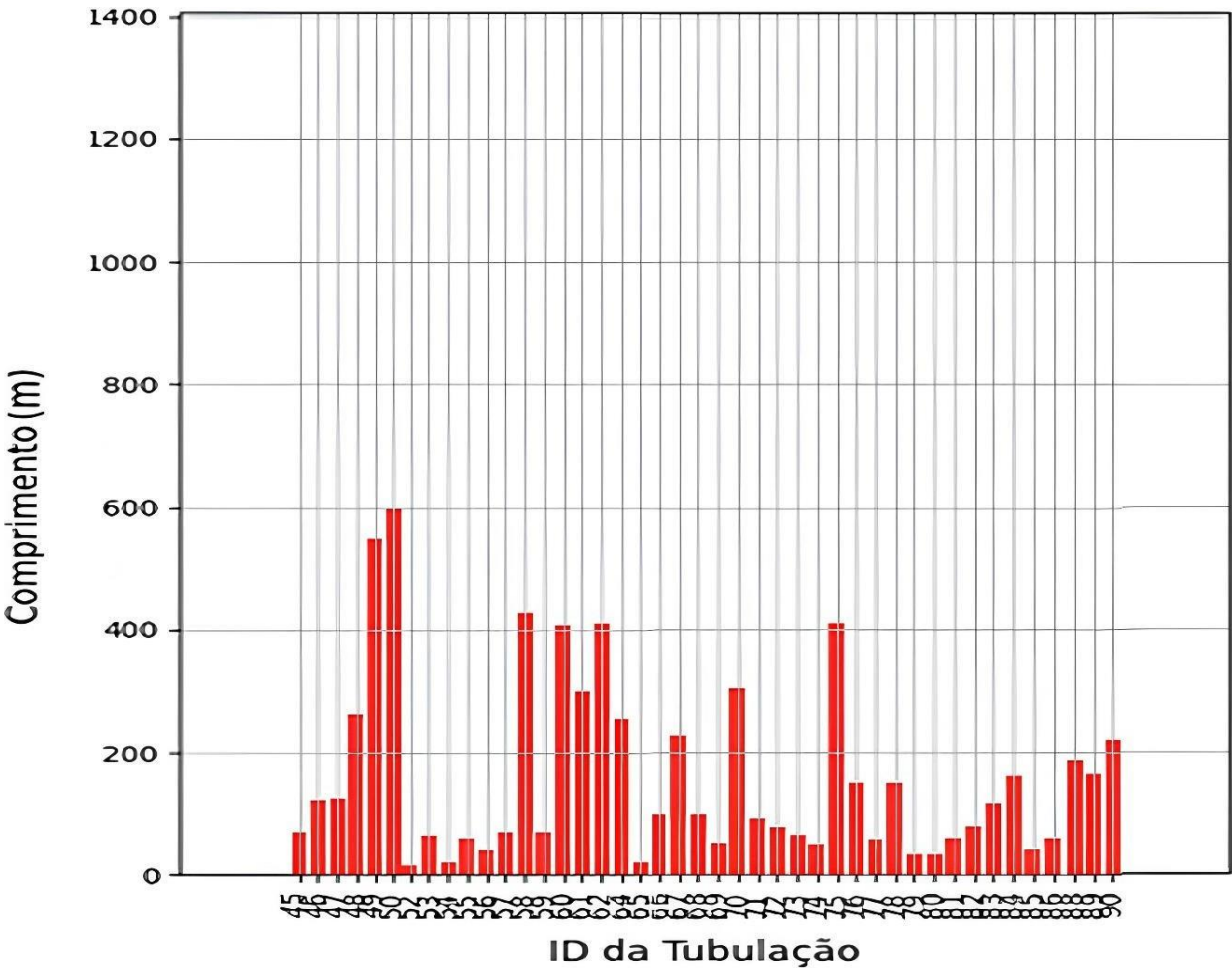
Com o intuito de representar as informações da rede de abastecimento de maneira mais clara, foram elaborados os gráficos das Figuras 49 e 50 e 51 a seguir, com o comprimento de todas as tubulações em relação ao seu ID, fornecido na exportação do arquivo epanet.inp. A inovação nesse gráfico está em apresentar todos os comprimentos simultaneamente através de gráficos simples e de fácil compreensão, sem ter que ficar procurando em mapas, ou arquivos .inp e .net do EPANET 2.0 ® de maneira desorganizada.

Figura 49 – Distribuição dos comprimentos dos tubos do ID 1 até o ID 45



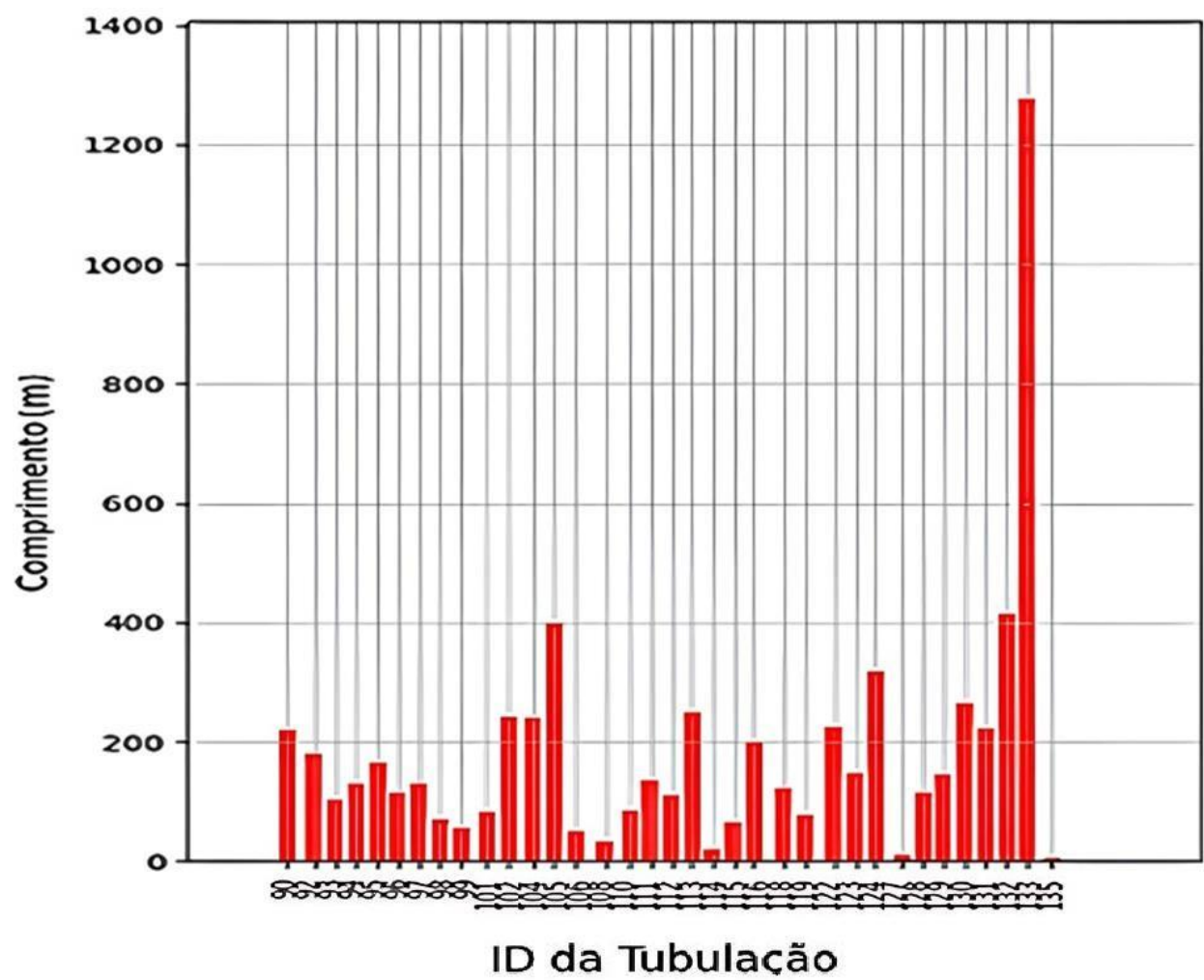
Fonte: O autor (2024)

Figura 50 – Distribuição dos comprimentos dos tubos do ID 45 até o ID 90



Fonte: O autor (2024)

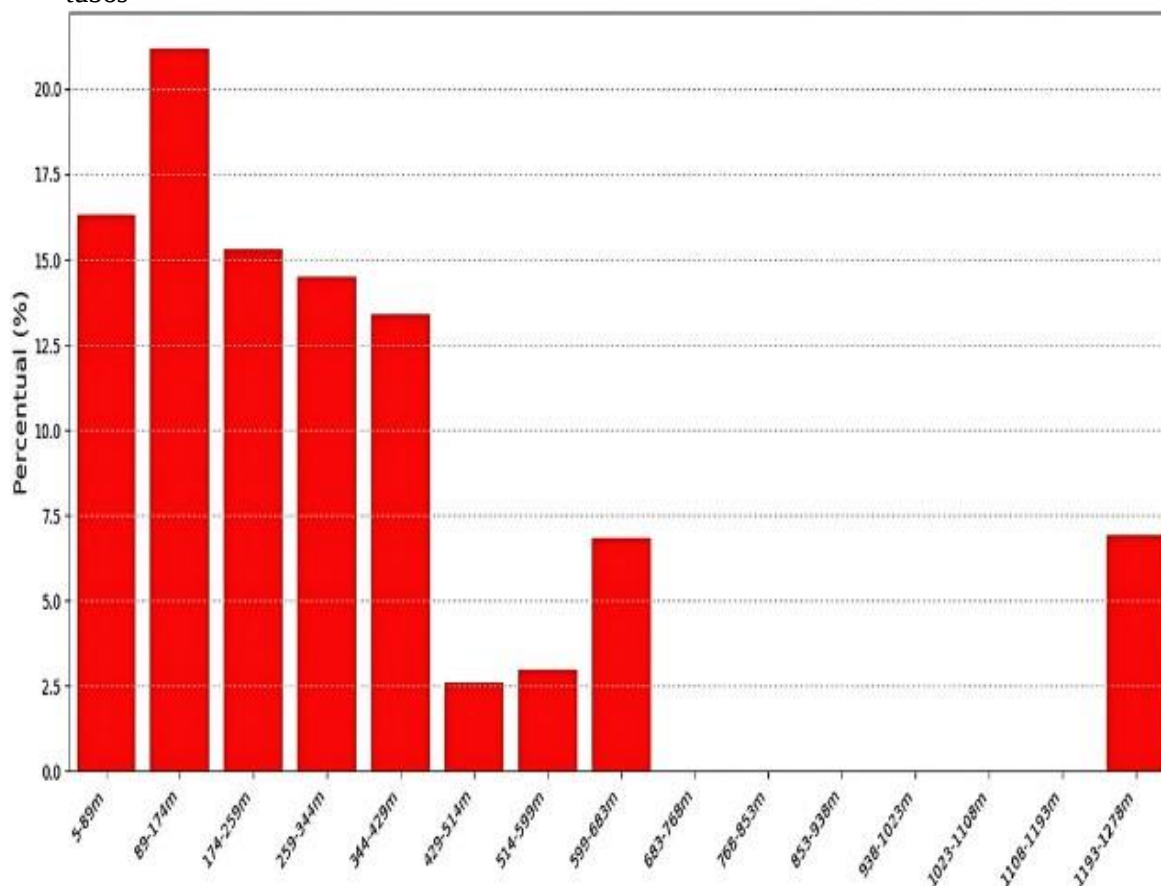
Figura 51 – Distribuição dos comprimentos dos tubos do ID 90 até o ID 135



Fonte: O autor (2024)

Para ter uma visão geral e completa dos tubos da rede, ainda faltava a distribuição percentual dos comprimentos dos tubos. Na Figura 52 a seguir podemos observar o histograma da distribuição percentual dos comprimentos dos tubos.

Figura 52 – Histograma da distribuição percentual dos comprimentos dos tubos



Fonte: O autor (2024)

O histograma apresentado na Figura 52, mostra a distribuição percentual dos comprimentos das tubulações de uma rede. Nele, podemos observar que a maior parte das tubulações está concentrada nas primeiras classes, especialmente nos intervalos entre 5-8 metros, 8-17 metros e 17-25 metros. Isso indica que a rede é composta predominantemente por trechos curtos, sugerindo uma estrutura projetada para atender demandas locais ou setores específicos. Esse comportamento é típico de redes que atendem regiões densamente ocupadas, como áreas urbanas, onde os pontos de consumo estão relativamente próximos entre si. Por outro lado, classes intermediárias e mais longas possuem menor representatividade, com percentuais que diminuem gradualmente, até voltar a crescer na última classe, que compreende tubulações de 119-128 metros.

A concentração de trechos curtos sugere um sistema hidráulico mais segmentado, o que favorece a manutenção e o controle operacional. Redes com essas características tendem a ter menores perdas de carga ao longo dos trechos, pois as distâncias mais curtas limitam o atrito interno e, consequentemente, a queda de pressão.

Além disso, trechos curtos permitem maior flexibilidade na expansão da rede e uma resposta mais eficiente a problemas, como vazamentos ou bloqueios, uma vez que impactam áreas menores e facilitam o isolamento de setores específicos durante as manutenções.

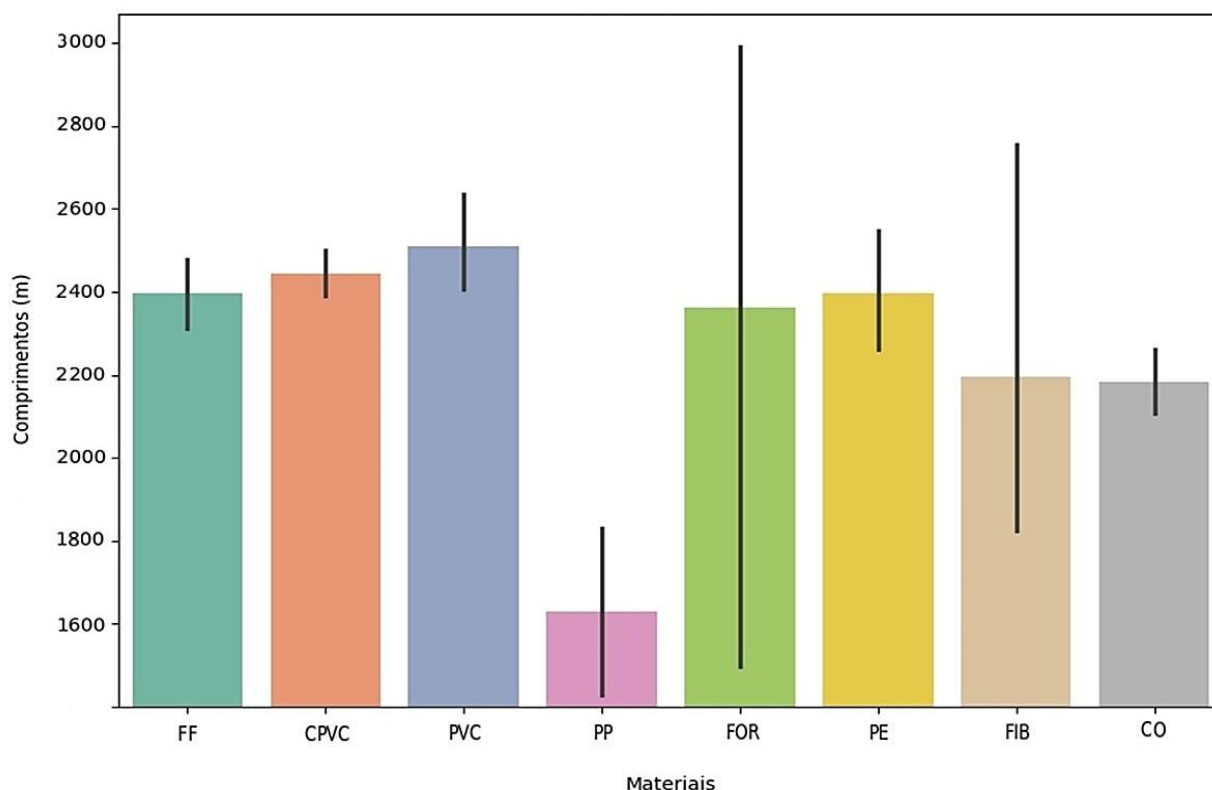
A presença de algumas tubulações longas, embora com menor frequência, pode representar segmentos de transporte principal ou áreas específicas de distribuição onde as demandas estão mais afastadas. Esses trechos, por serem mais extensos, podem gerar maiores perdas localizadas de carga e exigem dimensionamento cuidadoso, considerando tanto o diâmetro das tubulações quanto os reforços de pressão necessários para garantir um abastecimento eficiente. Além disso, tubulações longas costumam ser mais vulneráveis a oscilações de pressão e, por isso, demandam análises hidráulicas mais detalhadas, especialmente em regiões de alta vazão ou terrenos irregulares.

A classe modal, correspondente ao intervalo de 8-17 metros, apresenta o maior percentual, aproximadamente 20%. Isso reforça a ideia de uma predominância de trechos curtos na rede, algo que é vantajoso em termos de custos de instalação e manutenção, uma vez que tubulações menores são mais econômicas e fáceis de substituir em caso de falhas. Entretanto, é importante considerar que a diversidade de comprimentos, mesmo com a predominância de trechos curtos, pode indicar uma rede com diferentes níveis de hierarquia, onde trechos mais longos podem ser responsáveis por conectar setores ou abastecer pontos mais distantes.

Do ponto de vista hidráulico, a distribuição apresentada sugere uma rede eficiente para áreas de alta densidade, mas que também pode atender a demandas específicas em regiões menos concentradas devido à presença de tubulações longas. Essa configuração permite um desempenho equilibrado entre setores de consumo e transporte de água em trechos mais extensos. No entanto, para garantir o desempenho ideal, é essencial monitorar os trechos mais longos, que podem se tornar gargalos operacionais caso não sejam projetados adequadamente.

Por fim, a análise geral do gráfico aponta que a rede parece ser projetada para maximizar eficiência em regiões de alta densidade populacional ou industrial, aproveitando a segmentação de trechos curtos para reduzir perdas e facilitar a manutenção. Ainda assim, os trechos mais longos presentes na distribuição demandam atenção especial em relação à pressurização e ao controle de perdas, garantindo que o abastecimento seja uniforme e confiável em toda a extensão da rede. Os dados gerais da rede são: comprimento total de 17, 989 km, 135 trechos e 116 nós e 4 reservatórios Marcondes (2019). Neste contexto, em outra análise importante, foi realizado um levantamento dos principais materiais presentes nos 17,989 km de extensão da rede de abastecimento, conforme mostra a Figura 53.

Figura 53 – Distribuição dos comprimentos dos tubos de acordo com cada material



Fonte: O autor (2024)

A Figura 53, ilustra a distribuição dos materiais de tubulação utilizados em uma rede de abastecimento de água, destacando o comprimento total de tubos fabricados com diferentes materiais, como PVC (Policloreto de polivinila), CPVC (Cloroeto de polivinila clorado), FF (Ferro fundido), PE (Polietileno), FIB (Fibra de vidro), PP (Polipropileno), FOR (Ferro fundido dúctil) e CO (Cobre).

O Material mais presente na rede é o PVC com aproximadamente 2500 metros de tubo. A linha vertical nas barras representam o desvio padrão dos dados, seja positivo ou negativo. Cada barra no gráfico representa o comprimento total dos tubos para cada material, além de incluir barras de erro que indicam a variação nos comprimentos.

Os materiais mais utilizados na rede são PVC, FF e CPVC, com comprimentos variando de 2400 a 2600 metros, refletindo sua popularidade devido à durabilidade, resistência à corrosão e facilidade de instalação. O PVC, por exemplo, é amplamente utilizado em redes urbanas, enquanto o ferro fundido é preferido em trechos com maior pressão, onde sua robustez é um diferencial. Materiais como PE, FIB e CO são utilizados de forma moderada, com comprimentos variando entre 2000 e 2400 metros.

O PE é reconhecido por sua flexibilidade e resistência à corrosão, sendo ideal para tubulações subterrâneas, enquanto a fibra de vidro e o cobre, apesar de mais pesados e complexos de instalar, oferecem alta durabilidade e resistência mecânica, sendo usados em trechos de grandes diâmetros ou em ambientes mais agressivos. O PP, por outro lado, aparece como o material menos utilizado, com menos de 1600 metros de tubos instalados, o que indica seu uso limitado em trechos específicos, como ramificações menores ou em áreas de baixa demanda, devido à sua menor resistência em comparação com outros materiais.

O FOR se destaca por apresentar a maior variação de comprimento, com alguns trechos superando 2800 metros, enquanto outros são significativamente mais curtos.

Esse material é amplamente empregado de forma estratégica em diferentes pontos da rede, especialmente em locais que demandam maior resistência à pressão ou enfrentam condições geográficas adversas, como terrenos montanhosos. A flexibilidade e a durabilidade do ferro dúctil tornam-no ideal para redes de alta pressão, particularmente em áreas com grandes variações de elevação.

A variação nos comprimentos sugere que materiais como ferro dúctil e polietileno são utilizados em trechos longos e curtos conforme a necessidade da rede, enquanto o polipropileno tem uso mais padronizado. Essas variações influenciam diretamente a operação e a manutenção da rede. Materiais como ferro fundido e ferro dúctil exigem maior atenção em termos de manutenção, mas garantem durabilidade, enquanto materiais plásticos, como PVC e CPVC, são mais fáceis de instalar e manter, sendo adequados para trechos com menor pressão.

A escolha dos materiais é fundamental para lidar com pressões variáveis e condições geográficas adversas. Tubos de ferro dúctil ou cobre podem ser preferíveis para suportar altas pressões em áreas com elevações significativas, enquanto materiais como PVC são mais adequados para trechos com menos desafios topográficos. A variação dos materiais também pode impactar a eficiência energética da rede, já que diferentes materiais possuem distintas capacidades de resistência à pressão e às variações de vazão.

A Figura 53 revela uma rede que utiliza uma variedade de materiais para equilibrar eficiência, durabilidade e custo. Há um predomínio de PVC, CPVC e ferro fundido em trechos maiores, enquanto PP e fibra de vidro são aplicados em casos específicos.

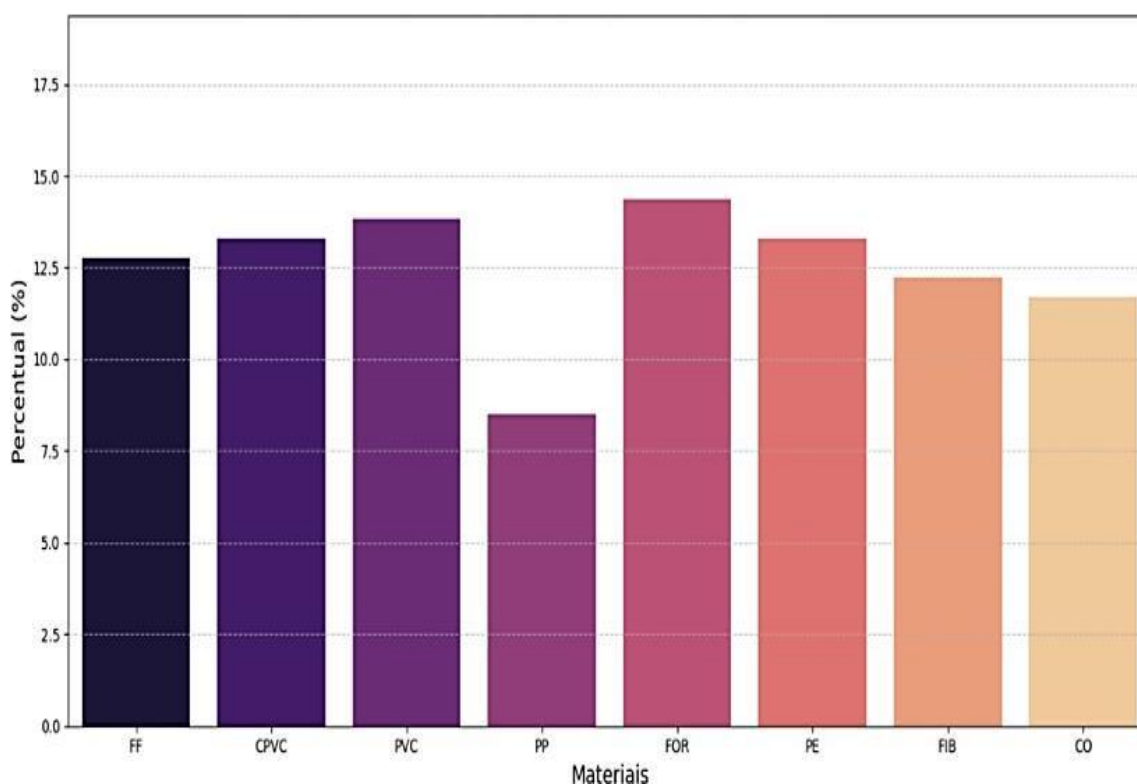
A variação de comprimento entre os materiais indica uma adaptação da rede às condições operacionais e geográficas, com o ferro dúctil sendo amplamente utilizado em áreas que requerem maior resistência.

A análise dessa distribuição de materiais dos tubos é essencial para a otimização da rede, pois permite a escolha de materiais que maximizem a eficiência hidráulica e minimizem os custos de manutenção, especialmente em regiões com desafios topográficos como montanhas.

A análise deste gráfico revela uma rede composta por tubos de diferentes idades, refletindo a instalação gradual ou substituições ao longo dos anos.

Em outra análise importante, no gráfico da Figura 54 é possível visualizar a porcentagem total da rede em relação ao seu comprimento em função do seu material.

Figura 54 – Porcentagem total do comprimentos em função do material



Fonte: O autor (2024)

Do ponto de vista estatístico, observamos que os materiais FF, CPVC, PVC, FOR e PE apresentam percentuais similares, na faixa de 12,5% a 14%. Isso sugere que esses materiais são amplamente utilizados e desempenham papéis significativos na rede.

Por outro lado, o material PP apresenta o menor percentual, com menos de 10%, indicando um uso mais restrito ou específico, possivelmente para aplicações onde suas propriedades mecânicas ou químicas são mais adequadas. Já os materiais FIB e CO possuem percentuais intermediários, entre 10% e 12%, o que sugere que são importantes, mas não dominantes.

Na análise hidráulica, a diversidade de materiais indica que a rede foi projetada para atender diferentes demandas e condições de operação. Materiais como CPVC, PVC e PE são conhecidos por sua resistência à corrosão e facilidade de instalação, o que os torna ideais para redes de água potável ou sistemas que exigem alta durabilidade em ambientes agressivos. O uso significativo de FF indica que há trechos da rede que requerem materiais mais robustos e resistentes à pressão, geralmente em áreas onde se transportam maiores volumes de água ou onde há alta pressão estática. Já os materiais FIB e CO podem ser utilizados em trechos específicos, como grandes linhas de transporte ou redes de drenagem.

A baixa utilização de PP pode estar relacionada às suas propriedades mecânicas, que, embora boas, são menos adequadas para situações de alta pressão ou temperaturas extremas. Esse material pode ser utilizado em redes secundárias ou setores com menores exigências hidráulicas. Por outro lado, a significativa presença de FOR aponta para trechos onde se busca maior resistência estrutural, mas pode também indicar maiores custos de manutenção devido à suscetibilidade à corrosão, especialmente se o material não for tratado adequadamente.

Do ponto de vista da durabilidade e custo, materiais como PVC, PE e CPVC oferecem uma boa relação custo-benefício, sendo fáceis de instalar e de baixa manutenção. Já o FF e o FOR, embora mais caros e suscetíveis a problemas como corrosão, são fundamentais para aplicações em alta pressão. A utilização de materiais compostos como fibra e concreto em percentuais intermediários indica que a rede pode conter grandes trechos de transporte principal ou áreas de drenagem onde a resistência estrutural é crucial.

Hidraulicamente, a Figura 54 revela a complexidade e o planejamento da rede, que parece ter sido projetada para atender a diferentes demandas com base nas características físicas e químicas dos materiais.

Materiais mais flexíveis, como PVC e PE, permitem fácil adaptação a diferentes condições de terreno, enquanto materiais rígidos, como FF e CO, são ideais para trechos estáveis ou com alta pressão.

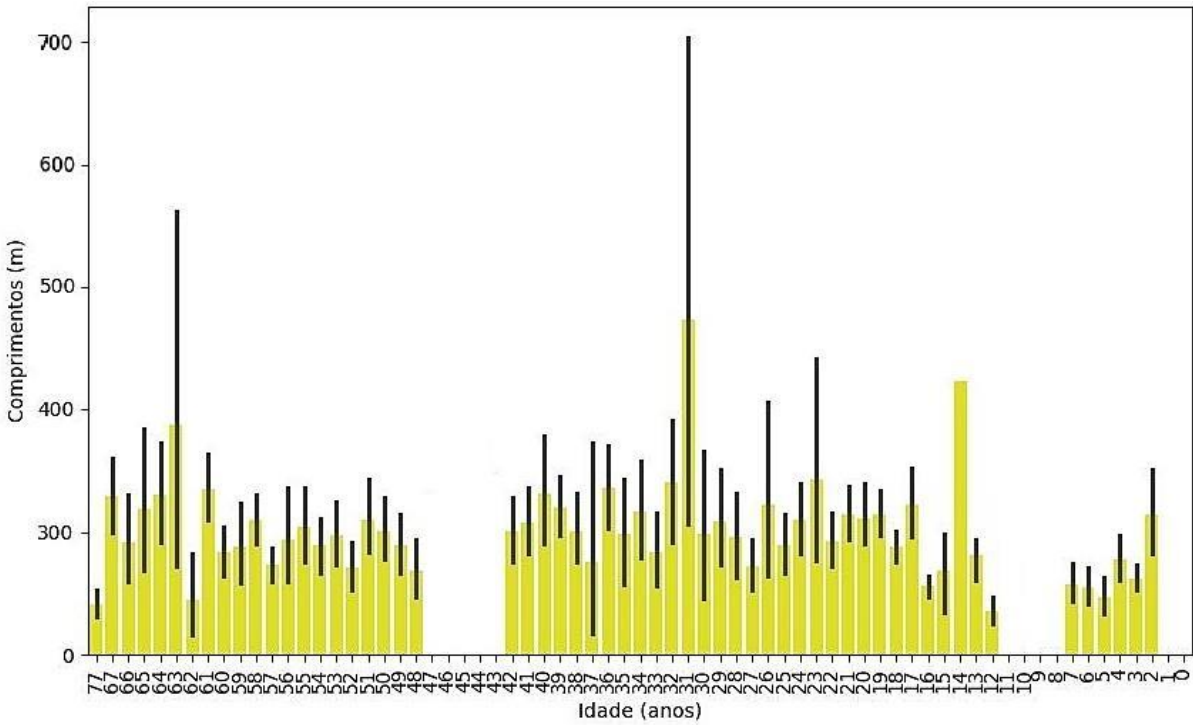
A análise desse da Figura 54 também evidencia a importância da compatibilidade entre os materiais. Redes com muitos materiais diferentes podem exigir mais atenção em conexões e transições para evitar perdas, vazamentos ou falhas devido a diferentes coeficientes de expansão térmica ou resistências mecânicas.

Além disso, a presença significativa de materiais como CPVC e PE indica que a rede é resistente à corrosão e pode operar bem em ambientes químicos agressivos, como áreas industriais.

A distribuição apresentada no gráfico sugere um equilíbrio no uso dos materiais, com alguns (como PVC e CPVC) desempenhando papéis mais versáteis e outros (como FF e FOR) sendo utilizados para funções mais específicas. A baixa utilização de PP, por sua vez, pode ser uma indicação de limitações em sua aplicação prática na rede analisada. Em suma, o gráfico reflete uma rede projetada com cuidado para atender diferentes necessidades operacionais e hidráulicas, otimizando custos e desempenho a longo prazo.

Em outra análise fundamental, na Figura 55, foi feita uma distribuição dos comprimentos dos tubos em função da idade. É muito importante conhecer a idade dos tubos para prever a rugosidade, gestão de manutenção, probabilidade de falhas etc.

Figura 55 – Distribuição dos comprimentos dos tubos em função da idade em anos de uso



Fonte: O autor (2024)

Podemos perceber na Figura 55, que a distribuição dos tubos se concentra em faixas etárias específicas, tendo três intervalos sem dados sendo de 0 até 2 anos, de 7 até 12 anos e de 42 até 48 anos. Existem dois períodos intermitentes, sem nenhum trecho com as idades entre 8 e 11 anos e entre 43 e 47 anos.

As linhas verticais que surgem sobre os valores representando o desvio padrão fornecem uma perspectiva adicional sobre a variabilidade da idade dos tubos. Um desvio padrão elevado em determinadas faixas etárias pode indicar uma maior heterogeneidade na idade dos tubos, sugerindo que, além da idade média, existe uma diversidade considerável entre as tubulações instaladas, o que pode ter implicações significativas para a gestão de manutenção e substituição. A idade dos tubos varia amplamente, com uma distribuição relativamente uniforme entre trechos de tubos novos e antigos, o que sugere que a rede passou por várias fases de expansão ou renovação ao longo do tempo.

Observa-se a presença de picos significativos em certas faixas etárias, com alguns comprimentos de tubo ultrapassando 500 metros, o que sugere que grandes partes da rede foram instaladas em períodos específicos, provavelmente durante projetos de expansão da infraestrutura.

Esses picos podem indicar áreas da rede que ainda não passaram por renovação ou modernização, levantando a necessidade de uma atenção especial em termos de manutenção preventiva.

Essas seções mais antigas da rede, com grandes extensões de tubos, podem estar em condições de maior deterioração, levando a riscos de vazamentos, incrustações ou até mesmo falhas estruturais.

A maior parte dos tubos da rede, conforme mostrado no gráfico, apresenta comprimentos moderados, entre 300 e 400 metros, o que indica que a rede é composta por trechos de vida útil intermediária. A análise dessas seções pode ser útil para identificar prioridades de substituição ou reparos, principalmente nas áreas onde a idade dos tubos pode começar a comprometer a eficiência e o desempenho geral do sistema. As barras de erro no gráfico indicam a variação na estimativa dos comprimentos de tubos em cada faixa etária, possivelmente refletindo incertezas no histórico de instalação dos tubos mais antigos ou variações no método de coleta de dados.

Uma característica importante a ser observada é a relação entre a idade dos tubos e o desempenho da rede.

Tubos mais antigos tendem a apresentar maiores problemas de manutenção e desempenho, especialmente devido ao desgaste natural, à corrosão e às incrustações internas, que aumentam a rugosidade e reduzem o fluxo eficiente de água. Esse aumento na resistência ao fluxo pode exigir maior pressão de bombeamento, resultando em maior consumo de energia e uma operação menos eficiente do sistema.

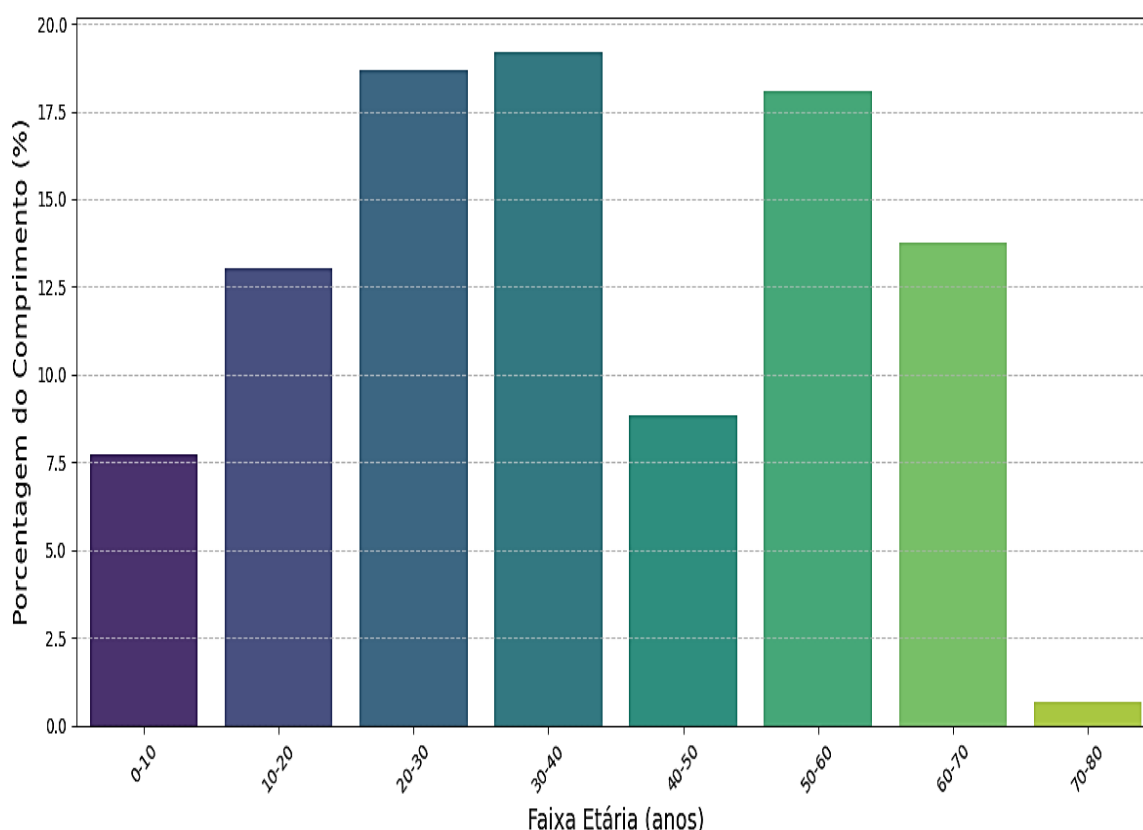
Portanto, os tubos mais antigos podem não ser adequados para lidar com as condições operacionais atuais, especialmente se a rede foi expandida ou modificada desde a instalação original. Especialmente em regiões montanhosas, a idade dos tubos tem um impacto direto na eficiência do sistema. Redes em áreas de elevação variável enfrentam desafios significativos em termos de controle de pressão e resistência dos materiais à topografia. Tubos mais antigos podem não ter sido projetados para suportar as exigências atuais de pressão e, por isso, são candidatos à substituição ou reforço. A identificação de trechos de rede que precisam ser renovados com base em sua idade permitirá uma melhoria tanto no desempenho hidráulico quanto na eficiência energética do sistema.

A interpretação desses dados pode ser utilizada para planejar uma manutenção proativa, priorizando os trechos de tubos mais antigos e mais críticos para evitar falhas.

Além disso, redes mais antigas tendem a enfrentar um risco maior de vazamentos, o que pode resultar em perdas significativas de água e custos mais elevados com reparos emergenciais.

Dessa forma, a análise da idade da rede não apenas otimiza o desempenho do sistema, mas também reduz os custos de operação e manutenção a longo prazo. Para completar a análise, na Figura 56 a seguir, foi feita a distribuição percentual dos comprimentos dos tubos em função da faixa etária.

Figura 56 – Distribuição percentual dos comprimentos dos tubos pela idade



Fonte: O autor (2024)

A Figura 56, apresenta a distribuição percentual do comprimento total de tubulações por faixa etária, indicando a relação entre a idade das tubulações e sua representatividade no total da rede. Esse tipo de análise é crucial para avaliar a durabilidade, desempenho e a necessidade de manutenção ou substituição de diferentes segmentos da rede. Com base nos dados apresentados, é possível traçar diversas inferências estatísticas e implicações práticas para a operação hidráulica da rede.

Observamos que as faixas etárias de 30-40 anos, 40-50 anos e 50-60 anos representam os maiores percentuais, alcançando cerca de 17%-18% cada uma. Isso indica que uma parcela significativa da rede tem idade intermediária, podendo estar ainda em bom estado de operação dependendo do material utilizado. Tubulações com essa faixa etária geralmente estão na fase de transição entre vida útil funcional e potencial desgaste acelerado, especialmente se os materiais não forem resistentes à corrosão ou outras agressões ambientais.

A faixa de 0-10 anos, com um percentual inferior a 10%, demonstra que apenas uma pequena parte da rede é relativamente nova. Isso pode indicar que investimentos recentes em infraestrutura de tubulações foram limitados ou que houve substituições pontuais, sem renovação significativa de grandes extensões. Já a faixa etária de 10-20 anos possui uma proporção maior, próxima de 13%, o que sugere que houve um período de maior renovação ou expansão da rede há uma ou duas décadas.

No entanto, a presença de um percentual baixo na faixa de 70-80 anos, inferior a 5%, revela que existem ainda tubulações muito antigas na rede. Este é um sinal de alerta, já que tubulações com idade tão avançada geralmente apresentam problemas estruturais severos, como vazamentos, obstruções e risco de colapsos. Esses trechos devem ser priorizados em planos de manutenção e substituição.

Do ponto de vista hidráulico, redes com grande parte de sua extensão em faixas intermediárias (30-60 anos) podem apresentar eficiência operacional reduzida devido ao acúmulo de incrustações internas, aumentando a rugosidade e, conseqüentemente, as perdas de carga. Além disso, materiais mais antigos, como ferro fundido ou aço, podem sofrer com corrosão, comprometendo tanto a qualidade da água quanto a integridade da rede. Por outro lado, trechos mais novos (0-20 anos) têm maior probabilidade de manter bom desempenho hidráulico, com menores perdas de pressão e maior resistência a danos.

A presença de tubulações muito antigas (acima de 70 anos) representa um desafio para a operação hidráulica, já que essas partes da rede são mais suscetíveis a falhas e podem se tornar gargalos, especialmente em áreas de alta demanda. Substituir esses trechos não apenas reduz o risco de interrupções, mas também melhora o desempenho geral da rede, uma vez que materiais mais modernos têm características hidráulicas superiores e maior durabilidade.

Estatisticamente, a distribuição mostra uma rede que passou por ciclos de construção e renovação ao longo do tempo, com uma concentração de tubulações construídas em um período de expansão significativa há 30-60 anos. Essa característica é comum em cidades ou regiões que experimentaram crescimento urbano acelerado em meados do século passado. No entanto, a falta de renovação recente, evidenciada pelos baixos percentuais de tubulações na faixa de 0-10 anos, pode indicar um atraso em investimentos em infraestrutura, o que pode levar a problemas mais graves no futuro.

A análise da Figura 56, reforça a importância de um plano de gerenciamento de ativos eficiente, que priorize a substituição de tubulações mais antigas e incorpore tecnologias modernas nos novos trechos. Um equilíbrio na renovação e manutenção da rede é essencial para garantir o desempenho hidráulico, minimizar custos operacionais e evitar colapsos em sistemas críticos. A distribuição apresentada sugere que, embora a rede ainda seja funcional, há um ponto de inflexão próximo, em que a necessidade de renovação será mais urgente.

Com o intuito de representar as informações da rede de abastecimento de maneira mais clara, Os gráficos apresentados nas Figuras 57, 58 e 59 a seguir mostram a distribuição dos diâmetros das tubulações utilizadas em uma rede de abastecimento de água, com o diâmetro das tubulações no eixo vertical (em milímetros) e o ID de cada tubulação no eixo horizontal.

Esse tipo de gráfico permite uma visualização organizada e eficiente das variações de diâmetro ao longo de toda a rede, ajudando a identificar padrões, possíveis gargalos ou áreas que precisem de atenção

Figura 57 – Distribuição dos diâmetros das tubulações do ID 1 até o ID 45

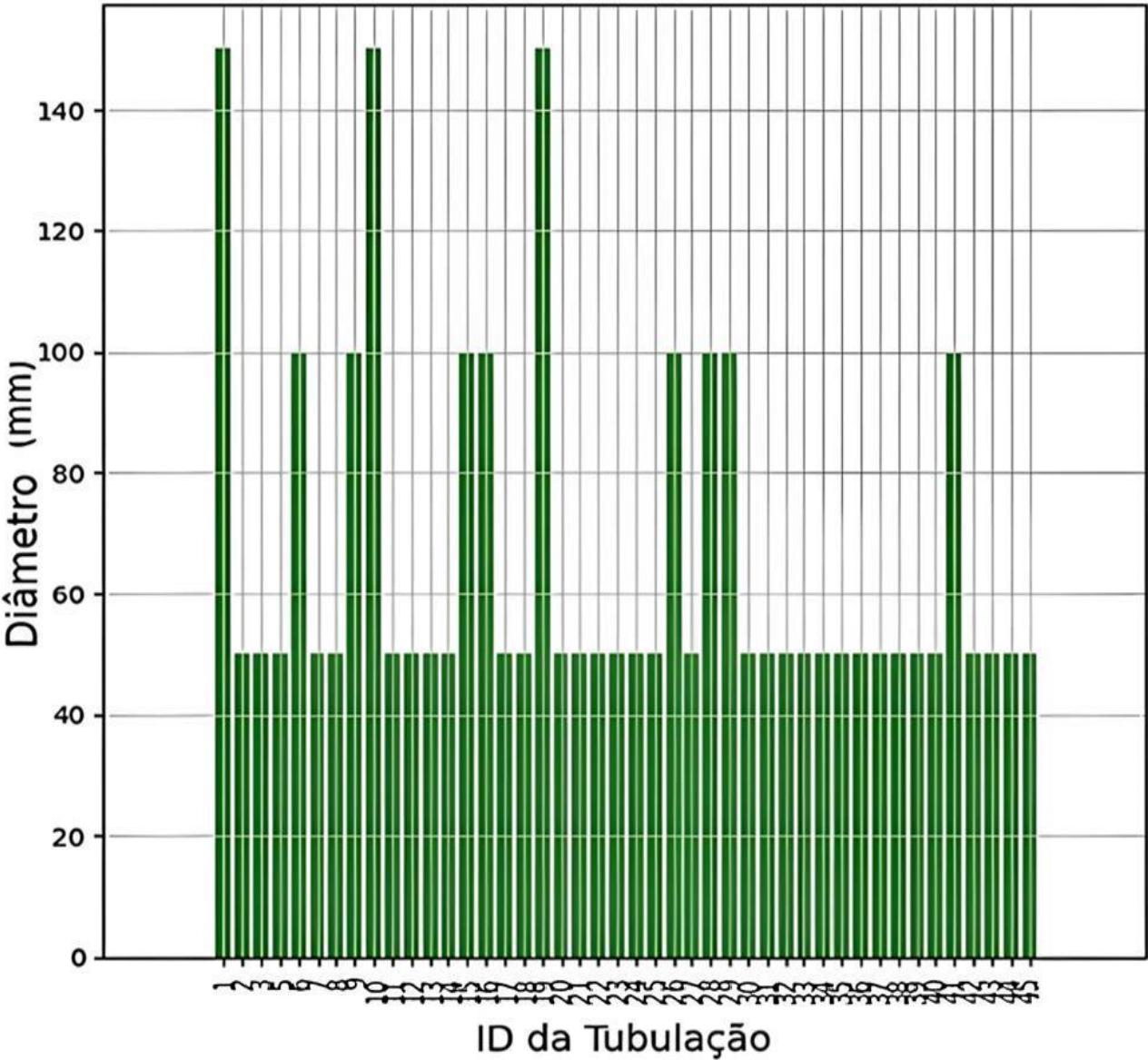
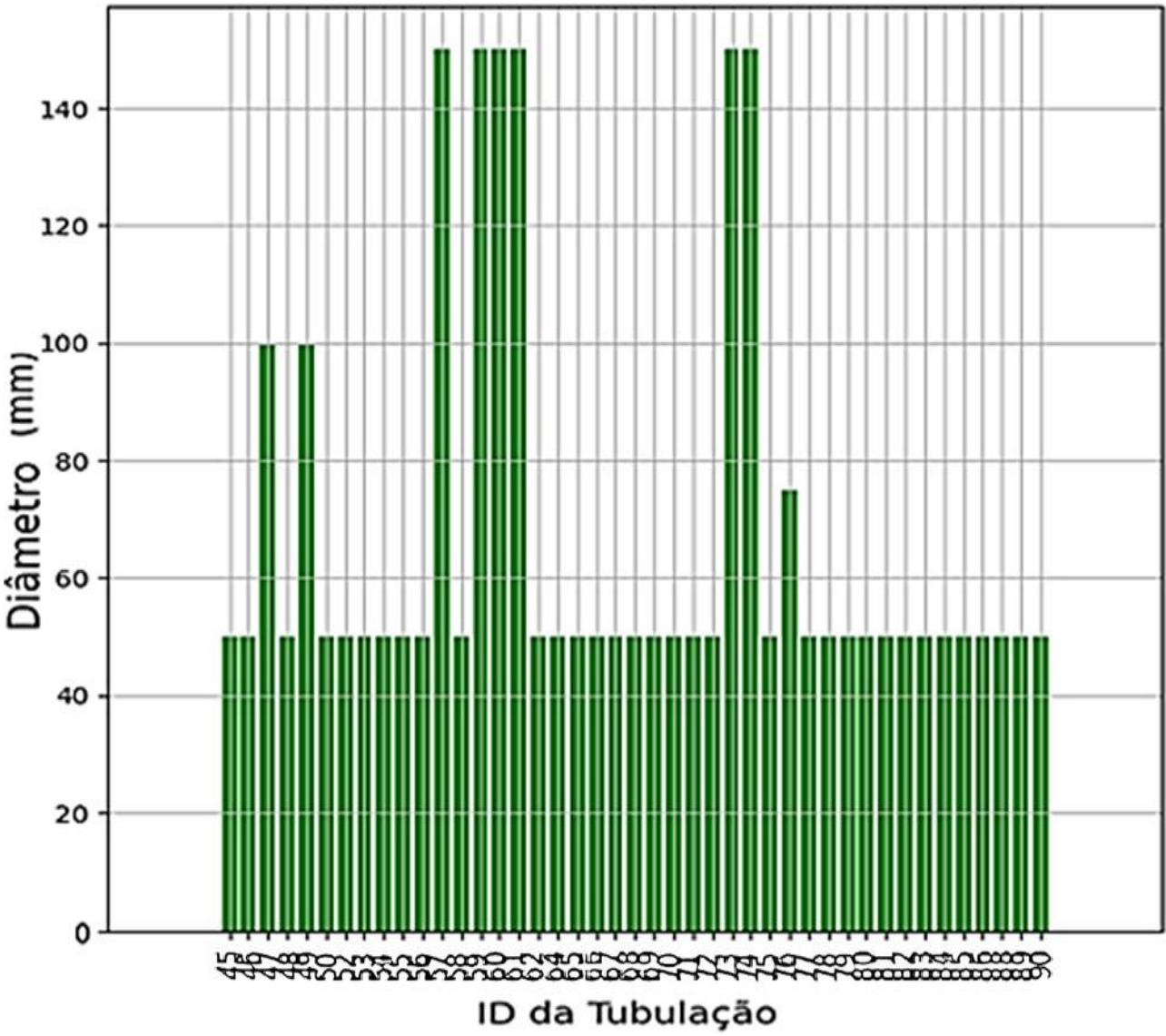
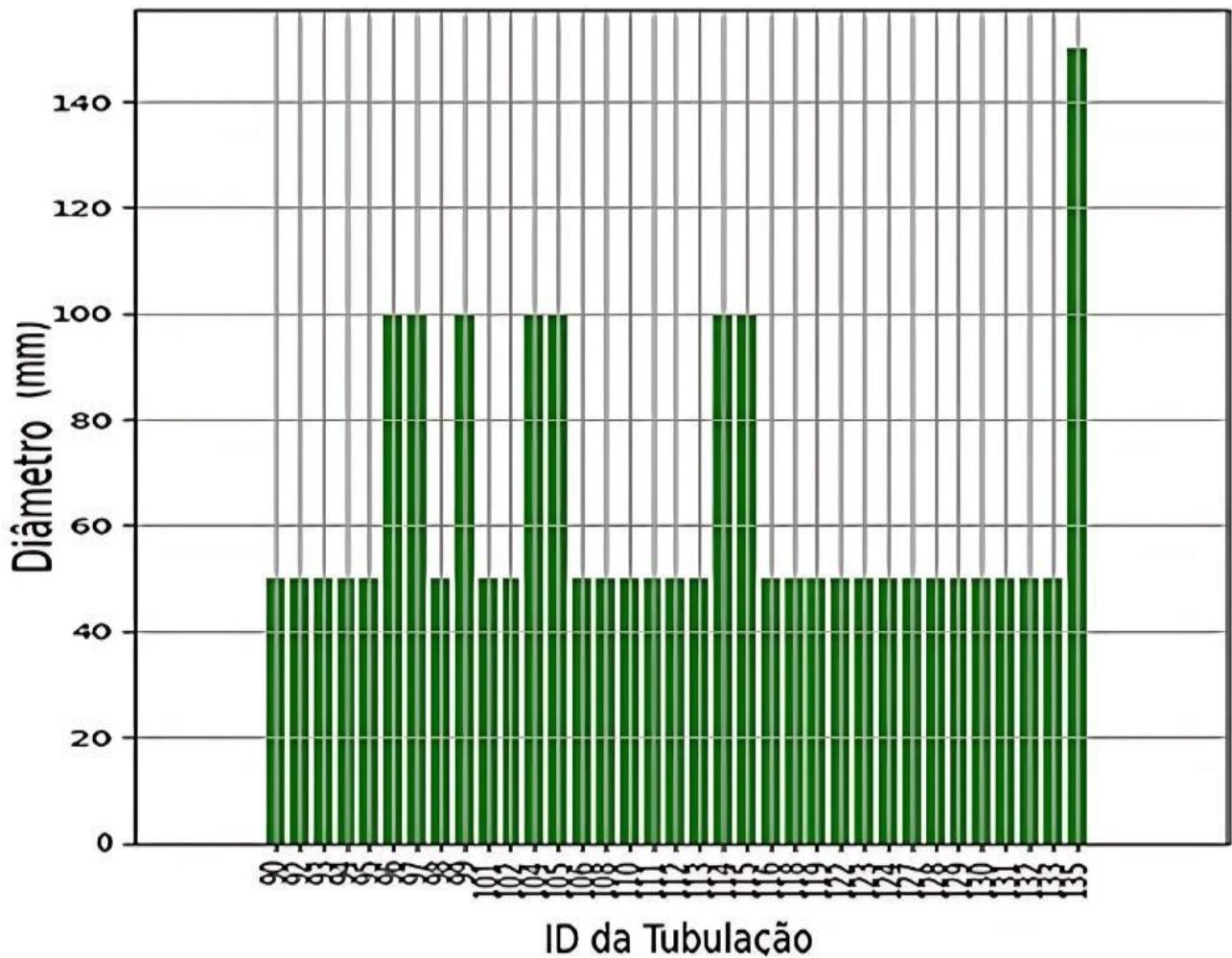


Figura 58 – Distribuição dos diâmetros das tubulações do ID 45 até o ID 90



Fonte: O autor (2024)

Figura 59 – Distribuição dos diâmetros das tubulações do ID 90 até o ID 135



Fonte: O autor (2024)

Essa visualização facilita a análise comparativa entre diferentes tubulações, permitindo identificar rapidamente quais possuem maiores ou menores diâmetros. O diâmetro das tubulações tem impacto direto na capacidade de transporte de água. Tubulações com diâmetros maiores tendem a transportar maiores volumes de água, enquanto tubulações menores podem representar gargalos em áreas críticas. As Figuras 57, 58 e 59 revelam uma variação significativa nos diâmetros ao longo da rede, o que reflete um planejamento cuidadoso para atender às diferentes demandas de água, tanto em trechos principais quanto em ramificações menores. A maior parte das tubulações apresenta diâmetros entre 40 e 60 mm, que são comuns em redes secundárias ou ramificações finais destinadas ao abastecimento residencial ou áreas de baixa demanda.

Tubulações com diâmetros menores, como de 40 mm, são mais econômicas e fáceis de instalar, sendo usadas principalmente em setores com menor necessidade de transporte de grandes volumes de água.

Além disso, o gráfico mostra a presença de várias tubulações com diâmetros maiores, entre 80 mm e 150 mm, com destaque para tubulações de 100 mm e alguns picos em 150 mm, que indicam trechos principais da rede ou linhas de distribuição que atendem a áreas com maior densidade populacional ou demandas elevadas, como zonas comerciais ou industriais. Essas tubulações de diâmetros maiores são essenciais para garantir o transporte eficiente de grandes volumes de água ao longo da rede, reduzindo as perdas de pressão e otimizando a distribuição para diferentes setores.

Os picos em diâmetros maiores, especialmente em 100 mm e 150 mm, sugerem que essas tubulações são utilizadas em linhas principais, responsáveis por transportar grandes quantidades de água para diversos pontos da rede, onde são redistribuídas por tubulações com diâmetros menores. Esse padrão de distribuição de diâmetros é típico de redes bem planejadas, em que as tubulações principais atendem a grandes áreas e são capazes de garantir a pressão e o volume de água necessários, enquanto tubulações menores fornecem água diretamente aos consumidores finais.

A variação nos diâmetros indica uma rede projetada para lidar com diferentes níveis de demanda, desde grandes volumes de transporte de água até a distribuição fina em áreas residenciais. A escolha do diâmetro adequado para cada trecho da rede é fundamental para evitar perdas de pressão excessivas e garantir que a água chegue a todos os pontos com a pressão adequada.

Tubulações com diâmetro menor podem gerar maiores perdas de carga, resultando em uma pressão reduzida nos pontos finais da rede, enquanto diâmetros maiores, embora possam manter a pressão ao longo de trechos longos, podem ser excessivos se não forem corretamente ajustados às necessidades de cada área.

Outro ponto a ser considerado é o impacto no custo de manutenção e eficiência energética da rede. Tubulações com diâmetros maiores são mais caras de instalar e manter, exigindo materiais mais robustos e processos de instalação mais complexos. No entanto, elas oferecem a vantagem de transportar grandes volumes de água com menos necessidade de sistemas de bombeamento adicionais, o que pode melhorar a eficiência energética da rede.

Por outro lado, tubulações menores, apesar de serem mais baratas e mais fáceis de instalar, estão mais suscetíveis a problemas como incrustações e entupimentos, o que pode reduzir a eficiência do sistema e aumentar a necessidade de manutenções regulares.

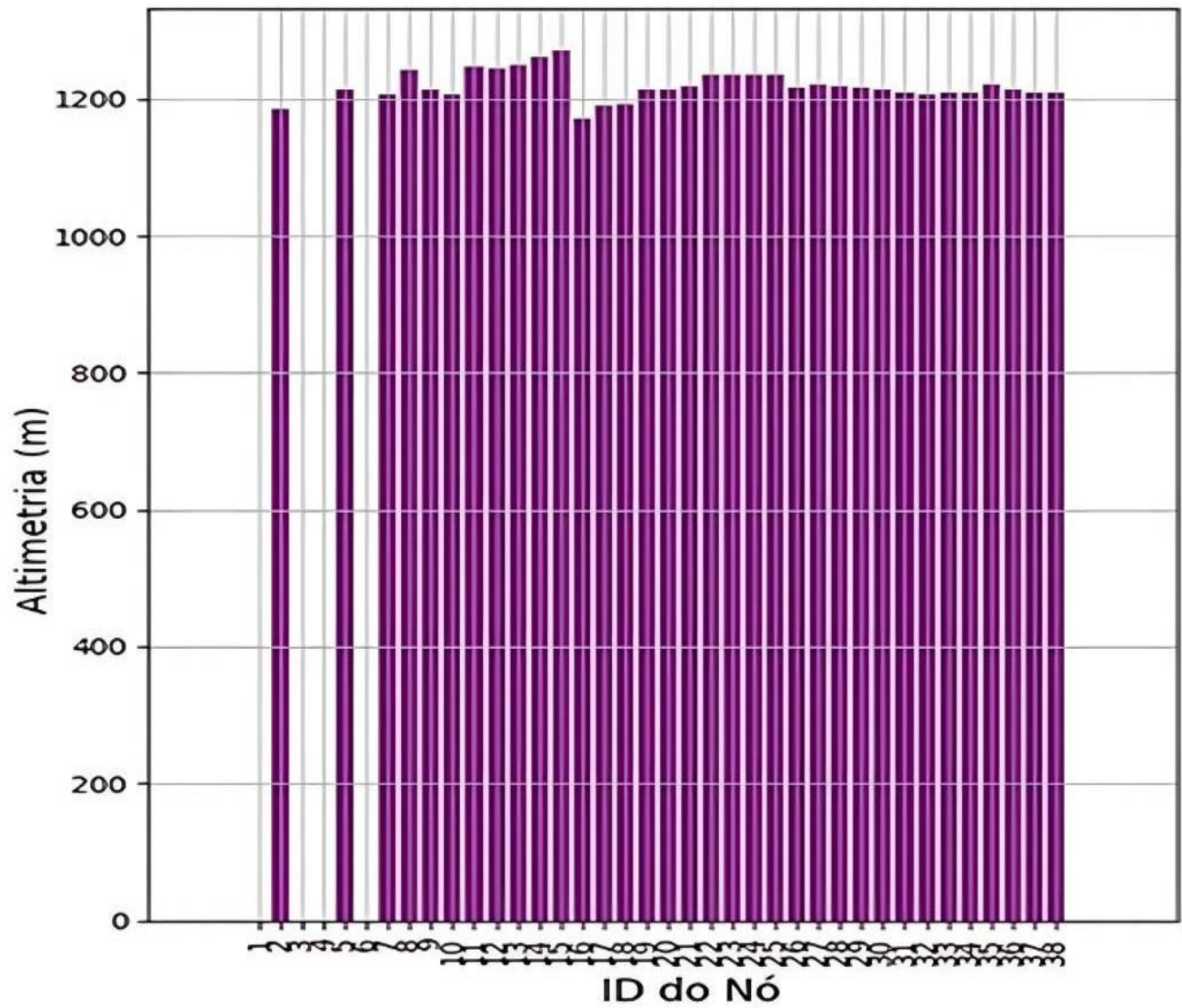
Em regiões montanhosas, a variação dos diâmetros é especialmente relevante. Nessas regiões, a variação de elevação impõe desafios adicionais em termos de controle de pressão, e a escolha adequada dos diâmetros das tubulações pode ser determinante para manter a pressão ao longo dos diferentes trechos da rede.

Tubulações maiores podem ser usadas estrategicamente para compensar perdas de pressão em áreas de maior elevação, enquanto diâmetros menores podem ser suficientes para regiões de menor elevação ou menor demanda.

As Figuras 60, 61 e 62 mostram a distribuição das altimetrias das tubulações utilizadas na rede de abastecimento de água, com a altimetria dos nós no eixo vertical (em milímetros) e o ID de cada nó no eixo horizontal.

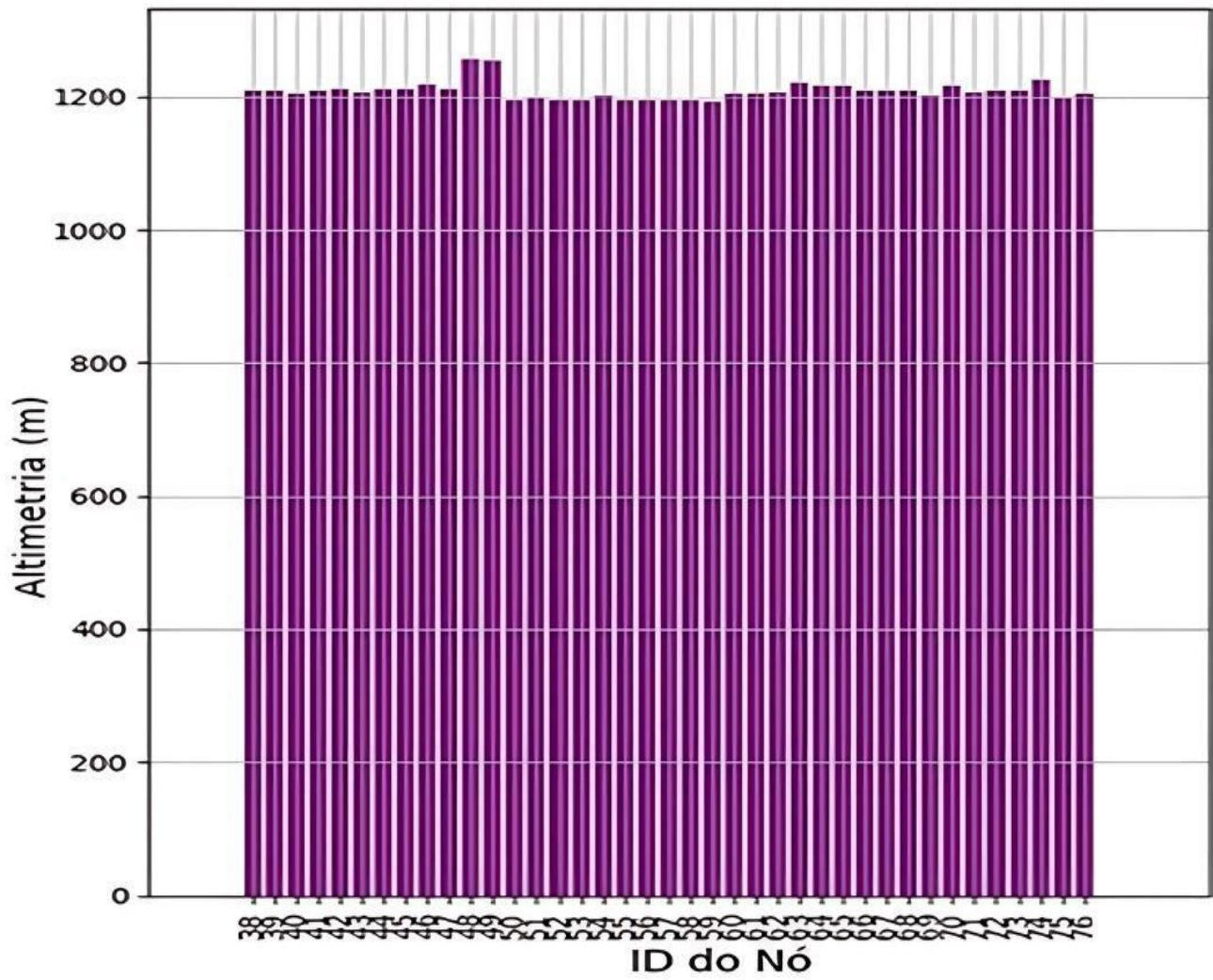
Esse tipo de gráfico permite uma visualização organizada e eficiente das variações de altimetria ao longo de toda a rede, ajudando a identificar padrões, possíveis gargalos ou áreas que precisem de atenção

Figura 60 – Distribuição das altimetrias dos nós do ID 1 até o ID 38



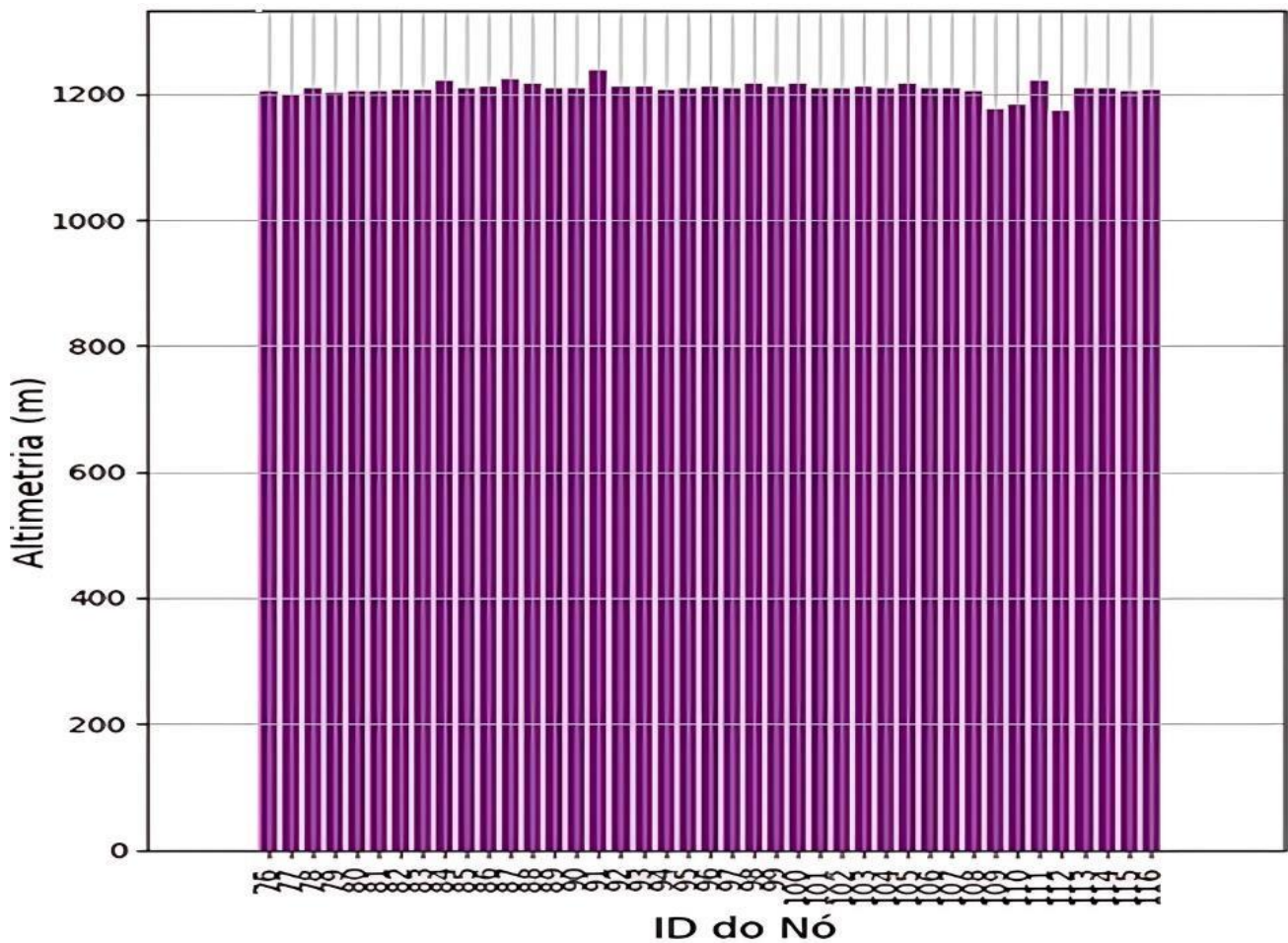
Fonte: O autor (2024)

Figura 61 – Distribuição das altimetrias dos nós do ID 38 até o ID 76



Fonte: O autor (2024)

Figura 62 – Distribuição das altimetrias dos nós do ID 76 até o ID 116



Fonte: O autor (2024)

A maioria dos nós estão situados em altimetrias elevadas, por volta de 1200 metros, com algumas variações ao longo da rede. Isso indica que a rede opera em um terreno elevado, o que pode ter impacto direto na pressão sobre nós e no consumo de energia para bombear a água. Na Figura 60, os valores dos nós 1, 3, 4 e 6 estão sem valores de altimetria pois esses nós estão vinculados a reservatórios.

Redes com grandes diferenças altimétricas, como exibidas nos gráficos, apresentam desafios maiores em termos de controle de pressão. Se a rede não tiver controle adequado, áreas mais altas podem sofrer com baixa pressão, o que pode prejudicar o abastecimento, enquanto áreas mais baixas podem ter pressão estressante, o que aumenta o risco de vazamentos e falhas nas tubulações.

Essa distribuição sugere que a rede está localizada em uma região montanhosa, o que traz desafios significativos para o gerenciamento da pressão e eficiência no transporte de água.

A presença de variações de altimetria é evidente ao longo do gráfico, com diferenças notáveis em alguns nós que estão em altimetrias mais altas ou mais baixas. Essas variações podem criar dificuldades operacionais, especialmente na manutenção de uma pressão estável em toda a rede, uma vez que áreas mais altas exigem maior pressão para que a água chegue de maneira adequada.

Os picos e quedas acentuadas em certas altimetrias indicam que a rede enfrenta condições topográficas complexas, com nós localizados em terrenos altos e outros em áreas mais baixas. Esses picos refletem a necessidade de se utilizar estratégias específicas para garantir a eficiência do sistema. Em áreas de grande elevação, é essencial que a pressão seja aumentada, o que normalmente é feito com o uso de bombas ou reservatórios elevados, para que a água atinja essas regiões com a pressão necessária. Por outro lado, nós em altimetrias mais baixas podem sofrer com pressões excessivas, exigindo a instalação de válvulas redutoras para evitar rupturas ou danos nas tubulações.

O controle de pressão, portanto, é um fator crítico para o funcionamento eficiente da rede. A variação de altimetria também influencia diretamente no dimensionamento das tubulações, onde diâmetros maiores são frequentemente necessários para manter a pressão em áreas elevadas, enquanto diâmetros menores podem ser suficientes em áreas mais baixas.

A distribuição irregular de altimetrias entre os nós mostra que o planejamento da rede deve ser ajustado para lidar com essas variações, evitando tanto a perda de pressão nas áreas mais altas quanto o excesso de pressão nos pontos mais baixos. Esse equilíbrio é crucial para garantir a longevidade da infraestrutura e reduzir os custos de manutenção, além de otimizar o consumo de energia, uma vez que o bombeamento de água em regiões montanhosas tende a ser mais dispendioso.

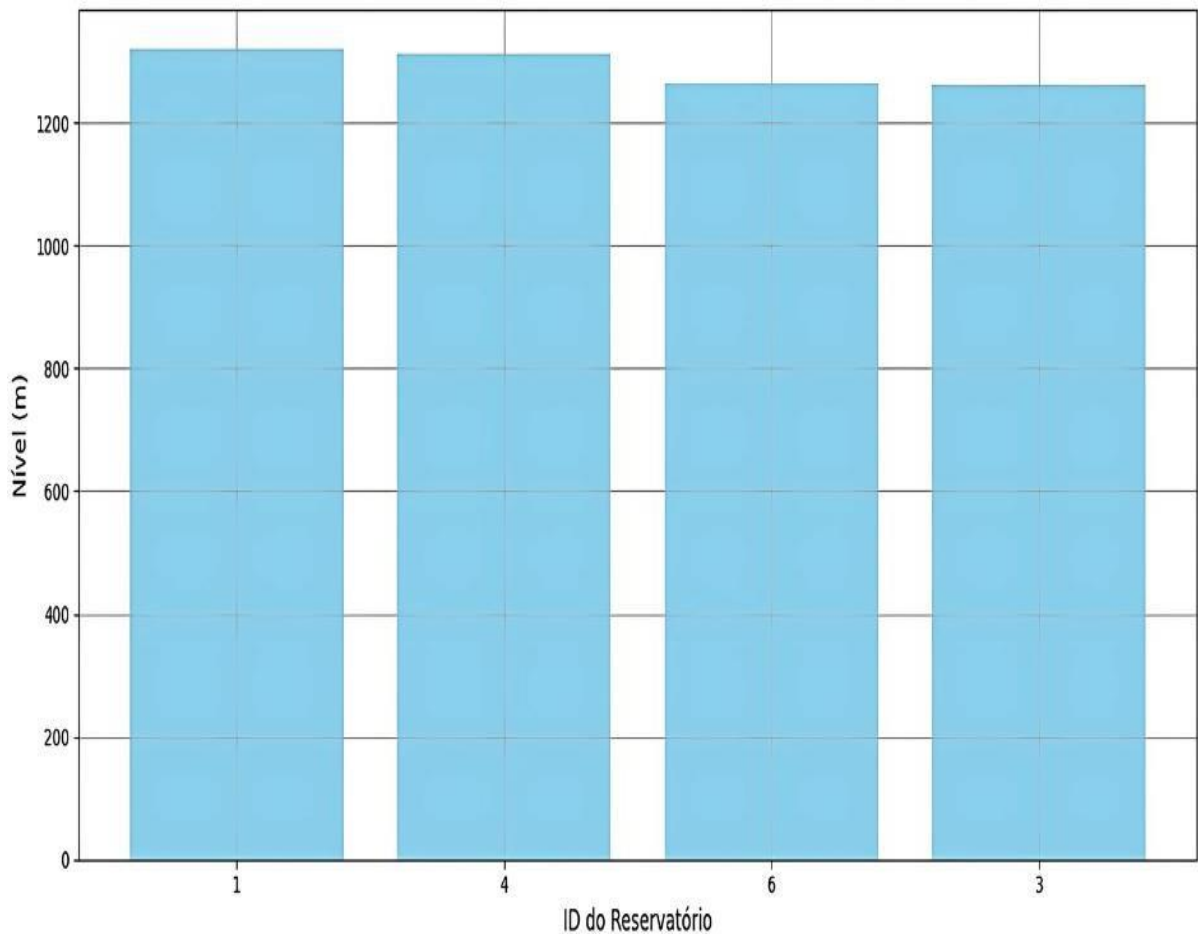
As Figuras 60, 61 e 62 são ferramentas fundamentais para entender como a topografia afeta o sistema de distribuição. Além disso, o posicionamento estratégico das estações de bombeamento ao longo da rede, em pontos onde a elevação muda drasticamente, pode ajudar a garantir que a água seja distribuída uniformemente, sem comprometer a pressão em nenhuma parte da rede.

A análise das altimetrias dos nós também permite identificar pontos críticos que podem exigir maior atenção, como áreas de grande elevação que precisam de reforços na pressão ou áreas baixas que podem enfrentar problemas com excesso de pressão.

Esses ajustes são essenciais para o desempenho a longo prazo da rede e para a redução de custos operacionais. tubulações em áreas mais elevadas tendem a sofrer maior desgaste devido às altas pressões necessárias para manter o abastecimento, o que pode gerar a necessidade de manutenções mais frequentes. Por isso, é importante prever esses desafios durante o planejamento e operação da rede, garantindo que a infraestrutura esteja preparada para lidar com as variações topográficas da região.

A análise dessas altimetrias é essencial para garantir a eficiência no abastecimento de água, otimizando o uso de energia e prevenindo problemas de pressão que possam comprometer a integridade das tubulações. A figura 63 mostra a altimetria dos reservatórios em função do ID do nó do reservatório.

Figura 63 – Distribuição da altimetrias dos reservatórios



Fonte: O autor (2024)

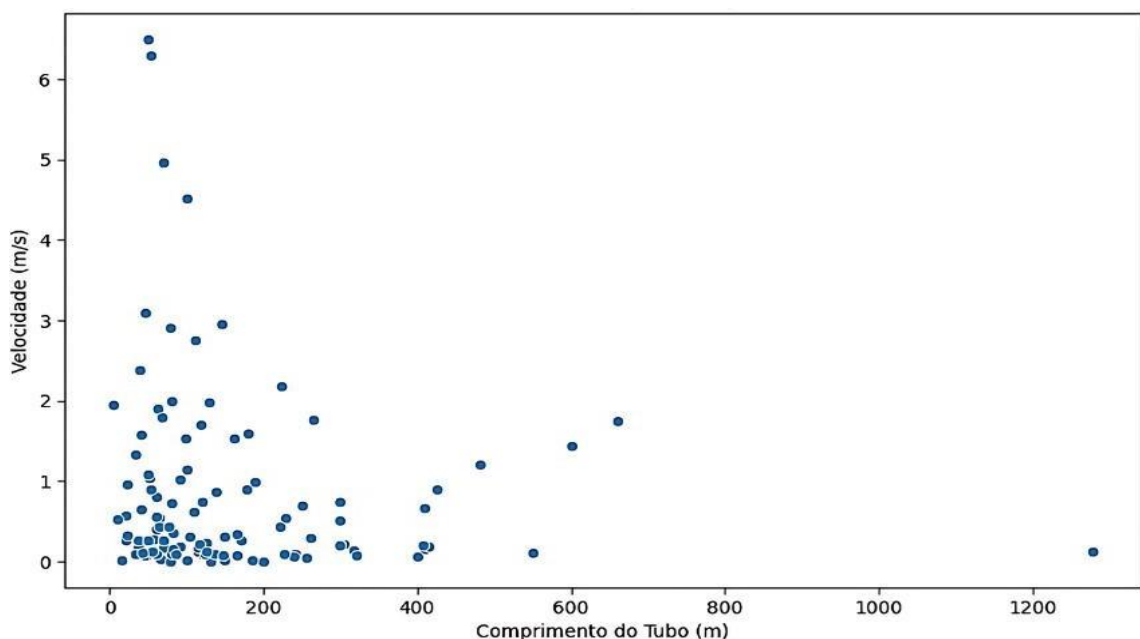
A pressão em um sistema de abastecimento de água é diretamente influenciada pela altura dos reservatórios em relação ao ponto de consumo. Alturas similares tendem a produzir pressões equivalentes nas áreas abastecidas, simplificando o controle de pressão e o gerenciamento do sistema. Isso pode ser benéfico em áreas onde a topografia é relativamente plana ou onde os consumidores estão em altitudes similares.

Entretanto, se o sistema abastece zonas com grandes variações de altitude, a falta de variação nas altitudes dos reservatórios pode resultar em problemas de pressão. Em áreas mais baixas, a pressão pode ser excessiva, enquanto em áreas mais altas, a pressão pode ser insuficiente. Nesses casos, a utilização de dispositivos de controle, como válvulas redutoras de pressão, seria essencial para manter a operação eficiente do sistema e garantir que a água chegue a todos os pontos com uma pressão adequada.

Outro ponto importante a ser considerado é a influência desse padrão de altimetria na eficiência energética. Com alturas uniformes, o sistema pode evitar a necessidade de recalques adicionais ou de energia para bombear água para níveis mais elevados, contribuindo para uma operação mais eficiente. Além disso, essa configuração também pode facilitar a manutenção, uma vez que as variações de pressão seriam mínimas, reduzindo o desgaste em tubulações e outros componentes do sistema.

A Figura 64 mostra a relação entre a velocidade (em m/s) e o comprimento dos tubos (em metros) para a rede em estudo.

Figura 64 – Distribuição da velocidade nos tubos por seu comprimento



Observa-se que a velocidade apresenta uma tendência de decrescimento à medida que o comprimento dos tubos aumenta, com uma maior concentração de velocidades mais baixas em tubos de comprimentos menores.

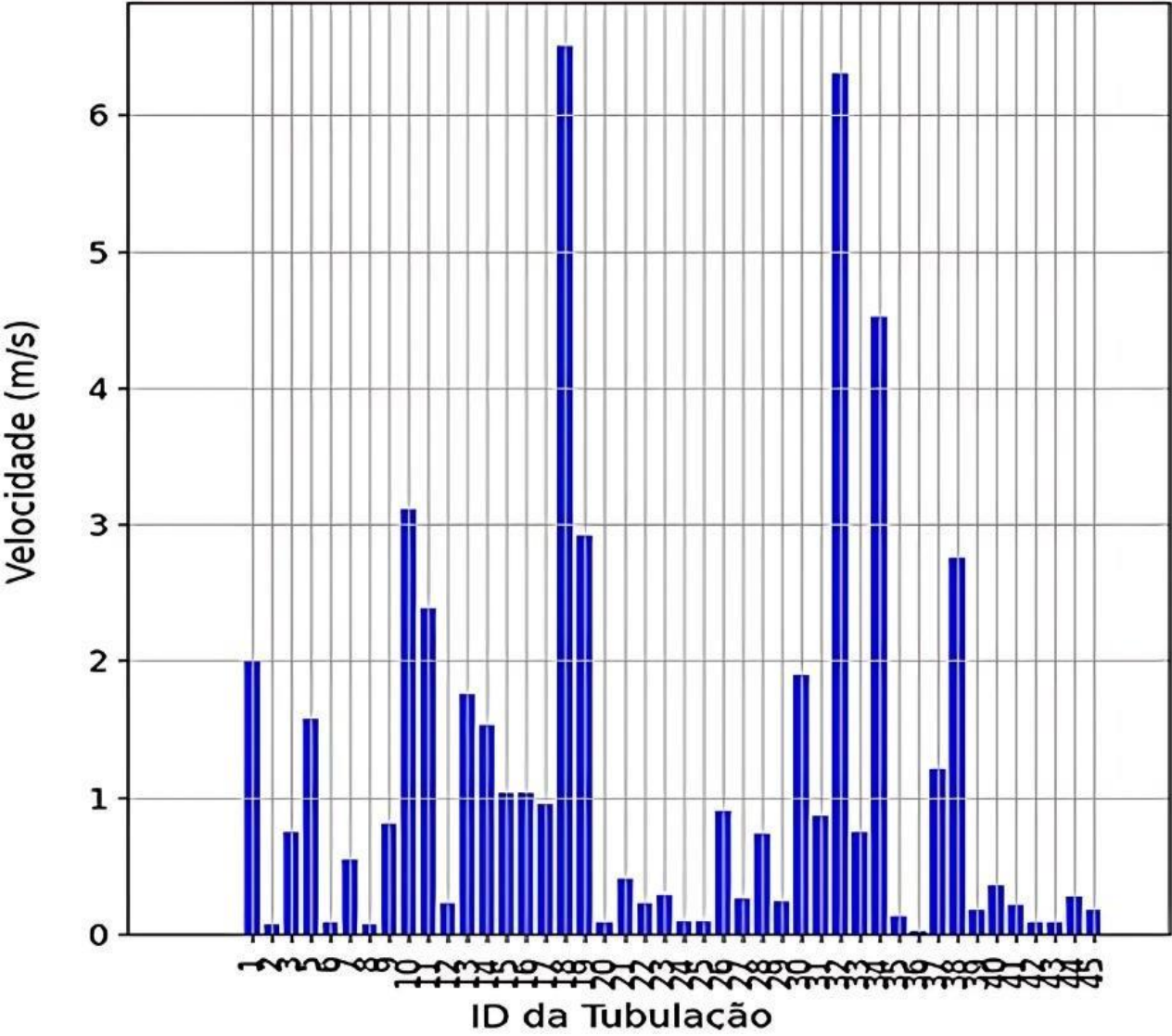
É possível observar a relação entre o comprimento e a velocidade nas tubulações de maneira ampla e prática. Ele ajuda a identificar áreas críticas da rede, tanto em termos de altas velocidades que podem causar desgastes, quanto de baixas velocidades que podem indicar problemas de baixa pressão. Contudo, há alguns valores mais altos de velocidade para comprimentos curtos, enquanto para tubos mais longos as velocidades são mais estáveis e baixas. Para tubos com comprimentos menores (até 200 metros), a variabilidade de velocidade pode ser influenciada por pressões maiores, o que pode estar relacionado a condições específicas da topografia, perda de carga localizada, ou até mesmo maiores demandas em determinados pontos da rede.

Para comprimentos de tubos maiores (acima de 600 metros), as velocidades são mais baixas e tendem a ser mais homogêneas. Isso pode indicar que, à medida que o comprimento dos tubos aumenta, a perda de carga tende a aumentar, resultando em velocidades mais constantes e menores, possivelmente devido a resistências maiores no escoamento (perdas por atrito ao longo dos tubos)

Isso pode indicar que, nos trechos mais curtos, a velocidade tende a variar mais, possivelmente devido a características locais como topografia, perdas localizadas ou fluxos irregulares. Já nos trechos mais longos, o sistema parece apresentar uma tendência mais uniforme e controlada. Para facilitar a visualização da informação, os gráficos apresentados nas Figuras 65, 66 e 67 mostram a distribuição das velocidades da tubulações da rede de abastecimento em m/s, com a velocidade nos tubos no eixo vertical e o ID de cada tubo no eixo horizontal.

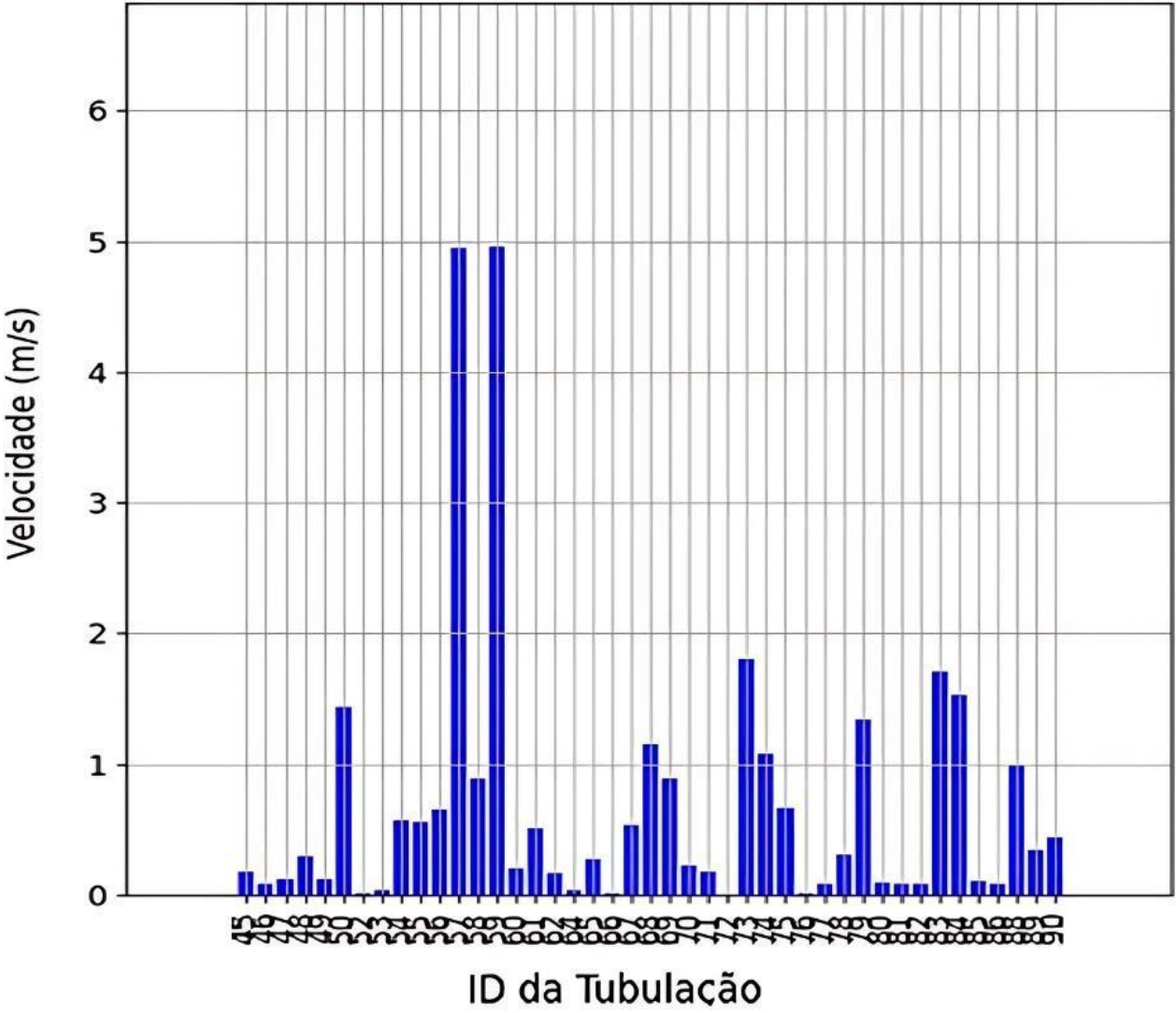
Esse tipo de gráfico permite uma visualização organizada e eficiente das variações de velocidade do fluido ao longo de toda a rede, ajudando a identificar padrões, possíveis gargalos ou áreas que precisem de atenção

Figura 65 – Distribuição das velocidade nos tubos do ID 1 até o ID 45



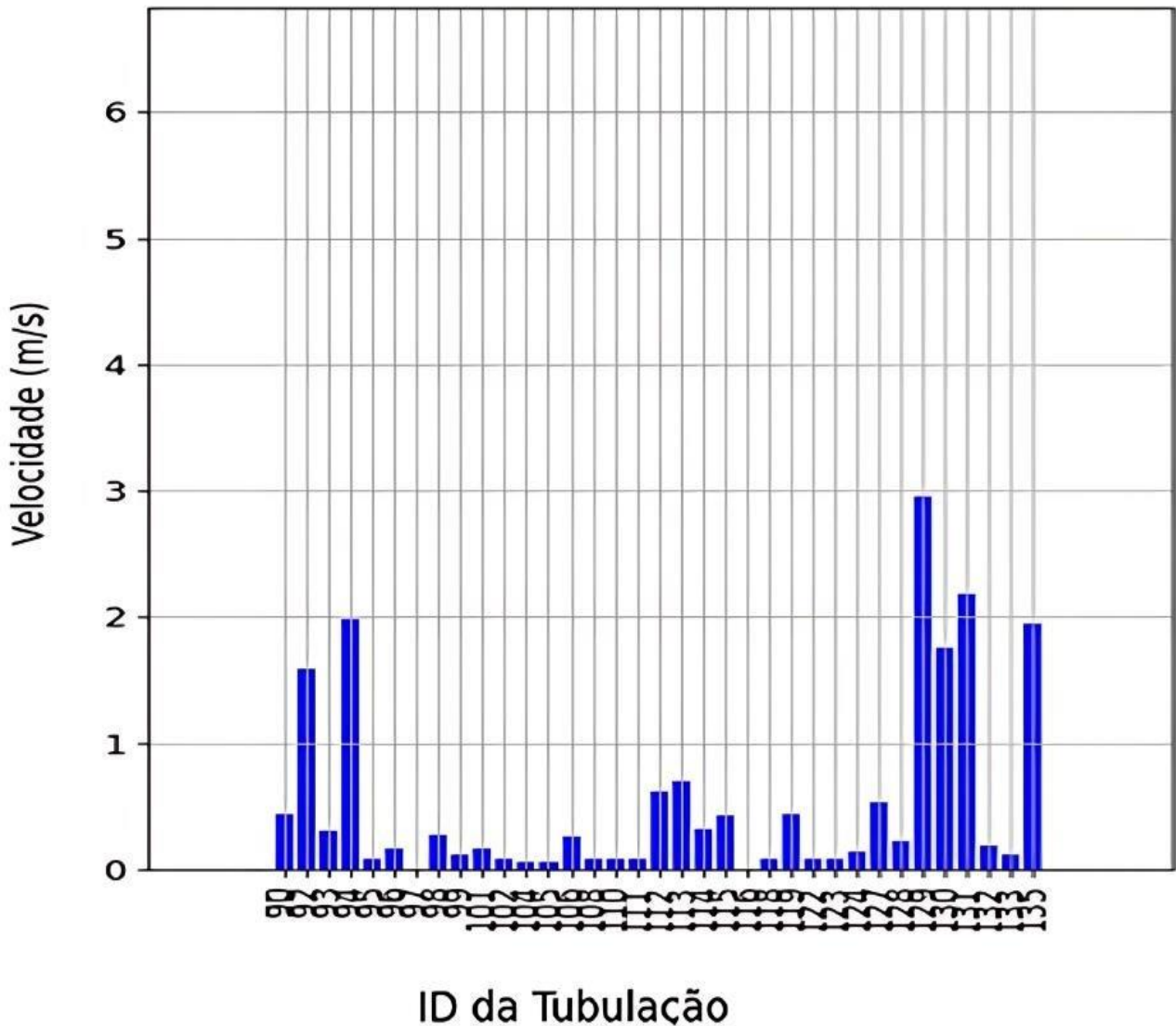
Fonte: O autor (2024)

Figura 66 – Distribuição das velocidade nos tubos do ID 45 até o ID 90



Fonte: O autor (2024)

Figura 67 – Distribuição das velocidade nos tubos do ID 90 até o ID 135



Fonte: O autor (2024)

As Figuras 65, 66 e 67 mostram a variação de velocidades em diferentes tubulações de uma rede de abastecimento de água. Eles ajudam a identificar problemas hidráulicos, como sobrepressão (velocidades muito altas) ou fluxo insuficiente (velocidades baixas), permitindo otimizar o consumo de energia, realizar manutenções preventivas e planejar melhorias na rede.

Esses dados são cruciais para a eficiência e sustentabilidade da gestão da rede de água. O gráfico mostra a velocidade do fluxo de água nas tubulações de uma rede de abastecimento, com variações significativas entre diferentes segmentos da rede.

A velocidade da água é medida em metros por segundo (m/s) e apresentada no eixo vertical, enquanto o ID das tubulações aparece no eixo horizontal.

A análise das velocidades é crucial para avaliar a eficiência do sistema, identificar possíveis áreas problemáticas e garantir que a distribuição de água ocorra de maneira eficiente e segura.

A maioria das tubulações apresenta velocidades moderadas, variando entre 0,5 e 2 m/s, o que está dentro da faixa ideal para sistemas de distribuição de água. Velocidades dentro desse intervalo garantem uma operação eficiente, com perdas de carga controladas e energia suficiente para manter o fluxo de água sem sobrecarregar o sistema de bombeamento. No entanto, há também vários picos de velocidade que ultrapassam 4 m/s, chegando a mais de 6 m/s em algumas tubulações, o que pode indicar zonas de alta pressão ou segmentos principais da rede, onde há necessidade de transportar grandes volumes de água para áreas de alta demanda. Esses picos exigem atenção, pois velocidades muito altas podem gerar problemas de cavitação, erosão das tubulações e até golpes de aríete, que causam ondas de pressão danosas quando a velocidade da água varia abruptamente.

Por outro lado, há trechos da rede que apresentam velocidades muito baixas, próximas de 0,5 m/s ou menos, o que pode indicar zonas de estagnação, onde o fluxo de água é insuficiente para evitar a acumulação de sedimentos ou incrustações nas tubulações. Esses problemas podem comprometer a qualidade da água, aumentar o risco de entupimentos e criar desafios operacionais, exigindo manutenções mais frequentes para limpar as tubulações e restaurar o fluxo adequado.

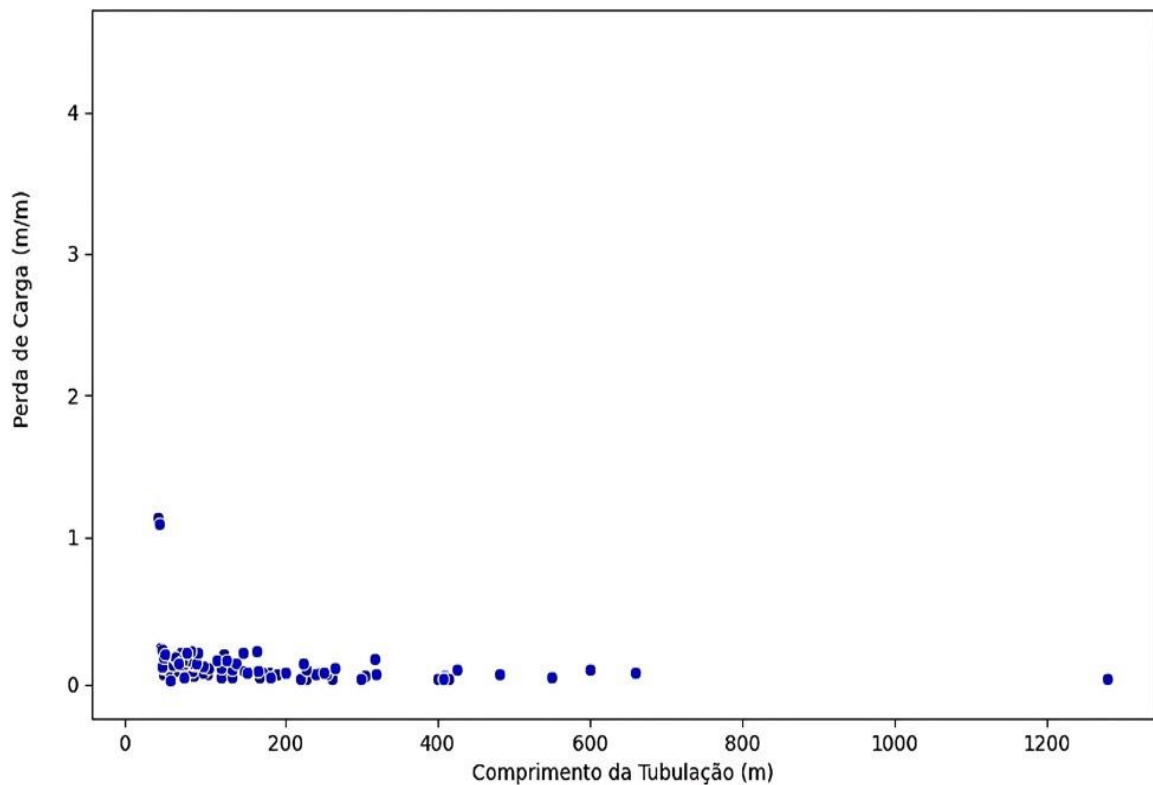
A variação de velocidade ao longo da rede está diretamente relacionada a fatores como o diâmetro das tubulações, a pressão de bombeamento e a demanda em cada área atendida. Tubulações com diâmetro maior tendem a apresentar velocidades mais baixas, especialmente em áreas de menor demanda, enquanto tubulações menores em regiões de alta demanda podem registrar velocidades mais elevadas para garantir o transporte adequado de água. Velocidades fora da faixa ideal, seja para mais ou para menos, podem afetar negativamente a eficiência energética da rede, aumentando o consumo de energia para bombear a água em velocidades inadequadas ou gerando ineficiências operacionais que resultam em maiores custos de manutenção.

Em regiões montanhosas a topografia desempenha um papel importante na variação das velocidades. Tubulações localizadas em áreas mais elevadas tendem a exigir maior pressão para manter a velocidade adequada, compensando as perdas de pressão causadas pela gravidade.

Já nas áreas de menor elevação, as velocidades podem ser menores devido à ajuda da gravidade, mas ainda assim é necessário garantir que o fluxo seja suficiente para evitar estagnação.

Velocidades muito altas aumentam o desgaste das tubulações e os custos de energia, enquanto velocidades muito baixas podem comprometer a qualidade da água e a eficiência do sistema. Picos de velocidade superiores a 4 m/s devem ser ajustados com o uso de válvulas reguladoras de pressão ou com o aumento do diâmetro das tubulações para reduzir a velocidade, minimizando os riscos de cavitação e erosão. Já as tubulações com velocidades muito baixas podem precisar de ajustes no bombeamento ou de redistribuição de fluxo para garantir que a água flua com mais eficiência. A Figura 68 mostra o gráfico de dispersão da perda de carga em função do comprimento da tubulação.

Figura 68 – Distribuição da perda de carga em função do comprimento da tubulação



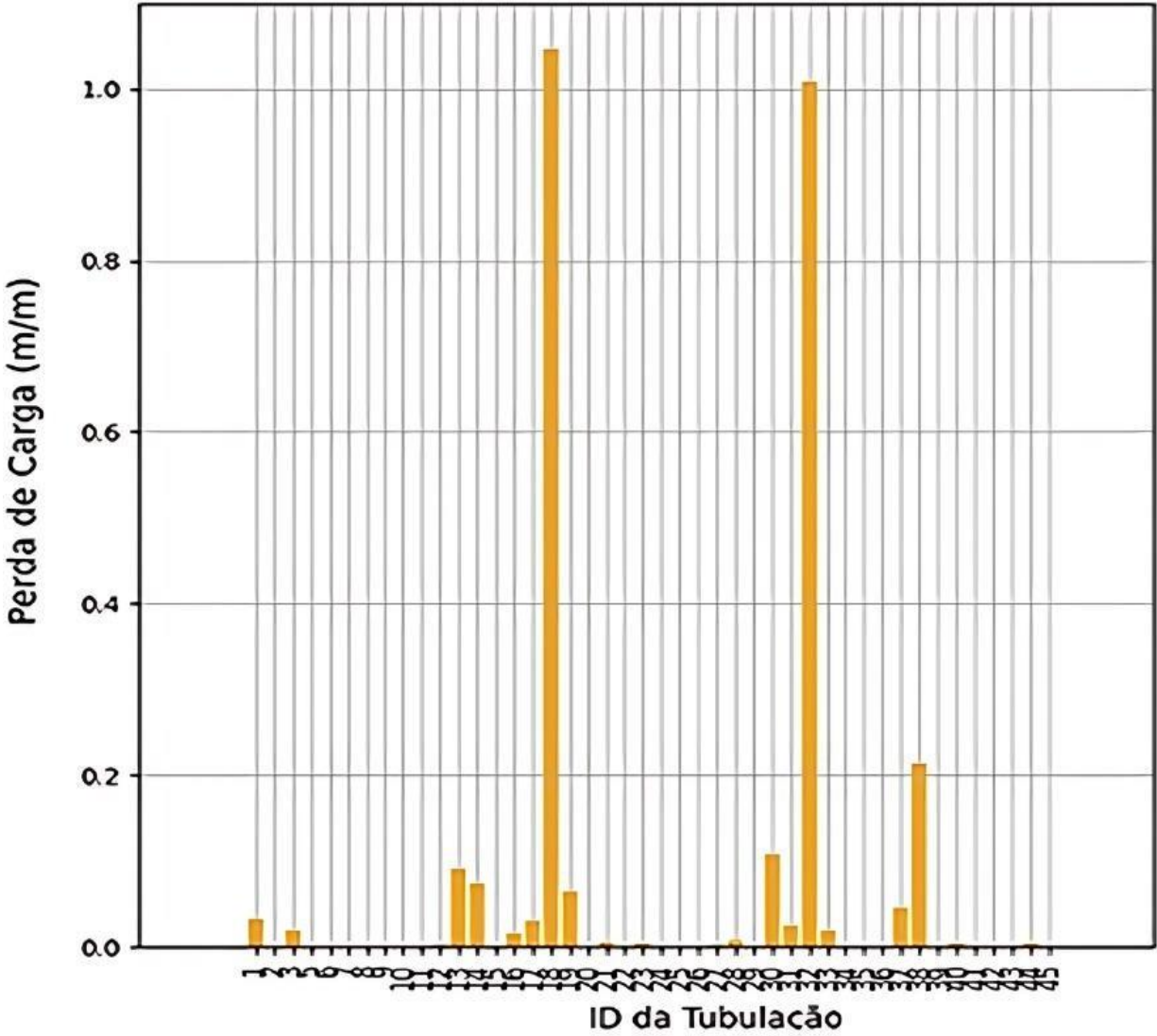
Fonte: O autor (2024)

A perda de carga é maior em tubos curtos, especialmente abaixo de 200 metros, indicando que esses trechos estão mais suscetíveis a perdas elevadas, possivelmente devido a maiores velocidades de escoamento ou características de rugosidade. A concentração de pontos nessa faixa sugere que grande parte do sistema é composta por trechos curtos, como em ramais ou áreas de distribuição mais densa. Em contraste, tubulações mais longas, acima de 200 metros, apresentam perdas de carga próximas de zero, sugerindo maior estabilidade e eficiência hidráulica, o que pode ser atribuído a diâmetros maiores ou menores fluxos.

Alguns poucos pontos com perdas elevadas (acima de 1 m/m) em tubos curtos indicam possíveis zonas críticas no sistema, onde a alta rugosidade, velocidades elevadas ou fluxos turbulentos podem estar presentes. Esses trechos demandam atenção, pois podem ser potenciais focos de problemas operacionais. A análise da perda de carga é essencial para otimizar o dimensionamento da rede, ajustando variáveis como diâmetro, rugosidade e velocidades de fluxo, visando melhorar a eficiência geral e reduzir o consumo energético. Essa avaliação pode auxiliar na implementação de melhorias para garantir uma distribuição mais equilibrada e eficiente, minimizando as perdas ao longo do sistema de abastecimento de água. Para facilitar a visualização da informação, os gráficos apresentados nas Figuras 69, 70 e 71 mostram a distribuição das perdas de carga das tubulações da rede de abastecimento em m/m, com a perda de carga no eixo vertical e o ID de cada tubo no eixo horizontal.

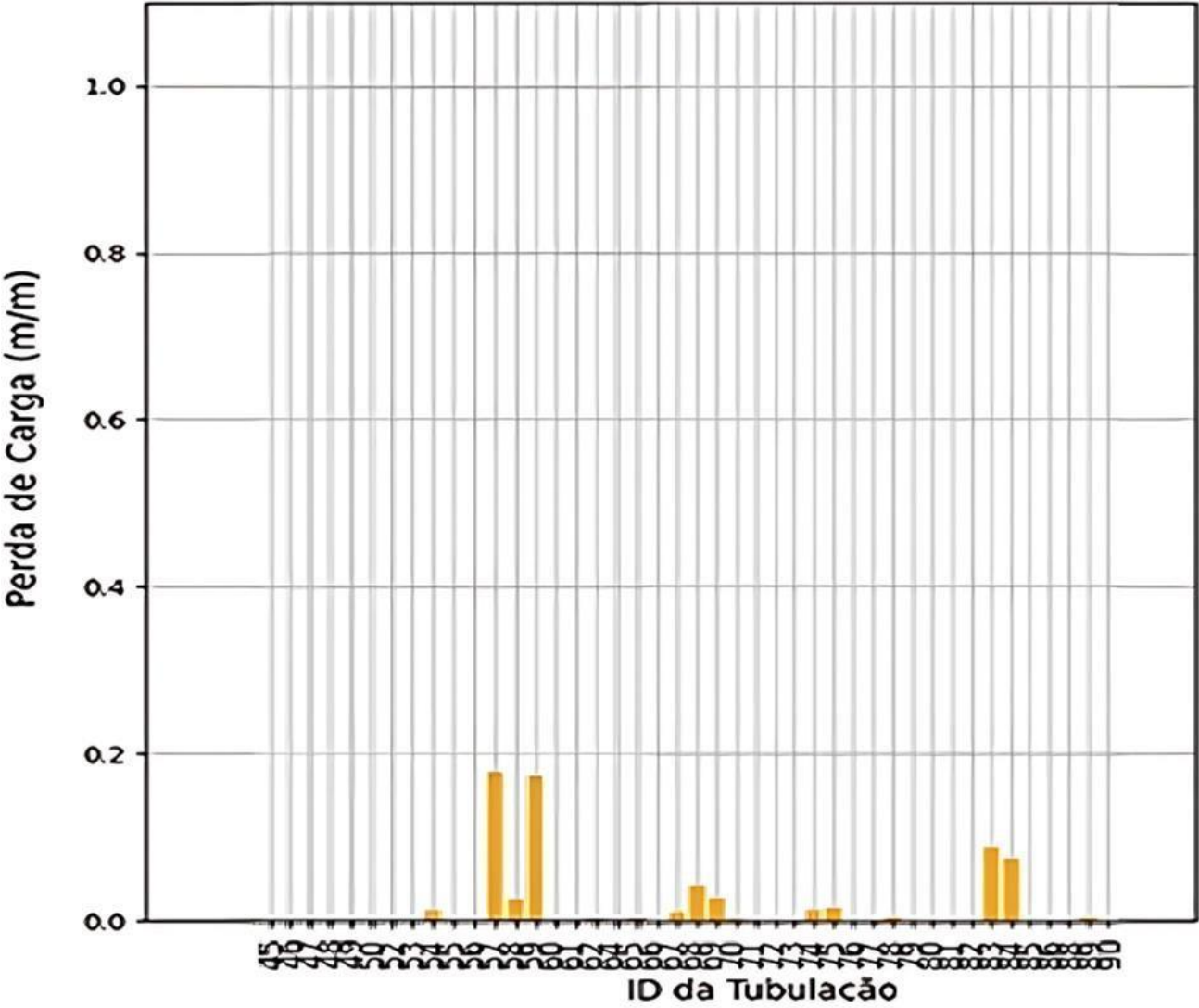
Esse tipo de gráfico permite uma visualização organizada e eficiente das variações de perda de carga ao longo de toda a rede, ajudando a identificar padrões, possíveis gargalos ou áreas que precisem de atenção

Figura 69 – Distribuição da perda de carga em função do ID 1 até o ID 45



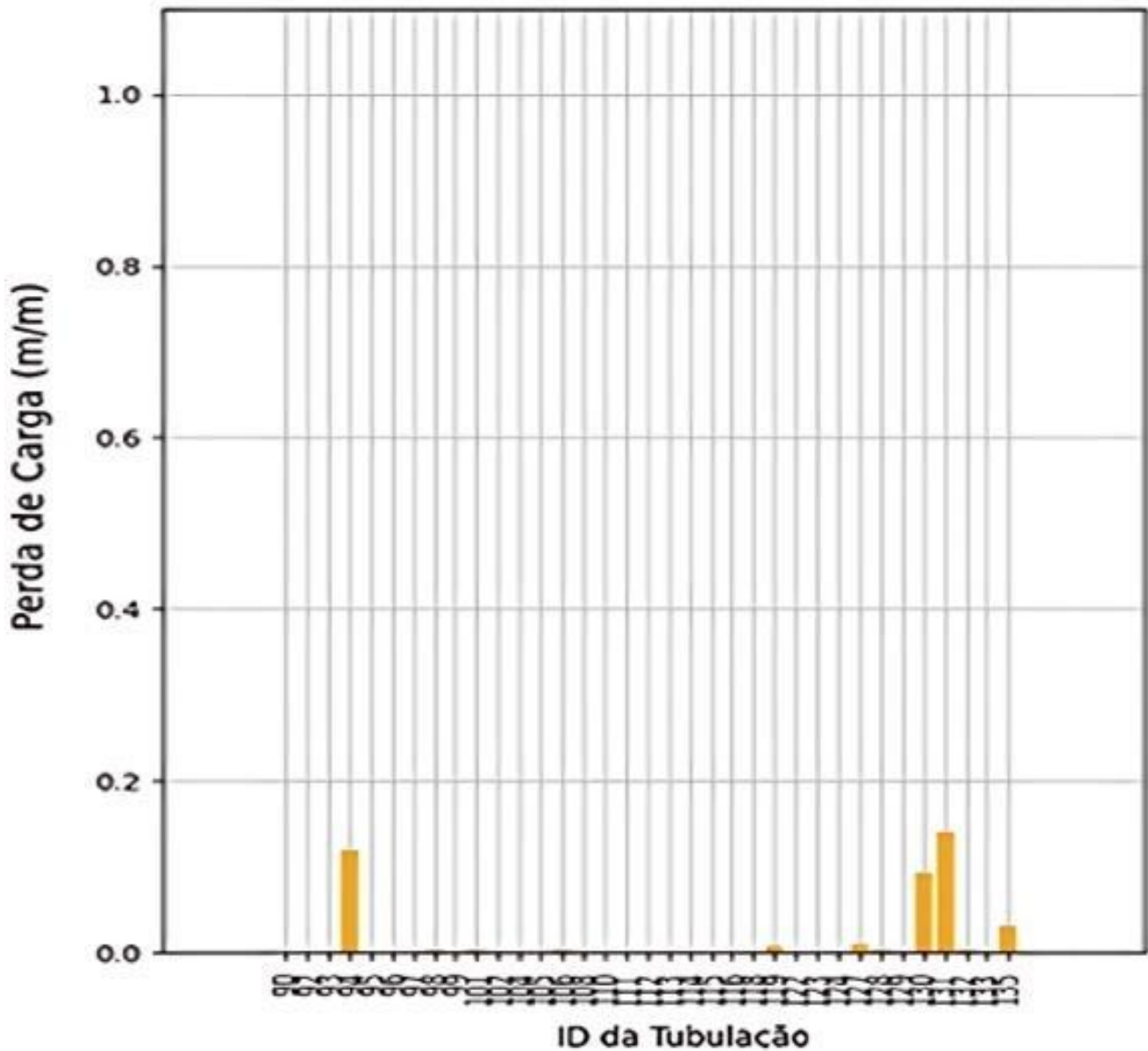
Fonte: O autor (2024)

Figura 70 – Distribuição da perda de carga em função do ID 45 até o ID 90



Fonte: O autor (2024)

Figura 71 – Distribuição da perda de carga em função do ID 90 até o ID 135



Fonte: O autor (2024)

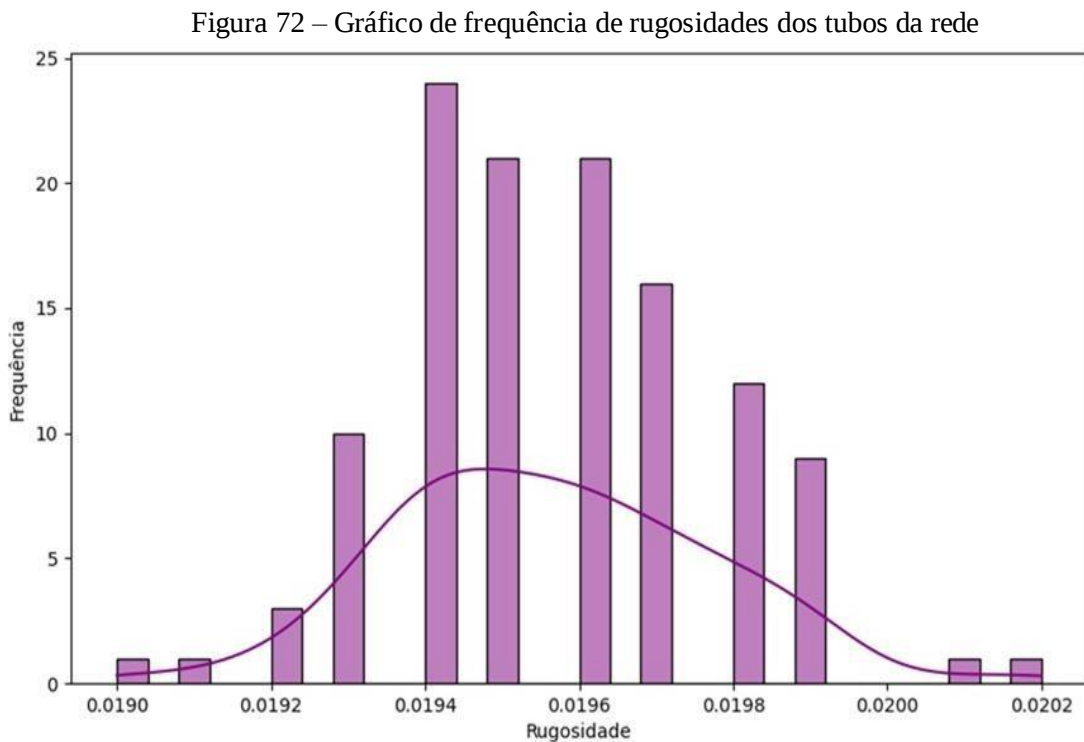
A análise dos resultados mostra uma distribuição irregular das perdas de carga, com dois grandes picos que ultrapassam 1 m/m. Esses picos indicam pontos críticos na rede, onde a perda de energia é significativamente maior.

As causas desses picos podem estar relacionadas a fatores como altas vazões, diâmetros reduzidos ou tubulações com alta rugosidade. Esses trechos podem representar problemas potenciais, exigindo intervenções para evitar ineficiências no sistema, como substituição de tubos ou redimensionamento de diâmetros.

Além dos picos, há várias tubulações que apresentam perdas moderadas, na faixa de 0,1 m/m a 0,3 m/m. Embora essas perdas não sejam tão severas quanto as dos picos, elas ainda podem impactar o desempenho do sistema, especialmente em termos de consumo de energia para bombeamento e pressões nos nós próximos. Essas tubulações podem exigir monitoramento contínuo e possíveis ajustes para garantir que não se tornem pontos problemáticos no futuro.

Por outro lado, a maioria das tubulações no gráfico apresenta perdas de carga muito baixas, próximas de zero. Isso é um bom sinal, indicando que a maior parte da rede está operando de maneira eficiente, com perdas de fricção mínimas. Essas tubulações provavelmente têm características favoráveis, como diâmetros adequados e fluxos estabilizados, contribuindo para a eficiência global do sistema de distribuição de água.

Outra análise importante é a das rugosidades. A figura 72 mostra o gráfico de frequência de rugosidade das tubulações da rede com a curva de ajuste.



Fonte: O autor (2024)

A Figura 72 da frequência de rugosidade das tubulações da rede de abastecimento de água revela uma dispersão que segue uma distribuição aproximadamente normal. A maior parte das rugosidades concentra-se no intervalo entre 0,0194 e 0,0196, com um pico de frequência acima de 20 ocorrências. Isso sugere que a maioria das tubulações da rede possui características hidráulicas uniformes, indicando materiais semelhantes ou padrões de instalação homogêneos, o que favorece a eficiência hidráulica e a operação da rede.

A concentração em torno de um valor central de rugosidade pode ser interpretada como um bom sinal de controle de qualidade na construção ou manutenção da rede. Tubulações com essas características tendem a gerar menores perdas de carga e maior estabilidade no sistema, contribuindo para a eficiência geral. O material predominante parece oferecer um equilíbrio adequado entre resistência e fluidez do escoamento, sem grandes irregularidades que possam comprometer a performance da rede.

No entanto, é importante observar que o gráfico também aponta a existência de alguns extremos: tubulações com rugosidade inferior a 0,0190 e superior a 0,0200, embora sejam poucas. As rugosidades mais baixas podem estar associadas a tubos novos ou de materiais mais lisos, resultando em menos fricção e, consequentemente, menores perdas de carga. Por outro lado, tubulações com rugosidades acima de 0,0200 podem representar pontos críticos no sistema, como tubos mais antigos ou deteriorados, que podem causar aumento na resistência ao fluxo de água e, eventualmente, aumentar o consumo energético para manter a pressão desejada.

Esses extremos podem estar correlacionados com pontos de maiores perdas de carga identificados em outras análises, como no gráfico de perda de carga por comprimento de tubulação. Caso seja confirmada essa correlação, é importante priorizar intervenções nesses trechos, como a substituição das tubulações mais desgastadas ou a realização de manutenção preventiva, visando reduzir as perdas de energia no sistema.

Tubulações com maior rugosidade tendem a deteriorar o desempenho ao longo do tempo, e isso pode comprometer o equilíbrio da rede de abastecimento, especialmente em zonas de alta demanda. A manutenção regular e o controle da rugosidade são fundamentais para manter a eficiência do sistema, evitando aumentos excessivos de perda de carga que resultariam em maior consumo energético.

Além disso, o monitoramento contínuo desses parâmetros permite que o sistema opere de forma mais eficiente e segura, garantindo a continuidade do abastecimento com mínima interferência.

As Figuras 73, 74 e 75 retratam o gráfico de rugosidade por ID de tubulação com a rugosidade no eixo vertical e o ID de cada tubo no eixo horizontal. A análise revela uma rede de abastecimento com alta uniformidade nas características das tubulações, apresentando rugosidades que variam entre 0,0190 e 0,0200.

Figura 73 – Distribuição da rugosidade em função do ID 1 até o ID 45

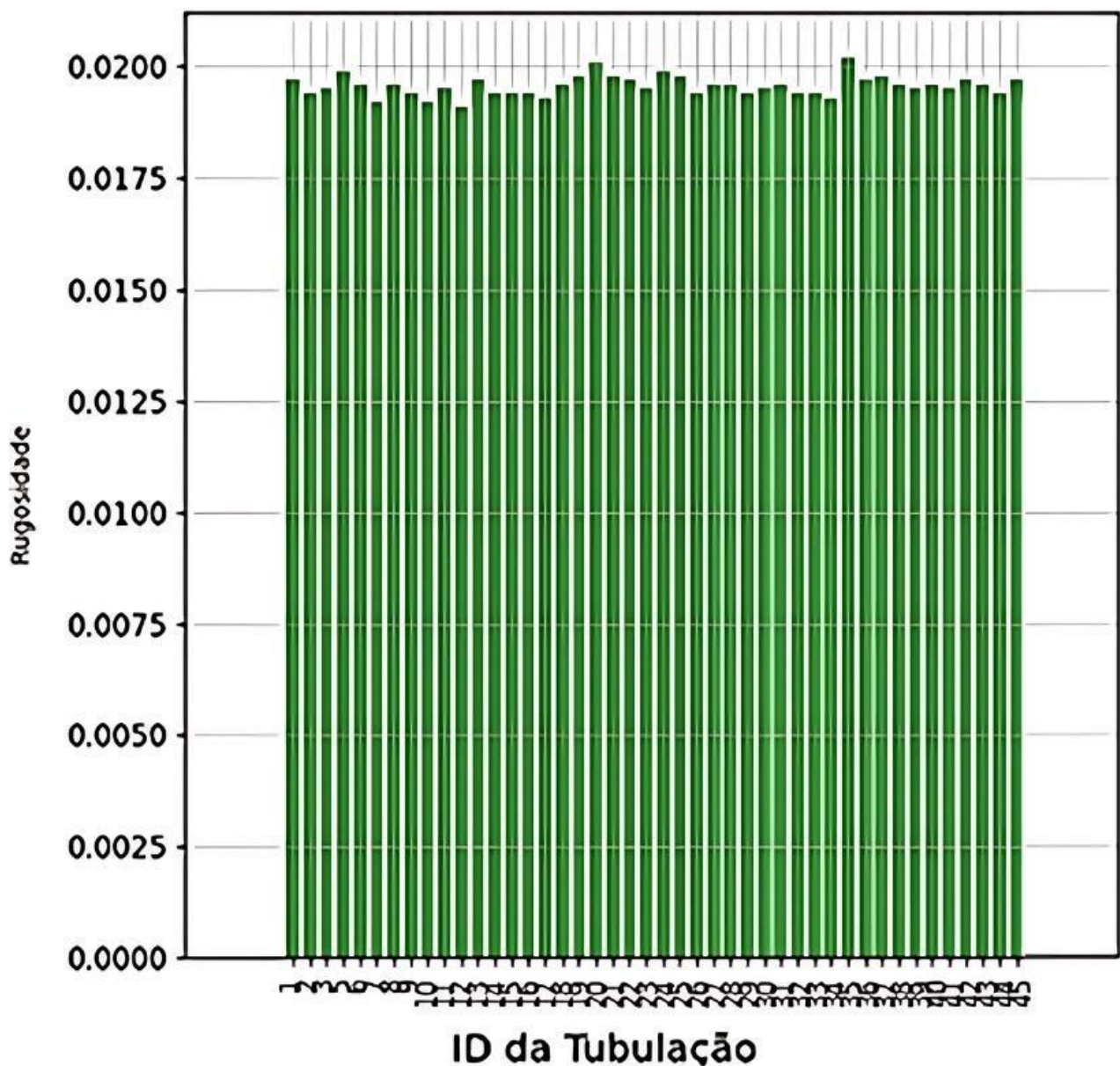
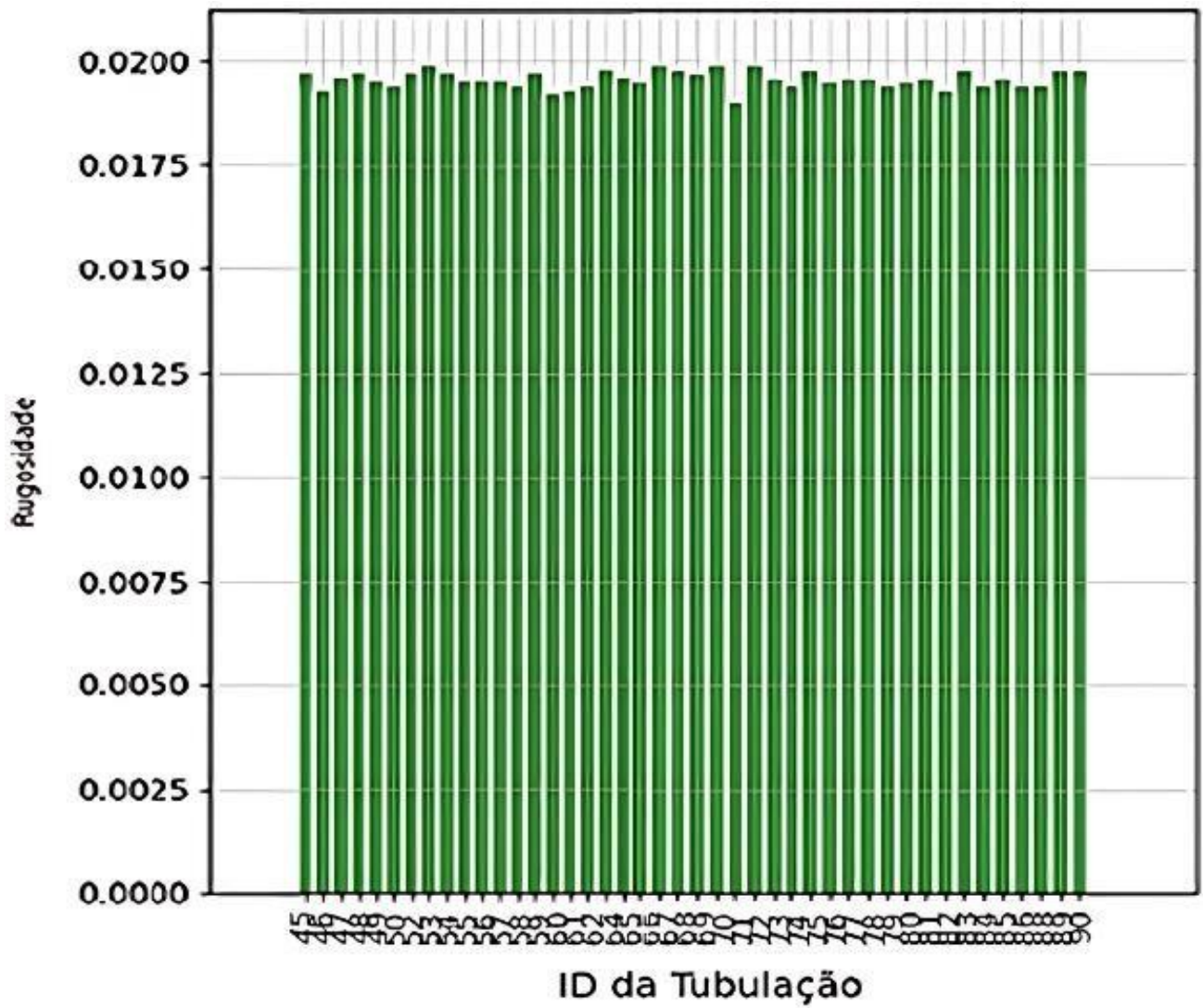
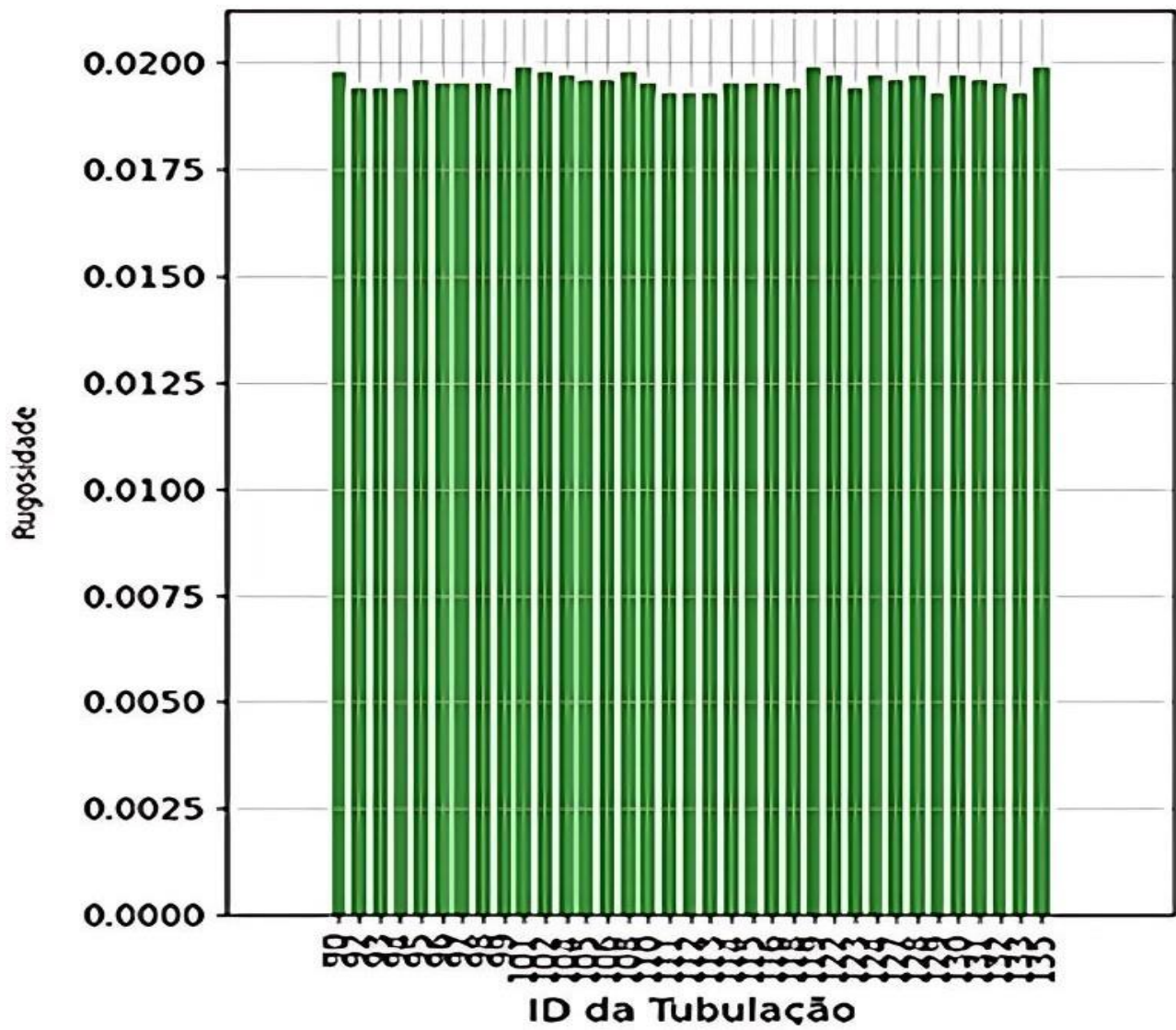


Figura 74 – Distribuição da rugosidade em função do ID 45 até o ID 90



O autor (2024)

Figura 75 – Distribuição da rugosidade em função do ID 90 até o ID 135



Fonte: O autor (2024)

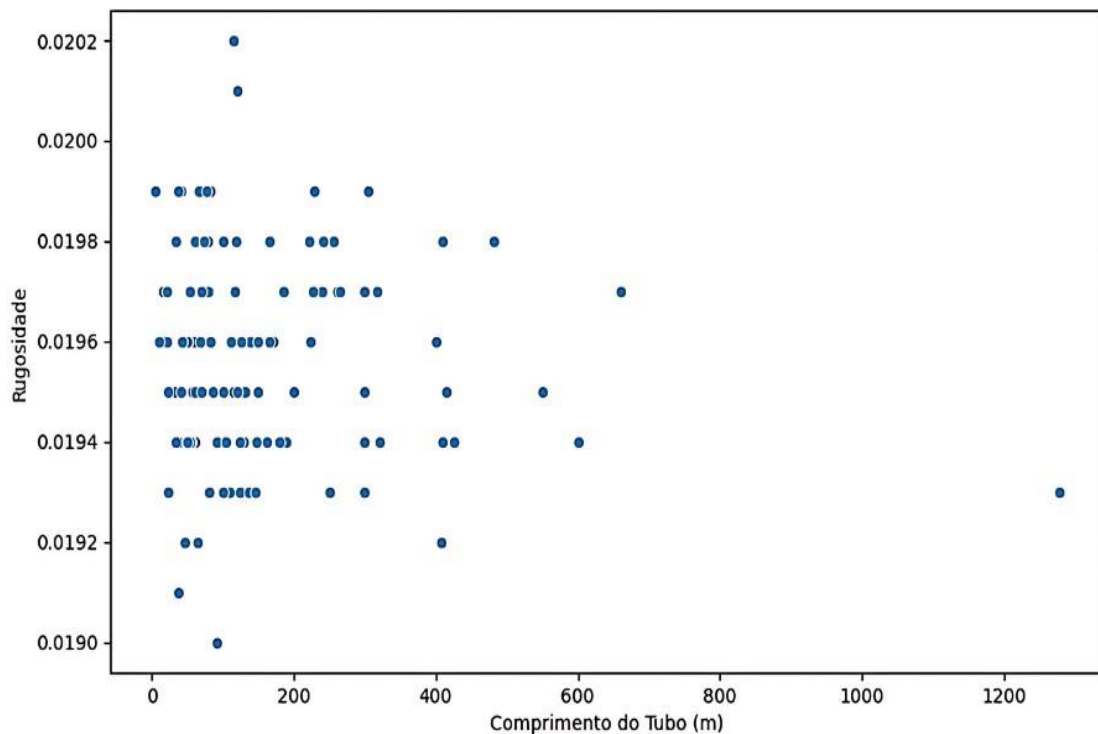
Essa consistência nos valores de rugosidade indicam que as tubulações foram construídas ou mantidas com materiais de boa qualidade e de forma padronizada, contribuindo para a eficiência hidráulica do sistema. A uniformidade na rugosidade é crucial, pois valores homogêneos resultam em uma distribuição equilibrada de perda de carga ao longo da rede, minimizando a resistência ao fluxo de água e, consequentemente, o consumo de energia.

A baixa variação observada sugere que o sistema está operando de forma eficiente, sem grandes discrepâncias na fricção interna das tubulações. Isso é um indicativo positivo, já que grandes variações na rugosidade poderiam resultar em zonas de ineficiência com maiores perdas de carga. Ao manter a rugosidade dentro de uma faixa limitada, a rede tende a operar com maior previsibilidade e menor desgaste, garantindo maior durabilidade e menores custos de manutenção a longo prazo.

Rugosidades anormalmente altas ou baixas podem ser sinais de desgaste, corrosão ou incrustações nas tubulações, o que pode aumentar a resistência ao fluxo e afetar a eficiência do sistema. Esses pontos devem ser monitorados de perto para evitar problemas futuros.

Outra análise de suma importância é a da Figura 76, que representa a dispersão da distribuição das rugosidades por comprimento do tubo.

Figura 76 – Gráfico de dispersão das rugosidades por comprimento do tubo



Fonte: O autor (2024)

A Figura 76, revela uma série de padrões sobre o comportamento da rede de abastecimento de água, especificamente no que tange à uniformidade da rugosidade em tubos de diferentes extensões. A análise detalhada dos pontos de dispersão nos permite identificar algumas características importantes sobre a condição do sistema e o impacto da rugosidade no desempenho hidráulico.

Primeiramente, observa-se que a rugosidade das tubulações está amplamente concentrada em uma faixa estreita, variando entre 0,0190 e 0,0202, independentemente do comprimento das tubulações. Essa uniformidade sugere que as características internas das tubulações, como o material e as condições de desgaste, são bastante consistentes em toda a rede, sem grandes variações relacionadas ao comprimento. Isso pode indicar que a rede foi construída de maneira padronizada, com o uso de materiais similares ou que a manutenção ao longo do tempo tem sido eficaz, garantindo que não haja deterioração significativa que afete a rugosidade de tubos mais longos ou mais antigos. A maioria dos tubos no sistema apresenta comprimentos abaixo de 400 metros, com uma distribuição dispersa de tubos mais longos, alguns chegando a 1200 metros.

Tubulações mais curtas são típicas de sistemas de distribuição em áreas urbanas, onde a densidade populacional e a proximidade entre consumidores exige ramificações mais curtas para atender a diferentes pontos. Tubos mais longos geralmente representam adutoras principais ou trechos que transportam água por distâncias maiores até zonas de distribuição, o que explica a sua menor frequência no gráfico. No entanto, mesmo nos

Trechos mais longos, a rugosidade se mantém consistente, sugerindo que essas tubulações não estão sujeitas a fatores adicionais de desgaste ou incrustações, o que é comum em sistemas mais antigos ou mal mantidos.

Não há uma correlação clara entre comprimento e rugosidade, o que também reforça a ideia de um sistema com manutenção regular ou com idade relativamente jovem. Em sistemas mais antigos, seria esperado que tubulações mais longas, principalmente se fossem instaladas em épocas distintas ou com materiais diferentes, apresentassem maiores valores de rugosidade, devido ao acúmulo de sedimentos, incrustações ou desgaste interno ao longo do tempo. No entanto, o gráfico não demonstra tal comportamento, o que é um bom indicador de que a rede está em boas condições operacionais.

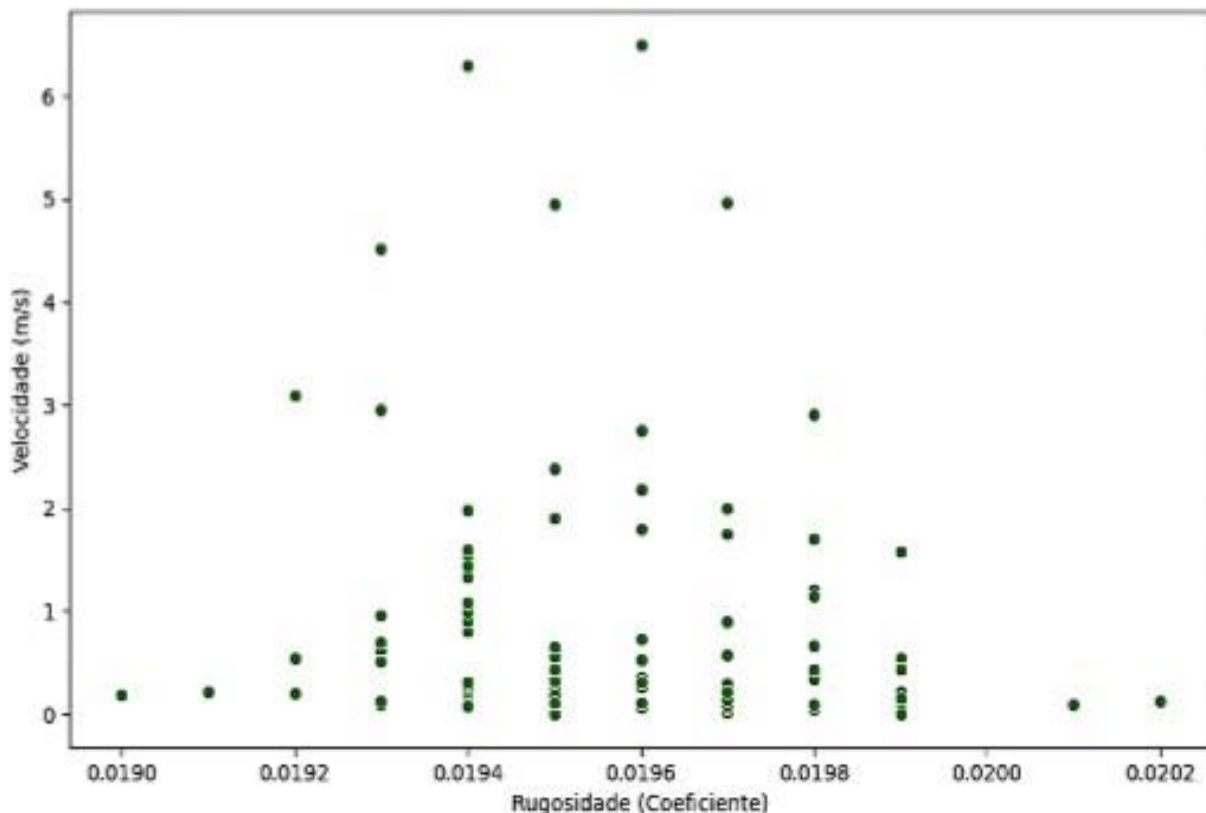
Outro ponto importante é a presença de alguns tubos com rugosidade ligeiramente acima de 0,0200, o que é relativamente raro no sistema. Esses valores podem representar tubulações que estão começando a apresentar sinais de desgaste ou que foram fabricadas com materiais um pouco diferentes, possivelmente em manutenções pontuais ou substituições. Embora esses valores não sejam alarmantes, podem ser um indicativo de que essas tubulações específicas exigem atenção, já que uma rugosidade maior pode levar a perdas de carga mais elevadas e a uma eficiência hidráulica reduzida nesses trechos. Manter o monitoramento dessas áreas pode ser crucial para evitar que o problema se agrave e comprometa o desempenho da rede como um todo.

Um ponto positivo é a presença de alguns tubos longos, acima de 600 metros, que apresentam rugosidade baixa, em torno de 0,0194. Isso é um ótimo indicativo de eficiência, pois tubos mais longos, quando combinados com baixas rugosidades, geram menores perdas de carga e, conseqüentemente, demandam menos energia para o bombeamento da água ao longo da rede.

Esses tubos provavelmente desempenham um papel crucial na distribuição de água para áreas mais distantes, e a baixa rugosidade neles contribui significativamente para manter a pressão adequada e reduzir o custo operacional do sistema.

Em termos gerais, a ausência de grandes variações de rugosidade no gráfico sugere que o sistema está operando de forma eficiente, sem grandes discrepâncias que poderiam comprometer o desempenho hidráulico. Essa consistência na rugosidade ao longo de tubos de diferentes comprimentos é um reflexo positivo de uma boa construção e/ou manutenção da rede. Outra análise importante é a da Figura 77 retrada a dispersão entre os valores de rugosidade e velocidade dentro dos tubos.

Figura 77 – Gráfico de dispersão entre os valores de rugosidade e velocidade nos tubos



Fonte: O autor (2024)

A rugosidade, que varia entre 0,0190 e 0,0202, mostra-se bastante uniforme ao longo da rede, indicando que as tubulações são compostas de materiais consistentes e estão em boas condições de manutenção. Essa uniformidade na rugosidade é um ponto positivo, pois ajuda a manter a eficiência hidráulica da rede, reduzindo a perda de carga associada ao atrito interno nas tubulações.

A velocidade do fluxo, que varia de 0 a mais de 6 m/s, apresenta uma distribuição muito mais ampla e indica que o sistema de abastecimento opera sob diferentes condições de fluxo em várias partes da rede. A maioria dos valores de velocidade está concentrada entre 1 m/s e 2 m/s, o que é um intervalo típico para redes de distribuição de água. Velocidades dentro dessa faixa são geralmente desejáveis, pois oferecem um bom equilíbrio entre eficiência e controle de pressão.

No entanto, o gráfico também revela alguns pontos onde a velocidade é significativamente maior, chegando a mais de 5 m/s. Esses trechos são críticos e podem indicar problemas como restrições de diâmetro ou alta demanda localizada, que forçam o aumento da velocidade do fluxo.

O fato de não haver uma correlação clara entre rugosidade e velocidade é uma constatação importante. Embora a rugosidade seja um fator que afeta a perda de carga, o comportamento hidráulico em termos de velocidade parece ser mais influenciado por outros fatores, como diâmetro da tubulação, pressão do sistema e variações de demanda de água ao longo da rede. Tubulações com valores similares de rugosidade apresentam uma grande variedade de velocidades, o que indica que a condição interna do tubo (rugosidade) não é o principal fator determinante para a velocidade do fluxo. Assim, embora a rugosidade seja importante, especialmente para minimizar as perdas de carga, outros fatores como a geografia do sistema e o dimensionamento dos tubos também desempenham papéis críticos.

Os pontos de alta velocidade, identificados no gráfico, merecem uma análise cuidadosa. Velocidades muito altas, acima de 5 m/s, podem causar efeitos negativos ao longo do tempo. Tubulações operando a essas velocidades tendem a sofrer mais desgaste, o que pode levar à degradação do material, aumento da rugosidade e, eventualmente, falhas no sistema. Além disso, velocidades excessivas podem aumentar a perda de carga de forma significativa, o que implica em maior demanda de energia para bombear a água, elevando os custos operacionais. Em algumas situações, essas altas velocidades podem resultar de subdimensionamento das tubulações para a demanda atual ou de redes projetadas sem levar em consideração o aumento populacional ou mudanças nas necessidades de abastecimento. A substituição ou expansão dessas tubulações pode ser uma solução para melhorar a eficiência e a longevidade do sistema.

Outro aspecto importante é que as tubulações com baixa rugosidade, especialmente em torno de 0,0190, apresentam uma ampla gama de velocidades, desde valores próximos de 0 m/s até velocidades mais elevadas. Isso indica que, mesmo em condições favoráveis de baixa rugosidade, a velocidade pode variar bastante dependendo de onde a tubulação está localizada na rede. Essa variabilidade pode ser explicada por diferenças na demanda de água, localização geográfica ou uso de tubulações de diferentes diâmetros. Entretanto, a baixa rugosidade nessas tubulações permite que, mesmo com velocidades mais elevadas, a eficiência seja mantida, reduzindo as perdas de carga associadas ao atrito interno.

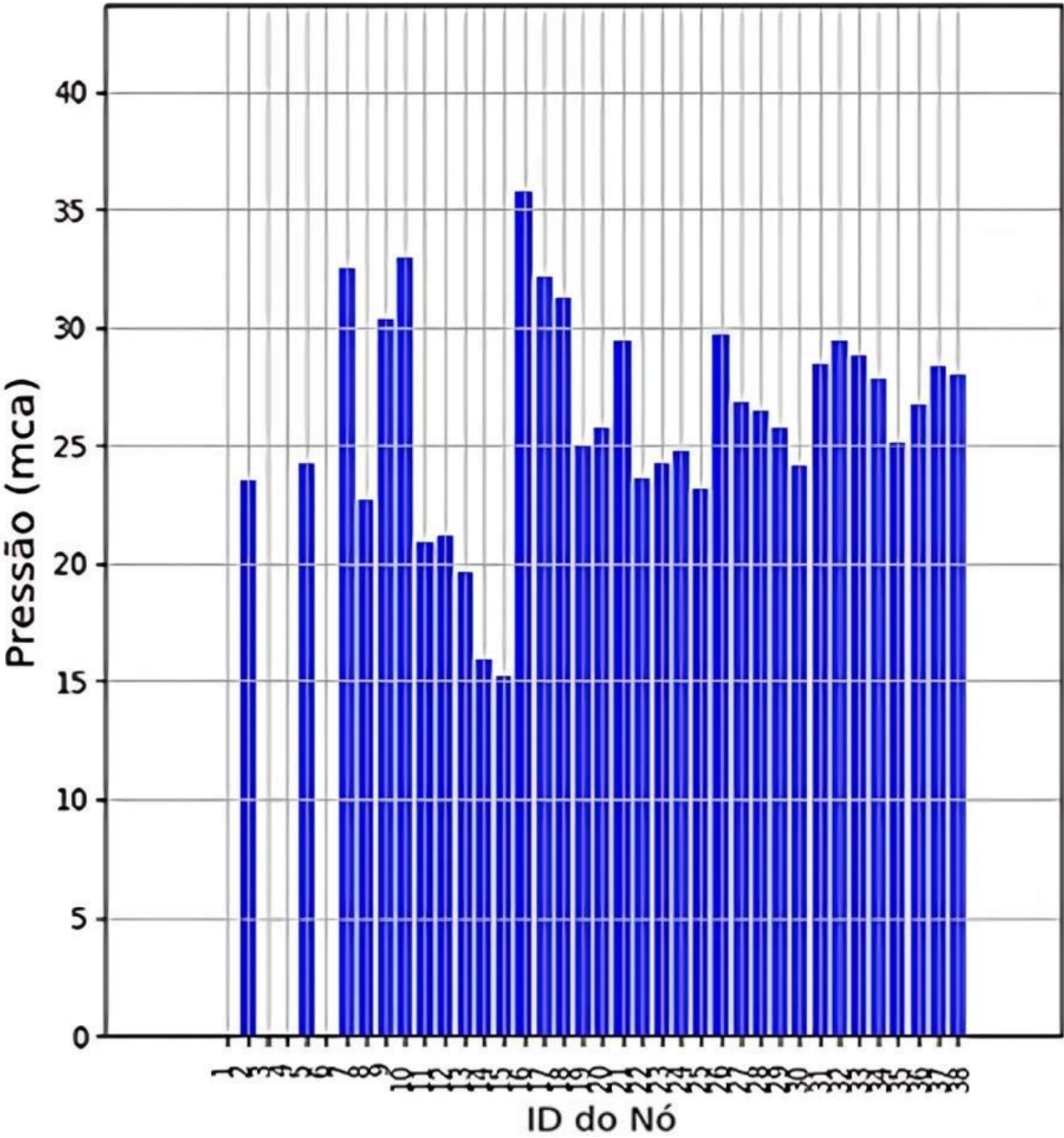
A Figura 77 evidencia um sistema com boas características de rugosidade, mas com variações significativas nas velocidades do fluxo, o que sugere que a rede pode estar sujeita a pressões operacionais diferentes em trechos distintos. Embora a rugosidade seja baixa e homogênea, o que é positivo para a eficiência do sistema, as velocidades elevadas em alguns pontos são um indicativo de que o sistema pode estar operando em condições subótimas em certos locais. Esses trechos de alta velocidade devem ser monitorados e, se possível, ajustados para evitar problemas futuros, como aumento de perda de carga, desgaste acelerado das tubulações e elevação dos custos operacionais.

A ausência de uma correlação clara entre rugosidade e velocidade reforça que o desempenho hidráulico é influenciado por uma combinação de fatores, e a simples manutenção de tubulações com baixa rugosidade não é suficiente para garantir a eficiência do sistema como um todo. A análise de variáveis como diâmetro, pressão e demanda ao longo da rede deve ser feita em conjunto com a rugosidade para otimizar o desempenho hidráulico. Manter a homogeneidade da rugosidade é uma parte importante da gestão da rede, mas lidar com variações de velocidade, especialmente em trechos críticos, é igualmente crucial para garantir a eficiência e a durabilidade do sistema de abastecimento de água.

Além de todas as análises já feitas, além de já ter realizado os resultados de pressão dos cenários com o plugin QGISRed , verificou-se também a necessidade de colocar os valores de pressão apresentados simultaneamente conforme Figuras 78, 79 e 80, sem ter que ficar procurando em mapas ou arquivos .inp de maneira desorganizada.

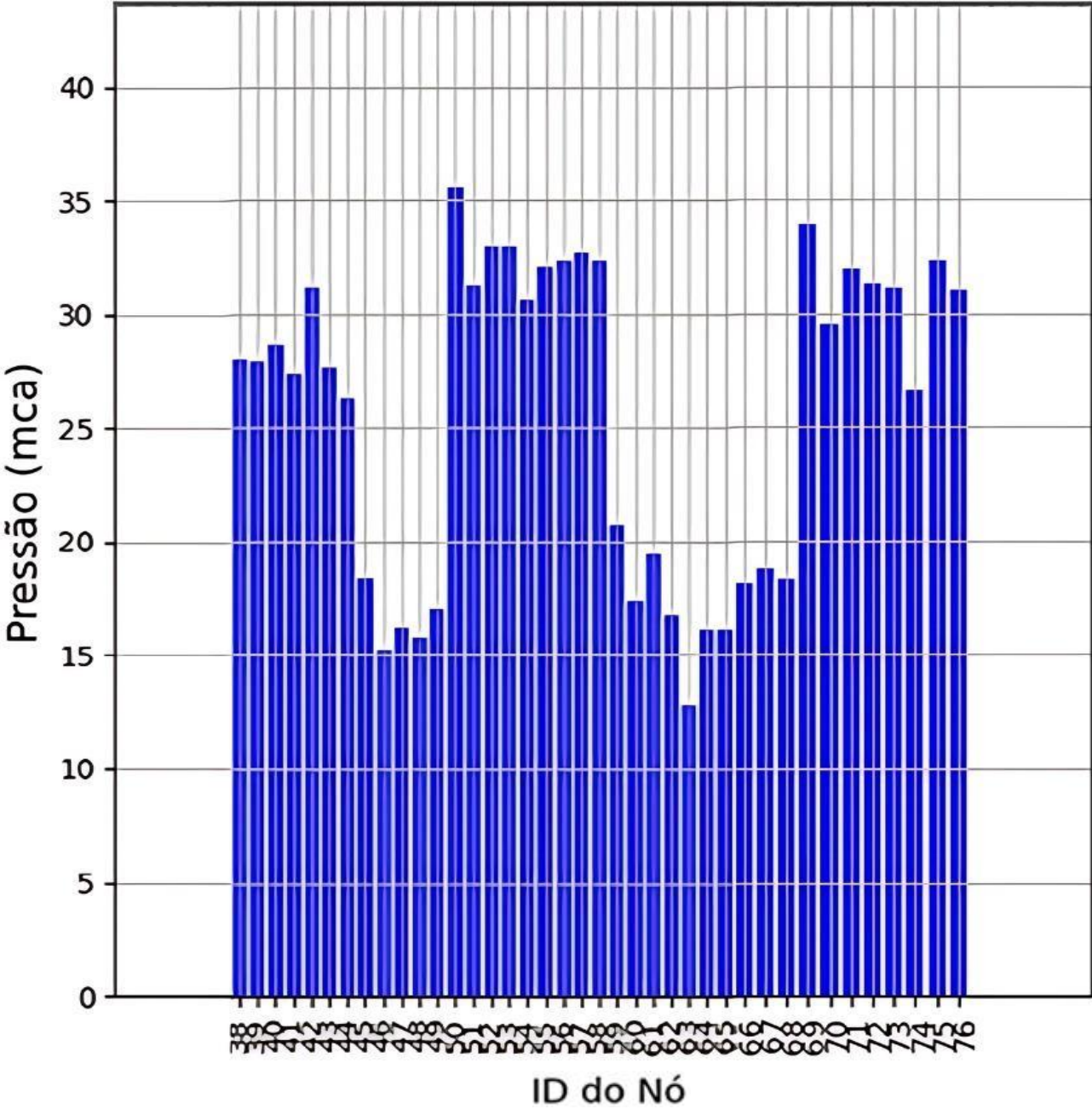
Esse tipo de gráfico das Figura 78, 79 e 80 permitem uma visualização organizada e eficiente das variações de pressão ao longo de toda a rede, ajudando a identificar padrões, possíveis gargalos ou áreas que precisem de atenção

Figura 78 – Gráfico de Distribuição da pressão nos nós do ID 1 até o ID 38



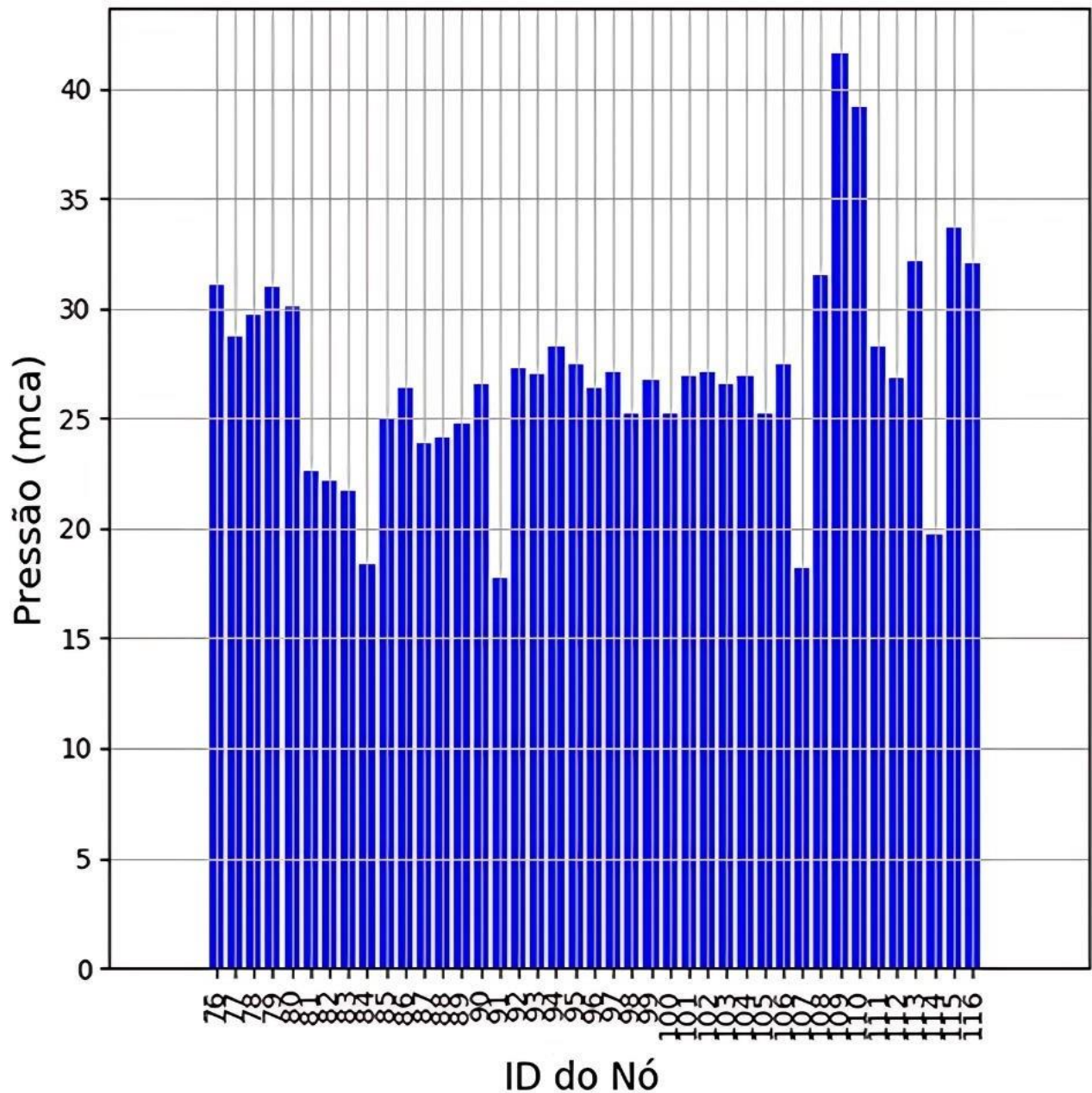
Fonte: O autor (2024)

Figura 79 – Distribuição das velocidade nos tubos do ID 38 até o ID 76



Fonte: O autor (2024)

Figura 80 – Distribuição das velocidade nos tubos do ID 76 até o ID 116



Fonte: O autor (2024)

Os gráficos das Figuras 78, 79 e 80 apresentam a distribuição das pressões simuladas em cada nó de uma rede de abastecimento de água, com os valores de pressão expressos em metros de coluna de água (mca) no eixo vertical e os IDs dos nós no eixo horizontal. Essa representação é fundamental para avaliar o desempenho hidráulico da rede e garantir que os níveis de pressão estejam dentro dos limites adequados para atender às demandas de consumo sem comprometer a integridade do sistema.

Os dados indicam uma ampla variação de pressões entre os nós, com a maioria apresentando valores entre 20 e 35 mca, o que é considerado ideal segundo as normas técnicas, pois garante um abastecimento eficiente e seguro. No entanto, há nós que registram pressões significativamente mais baixas, próximas de 5 mca, o que pode indicar áreas de baixa elevação ou locais onde o sistema enfrenta dificuldades para manter uma pressão suficiente. Por outro lado, também existem picos de pressão superiores a 40 mca, o que pode ser reflexo de regiões próximas a reservatórios elevados ou pontos de bombeamento que geram pressões elevadas para atender a zonas de maior demanda ou superar a resistência hidráulica em trechos mais extensos.

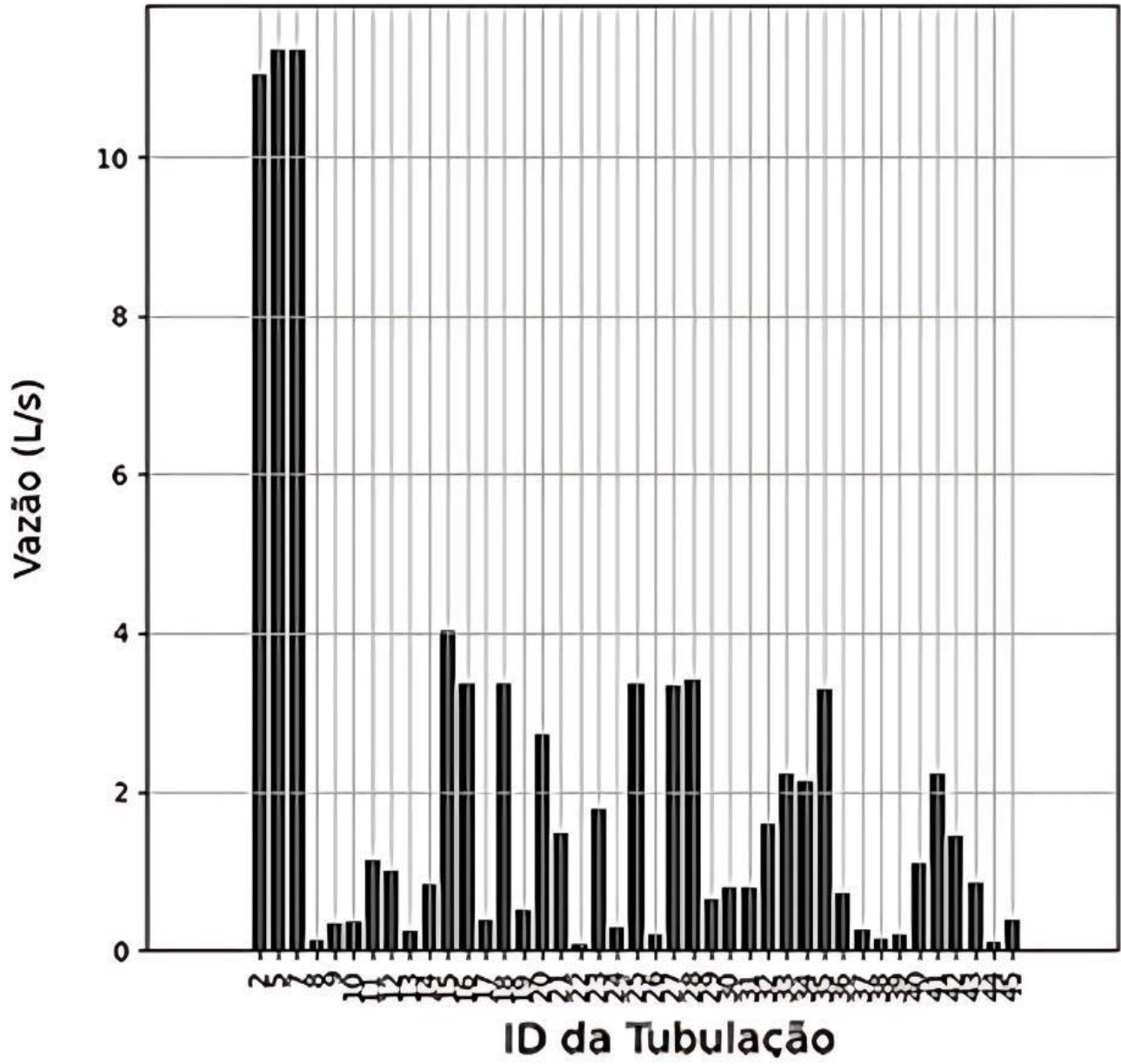
Pressões excessivamente altas podem causar problemas como rupturas nas tubulações, vazamentos e aumento dos custos de manutenção devido ao desgaste acelerado dos componentes. Para mitigar esses riscos, é recomendada a instalação de válvulas redutoras de pressão ou o redimensionamento das tubulações em áreas críticas. Já as pressões muito baixas, além de prejudicarem o abastecimento, podem comprometer a qualidade da água ao favorecer a formação de zonas de estagnação, acumulando sedimentos e possíveis contaminantes.

A topografia desempenha um papel determinante na variação das pressões na rede, especialmente em regiões montanhosas. Nós localizados em áreas mais altas exigem maior pressão para garantir o abastecimento, enquanto nós em áreas mais baixas tendem a registrar valores mais elevados devido à influência da gravidade. Esse comportamento ressalta a necessidade de estratégias de controle hidráulico, como a instalação de boosters para reforçar a pressão em zonas deficitárias e o ajuste de válvulas em trechos com pressões excessivas.

A análise detalhada das pressões em cada nó, como apresentada no gráfico, é indispensável para a otimização do sistema, permitindo identificar zonas críticas, planejar manutenções preventivas e propor intervenções para melhorar a eficiência e a confiabilidade da rede. Essa abordagem não só assegura o fornecimento contínuo e de qualidade, mas também contribui para a sustentabilidade operacional ao reduzir desperdícios e prolongar a vida útil da infraestrutura hidráulica.

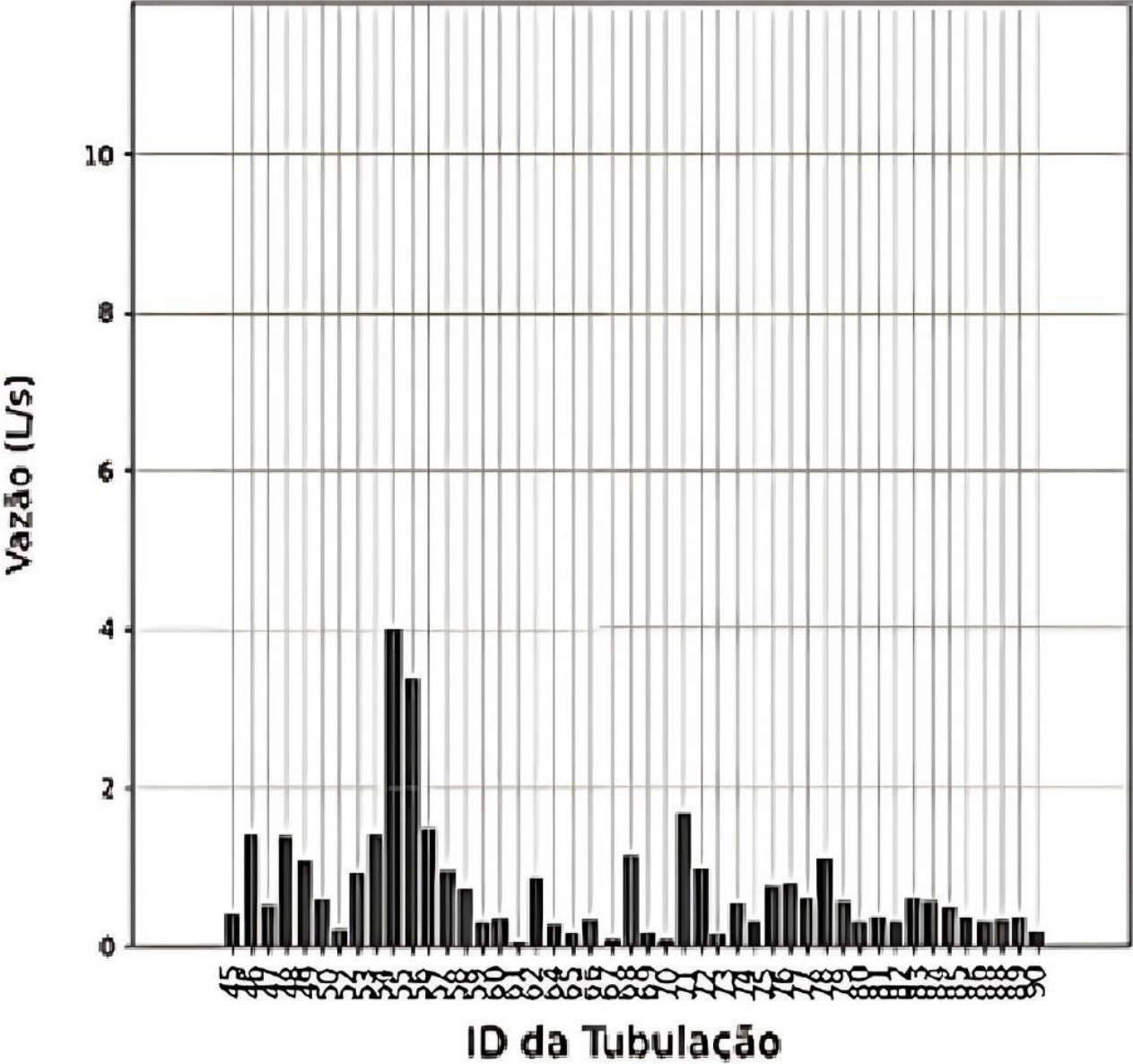
De forma análoga além de já ter realizado os resultados de vazão dos cenários com o plugin QGISRed, verificou-se também a necessidade de colocar os valores de vazão apresentados simultaneamente conforme as Figura 81, 82 e 83, sem ter que ficar procurando em mapas ou arquivos. inp de maneira desorganizada.

Figura 81 – Gráfico de Distribuição da vazão nos tubos do ID 2 até o ID 45



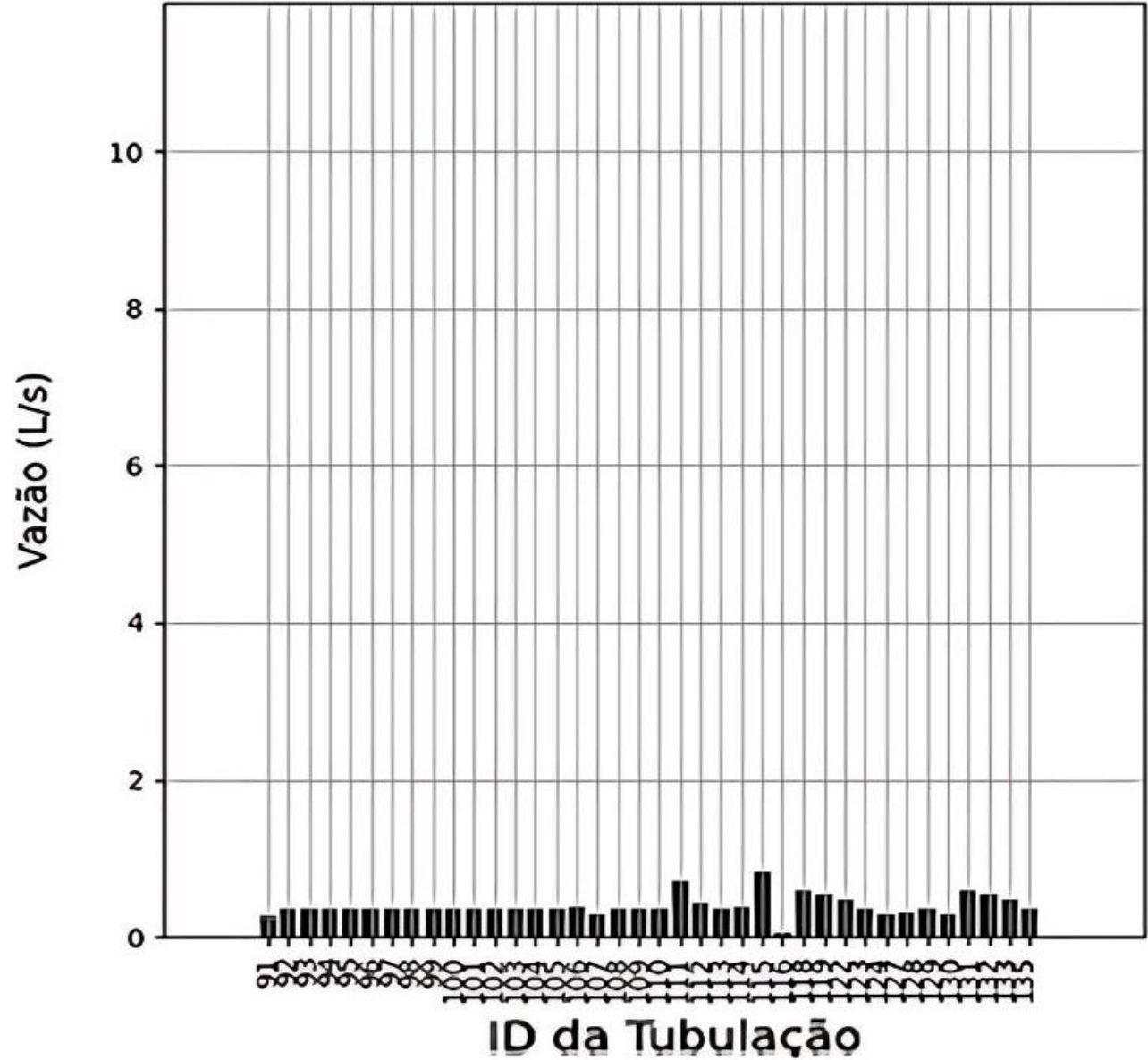
Fonte: O autor (2024)

Figura 82 – Gráfico de Distribuição da vazão nos tubos do ID 45 até o ID 90



Fonte: O autor (2024)

Figura 83 – Gráfico de Distribuição da vazão nos tubos do ID 91 até o ID 135



Fonte: O autor (2024)

As Figuras 81, 82 e 83, representam as vazões em diferentes nós de uma rede de abastecimento de água, com os valores medidos em litros por segundo (L/s) no eixo vertical e os IDs dos nós indicados no eixo horizontal. Essa análise é essencial para compreender como o fluxo de água está distribuído ao longo da rede e identificar possíveis discrepâncias entre a demanda e a oferta em diferentes pontos.

Os dados mostram uma grande concentração de vazões elevadas em poucos nós específicos, com valores que ultrapassam 10 L/s, enquanto a maioria dos outros nós apresenta vazões significativamente menores, muitas vezes abaixo de 2 L/s. Esse comportamento sugere que há nós que funcionam como pontos principais de distribuição ou atendem áreas de maior consumo, enquanto outros recebem apenas pequenas frações do fluxo total de água.

Vazões muito altas podem indicar a necessidade de redimensionamento das tubulações para evitar sobrecarga hidráulica e reduzir perdas de energia associadas a fluxos intensos. Esses nós de alta vazão geralmente estão localizados próximos a reservatórios, estações de bombeamento ou áreas de grande densidade populacional.

Por outro lado, vazões muito baixas podem estar relacionadas a zonas de baixa demanda ou áreas com restrições no transporte de água, o que pode levar à estagnação, acúmulo de sedimentos e redução da qualidade da água.

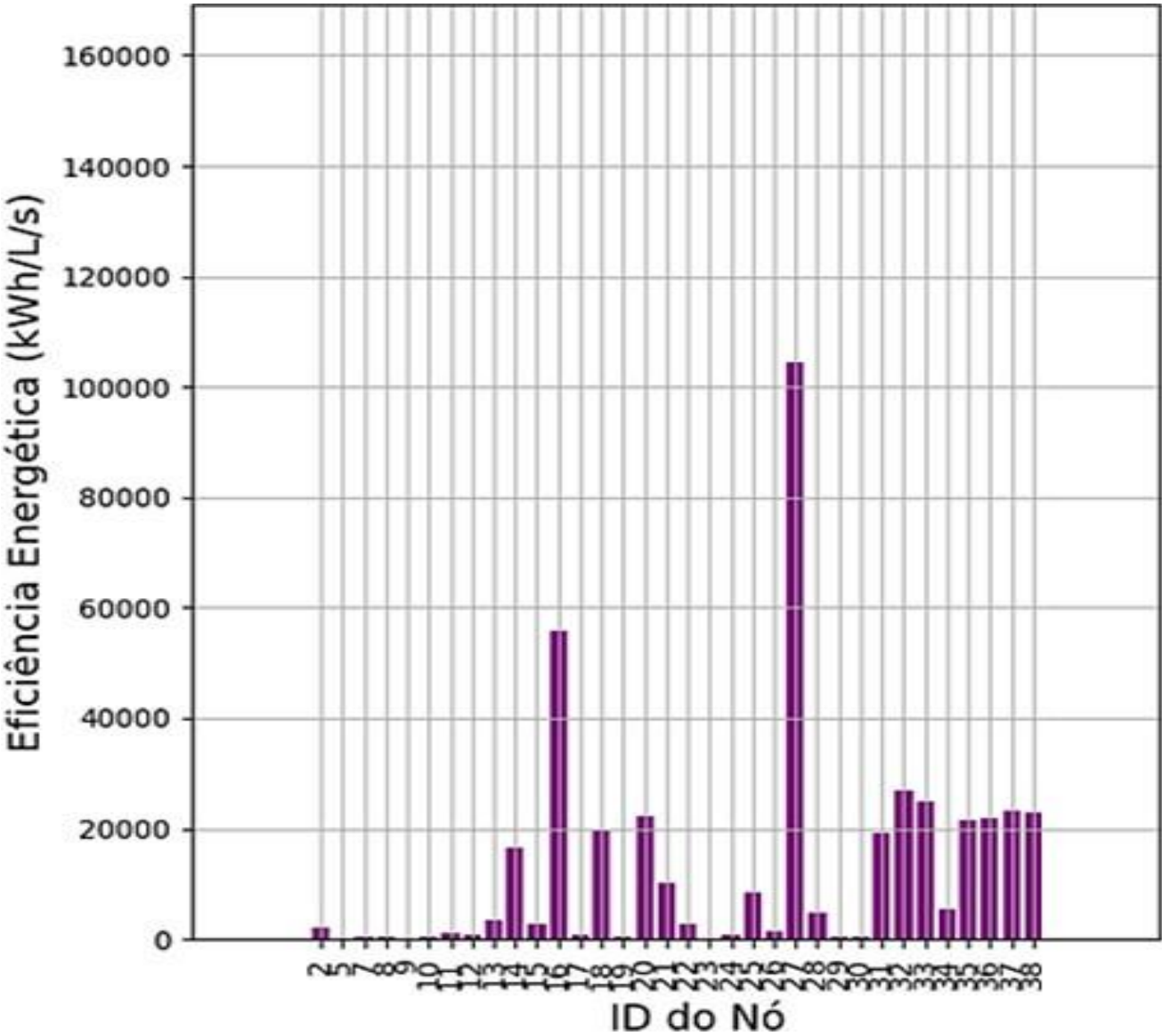
A variação de vazões observada também pode estar associada a fatores como o dimensionamento das tubulações, a altura manométrica das bombas e o layout da rede. Em sistemas complexos, é comum que as vazões sejam maiores nas tubulações principais e reduzidas nas secundárias, mas é importante garantir que todas as áreas da rede recebam o fluxo necessário para atender as demandas locais com eficiência e segurança.

A identificação de nós com vazões muito discrepantes, como evidenciado no gráfico, é fundamental para o planejamento e operação do sistema. Vazões excessivas podem ser controladas por meio de válvulas reguladoras de fluxo ou ajustes no bombeamento, enquanto vazões muito baixas podem exigir intervenções como o aumento do diâmetro das tubulações ou a redistribuição do fluxo na rede. Essas medidas são importantes não apenas para garantir o equilíbrio hidráulico, mas também para otimizar o uso de energia e prolongar a vida útil da infraestrutura.

Esse tipo de análise, como ilustrado no gráfico, fornece uma visão detalhada da dinâmica do sistema e permite a tomada de decisões informadas para melhorar a eficiência, reduzir custos operacionais e assegurar um fornecimento confiável de água para todos os usuários.

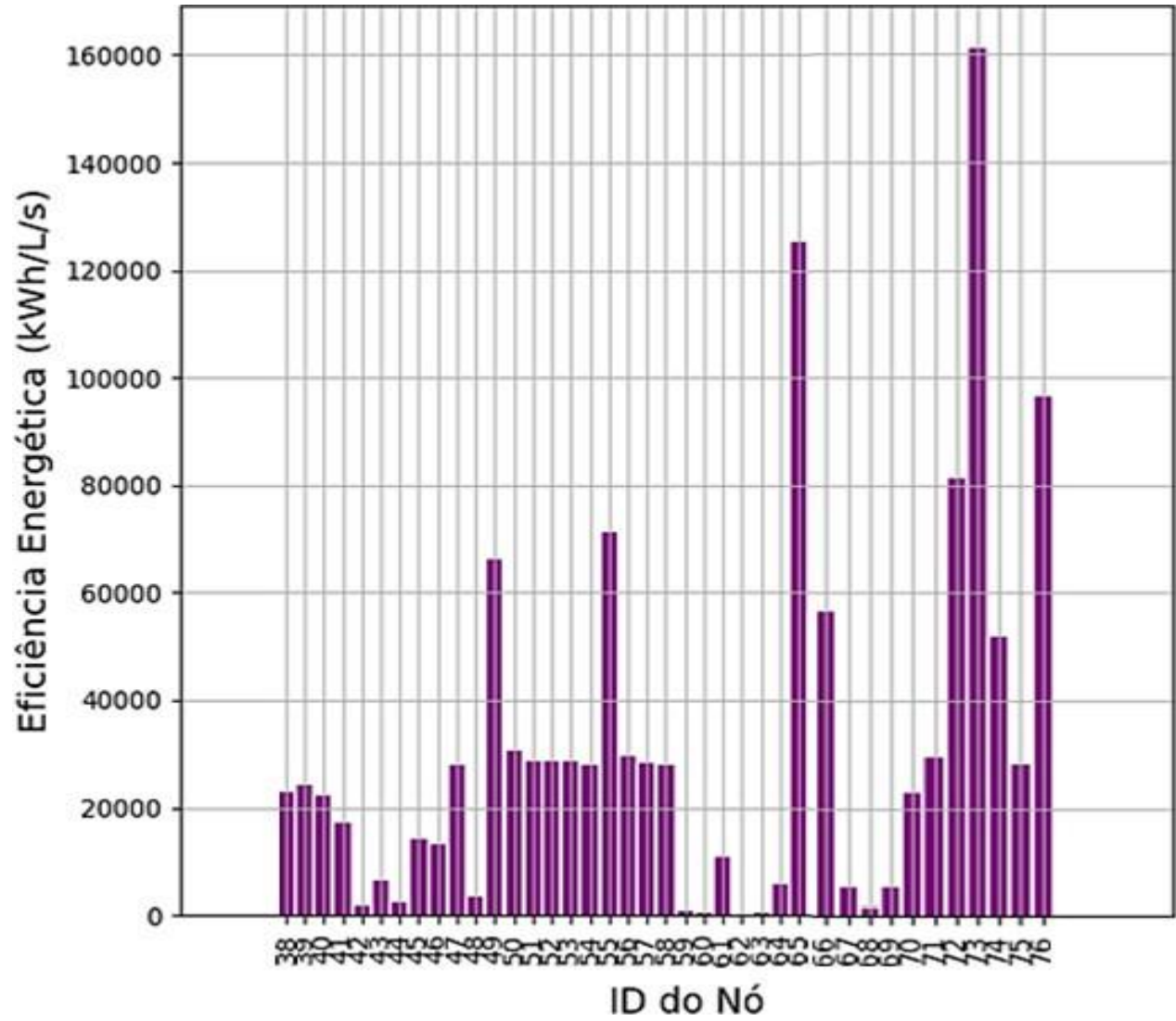
Outra análise importante são os gráficos das Figuras 84, 85 e 86 da Eficiência Energética em Cada Nó, que demonstra a energia utilizada ao longo de uma rede de abastecimento de água, associando a eficiência energética (kWh/L/s) ao ID dos nós.

Figura 84 – Distribuição da eficiência energética do ID 2 até o ID 38



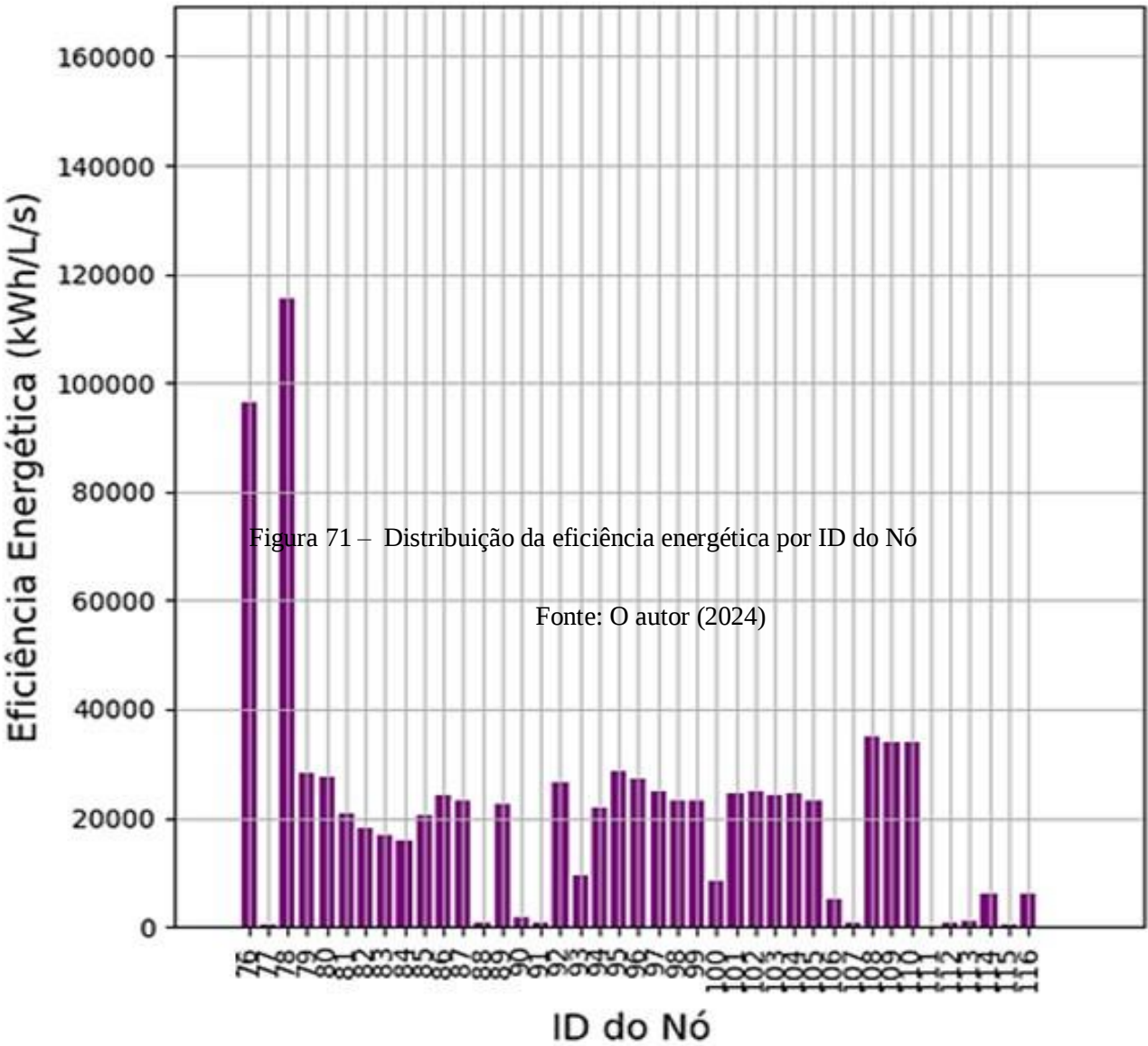
Fonte: O autor (2024)

Figura 85 – Distribuição da eficiência energética do ID 38 até o ID 76



Fonte: O autor (2024)

Figura 86 – Distribuição da eficiência energética do ID 76 até o ID 116



Fonte: O autor (2024)

A análise evidencia uma discrepância significativa entre os diferentes pontos da rede, com alguns nós consumindo muito mais energia por litro de água bombeado do que outros. Essa variação pode estar associada a vários fatores, como a elevação dos nós, o dimensionamento das tubulações e bombas, a pressão necessária e as condições hidráulicas locais.

Os nós com valores de eficiência energética mais altos indicam que há um consumo exagerado de energia nesses pontos, sugerindo a presença de problemas operacionais ou de design.

Por exemplo, esses nós podem estar localizados em áreas de maior elevação, onde a energia necessária para vencer a gravidade e manter a pressão da água é maior. Alternativamente, esses picos de eficiência energética podem refletir a presença de tubulações com alta rugosidade ou dimensões inadequadas, que acabam gerando perdas significativas de energia devido à fricção interna. Outro cenário possível é a necessidade de sobrecarregar bombas para compensar demandas elevadas em pontos mais afastados ou críticos da rede.

Em contraste, a maioria dos nós apresenta eficiência energética significativamente menor, o que indica que eles exigem menos energia para transportar a mesma quantidade de água. Embora isso possa ser positivo em termos de economia de energia, é necessário interpretar esses números com cuidado.

Eficiências muito baixas podem estar associadas a zonas de baixa demanda, onde a água se move mais lentamente e pode enfrentar problemas de estagnação. Em tais condições, a qualidade da água pode ser prejudicada devido ao acúmulo de sedimentos ou à falta de oxigenação, o que resulta em uma operação aparentemente eficiente, mas não necessariamente ideal.

A distribuição assimétrica dos dados sugere que alguns nós estão em áreas de alta demanda ou de grande consumo, o que pode estar causando um estresse adicional ao sistema hidráulico, exigindo maiores volumes de bombeamento e, conseqüentemente, mais energia. Esses nós podem estar localizados próximos a grandes consumidores de água, como indústrias ou áreas densamente povoadas, ou podem estar em locais críticos da rede, como reservatórios ou estações de bombeamento. Além disso, nós com eficiência energética elevada também podem estar relacionados a problemas de pressurização inadequada, o que leva ao desperdício de energia. Em muitos sistemas de abastecimento, quando as bombas são mal ajustadas ou as válvulas reguladoras de pressão não são eficientes, a energia necessária para fornecer água a uma determinada pressão aumenta desproporcionalmente.

Por outro lado, os nós com eficiência energética baixa geralmente estão situados em áreas mais próximas das fontes de abastecimento ou em pontos onde a demanda é moderada e o esforço energético para movimentar a água é mínimo. Esses nós podem não apresentar grandes desafios hidráulicos, mas isso não significa que não possam ser otimizados.

A eficiência energética aparentemente baixa em alguns nós pode ser um sinal de que há um subdimensionamento ou superdimensionamento das infraestruturas, o que pode gerar custos operacionais desnecessários.

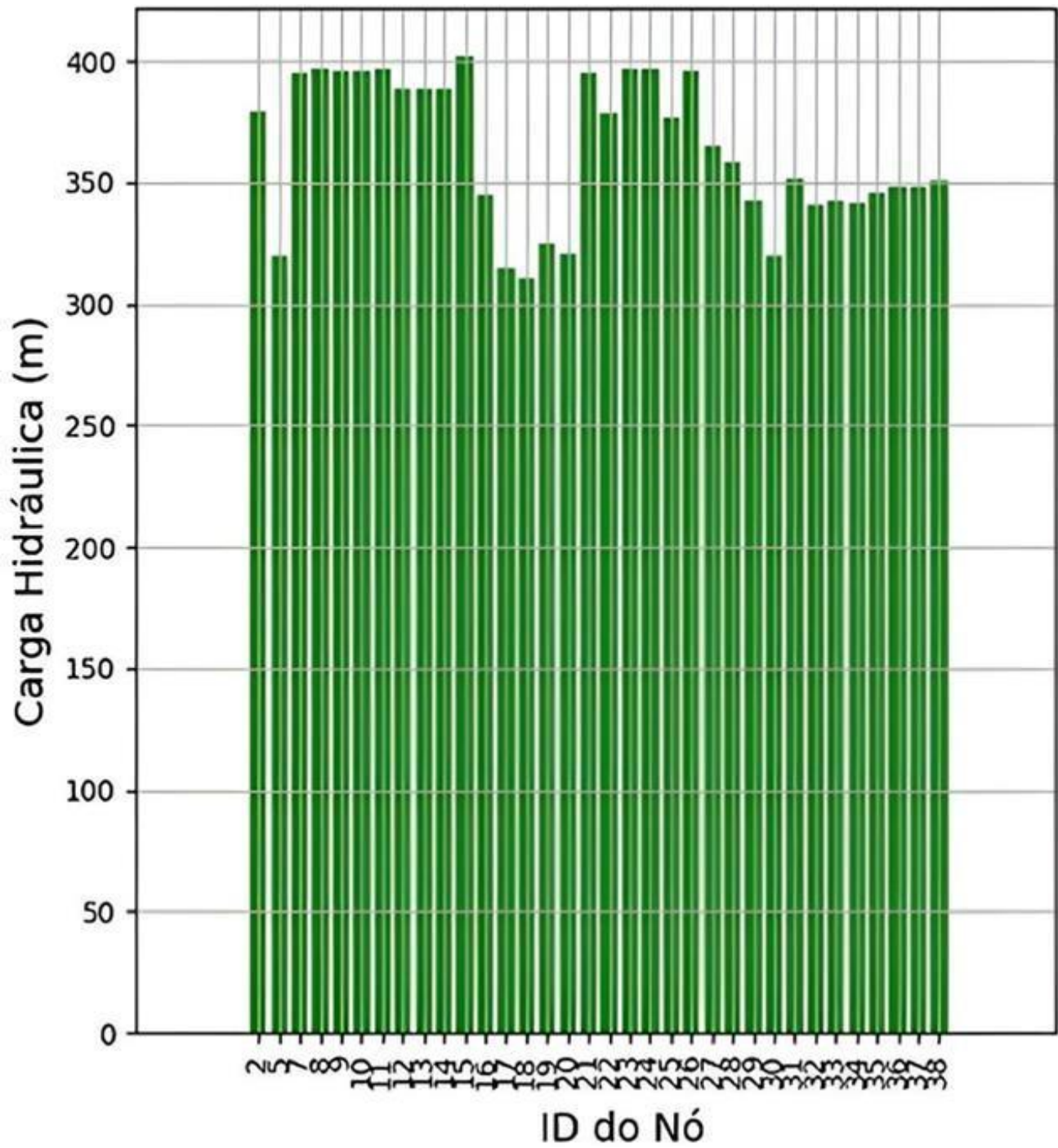
Para melhorar a eficiência energética geral do sistema, seria necessário identificar os nós com maior consumo energético e investigar possíveis causas de ineficiência, como vazamentos, demandas elevadas, ou dimensionamento inadequado de tubulações. Além disso, intervenções como o redimensionamento de bombas, a redistribuição da carga hidráulica e a instalação de válvulas reguladoras de fluxo podem ser eficazes para redistribuir a pressão de maneira mais uniforme e reduzir o esforço energético necessário.

Os gráficos das Figuras 84, 84 e 86 fornecem uma visão crucial sobre a distribuição do consumo energético na rede de abastecimento, permitindo a identificação de nós problemáticos que podem estar sobrecarregando o sistema.

A partir desta análise, é possível tomar decisões informadas para otimizar o uso de energia, melhorar a eficiência operacional e garantir a sustentabilidade a longo prazo da rede. O objetivo final dessas intervenções seria não apenas garantir um fornecimento de água mais econômico e confiável, mas também reduzir os custos associados ao consumo de energia, que representam uma parte significativa das despesas operacionais dos sistemas de abastecimento de água.

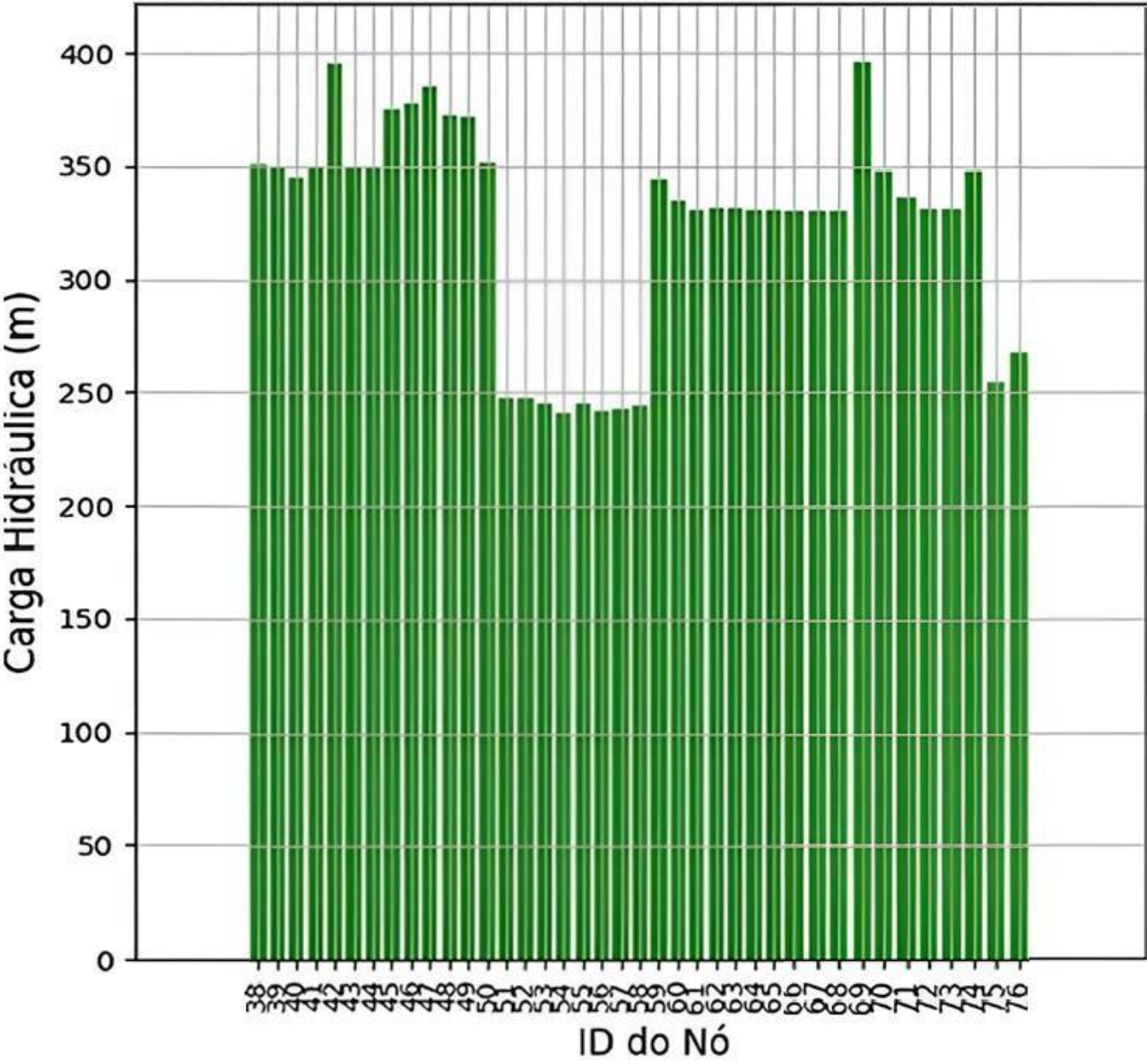
Outra análise importante é a da carga hidráulica por ID do nó da rede conforme mostram as Figuras 87, 88 e 89, sendo uma representação essencial para avaliar o desempenho do sistema.

Figura 87 – Distribuição da carga hidráulica do ID 2 até o ID 38



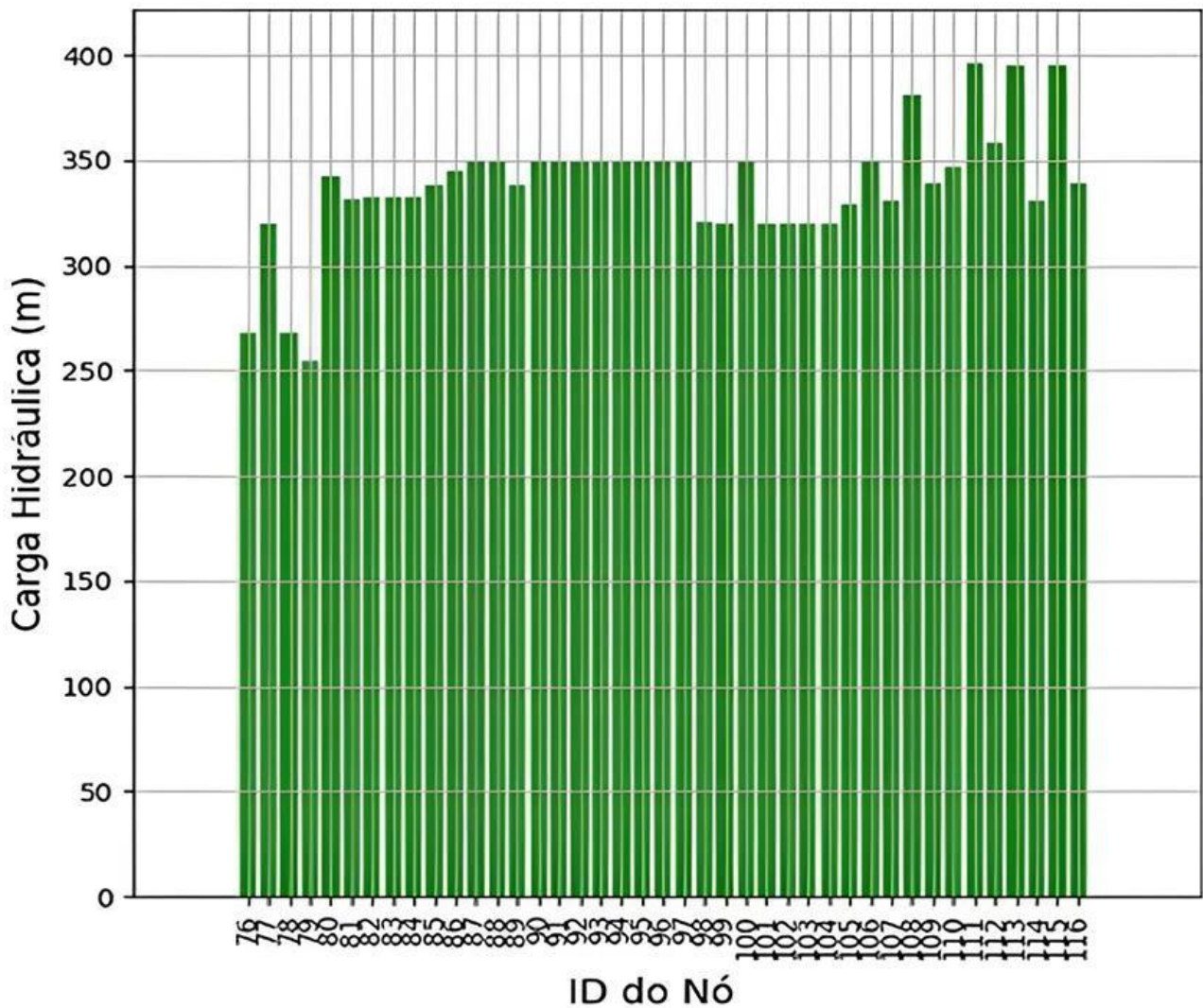
Fonte: O autor (2024)

Figura 88 – Distribuição da carga hidráulica do ID 38 até o ID 76



Fonte: O autor (2024)

Figura 89 – Distribuição da carga hidráulica do ID 76 até o ID 116



Fonte: O autor (2024)

As Figuras 87, 88 e 89 ilustram a distribuição da carga hidráulica em cada nó de uma rede de abastecimento de água, sendo uma representação essencial para avaliar o desempenho do sistema. A carga hidráulica, expressa em metros (m), é exibida no eixo vertical, enquanto o eixo horizontal corresponde ao ID de cada nó. Os dados mostram uma grande variação de carga ao longo da rede, refletindo as condições operacionais, topográficas e estruturais que influenciam o comportamento hidráulico em diferentes pontos do sistema. Essa análise é crucial para identificar áreas críticas e planejar intervenções que garantam uma operação eficiente e segura.

Os nós com valores elevados de carga hidráulica, frequentemente superiores a 350 metros, sugerem proximidade a reservatórios elevados ou a pontos de bombeamento, que introduzem energia adicional ao sistema. Esses picos de carga são necessários para compensar perdas de pressão em trechos extensos ou regiões de maior demanda.

Por outro lado, os nós com cargas muito baixas, próximos de zero, indicam pontos potencialmente problemáticos, como insuficiência de pressão para atender às demandas locais ou mesmo dificuldades no transporte da água devido à perda de carga excessiva ou a altitudes mais elevadas. Tais situações podem comprometer o abastecimento e demandam intervenções, como redimensionamento de tubulações, ajuste de equipamentos ou redistribuição do fluxo.

A variação significativa de carga ao longo da rede revela uma distribuição heterogênea, o que pode ser indício de um sistema não completamente otimizado. Idealmente, uma rede de abastecimento deve manter uma carga hidráulica equilibrada, dentro dos limites recomendados pelas normas técnicas, para garantir que todos os nós recebam pressão suficiente sem sobrecarregar componentes como bombas e tubulações. A presença de zonas críticas com valores muito altos ou muito baixos de carga pode indicar a necessidade de melhorias específicas, como a instalação de válvulas reguladoras de pressão para evitar perdas excessivas ou de bombas adicionais para reforçar a pressão em áreas deficitárias.

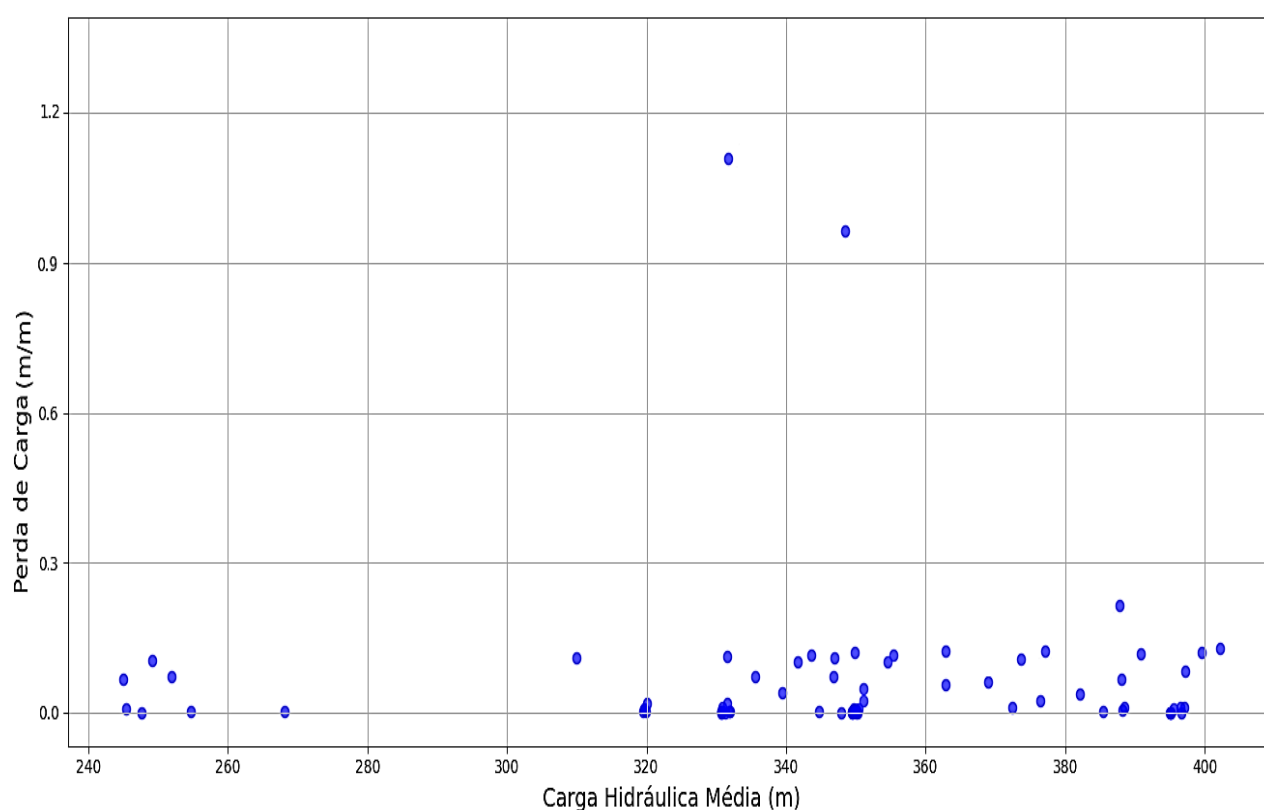
A influência da topografia é evidente na variação dos valores de carga. Em regiões montanhosas, como frequentemente ocorre em redes localizadas em terrenos acidentados, a elevação influencia diretamente a carga hidráulica necessária para atender cada ponto. Nós localizados em altitudes mais elevadas exigem maior pressão, enquanto áreas mais baixas podem apresentar cargas excessivas, criando a necessidade de mecanismos de controle para equilibrar o sistema. Além disso, perdas de carga associadas a longas distâncias, rugosidade interna das tubulações e diâmetros inadequados podem amplificar as discrepâncias observadas no gráfico.

A análise da carga hidráulica também é um indicador valioso para identificar possíveis vazamentos ou anomalias na rede. Quedas abruptas de carga em segmentos específicos podem estar associadas a perdas significativas de água ou a falhas estruturais que devem ser investigadas e corrigidas. Essas informações são essenciais para priorizar manutenções preventivas e corretivas, reduzindo custos operacionais e otimizando a eficiência energética do sistema.

Em síntese, as Figuras 87, 88 e 89 oferecem uma visão abrangente da performance hidráulica da rede e auxilia na identificação de deficiências operacionais, na avaliação da adequação aos padrões normativos e no planejamento de intervenções.

A análise permite não apenas assegurar o abastecimento contínuo e de qualidade à população, mas também promover a sustentabilidade hídrica e energética da rede, reduzindo desperdícios e prolongando a vida útil dos equipamentos e infraestruturas do sistema. Outra análise importante é a da Figura 90, que representa a relação entre Perda de Carga e Carga Hidráulica Média ao qual mostra como a perda de carga (m/m) varia em função da carga hidráulica média (m) nos diferentes nós.

Figura 90 – Gráfico de dispersão entre a perda de carga e a carga hidráulica média da rede



Fonte: O autor (2024)

A análise visual destaca uma grande concentração de pontos em torno de valores mais baixos de perda de carga, com algumas exceções onde a perda de carga é consideravelmente mais elevada. Isso indica que a maioria dos nós experimenta perdas de carga relativamente pequenas, enquanto um pequeno número de nós apresenta perdas de carga significativas, que podem impactar a eficiência geral do sistema.

A perda de carga em sistemas de abastecimento de água está intimamente ligada à resistência ao fluxo dentro das tubulações, que por sua vez é influenciada por fatores como o diâmetro das tubulações, a rugosidade interna e a velocidade da água. Valores elevados de perda de carga podem sugerir a presença de problemas locais, como tubulações subdimensionadas, superfícies internas deterioradas (devido ao envelhecimento dos materiais) ou fluxos excessivamente rápidos. Nessas situações, a energia necessária para transportar a água aumenta, resultando em maior pressão e consumo energético para manter o abastecimento.

Os nós com maior carga hidráulica média (acima de 320 m) tendem a exibir perdas de carga ligeiramente mais elevadas, como mostrado por alguns picos no gráfico. Esses nós podem estar localizados em áreas onde a pressão necessária para fornecer água é maior, como regiões com elevações geográficas elevadas. Nesses casos, a água precisa ser bombeada com maior intensidade para vencer a força gravitacional, o que também pode resultar em uma maior perda de carga ao longo das tubulações. Além disso, a distância entre o ponto de origem da água e esses nós pode ser outro fator contribuinte para a maior perda de carga, já que o atrito interno se acumula ao longo de trajetos mais longos.

Em contraste, a maioria dos nós situados em regiões com carga hidráulica média entre 240 m e 300 m apresentam baixas perdas de carga, indicando que o sistema está operando de forma eficiente nessas áreas. Aqui, a movimentação da água através da rede parece ocorrer com menos resistência, o que pode significar que as tubulações são adequadamente dimensionadas, bem mantidas e que as pressões são equilibradas. Esses nós podem estar mais próximos de fontes de água ou situados em zonas de baixa elevação, onde a energia necessária para mover a água é naturalmente menor.

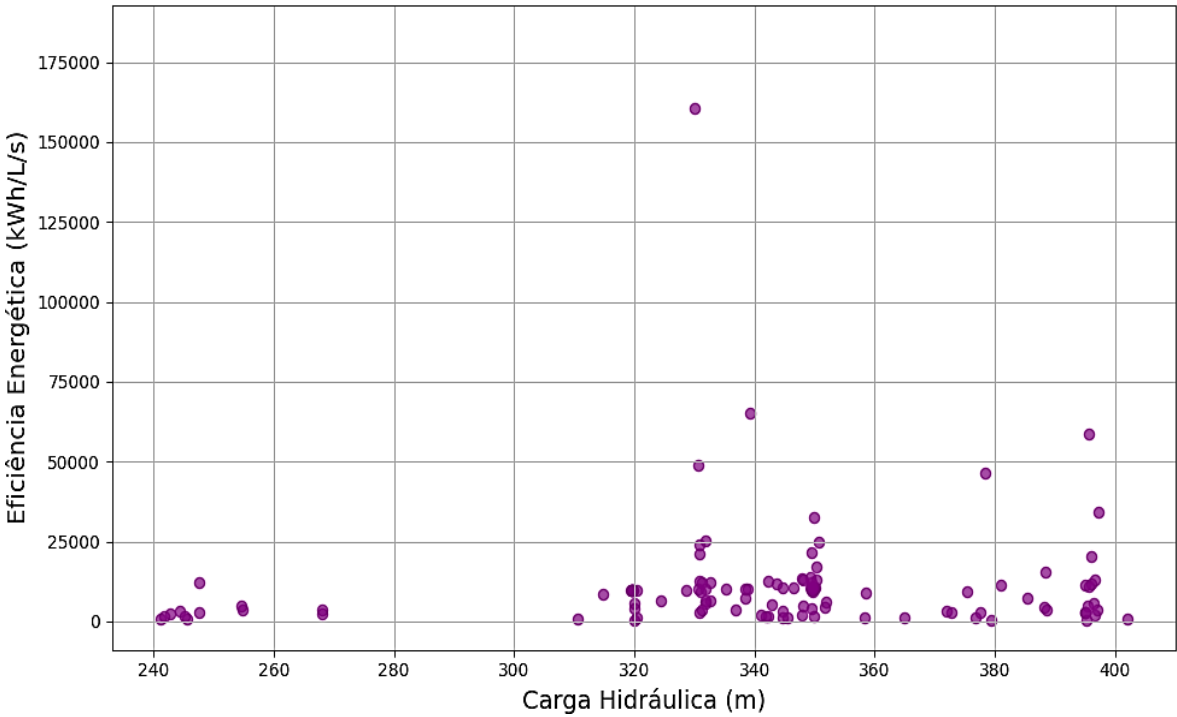
Contudo, os nós com baixa perda de carga também podem mascarar potenciais problemas, como fluxos insuficientes ou uma baixa velocidade da água, o que pode causar estagnação e prejudicar a qualidade da água. Assim, embora baixos valores de perda de carga sejam, em princípio, desejáveis, é importante assegurar que esses nós não estejam contribuindo para outros problemas operacionais.

A relação observada no gráfico entre a carga hidráulica média e a perda de carga permite identificar padrões que podem guiar estratégias de manutenção e otimização da rede de abastecimento. Por exemplo, nós que apresentam picos de perda de carga podem ser alvos de investigações mais detalhadas para avaliar se as tubulações nesses trechos precisam de reparos ou substituições. Além disso, ajustes no sistema de pressurização, como a instalação de válvulas redutoras de pressão ou a modulação de bombas, podem ser eficazes para redistribuir a pressão de maneira mais eficiente, reduzindo as perdas de carga nos nós problemáticos.

O gráfico da Figura 90, oferece uma importante visão sobre o comportamento hidráulico da rede e sobre como as características físicas das tubulações e as condições operacionais afetam a eficiência do sistema. Ao abordar as perdas de carga nos nós com valores mais elevados, é possível aumentar a confiabilidade do sistema, reduzir o consumo de energia e melhorar o desempenho geral da rede de abastecimento de água. A interpretação dos dados também pode ajudar a prever problemas futuros e a garantir uma operação mais sustentável e econômica do sistema a longo prazo.

Outra análise importante é a da Figura 91, que representa a relação entre Eficiência Energética e Carga Hidráulica ao qual mostra como a eficiência energética varia em função da carga hidráulica.

Figura 91 – Gráfico de dispersão entre Eficiência Energética e Carga Hidráulica



NBR 5626 (2020) O gráfico de Relação entre Eficiência Energética e Carga Hidráulica nos Nós mostra a variação da eficiência energética (em kWh/L/s) em função da carga hidráulica (m) nos diversos nós de uma rede de abastecimento de água. A eficiência energética, neste contexto, refere-se à quantidade de energia necessária para fornecer um volume específico de água por unidade de tempo, e uma eficiência mais alta indica maior consumo de energia para um mesmo volume de água transportado. O gráfico revela uma significativa concentração de pontos em torno de valores mais baixos de eficiência energética, com alguns pontos dispersos em valores extremamente altos, sugerindo uma distribuição desigual da eficiência ao longo da rede.

Observa-se que a maioria dos nós opera com eficiência energética relativamente baixa, o que é desejável em um sistema de abastecimento de água, pois significa que a quantidade de energia usada para transportar a água é minimizada. No entanto, há um número limitado de nós que apresentam valores de eficiência energética muito elevados, especialmente em torno de cargas hidráulicas maiores (acima de 320 m).

Esses pontos sugerem áreas problemáticas na rede, onde o consumo energético é desproporcionalmente alto em relação à quantidade de água transportada, possivelmente devido a fatores como tubulações subdimensionadas, elevadas resistências internas ou bombeamento ineficiente.

Os picos de eficiência energética em cargas hidráulicas acima de 320 m podem estar associados a nós localizados em áreas de elevação elevada ou distantes das fontes de água. Nessas situações, o sistema requer mais energia para vencer a gravidade ou o atrito ao longo de longos trechos de tubulação. Além disso, a presença de vazamentos ou tubulações antigas com superfícies rugosas pode aumentar a resistência ao fluxo de água, exigindo mais energia para manter o abastecimento adequado.

Por outro lado, os nós que operam com carga hidráulica entre 240 m e 300 m, em sua maioria, apresentam eficiência energética baixa e estável. Esses nós provavelmente estão situados em áreas mais planas ou próximas às estações de bombeamento, onde as pressões e o fluxo de água são mais facilmente mantidos, resultando em menores exigências energéticas. Nessas regiões, o sistema parece estar operando de maneira eficiente, com pouca energia sendo desperdiçada para manter o transporte de água.

Entretanto, a presença de nós com eficiência energética muito baixa também pode indicar um subaproveitamento do sistema, onde o fluxo de água é insuficiente para justificar o consumo energético. Em tais casos, embora o consumo de energia pareça baixo, pode ser um sinal de que o sistema não está operando em sua capacidade ideal, o que pode levar a uma entrega inadequada de água ou a problemas como baixa pressão em determinadas áreas.

A análise desse gráfico é fundamental para identificar pontos de ineficiência no sistema de distribuição de água. Nós com picos elevados de eficiência energética são candidatos a intervenções, como melhorias na infraestrutura de bombeamento ou substituições de tubulações problemáticas. Além disso, a redistribuição de pressões ou a instalação de sistemas de bombeamento mais eficientes pode ajudar a equilibrar o consumo de energia ao longo da rede.

O gráfico da Figura 91, oferece percepções importantes sobre o desempenho energético do sistema de abastecimento de água, revelando como a energia é distribuída e utilizada para manter o fluxo de água. Ao focar nos nós com maior ineficiência energética, é possível otimizar o sistema, reduzir o consumo de energia e promover uma operação mais econômica e ambientalmente sustentável.

A identificação desses padrões também pode ajudar na tomada de decisões relacionadas à manutenção preventiva e à modernização do sistema para garantir um abastecimento de água confiável e eficiente a longo prazo.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo apresentou uma metodologia inovadora para a gestão de redes de distribuição de água em regiões montanhosas, integrando ferramentas como o QGISRed, Processing R Provider e bibliotecas Python, uma combinação poderosa que alia geoprocessamento, modelagem hidráulica e análise estatística avançada. O uso dessas tecnologias permitiu um avanço significativo na compreensão das complexas interações entre pressão, vazão e topografia, elementos cruciais para sistemas de abastecimento em regiões com relevo acidentado. A abordagem proposta não apenas aprimora a análise espacial e hidráulica, mas também potencializa a eficiência hídrica e energética, dois pilares fundamentais para a sustentabilidade no setor de saneamento.

A utilização do QGISRed destacou-se como uma solução versátil e robusta, mostrando-se superior em cenários de topografia acidentada em comparação com ferramentas tradicionais, como o EPANET. Enquanto o EPANET é amplamente reconhecido pela sua funcionalidade em modelagem hidráulica básica, sua integração limitada com dados geoespaciais e sua capacidade reduzida de análise avançada colocam-no em desvantagem diante do QGISRed. Este último, ao se integrar ao ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) do QGIS, permite um nível de detalhamento inédito na modelagem, viabilizando análises que levam em conta aspectos geográficos e operacionais de forma simultânea.

O uso de bibliotecas Python PyQGIS e plugin R Processing Provider, foi outro diferencial significativo do trabalho. Essas ferramentas ampliaram as possibilidades de exploração dos dados gerados, permitindo análises estatísticas profundas e visualizações ricas que, por sua vez, proporcionaram percepções valiosas sobre o comportamento das redes modeladas. A aplicação prática dessas ferramentas evidenciou sua capacidade de identificar padrões de pressão e vazão, avaliar o impacto das variações topográficas e propor soluções mais embasadas para o controle de perdas e otimização de recursos.

A integração do R ao QGIS via plugins como o R Processing Provider mostrou-se particularmente eficaz, permitindo que modelos estatísticos avançados fossem aplicados diretamente sobre os dados geoespaciais da rede. Isso possibilitou a identificação de áreas críticas, como pontos de alta pressão propensos a vazamentos e regiões de baixa pressão que poderiam comprometer o abastecimento.

Além disso, o uso do Python com bibliotecas como matplotlib e seaborn permitiu a criação de gráficos detalhados que facilitaram a visualização dos resultados, auxiliando na comunicação das descobertas para gestores e tomadores de decisão.

Outro aspecto relevante da metodologia foi sua capacidade de lidar com dados de entrada e saída de forma integrada, permitindo a modelagem de cenários complexos com uma interação dinâmica entre os parâmetros hidráulicos e as variáveis espaciais. Por exemplo, o estudo demonstrou como a alteração de diâmetros de tubulação, ajustes em válvulas de pressão e mudanças nos níveis de reservatórios podem impactar diretamente na eficiência do sistema. Essa abordagem também permitiu simular cenários futuros, como o impacto de mudanças climáticas ou o crescimento populacional em áreas montanhosas, fornecendo uma ferramenta preditiva valiosa para planejamento estratégico.

Além dos avanços técnicos, o trabalho também trouxe contribuições significativas para o campo da gestão de recursos hídricos, destacando a importância da interdisciplinaridade. A combinação de conhecimentos em engenharia hidráulica, geoprocessamento e ciência de dados resultou em uma metodologia robusta e adaptável a diferentes contextos. Isso é particularmente relevante em um cenário global de crescente preocupação com a escassez hídrica e a necessidade de eficiência energética, onde sistemas de abastecimento de água precisam atender a demandas cada vez maiores com recursos limitados.

Os resultados obtidos destacaram o imenso potencial da integração de ferramentas e técnicas avançadas para a gestão de redes de distribuição de água. O QGISRed, em particular, provou ser uma ferramenta promissora, oferecendo funcionalidades que vão além da simples modelagem hidráulica, como a capacidade de incorporar dados reais de monitoramento em tempo real, identificar vazamentos e realizar análises de desempenho detalhadas. Essas capacidades tornam o QGISRed uma escolha estratégica para gestores e engenheiros que buscam soluções modernas e eficazes para desafios operacionais.

Por fim, a pesquisa representa uma contribuição significativa para a área, não apenas pela inovação tecnológica, mas também pelo desenvolvimento de uma abordagem metodológica que pode ser replicada e ampliada em outros contextos.

Através dessa abordagem, foi possível observar não apenas o desempenho operacional dos componentes da rede, como tubulações, nós e reservatórios, mas também identificar padrões de comportamento sob diferentes condições de funcionamento.

A metodologia permitiu uma avaliação criteriosa de como os ativos respondem às variações de pressão, demanda, fluxo e eficiência energética, oferecendo uma visão clara dos pontos críticos da rede.

Ao longo da execução desta pesquisa, foi desenvolvida uma análise minuciosa e detalhada que proporcionou uma compreensão profunda e abrangente sobre o comportamento dos diversos ativos que compõem a rede de abastecimento de água. A metodologia implementada foi desenhada para garantir que todas as variáveis relevantes fossem consideradas, permitindo uma investigação exaustiva de cada aspecto operacional dos componentes da rede. Este estudo englobou tubulações, nós, reservatórios, além de outros elementos cruciais para o funcionamento adequado do sistema.

A abordagem adotada proporcionou uma oportunidade única para monitorar e avaliar de forma contínua o desempenho desses ativos sob diferentes condições operacionais. Isso incluiu a análise do comportamento da rede em situações normais de operação, assim como em cenários de estresse, como períodos de alta demanda ou variações extremas de pressão. O estudo revelou informações valiosas que ajudaram a traçar um panorama mais preciso de como cada componente responde a flutuações nos parâmetros do sistema.

Uma das principais contribuições desta análise foi a capacidade de identificar padrões de comportamento recorrentes, o que trouxe uma perspectiva inovadora para a gestão de redes de abastecimento. Esses padrões permitiram uma compreensão mais completa sobre o impacto que diferentes variáveis, como pressão, fluxo e demanda, exercem sobre a rede. Foi possível, por exemplo, observar que em áreas com tubulações mais antigas ou materiais mais suscetíveis à degradação, a eficiência do sistema tende a diminuir, exigindo maiores cuidados de manutenção.

Outro ponto de destaque foi a análise criteriosa dos impactos das variações de pressão. Sabendo que a pressão é uma variável fundamental para a operação segura e eficiente de uma rede de distribuição de água, a metodologia adotada permitiu avaliar com precisão como os diferentes nós e tubulações reagem a essas mudanças.

Os dados obtidos foram fundamentais para mapear os pontos da rede mais suscetíveis a problemas de estresse hidráulico, como vazamentos ou rupturas, gerando uma base sólida para a tomada de decisões informadas.

Além disso, a avaliação também envolveu uma investigação sobre o fluxo e a eficiência energética da rede. Em um contexto de crescente preocupação com a sustentabilidade e o uso racional dos recursos, essa análise foi fundamental para entender como a rede pode ser otimizada para reduzir perdas energéticas e aumentar sua eficiência. Com a identificação de áreas onde o consumo energético era elevado, foi possível propor melhorias que podem não apenas reduzir custos operacionais, mas também minimizar o impacto ambiental.

A partir dos resultados obtidos, foi possível realizar uma verdadeira otimização das operações do sistema. Com uma visão clara dos pontos críticos da rede, as ações de manutenção puderam ser direcionadas de forma mais eficiente, priorizando áreas que apresentavam maior risco de falhas. Isso também facilitou a previsão de possíveis falhas ou problemas no sistema, permitindo que medidas preventivas fossem tomadas antes que ocorressem interrupções significativas no abastecimento.

Além disso, a análise detalhada ofereceu percepções valiosas para a tomada de decisões estratégicas. Com base nos dados obtidos, foi possível sugerir uma série de melhorias para o sistema de abastecimento, visando aumentar sua confiabilidade e eficiência. Essas sugestões incluíram a substituição de tubulações em áreas mais críticas, a implementação de tecnologias de monitoramento mais avançadas e a adoção de práticas de manutenção preventiva mais eficazes.

Por fim, a metodologia adotada demonstrou-se não apenas eficiente para a análise do comportamento dos ativos da rede de abastecimento, mas também extremamente útil como ferramenta de apoio à gestão de recursos hídricos. Ao proporcionar uma visão detalhada do estado atual da rede e dos desafios enfrentados em sua operação, essa abordagem se mostrou essencial para garantir uma gestão mais eficiente e sustentável. Em um cenário de crescente demanda por água e recursos limitados, essa metodologia oferece uma solução promissora para otimizar o uso dos recursos e garantir a continuidade do fornecimento de água de forma eficiente e ambientalmente responsável.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados deste estudo apontam para inúmeras oportunidades de avanço no campo da gestão de redes de distribuição de água, especialmente em regiões montanhosas. Trabalhos futuros podem explorar a aplicação prática da metodologia em redes reais, abrangendo diferentes contextos, desde áreas urbanas densamente povoadas até regiões rurais ou remotas. Essa validação prática permitirá ajustes nos modelos propostos, além de identificar desafios específicos que possam surgir na operação de sistemas reais, fortalecendo ainda mais a robustez e aplicabilidade da abordagem.

Um passo significativo seria o desenvolvimento de um plugin próprio, projetado especificamente para atender às demandas identificadas neste estudo e que permita ser chamado direto no código, para fazer iterações diretamente com o terminal Python. Um plugin projetado especificamente para ser chamado diretamente no código e que permita interações com o terminal Python dentro do QGIS traria benefícios significativos em termos de flexibilidade, automação e integração.

Esse plugin poderia incorporar funcionalidades adicionais, como detecção em tempo real de vazamentos, análise integrada de qualidade da água, otimização de parâmetros hidráulicos e suporte avançado para simulações em cenários climáticos extremos.

A criação de um plugin dedicado, totalmente alinhado aos objetivos da pesquisa, representaria uma evolução importante em termos de flexibilidade e precisão, além de promover independência em relação a ferramentas existentes, como o QGISRed, que, embora eficaz, apresenta limitações que podem ser superadas com soluções personalizadas.

Outra linha promissora é a integração da metodologia com tecnologias emergentes, como sensores inteligentes, sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT) e análise de grandes volumes de dados (Big Data). Essa integração pode viabilizar o monitoramento contínuo das redes, permitindo intervenções mais rápidas e eficazes. Além disso, estudos futuros podem focar na análise econômica detalhada, avaliando o custo-benefício da aplicação da metodologia e estimando os ganhos em termos de eficiência hídrica, energética e sustentabilidade ambiental. Esses estudos seriam fundamentais para consolidar a viabilidade da proposta tanto em companhias públicas quanto privadas.

REFERÊNCIAS

- ABDY SAYYED, M. A.; GUPTA, R.; TANYIMBOH, T. T. Noniterative application of EPANET for pressure dependent modelling of water distribution systems. **Water resources management**, v. 29, p. 3227-3242, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0992-0>
- AGARWAL, R; SINHA, A. P.; TANNIRU, M. Cognitive fit in requirements modeling: A study of object and process methodologies. **Journal of Management Information Systems**, v. 13, n. 2, p. 137-162, 1996. <https://doi.org/10.1080/07421222.1996.11518126>
- ALZAROONI, E.; ALI, T; ATABAY, S.; YILMAZ, A. G.; MORTULA, M.; FATTAH, K. P.; KHAN, Z. GIS-Based Identification of Locations in Water Distribution Networks Vulnerable to Leakage. **Applied Sciences**, v. 13, n. 8, p. 4692, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13084692>
- ANDRADE SOBRINHO, R.; BORJA, P. C. Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: um estudo dos fatores intervenientes na RMS. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, p. 783-795, 2016. <https://doi.org.br/10.1590/S1413-41522016116037>
- ARANDIA, E.; ECK, B. J. An R package for EPANET simulations. **Environmental modelling and software**, Utah, v. 107, p. 59-63, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.016>
- AYAD, A.; KHALIFA, A.; FAWY, M. E.; MOAWAD, A. An integrated approach for non-revenue water reduction in water distribution networks based on field activities, optimisation, and GIS applications. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 4, p. 3509-3520, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.007>
- AWE, O. M.; OKOLIE, S. T. A.; FAYOMI, O. S. I. Review of water distribution systems modelling and performance analysis softwares. In: **Journal of physics: conference series**. IOP Publishing, 2019. p. 022067. <https://doi.org.br/10.1088/1742-6596/1378/2/022067>

BANDARA, S.; RAJEEV, P.; GAD, E. A review on condition assessment technologies for power distribution network infrastructure. **Structure and Infrastructure Engineering**, p. 1-18, 2023.<https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2177680>

BATMAZ, V.; KAYAALP, N. Optimization of water distribution networks using hybrid BBO-IWO algorithm. **Urban Water Journal**, v. 20, n. 2, p. 205-222, 2023.<https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2155854>

BERG, A.; HAWILA, N. Some teaching resources using R with illustrative examples exploring COVID-19 data. **Teaching Statistics**, v. 43, p. S98-S109, 2021. <https://doi.org/10.1111/test.12258>

BIPU, N. A. Geographic information system & spatial analysis. **International Journal for Empirical Education and Research**, 2019.<https://doi.org/10.35935/edr/31.9070>

CASTAÑEDA CASTAÑO, Y. Herramientas de modelación hidráulica y espacial para mejorar la operación de sistemas de distribución en acueductos veredales, caso de estudio acueducto San Isidro. 2020. Monografía (Graduação em Engenharia Sanitária) Universidade de Antioquia, Medellin, Colombia, 92p. Disponível em: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/17213/2/CastanedaYeison_2020_OptimizacionAcueductosVeredales.pdf. Acesso em: 11 mai 2023.

CEGLIA, F.; MARRASSO, E.; ROSELI, C.; SASSO, M. Energy and environmental assessment of a biomass-based renewable energy community including photovoltaic and hydroelectric systems. **Energy**, v. 282, p. 128348, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128348>

CHINI, C. M.; STILLWELL, A. S., 2018. The State of U. S. Urban Water: Data and the Energy Water Nexus. **Water Resources Research**, Washington, v. 54, n. 3, p. 1796-1811. <https://doi.org/10.1002/2017WR022265>

CRAN. Comprehensive R Archive Network (CRAN). Disponível em <https://cran.rproject.org/>. Acesso em: 20 mai 2023.

CREACO, E.; PEZZINGA, G. Embedding linear programming in multi objective genetic algorithms for reducing the size of the search space with application to leakage minimization in water distribution networks. **Environmental Modelling and Software**, Utah, v. 69, p. 308–318, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.10.013>

COSGROVE, W. J.; LOUCKS, D. P. Water management: Current and future challenges and research directions. **Water Resources Research**, v. 51, n. 6, p. 4823-4839, 2015. <https://doi.org/10.1002/2014WR016869>

DABIRIAN, S.; SAAD, M. M.; HUSSAIN, S.; PEYMAN, S.; RAHIMI, N.; ALVAREZ U.; P. M.; YEFI, P.; EICKER, U. Structuring heterogeneous urban data: A framework to develop the data model for energy simulation of cities. **Energy and Buildings**, v. 296, p. 113376, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113376>

DAI, J.; WU, S.; HAN, G.; WEINBERG, J.; XIE, X.; WU, X.; SONG, X.; JIA, B.; XUE, W.; YANG, Q. Water-energy nexus: A review of methods and tools for macro-assessment. **Applied energy**, v. 210, p. 393-408, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.243>

DUURSMA, R. A.; CHOAT, B. fitplc: an R package to fit hydraulic vulnerability curves. **Journal of Plant Hydraulics**, 2017. <https://doi.org/10.20870/jph.2017.e002>

ECK, B. J. An R package for reading EPANET files. **Environmental Modelling & Software**, Utah, v. 84, p. 149-154, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.027>

EPA, Environmental Protection Agency. April 30, 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-takes-next-step-review-process-herbicide-glyphosate-reaffirms-no-risk-public-health>APA. Acesso em: 29 Jul. 2023

ESPINOSA-ORTIZ, E. J.; GERLACH, R.; PEYTON, B. M.; ROBERSON, L.; YEH, D.H. Biofilm reactors for the treatment of used water in space: potential, challenges, and future perspectives. **Biofilm**, v. 6, p. 100140, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biofilm.2023.100140>

FREITAS, C. L.; SILVA, F. G. B. ; SILVA, A. T. Y. L.; BARBEDO, M. D. G. Análise de sistema de distribuição de água real no sul de Minas Gerais com o uso de sistema de informação geográfica. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, p. 31-39, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200380>

FONTES, H. A. C. M. V. **Modelação de fugas e perdas: o caso da Zona de Monitorização e Controlo da Malavada em Coimbra**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2022. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/106253>. Acesso em: 11 mai. 2023.

GIUDICIANNI, C.; HERRERA, M.; DI NARDO, A.; ADEYEYE, K.; RAMOS, H. M. Overview of energy management and leakage control systems for smart water grids and digital water. **Modelling**, v. 1, n. 2, p. 134-155, 2020. <https://doi.org/10.3390/modelling1020009>

Go Associados. ESTUDO DE PERDAS DE ÁGUA DO INSTITUTO TRATA BRASIL DE 2022 (SNIS) 2020: DESAFIOS PARA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E AVANÇO DA EFICIENCIA DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL.2022 Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/Relatorio_Completo.pdf. Acesso em: 28 Jan. 2023.

GOMES, H.P.; SALVINO, M.M.; SILVA, L.S.A.; FARIAS, P.A.S.S. Indicador de eficiência da capacidade de transporte de água de uma rede de abastecimento (Efficiency Indicator of Water Transportation Capacity in a Supply Network). Ibero-American Seminar on Water and Drainage Networks (SEREA), 2017. p. 9. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=3113014>. Acesso em: 15 ago. 2024.

GÜVEN, A. F.; YÖRÜKEREN, N.; TAG-ELDIN, E.; SAMY, M. M. Multi-objective optimization of an islanded green energy system utilizing sophisticated hybrid metaheuristic approach. **IEEE Access**, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3296589>

HARIRI ASLI, K.; HARIRI ASLI, K. Isolated pressure zones based on GIS as a solution for water network problems. **Water Practice & Technology**, v. 17, n. 10, p. 2125-2140, 2022. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.119>

HASSANVAND, M. R.; SALIMI, A. H.; KISI, O.; MOHAMMADI, H. O.; ABOUZARI, N. Investigating application of adaptive neuro fuzzy inference systems method and Epanet software for modeling green space water distribution network. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 45, p. 2765-2777, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00625-8>

HOSSZEJNI, D.; KASTNER, G. Modeling Univariate and Multivariate Stochastic Volatility in R with stochvol and factorstochvol. **arXiv preprint arXiv:1906.12123**, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.12123>

HUANG, N.; ZHAO, X.; GUO, Y.; CAI, G.; WANG, R. Distribution network expansion planning considering a distributed hydrogen-thermal storage system based on photovoltaic development of the Whole County of China. **Energy**, v. 278, p. 127761, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127761>

JABBOUR, A. B. L. S.; JABBOUR, C. J. C.; GODINHO FILHO, M.; ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, v. 270, p. 273-286, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8>

JAFARINEJAD, S.; HERNANDEZ, R. R.; BIGHAM, S.; BECKINGHAM, B. S. The Intertwined Renewable Energy–Water–Environment (REWE) Nexus Challenges and Opportunities: A Case Study of California. **Sustainability**, v. 15, n. 13, p. 10672, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151310672>

KANAKOUDIS, V.; MUHAMMETOGLU, H. Urban water pipe networks management towards non-revenue water reduction: Two case studies from Greece and Turkey. **Clean–Soil, Air, Water**, v. 42, n. 7, p. 880-892, 2014. <https://doi.org.br/10.1002/clen.201300138>

Klise, K. A., Bynum, M., Moriarty, D., & Murray, R. A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study. **Environmental modelling & software**, 2017, 95, 420-431.

KRISHNAMOORTHY, Bala; D'LIMA, Christine. Benchmarking as a measure of competitiveness. **International Journal of Process Management and Benchmarking**, v. 4, n. 3, p. 342-359, 2014.

KONRATH, A. C.; SILVA, S. A.; HENNING, E.; DOS SANTOS, L. M.; DE MIRANDA, R. G.; SAMOHYL, R. W. Desenvolvimento de Aplicativos Web Com R e Shiny: inovações no ensino de Estatística. **Abakós**, v. 6, n. 2, p. 55–71, 2018. <https://doi.org/10.5752/P.2316-9451.2018v6n2p55-71>. Disponível em: <https://doi.org/10.5752/P.2316-9451.2018v6n2p55-71>. Acesso em: 12 jun. 2021.

KOCHENDERFER, M. J.; WHEELER, T. A. **Algorithms for optimization**. Mit Press, 499p, 2019.

KURT M.; SMITH JR, R.; PIRELLI, L.; HOESEN, J. V. **Mastering QGIS**. Packt Publishing Ltd, 486p, 2016.

LAHJOUI, A.; EL HMAIDI, A.; BOUHAFIA, K. Simulation of soil water and nitrate transport in a wheat field under various nitrogen fertilizer rates and rainfed conditions using HYDRUS-1D. **Soil Science Annual**, v. 74, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.37501/solisa/161944>

LAWHEAD, J. **QGIS python programming cookbook**. Packt Publishing Ltd, 430p, 2015.

LEUTNANT, D.; DÖRING, A.; UHL, M. swmmr-an R package to interface SWMM. **Urban Water Journal**, v. 16, n. 1, p. 68-76, 2019. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1611889>

LEWIS, G.; SNIDER, B.; VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, L.; CHEN, A. S.; DJORDJEVIC, S.; SAVIC, D. A. Web-based GIS for simulation, and visualisation: EPANET and data-rich shapefiles. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2023. p. 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1136/1/012007>

LI, J.; ZHENG, W.; LU, C. An accurate leakage localization method for water supply network based on deep learning network. **Water Resources Management**, v. 36, n. 7, p. 2309-2325, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03144-x>

LOHRMANN, A.; FARFAN, J.; LOHRMANN, C.; Kölbel, J. F.; PETTERSON, F. Troubled waters: Estimating the role of the power sector in future water scarcity crises. **Energy**, p. 128820, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128820>

MARTINHO, Nuno et al. Urbanwater: Integrating epanet 2 in a postgresql/postgis-based geospatial database management system. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 11, p. 613, 2020.

Martínez, F., & Lerma, N. (2019). QGISRed (v0.16). Disponível em: <https://qgisred.upv.es/>. Acesso em 18 de Mai 2023.

MADANI, K.; AGHAKOUCHAK, A.; MIRCHI, A. Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation. **Iranian studies**, v. 49, n. 6, p. 997-1016, 2016. <https://doi.org/10.1080/00210862.2016.1259286>

MARTÍNEZ ALZAMORA, F.; LERMA, N.; BARTOLIN, H.; VEGAS NIÑO, O. Upgrade of the GISRed application for the free analysis of WDN under GIS environment. In **Proceedings of the 17th International Computing & Control for the Water Industry Conference**, CCWI, Exeter, UK, 1–4 September 2019; pp. 1–3

MARTINEZ, A.; LERMA, N. QGIS PLUGIN FOR TO CREATION OF REALISTIC MODELS OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS, TO BUILD AND ANALYZE ADVANCED WATER DISTRIBUTION NETWORK MODELS AND DIGITAL TWINS USER'S MANUAL, 2022. Disponível em: https://redhisp.webs.upv.es/files/QGISRed/manuals/QGISRed_0.15_usermanual_en.pdf. Acesso em 11 Jan 2023

MCLAREN, R. A.; KENNIE, T. J. M. Visualisation of digital terrain models: techniques and applications. **Three dimensional applications in GIS**, p. 79-98, 2020.

MEADEN, G. J.; AGUILAR-MANJARREZ, J. Advances in geographic information systems and remote sensing for fisheries and aquaculture. **FAO fisheries and aquaculture technical paper**, n. 552, p. I, 2013. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4037.7682>

Minas Gerais. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Práticas de geoprocessamento em QGIS / Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. 2. ed. --- Belo Horizonte: Semad, 2019. 123 p

MORAES, A. F. **Análise dos impactos gerados no sistema de abastecimento de água, devido à evacuação de moradores, em área afetada pela subsidência do solo na cidade de Maceió/AL**. 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, 91p. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/10549>.

MRŠA, Laura. Numerical analysis of flow in the water supply system network. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) University of Rijeka. Faculty of Engineering, 2022. Disponível em: <https://zir.nsk.hr/en/islandora/object/riteh%3A3205/datastream/PDF/view>. Acesso em 11 Abr 2023

MUENCHOW, J.; SCHRATZ, P.; BRENNING, A. RQGIS: Integrating R with QGIS for Statistical Geocomputing. **R Journal**, v. 9, n. 2, 2017.

MULLER, A. L.; GERICKE, O. J.; PIETERSEN, J. P. J. Methodological approach for the compilation of a water distribution network model using QGIS and EPANET. **Journal of the South african institution of civil engineering**, v. 62, n. 4, p. 32-43, 2020.<http://dx.doi.org/10.17159/2309-8775/2020/v62n4a4>

NAHWANI, A.; HUSIN, A. E. Water network improvement using infrastructure leakage index and geographic information system. **Civil Engineering and Architecture**, v. 9, n. 3, p. 909-914, 2021. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090333>

NIBI, K. V. KUMAR, M. N.; DEVIDAS, A. R.; RAMESH, M. V.; THADATHIL, S. P. GIS based Urban Water Distribution Network Analysis: A Case Study in Kochi, India. In: **2022 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)**. IEEE, 2022. p. 956-963.<https://doi.org/10.1109/ICCCIS56430.2022.10037629>

NINÕ, O. V. Jornadas de SIG Libre 2021. Comparativa de Plugins de QGIS para elaborar y simular modelos de redes hidráulicas con Epanet. Conference: Jornadas de SIG Libre 2021, Universitat de Girona Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció (Espanha). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22651.03368>. Disponível em:https://www.researchgate.net/publications/350487087_Comparativa_de_Plugins_de_QGIS_para_elaborar_y_simular_modelos_de_redes_hidraulicas_con_Epanet. Acesso em: 14 de mar 2023

NOVO, A.; GARRIDO, I.; LORENZO, H.; ARIAS, P. Use of Geographic Information Systems (GIS) in higher education: practical geomatics applications with Quantum GIS software. In: **2022 International Symposium on Computers in Education (SIIE)**. IEEE, 2022. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/SIIE56031.2022.9982364>

NUNES, R.; ARRAUT, E.; PIMENTEL, M. Risk Assessment Model for the Renewal of Water Distribution Networks: A Practical Approach. **Water**, v. 15, n. 8, p. 1509, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15081509>

OLIVEIRA, P. F. DE; GUERRA, S.; MCDONNELL, R. Ciência de Dados com R. Brasília: Editora IBPAD, 2018, 240p.

OLIVEIRA G.; MARCATO F.S.; SCAZUFCA P.; PIRES R.C.; MARGULIES B.N. PERDAS DE ÁGUA 2019 (SNIS 2017): DESAFIOS PARA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E AVANÇO DA EFICIÊNCIA DO SANEAMENTO BÁSICO. Go associados. São Paulo. 2019.68 p.

PIETROBON, GUGLIELMO. Analisi e ottimizzazione della gestione di un sistema idropotabile complesso, 2018. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade de Padua, Itália. Disponível em: <https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/37227>

QGIS Desktop 3.22 User Guide, QGIS Project, 2023. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.22/pdf/pt_BR/QGIS-3.22-DesktopUserGuide-pt_BR.pdf. Acesso em: 30 de mar 2023

QGIS.org, 2022. Geographic Information System API Documentation. QGIS Association, 1431 p. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/docs/index.html. Acesso em: 11 de mar 2023

QGIS.org, 2023. Geographic Information System API Documentation. QGIS Association. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/docs/index.html. Acesso em: 11 de mar 2023

QGIS Development Team, 2022. QGIS 3.22.7. Geographic Information System User Guide. Open-Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://download.osgeo.org/qgis/doc/manual/>. Acesso em: 11 de mar 2023

QGIS manual de treinamento, 2023. QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.28/pt_BR/docs/training_manual/index.html. Acesso em: 11 de mar 2023

RAI, P. K. Role of Water-Energy-Food Nexus in Environmental Management and Climate Action. **Energy Nexus**, p. 100230, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100230>

RAMALHO, Luciano. **Python Fluente: Programação clara, concisa e eficaz**. NOVATEC, 2015, 800 p.

REINA, D. G.; CÓRDOBA, A. T.; DEL NOZAL, Á. R. **Algoritmos Genéticos con Python: Un enfoque practico para resolver problemas de ingeniería**. Marcombo, 2020, 462 p.

RECESA. Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: guia do profissional em treinamento: nível 2. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). Belo Horizonte. 2008.

ROSSMAN, Lewis A. et al. EPANET 2: user's manual. 2000.

SANTOS, A. C. P. A.; PEREIRA, J. A. R.; REGO, A. G. Geographic information systems-tool for evaluation of the hydro-energy performance of water supply systems. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, n. 2, p. 231-239, 2017.

SLATER, L.; J.; THIREL, G.; HARRIGAN, S.; DELAIGUE, O.; HURLEY, A.; KHOUAKHI, A.; PROSDOCIMI, L.; VITOLO, C.; SMITH, K. Using R in hydrology: a review of recent developments and future directions. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 7, p. 2939-2963, 2019. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2939-2019>

SHARVELLE, S.; DOZIER, A.; ARABI, M.; REICHEL, B. A geospatially-enabled web tool for urban water demand forecasting and assessment of alternative urban water management strategies. *Environ. Model. Softw.* 2017, 97, 213–228 <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.08.009>

SCHERER, Láisa Costa; DOS REIS, Alisson Leonardo Vieira; DA SILVA LESS, Diani Fernanda. AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MODELO EPANET: O CASO DE ALTER DO CHÃO, PARÁ, BRASIL.

STIGLIC, G; WATSON, Roger; CILAR, Leona. R you ready? Using the R programme for statistical analysis and graphics. **Research in nursing & health**, v. 42, n. 6, p. 494-499, 2019.<https://doi.org/10.1002/nur.21990>

SESMA-MARTÍN, D.; PUENTE-AJOVÍN, M. The Environmental Kuznets Curve at the thermoelectricity-water nexus: Empirical evidence from Spain. **Water Resources and Economics**, v. 39, p. 100202, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2022.100202>

SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A.; KHAJEH, H.; SHAHPARASTI, M.; LAAKSONEN, H. Future renewable energy communities based flexible power systems. *Applied Sciences*, v. 12, n. 1, p. 121, 2021.<https://doi.org/10.3390/app12010121>

SIMÃO, G. F. C. Apresentação do QGIS, Secretaria de Geologia, Mineração e transformação Mineral.MME, 98 p., 2015. Disponível em: https://intranet.sgb.gov.br/publique/media/ti/apresentacao_qgis.pdf. Acesso em: 25 Mar 2023

TAO, Y.; YAN, D.; YANG, H.; MA, L.; KOU, C. Multi-objective optimization of water distribution networks based on non-dominated sequencing genetic algorithm. *Plos one*, v. 17, n. 11, p. e0277954, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277954>

MORAES, A. F. **Análise dos impactos gerados no sistema de abastecimento de água, devido à evacuação de moradores, em área afetada pela subsidência do solo na cidade de Maceió/AL**. 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, 91p.

TITTLE, J. **Potable Water Leakage Prediction and Detection using Geospatial Analysis**. Dissertação (Master of S) University State of Tennessee, 78 p, EUA, 2019. Disponível em: <https://dc.etsu.edu/etd/3663/>. Acesso em: Mar 2023

THAKURIAH, G. Geographic information system and analytical hierarchical process approach for groundwater potential zone of lower Kuls basin, India. **Sustainable Water Resources Management**, v. 9, n. 3, p. 85, 2023.<https://doi.org/10.1007/s40899-023-00870-x>

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. **Introdução ao QGIS: OSGeo4W-3.22. 7**. Oficina de Textos, 288 p, 2022.

TU, T. T.; HOANG, H. Y. Applications of Geographic Information System (GIS) in Environmental Management. **Scientific Collection «InterConf»**, n. 154, p. 397-402, 2023. Disponível em: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-ng/article/view/3361>. Acesso em 21 Mar 2023

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 277–285, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:3\(277\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:3(277))

UNIVERSIDADE DE GIRONA (2021). Plugins de QGIS para elaborar y modelar redes hidráulicas a presión. Disponível em: <https://diobma.udg.edu/handle/10256.1/6226>. Acesso em: 18 de Jun 2023.

UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE VALÊNCIA (2023). QGISRED: Quantitative Geographic Information Systems for Resource and Environmental Decision-Making. Disponível em: <https://qgisred.upv.es/en/diffusion/#publications>. Acesso em: 20 Set 2023.

VAIDYA, D. R.; MALI, S. T.; GUPTA, R. Pressure-Dependent Analysis of Water Distribution Network Having Different Required Pressure Values at Different Nodes. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, p. 1-11, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01183-x>

VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 701-714, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.024>

VITALIS, S.; ARROYO OHORI, K.; STOTER, J. CityJSON in QGIS: Development of an open-source plugin. **Transactions in GIS**, v. 24, n. 5, p. 1147-1164, 2020. <https://doi.org/10.1111/tgis.12657>

WAN, X.; FARMANI, R.; KEEDWELL, E. Gradual Leak Detection in Water Distribution Networks Based on Multistep Forecasting Strategy. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 149, n. 8, p. 04023035, 2023. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6001>

WANG, X. C.; PENG, J.; LAN, Y.; VAN, F. Y.; JAROMIR, K. J.; YUTAO, W. Extended water-energy nexus contribution to environmentally related sustainable development goals. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111485, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111485>

XIE, X.; JIANG, X.; ZHANG, T.; HUANG, Z. Study on impact of electricity production on regional water resource in China by water footprint. **Renewable Energy**, v. 152, p. 165-178, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.025>

XU, H.; BERRES, A.; LIU, Y.; ALLEN-DUMAS, M. R.; SANYAL, J. An overview of visualization and visual analytics applications in water resources management. **Environmental Modelling & Software**, v. 153, p. 105396, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105396>.

YAVARI, H.; QAJAR, J.; AADNOY, B. S.; KHOSRAVANI, R. Selection of Optimal Well Trajectory Using Multi-Objective Genetic Algorithm and TOPSIS Method. **Arabian Journal for Science and Engineering**, p. 1-25, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08149-1>

YU, P.; YUNG, E. H. K.; CHAN, E. H. W.; WONG, M. S.; WANG, S.; CHEN, Y. An integrated approach for examining urban fragmentation in metropolitan areas: Implications for sustainable urban planning. **Journal of Cleaner Production**, p. 138151, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138151>

DEMORAES, Florent; SOURIS, Marc. FactoQGIS: a GUI tool based on an R script to perform Geometric Data Analysis in a Free and Open Source GIS. **Acta Geographica Bosniae et Herzegovinae**, v. 6, n. 11, p. 5-19, 2019.

ZAF, RUKEN DILARA. Implementing an algorithm based on soft computing for burned area mapping from Sentinel-2 data in a user-friendly QGIS workflow. 2020.