

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Matheus Rodrigues Martins

**USO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA NA TOMADA DE DECISÃO EM
REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Santa Maria, RS
2018

Matheus Rodrigues Martins

**USO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA NA TOMADA DE DECISÃO EM REDES DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Débora Missio Bayer

Santa Maria, RS
2018

Rodrigues Martins, Matheus

Uso de simulação hidráulica na tomada de decisão em
redes de abastecimento de água / Matheus Rodrigues
Martins.- 2018.

82 p.; 30 cm

Orientadora: Débora Missio Bayer

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2018

1. REDES DE ABASTECIMENTO 2. EPANET 3. SIMULAÇÃO 4.
PERDAS DE ÁGUA I. Missio Bayer, Débora II. Título.

Matheus Rodrigues Martins

**USO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA NA TOMADA DE DECISÃO EM REDES DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em: 26 de outubro de 2018.

Débora Missio Bayer, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Daniela Guzzon Sanagiotto, Dra. (UFRGS)

Vanessa Sari, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

Agradecimentos

À minha família, minha namorada Luíza, meu pai Jânio, minha mãe Miriam, meus irmãos Thiago e Tatiana que estiveram comigo sempre que precisei, que muito sacrificaram para que aqui eu chegasse e sem os quais eu nunca conseguiria o que consegui;

À minha orientadora prof^a. Dr^a. Débora Bayer, pela paciência e pelos ensinamentos que com certeza levarei para toda a vida;

Às professoras da banca, Prof^a. Dr^a. Daniela Sanagiotto e Prof^a. Dr^a. Vanessa Sari, agradeço pelos importantes conselhos para tornar este trabalho o melhor possível;

Ao prof. Dr. Élvis Carissimi, por uma conversa entre aulas, em maio de 2016, que foi o pequeno passo inicial para que eu chegasse até aqui;

Aos meus queridos colegas Andressa Hubner, Andressa Gluszczak e Manoel Maraschin, companhias em diversos trabalhos e com certeza amigos que levo para o resto da vida;

Aos participantes do GHIDROS, que dividiram a sala (e o café e as bolachas) comigo de maneira tão espontânea: Henrique Haas, Érica Vitalli e Luiza Conte, meu muito obrigado pela parceria durante este período;

A todos os professores com os quais aprendi diariamente durante o mestrado;

Aos meus avós, Omar e Araci, Olegário e Nely, e às minhas tias Marcina e Marta, obrigado por terem feito parte da fundação do que sou hoje em dia;

Às secretarias Rosa Britto e Luciane Iop pela paciência e agilidade em resolver qualquer problema que eu tivesse durante todo o período de pós-graduação;

À UFSM, por ter propiciado um ensino de qualidade desde a graduação até aqui;

À CAPES/CNPq, pela bolsa de mestrado durante a realização deste trabalho;

À SGS, pelos dados utilizados e pela agilidade de sempre, agradeço especialmente aos eng^o. Luiz Bertazzo, eng^o. Mateus Cruz e eng^o. Matheus Sassi por sempre me receberem de braços abertos quando eu necessitava de algo;

A todos que contribuíram direta ou indiretamente, **muito obrigado!**

RESUMO

USO DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA NA TOMADA DE DECISÃO EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

AUTOR: Matheus Rodrigues Martins
ORIENTADORA: Débora Missio Bayer

A água é um bem essencial para o desenvolvimento da vida humana. Embora o atendimento populacional tenha evoluído no país, ainda existe uma perda de água de 36,3% nas redes que abastecem a população brasileira. Essas perdas de água podem ser compostas de elementos como vazamentos, erros de medição e usos não autorizados, e podem ser identificadas ou controladas tanto manual quanto automaticamente. Uma variável importante e que influencia nas perdas de água na rede é a pressão atuante no sistema. A NBR 12.218 da ABNT, atualizada em 2017, estabelece os limites mínimos e máximos de pressão para que o atendimento ao consumidor seja realizado de modo satisfatório. Para que esses limites sejam atendidos, pode-se fazer uso de acessórios como bombas e válvulas redutoras de pressão. A utilização indiscriminada desses acessórios pode gerar custos elevados, tanto de aquisição quanto energético, mas o seu uso racional pode gerar economia energética e, ainda, se aliado a métodos de redução de consumo como aproveitamento de água da chuva ou reuso, pode-se alcançar um sistema mais sustentável do ponto de vista energético e financeiro. Neste trabalho, foi analisada a aplicação de simulação hidráulica em uma rede de abastecimento real, localizada no município de São Gabriel-RS, como ferramenta de auxílio na tomada de decisão. Foram simulados dois cenários, consumo máximo e consumo mínimo, e identificadas as regiões da rede consideradas críticas, nas quais as pressões e as velocidades não atendiam aos valores previstos na norma supracitada. A rede foi então setorizada, e foram sugeridas intervenções como a instalações de acessórios (bombas e válvulas redutoras de pressão), a diminuição de diâmetros de alguns trechos de tubulação, além da alteração do regime de funcionamento das bombas já existentes. Outros dois cenários foram simulados, nos quais foi avaliado o impacto que o aproveitamento de água da chuva ou de reuso de águas cinzas causaria à rede. O uso da simulação hidráulica permitiu a clara identificação de zonas de pressão, em diferentes situações de funcionamento, possibilitando que fossem elencadas algumas alterações, em ordem prioritária, que poderiam gerar melhoras na operação da rede bem como auxiliar na tomada de decisão.

Palavras-chave: sistemas de abastecimento de água, redes de abastecimento de água, gerenciamento, racionalização, perdas de água, pressão na rede, EPANET

ABSTRACT

USING HYDRAULIC SIMULATION AS A TOOL IN THE DECISION MAKING PROCESS OF A WATER SUPPLY NETWORK

AUTHOR: Matheus Rodrigues Martins

ADVISOR: Débora Missio Bayer

Water is essential for the development of human life. Although sanitation services have been improving in Brazil, Brazilian water networks still lose 36,3% of the water distributed to the population. These water losses may be composed of leakages, measurements errors and unauthorized usages, and can be identified or controlled both manually and automatically. An important variable to control the water losses is the pressure value on the water supply network. The NBR 12.218 (ABNT), updated in 2017, sets maximum and minimum pressure values for the service to be satisfactory. In order for these limits to be fulfilled, equipments such as pumps and pressure reducing valves can be used to prevent pressure from being too low or too high. Although the indiscriminate use of these equipments can result in high costs, both financially and energy-efficiently, its rational use can save energy and, combined with methods for water reutilization or rainwater utilization, a sustainable system can be achieved. This work presents a modeled hydraulic representation of a real water supply network, located in São Gabriel-RS, Brazil, as a decision-making helping tool. Two scenarios were simulated considering maximum and minimum consumption, and areas with water pressure and velocity above and below the limits allowed were identified. The network was then sectorized and some improvements were suggested, such as new equipments, pressure reducing valves and a pump, pipe diameter decreases and changes in the pump scheduling. Another two scenarios were simulated to evaluate the impact of water reutilization and rainwater utilization on the network. The use of a hydraulic simulation showed a clear identification of pressure zones in different operation situations, which allowed the creation of a list prioritizing the suggested equipments in an order that would benefit the water network thus helping the decision-making process.

Keywords: water supply system, water distribution system, management, water losses, pressure, EPANET

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Índice econômico de vazamentos. | 21 |
| Figura 2 – VRP controlada por pistão. | 26 |
| Figura 3 – VRP controlada por mola. | 26 |
| Figura 4 – VRP controlada por diafragma. | 26 |
| Figura 5 – Etapas do estudo realizado. | 32 |
| Figura 6 – Localização do município de São Gabriel no estado e indicação dos bairros Bonfim e Medianeira. | 34 |
| Figura 7 – Traçado da rede de abastecimento dos bairros Bom Fim e Medianeira. | 36 |
| Figura 8 – Padrão de consumo. | 37 |
| Figura 9 – Esquema simplificado da rede. | 39 |
| Figura 10 – Curva da bomba b1. | 40 |
| Figura 11 – Curva da bomba b2. | 40 |
| Figura 12 – Cenários avaliados na simulação hidráulica. | 43 |
| Figura 13 – Pressões máximas (a) e mínimas (b) para o cenário de consumo máximo (cenário 1). | 45 |
| Figura 14 – Pressão no nó n23 para o cenário 1. | 47 |
| Figura 15 – Pressão no nó n65 para o cenário 1. | 47 |
| Figura 16 – Velocidade e vazão no nó n23 com consumo máximo. | 48 |
| Figura 17 – Pressão máxima com diâmetros da rede reduzidos para o cenário 1. | 49 |
| Figura 18 – Pressão máxima e mínima para o cenário de consumo mínimo (cenário 2). | 50 |
| Figura 19 – Pressão no nó n23 para o cenário 2. | 51 |
| Figura 20 – Pressão no nó n65 para o cenário 2. | 51 |
| Figura 21 – Velocidade e vazão no nó n23 para o cenário 2. | 52 |
| Figura 22 – Setorização da rede. | 53 |
| Figura 23 – Rede e intervenções propostas. | 54 |
| Figura 24 – Esquema simplificado com as alterações da rede inseridas. | 55 |
| Figura 25 – Posição da VRP1 entre os nós n23 e n73 no Setor 1. | 56 |
| Figura 26 – Pressões antes e após o acionamento da VRP1 no nó n73. | 57 |
| Figura 27 – Pressão antes e após o acionamento da VRP1 no nó n27. | 57 |
| Figura 28 – Pressão antes e após a instalação e a operação da bomba b3 no nó n41. | 58 |
| Figura 29 – Pressão antes e após a instalação e a operação da bomba b3 no nó n11. | 59 |
| Figura 30 – Pressão antes e após a instalação e a operação da bomba b3 no nó n19. | 59 |
| Figura 31 – Pressão antes e após a instalação e a operação da bomba b3 no nó n59. | 60 |
| Figura 32 – Pressão antes e após a instalação e a operação da VRP2 no nó n6. | 61 |
| Figura 33 – Pressão antes e após a instalação e a operação da VRP2 no nó n25. | 61 |
| Figura 34 – Pressão antes e após a instalação e operação da VRP3 no nó n33. | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 35 – Pressão antes e após a instalação e operação da VRP3 no nó n32..... | 63 |
| Figura 36 – Pressão antes e após a instalação e operação da VRP3 no nó n34..... | 63 |
| Figura 37 – Pressão antes e depois da alteração no regime da bomba b2 no nó n65. | 64 |
| Figura 38 – Pressões máximas (a) e mínimas (b) com as alterações propostas considerando o consumo mínimo..... | 65 |
| Figura 39 – Pressões máximas (a) e mínimas (b) no Cenário 3. | 66 |
| Figura 40 – Pressões máximas (a) e mínimas (b) no cenário 4 (consumo sustentável e alterações propostas para a rede)..... | 68 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Perda de água por região..... | 17 |
| Quadro 2 – Perdas de água de um sistema..... | 18 |
| Quadro 3 – Abastecimento populacional através de redes de água..... | 29 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Comprimento e diâmetro interno de cada um dos trechos de tubulações da rede. | 35 |
| Tabela 2 – Cota topográfica e área de influência de cada um dos nós. Os nós n77, n78 e n79 foram omitidos na simulação. | 38 |
| Tabela 3 – Volume consumido mensalmente no ano de 2017 nos bairros Medianeira e Bom Fim. | 42 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1. OBJETIVOS..... | 15 |
| 1.1.1. Objetivo Geral | 15 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos | 15 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1. PERDAS E RACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO..... | 16 |
| 2.1.1. Perdas de Água | 16 |
| 2.1.2. Controle de Perdas | 19 |
| 2.1.3. Racionalização e Gasto Energético | 24 |
| 2.2. FONTES ALTERNATIVAS À REDE DE ABASTECIMENTO..... | 28 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 32 |
| 3.1. SIMULAÇÃO HIDRÁULICA..... | 32 |
| 3.2. REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA | 33 |
| 3.2.1. Características das tubulações | 34 |
| 3.2.2. Consumos nodais | 37 |
| 3.2.3. Características dos reservatórios | 38 |
| 3.2.4. Características das bombas | 40 |
| 3.2.5. Característica da válvula redutora de pressão | 41 |
| 3.2.6. Parâmetros de simulação e cálculo da perda de carga | 41 |
| 3.2.7. Cenários propostos | 41 |
| 3.2.8. Quantificação das perdas de água | 43 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 45 |
| 4.1. ANÁLISES DE PRESSÃO E DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NA REDE PARA O CENÁRIO DE CONSUMO MÁXIMO (CENÁRIO 1)..... | 45 |
| 4.2. ANÁLISES DE PRESSÃO E DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NA REDE PARA O CENÁRIO DE CONSUMO MÍNIMO (CENÁRIO 2) | 49 |
| 4.3. SETORIZAÇÃO E INTERVENÇÕES PROPOSTAS | 52 |
| 4.3.1. Acessórios adicionados e suas influências na pressão e na velocidade da rede | 54 |
| 4.3.1.1. Alteração no funcionamento da bomba b1 | 55 |
| 4.3.1.2. Setor 1 | 55 |
| 4.3.1.3. Setor 2 | 58 |
| 4.3.1.4. Setor 3 | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3.1.5. Setor 4..... | 62 |
| 4.3.1.6. Setor 5..... | 64 |
| 4.3.1.7. Influência conjunta das alterações propostas na rede do sistema de abastecimento..... | 64 |
| 4.4. CONSUMO SUSTENTÁVEL – CENÁRIOS 3 E 4..... | 66 |
| 4.5. ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DAS ALTERAÇÕES PROPOSTAS..... | 68 |
| 4.6. DISCUSSÕES GERAIS..... | 69 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 72 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 74 |

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a tendência de formação das comunidades e desenvolvimento posterior de cidades deu-se no entorno de fontes de água, já que a água representa um item essencial para a sobrevivência. Com o crescimento das cidades começou a aumentar a demanda por sistemas capazes de garantir o abastecimento de água, mesmo com longas distâncias entre a fonte d'água e a população.

Os romanos, ao se depararem com esse problema, acabaram por deixar marcado para a posteridade sua engenhosidade em trabalhar com redes de distribuição de água através de aquedutos, alguns dos quais existem até hoje. Suas fontes de água ficavam longe das cidades e suas redes possuíam conceitos modernos, como as utilizadas na cidade de Pompeia. Nessa cidade, o sistema derivava para pequenas caixas d'água, onde cada uma abastecia a poucos usuários, e assim reduziam-se as perdas de água do sistema total por meio da redução de pressão (MONTELEONE; YEUNG; SMITH, 2007).

Os sistemas de abastecimento evoluíram, no entanto, em 2015, apenas 7 em cada 10 pessoas no mundo tiveram acesso à um sistema de água potável seguro e apenas 3 em cada 5 pessoas utilizaram serviços de saneamento adequados (WHO e UNICEF, 2017). Essa tendência, que ocorre por uma combinação de falta de investimentos e falta de gestão apropriada, é mais evidente em países em desenvolvimento.

Em 2016, os indicadores mostravam que 166,6 milhões de pessoas no Brasil têm acesso a água potável, sendo que 93,1% dessas pessoas estavam em áreas urbanas (SNIS, 2016). Na região norte do Brasil, por exemplo, o abastecimento de água atinge somente 67,7% da população urbana e 55,4% da população total, podendo ser considerada a região geográfica com o pior atendimento no país. A região Sudeste se destaca por possuir os melhores índices de atendimento com rede de abastecimento em relação à população total (91,2%), enquanto a região Sul possui o melhor índice de atendimento da população urbana, que chega a 98,4%. Apesar da região Sul ter o melhor índice de atendimento urbano, esse cai para 89,4% da população total, com índices de perdas de água chegando a 36,3%. O controle de perdas de água faz parte do processo de tomada de decisão feita na

gestão do sistema de abastecimento, sendo a rede de distribuição uma etapa de extrema importância desse processo.

A rede de distribuição pode ser definida como a parte do sistema de abastecimento formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão adequadas (ABNT, 2017). A distribuição, por exemplo, pode ocorrer por gravidade ou por bombeamento, e ainda, com ou sem reservatório intermediário (TSUTIYA, 2006). O uso de bombeamento no sistema gera gastos energéticos constantes e suscetibilidade de falhas durante faltas de energia (EKTESABI; MORADI-MOTLAGH; ABDEKHODAEI, 2009).

Considerando o potencial de redução de perdas de água e economia energética que uma gestão adequada pode proporcionar, faz-se necessário o uso de ferramentas capazes de auxiliar os gestores na operacionalização e na tomada de decisões referentes ao sistema de abastecimento de água urbano. A NBR ABNT 12.218, atualizada em 2017, evidencia que o dimensionamento e a análise do sistema global devem ser feitos mediante simulação hidráulica. Nesse sentido, este trabalho pretende analisar o uso de simulação hidráulica em uma rede de abastecimento existente, localizada na cidade de São Gabriel, e suas funcionalidades na tomada de decisões e na proposição de intervenções e melhorias.

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema em estudo e os objetivos do trabalho. No Capítulo 2 é apresentada a revisão de literatura, introduzindo os conceitos necessários para o entendimento e desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia, detalhando as simulações e os parâmetros de cálculo utilizados para definição dos cenários analisados. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nas simulações e no último capítulo é apresentada a conclusão do trabalho.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O estudo tem como objetivo principal analisar a aplicação de simulação hidráulica na tomada de decisão para a gestão de redes de distribuição de água de um sistema de abastecimento urbano.

1.1.2. Objetivos Específicos

Alguns objetivos específicos são traçados para atingir o objetivo geral deste trabalho, como analisar:

- a adequação das características reais da rede para o ambiente virtual;
- as intervenções na rede programadas pela companhia gestora do sistema;
- as alternativas para melhorar a operação da rede, de modo a auxiliar na tomada de decisões, e de maneira a alcançar benefícios energéticos e financeiros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PERDAS E RACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO

A racionalização é parte indispensável na gestão de uma rede de distribuição de água. A partir de sua aplicação, são possíveis a diminuição dos gastos com as perdas de água e a otimização do gasto energético, possibilitando lucros mais expressivos e a capacidade de realizar maior investimento para melhoramentos da própria rede.

2.1.1. Perdas de Água

Segundo a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, em seu sistema nacional de informações sobre saneamento, a perda de água em redes de abastecimento no Brasil chega, em média, a 38,1% do volume de água tratado. Esse valor apresentou um acréscimo de 1,1% em relação aos índices do ano anterior, segundo dados recolhidos durante o ano de 2015 (SNIS, 2016), o que demonstra certa estagnação na detecção e prevenção de perdas nacionalmente. De fato, a perda de água tratada no Brasil ainda está distante dos valores de perdas de água em redes localizadas em países desenvolvidos como Estados Unidos ou Japão, que são de 16% (USEPA, 2013) e cerca de 8% (MHLW, 2006), respectivamente.

Em um estudo independente realizado em 10 cidades do estado de Santa Catarina, o índice de perda de água observado chegou à 55% da água total distribuída, resultando em valores perdidos de, em média, 69 milhões de reais por ano (FABRE; PFITSCHER, 2011). O custo total dessas perdas de água no Brasil chega a R\$ 1,1 bilhões no ano de 2014, levando em conta dados fornecidos pelas operadoras dos sistemas de distribuição (ITB, 2015). O Quadro 1 apresenta os

índices de perdas de água por região e nacionalmente.

Quadro 1 – Perda de água por região e total de perdas no Brasil.

| Região | Índice de Perdas |
|---------------|-------------------------|
| Norte | 47,3% |
| Nordeste | 46,3% |
| Sudeste | 34,7% |
| Sul | 36,3% |
| Centro-Oeste | 35,0% |
| Brasil | 38,1% |

Fonte: SNIS (2016)

As regiões Norte e Nordeste são as que apresentam os maiores índices de perdas no abastecimento, com respectivamente 47,3% e 46,3%, enquanto as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul possuem os menores, de 34,7%, 35,0% e de 36,3%, respectivamente (SNIS, 2016). Esses percentuais de perdas representam volumes expressivos, mas não se referem exclusivamente a volumes reais de água perdidos.

O balanço hídrico proposto pelo American Water Works Association Water Loss Control Committee (AWWA WLC) e pelo IWA Water Loss Task Force (IWA WLTF) propõe que a água que entra no sistema de abastecimento pode ser dividida em dois tipos: consumo autorizado e perdas de água (ALEGRE et al, 2000), como mostra o Quadro 2.

O consumo autorizado pode ser faturado ou não faturado. O faturado representa a receita do sistema, podendo ser estimado ou medido através de micro medidores. O consumo autorizado não faturado refere-se à parcela de água utilizada em carros pipas, pela própria operadora para algum serviço próprio, ou para o combate de incêndios (TARDELLI; DA COSTA; BÁGGIO; MACHADO, 2015).

As perdas de água podem ser divididas em perdas aparentes e perdas reais. As perdas aparentes não possuem significado físico, e representam a parcela de

volume de água que é consumida pelo usuário sem ser contabilizada pela companhia, seja por erros de medição ou por ligações clandestinas (ALEGRE et al., 2000). Já as perdas reais formam a parcela que é fisicamente perdida durante o tratamento, reserva ou distribuição da água (ALEGRE et al., 2000).

Os erros de medição podem ocorrer quando os hidrômetros registrarem, ou não, erroneamente a passagem de água por fatores como consumo muito abaixo de sua capacidade de medição, existência de caixa d'água domiciliar ou até mesmo a inclinação do hidrômetro (BAGGIO et al., 2013). Já a parcela de água perdida através de furtos ou desvios caracteriza um consumo ilegal de água, que é a principal consequência da baixa fiscalização que ocorre nas redes de distribuição e na coibição de ligações clandestinas (BAGGIO et al., 2013).

Quadro 2 – Balanço hídrico proposto pelo AWWA/IWA.

| | | | | |
|---------------------------|--------------------|---------------------------------|---|-------------------|
| Água que entra no sistema | Consumo autorizado | Consumo autorizado faturado | Consumo faturado medido | Água Faturada |
| | | | Consumo faturado não medido | |
| | | Consumo autorizado não faturado | Consumo não faturado medido | Água Não Faturada |
| | | | Consumo não faturado não medido | |
| | Perdas de água | Perdas aparentes | Uso não autorizado | |
| | | | Erros de medição | |
| | | Perdas reais | Perdas reais nas tubulações de água bruta e no tratamento | |
| | | | Vazamentos nas adutoras ou redes de distribuição | |
| | | | Vazamentos e extravasamentos nos reservatórios de adução e distribuição | |
| | | | Vazamentos nos ramais | |

Fonte: Adaptado de Tardelli (2015)

A identificação de perdas reais pode ser feita de diversas maneiras, como a detecção de vazamentos nas redes através da injeção de gás na rede, utilização de aparelho auditivo manual, correlação água-ruído (através de acelerômetros ou microfone subaquático) (HAMILTON; MCKENZIE, 2014), análise dos indicadores operacionais, vazões mínimas noturnas e utilização de modelos matemáticos (COPASA, 2003) ou computacionais (SOARES; COVAS; REIS, 2011). Também podem ser utilizados para a verificação de vazamentos algoritmos com capacidade de detecção em tempo real dos vazamentos do sistema (ISHIDO; TAKAHASHI, 2014; MIRATS-TUR et al., 2014; ZAN et al., 2014), técnicas de detecção de pressão excessiva em pequenas redes (GAMBOA-MEDINA; REIS; GUIDO, 2014) ou grandes redes (ABDULSHAHEED; MUSTAPHA; GHAVAMIAN, 2017), ou técnicas de detecção de fugas em redes de pequena escala (SALA; KOLAKOWSKI, 2014).

Toda a água tratada que é distribuída pela rede, mas não é revertida em faturamento para a concessionária é chamada de água não faturada (PETROULIAS; FOUFEAS; BOUGOULIA, 2016). A parcela de água não faturada pode chegar a 49% da água que entra no sistema em países em desenvolvimento, com alguns casos críticos de 90% da água presente no sistema não retornar como faturamento para a distribuidora (SALDARRIAGA; SALCEDO, 2015). As perdas de água não faturada devem ser controladas por não retornarem como valor para a prestadora do abastecimento, e também por contribuírem para problemas de racionamento e escassez hídrica.

Dessa forma, a gestão das perdas reais pode oferecer ganhos não somente em termos financeiros, mas também socioambientais, dentro da região onde o sistema de abastecimento está inserido.

2.1.2. Controle de Perdas

Todos os sistemas de abastecimento sofrem algum tipo de perda (GANORKAR et al., 2013), e embora algumas perdas sejam inevitáveis ou

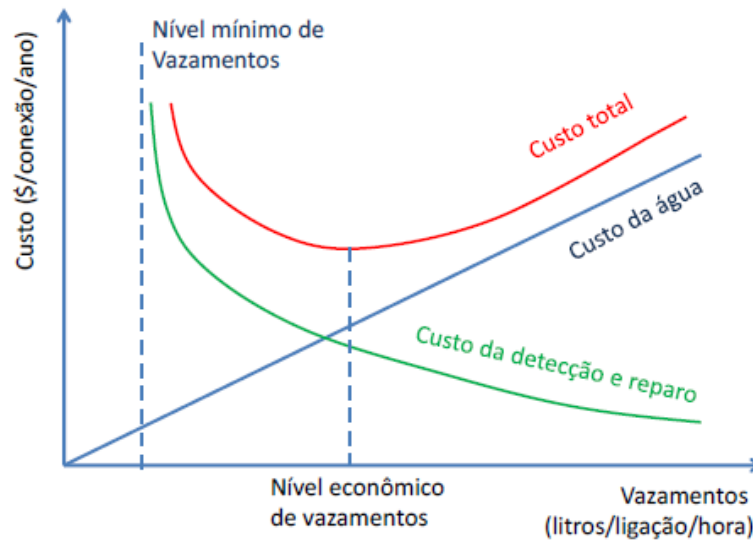
compensem muito pouco a sua extinção, a maior parte pode ser identificada e resolvida através de uma análise criteriosa.

O índice de perdas de um sistema é um dos principais indicadores da eficiência de operação de um sistema de abastecimento de água (BAGGIO et al., 2013). Devido ao aumento da demanda de água causado pelo avanço da urbanização, torna-se cada vez mais necessário o aperfeiçoamento e um maior controle das possíveis perdas que ocorrem com a expansão da rede.

É também interessante observar a análise do impacto ambiental positivo ou negativo que o controle das perdas poderia gerar à região. Um impacto positivo, por exemplo, é a redução do volume de água demandado das fontes superficiais ou subterrâneas. Porém, a intervenção necessária para redução das perdas poderia gerar impactos negativos, como equipamentos abrindo valas no solo, por exemplo, que poderiam causar mais males ao meio ambiente do que a economia de água geraria em benefícios ao mesmo (PILLOT et al., 2016). A análise dos impactos que o controle de perdas gera ao entorno da rede é crucial para um controle de perdas sustentável.

Esse controle sustentável das perdas passa inicialmente pela identificação de dois limites: o técnico e o econômico (BAGGIO et al., 2013). O limite econômico é definido como o ponto a partir do qual o gasto no controle das perdas torna-se maior que o ganho econômico com o fato da água não ter sido perdida. Já o limite técnico é devido a capacidade ou não de evitar que determinada perda possa ocorrer no sistema (BAGGIO et al., 2013). Na Figura 1 é mostrada essa relação, indicando o que foi chamado de nível econômico de vazamentos, ou seja, um valor cuja ocorrência é permitida.

Figura 1 – Índice econômico de vazamentos.



Fonte: Baggio et al. (2013)

Os levantamentos econômico e técnico dependem da análise dos tipos de perdas existentes em um sistema. As perdas aparentes são de um controle mais difícil por sua dinamicidade (RIZZO et al., 2007), e uma constante atualização dos usuários da rede pode diminuir a ocorrência da utilização não autorizada por usuários novos (RÍOS et al., 2014).

O controle da submedição na micromedição pode ser realizado a partir da troca de hidrômetros, sendo estimado que haja entre 8% e 23% de submedição no Brasil (PEREIRA; ILHA, 2008). Essa troca deve levar em conta a sua vida útil, assim como a quantidade de medidores que devem ser trocados (YEE, 1999). Métodos analíticos (FERREOL, 2005) e gráficos (DE LA CRUZ et al., 2011) podem ser utilizados para determinar a vida útil dos medidores e indicar quando esses deveriam ser substituídos.

As perdas reais podem ocorrer através de vazamentos não visíveis e não detectáveis por métodos acústicos, não visíveis e detectáveis ou de vazamentos visíveis (BAGGIO et al., 2013); e sua prevenção inicia com a adequada seleção do material (tubulações, conexões e demais peças), instalação e manutenção, com renovação e troca de tubulações utilizadas na rede; enquanto que o controle dos vazamentos pode ser realizado com o controle da pressão na tubulação, controle

ativo dos vazamentos, da velocidade e da qualidade nos reparos (LAMBERT; McKENZIE, 2002).

A prevenção das perdas inicia pelo processo de escolha do material e do uso adequado da técnica na sua instalação. A manutenção constante, que engloba a renovação e troca de tubulações utilizadas na rede, envolve o adequado mapeamento de informações, como a idade e o material das tubulações (LIU et al., 2017), já que quanto mais velha for a tubulação maior a chance de ocorrerem fissuras ou rupturas. Tubulações sem muitos dados e/ou sendo utilizadas muito além da vida útil do material podem levar a rompimentos, que não necessariamente serão percebidos, pois a água pode entrar nas redes de esgoto ou de águas pluviais (MORAIS; CAVALCANTE; ALMEIDA, 2010).

No Brasil, quando um sistema de abastecimento será ampliado, é permitido que as redes existentes, com tubulações em operação no sistema, sejam mantidas, porém são necessários estudos técnicos para demonstrar sua viabilidade técnica e econômica (ABNT, 1992; ABNT, 2017). Nesse sentido, todos os dados devem ser mantidos atualizados para permitir um maior controle sobre a rede como um todo.

Em relação ao controle da pressão na tubulação, controle ativo dos vazamentos, da velocidade e da qualidade nos reparos é necessário um monitoramento mais detalhado do funcionamento do sistema de abastecimento. O sistema é algo complexo de ser gerido, por isso é indicado a divisão da rede de distribuição em distritos de medição e controle (DMC). A DMC é uma região da rede que possa ser isolada, possibilitando assim o controle de pressões e vazões, o monitoramento da rede e, por consequência, uma possibilidade de controle de perdas (ABNT, 2017).

A formação da DMC pode ser realizada de maneira dinâmica, através do controle em tempo real de vários pontos diferentes da rede (WRIGHT et al., 2015), ou através da alocação e posterior fechamento de válvulas de tubulações entre diferentes DMCs e a medição da vazão nas tubulações que continuam abertas (ALVISI; FRANCHINI, 2014; SCIBETTA et al., 2014; KARATHANASI, 2016). Cada saída da DMC deve ser obrigatoriamente equipada com uma unidade de controle operacional, formada por no mínimo um medidor de vazão (CAMPBELL et al., 2016). Assim, a localização das válvulas e das unidades de controle operacional devem ser

otimizadas para evitar que locais da rede experienciem falta de água causada por falta de pressão (CAMPBELL et al, 2016).

A operação da DMC também pode servir como ferramenta para a estimativa de vazamentos, quando utilizada no período de menor demanda (à noite) (WRIGHT et al., 2015). De fato, durante o período noturno, a pressão na tubulação tende a ser mais alta já que há pouco consumo por parte dos usuários (HUNAIDI, 2010). O volume horário mínimo escoado durante esse período é chamado de vazão mínima noturna (*minimum night flow* ou MNF) e qualquer mudança em seu valor pode indicar vazamentos na rede monitorada. Essas leituras, porém, podem não retratar a realidade caso haja abastecimento irregular ou demanda mal atendida (GONÇALVES; ALVIM, 2007)

A divisão da rede em DMCs possibilita um controle quase absoluto da água que percorre a rede, desde os valores de pressão momentânea até possíveis vazamentos. O levantamento instantâneo, por sistemas de telemetria, das informações dos equipamentos instalados nas DMCs permite a identificação de anomalias em termos de pressão ou vazão, o que pode indicar a ocorrência de vazamentos ou necessidade de reparos. Isso, associado a equipes técnicas bem treinadas, auxiliaram no controle ativo de vazamentos.

O tamanho de cada DMC é particular para cada rede de abastecimento, e depende de fatores como configuração da rede, condições das tubulações, qualidade da água e recursos financeiros que a operadora da rede dispõe para investimento (GOMES; MARQUES; SOUSA, 2012).

A pressão é a principal variável no controle da rede e sua manipulação pode evitar possíveis avarias no sistema, visto que estas levam a vazamentos (BABEL; ISLAM; DAS GUPTA, 2009). A pressão máxima estática de serviço em uma rede de distribuição, ou seja, quando não há consumo na rede, é de 400 kPa, com a possibilidade desse limite ser estendido até 500 kPa em locais com topografia muito acidentada; e a pressão dinâmica, quando há consumo ocorrendo no sistema, deve ser de no mínimo 100 kPa (ABNT, 2017). A norma sugere, inclusive, que para diminuir a quantidade de perdas reais na rede, a pressão estática deveria ficar entre 250 e 300 kPa. Devido às características particulares do traçado das redes de muitas das cidades, e às variações de consumo ao longo do dia, da semana e dos meses, a rede pode ficar sujeita a variações de pressões consideráveis, que podem

dificultar a manutenção das pressões nas faixas recomendadas e, ainda, podem acabar causando rupturas na estrutura da tubulação.

O principal modo de controlar a pressão na rede é por meio do gerenciamento das bombas e/ou boosters e das válvulas redutoras de pressão (VRP) do sistema. As bombas são utilizadas para vencer um desnível geométrico e as perdas de carga que ocorrem no sistema, com a finalidade de garantir a chegada da água em quantidade e pressão suficiente para o consumo dos usuários, e diferem dos boosters por estes não possuírem poços de sucção (CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, 2005). As bombas são responsáveis por grande parte do custo operacional presente em uma rede de distribuição, como gasto energético e gasto com a manutenção (MALA-JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2017).

O funcionamento das bombas é feito seguindo uma programação de bombeamento, que, geralmente, não é gerada hidraulicamente, mas estabelecida de forma arbitrária (BOHÓRQUEZ; SALDARRIAGA; VALLEJO, 2015). Essa arbitrariedade acaba levando ao funcionamento das bombas durante períodos desnecessários, sendo possível uma melhor abordagem para tornar esse processo mais racional.

2.1.3. Racionalização e Gasto Energético

A racionalização de uma rede de abastecimento pode ser realizada de maneiras diversas, quer seja através da otimização utilizando ferramentas computacionais, quer seja realizada a análise caso a caso.

A otimização da programação do sistema de bombeamento, por exemplo, é algo computacionalmente difícil, por envolver variáveis binárias como estado das bombas e vazão na rede e equações não-lineares (MENKE et al., 2016). Algumas estações de bombeamento utilizam bombas paralelas na distribuição de água, mas essa utilização pode causar dificuldade para definir uma programação de uso das bombas que economize energia e não cause falta de pressão (SARBU, 2016). Essa configuração de bombeamento também necessita otimização, com uma relação desempenho/economia de energia bem equilibrada (WU et al., 2015).

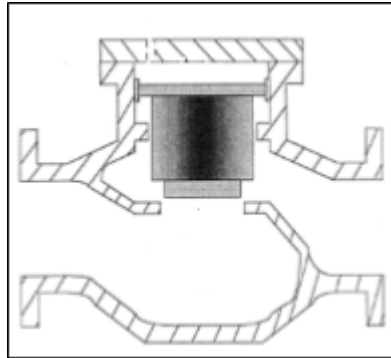
Estimativas indicam que cerca de 30% do gasto energético com bombas em uma rede de abastecimento é gerado pela ineficiência das bombas utilizadas (McCORMICK; POWELL, 2003). Assim, o acompanhamento em tempo real torna-se uma importante ferramenta para melhoria do sistema.

Alternativas como a otimização do uso de bombeamentos estilo colônia de formigas (*ant colony optimization*, ou ACO), que envolve um método de otimização que imita a técnica utilizada pelas formigas para gerar caminhos na vida real, foram utilizadas obtendo resultados satisfatórios (LÓPEZ-IBÁÑEZ; PRASAD; PAECHTER, 2008; HASHEMI; TABESHI; ATAEEKIA, 2013).

Outras formas de acompanhamento utilizando algoritmos podem levar a um maior controle em tempo real da tubulação. Esse é o caso do acompanhamento diário, que pode ser realizado através de algoritmos como visto em Nuñez (2007), Pasha e Lansey (2009), Bene, Selek e Hös (2010), Bi, Dandy e Maier (2015), Zheng, Zecchin e Simpson (2015), mas a sua análise depende muito da habilidade do algoritmo de encontrar a solução ótima em um tempo muito rápido (MALA-JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2017) e do controle das bombas e das válvulas do sistema, como a otimização do uso de bombas através de decomposição Lagrangiana (GHADDAR et al., 2015).

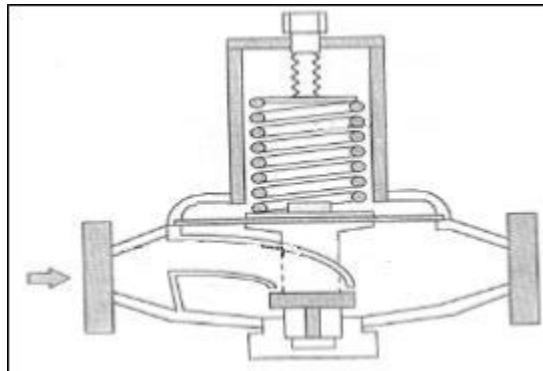
Já a utilização de VRPs é de grande importância para garantir o controle da pressão, e seu gerenciamento é uma variável de decisão importante na otimização do sistema (MALA-JETMAROVA; SULTANOVA; SAVIC, 2017) que vai garantir que o limite de pressão não ultrapasse os valores máximos estabelecidos pela NBR 12.218 (ABNT, 2017). As VRPs podem ser controladas de maneira eletrônica ou mecânica (SIGNORETI et al., 2016), e seu tipo, número e localização devem ser otimizados para controlar a perda de água do sistema (ARAÚJO; RAMOS; COELHO, 2006). As Figuras 2, 3 e 4 mostram respectivamente VRPs controladas por pistão, mola e diafragma.

Figura 2 – VRP controlada por pistão.



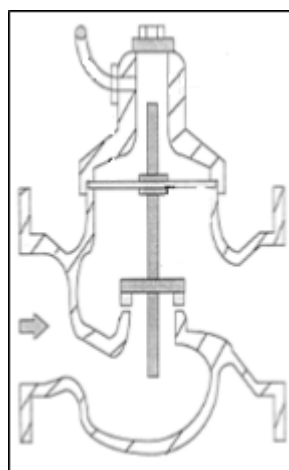
Fonte: Adaptado de Signoreti et al. (2016)

Figura 3 – VRP controlada por mola.



Fonte: Adaptado de Signoreti et al. (2016)

Figura 4 – VRP controlada por diafragma.



Fonte: Adaptado de Signoreti et al. (2016)

Além disso, o emprego de equipamentos na rede para gerir a pressão também deve ter como meta a economia energética, algo altamente desejável, uma

vez que a operação de redes de distribuição de água demanda uma grande quantidade de energia (SNIS, 2016). Em uma análise para economia de energia, a rede pode ser dividida nos pontos ou zonas que mais consomem energia (NOTARO et al., 2015), identificando assim padrões de uso que podem aumentar o consumo energético e as possíveis causas de um consumo energético elevado.

O consumo energético varia de acordo com as características locais como: topografia, padrão de uso de água e clima local (LAM; KENWAY; LANT, 2017). Além disso, escolhas na própria rede de abastecimento, como tomadas de decisão automatizadas e um traçado de rede desfavorável, acabam elevando o consumo energético (BOLOGNESI et al., 2014). A maneira mais eficiente, embora contraditória, para realizar o bombeamento de maneira a poupar energia e evitar vazamentos seria utilizar o período diurno para encher os reservatórios para o período noturno, já que nesse período a pressão é menor, uma vez que há um maior consumo por parte dos usuários (GIUSTOLISI; LAUCELLI; BERARDI, 2013).

Ações como aumentar a eficiência das bombas utilizadas na rede, diminuir a pressão e, por consequência, os vazamentos na tubulação podem gerar uma redução de mais de 5% de gasto energético (LAM; KENWAY; LANT, 2017). A cidade de Berlim reduziu o consumo de $0,535 \text{ kWh.m}^{-3}$, no ano de 2006, para $0,505 \text{ kWh.m}^{-3}$ em 2010, por meio da otimização hidráulica, utilização de água subterrânea individualmente, aumento da eficiência das bombas utilizadas e adoção de traçados da rede com diferenças mínimas de elevação (LAM; KENWAY; LANT, 2017).

Também é possível a utilização de bombas como turbinas (*pump as turbines*, ou PATs) para a diminuição da pressão e recuperação de parte da energia, o que diminui os gastos energéticos do sistema, o que não ocorre com as VRPs (FONTANA; GIUGNI; PORTOLANO, 2012; FECAROTTA et al., 2015; DE MARCHIS et al., 2016; CARRAVETTA et al., 2017), ou de sistemas de recuperação de energia (*power recovery systems* ou PRS) que agem de maneira semelhante às PATs mas de maneira mais simples e efetiva (SINAGRA et al., 2017).

No sistema de abastecimento de água, etapas de adução, tratamento e distribuição da água para os consumidores, em geral, demandam por energia elétrica. No Brasil, o gasto energético com saneamento atinge R\$ 5,41 bilhões

anuais, com 10,6 TWh produzidos apenas para o abastecimento de água (SNIS, 2016).

O sistema elétrico nacional é interligado, e a depender das condições e capacidades de produção momentânea em cada local, existe uma oscilação da produção entre os tipos eólica, hidrelétrica, nuclear, solar e térmica. Ainda assim, a produção de energia por meio hidrelétrico representa cerca de 70% do total produzido (ONS, 2017). Com a tendência de que a energia proveniente de hidrelétricas continue sendo largamente utilizada nacionalmente e que as concessionárias de distribuição de água não racionalizem seu consumo energético, há então um conflito entre o uso da água para abastecimento e a utilização de água para a geração de eletricidade.

As gestoras de sistemas de abastecimento, em geral, primam pela diminuição do custo da energia em si ao invés da redução do consumo energético através de um regime de bombas mais racional (VILANOVA; BALESTIERI, 2014). No panorama atual, a gestão das redes de abastecimento no Brasil, junto à economia de energia e ao ganho em recursos financeiros que a racionalização poderia trazer ao sistema, é de extrema importância para o futuro da gestão hídrica no país. Ainda, é possível maximizar esses benefícios com a adoção de outras iniciativas que gerem uma diminuição das perdas e, também, do consumo de água, com a adoção de práticas como o aproveitamento de água da chuva e das águas cinzas.

2.2 FONTES ALTERNATIVAS À REDE DE ABASTECIMENTO

A distribuição de água através de redes é a forma mais comum de atendimento populacional no Brasil. Cerca de 83,3% da população brasileira total é abastecida através de redes de distribuição (SNIS, 2016), como mostrado na Quadro 3.

O índice de atendimento é menor na região Norte, e quase total nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste. Porém, nem mesmo nas regiões com melhor atendimento no país o abastecimento atinge 100% da população. Como a água é um item essencial para a sobrevivência humana, aumenta a necessidade de fontes alternativas para obtenção de água ou uma melhor gestão da água disponível.

Crises no sistema de abastecimento de água, em geral, tendem a aumentar a utilização de poços clandestinos, por exemplo (PORTELA, 2014).

Quadro 3 – Abastecimento populacional através de redes de água.

| Região | Índice de atendimento com rede de água (%) | |
|--------------|--|--------|
| | Total | Urbano |
| Norte | 55,4 | 67,7 |
| Nordeste | 73,6 | 89,3 |
| Sudeste | 91,2 | 96,1 |
| Sul | 89,4 | 98,4 |
| Centro-Oeste | 89,7 | 97,7 |
| Brasil | 83,3 | 93,0 |

Fonte: Adaptado de SNIS (2016)

Além do problema da degradação da qualidade da água dos poços, que diminui sem o devido cuidado na construção do poço (PARREIRAS, 2015), há também o problema do dimensionamento da rede de abastecimento. Como a rede é dimensionada para uma estimativa populacional, a diminuição do consumo diminui a velocidade e conseqüentemente aumenta a pressão na rede de distribuição. Dessa maneira, a operadora da rede precisaria diminuir os valores de pressão para manter os parâmetros da rede estáveis e evitar avarias na tubulação. Caso exista alguma tubulação já fissurada ou áreas expostas a pressões muito próximas aos limites mínimos estabelecidos pela norma, a rede corre o risco de sofrer contaminações como consequência dessa diminuição de pressão induzida pela operadora da rede (LOBEL, 2015).

Da mesma maneira, o aproveitamento de água da chuva é algo que pode impactar a operação de uma rede de abastecimento. A NBR 15.527 determina que a água proveniente de chuva pode ser utilizada para fins não-potáveis, desde que apresente uma qualidade mínima (ABNT, 2007). A implementação do

aproveitamento ocasiona diversas vantagens para a cidade, como diminuição no consumo de água tratada (MAIA; SANTOS; OLIVEIRA, 2011) e diminuição do escoamento superficial durante as chuvas (TASSI, 2002; TESTON, 2015). Com a diminuição do consumo programada, é mais fácil para a empresa responsável pela distribuição de água adequar a pressão para o sistema e impedir danos à rede.

Ao mesmo tempo, a utilização da água da chuva diminui a quantidade de escoamento superficial e auxilia na drenagem urbana. O impacto desse aproveitamento da água da chuva na drenagem pode ficar entre 6% (TESTON, 2015) até 50% (TASSI, 2002) do valor de volume de pico retido no reservatório, dependendo do método utilizado para o cálculo deste. Assim, o reservatório acaba ajudando a drenagem em momentos de chuva intensa e também causa um impacto positivo para o consumidor, que pode reduzir o consumo de água proveniente da rede de distribuição.

A análise da viabilidade do aproveitamento de água da chuva e suas vantagens e potencialidades tem sido largamente estudada, como demonstrado por May (2004), Maia, Santos e Oliveira (2011), Flores et al. (2012), Hentges (2013), Mello, Pertel e Souza (2014), Nascimento, Fernandes e Yoshino (2016) e Perius (2016). A clara necessidade de sua implantação e as suas potenciais vantagens resultaram na aprovação de diversas legislações de regulação.

O aproveitamento de água da chuva possui legislação regulatória em nível federal e municipal. A Lei Federal nº 13.501/17 acrescenta à Lei nº 9.433/97, a Lei das Águas, o objetivo de “incentivar e promover a captação, a preservação e o aproveitamento de águas pluviais” (BRASIL, 1997). Vários municípios possuem leis específicas para o aproveitamento de água da chuva, como a Lei nº 8.080/09 em Florianópolis ou a Lei nº 6.345/03 na cidade de Maringá, ou para o aproveitamento de água da chuva e reutilização de águas cinzas, como a Lei nº 10.785/03 em Curitiba, que instituiu o Programa de Conservação e Uso Racional da Água nas Edificações (PURA) na cidade.

A reutilização de águas cinzas é outra ação importante na redução de consumo de água. Até 80% da água utilizada em residências é destinada para a lavagem de louças, roupas e banhos (AL-JAYYOUSI, 2003). O projeto de Lei nº 2.245/15, ainda não aprovado, acrescenta aos fundamentos da Política Nacional de

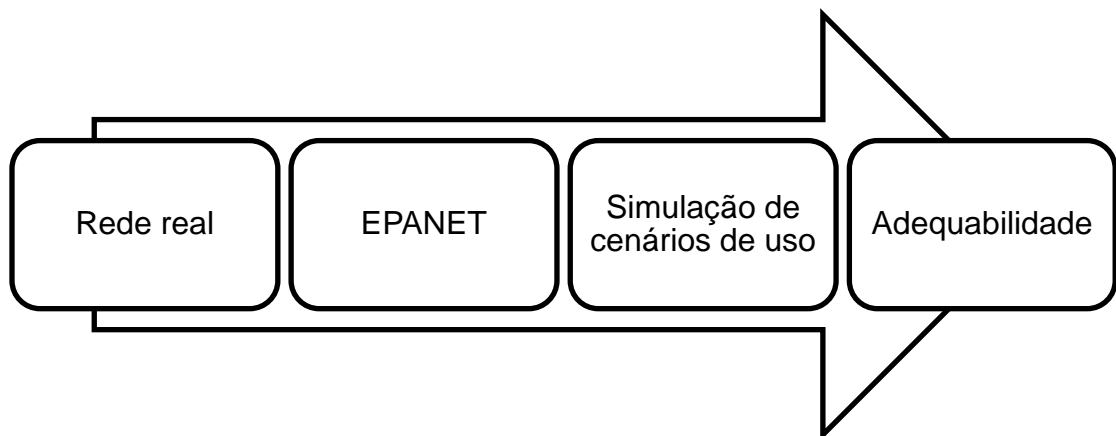
Recursos Hídricos a utilização de águas de menor qualidade para usos com uma menor exigência, tais como descargas sanitárias e irrigação dos jardins.

A utilização de um sistema com aproveitamento de água da chuva e reuso de águas cinzas pode trazer um ganho de economia de água tratada maior que através da utilização de apenas um desses sistemas (GHISI; FERREIRA, 2007). Assim, é importante a análise do impacto que essa utilização poderia causar em uma rede de abastecimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo será realizado a partir da avaliação de diferentes cenários simulados hidráulicamente, baseados em uma rede real. A Figura 5 apresenta as etapas do estudo.

Figura 5 – Etapas do estudo realizado.



Fonte: Autor

O software EPANET (ROSSMAN, 2000) será utilizado para as simulações hidráulicas, e suas funcionalidades serão abordados no item 3.1. Após, serão explicadas as características da rede real e as características dos cenários a serem simulados.

3.1. SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

A simulação hidráulica será realizada utilizando o EPANET, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental Americana (*United States Environmental Protection Agency*, ou USEPA). Esse programa, além de simulações hidráulicas, também pode ser utilizado para simulações de qualidade de água (UFPB, 2009).

O EPANET é de fácil obtenção, instalação e utilização, e tem sido amplamente utilizado para a simulação e otimização de redes de distribuição de água, como em Castro e Costa (2004), Barroso (2005), Vilas-Boas (2008), Moreira (2011), Adachi et al. (2014), Mohapatra, Sargaonkar e Labhasetwar (2014), Bolognesi et al. (2014), Farina, Creaco e Franchini (2014) e Saldarriaga e Salcedo

(2015). Como o seu código é aberto, é possível a utilização de um conjunto de ferramentas que permite ao usuário a personalização do programa e a simulação de informações específicas, não presentes em sua versão original. No estudo, entretanto, foi utilizada a versão original do programa.

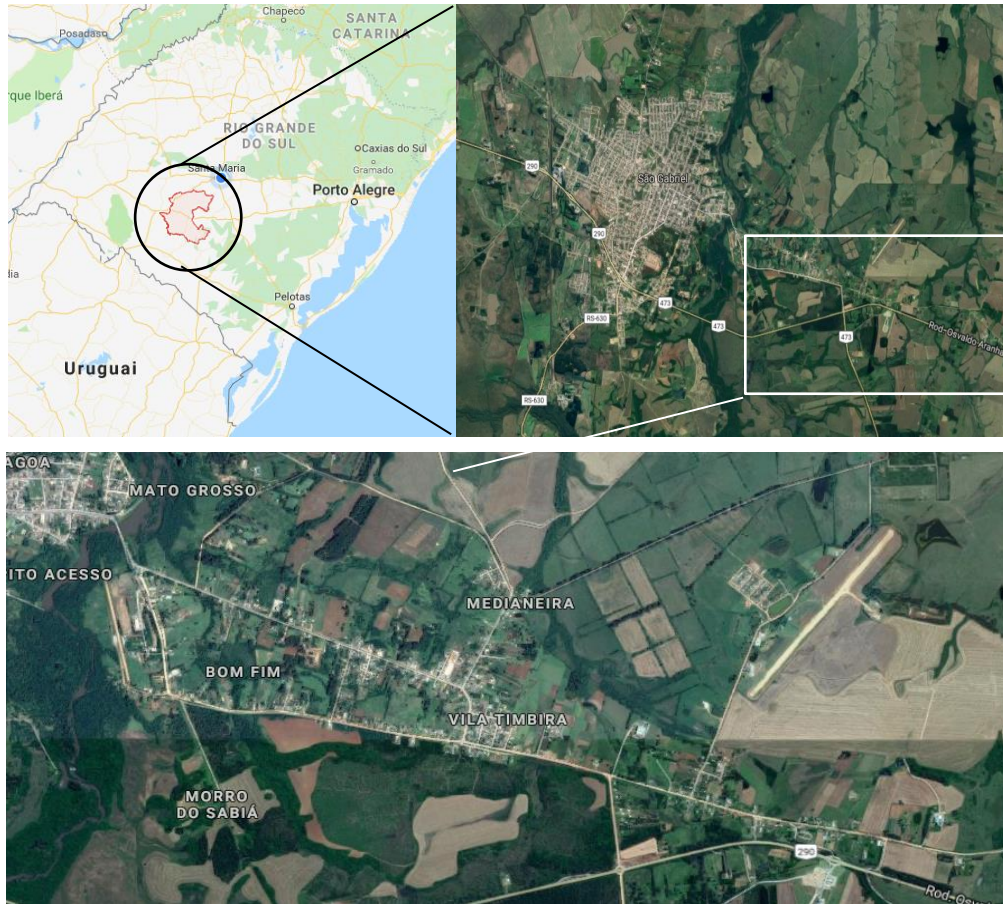
Os dados de entrada necessários para a realização da simulação hidráulica são: traçado da rede, com a definição dos trechos de tubulação e nós; nos trechos devem ser informados o comprimento, o diâmetro e a rugosidade do material; e nos nós o consumo nodal e a cota topográfica. A partir das simulações, estática ou dinâmica, obtêm-se dados como pressão e carga hidráulica nos nós, vazão, perda de carga (calculada pela equação de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams ou Chezy-Manning) e velocidade em cada trecho de tubulação.

3.2. REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A rede de distribuição de água utilizada nesse estudo compõe um sistema real de abastecimento de água, e pertence aos bairros Bonfim e Medianeira, do município de São Gabriel (RS) (Figura 6). A população urbana do município é estimada em 62.061 habitantes, e a concessionária atende 22.924 economias. Nos bairros em estudo, o abastecimento representa 816 economias, o que resulta em uma estimativa populacional de cerca de 2,2 mil habitantes.

O traçado e especificações das tubulações e as informações sobre a operacionalização do sistema foram obtidos com a empresa que administra o sistema de abastecimento de água e esgotamento sanitário do município, a São Gabriel Saneamento (SGS). Trata-se de uma empresa privada, pertencente ao grupo multinacional Solvi, que iniciou a prestação de serviços no ano de 2012, com uma concessão para 30 anos. A empresa não foi a responsável pelo projeto e instalação da rede avaliada neste estudo. O arquivo do traçado foi convertido para o EPANET através da utilização do programa EpaCAD (UPV, 2009).

Figura 6 – Localização do município de São Gabriel no estado e indicação dos bairros Bonfim e Medianeira.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2018)

3.2.1. Características das tubulações

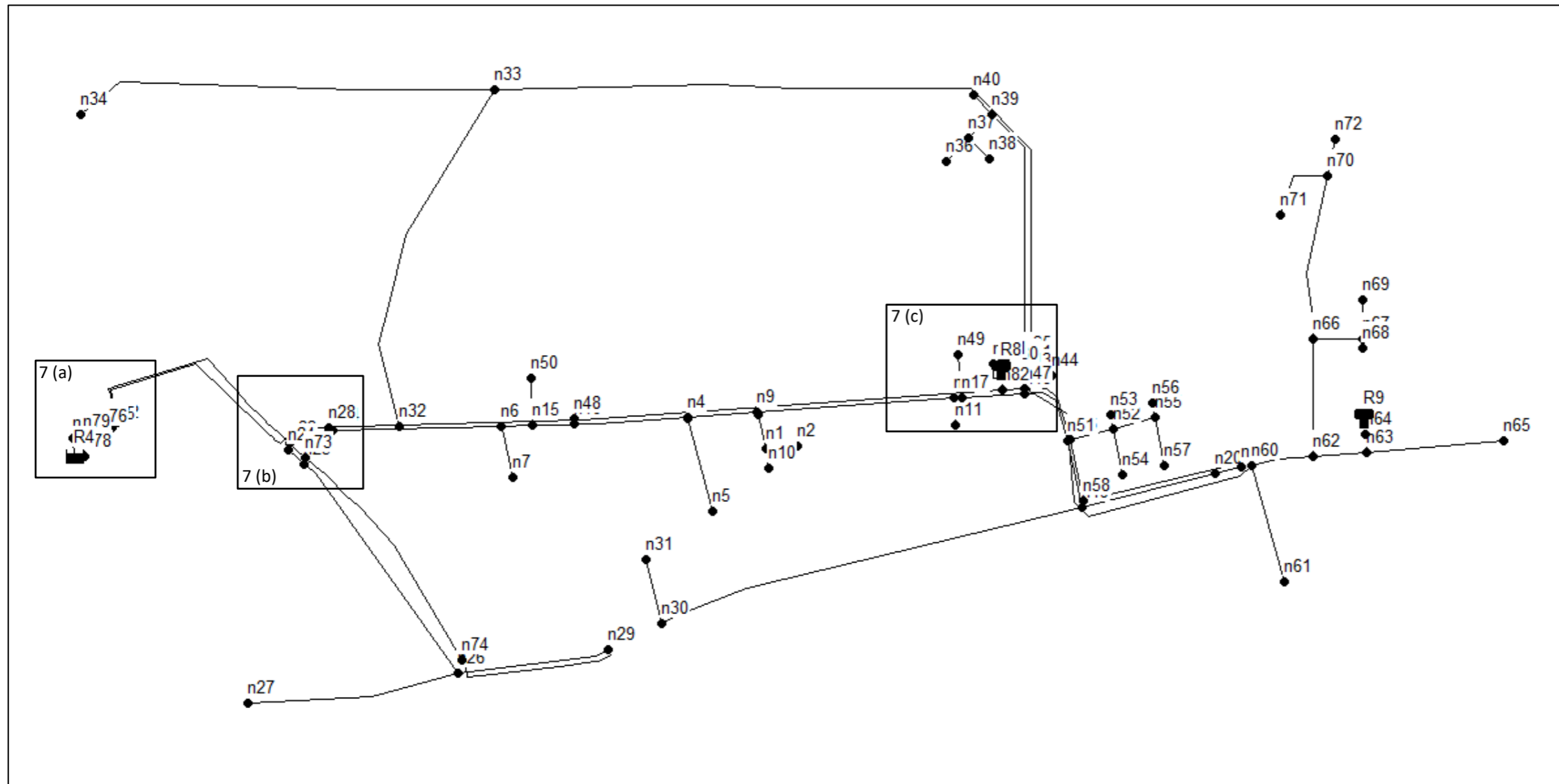
A rede é composta por 24.196,05 m de tubulações que foram divididas, nesse estudo, em 79 trechos. O material utilizado na simulação foi o PVC, com diâmetros nominais variando de DN 50 até DN 200 e coeficiente de rugosidade (C) igual a 130. Na Tabela 1 são identificadas as características de cada trecho, e na Figura 7 é possível ver o traçado da rede inserida no programa EPANET.

Tabela 1 – Comprimento e diâmetro interno de cada um dos trechos de tubulações da rede simulada.

| Trecho | L (m) | DI (mm) | Trecho | L (m) | DI (mm) | Trecho | L (m) | DI (mm) |
|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| p1 | 81,27 | 53,4 | p33 | 1938,00 | 75,6 | p63 | 840,00 | 75,6 |
| p2 | 5,39 | 97,8 | p34 | 80,93 | 53,4 | p64 | 45,33 | 75,6 |
| p3 | 236,90 | 53,4 | p35 | 72,59 | 53,4 | p65 | 180,00 | 53,4 |
| p4 | 129,50 | 53,4 | p36 | 83,93 | 53,4 | p66 | 290,70 | 53,4 |
| p5 | 5,32 | 97,8 | p37 | 67,04 | 53,4 | p67 | 123,80 | 53,4 |
| p6 | 93,80 | 53,4 | p38 | 640,60 | 53,4 | p68 | 21,82 | 53,4 |
| p7 | 65,67 | 53,4 | p39 | 21,42 | 97,8 | p69 | 97,46 | 53,4 |
| p8 | 12,02 | 97,8 | p41 | 22,24 | 97,8 | p70 | 1414,40 | 53,4 |
| p9 | 420,00 | 97,8 | p42 | 69,60 | 53,4 | p71 | 187,50 | 53,4 |
| p10 | 78,43 | 97,8 | p43 | 338,90 | 75,6 | p72 | 92,56 | 53,4 |
| p11 | 103,90 | 97,8 | p44 | 32,49 | 97,8 | p73 | 52,08 | 156,4 |
| p12 | 282,40 | 97,8 | p45 | 12,22 | 97,8 | p74 | 646,60 | 156,4 |
| p13 | 174,80 | 97,8 | p47 | 108,20 | 53,4 | p75 | 422,40 | 97,8 |
| p14 | 492,22 | 97,8 | p48 | 12,99 | 97,8 | p76 | 187,70 | 97,8 |
| p15 | 18,20 | 97,8 | p49 | 118,80 | 53,4 | p77 | 168,90 | 97,8 |
| p16 | 157,50 | 97,8 | p51 | 116,70 | 53,4 | p79 | 9,10 | 156,4 |
| p17 | 456,61 | 97,8 | p52 | 36,06 | 53,4 | p80 | 45,00 | 97,8 |
| p18 | 758,10 | 97,8 | p53 | 118,90 | 53,4 | p81 | 48,30 | 53,4 |
| p19 | 672,40 | 156,4 | p54 | 108,70 | 53,4 | p87 | 1,00 | 97,8 |
| p22 | 532,50 | 53,4 | p55 | 38,46 | 53,4 | p89 | 44,80 | 97,8 |
| p24 | 6,69 | 156,4 | p56 | 120,40 | 53,4 | p90 | 706,20 | 53,4 |
| p27 | 166,10 | 53,4 | p57 | 156,40 | 75,6 | p91 | 378,50 | 53,4 |
| p28 | 1090,00 | 53,4 | p58 | 868,41 | 75,6 | p92 | 10,00 | 97,8 |
| p29 | 147,00 | 97,8 | p59 | 65,68 | 75,6 | p93 | 2000,00 | 97,8 |
| p31 | 915,50 | 75,6 | p61 | 301,30 | 53,4 | p94 | 1853,00 | 156,4 |
| p32 | 1062,00 | 53,4 | p62 | 514,21 | 75,6 | p95 | 54,73 | 97,8 |
| | | | | | | p96 | 44,80 | 75,6 |

Fonte: Elaborada com informações repassadas pela concessionária SGS

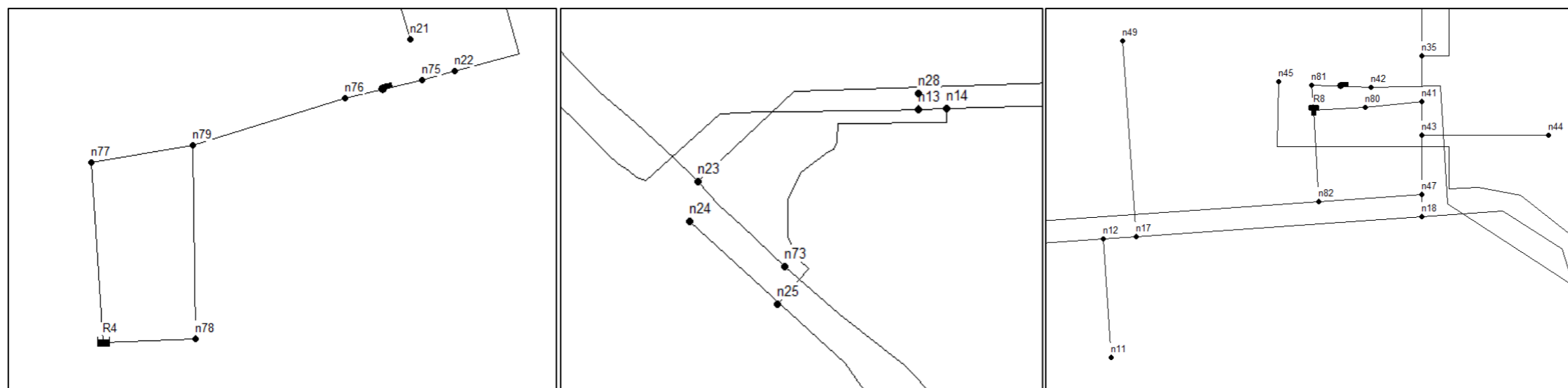
Figura 7 – Traçado da rede de abastecimento dos bairros Bom Fim e Medianeira.



7 (a)

7 (b)

7 (c)

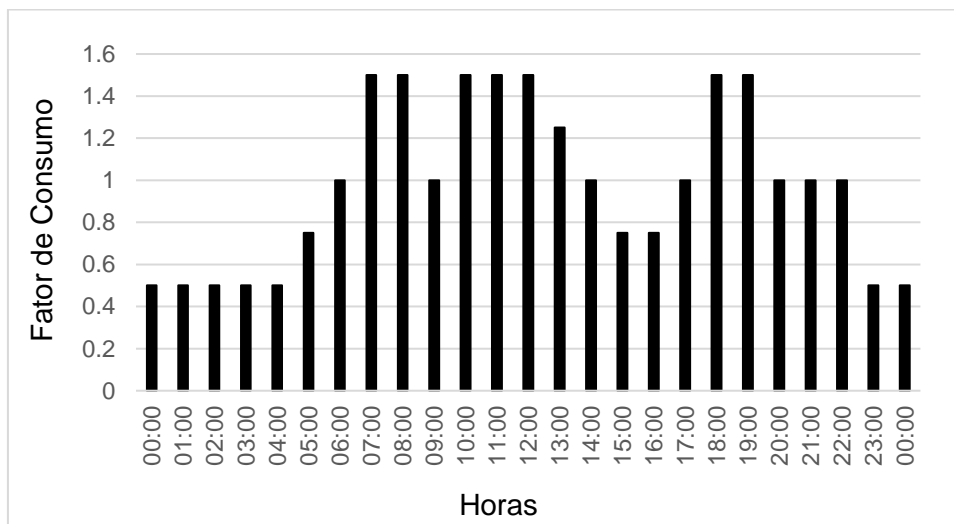


3.2.2. Consumos nodais

Para cada um dos 79 nós especificados foram fornecidas as informações de cota topográfica e consumo nodal. O consumo nodal foi estimado a partir do consumo total mensal ($\text{m}^3.\text{mês}^{-1}$) da rede, medido na entrada do sistema em estudo. Através de imagens de satélite, definiu-se a área de influência de cada nó (m^2) e foi realizado o levantamento do número de economias em cada área (economias.m^{-2}). Considerando $2,7 \text{ habitantes.economia}^{-1}$ (número de habitantes estimados no bairro dividido pelas economias presentes no bairro) e o consumo por habitante ($\text{L.s}^{-1}.\text{habitante}^{-1}$) obteve-se o consumo por economia ($\text{L.s}^{-1}.\text{economia}^{-1}$) e, conseqüentemente, o consumo nodal a partir do número de economias em cada área de influência. Essas informações podem ser vistas na Tabela 2.

Em relação às variações de consumo de água que ocorrem ao longo do dia, essas foram adotadas conforme apresentado na Figura 8. O padrão temporal de variação de consumo foi definido através dos resultados de simulações prévias e comparações com valores reais de pressão, através de um processo iterativo de simulação e comparação, em conjunto com o corpo técnico da concessionária.

Figura 8 – Padrão de consumo.



Fonte: Autor

Tabela 2 – Cota topográfica e área de influência de cada um dos nós da rede simulada.

| Nó | Cota (m) | A (m ²) | Nó | Cota (m) | A (m ²) | Nó | Cota (m) | A (m ²) |
|-----|----------|---------------------|-----|----------|---------------------|-----|----------|---------------------|
| n1 | 129 | 8144 | n27 | 90 | 20578 | n53 | 131 | 5229 |
| n2 | 130 | 4505 | n28 | 91 | 3898 | n54 | 132 | 4355 |
| n3 | 125 | 23568 | n29 | 101 | 31074 | n55 | 130 | 16146 |
| n4 | 125 | 6749 | n30 | 110 | 109559 | n56 | 129 | 10709 |
| n5 | 125 | 21193 | n31 | 114 | 19983 | n57 | 132 | 8250 |
| n6 | 101 | 45467 | n32 | 90 | 150911 | n58 | 133 | 16284 |
| n7 | 100 | 37808 | n33 | 122 | 478599 | n59 | 136 | 103713 |
| n8 | 128 | 6505 | n34 | 93 | 268796 | n60 | 136 | 54723 |
| n9 | 128 | 6473 | n35 | 130 | 125431 | n61 | 146 | 37522 |
| n10 | 128 | 7030 | n36 | 124 | 8045 | n62 | 138 | 129314 |
| n11 | 134 | 7758 | n37 | 124 | 4728 | n63 | 153 | 154263 |
| n12 | 132 | 39523 | n38 | 125 | 8154 | n64 | 153 | - |
| n13 | 91 | 2060 | n39 | 123 | 2814 | n65 | 156 | 18186 |
| n14 | 91 | 8056 | n40 | 122 | 4080 | n66 | 141 | 83967 |
| n15 | 113 | 11213 | n41 | 130 | 3191 | n67 | 145 | 5474 |
| n16 | 118 | 16325 | n42 | 125 | - | n68 | 145 | 2028 |
| n17 | 132 | 9176 | n43 | 130 | 5732 | n69 | 145 | 5851 |
| n18 | 133 | 8328 | n44 | 131 | 6917 | n70 | 143 | 64428 |
| n19 | 134 | 110892 | n45 | 129 | 10782 | n71 | 142 | 81957 |
| n20 | 132 | 12148 | n46 | 133 | 7923 | n72 | 142 | 49796 |
| n21 | 94 | - | n47 | 130 | 2821 | n73 | 90 | 43372 |
| n22 | 93 | - | n48 | 117 | 21269 | n74 | 112 | 67747 |
| n23 | 89 | - | n49 | 127 | 15220 | n75 | 94 | - |
| n24 | 89 | - | n50 | 110 | 16082 | n76 | 94 | - |
| n25 | 90 | 20284 | n51 | 133 | 8627 | n80 | 127 | - |
| n26 | 112 | 43857 | n52 | 131 | 7922 | n81 | 129 | - |
| | | | | | | n82 | 131 | - |

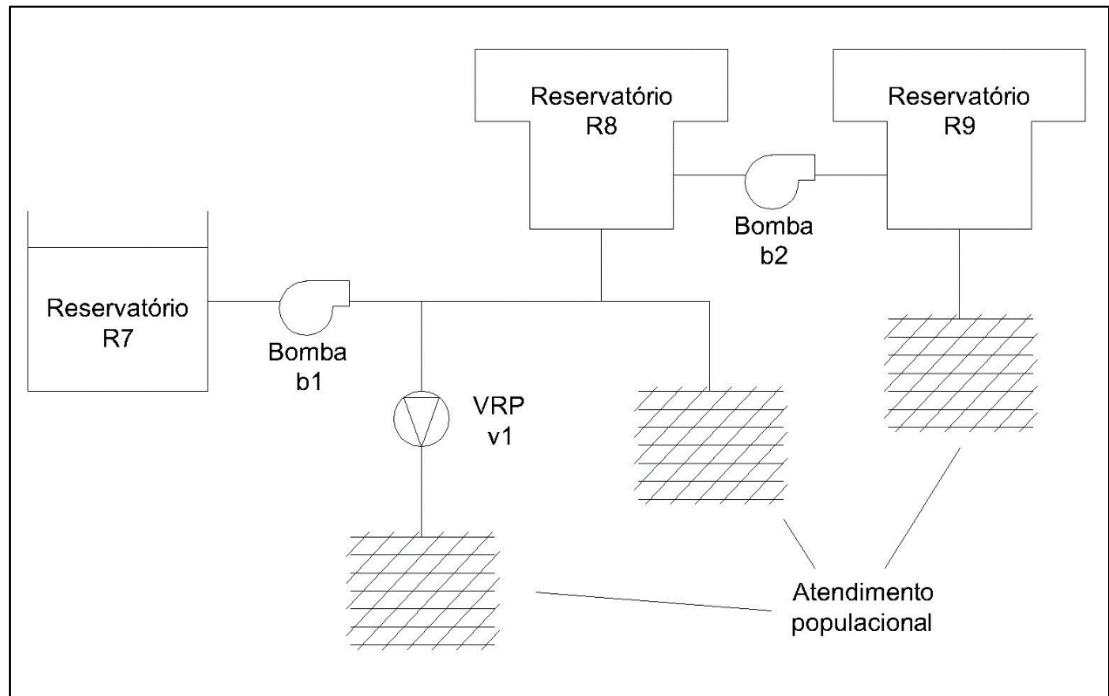
Fonte: Elaborada com informações repassadas pela concessionária SGS

3.2.3. Características dos reservatórios

A cidade de São Gabriel possui seis reservatórios, sendo que desses, apenas três (R7, R8 e R9) pertencem a rede estudada. O reservatório R7 está localizado no

centro da cidade, e é quem recebe a água da estação de tratamento e abastece as diferentes zonas da cidade. Sendo assim, esse reservatório será considerado como o início da rede em estudo. Na Figura 9 é apresentado um esquema com a sequência dos reservatórios no sistema.

Figura 9 – Esquema simplificado da rede.



Fonte: Autor

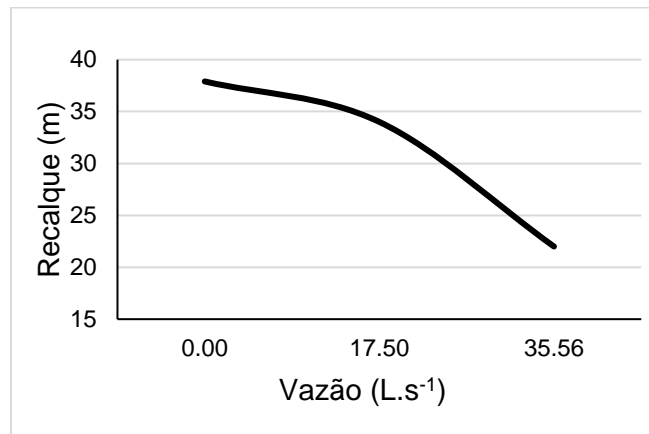
Uma tubulação com DN 150 sai do R7, conectada a uma bomba (b1), e é dividida em duas tubulações, sendo que uma delas fornece água para os consumidores e a outra para o reservatório R8. O reservatório R8 está localizado em um ponto com cota topográfica de 141,36 m, possui um diâmetro equivalente de 7,71 m e nível d'água entre 0,60 m e 1,93 m. Esse reservatório possui duas tubulações de saída, uma para abastecimento populacional e outra conectada a uma bomba (b2), para abastecimento do reservatório R9.

O reservatório R9 está localizado em uma cota topográfica de 156,00 m, possui um diâmetro de 2,79 m e nível d'água entre 2,47 m e 4,90 m.

3.2.4. Características das bombas

Existem duas estações elevatórias de água tratada (EEAT) na rede estudada, a Medianeira e a Bom Fim (Figura 9). A EEAT Medianeira está localizada logo após o reservatório R7, com uma bomba (b1) para realizar o recalque da marca MEGANORM, modelo 050-032-125 GG. A Figura 10 mostra a curva característica da bomba b1.

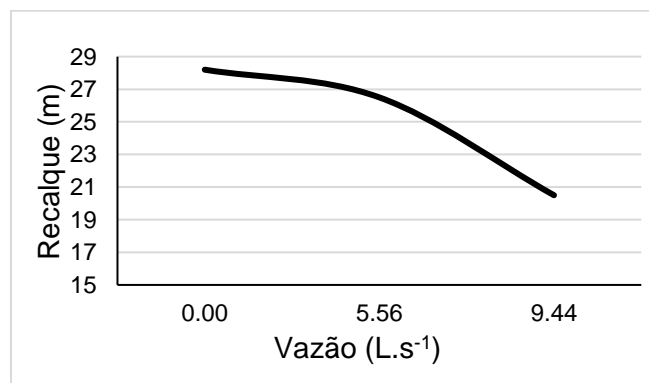
Figura 10 – Curva da bomba b1



Fonte: Autor

A EEAT Bom Fim está localizada a jusante do reservatório R9 e é composta por uma bomba (b2), marca MEGANORM, modelo 080-050-125 GG. A Figura 11 mostra a curva característica da bomba b2.

Figura 11 – Curva da bomba b2



Fonte: Autor

O funcionamento das bombas nas simulações hidráulicas foi ajustado de acordo com as características aplicadas no sistema real, com rendimentos de 80%. Na prática, esse rendimento depende da vazão, porém para as simulações neste trabalho foram considerados que os rendimentos eram constantes. O acionamento da bomba b1 é controlado pelo nível d'água no reservatório R8, que deve permanecer entre 0,65 e 1,80 m; enquanto o da bomba b2 pelo nível d'água no reservatório R9, que deve permanecer entre 3,00 e 4,50 m.

3.2.5. Característica da válvula redutora de pressão

A rede possui uma VRP (VRP1) instalada na derivação que abastece a população após o reservatório R7 (Figura 9). Essa VRP ainda não está em funcionamento, e possui um parâmetro de controle da válvula de 37,5 m.c.a.

3.2.6. Parâmetros de simulação e cálculo da perda de carga

Todas as simulações foram realizadas com tempo total de 72 horas, com intervalos de 1 hora entre os resultados. Para o cálculo da perda de carga distribuída foi utilizada a equação Hazen-Williams, enquanto a perda de carga localizada foi considerada desprezível. Para verificação da adequabilidade das características adotadas no modelo, as cargas de pressão obtidas na rede de distribuição simulada foram comparadas com valores reais fornecidos pela concessionária.

3.2.7. Cenários propostos

Inicialmente foram propostos dois cenários para verificar a adequabilidade de funcionamento da rede de distribuição em relação às exigências da NBR 12.218 (ABNT, 2017), o primeiro correspondendo ao consumo máximo de água e o segundo ao consumo mínimo. Esses dois cenários foram definidos a partir das informações de consumo mensal do ano de 2017, que é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Volume consumido mensalmente no ano de 2017 nos bairros Medianeira e Bom Fim.

| Mês | Volume - m ³ | Consumo - L.(hab.dia) ⁻¹ |
|--------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Janeiro | 8066,8 | 134,45 |
| Fevereiro | 7846,4 | 130,77 |
| Março | 8355,2 | 139,25 |
| Abril | 7585,0 | 126,42 |
| Mai | 6744,0 | 112,40 |
| Junho | 7515,6 | 125,21 |
| Julho | 7057,2 | 117,62 |
| Agosto | 7322,4 | 122,04 |
| Setembro | 7819,8 | 130,33 |
| Outubro | 7641,2 | 127,35 |
| Novembro | 7446,0 | 124,10 |
| Dezembro | 7512,0 | 125,20 |

Fonte: Dados fornecidos pela concessionária SGS. Em negrito, os valores de máximo e mínimo encontrados.

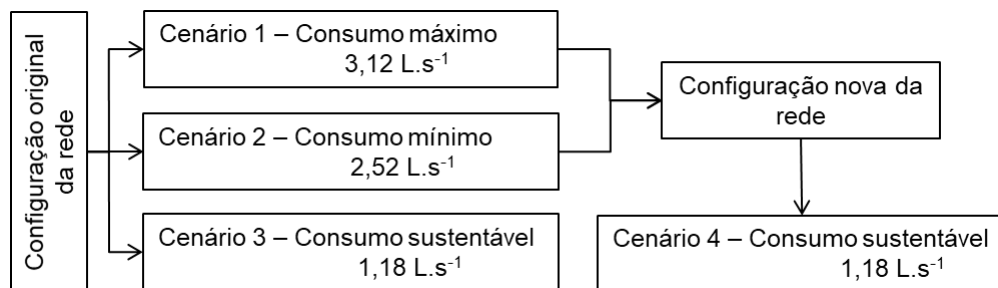
Como pode ser observado na Tabela 3, ocorre uma variação anual no consumo de água. O máximo consumo ocorreu no mês de Março, correspondendo a 8355,2 m³, o que representa um consumo de 3,12 L.s⁻¹ (139,25 L.hab⁻¹.dia⁻¹). Já o consumo mínimo de 6744,0 m³ ocorreu no mês de Maio, o que representa uma vazão de 2,52 L.s⁻¹ (112,40 L.hab⁻¹.dia⁻¹).

A partir dos cenários de máximo e de mínimo consumo foram propostas melhorias na rede de distribuição, originando uma nova configuração com a

utilização de acessórios especiais (VRPs e bombas), modificação do tempo de operação dos acessórios e alterações de diâmetro de tubulações.

Na rede, com configuração antiga e nova, foi avaliado um cenário sustentável, no qual foi considerado que uma parcela do consumo de água residencial seria proveniente do aproveitamento de água da chuva ou reuso das águas cinzas. Essa parcela foi estimada em $1,34 \text{ L.s}^{-1}$ (cerca de 53% do consumo mínimo, considerando-se uma soma entre o aproveitamento de água da chuva e o reuso de águas cinzas), correspondente a usos como descarga, irrigação de jardins, limpezas da casa e de calçadas e lavagem de carro. Nesses cenários sustentáveis, o consumo utilizado na simulação foi de $1,18 \text{ L.s}^{-1}$, uma vez que o mesmo foi avaliado na situação de consumo mínimo. O esquema da Figura 12 mostra os quatro cenários avaliados.

Figura 12 – Cenários avaliados na simulação hidráulica.



Fonte: Autor

3.2.8. Quantificação das perdas de água

A quantificação do impacto em relação às perdas de água causado por alterações operacionais no sistema, ou seja, pela redução da pressão dinâmica, foi feita considerando que o tamanho do orifício de vazamento varia de acordo com a pressão na rede (LAMBERT, 2001), ou seja:

$$Q_1 = Q_0 \times \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N1}, \quad (1)$$

em que Q_0 é a vazão de vazamento inicial ($L.h^{-1}$), que ocorre com a pressão P_0 (em m.c.a.); Q_1 é a vazão de vazamento final ($L.h^{-1}$), que ocorre com a pressão P_1 (em m.c.a.); e $N1$ é um coeficiente que varia de acordo com o material da tubulação. Esse coeficiente pode assumir valores entre 0,5 (para tubulações menos sensíveis à variação de pressão) e 2,5 (para tubulações mais flexíveis e sensíveis à alteração de pressão). Como as tubulações no sistema estudado são de PVC, foi utilizado o valor de 0,5 (GREYVENSTEIN; VAN ZYL, 2007).

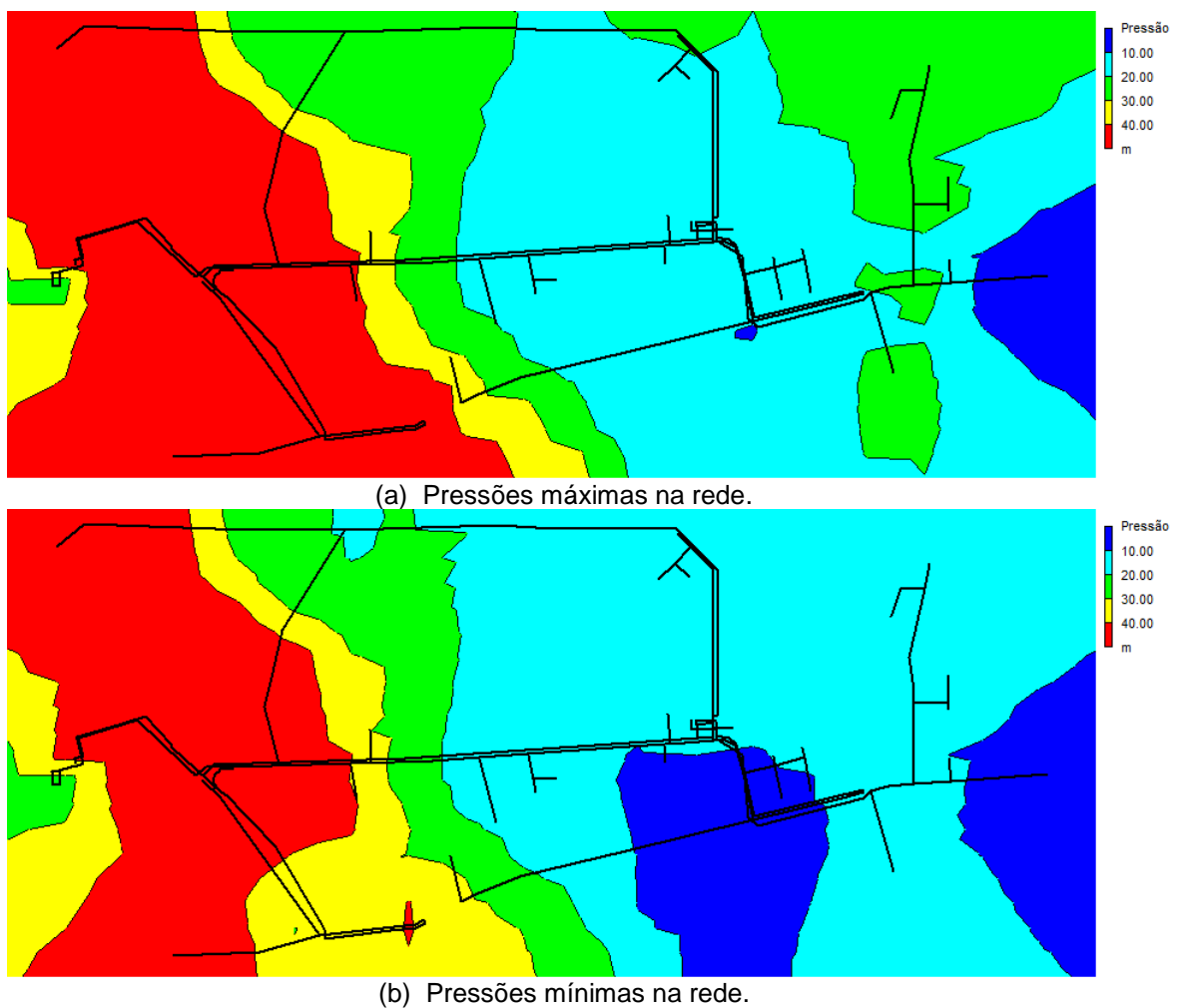
Nesta etapa foi realizada uma comparação entre as pressões da rede real, ou seja, aquela que representa a situação original do sistema, em comparação a rede com as melhorias propostas após avaliação dos cenários 1 e 2. Na rede real foi considerado que as pressões existentes ocasionariam as perdas de água por vazamento de cerca de 30% das perdas totais do sistema (ARAÚJO, 2005 apud SIGNORETI et al., 2016), sendo que o valor de perdas totais é estimada em 31%, de acordo com a concessionária. Portanto, as perdas de água por vazamento correspondem a 9,3% de perdas totais do sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISES DE PRESSÃO E DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NA REDE PARA O CENÁRIO DE CONSUMO MÁXIMO (CENÁRIO 1)

A rede simulada com valores de consumo máximo registrou áreas de pressão máximas e mínimas como mostradas nas Figuras 13(a) e 13(b), respectivamente. A pressão máxima ocorre em momentos nos quais a bomba b1 é acionada para manter o nível do reservatório R8 acima de 0,65 m e, os valores mínimos quando o nível d'água de R8 está próximo a essa cota e o sistema está sendo abastecido por gravidade.

Figura 13 – Pressões máximas (a) e mínimas (b) para o cenário de consumo máximo (cenário 1).



Fonte: Autor

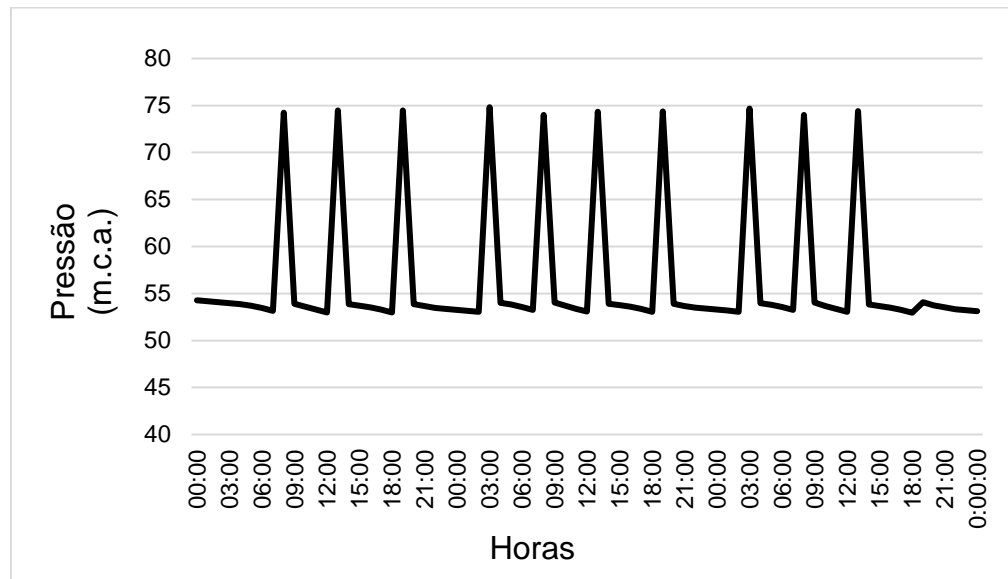
A NBR 12.218 (ABNT, 2017) não estabelece um valor de pressão dinâmica máxima, porém quanto mais elevado for esse valor, menor a vida útil das tubulações e mais susceptível essas estarão à fissura e rupturas. Idealmente, poderíamos considerar como referência a pressão estática máxima estabelecida pela referida norma, uma vez que quando o sistema funciona por gravidade, essa representa a pressão máxima possível.

Nas Figuras 13(a) e 13(b) as tubulações contidas nas regiões em amarelo e vermelho possuem pressões dinâmicas acima de 300 kPa (30 m.c.a.), valor esse que está acima da recomendação de 250 kPa à 300 kPa. Nas tubulações contidas na região em azul escuro as pressões dinâmicas estão abaixo dos 100 kPa (10 m.c.a.) estabelecidos pela NBR 12.218 (ABNT, 2017). Apenas as tubulações nas regiões em azul claro e verde as pressões estariam em condições ideais de funcionamento.

Nas Figuras 14 e 15 são apresentadas as variações de pressão nos nós n23 e n65, respectivamente. O nó n23 está localizado na primeira derivação após o reservatório R7, onde é possível a observação dos picos de pressão todas as vezes que ocorre o acionamento da bomba (b1), com esses chegando a valores de até 75 m.c.a (750 kPa). Também é possível observar que os valores mínimos de pressão, quando o sistema está sendo abastecido por gravidade pelo reservatório R8, ficam sempre acima 53 m.c.a (530 kPa). É possível salientar que a pressão estática, pressão inicial da simulação quando não há consumo na rede e os reservatórios encontram-se com seus níveis máximos, encontrada no nó n23 (com cota topográfica de 89,00 m) é de 542,8 kPa, e representa a diferença entre a cota topográfica do nó n23 e a cota topográfica do reservatório R8 (141,36 m) mais seu nível máximo de aproximadamente 1,93 m. Dessa maneira, esse nó está em desacordo com o valor máximo segundo a NBR 12.218 (ABNT, 2017).

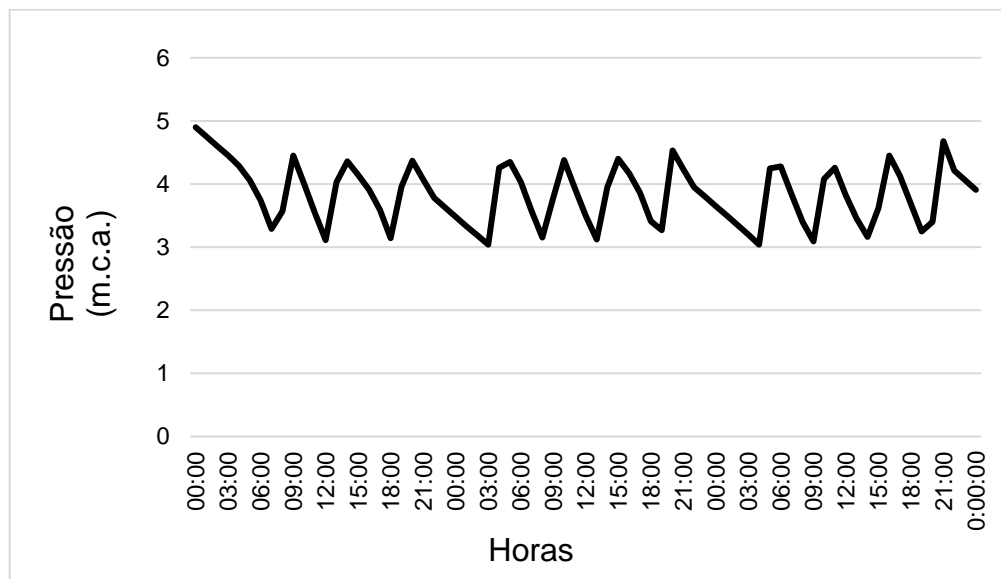
O nó n65 está localizado no ponto mais afastado do início da rede, em uma região mais alta, com cota topográfica de 156,00 m. Ele é abastecido por meio da pressão exercida pela bomba (b2), com valores de pressão sempre abaixo de 10 m.c.a. (100 kPa).

Figura 14 – Pressão no nó n23 para o cenário 1.



Fonte: Autor

Figura 15 – Pressão no nó n65 para o cenário 1.

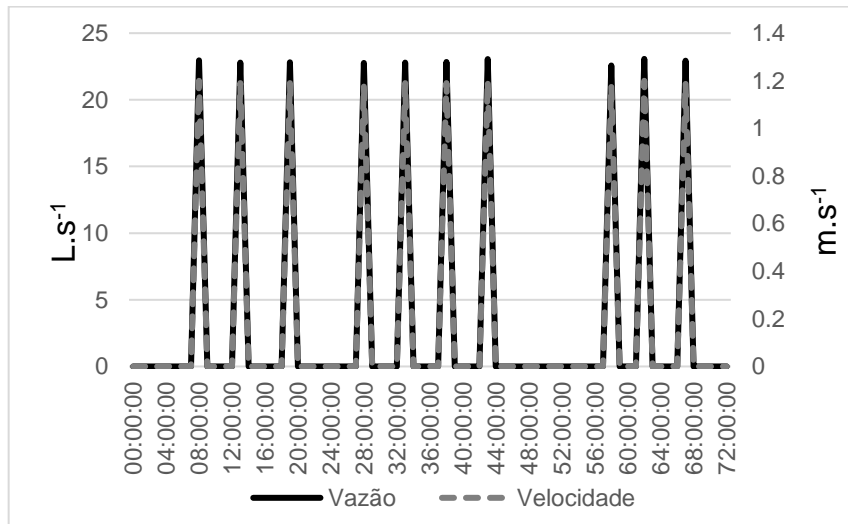


Fonte: Autor

Quanto aos parâmetros de velocidade e vazão na rede, imediatamente a montante do nó n23 está o trecho de tubulação p19. Nesse trecho, devido ao funcionamento da bomba b1, ocorre uma grande amplitude de variação nos valores de vazão e velocidade, passando de $23,07 \text{ L.s}^{-1}$ e $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ (14:00 do terceiro dia de

simulação), para zero de vazão e velocidade. A Figura 16 apresenta as variações de vazão e velocidade ao longo da simulação realizada.

Figura 16 – Velocidade e vazão no nó n23 com consumo máximo.



Fonte: Autor

De acordo com a NBR 12.218 (ABNT, 2017), a velocidade da água no sistema de distribuição não deveria ser menor que $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, para que seja evitada a sedimentação na tubulação e seja garantida a qualidade da água para consumo. Apenas quando ocorre o funcionamento das bombas as velocidades ficam acima desse limite estabelecido pela norma, ou seja, quando o sistema está funcionando por gravidade as velocidades ficam inferiores a $0,5 \text{ m.s}^{-1}$.

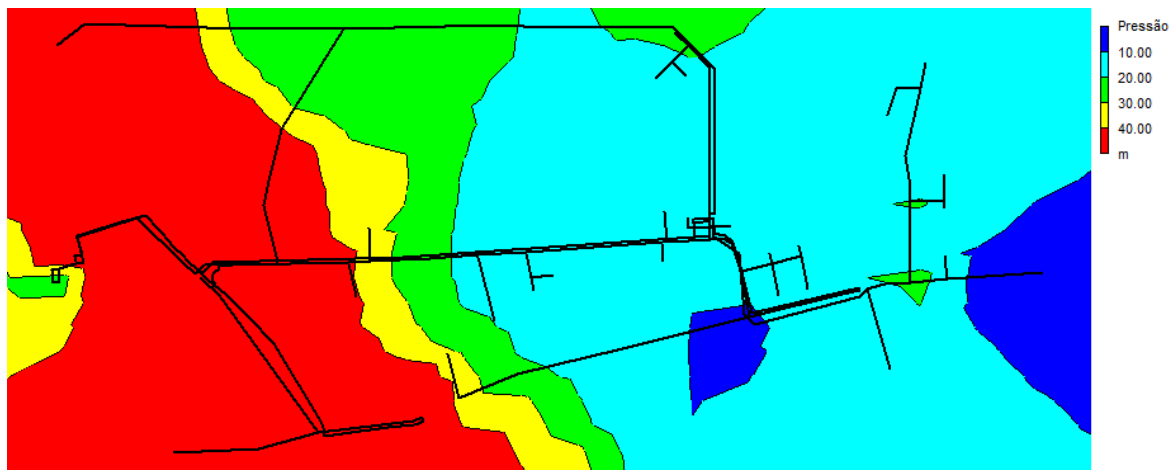
Como pode ser observado na Tabela 1, 58% dos trechos de tubulações possuem DN acima de 50 mm. Desses, 52% poderiam ter suas tubulações substituídas por diâmetros menores, uma vez que apresentaram velocidades entre zero e $0,29 \text{ m.s}^{-1}$. A diminuição de todos os diâmetros possíveis (sem impedir a simulação hidráulica) elevou a velocidade para um patamar maior que o mínimo da norma em oito trechos (18% dos 52%).

Essa substituição, no entanto, não resolveria o problema em sua totalidade, uma vez que todos os trechos originalmente com DN 50 ainda teriam velocidades abaixo de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$, e seis trechos não poderiam ter seus diâmetros de acordo com

a simulação hidráulica. A diminuição desses diâmetros impossibilitaria a realização das simulações, dessa maneira não tornando sua utilização possível.

As alterações de diâmetro resultaram em pressões menores na rede, como demonstra a Figura 17. A região em azul claro aumentou em relação à Figura 13(a), enquanto as zonas em amarelo e vermelho diminuíram ou permaneceram praticamente do mesmo tamanho (indicando pressões acima de 300 kPa). Além disso, como consequência da redução de pressão na rede pela redução de alguns diâmetros, as zonas em azul escuro também aumentaram, o que indica o não atendimento à pressão dinâmica mínima de 100 kPa. Sendo assim, a alteração de diâmetros isoladamente não representa uma solução definitiva.

Figura 17 – Pressão máxima com diâmetros da rede reduzidos para o cenário 1.

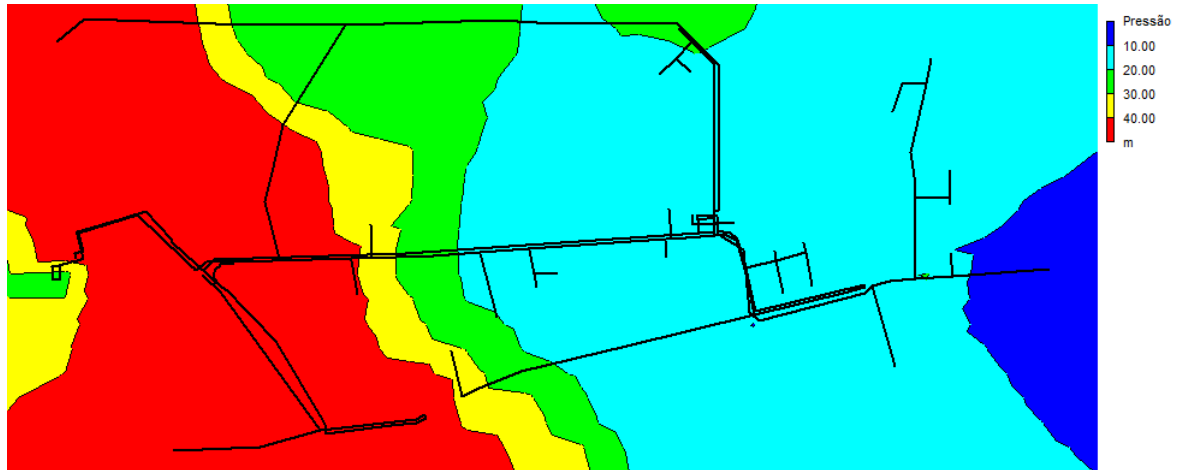


Fonte: Autor

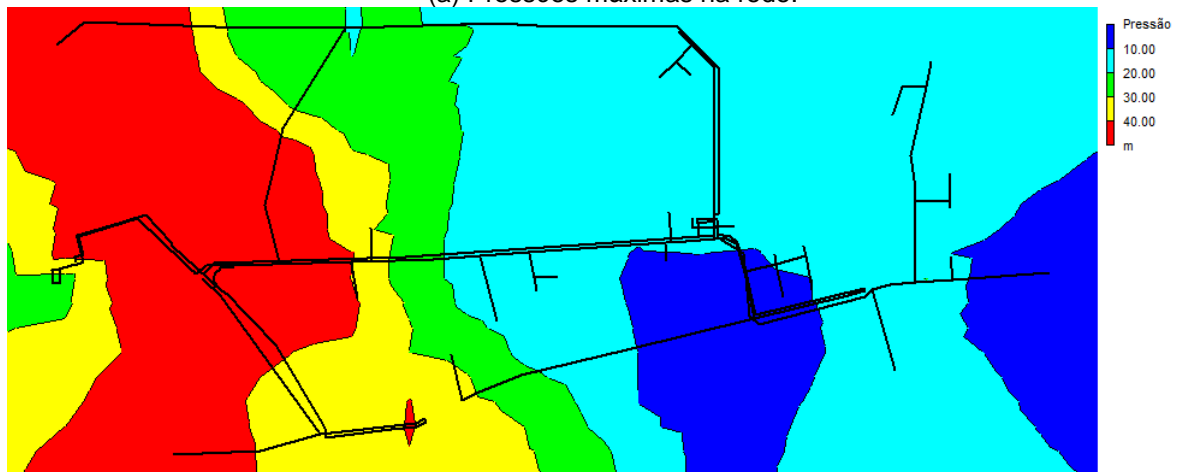
4.2. ANÁLISES DE PRESSÃO E DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NA REDE PARA O CENÁRIO DE CONSUMO MÍNIMO (CENÁRIO 2)

A rede simulada com valores de consumo mínimo registrou áreas de pressão máximas e mínimas como mostradas nas Figuras 18(a) e 18(b), respectivamente. Como pode ser observado, as regiões de pressões elevadas (vermelho e amarelo) são semelhantes às do Cenário 1 (Figuras 13(a) e 13(b)). As regiões em azul escuro continuam bem delimitadas, indicando a permanência de pressões abaixo de 100 kPa.

Figura 18 – Pressão máxima e mínima para o cenário de consumo mínimo (cenário 2).



(a) Pressões máximas na rede.

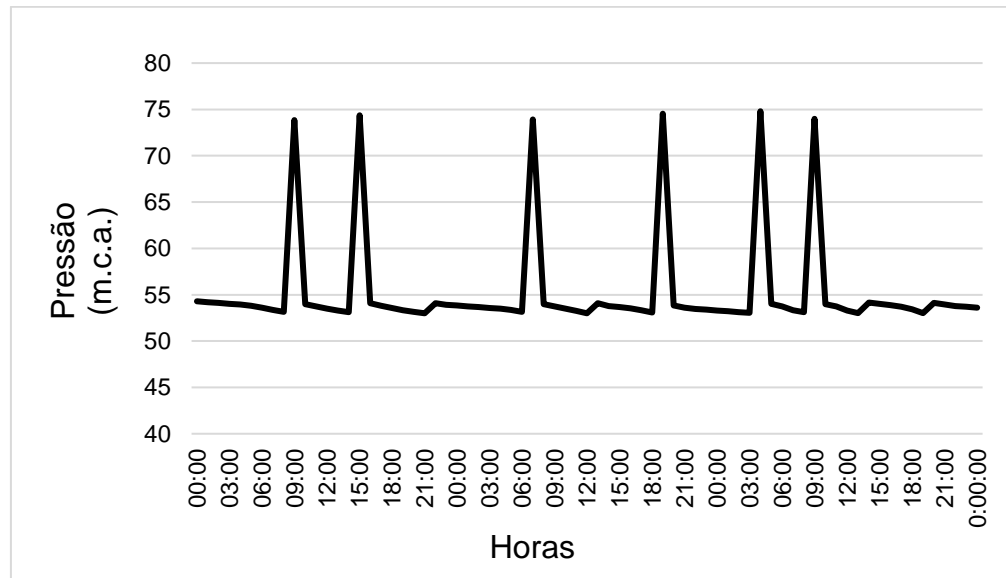


(b) Pressões mínimas na rede.

Fonte: Autor

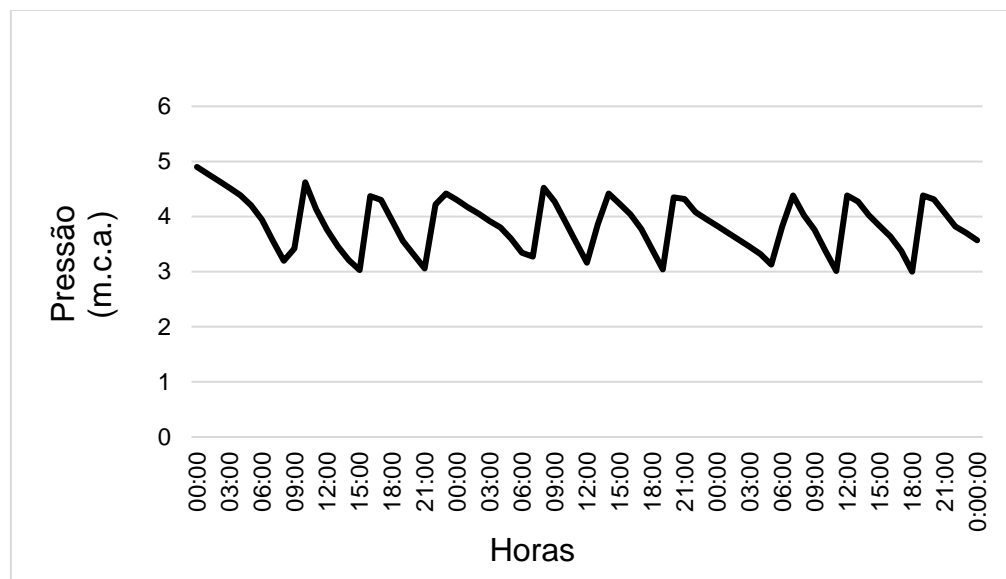
Nas Figuras 19 e 20 são apresentadas as variações de pressão nos nós n23 e n65, respectivamente. A mudança mais significativa é a diminuição do número de picos de pressão aos quais a rede está exposta com a diminuição de consumo. A pressão é menos alterada no nó n65, pois este nó é largamente abastecido por gravidade, com a água sendo proveniente do reservatório R9. Mesmo com um consumo mínimo, essa região da rede ainda possui pressão com valores abaixo de 100 kPa (10 m.c.a.), indicada como valor mínimo sugerido pela NBR 12.218.

Figura 19 – Pressão no nó n23 para o cenário 2.



Fonte: Autor

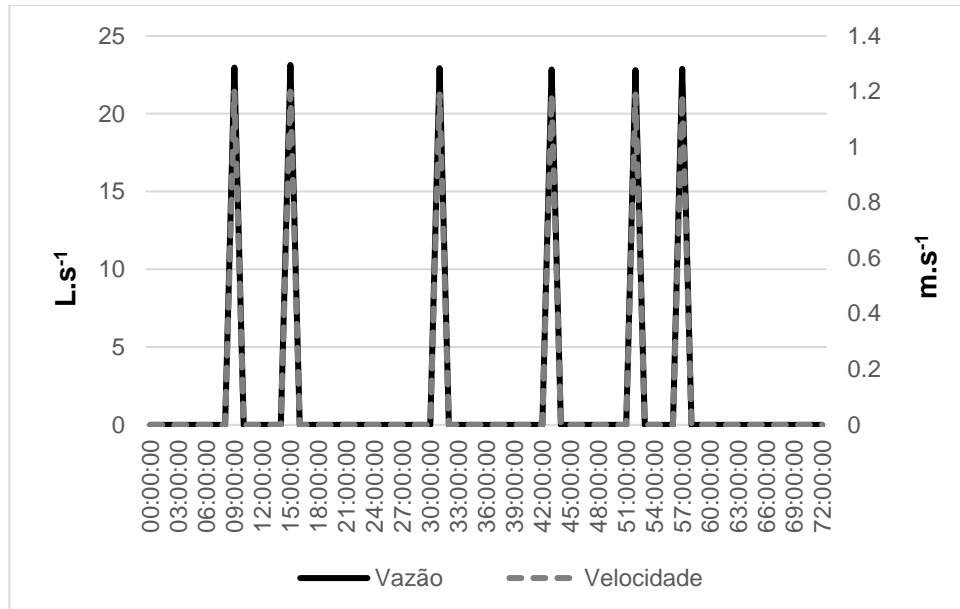
Figura 20 – Pressão no nó n65 para o cenário 2.



Fonte: Autor

No trecho p19, com a diminuição do consumo, ocorre uma grande amplitude de variação nos valores de vazão e velocidade, passando de 23,14 L.s⁻¹ e 1,2 m.s⁻¹ (14:00 do primeiro dia de simulação), para também zero de vazão e velocidade. A Figura 21 apresenta os valores de velocidade e vazão no trecho p19.

Figura 21 – Velocidade e vazão no nó n23 para o cenário 2.



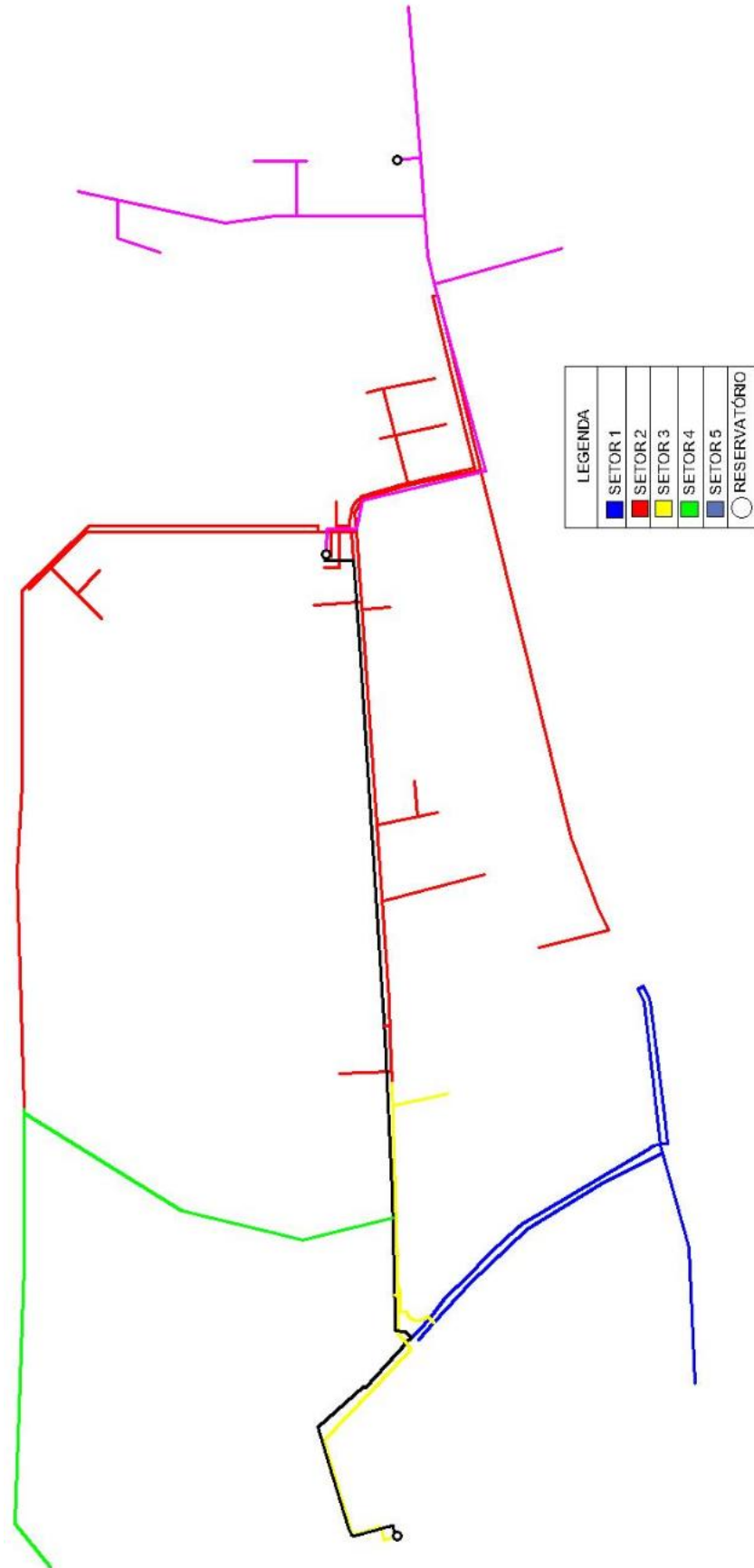
Fonte: Autor

Com a diminuição do consumo no Cenário 2, as velocidades na rede como um todo ficaram com valores 50% menores do que no Cenário 1. Dessa maneira, a simples diminuição de diâmetros não seria suficiente para trazer a rede para o equilíbrio. Porém, embora não seja o suficiente como solução única, a troca dos diâmetros é necessária para possibilitar uma melhor operação da rede, em conjunto com as intervenções propostas a seguir.

4.3. SETORIZAÇÃO E INTERVENÇÕES PROPOSTAS

Para facilitar a análise das intervenções propostas, a rede estudada foi dividida em cinco setores, como apresentado na Figura 22. A setorização realizada baseou-se nas zonas de pressão recorrentes ocorridas nos Cenários 1 e 2, ou seja, na repetição de uma zona de pressão alta na região centro-oeste da rede e uma zona de pressão baixa na região leste da rede, como visto nas Figuras 13(a) e 13(b) e 18(a) e 18(b).

Figura 22 – Setorização da rede.



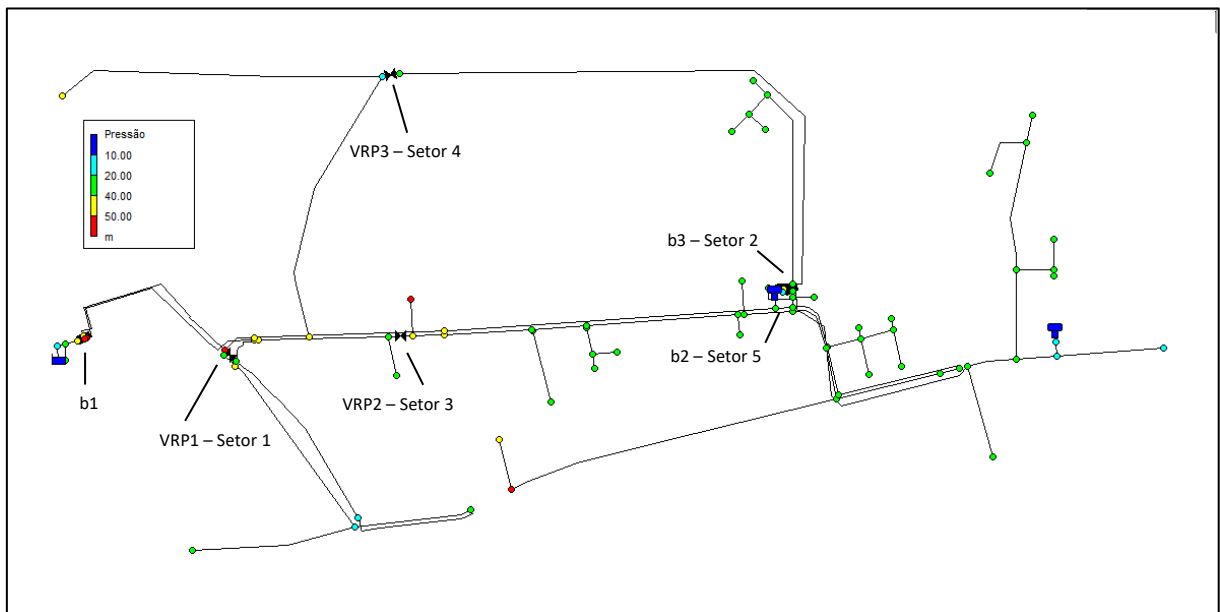
Fonte: Autor

4.3.1. Acessórios adicionados e suas influências na pressão e na velocidade da rede

São propostas algumas intervenções na rede a partir da inclusão de alguns acessórios. O cenário mais bem-sucedido é apresentado na Figura 23 e na Figura 24. Essa nova configuração inclui:

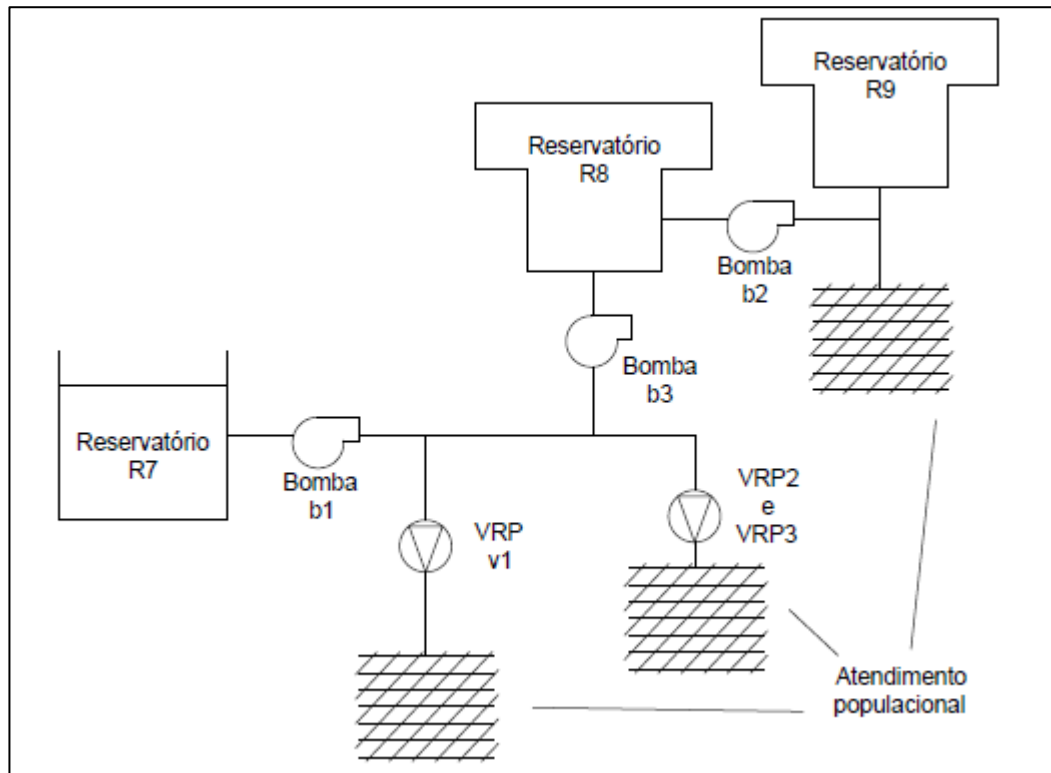
- Mudança de funcionamento na bomba b1;
- Setor 1: início da operação da VRP1;
- Setor 2: instalação e operação de uma bomba (b3);
- Setor 3: instalação e operação de uma VRP (VRP2);
- Setor 4: instalação e operação de uma VRP (VRP3);
- Setor 5: alteração no funcionamento da bomba b2.

Figura 23 – Rede e intervenções propostas



Fonte: Autor

Figura 24 – Esquema simplificado com as alterações da rede inseridas.



Fonte: Autor

4.3.1.1. Alteração no funcionamento da bomba b1

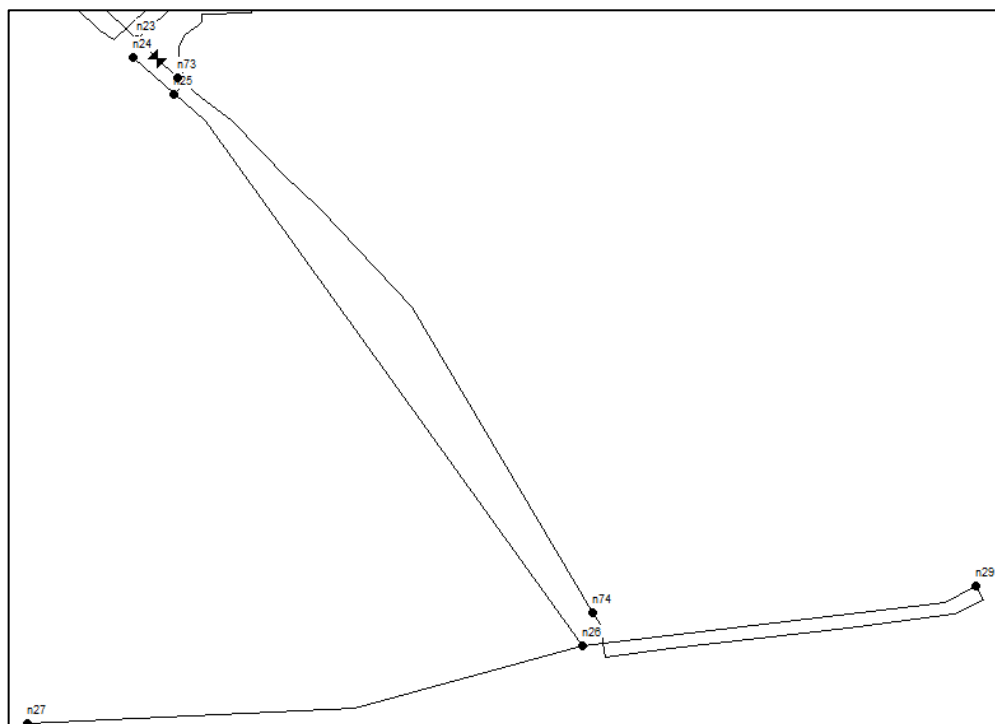
A bomba b1 teve seu parâmetro de controle (velocidade de funcionamento) alterado, de modo que a sua velocidade resultante fosse 40% do valor de velocidade atual de funcionamento. Essa escolha de operação (enchimento do reservatório R8) seria mais lenta, porém não haveriam picos tão acintosos de vazão e pressão, além de gerar uma economia de energia, apenas com a nova operação da bomba, de até 80%.

4.3.1.2. Setor 1

No Setor 1 foi colocada em operação a VRP1 já instalada. A VRP1, em detalhe na Figura 25, representa uma ferramenta importante de gestão da rede a jusante, que permite uma melhora nos valores de pressão presentes nesse setor. Esse setor apresentou nas simulações dos Cenários 1 e 2 pressões sempre acima

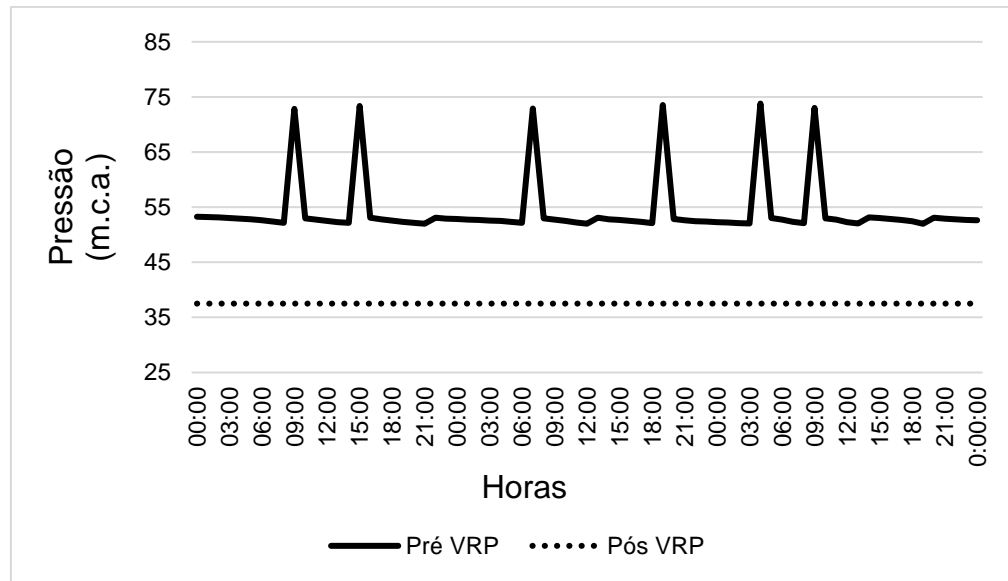
de 300 kPa, chegando à valores máximos de até 730 kPa. Como pode ser verificado no nó n73, que está localizado logo após a VRP1, na Figura 26, e no n27, ao final da tubulação do Setor 1, na Figura 27, que com o funcionamento dessa VRP as pressões apresentaram uma melhora considerável. A presença da VRP1 regulariza os valores de pressão em todo o setor, permitindo o estabelecimento de pressões dinâmicas sempre abaixo dos 400 kPa (40 m.c.a.), diminuindo em até 31% os valores de pressão no trecho em comparação aos valores alcançados no cenário 2.

Figura 25 – Posição da VRP1 entre os nós n23 e n73 no Setor 1.



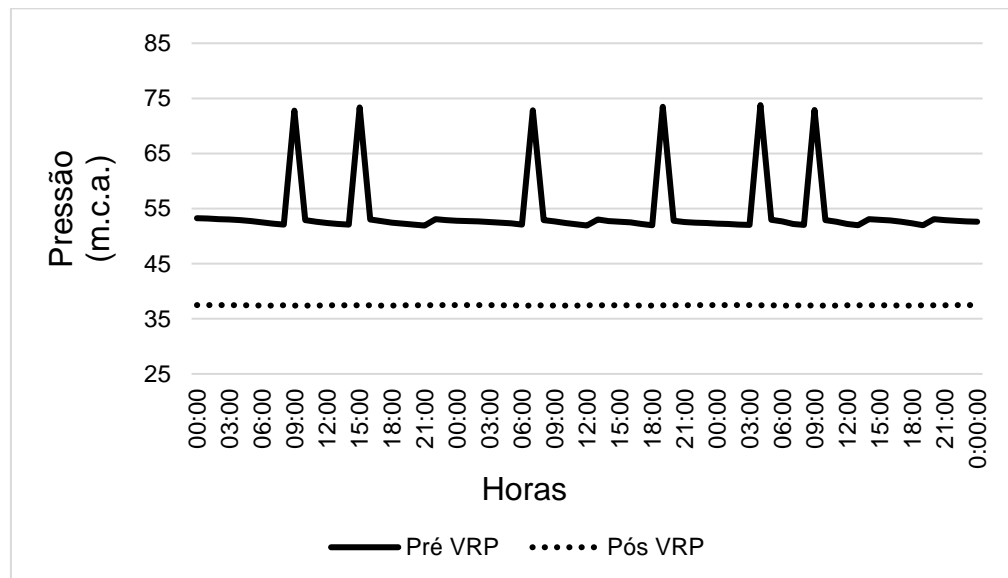
Fonte: Autor

Figura 26 – Pressões antes e após o acionamento da VRP1 no nó n73.



Fonte: Autor

Figura 27 – Pressão antes e após o acionamento da VRP1 no nó n27.



Fonte: Autor

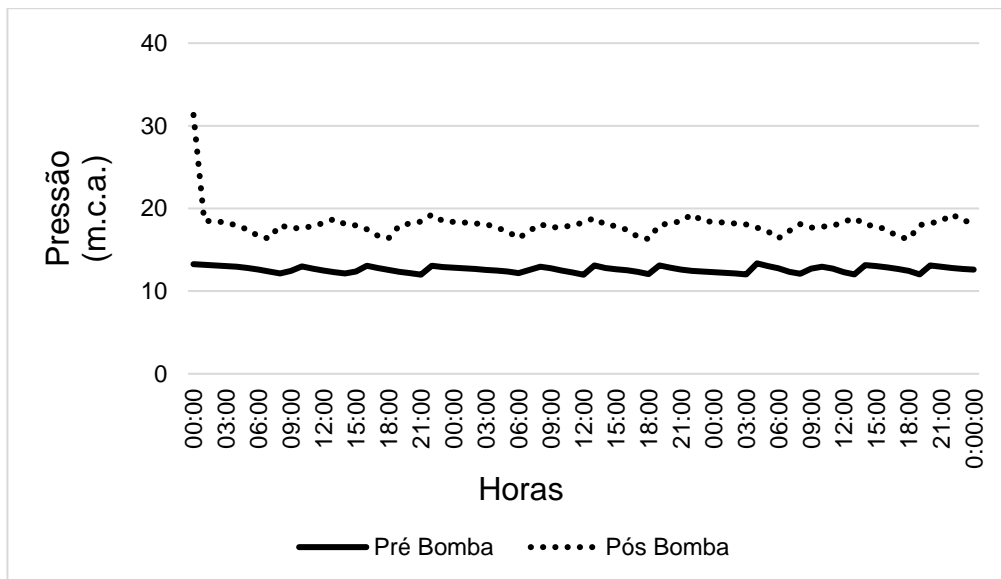
O Setor 1 sem o funcionamento da VRP1 apresenta uma faixa de ocorrências de pressões com uma grande amplitude, o que pode levar a ocorrência de fissuras na tubulação (SAPPORO, 1994 apud TSUTIYA, 2006). Ao mesmo tempo, há pouca diferença de pressão entre o nó n73 e o nó n27 (mais afastado), tanto antes quanto após a operação da válvula. Isso demonstra que a operação da VRP1 seria o

suficiente para regularizar as pressões dentro da faixa máxima da NBR 12.218 (ABNT, 2017) em todos os pontos a jusante de sua localização.

4.3.1.3. Setor 2

A sugestão de instalação de uma bomba (b3) após o reservatório R8 objetiva o aumento da pressão dinâmica no Setor 2, que apresenta algumas zonas de pressão abaixo do valor mínimo estabelecido pela NBR12.218 (ABNT, 2017), 100 kPa. A bomba b3 é idêntica à bomba b2 em virtude do conhecimento operacional que a concessionária já possui do uso desse modelo de bomba. O nó n41 é o primeiro nó após a bomba b3. A pressão nesse nó é mostrada na Figura 28.

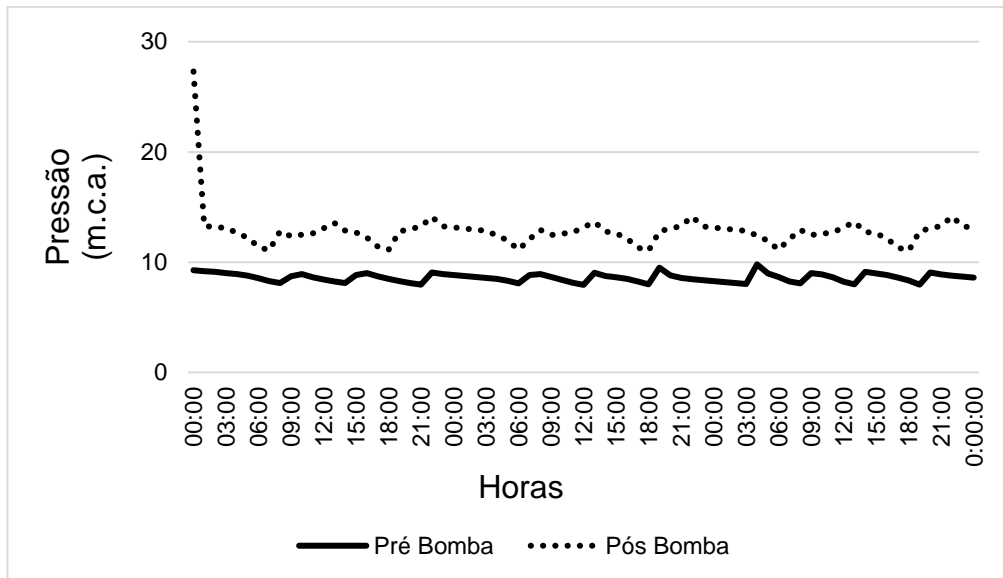
Figura 28 – Pressão antes e após a instalação e a operação da bomba b3 no nó n41.



Fonte: Autor

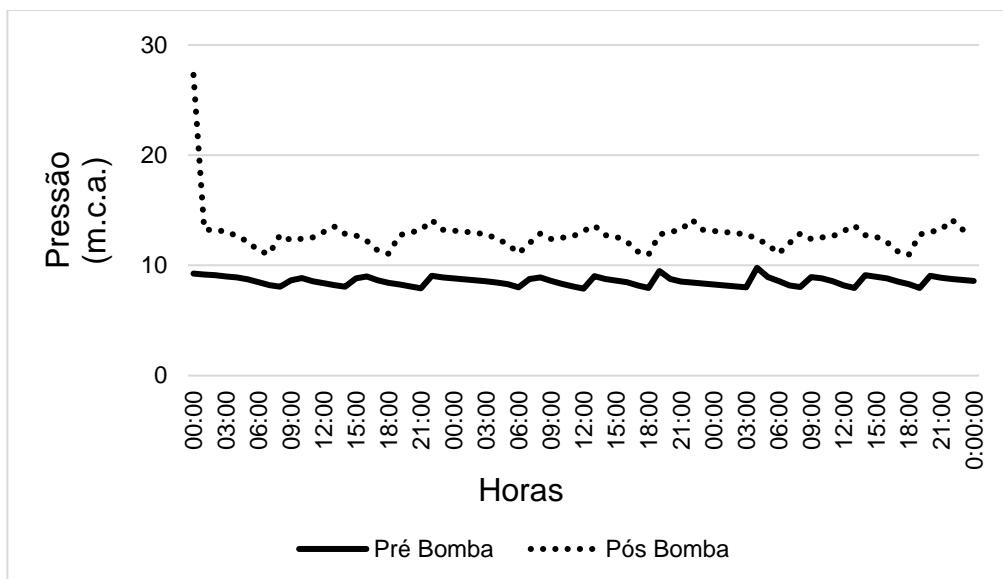
As piores situações de pressão no Setor 2 eram encontradas nos nós n11, n19 e n59. Os valores de pressão desses nós são apresentados nas Figuras 29, 30 e 31, respectivamente.

Figura 29 – Pressão antes e após a instalação e a operação da bomba b3 no nó n11.



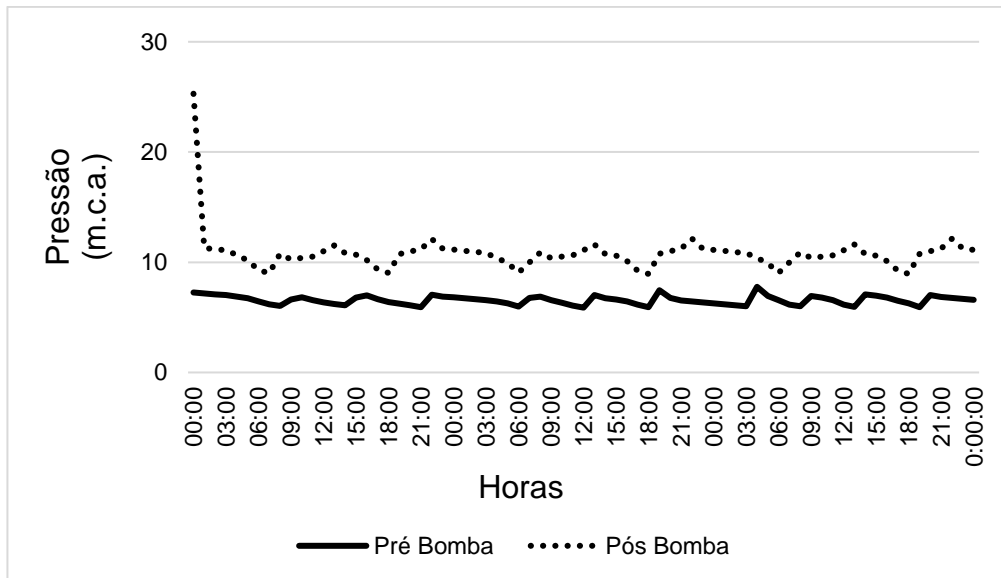
Fonte: Autor

Figura 30 – Pressão antes e após a instalação e a operação da bomba b3 no nó n19.



Fonte: Autor

Figura 31 – Pressão antes e após a instalação e a operação da bomba b3 no nó n59.



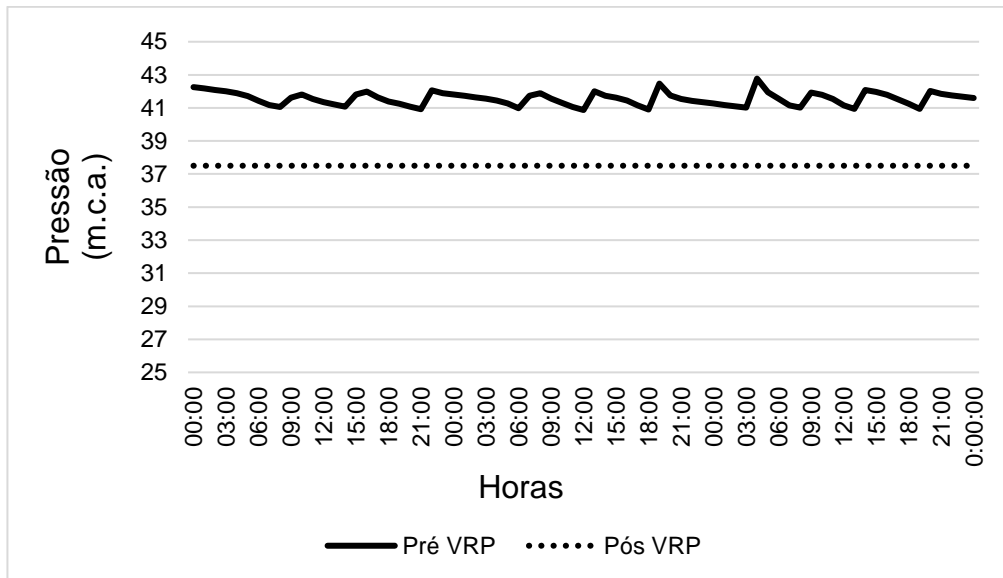
Fonte: Autor

A inserção da bomba garantiu que todos os valores de pressão nos trechos pertencentes ao Setor 2 atendessem o valor mínimo da NBR 12.218 (ABNT, 2017) de 100 kPa (10 m.c.a.). Dessa maneira, o setor todo estaria em conformidade com os valores de norma.

4.3.1.4. Setor 3

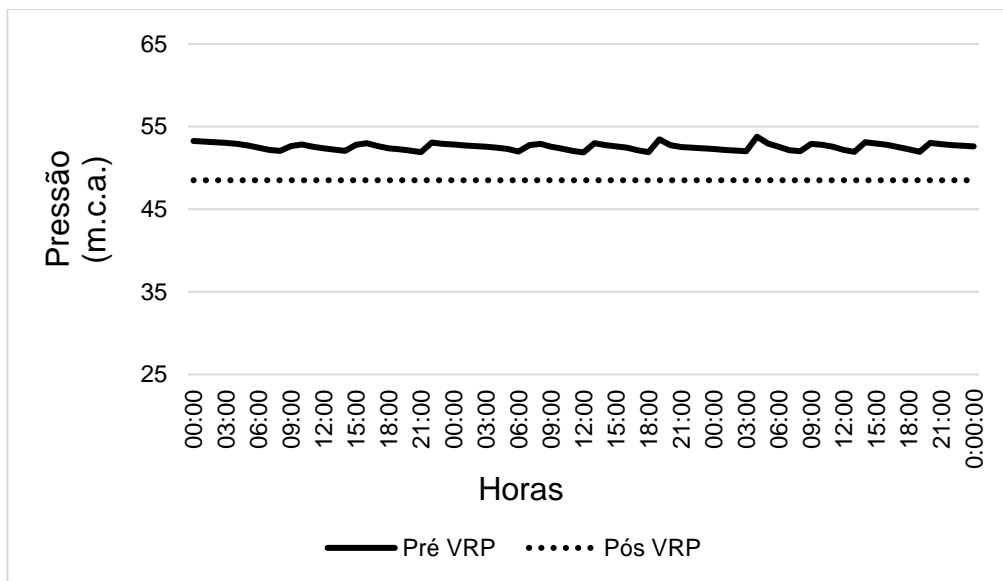
No Setor 3 foi simulada a instalação e a operação de uma VRP, nomeada VRP2. Essa válvula foi configurada com o mesmo parâmetro de controle que a VRP1, 37,5 m.c.a. O Setor 3 está geograficamente próximo ao Setor 1, além de possuir alguns trechos da rede que se sobrepõe aos trechos do Setor 1. Dessa forma, assim como o Setor 1, este setor apresenta altos valores de pressão. Com a instalação e operação da VRP2, os valores de pressão seriam regularizados em níveis mais benéficos para a rede, como mostram as Figuras 32 e 33, que apresentam os valores de pressão para os nós n6 e n25.

Figura 32 – Pressão antes e após a instalação e a operação da VRP2 no nó n6.



Fonte: Autor

Figura 33 – Pressão antes e após a instalação e a operação da VRP2 no nó n25.



Fonte: Autor

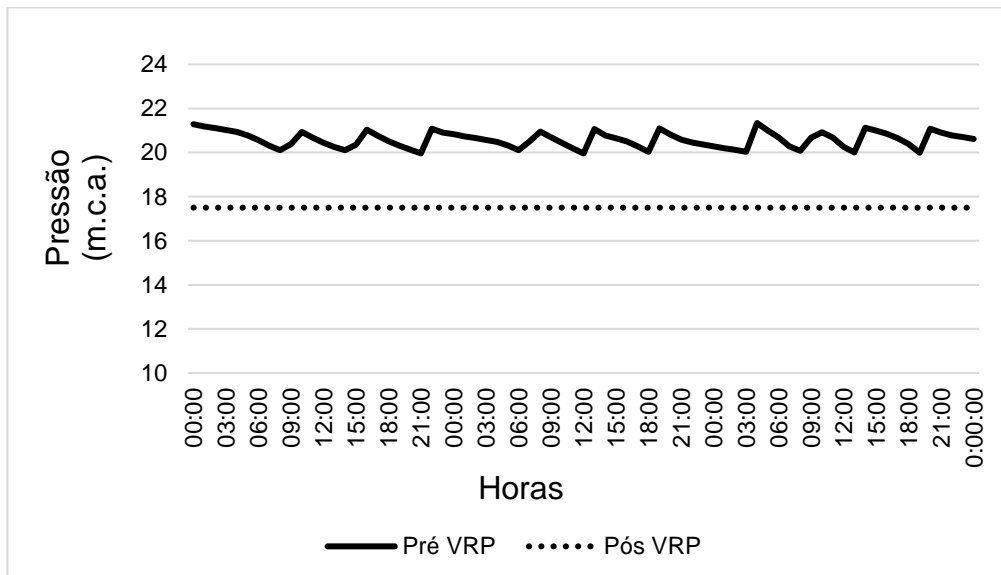
O nó n6 está localizado imediatamente após a VRP2, e a operação da mesma mantém os valores de pressão nesse nó em 375 kPa (37,5 m.c.a.). Esse efeito na pressão irá se propagar pela rede a jusante fazendo com que a pressão no nó n25, que possuía pico de pressão próxima aos 550 kPa (55 m.c.a.), reduza em cerca de

12% em relação ao ocorrido no cenário 2. Embora em alguns trechos os valores de pressão ainda fiquem acima de 300 kPa, a redução proposta já representaria uma melhora em relação ao quadro atual da rede.

4.3.1.5. Setor 4

Assim como ocorre nos setores 1 e 3, o setor 4 também é caracterizado por altos valores de pressão. Por isso, também foi simulada nesse setor a instalação e a operação de uma VRP, nomeada VRP3. Essa válvula foi configurada com o parâmetro de controle de 17,5 m.c.a. (valor arbitrário para que os valores de pressão estática após a válvula não ultrapassassem 500 kPa). O Setor 4, assim como o Setor 1 e 3, é caracterizado por altos valores de pressão. O nó n33 está posicionado imediatamente após a VRP3 e sua pressão, antes e após a instalação da válvula, é demonstrada na Figura 34. A pior situação de pressão era encontrada nos nós n32 e n34. Os valores de pressão desses nós são apresentados nas Figuras 35 e 36.

Figura 34 – Pressão antes e após a instalação e operação da VRP3 no nó n33.

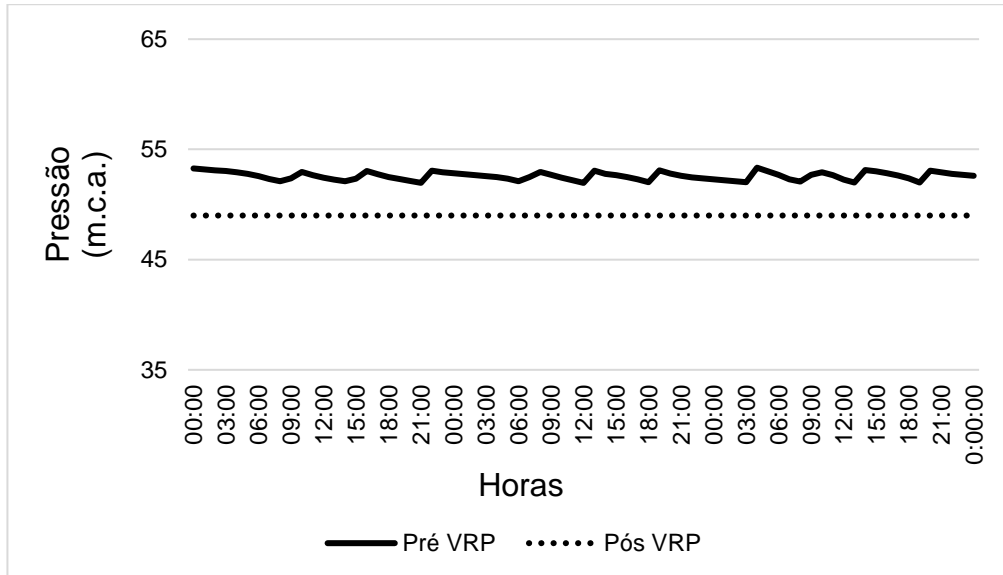


Fonte: Autor

Em decorrência da implantação e operação da VRP3, o Setor 4 apresenta melhora nos valores de pressão, embora esses ainda estejam acima de 300 kPa.

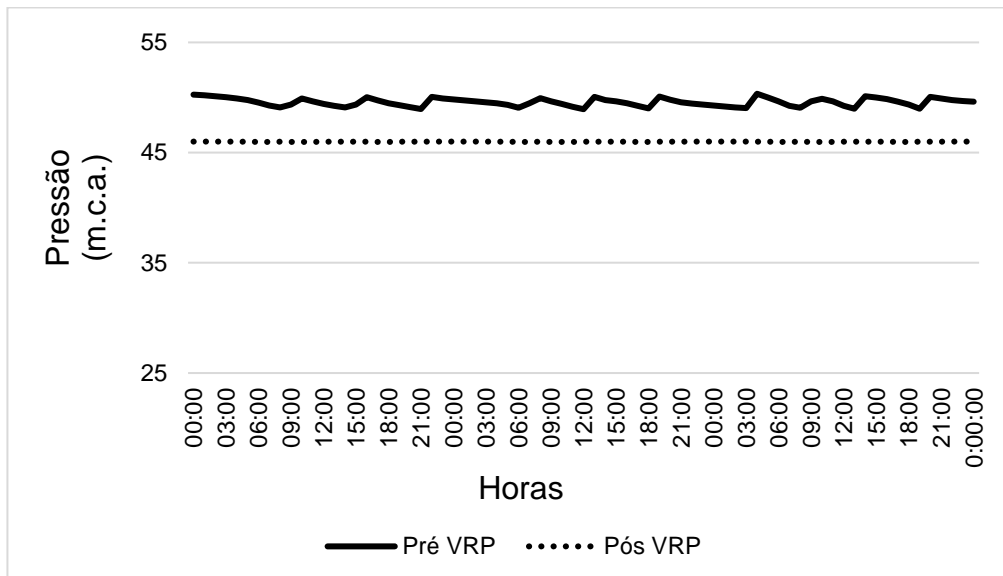
Porém também houve uma redução nos valores de pressão na ordem de 10% em relação aos picos ocorridos no cenário 2, cenário mais crítico.

Figura 35 – Pressão antes e após a instalação e operação da VRP3 no nó n32.



Fonte: Autor

Figura 36 – Pressão antes e após a instalação e operação da VRP3 no nó n34.

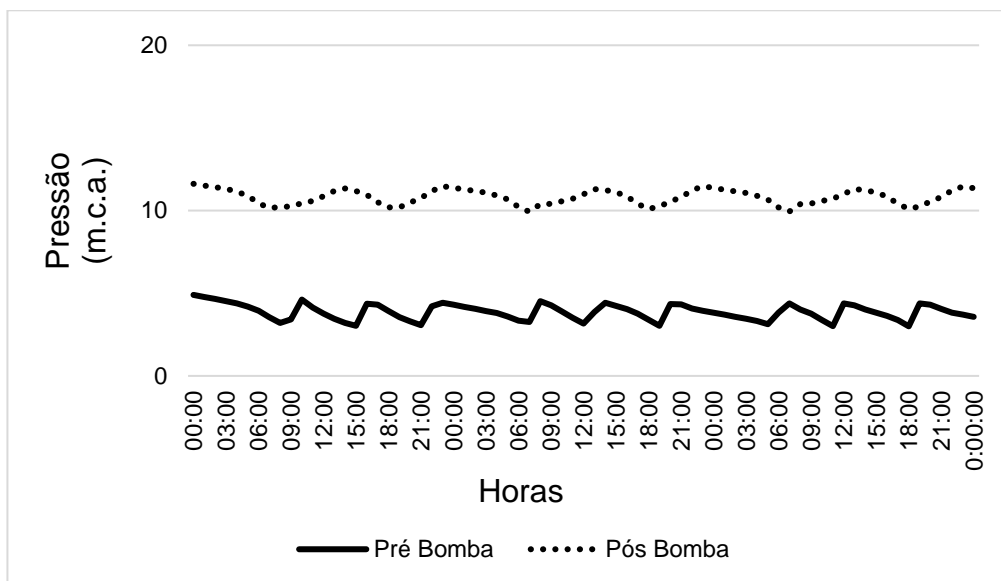


Fonte: Autor

4.3.1.6. Setor 5

No Setor 5 alterou-se o controle de funcionamento da bomba b2, diminuindo-se o tempo de operação. Sua velocidade foi aumentada para 93% em relação a velocidade atual, de maneira a melhor atender o pior ponto de pressão de toda a rede (nó n65), pertencente ao Setor 5. Os valores de pressão desse nó são apresentados na Figura 37.

Figura 37 – Pressão antes e depois da alteração no regime da bomba b2 no nó n65.



Fonte: Autor

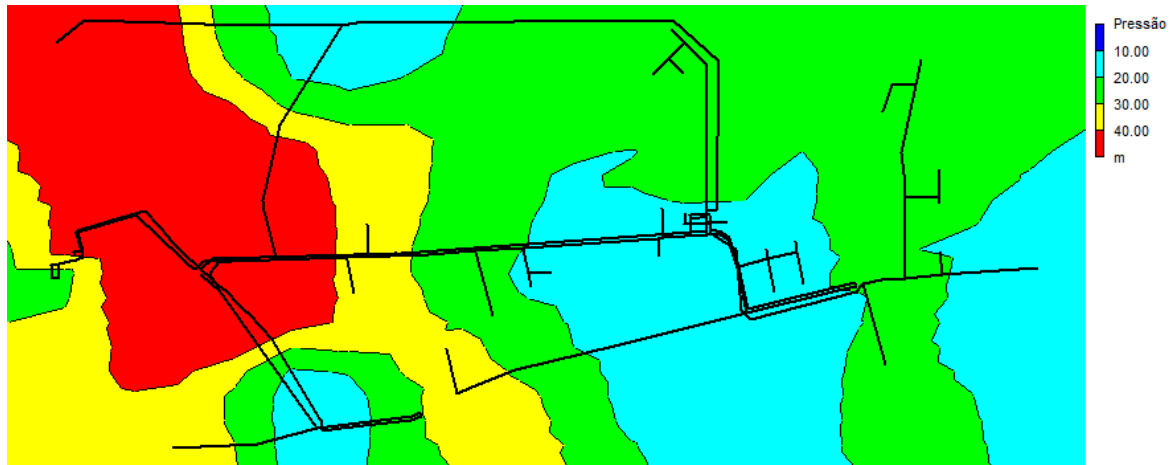
Com a alteração do regime de funcionamento da bomba b2, os limites mínimos da norma NBR 12.218 (ABNT, 2017) seriam atendidos satisfatoriamente em relação às pressões mínimas dinâmicas, garantindo o suprimento da demanda de maneira segura para os consumidores do setor.

4.3.1.7. Influência conjunta das alterações propostas na rede do sistema de abastecimento

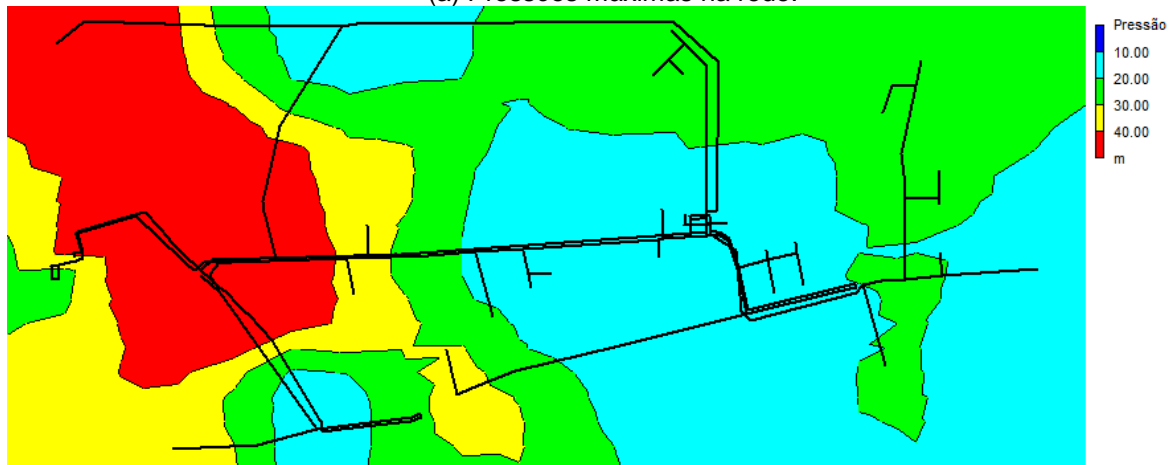
A rede foi simulada para as alterações propostas e utilizando-se os valores de consumo mínimo (cenário 2), situação na qual ocorrem as maiores pressões. Nas

Figuras 38(a) e 38(b) são apresentados os valores máximos e mínimos de pressão obtidos na rede.

Figura 38 – Pressões máximas (a) e mínimas (b) com as alterações propostas considerando o consumo mínimo.



(a) Pressões máximas na rede.



(b) Pressões mínimas na rede.

Fonte: Autor

Com as alterações propostas, os valores de pressão são substancialmente melhorados. Esse cenário apresenta o sistema em conformidade com a NBR 12.218 (ABNT, 2017) em sua quase totalidade. Apenas uma região (em vermelho) ainda apresentaria altos valores de pressão, que está relacionada a uma grande diferença de cotas entre o R8 e essa região.

Os valores de velocidade encontrados são inferiores ao mínimo indicado pela norma, porém a redução de diâmetros, anteriormente avaliada, não se mostrou eficaz para produzir um aumento de velocidade. Nesse sentido, tecnicamente o

sistema estaria bem dimensionado. Apesar disso, velocidades abaixo das indicadas podem, ao longo dos anos, gerar deposição de sedimentos na rede e, assim, ocasionar outros problemas, como a redução da seção escoada.

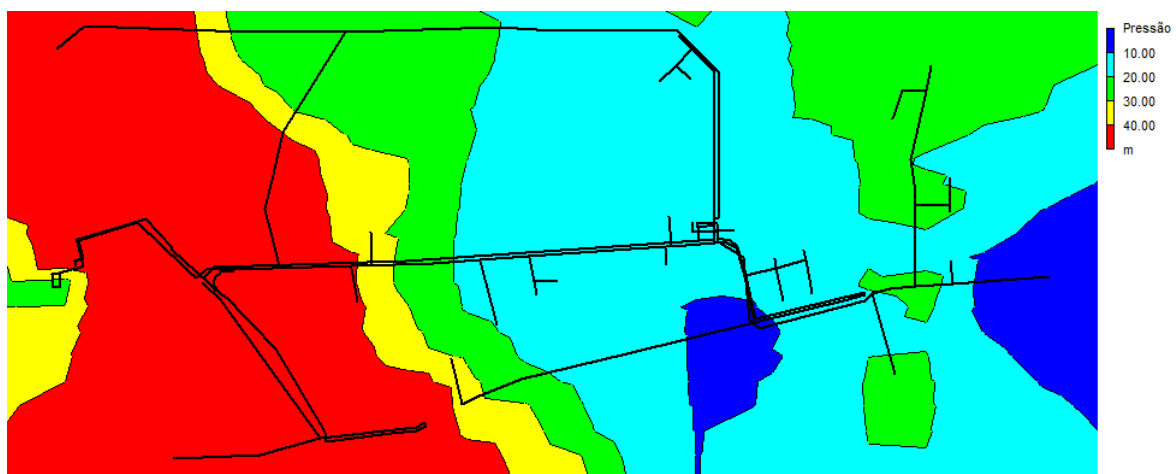
4.4. CONSUMO SUSTENTÁVEL – CENÁRIOS 3 E 4

Nas simulações com o aproveitamento de água da chuva e/ou reuso de águas cinzas, foi considerada uma vazão na entrada do sistema de $1,18 \text{ L.s}^{-1}$. Foram simulados dois cenários distintos: um cenário sem alteração em relação à rede atual (cenário 3) e um cenário com as alterações propostas (cenário 4). Como há uma diminuição de consumo, é esperado um aumento nos valores de pressão atuantes sobre a rede.

O cenário 3 apresenta a rede real sem as intervenções propostas, para o consumo sustentável. Os valores de pressões máximos e mínimos, observados para essa simulação, são apresentados na Figura 39(a) e 39(b).

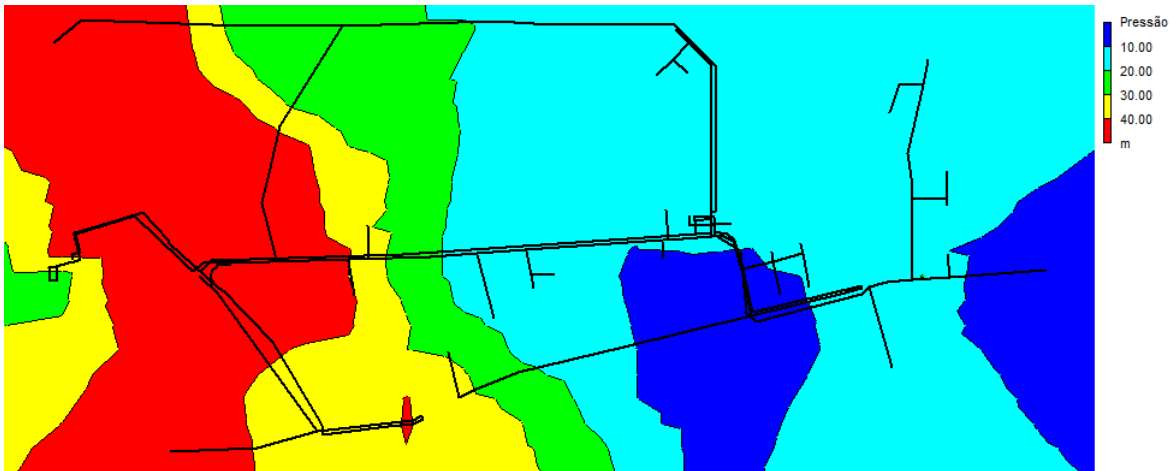
A implantação do cenário 3 levaria a valores de pressão levemente superiores aos apresentados nas simulações do cenário 2 (Figura 18(a) e 18(b)). Um aumento de 2% nos valores de pressão do setor 5 ocorreram durante o período de pressão máxima em relação ao cenário 2. No entanto, esse aumento não resultaria em uma melhora na região representada em azul escuro, uma vez que nessa as pressões são em média de $3,86 \pm 0,88 \text{ m.c.a.}$, ainda abaixo do valor mínimo de 100 kPa, exigido pela NBR 12.218 para as pressões dinâmicas da rede.

Figura 39 – Pressões máximas (a) e mínimas (b) no Cenário 3.



(a) Pressões máximas na rede.

Figura 39 - Pressões máximas (a) e mínimas (b) no Cenário 3.



(b) Pressões mínimas na rede.

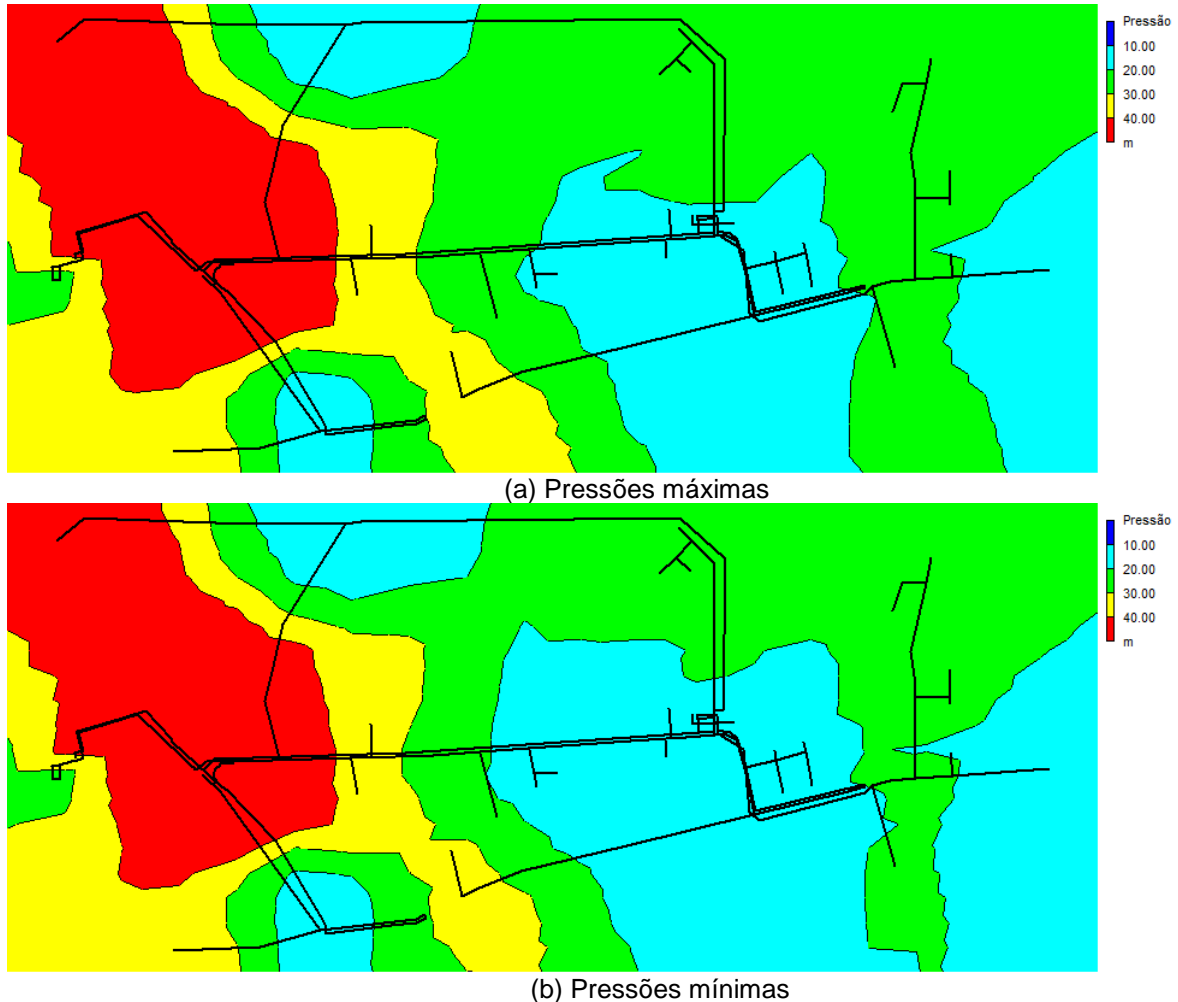
Fonte: Autor

O resultado das simulações do Cenário 4, para o consumo sustentável associado às alterações propostas na rede, é apresentado nas Figuras 40(a) e 40(b), apresenta semelhanças com os resultados mostrados nas Figuras 38(a) e 38(b), embora os valores de pressão estejam 1% maior.

Esse cenário também apresenta conformidade com a NBR 12.218 (ABNT, 2017) em sua quase totalidade, exceto pela região onde está posicionada a VRP1. Porém, mesmo que o valor máximo de pressão no Cenário 4 seja de 577,4 kPa (57,74 m.c.a.), ele é cerca de 23% menor que o valor máximo de pressão atuante no cenário 2, com consumo mínimo e sem alterações.

Nesse cenário, as simulações indicam que embora a rede continue apresentando valores abaixo do mínimo da norma, com apenas 6% dos trechos atingindo o valor mínimo de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ da NBR 12.218 (ABNT, 2017), no geral haveria um aumento de até 25% nos valores de velocidade de escoamento na rede em relação ao cenário 3, o que indicaria uma melhora na adequabilidade do sistema.

Figura 40 – Pressões máximas (a) e mínimas (b) no cenário 4 (consumo sustentável e alterações propostas para a rede).



Fonte: Autor

4.5. ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DAS ALTERAÇÕES PROPOSTAS

No regime de funcionamento atual de bombeamento, de acordo com informações da concessionária SGS, são gastos de cerca de R\$ 14,14 por dia em energia elétrica. Isso representa um custo ao longo do contrato de concessão (30 anos) de R\$ 122.169,90, sem considerar alterações tarifárias.

Nos cenários propostos, a alteração no regime de funcionamento das bombas b1 e b2, que influenciou o Setor 5, e adicionado ao custo energético para o

funcionamento da nova bomba b3, que influenciaria o Setor 2, causaria uma redução do gasto em energia elétrica, que passaria a ser de R\$ 12,79 por dia. O custo com energia ao longo do tempo de contrato de concessão com esse regime sugerido chegaria a R\$ 110.505,60, o que representa uma economia de R\$ 11.664,00.

A VRP1 instalada no Setor 1, considerando o custo de mão de obra e material (válvula, material de tubulação, caixas e acessórios), representou um investimento de R\$ 256.000,00. Como é sugerida a instalação de mais duas VRPs (Setor 3 e Setor 4), o investimento necessário seria de aproximadamente R\$ 512.000,00. A bomba b3, a ser instalada no Setor 2, poderia ser adquirida com valores entre R\$ 6.000,00 e R\$ 16.000,00, sem considerar a instalação.

Com a inclusão e operação das VRPs e um bombeamento mais eficiente e racional é esperada uma redução nas perdas de água, decorrente da diminuição da pressão à qual a rede está submetida.

No Setor 1, que já possui uma VRP posicionada, por exemplo, caso esta fosse colocada em funcionamento a perda de cerca de 28 mil litros de água (perda estimada como demonstrado no item 3.2.8.) poderia ser evitada mensalmente. De acordo com a tabela tarifária da SGS, 28 mil litros (ou 28 m³) poderiam retornar para a empresa como água revendida por no mínimo R\$ 4,25.m⁻³. Por ano, a concessionária poderia ter o retorno de R\$ 1.428,00 somente com a operação da VRP1. Os valores nos Setores 3 e 4 poderiam ser de até R\$ 165,24 e R\$ 307,53, respectivamente. Esses valores são menos expressivos que o valor de retorno do Setor 1 porque há uma menor redução da pressão nos Setores 3 e 4 (12% e 10%, respectivamente) em comparação com a redução de 31% dos valores de pressão no Setor 1.

4.6. DISCUSSÕES GERAIS

O trabalho com uma rede de distribuição real, a qual foi implantada sem a utilização de simulações hidráulicas apresenta alguns desafios, principalmente em relação ao atendimento dos limites estabelecidos pela NBR 12.218 (ABNT, 2017). A racionalização dos regimes de utilização das bombas do sistema, assim como a colocação de VRPs para evitar que certos pontos tivessem pressão acima do permitido pela norma vigente, foram as principais ferramentas testadas na simulação

hidráulica para o controle de pressão na rede. O investimento nesses acessórios pode, como visto no item 4.5, não ser financeiramente viável e não ter uma melhoria técnica que justifique uma intervenção imediata para a concessionária.

De acordo com a análise técnica financeira, vislumbrou-se que algumas intervenções seriam mais pertinentes, uma vez que trariam um retorno técnico e financeiro como: mudança no regime de operação da bomba b1 e b2 e início da operação da VRP1. Essas alterações não necessitam de nenhum investimento adicional e resultariam em ganhos imediatos.

A instalação e operação da bomba b3 não representaria um investimento tão expressivo, mas traria a adequabilidade técnica nos Setores 5. A aquisição e instalação das VRPs teriam um impacto financeiro significativo e o ganho técnico, embora existente, não seria o suficiente para justificar o investimento financeiro, dados os valores de retorno irrisórios que estas trariam.

Uma alternativa interessante ao trabalho realizado seria analisar se haveria golpe de aríete no sistema em virtude da adição da bomba, além de riscos adicionais. Caso isso ocorresse, seria necessária a introdução de outros dispositivos de proteção, o que trariam custos e afetaria o retorno do investimento da instalação da bomba.

Outro ponto a ser considerado é que, para investimentos substanciais, como em VRPs, o estudo de simulação hidráulica é de extrema importância e deveria ser ampliado para toda a rede existente. Dessa maneira, é interessante e sugerido que o estudo seja expandido para toda a rede, aumentando os dados trabalhados e identificando possíveis áreas com ganho maior tanto operacional quanto financeiro, para a implantação de cada proposta de alteração.

O estudo ampliado ainda levaria em conta o quanto a vida útil da tubulação poderia impactar as alterações a serem feitas. Durante a troca das tubulações que atingissem o limite, por exemplo, poderia ser realizada a gradual alteração de diâmetros de maneira a garantir que as velocidades fossem ligeiramente aumentadas também na rede completa.

Junto ao estudo, seria sugerido um melhor monitoramento das perdas, a realização da troca dos hidrômetros que já atingiram o limite da vida útil, o que

geraria dados mais confiáveis para a simulação e garantiria melhor análise das sugestões idealizadas.

5. CONCLUSÃO

O abastecimento de água é uma questão de imensa importância para a sociedade moderna. É cada vez mais difícil o abastecimento da população de maneira eficiente e econômica.

Além da dificuldade de levar água aos consumidores, é imprescindível também o cuidado com as perdas de água do sistema. Dessa maneira, é necessária a análise econômica do quanto o controle dessa perda é viável e desejável, assim como o monitoramento de quanto da perda que ocorre no sistema é perda real, e não erro de medição ou erro de cobrança.

Para o combate das perdas reais, as principais ferramentas disponíveis são o controle da pressão e o controle ativo dos vazamentos. O controle de pressão pode ser realizado através da utilização de equipamentos como bombas e VRPs, e através desse controle que se procura a racionalização de uma rede de abastecimento.

Para uma análise eficiente dos sistemas de abastecimento, a NBR 12.218 torna obrigatória a adoção do uso de simulações hidráulicas em novos projetos (ABNT, 2017), e o seu uso é um facilitador na tomada de decisões de operação de uma rede.

Nesse estudo, por meio da simulação foi possível analisar as consequências que acessórios introduzidos na rede, como novas válvulas redutoras de pressão e bombas gerariam ao sistema, além do impacto que o aproveitamento de água da chuva e/ou reuso causariam.

É necessário, porém, destacar a expressiva incerteza ao qual o estudo foi submetido, com valores assumidos de consumo nodal, padrão temporal de consumo e a consideração de rendimentos constantes das bombas inseridas na simulação.

Levando as incertezas em conta, a implementação do reuso de água e do aproveitamento de água da chuva na rede estudada resultaria em uma queda expressiva no consumo e essa queda, caso fosse real, deveria ser considerada pela concessionária para que fosse mantida a qualidade no serviço aos consumidores. Nas simulações de acessórios adicionados, os valores de pressão apresentaram melhora considerável, embora também resultem em uma diminuição dos valores de velocidade na rede.

Financeiramente, de forma direta, as alterações propostas não se justificam, em razão dos custos de implantação, sem um retorno significativo a curto prazo. No entanto, essas alterações, a longo prazo, podem trazer ganhos técnicos significativos, reduzindo as pressões e as perdas no sistema. Desse modo, uma análise mais detalhada e completa de todo o sistema, considerando também sua vida útil, poderia justificar a introdução dessas medidas analisadas ou outras alterações no sistema de abastecimento estudado que possam trazer um ganho técnico mais significativo.

Tais medidas possibilitariam o atendimento mais satisfatório dos consumidores, especialmente nas regiões que, atualmente, apresentam maiores limitações no recebimento da água distribuída e, por outro lado, gerariam ganhos para a concessionária, por meio de maior controle das perdas de água.

O uso da simulação hidráulica associada a avaliação financeira permitirá que as gestoras de sistemas de abastecimento elenquem suas prioridades, o que subsidiará a tomada de decisão de maneira a melhorar a operação da rede.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULSHAHEED, A.; MUSTAPHA, F.; GHAVAMIAN, A. A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.69, p.902-911, 2017.

ADACHI, S.; TAKAHASHI, S.; KURISU, H.; TADOKORO, H. Estimating area leakage in water networks based on hydraulic model and asset information. **Procedia Engineering**, v.89, p.278-285, 2014.

AL-JAYYOUSI, O. R. Greywater reuse: towards sustainable water management. **Desalination**, v.156, p.181-192, 2003.

ALEGRE, H.; BAPTISTA, J. M.; CABRERA JR., E.; CUBILLO, F.; DUARTE, P.; HIRNER, W.; MERKEL, W.; PARENA, R. **Performance indicators for water supply services**. London: International Water Association – IWA, 2000.

ALVISI, S.; FRANCHINI, M. A procedure for the design of district metered areas in water distribution systems. **Procedia Engineering**, v.70, p.41-50, 2014.

ARAÚJO, L. S.; RAMOS, H.; COELHO, T. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. **Water Resources Management**, v.20, p.133-149, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR12.211 – Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água**. 1992.

_____. **NBR12.218 – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. 2017.

_____. **NBR15.527 – Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis**. 2007.

BABEL, M. S.; ISLAM, M. S.; DAS GUPTA, A. Leakage management in a low pressure water distribution network of Bangkok. **Water Science & Technology: Water Supply**, v.9, n.2, p.141-147, 2009.

BAGGIO, M.; GALVÃO, A.; ROSITO, C. A.; TARDELLI, J.; AJZENBERG, M. **Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água: Diagnóstico, Potencial de Ganhos com sua Redução e Propostas de Medidas para o Combate**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2013.

BARROSO, L. B. **Estudo da minimização das perdas físicas em sistema de distribuição de água utilizando o modelo EPANET**. 2005. 112 p. Mestrado em Engenharia Civil. UFSM, Santa Maria, Brasil. 2005.

BENE, J. G.; SELEK, I.; HÖS, C. Neutral search technique for short term pump schedule optimization. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.136, p.133-137, 2010.

BI, W.; DANDY, G. C.; MAIER, H. R. Improved genetic algorithm optimization of water distribution system design by incorporating domain knowledge. **Environmental Modelling & Software**, v.69, p.370-381, 2015.

BOHÓRQUEZ, J.; SALDARRIAGA, J.; VALLEJO, D. Pumping pattern optimization in order to reduce WDS operation costs. **Procedia Engineering**, v.119, p.1069-1077, 2015.

BOLOGNESI, A.; BRAGALLI, C.; LENZI, C.; ARTINA, S. Energy efficiency optimization in water distribution systems. **Procedia Engineering**, v.70, p.181-190, 2014.

BRASIL. Lei n. 9.433 de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Brasileira de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Seção 1, p. 470.

CAMPBELL, E.; IZQUIERDO, J.; MONTALVO, I.; PÉREZ-GARCIA, R. A novel water supply network sectorization methodology based on a complete economic analysis, including uncertainties. **Water**, v.8, n.179, 2016.

CARRAVETTA, A.; ANTIPODI, L.; GOLIA, U.; FECAROTTA, O. Energy saving in a water supply network by coupling a pump and a pump as a turbine (PAT) in a turbopump. **Water**, v.9, n.62, 2017.

CASTRO, M. A. H.; COSTA, L. H. M. **Otimização de redes de distribuição de água usando a metodologia de Morgan e o EPANET**. IV Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa, Paraíba. 2004.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**. Rio de Janeiro, Eletrobrás. 2005.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS (COPASA). **Programa de Redução de Perdas de Água no Sistema de Distribuição**. 60 p. 2003.

CURITIBA. **Lei Municipal nº 10.785 de 18 de setembro de 2003** – Cria no município de Curitiba, o Programa de Conservação e Uso Racional da Água nas Edificações – PURAE. Curitiba: Prefeitura Municipal. 2003.

DE LA CRUZ, F. A.; JORDÁN, R. C.; ROCHERA, E. C.; ALEMANY, V. B. E. Graphical method to calculate the optimum replacement period for water meters. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.137, n.1, p.143-146, 2011.

DE MARCHIS, M.; MILICI, B.; VOLPE, R.; MESSINEO, A. Energy saving in water distribution network through pump as turbine generators: Economic and environmental analysis. **Energies**, v.9, p.877, 2016.

EKTESABI, M.; MORADI—MOTLAGH, A. H.; ABDEKHODAEI, A. H. Energy and sustainability through integrated water network management. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v.121, p.175-186, 2009.

FABRE, V. V.; PFITSCHER, E. D. **Relevância econômica da perda de água tratada: Análise dos dez maiores municípios produtores de Santa Catarina**. Revista de Contabilidade do Mestrado em Ciências Contábeis da UERJ. 16 (3), 65-80. 2011.

FARINA, G.; CREACO, E.; FRANCHINI, M. Using EPANET for modelling water distribution systems with users along the pipes. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v.31, n.1, p.36-50, 2014.

FECAROTTA, O.; ARICÒ, C.; CARRAVETTA, A.; MARTINO, R.; RAMOS, H. M. Hydropower potential in water distribution networks: Pressure control by PATs. **Water Resources Management**, v.29, p.699-714, 2015.

FERREOL, E. **How to measure and reduce the water meter park inefficiency?** Leakage 2005. Halifax, Canadá.

FLORES, R. A.; MENDES, R. L. R.; OLVEIRA, D. R. C.; COSTA, T. C. D.; VELOSO, N. S. L. Potencial de captação de água de chuva para abastecimento: o caso da cidade de Belém (PA, Brasil). **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v.8, n.2, p.69-80, 2012.

FLORIANÓPOLIS. **Lei Municipal nº 8.080 de 9 de novembro de 2009** – Institui Programa Municipal de Conservação, Uso Racional e Reuso da Água em Edificações e dá outras providências. Florianópolis: Prefeitura Municipal, 2009.

FONTANA, N.; GIUGNI, M.; PORTOLANO, D. Losses reduction and energy production in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.138, p.237-244, 2012.

GAMBOA-MEDINA, M. M.; REIS, L. F. R.; GUIDO, R. C. Feature extraction in pressure signals for leak detection in water networks. **Procedia Engineering**, v.70, p.688-697, 2014.

GANORKAR, R. A.; RODE, P. I.; DESHMUKH, S. A.; DHOBLE, R. M. Water audit – a tool for assessment of water losses. **International Journal of Computational Engineering Research**, v.3, n.3, p.252-256, 2013.

GHADDAR, B.; NAOUAM-SAWAYA, J.; KISHIMOTO, A.; TAHERI, N.; ECK, B. A Lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks. **European Journal of Operational Research**, v.241, n.2, p.490-501, 2015.

GHISI, E.; FERREIRA, D. F. Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. **Building and Environment**, v.42, p.2512-2522, 2007.

GIUSTOLISI, O.; LAUCELLI, D.; BERARDI, L. Operational optimization: Water losses versus energy costs. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.139, p.410-423, 2013.

GOMES, R.; MARQUES, A. S.; SOUSA, J. **Identification of the optimal entry points at district metered areas and implementation of pressure management.** *Urban Water Journal*, 9 (6), 365-384. 2012.

GONÇALVES, E.; ALVIM, P. R. A. **Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água – Pesquisa e combate a vazamentos não visíveis.** Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água – PNCDA. Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano. 89p. Brasília, 2007.

GOOGLE MAPS. **Bairros Bom Fim e Medianeira, São Gabriel – RS, Brasil.** 2018. Disponível em <https://www.google.com.br/maps/place/S%C3%A3o+Gabriel+-+RS,+97300-000/@-30.3464394,-54.2988397,1866m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x950148997f4ea8b9:0xdc6c3098f7eac58f!8m2!3d-30.3340579!4d-54.323014>Acesso em: 21 ago. 2018.

GREYVENSTEIN, B; VAN ZYL, J. E. An experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes. **Journal of Water Supply Research and Technology**, v.56, n.2, p.117-124, 2007.

HAMILTON, S.; MCKENZIE, R. **Water Management and Water Loss.** International Water Association. 2014.

HASHEMI, S. S.; TABESHI, M.; ATAEEKIA, B. Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable-speed pumps in water distribution networks. **Urban Water Journal**, v.11, n.5, p.335-347, 2013.

HENTGES, S. C. **Efeito de reservatório de aproveitamento de água da chuva sobre rede de drenagem pluvial.** 2013. 258p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM. 2013.

HUNAJDI, O. **Leakage management for water distribution infrastructure: Results of DMA experiments in Regina, SK.** Canada, National Research Council, 2010.

INSTITUTO TRATA BRASIL (ITB). **Perdas de água: Desafios ao avanço do saneamento básico e à Escassez Hídrica.** 2015.

ISHIDO, Y.; TAKAHASHI, S. A new indicator for real-time leak detection in water distribution networks: Design and simulation validation. **Procedia Engineering**, v.89, p.411-417, 2014.

KARATHANASI, I.; PAPAGEORGAKOPOULOS, C. Development of a leakage control system at the water supply network of the city of Patras. **Procedia Engineering**, v.162, p.553-558, 2016.

LAM, K. L.; KENWAY, S. J.; LANT, P. A. Energy use for water provision in cities. **Journal of Cleaner Production**, v.143, p.699-709, 2017.

LAMBERT, A. **What do we know about pressure:leakage relationships in distribution systems?** IWA Conference on System Approach in Leakage Control and Water Distribution Systems Management, 8p. 2001.

LAMBERT, A; MCKENZIE R. **Practical experience in using the infrastructure leakage index.** Proceedings of IWA Conference Leakage Management: A practical approach in Lemesos, Cyprus. 2002.

LIU, G.; ZHANG, Y.; KNIBBE, W.J.; FENG, C.; LIU, W.; MEDEMA, G.; VAN DER MEER, W. Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: A review. **Water Research**, v.116, p.135-148, 2017.

LOBEL, Fabrício. Principal aposta da Sabesp, redução de pressão pode contaminar água. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 20 jan. 2015. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2015/01/1577496-principal-aposta-da-sabesp-reducao-de-pressao-pode-contaminar-agua.shtml>>. Acesso em: 25 set. 2018.

LÓPEZ-IBAÑEZ, M.; PRASAD, T. D.; PAECHTER, B. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.134, n.4, p.337-346, 2008.

MAIA, A. G.; SANTOS, A. L.; OLIVEIRA, P. C. F. Avaliação da economia de água potável com a implantação de um Sistema de aproveitamento de água de chuva: estudo de caso no município de Irati, Paraná. **Ambiência**, v.7, n.1, p.51-63, 2011.

MALA-JETMAROVA, H.; SULTANOVA, N.; SAVIC, D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. **Environmental Modelling & Software**, v.93, p.209-254, 2017.

MARINGÁ. **Lei Municipal nº 6.345 de 15 de outubro de 2003** – Institui o Programa de Reaproveitamento de Águas de Maringá. Maringá: Prefeitura Municipal. 2003.

MAY, S. **Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações.** 2004. 189p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia) – USP. 2004.

MCCORMICK, G.; POWELL, R. Optimal pump scheduling in water supply systems with maximum demand charges. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.129, p.372-379, 2003.

MENKE, R.; ABRAHAM, E.; PARPAS, P.; STOIANOV, I. Demonstrating demand response from water distribution system through pump scheduling. **Applied Energy**, v.170, p.377-387, 2016.

MELLO, M.; PERTEL, M; SOUZA, F. P. Análise de viabilidade econômica: Um estudo de aproveitamento de água de chuva no Instituto Educational Paulo de Tarso – Campos, RJ. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharia**, v.4 n.8, p.31-50, 2014.

MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE. **Waterworks technologies in Japan**. Disponível em: < https://www.mhlw.go.jp/english/policy/health/water_supply/8.html>. Acesso em: 2 out. 2018.

MIRATS-TUR, J. M.; JARRIGE, P. A.; MESEGUER, J.; CEMBRANO, G. Leak detection and localization using models: field results. **Procedia Engineering**, v.70, p.1157-1165, 2014.

MOHAPATRA, S.; SARGAONKAR, A.; LABHASETWAR, P. K. Distribution network assessment using EPANET for intermittent and continuous water supply. **Water Resources Management**, v.28, p.3745-3759, 2014.

MONTELEONE M.C.; YEUNG H., SMITH R. A review of ancient Roman water supply exploring techniques of pressure reduction. **Water Science & Technology: Water Supply**, v.7 n.1, p.113-120, 2007.

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

MOREIRA, T. O. M. **Gestão de perdas em redes de abastecimento de água – assistida pelo simulador EPANET**. 2011. 201 p. Dissertação - Universidade do Porto, Portugal. 2011.

NASCIMENTO, T. V.; FERNANDES, L. L.; YOSHINO, G. H. Potencial de aproveitamento de água de chuva na Universidade Federal do Pará – Belém/PA. **Revista Monografias Ambientais – REMOA**, v.15, n.1, p.105-116, 2016.

NOTARO, V.; PULEO, V.; FONTANAZZA, C. M.; SAMBITO, M.; LA LOGGIA, G. A decision support tool for water and energy saving in the integrated water system. **Procedia Engineering**, v.119, p.1109-1118, 2015.

NUÑEZ, K. **Otimização energética da operação de um sistema adutor de água tratada utilizando algoritmos evolucionários multiobjectivo**. 2007. 147 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - UFMS. 2007.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Geração de energia**. Acesso em < http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>. Acessado em 20 set. 2018.

PARREIRAS, Mateus. Poços clandestinos sugam água do subsolo, comprometem abastecimento e elevam risco de contaminação. **Estado de Minas**, Belo Horizonte, 6 jul. 2015. Disponível em: < <https://www.em.com.br/app/noticia/especiais/guerra-da-agua/2015/07/06/noticia-especial-guerra-da-agua,665349/disputa-chega-ao-subsolo.shtml>>. Acesso em: 25 set. 2018.

PASHA, M. F. K.; LANSEY, K. **Optimal pump scheduling by linear programming**. World Environmental and Water Resources Congress, 2009.

PEREIRA, L. G.; ILHA, M. S. O. Avaliação da submedição de água em edificações residenciais unifamiliares: o caso das unidades de interesse social localizadas em Campinas, no estado de São Paulo. **Ambiente Construído**, v.8, n.2, p.7-21, 2008.

PERIUS, C. F. **Variáveis de projeto e sua influência no desempenho e dimensionamento de reservatórios de aproveitamento de água da chuva**. 2016. 133p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) - UFSM. 2016.

PETROULIAS, N.; FOUFEAS, D.; BOUGOULIA, E. Estimating water losses and assessing network management intervention scenarios: the case study of the water utility of the city of Drama in Greece. **Procedia Engineering**, v.162, p.559-567, 2016.

PILLOT, J.; CATEL, L.; RENAUD, E.; AUGÉARD, B.; ROUX, P. Up to what point is loss reduction environmentally friendly?: The LCA of loss reduction scenarios in drinking water networks. **Water Research**, v.104, p.231-241, 2016.

PORTELA, Marcelo. Ao menos 85% dos poços artesianos do País são clandestinos. **Estadão**, São Paulo. 15 out. 2014. Disponível em <<https://sao-paulo.estadao.com.br/noticias/geral,ao-menos-85-dos-pocos-artesianos-do-pais-sao-clandestinos,1577425>>. Acesso em: 25 set. 2018.

RÍOS, J. C.; SANTOS-TELLEZ, R. U.; HANSEN, P. R.; LEYVA, E. A.; MARTÍNEZ, V. N. Methodology for the identification of apparent losses in water distribution networks. **Procedia Engineering**, v.70, p.238-247, 2014.

RIZZO, A.; MICALLEF, G.; PACE, R.; RIOLO, S.; ST.JOHN, S.G.; VERMESCH, M. **Apparent Water Loss Control: The Way Forward**. IWA Water21 Journal, 2007.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 users manual**. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.

SALA, D.; KOLAKOWSKI, P. Detection of leaks in a small-scale water distribution network based on pressure data – experimental verification. **Procedia Engineering**, v.70, p.1460-1469, 2014.

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

SARBU, I. A study of energy optimisation of urban water distribution systems using potential elements. **Water**, v.8, p.593, 2016.

SCIBETTA, M.; BOANO, F.; REVELLI, R.; RIDOLFI, L. Community detection as a tool for district metered areas identification. **Procedia Engineering**, v.70, p.1518-1523, 2014.

SIGNORETI, R. O.; CAMARGO, R. Z.; CANNO, L. M.; PIRES, M. S. G.; RIBEIRO, L. C. L. J. **Importance of pressure reducing valves (PRVs) in water supply networks**. Journal of Physics: Conference Series, p.738, 2016.

SINAGRA, M.; SAMMARTANO, V.; MORREALE, G.; TUCCIARELLI, T. A new device for pressure control and energy recovery in water distribution networks. **Water**, v.9, p.309, 2017.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. 2016.

SOARES, A. K.; COVAS, D. I. C.; REIS, L. F. R. Leak detection by inverse transient analysis in an experimental PVC pipe system. **Journal of Hydroinformatics**, v.13 n.2, p.153-166, 2011.

TARDELLI, J.; DA COSTA, A. J. M.; BÁGGIO, M. A.; MACHADO, R. R. **Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 99 p. 2015.

TASSI, R. **Efeito dos microrreservatórios de lote sobre a macrodrenagem urbana**. 2002. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. 2002.

TESTON, A. **Impacto do aproveitamento de água da chuva na drenagem: Estudo de caso de um condomínio horizontal em Curitiba/PR**. 2015. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil. 2015.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3ª edição, São Paulo. 643p. 2006.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA. **EPANET 2.0 – Manual do Usuário**. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. 2006.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. **Manual EpaCAD v1.0**. ITA. 2009.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Water audits and water loss control for public water systems**. 7p. 2013.

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.

VILAS-BOAS, P. R. **Modelação de uma rede de distribuição de água**. 2008. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica) - Universidade do Porto, Portugal. 2008.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 Update and SDG Baselines**. Geneva: World Health Organization (WHO) and the United Nations Children's Fund (UNICEF), 2017.

WRIGHT, R.; ABRAHAM, E.; PARPAS, P.; STOIANOV, I. Control of water distribution networks with dynamic DMA topology using strictly feasible convex programming. **Water Resources Research**, v.51, p.9925-9941, 2015.

WU, P.; LAI, Z.; WU, D.; WANG, L. Optimization research of parallel pump system for improving energy efficiency. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.141, n.8, 04014094. 2015.

YEE, M. D. Economic analysis for replacing residential meters. **American Water Works Association Journal**, v.91, n.7, p.72-77, 1999.

ZAN, T. T. T.; LIM, H. B.; WONG, K. J.; WHITTLE, A. J.; LEE, B. S. Event detection and localization in urban water distribution network. **IEEE Sensors Journal**, v.14, n.12, p.4134-4142, 2014.

ZHENG, F.; ZECCHIN, A. C.; SIMPSON, A. R. Investigating the run-time searching behavior of the differential evolution algorithm applied to water distribution system optimization. **Environmental Modelling & Software**, v.69, p.292-307, 2015.