

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ISABELLA FILLUS

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE UMA REDE DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM USO DO SOFTWARE EPANET 2.0**

GUARAPUAVA

2021

ISABELLA FILLUS

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE UMA REDE DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM USO DO SOFTWARE EPANET 2.0**

**Evaluation of the operating conditions of a water supply network using the
EPANET 2.0 software**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Joice Cristini Kuritza.
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a. Mariane Kempka

GUARAPUAVA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ISABELLA FILLUS

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE UMA REDE DE
ABASTECIMENTO COM USO DO SOFTWARE EPANET 2.0**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 30/novembro/2021

Joice Cristini Kuritza
Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Mauricio Dai Pra
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Tiago Neumann Kuk
Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental
Faculdades Guarapuava

Mariane Kempka
Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha irmã, Gisella Fillus, pelos conselhos e por todas as vezes que leu esta monografia.

Agradeço aos meus pais, Maria Luci Huzek Fillus e Ivo Fillus, por todo apoio e por terem me incentivado a seguir meus sonhos.

A todos meus amigos, especialmente para o Mateus Blanski, a Melissa Moreira e o Eduardo Ricieri Fiorentin, que estão comigo desde o início da faculdade.

Agradeço a minha orientadora, a Prof.^a Dr.^a Joice Cristini Kuritza, pelos conselhos. Agradeço também a Prof.^a Dr.^a Mariane Kempka por toda ajuda na simulação hidráulica.

Agradeço a equipe de estudo do Sistema de Abastecimento de Água (SAA), que me ajudaram em diversos momentos.

Agradeço a Companhia de Saneamento, por ter disponibilizado os dados e todo o apoio para a realização da pesquisa, mediante Acordo de Cooperação.

RESUMO

Com o crescimento das cidades e conseqüente aumento do consumo de água e de energia elétrica se faz necessário o aprimoramento de projetos e da operação das diferentes unidades que compõe os sistemas de abastecimento de água. Em relação às redes de distribuição de água, pode-se avaliar seu dimensionamento e funcionamento, com proposição de possíveis melhorias, a partir da simulação hidráulica desenvolvida em softwares como o EPANET 2.0. Neste trabalho, foi desenvolvida a simulação hidráulica de uma rede de distribuição que faz parte de um subsistema de abastecimento de água com captação subterrânea, com o objetivo de avaliar a variação dos níveis do reservatório, de modo que a rede atenda as condições de pressões determinadas pela NBR 12218 (ABNT, 2017). Atualmente, a variação de nível de operação do reservatório é de 45 cm, e o conjunto motobomba permanece ligado entre 16 e 18 horas por dia. Para análise das pressões na rede de distribuição, foram realizadas diversas simulações variando o nível do reservatório, onde o sistema de bombeamento foi programado para acionar quando atingisse o nível mínimo e desligar quando atingisse o nível máximo. Com isso, foi determinado que o nível mínimo, nos dias em que o reservatório atende apenas a rede de distribuição diretamente associada a ele foi de 2,1 m, o que representa uma variação de nível de operação de 1,47 m, situação em que a bomba permanece ligada por 14 horas. Já nos dias em que há exportação de água do reservatório em estudo para outro subsistema do SAA do município, o nível mínimo passou para 2,3 m e o funcionamento da bomba ocorreu por 16 horas. Em ambas as simulações, foram programados controles para que o sistema de bombeamento não operasse nos horários de ponta, em que o custo da energia é maior, resultando em uma diminuição de 2 horas de funcionamento com relação a operação atual.

Palavras-chave: abastecimento de água; simulação; otimização.

ABSTRACT

With the growth of cities and consequent increase in water and electricity consumption, it is necessary to improve projects and the operation of the different units that make up the water supply systems. In relation to the water distribution networks, its dimensioning and functioning can be evaluated, with the proposal of possible improvements, based on the hydraulic simulation developed in software such as EPANET 2.0. In this work, a hydraulic simulation of a distribution network that is part of a water supply subsystem with underground catchment was developed, with the objective of evaluating the variation in reservoir levels, so that the network meets the conditions of determined pressures by NBR 12218 (ABNT, 2017). Currently, the operating level variation of the reservoir is 45 centimeters, and the pump set remains on between 16 and 18 hours a day. To analyze the pressure in the distribution network, several simulations were carried out, varying the level of the reservoir, where the pumping system was programmed to turn on when it reached the minimum level and turn off when it reached the maximum level. Thus, it was determined that the minimum level, on days when the reservoir only serves the distribution network directly associated with it, was 2.1 meters, which represents an operating level variation of 1.47 meters, situation where the pump remains on for 14 hours. On the days when water is exported from the reservoir under study to another water supply subsystem in the municipality, the minimum level rose to 2.3 meters and the pump operated for 16 hours. In both simulations, controls were programmed so that the pumping system would not operate during peak hours, when the energy cost is higher, resulting in a reduction of 2 hours of operation in relation to the current operation.

Keywords: water supply; simulation; optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de sistema de abastecimento de água.....	18
Figura 2 – Representação gráfica das transformações de energia em uma bomba	20
Figura 3 – Posições dos reservatórios em relação a cota do terreno	21
Figura 4 – Exemplo de rede ramificada	22
Figura 5 – Exemplo de rede malhada	23
Figura 6 – Descrição do reservatório em faixas de controle.....	27
Figura 7 – Sistema de captação subterrânea	34
Figura 8 – Detalhamento da captação subterrânea.....	35
Figura 9 – Volume e nível de água no reservatório apoiado, sem exportação de água.....	37
Figura 10 – Volume e nível de água no reservatório apoiado, com exportação de água.....	37
Figura 11 – Consumo médio adimensionalizado	38
Figura 12 – Subsistema do SAA estudado.....	39
Figura 13 – Subsistema abastecido pelo poço.....	40
Figura 14 – Curvas topográficas.....	41
Figura 15 – Cota nos nós.....	42
Figura 16 – Dados das tubulações	43
Figura 17 – Diâmetros das tubulações	44
Figura 18 – Projeto EPANET	46
Figura 19 – Curva da bomba	47
Figura 20 – Padrão de consumo	49
Figura 21 – Variação do consumo nos nós	49
Figura 22 – Controle programado para a condição atual	50
Figura 23 – Controle programado para determinar o nível mínimo do reservatório.....	51
Figura 24 – Localização do grande consumidor	53
Figura 25 – Controle programado para a bomba desligar no horário de ponta	54
Figura 26 – Pressão nos nós às 4 horas sem o <i>booster</i>	56
Figura 27 – Pressão nos nós às 4 horas sem o <i>booster</i>	57
Figura 28 – Área abastecida pelo <i>booster</i>	58
Figura 29 – Localização do <i>booster</i>	59
Figura 30 – Carga hidráulica no reservatório, condição atual sem exportação	60
Figura 31 – Vazão na bomba, condição atual sem exportação	60
Figura 32 – Carga hidráulica no reservatório, condição atual com exportação	61
Figura 33 – Vazão na bomba, condição atual com exportação.....	61
Figura 34 – Controle programado do nível mínimo do reservatório sem exportação	62
Figura 35 – Pressão nos nós sem exportação às 4 horas	63
Figura 36 – Pressão nos nós sem exportação às 14 horas	64
Figura 37 – Carga hidráulica no reservatório sem exportação	65
Figura 38 – Vazão na bomba sem exportação	65
Figura 39 – Vazão nas tubulações sem exportação.....	66
Figura 40 – Perda de carga nas tubulações sem exportação	67
Figura 41 – Níveis de operação do reservatório para dias sem exportação	68

Figura 42 – Controle programado, nível mínimo do reservatório com exportação	68
Figura 43 – Pressão nos nós com exportação às 4 horas	69
Figura 44 – Pressão nos nós com exportação às 14 horas.....	70
Figura 45 – Carga hidráulica no reservatório com exportação	71
Figura 46 – Vazão na bomba com exportação	71
Figura 47 – Controle programado para desligar a bomba no horário de ponta, simulação com exportação	72
Figura 48 – Carga hidráulica no reservatório com exportação, sem bombear no horário de ponta	72
Figura 49 – Vazão na bomba com exportação, sem funcionar no horário de ponta	73
Figura 50 – Vazão nas tubulações às 14 horas, simulação com exportação.....	74
Figura 51 – Perda de carga nas tubulações às 14 horas, simulação com exportação	75
Figura 52 – Níveis do reservatório para dias com exportação	76
Figura 53 – Comparativo dos resultados obtidos na condição atual do sistema	77
Figura 54 – Comparativo dos resultados obtidos na nova condição	77
Figura 55 – Comparativo dos resultados obtidos na variação do consumo	78
Quadro 1 – Comparativos entre programas de modelagem hidráulica.....	31
Quadro 2 – Profundidade e diâmetro do poço	34
Quadro 3 – Características do conjunto motobomba submerso	35
Quadro 4 – Dados do reservatório	36
Quadro 5 – Rugosidade dos materiais	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados para curva da bomba	47
Tabela 2 – Consumo adimensional.....	48
Tabela 3 – Aumento percentual do consumo	54
Tabela 4 – Simulação da variação do consumo	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CV	Válvula de Retenção
DN	Diâmetro Nominal
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
FoFo	Ferro Fundido
NBR	Normas Brasileiras
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PNCDA	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PVC	Policloreto de Vinila
RNF	Reservatório de Nível Fixo
RNV	Reservatório de Nível Variável
RPVC	Plástico reforçado com fibra de vidro e PVC
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VRP	Válvula Redutora de Pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
C	Coefficiente da fórmula de Hazen-Williams
cm	Centímetros
cv	Cavalo vapor
d	Diâmetro da tubulação
h	Horas
H	Altura manométrica
HP	Horse power
Hz	Hertz
l	Comprimento da tubulação
L	Litros
LPS	Litros por segundo
m	Metros
m ²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
mca	Metros de coluna de água
min	Minutos
mm	Milímetros
N	Rotação do motor
ND	Nível Dinâmico
P	Perda de carga
Pot	Potência
Q	Vazão
rpm	Rotação por minuto
s	Segundos
v	Velocidade
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Principal	16
2.2	Objetivos Secundários	16
3	SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	17
3.1	Mananciais	18
3.2	Estação elevatória	19
3.3	Estação de tratamento de água	20
3.4	Reservatórios	21
3.5	Rede de distribuição	21
3.6	Operação de sistemas de abastecimento de água	23
3.6.1	Otimização da estação elevatória.....	24
3.6.2	Operação do reservatório superior	26
3.6.3	Condições hidráulicas da rede de abastecimento	28
4	METODOLOGIA	33
4.1	Caracterização do subsistema de captação subterrânea	33
4.2	Simulação hidráulica	38
4.2.1	Inserção de dados no software EPANET 2.0	38
4.2.2	Simulação em condição atual de funcionamento	50
4.2.3	Simulação para determinar o nível mínimo do reservatório	50
4.2.4	Simulação hidráulica com exportação de água	52
4.2.5	Simulação para desligamento da bomba em horário de ponta	53
4.2.6	Simulação com aumento de consumo na rede	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	Inserção do <i>booster</i>	55
5.2	Análise da simulação em condição atual de funcionamento	59
5.2.1	Simulação sem exportação de água	59
5.2.2	Simulação com exportação de água	60
5.3	Análise da simulação hidráulica sem exportação de água	62
5.4	Análise da simulação hidráulica com exportação de água	68
5.5	Simulação variando o consumo na rede de distribuição	76
5.6	Comparativo dos resultados das simulações	77
	CONCLUSÃO	79

REFERÊNCIAS.....	81
------------------	----

1 INTRODUÇÃO

As necessidades de água potável possuem crescimento adjacente ao crescimento populacional e das atividades econômicas. Para o atendimento dessas necessidades, é fundamental um bom sistema de abastecimento de água, que é composto por um conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados ao abastecimento de água de uma comunidade (TSUTIYA, 2006). Além disso, de acordo com Widiarti (2020), o desenvolvimento e a gestão dos recursos hídricos podem ser denominados como fundamentos da vida humana.

Sistemas de abastecimento de água são compostos por um manancial, que pode ser superficial ou subterrâneo, pela captação, que extrai a água do manancial, tornando-a disponível para o transporte, realizado pela adutora. Além disso, possui as estações elevatórias que vencem os desníveis geométricos e as perdas de carga e, o tratamento, responsável pela potabilidade da água, que fica armazenada em reservatórios, que realizam a compensação entre vazão de produção e vazão de consumo. Por fim, tem-se a rede de distribuição, que são as canalizações responsáveis pela distribuição de água até as residências e estabelecimentos (HELLER, 2010).

As redes de distribuição, de acordo com a Fundação Nacional da Saúde (FUNASA, 2017), devem distribuir água de forma contínua e com pressões adequadas. Deste modo, a NBR 12218 (ABNT, 2017) recomenda que a pressão dinâmica não deve ser menor que 10 mca em nenhum ponto da rede. Já para pressão estática, a norma define que não deve ultrapassar 50 mca.

Nesse contexto, Souza (2019) destaca a importância dos modelos de simulação hidráulica na fase de projeto e operação de redes de distribuição, especialmente para compreender o funcionamento e corrigir eventuais inconsistências do sistema de distribuição de água.

Diversos pesquisadores têm utilizado modelos de simulação hidráulica para avaliar o projeto e a operação de redes de distribuição. Dentre eles, destaca-se Widiarti (2020), que garantiu bons resultados utilizando o software EPANET como ferramenta de análise de sistemas de distribuição de redes de dutos, onde realizou análises com relação a uma ampliação na rede já existente e considerou a projeção das necessidades de água potável. Com o auxílio do software, realizou a análise de

pressões nas tubulações e conseguiu determinar o melhor método para o desenvolvimento do sistema de abastecimento de água.

Deste modo, o trabalho visa a verificação das condições hidráulicas de operação da rede de distribuição de água, que compõe o subsistema de captação subterrânea, de uma cidade na região central do Paraná. O subsistema é formado pela captação de água em um poço tubular, bomba hidráulica submersa e reservatório superior do tipo apoiado, a partir do qual a água é distribuída por gravidade para a rede. O estudo foi desenvolvido através da parceria com a Companhia de Saneamento, que forneceu os dados necessários para a realização da simulação hidráulica no software EPANET 2.0.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é avaliar as condições operacionais de uma rede de abastecimento de água a partir da modelagem hidráulica da rede.

2.2 Objetivos Secundários

E os objetivos secundários são:

- desenvolver o modelo hidráulico da rede de abastecimento em software de simulação hidráulica;
- avaliar o efeito nas pressões da rede a partir da variação do desnível operacional do reservatório apoiado que abastece a rede;
- avaliar a variação do desnível operacional do reservatório a partir do aumento percentual do consumo na rede de distribuição.

3 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

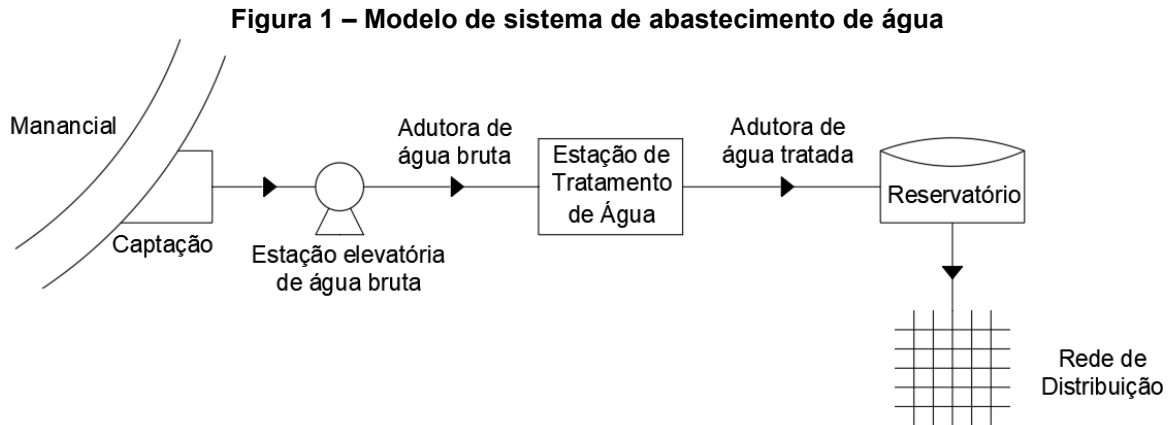
De acordo com Heller (2010), o abastecimento de água é um serviço necessário a saúde humana que faz parte do conjunto de elementos que compõe o saneamento básico, somado ao esgotamento sanitário, drenagem de águas pluviais, gestão de resíduos sólidos e controle de vetores. A operação dos sistemas de abastecimento deve garantir água em quantidade suficiente e qualidade adequada para o consumo da população.

Com o desenvolvimento das sociedades e a crescente demanda por água, pode-se enfatizar a importância da qualidade da água, especialmente relacionada ao uso ao qual ela se destina, visando a proteção da saúde humana e, também, adequação aos padrões de potabilidade, quando se trata de abastecimento humano. A água encontra-se limitada no planeta e pode ser encontrada de diversas formas na natureza, em mananciais superficial ou subterrâneo, com disponibilidade bastante variada conforme a localidade. Para alguns usos, torna-se necessário o tratamento de água, que ocorre nas estações de tratamento de água por meio de diversas etapas (HELLER, 2010).

De acordo com a NBR12211:1989, para a concepção de sistemas públicos de abastecimento de água deve-se realizar um estudo de concepção, que leva em consideração a população residente e temporária que será abastecida, as atividades necessárias e a configuração topográfica da região.

Sistemas de abastecimento de água (SAA) são compostos por um manancial, que pode ser superficial ou subterrâneo, pela captação, que extrai a água tornando-a disponível para o transporte, realizado pela adutora. Além disso, possui as estações elevatórias que vencem os desníveis geométricos da localidade e o tratamento, responsável pela potabilidade da água. A água tratada fica armazenada em reservatórios que realizam a regularização da vazão de produção frente às variações de consumo. Por fim, tem-se a rede de distribuição que são as canalizações responsáveis pela distribuição de água até o consumidor final (HELLER, 2010).

Na Figura 1 é apresentado um modelo simplificado da infraestrutura de um sistema de abastecimento de água.



Fonte: adaptado de Silva (2019)

Os sistemas públicos de abastecimento de água apresentam modo operacional complexo em função da grande distribuição geográfica. O crescimento urbano desordenado obriga as companhias de saneamento a incrementarem seus sistemas para atender as demandas, assim, o planejamento tem grande importância para as futuras manutenções. Deste modo, o gerenciamento das pressões e um plano de pesquisa de vazamentos são procedimentos importantes para a redução de perdas hídricas no sistema de abastecimento (SILVA, 2019).

3.1 Mananciais

O manancial é a fonte de água e pode ser superficial, com ou sem acumulação, subterrâneo, freático ou confinado, e águas pluviais. Para a escolha do manancial é importante que haja condições sanitárias adequadas e vazão suficiente para atender a demanda prevista em projeto (ABNT, 1989).

Em alguns sistemas, há a necessidade de utilizar mais de um manancial para atender a demanda, assim considera-se o aspecto econômico de operação e manutenção dos equipamentos para determinar um dos mananciais como prioritário. Com o crescente aumento do consumo de água, torna-se necessário o uso cada vez mais intenso dos recursos hídricos subterrâneos, mas deve-se verificar a superexploração, onde as taxas de bombeamentos são consideradas insustentáveis, superiores a recarga natural no manancial. Deste modo, pode acarretar consequências como redução dos níveis do lençol freático, da produtividade e do escoamento de base (HELLER, 2010).

Chaves *et al.* (2020) afirma que, para a adequação do fornecimento de água em qualidade e quantidade suficiente deve-se estabelecer um monitoramento contínuo das águas que são fonte de abastecimento.

Os mananciais subterrâneos podem ser considerados recursos estratégicos, já que seu abastecimento não está tão sujeito às condições climáticas, não sendo significativamente afetado pela variabilidade sazonal. Como requer áreas limitadas, a captação subterrânea não compromete as outras formas de uso do solo. Além disso, as águas subterrâneas geralmente possuem características compatíveis com o padrão de potabilidade, excetuando-se os casos em que há poluição no manancial, gerada pela percolação de água contaminada pelo solo. Assim, quando não se encontram poluídas, no que se refere aos custos, dispensam investimentos em grande escala, apesar da necessidade de bombeamento (HELLER, 2010).

De acordo com Lima *et al.* (2018), a infraestrutura necessária para o uso de mananciais subterrâneos é menor que para superficiais. Já que, a perfuração do poço pode ser realizada mais próxima a estação de tratamento de água, o que gera economia no custo das adutoras. Além disso, a perfuração de poços é mais barata e mais rápida que a construção de pequenas barragens ou estruturas hidráulicas para a captação de água em um corpo hídrico. Para localidades com menor população, de maneira geral, o uso de manancial subterrâneo se mostrou mais atraente e para localidades maiores o manancial superficial é mais satisfatório (LIMA *et al.*, 2018).

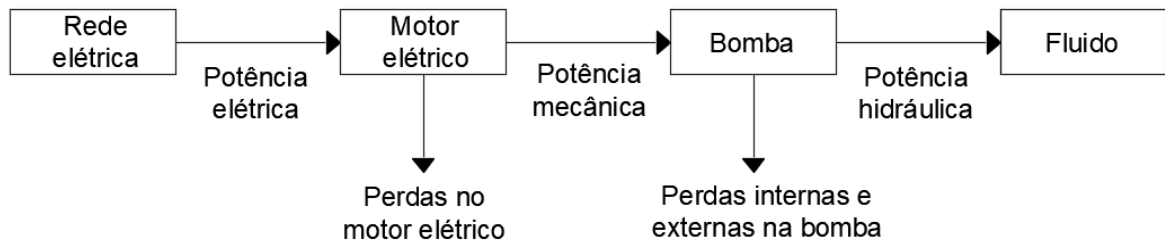
3.2 Estação elevatória

A estação elevatória é o conjunto de tubulações, acessórios, bombas e motores, que possuem a finalidade de vencer os desníveis geométricos ou fornecer carga piezométrica ao sistema. De acordo com Lacerda (2009), as instalações de bombeamento realizam o transporte de água a pontos mais distantes ou mais elevados, realizando o aumento da vazão nas adutoras e a alimentação direta das redes de distribuição.

O projeto de estações elevatórias, de acordo com a NBR 12214:1992, é realizado a partir da determinação das vazões de projeto. As bombas hidráulicas são responsáveis por mover os fluidos através de tubulações pressurizadas, assim, convertem a energia mecânica recebida de um motor em energia hidráulica, sendo utilizados predominantemente os motores elétricos. A Figura 2 apresenta a

transformação da potência desde a rede elétrica até o fluido, bem como as perdas que ocorrem neste processo (GOMES; CARVALHO, 2012).

Figura 2 - Representação gráfica das transformações de energia em uma bomba



Fonte: adaptado de Gomes e Carvalho (2012)

De acordo com Pedrosa (2019), os conjuntos elevatórios são necessários para transportar a água através dos sistemas e garantem o abastecimento de água. São responsáveis por grande consumo de energia elétrica, o que dificulta o equilíbrio financeiro das empresas de saneamento.

Segundo Gomes e Carvalho (2012), os conjuntos elevatórios são responsáveis pelo consumo de 90% da energia total consumida no sistema de abastecimento de água. Com isso, as ações de eficiência energética em sistemas de abastecimento de água têm como foco o estudo da estação elevatória.

3.3 Estação de tratamento de água

De acordo com Ferreira (2017), o processo de tratamento de água é um conjunto de manipulações para que esta possa ser considerada potável para abastecimento público, ou seja, para que atenda os padrões de qualidade definidos pelas agências reguladoras.

A NBR 12216:1992, define que as estações de tratamento de água devem possuir laboratórios com a função de controlar a eficiência do tratamento, ou seja, realizar ensaios físicos, químicos e bacteriológicos.

Lacerda (2009) afirma que o tratamento de água realiza melhorias das características qualitativas da água, que algumas vezes não são percebidas pelos sentidos, como sabor e cheiro, a fim de tornar a água própria para consumo.

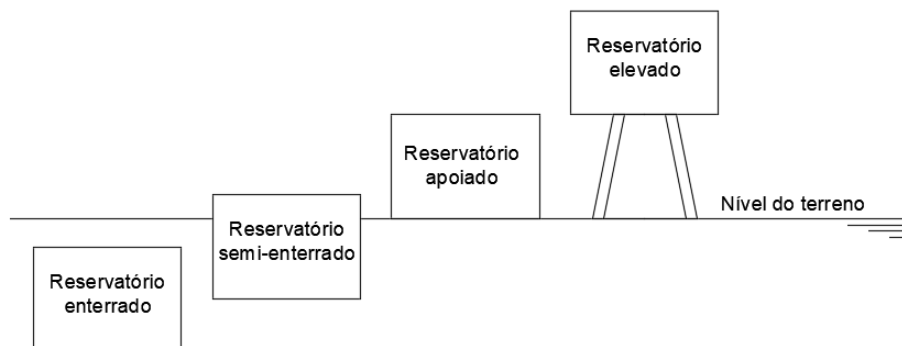
3.4 Reservatórios

Os reservatórios de distribuição, de acordo com a NBR 12217:1994, são responsáveis pela regularização das variações entre as vazões de adução e de distribuição e pelo condicionamento das pressões na rede. Com isso, os reservatórios elevados tem como função principal condicionar as pressões nas áreas de cotas topográficas mais altas.

Os reservatórios de montante sempre fornecem água a rede de distribuição e os reservatórios de jusante podem fornecer ou receber água da rede (NBR 12217:1994).

Os reservatórios, de acordo com Francato (2002), devem estar situados de maneira em que a água possa ser distribuída por gravidade aos pontos de consumo, sendo apresentados de diversas formas geométricas e podem ser elevados, enterrados, semi-enterrados ou apoiados sobre o terreno, como representado na Figura 3.

Figura 3 – Posições dos reservatórios em relação a cota do terreno



Fonte: adaptado de Tsutiya (2006)

A localização do reservatório no sistema pode ser a montante, quando é o responsável por fornecer água a rede de distribuição ou a jusante, quando o reservatório recolhe a água excedente de horários com menor consumo e auxilia no abastecimento em horas de maior consumo (TSUTIYA, 2006).

3.5 Rede de distribuição

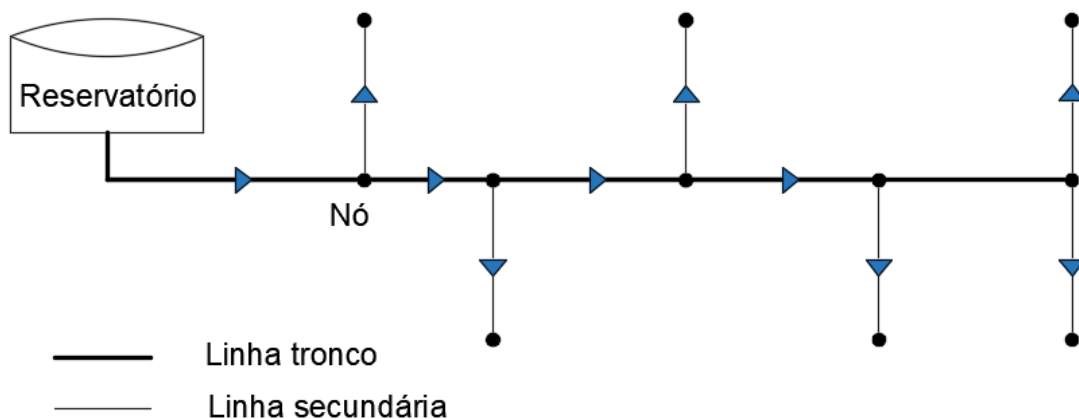
A rede de distribuição é formada por tubulações e acessórios, que são responsáveis pela destinação da água até seus consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendadas (HELLER, 2010).

De acordo com Azevedo Netto *et al.* (2018), as tubulações são condutos fechados, geralmente de seção circular, que possuem a finalidade de transportar um fluido de um ponto ao outro. Conforme a NBR 12218:2017, a rede de distribuição é composta por tubulações principais que possuem maior diâmetro e a finalidade de abastecer os condutos secundários, que por sua vez são responsáveis pelo abastecimento das demais tubulações.

A NBR 12218:2017, define que a rede de distribuição é parte do sistema de abastecimento formada por tubulações e acessórios, com a finalidade de destinar a água potável até seus consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressões recomendadas.

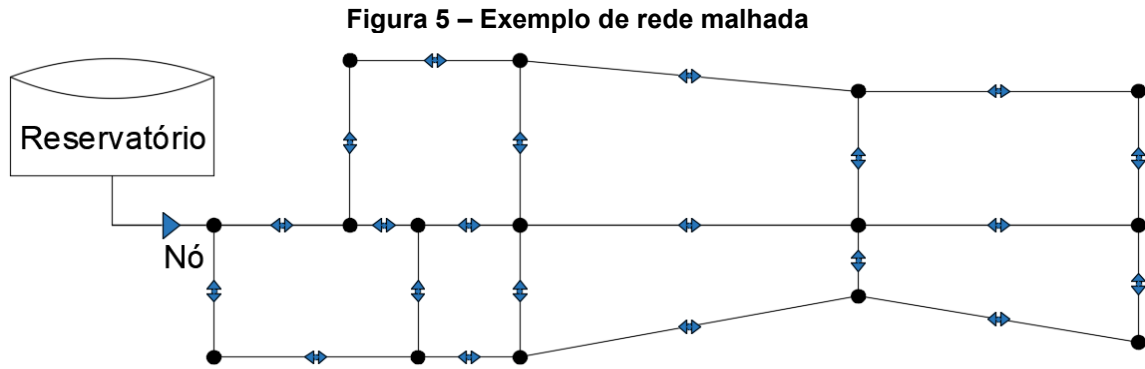
Em relação a concepção de projeto, as redes podem ser classificadas em ramificadas, malhadas ou mistas. A rede ramificada, segundo Porto (2006), possui uma tubulação tronco e a distribuição de água é feita para os condutos secundários. De acordo com Freire (2017), a rede do tipo ramificada tem como característica principal ter o sentido da vazão conhecido, como representado na Figura 4.

Figura 4 – Exemplo de rede ramificada



Fonte: adaptado de Freire (2017)

Já a rede malhada, como representada na Figura 5, tem como característica principal a flexibilidade, pois como não possui uma tubulação tronco, existe a possibilidade de reversibilidade do sentido das vazões, que varia conforme as solicitações de demanda (PORTO, 2006).



Fonte: adaptado de Freire (2017)

Também existem as redes hidráulicas mistas, que são a união dos dois tipos de redes citadas anteriormente.

Os sistemas de abastecimento de água acompanham o desenvolvimento e crescimento das cidades, o que acarreta em diversas ampliações. Logo, o sistema de tubulações possui diferentes materiais, diâmetros e idades de instalação. E com isso, ocorrem diversos problemas de operação e manutenção, para garantir os requisitos técnicos de consumo (ORELLANA et al, 2018).

A rede de distribuição de água não possui constantes inspeções, como as outras obras do sistema de abastecimento de água que são mais viáveis e de fácil acesso. Já que as redes ficam sob as vias públicas, as perdas de água nem sempre são percebidas. Além disso, a pressão é o fator que mais influencia nos vazamentos, deste modo, o controle das pressões é imprescindível para a diminuição de vazamentos (TSUTIYA, 2006).

O controle da pressão em tubulações possibilita:

“(…) reduzir o volume perdido em vazamentos, economizando recursos de água e custos associados; reduzir a frequência de arrebentamentos de tubulações e consequentes danos que têm reparos onerosos, minimizando também as interrupções de fornecimento e os perigos causados ao público usuário de ruas e estradas; prover um serviço com pressões mais estabilizadas aos consumidores, diminuindo a ocorrência de danos às instalações internas dos usuários até a caixa d’água (tubulações, registros e bóias); e reduzir os consumos relacionados com a pressão da rede, como por exemplo, a rega de jardins” (PNCDA/DTA D1, 1999).

3.6 Operação de sistemas de abastecimento de água

Os problemas de abastecimento de água devem ser resolvidos buscando uma solução apropriada a realidade social, sendo considerada “boa engenharia” aquela capaz de tomar as decisões mais conscientes, ponderando seus aspectos positivos e negativos. Considera-se que cada realidade requer sua única solução. Com isso,

devem ser realizadas avaliações buscando fornecer água a toda a população de maneira interrupta, conforme as características topográficas e geológicas, a distribuição da população na localidade e os mananciais disponíveis (HELLER, 2010).

Os elementos básicos para viabilidade e sustentabilidade de um sistema de abastecimento de água, segundo a Fundação Nacional de Saúde (2017), consistem na elaboração de um projeto, execução, operação e manutenção. O projeto é o elemento fundamental no processo de planejamento e implantação da obra, identificando as necessidades e assegurando sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. Além disso, destaca-se a importância da operação e manutenção do sistema, já que são etapas responsáveis por garantir sua eficiência e eficácia.

A operação do sistema de abastecimento de água pode ser estudada do ponto de vista da operação das estações elevatórias e dos reservatórios, onde ambas as etapas impactam no funcionamento da rede de abastecimento.

De acordo com Lacerda (2009), os benefícios da otimização da operação de sistemas de abastecimento de água são a gestão adequada da demanda com atendimento contínuo em quantidade e qualidade; a regularização do comportamento das pressões nos sistemas, proporcionando a diminuição das perdas físicas por vazamento ou rompimento de tubulações, o que conseqüentemente reduz o preço final; diminuição dos custos com bombeamento, manutenção de equipamentos e tubulações.

O Plano Nacional de Eficiência Energética (2011) afirma que as perdas reais de energia no setor de saneamento foram de 800 milhões de reais durante o ano de 2007. No valor, está inclusa a energia gasta devido as perdas de água e à ineficiência dos processos utilizados nos sistemas de abastecimento.

O Banco Interamericano de Desenvolvimento, atua com apoio financeiro e técnico, como objetivo de alcançar o desenvolvimento de uma forma sustentável. O Banco aponta em seu Manual de Eficiência Energética diversas medidas de economia, visando a redução dos custos e combate as perdas de água (BID, 2011).

3.6.1 Otimização da estação elevatória

De acordo com Muniz (2016), as companhias de saneamento começaram a ser cobradas por não utilizarem a energia de maneira eficiente, com consumo excedente de energia ou por ultrapassar a demanda elétrica contratada. Além disso, nas últimas décadas, ocorreu uma crise energética que contribuiu para o

aprimoramento do combate aos desperdícios, de modo a diminuir os custos com energia elétrica dos sistemas, sem afetar a qualidade dos serviços e equipamentos.

Preocupada com a utilização racional da energia elétrica, a Eletrobrás em parceria com a Secretaria de Saneamento Ambiental (SNSA), investiram em uma chamada pública intitulada Eficiência Energética no Saneamento Ambiental (PROCEL-SANEAR), que teve por objetivo promover o uso eficiente de energia elétrica e água em sistemas de saneamento ambiental e incentivar o uso racional dos recursos hídricos como estratégia de prevenção à escassez (PROCEL, 2006).

Além disso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável por regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, também avalia procedimentos para a otimização de sistemas, incentivando o combate aos desperdícios de energia em diversos setores da economia, inclusive o saneamento (Plano Nacional de Eficiência Energética, 2011).

De acordo com o Plano Nacional de Eficiência Energética (2011), apenas a substituição de equipamentos por outros mais eficientes não garante uma solução para os projetos de eficiência energética, já que devem ser consideradas as condições operacionais do sistema de saneamento. É importante realizar ações de capacitação do setor de saneamento com relação à eficiência energética e análise para redução de perdas de água por vazamentos.

Em sistemas de abastecimento de água, para reduzir o consumo de energia elétrica das estações elevatórias, e para reduzir o dispêndio financeiro com esse insumo, deve-se conhecer o sistema tarifário, reduzir a potência dos equipamentos, alterar o sistema operacional, realizar a automação do sistema de abastecimento e, quando possível, gerar energia através de fontes alternativas (TSUTIYA, 2005). De acordo com Bouzon *et al.* (2013), na maioria dos casos, a maior parte do custo energético dos SAA está associado à operação das estações elevatórias. Deste modo, a operação dos conjuntos motobomba em um padrão ótimo de funcionamento pode reduzir significativamente os custos, por meio de uma otimização do padrão de operação das bombas.

Segundo Gomes e Carvalho (2012), as ações que podem ser realizadas para a redução do consumo de energia elétrica são a diminuição da potência dos equipamentos, como a substituição dos motores, redução da altura manométrica do sistema e a redução do volume de água fornecido, realizando o controle das pressões nas tubulações e o controle de vazamentos. Além disso, pode-se implementar o

controle operacional, com a utilização de bombas com velocidade variável (conversores de frequência) e alteração nos procedimentos operacionais das estações de tratamento de água.

Nem sempre é possível realizar a otimização de sistemas elevatórios em redes de abastecimento de água com o desligamento das bombas em horários de ponta. Na pesquisa realizada por Lucena (2020), dentre os quatro reservatórios analisados, dois necessitaram o funcionamento dentro do horário de ponta, devido a demanda dos reservatórios. Com isso, pode-se perceber que cada caso deve ser analisado individualmente.

3.6.2 Operação do reservatório superior

A NBR 12217 (ABNT, 1994) apresenta algumas definições para melhor compreensão do projeto de reservatórios, dentre elas:

- Nível mínimo do reservatório: definido como a lâmina necessária para evitar vórtices, cavitação e arrasto dos sedimentos do fundo do reservatório.
- Nível máximo do reservatório: maior nível que pode ser atingido durante a operação, em condições normais.

Segundo Lacerda (2009), o reservatório deve ser sempre mantido em um nível vantajoso para a operação, com a faixa ótima em diferentes posições ao longo da operação. Quando o consumo está abaixo da média é imprescindível que o reservatório esteja com seu nível elevado para que não ocorra o esvaziamento durante períodos de maior consumo. Já o bombeamento deve ocorrer ao máximo no período de tarifa de energia elétrica reduzida. Quando a energia elétrica está com custo mais elevado, o ideal é que os reservatórios estejam com nível suficientemente elevado, para que as bombas possam ser desligadas pelo maior tempo possível.

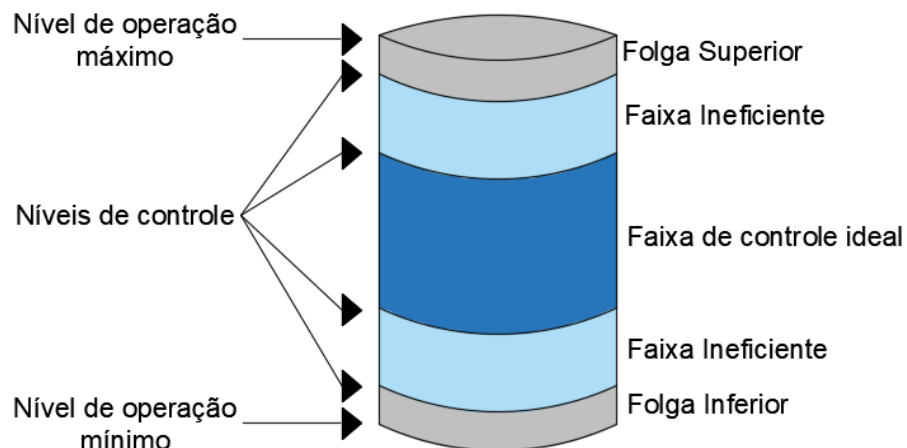
De acordo com Gomes e Carvalho (2012), pode-se realizar a alteração no sistema de bombeamento-reservação para a redução dos custos com energia no SAA. A alteração desse sistema consiste em aproveitar a capacidade volumétrica dos reservatórios, com o desligamento das bombas em determinados horários do dia, como, por exemplo, no período de ponta, quando as tarifas de energia elétrica são mais caras, entre 18 e 21 horas. A operação do reservatório pode permitir que se

realize o desligamento dos conjuntos motobomba para produzir uma considerável economia.

O autor ainda sugere que, caso o volume de reservação seja inferior ao volume de água demandado no período de ponta, pode-se realizar outros procedimentos como: “(...) desligar um número de bombas inferior ao total de máquinas instaladas em paralelo, desligar as bombas durante um período inferior às três horas do horário de ponta, ou aumentar a capacidade de reservação” (GOMES; CARVALHO, 2012). Para realizar o aumento da capacidade de reservação, aumento do reservatório ou construção de um novo, deve ser avaliada a viabilidade técnica e econômica, já que os investimentos para essas implantações são altos.

Lacerda (2009) define que para os reservatórios é necessário a definição de faixas de controle de acordo com a demanda de abastecimento, para que opere sem violar os níveis delimitados, como representado na Figura 6. Os níveis de operação são os níveis máximo e mínimo em que o reservatório pode trabalhar sem causar danos no sistema de abastecimento. Assim, quando o nível está acima do máximo pode causar extravasamentos e abaixo do mínimo compromete o funcionamento das bombas e o atendimento da demanda.

Figura 6 – Descrição do reservatório em faixas de controle



Fonte: adaptado de Lacerda (2009)

A faixa de controle ideal é onde o nível do reservatório deve ser mantido, para atender os objetivos operacionais. As faixas ineficientes são intervalos onde o nível de operação não contempla os objetivos e não atende a demanda. A folga entre os

níveis máximos e mínimos é estabelecida para que o reservatório funcione com segurança, de acordo com o projeto (LACERDA, 2009).

De acordo com Kuritza (2017), a capacidade de reservação de um sistema está diretamente relacionada a sua flexibilidade operacional, já que a água armazenada nos reservatórios pode suprir a demanda sem que esteja ocorrendo bombeamento no momento, fator significativo nos horários de ponta.

Na pesquisa realizada por Pedrosa (2019), o reservatório analisado operava como se fosse uma caixa de passagem, onde a vazão que chega é a mesma que sai, o que afeta o abastecimento, a operação e a estrutura física, o que conseqüentemente altera o equilíbrio financeiro da empresa de saneamento. Se o reservatório é mantido em níveis baixos, mais baixos que a geratriz superior da tubulação de saída, permite a entrada de ar na adutora e na rede de distribuição. Como solução foram apresentadas duas propostas, a primeira que sugere a variação da vazão de recalque da estação elevatória com o desligamento dos conjuntos motobomba, o que não acarretaria em economia de energia. A segunda proposta alterna o abastecimento de água entre as câmaras do reservatório, o que garante que ao menos uma das duas câmaras apresente nível satisfatório para abastecimento, eliminando a entrada de ar na adutora e conseqüentemente gerando economia de energia.

A estrutura hidráulica do sistema, portanto, pode ser aliada a otimização do mesmo, pois diminui os custos operacionais relacionados às despesas de energia elétrica (KURITZA, 2017).

3.6.3 Condições hidráulicas da rede de abastecimento

A NBR 12218 (ABNT, 2017), que estabelece diretrizes relacionadas à rede de distribuição, recomenda que a pressão dinâmica na rede de abastecimento não deve ser menor que 100 kPa ou 10 mca em nenhum ponto da rede. Já para pressão estática, a norma define que não deve ultrapassar 500 kPa ou 50 mca. O limite inferior possibilita que a água tenha energia suficiente para chegar aos reservatórios domiciliares, enquanto o limite superior auxilia no controle de perdas de água e na resistência das tubulações.

As redes de abastecimento de água são dimensionadas para funcionar dentro dos limites de pressão recomendados pela norma. A pressão estática ocorre geralmente nas primeiras horas da madrugada, em que o consumo é baixo. As

situações mais críticas ocorrem em horários de maior consumo de água, em que se verificam as maiores vazões e conseqüentemente as pressões mínimas (AVILA, 2007).

A pressão é o parâmetro de maior importância quando se trata da vazão de vazamentos e da sua ocorrência. Em sistemas de abastecimento de água, quando as pressões são elevadas podem ser instaladas válvulas redutoras de pressão. A válvula redutora de pressão é uma válvula de controle automático projetada para reduzir a pressão de montante a uma pressão constante a jusante, independente da variação de vazão e pressão do sistema (TSUTIYA, 2006).

“Como o perfil de consumo dos usuários não é constante, as vazões sofrem variações, levando também as pressões a sofrerem variações ao longo do dia e como a perda de água nos trechos da rede é influenciada pelas pressões, quanto maior as pressões, maiores as perdas de água” (AVILA, 2007).

Segundo Tsutiya (2006), os *boosters* são uma solução para o controle de pressões, reforçando a carga nos pontos mais altos que ficaram com pressões muito baixas ou totalmente despressurizados, além disso contam com variadores de velocidade que mantêm estável a pressão de saída. Assim, para regiões com pressões menores que 10 mca, podem ser instalados *boosters* para vencer os desníveis geométricos.

O *booster* para uso na distribuição de água é instalado em uma tubulação e possui objetivo de aumentar a pressão à jusante, para que a pressão na rede não exceda os limites estabelecidos em toda a rede de distribuição, independente das variações de consumo ocorridas durante o dia (TSUTIYA, 2006).

A utilização de uma VRP pressupõe a criação de um subsetor, definido pelo fechamento dos registros limítrofes para assegurar a estanqueidade da área. De acordo com Tsutiya (2006), a implantação de VRPs tem mostrado redução das perdas reais em redes de abastecimento e excelentes resultados em retorno de investimentos.

Nolli (2015) realizou diversos testes em laboratório que simulavam a exposição de tubos fraturados a variação de pressões e verificou que em todos os tubos testados a vazão de vazamento aumentou com o aumento da pressão. Além disso, a investigação determinou que as tubulações expostas a grandes variações de pressões colaboraram com a ocorrência de vazamentos.

De acordo com Francato (2002), para proporcionar uma melhor eficiência operacional das redes deve-se realizar uma setorização, para garantir um controle mais rigoroso dos sistemas, decompondo-os em subsistemas. Essa ação contribui por exemplo, para detectar com maior facilidade os pontos de vazamentos e solucionar de maneira mais eficiente problemas de pressões elevadas.

De acordo com Suzumura (2017) os vazamentos nas tubulações, responsáveis por cerca de 65% das perdas de água, são diretamente proporcionais às pressões na rede. Isso corrobora a importância, do controle das pressões, por meio de monitoramento *in loco* e, também, e de simulação hidráulica da rede.

Considerando as restrições de pressão nas redes de distribuição, Souza (2019) destaca a importância dos modelos de simulação hidráulica na fase de projeto e operação, para compreender o funcionamento e corrigir eventuais inconsistências do sistema de distribuição de água. Além disso, a simulação hidráulica permite avaliar as exportações de água de um subsistema para outro, verificando o efeito desse transporte para o controle das pressões na rede.

No saneamento, um modelo matemático representa uma visão baseada nas informações coletadas em campo, podendo realizar estudos do comportamento hidráulico e analisar possíveis soluções, garantindo vantagens do ponto de vista econômico com a diminuição de gastos como, por exemplo, a criação de modelos experimentais (PALO, 2010).

Nesse ínterim, diversas ferramentas computacionais estão disponíveis para a modelagem hidráulica de redes de distribuição. De acordo com Pedrosa *et al.* (2019), os softwares estão sendo amplamente utilizados como ferramenta na gestão operacional dos sistemas de distribuição de água, já que fornecem um acompanhamento dos parâmetros hidráulicos e do sistema de abastecimento. Rego (2007) elencou as vantagens e as desvantagens de algumas dessas ferramentas, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Comparativos entre programas de modelagem hidráulica

Item avaliado	<i>EPANET</i>	<i>HIDROCAD</i>	<i>STRUMAP</i>	<i>SYNERGEE</i>	<i>WATERCAD</i>
Custo	Muito bom	Bom	Não satisfaz	Não satisfaz	Não satisfaz
Facilidade de uso	Muito bom	Muito bom	Bom	Não satisfaz	Bom
Operacionalidade e flexibilidade	Bom	Não satisfaz	Muito bom	Bom	Bom
Velocidade de processamento	Bom	Não satisfaz	Muito bom	Muito bom	Muito bom
Interface com o usuário	Muito bom	Bom	Bom	Não satisfaz	Bom
Características do modelo de qualidade	Bom	Não satisfaz	Não satisfaz	Não satisfaz	Muito bom
Integração com bases de dados	Bom	Bom	Bom	Bom	Muito bom

Fonte: adaptado de Rego (2007)

Rego (2007), afirma que as razões pela escolha do EPANET foram o programa ser adequado às necessidades atuais de simulação, a fiabilidade do modelo, utilização livre e gratuita e a integração com outras ferramentas.

De acordo com Silva (2008) entre os programas de simulação hidráulica destaca-se o EPANET, que é um software criado e desenvolvido pela U.S.E.P.A – Environmental Protection Agency, dos Estados Unidos da América. O programa é gratuito e um dos mais confiáveis, que permite o planejamento das redes e também seu funcionamento, apresentando resultados para diversas situações como simulações estáticas e dinâmicas.

O EPANET é um software de modelagem hidráulica usado por concessionárias de água potável em todo o mundo, sendo usado para avaliar problemas de qualidade da água e entender o movimento dos constituintes da água. Com isso, pode ser usado para projetar e dimensionar a infraestrutura, otimizar as operações, reduzir o consumo de energia, investigar problemas de qualidade da água. Além disso, o EPANET pode ser usado para conter ameaças e se preparar para emergências (USEPA, 2019).

O software EPANET pode ser usado em diversos estudos, como por exemplo o estudo realizado por Iancu *et al.* (2019), onde foram realizadas simulações para compreender a variação dos níveis hidrodinâmicos de um poço de água subterrânea na Romênia.

Ainda sobre o EPANET 2.0, Widiarti (2020) garantiu bons resultados utilizando-o como ferramenta de análise de sistemas de distribuição de redes de dutos. Widiarti (2020), realizou análises com relação a uma ampliação na rede já existente e considerou a projeção das necessidades de água potável. Com o auxílio do software, realizou a análise de pressões nas tubulações e conseguiu determinar o melhor método para o desenvolvimento do sistema de abastecimento de água.

4 METODOLOGIA

Neste tópico serão apresentados os dados para reconhecimento do Sistema de Abastecimento de Água de uma cidade na região central do Paraná. Segundo informações disponibilizadas, o SAA é operado pela Companhia de Saneamento há 45 anos e atualmente, atende 28 mil pessoas, aproximadamente.

A etapa inicial do estudo foi a coleta de dados do sistema de abastecimento de água, que foram obtidos junto ao corpo técnico da Companhia de Saneamento, por meio de um acordo de cooperação para estudo de otimização do SAA.

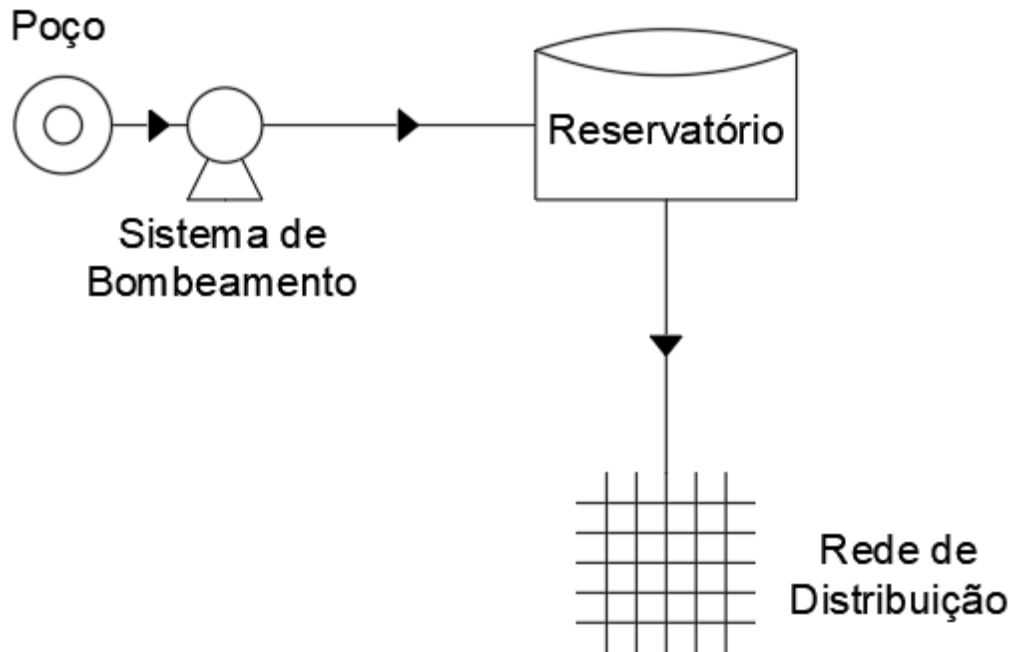
O SAA é composto por dois subsistemas, um com captação superficial e outro com captação subterrânea. Destaca-se que, do total de água tratada fornecida para a população, 65% provém do manancial superficial e o restante do subterrâneo.

Foram realizadas visitas técnicas às instalações do SAA com o intuito de reconhecer as instalações do sistema. Após a etapa inicial de coleta de dados, foram realizadas simulações hidráulicas no software EPANET 2.0 para avaliar as condições da rede de distribuição e do reservatório.

4.1 Caracterização do subsistema de captação subterrânea

O trabalho tem como escopo a modelagem hidráulica da rede abastecida por um reservatório apoiado, que recebe água do subsistema de captação subterrânea, conforme esquematização representada na Figura 7. O sistema de abastecimento é composto por um poço tubular profundo, um conjunto motobomba do tipo submerso, uma adutora de água bruta e um reservatório superior do tipo apoiado.

Figura 7 – Sistema de captação subterrânea



Fonte: autoria própria (2021)

A captação subterrânea é realizada pelo poço, que foi construído em 2003 com a finalidade de abastecer parte da população. O poço foi construído em uma região formada por rochas basálticas pertencentes a formação Serra Geral da era mesozoica. A perfuração do poço ocorreu em 2003, para possibilitar a retirada de água do aquífero Serra Geral e abastecer parte da população do município (COMPANHIA DE SANEAMENTO, 2003).

O poço possui acesso na cota 843,44 m, cerca de 55 cm acima do nível do terreno e profundidade total de 178 m, com diferentes diâmetros como apresentado no Quadro 2.

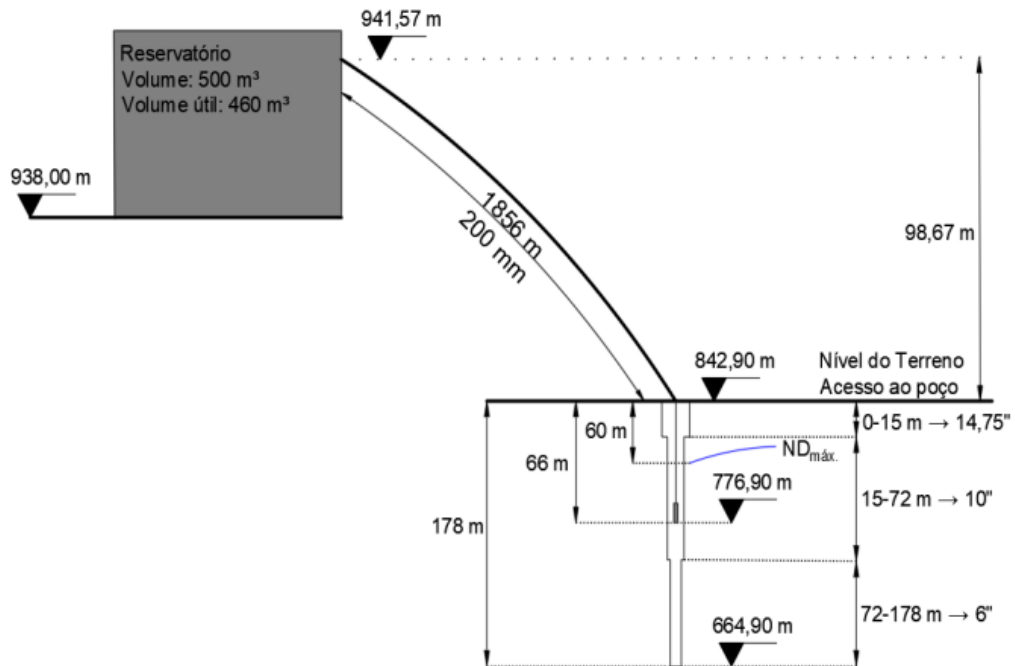
Quadro 2 – Profundidade e diâmetro do poço

Profundidade (m)	Diâmetro do poço
0 a 15	14,75" (aproximadamente 375 mm)
15 a 72	10" (aproximadamente 250 mm)
72 a 178	6" (aproximadamente 150 mm)

Fonte: Companhia de Saneamento (2003)

Na perfuração do poço, o nível estático apresentava-se a 3,45 m abaixo do nível do terreno. Na Figura 8 pode-se observar o detalhamento da captação subterrânea.

Figura 8 – Detalhamento da captação subterrânea



Fonte: Silva (2021)

A captação é feita por um conjunto motobomba submerso, controlado para operar a uma frequência de 51 Hz, que possui as características apresentadas no Quadro 3. Além disso, cabe ressaltar que a companhia de abastecimento vetou o acionamento do poço entre 0 e 5 horas da manhã.

Quadro 3 – Características do conjunto motobomba submerso

Marca	Ebara
Potência (cv)	145,00
Vazão (shut off) (m ³ /h)	180,00
Altura manométrica máxima (mca)	171,00
Profundidade crivo (m)	66,00

Fonte: Companhia de Saneamento (2003); Companhia de Saneamento (2020); EBARA (2017).

A adutora possui 200 mm de diâmetro e 1856 m de comprimento, sendo 1256 m de PVC FoFo e 600 m de RPVC. O volume de água bombeado é enviado ao reservatório apoiado, que possui suas características descritas no Quadro 4.

Quadro 4 – Dados do Reservatório

Reservatório apoiado	
Nível de água mínimo (m)	938,100
Nível de água máximo (m)	941,570
Nível de água útil (m)	3,47
Nível do terreno (m)	938,000
Volume nominal (m ³)	500
Volume útil (m ³)	460

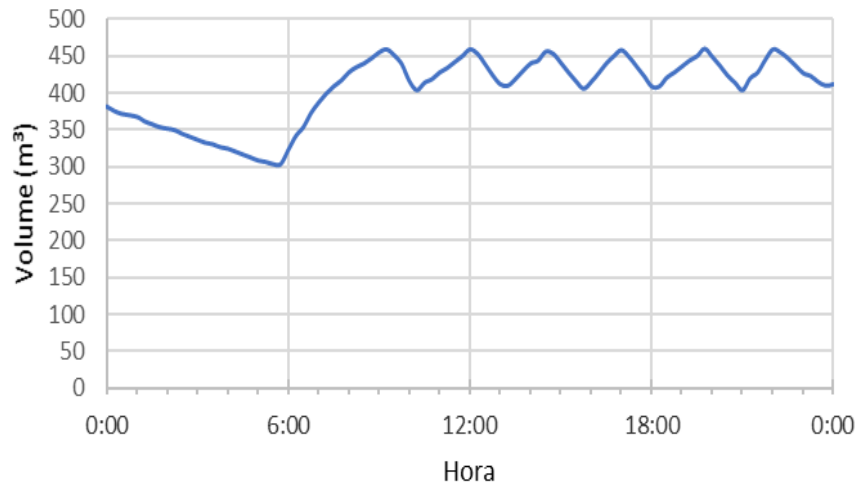
Fonte: Companhia de Saneamento (2020)

Com base em relatos da equipe da Companhia de Saneamento, o sistema de bombeamento do poço é acionado de forma automatizada, onde o controle para ligar e desligar o sistema é feito por meio do registro de nível do reservatório.

Foram realizadas algumas medições de volume no reservatório, entre os dias 01/10/2020 e 15/10/2020, com intervalo de aquisição de 15 minutos. Essas medições permitiram observar duas situações distintas na operação, a primeira relacionada ao menor consumo de água ao longo do dia, quando apenas a rede de distribuição escopo deste trabalho é abastecida e a segunda, quando há exportação de água do reservatório apoiado para um outro reservatório da cidade e, portanto, o consumo de água ao longo do dia é superior. Nesse segundo caso, ao contrário do primeiro, não é possível identificar os acionamentos do conjunto motobomba ao longo do dia.

Na Figura 9, observa-se o volume e o nível de água no reservatório em um dia que representa a primeira situação descrita anteriormente. Observa-se os acionamentos do sistema de bombeamento, já que os registros de volume alteram entre o volume máximo (460 m³) com altura de funcionamento 3,57 m e mínimo (400 m³) com altura de 3,12 m do reservatório. Assim, constata-se que a variação máxima no volume e no nível de água do reservatório foram de 60 m³ e de 0,45 m, respectivamente. Ainda, é possível observar que o volume atinge o menor valor antes das 6 horas da manhã (SILVA, 2021).

Figura 9 – Volume e nível de água no reservatório apoiado, sem exportação de água

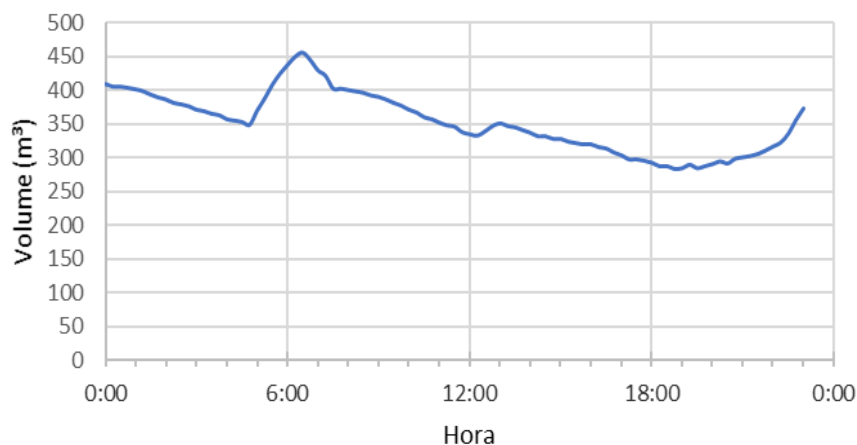


Fonte: Silva (2021)

Destaca-se, ainda, que a operação observada na Figura 9 representa um padrão típico para sistemas cujo funcionamento é controlado por chave boia.

Na Figura 10, observa-se um dia em que houve exportação de água do reservatório apoiado. As medições de volume não permitem identificar os momentos de acionamento do conjunto motobomba, pois como o consumo de água foi maior, o nível máximo que determina o desligamento do conjunto motobomba não foi atingido e, portanto, o sistema deve ter permanecido ligado.

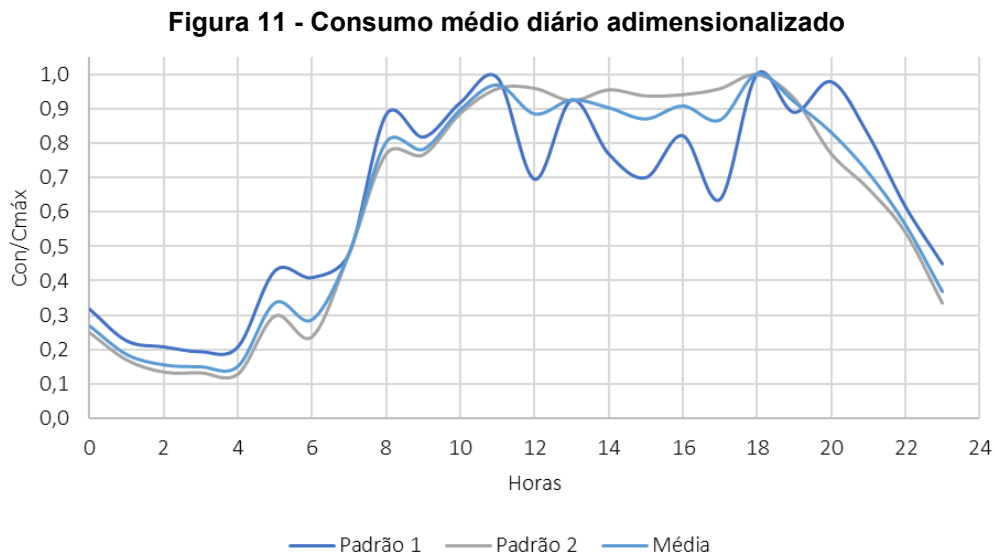
Figura 10 – Volume e nível de água do reservatório apoiado, com exportação de água



Fonte: Silva (2021)

A observação destes dados reforça a importância da simulação hidráulica da rede de distribuição, especialmente para verificar o impacto da variação do nível do reservatório nas pressões mínimas e máximas.

Silva (2021) apresentou a curva de consumo de água associada ao reservatório apoiado, conforme apresentado na Figura 11.



Fonte: Silva (2021)

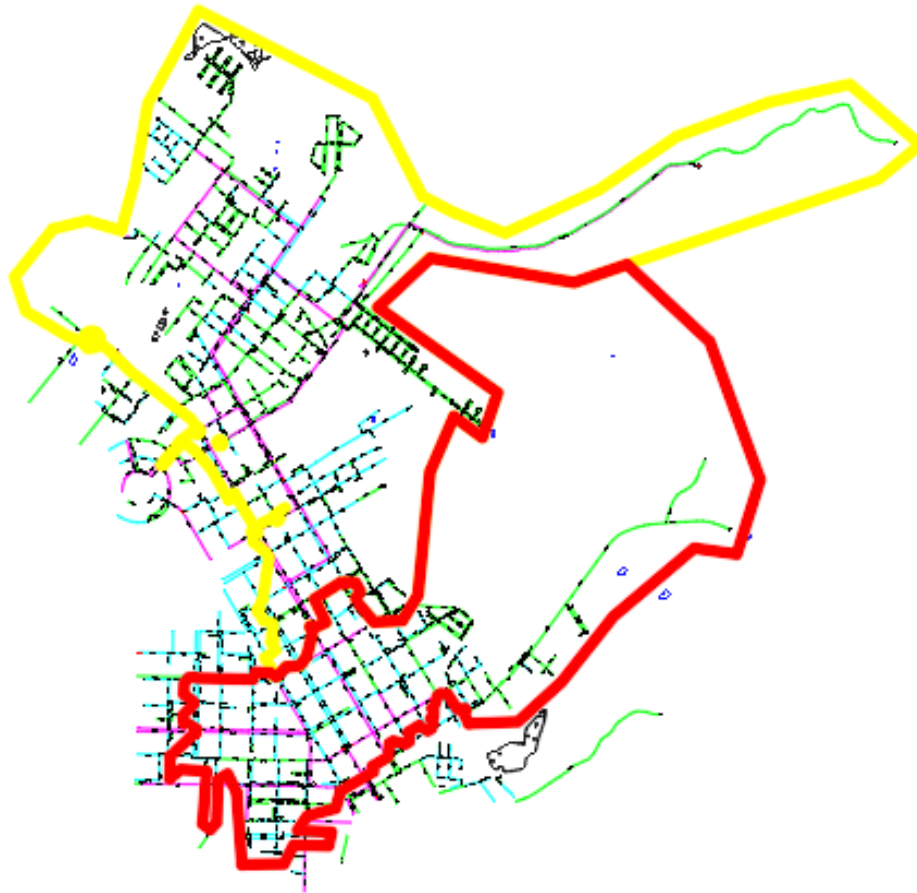
Na Figura 11, estão apresentadas as curvas em 2 cenários, um com sistema de bombeamento desligado (padrão 1), e o outro com sistema de bombeamento ligado (padrão 2), já a curva 3 representa a média entre ambos os padrões, e será utilizada para representar o consumo médio diário na rede de distribuição.

4.2 Simulação hidráulica

4.2.1 Inserção de dados no software EPANET 2.0

A parcela da rede de abastecimento para a qual foi desenvolvida a simulação hidráulica no software EPANET 2.0 está destacada em amarelo na Figura 12. Ressalta-se que a área destacada em amarelo é atendida apenas pelo subsistema de captação subterrânea, enquanto a área destacada em vermelho é atendida pelo subsistema de captação superficial. Apesar disso, quando há a necessidade, ocorre exportação de água do reservatório apoiado para a rede representada em vermelho. Deste modo, o foco deste estudo será a simulação hidráulica da rede delimitada em amarelo, observando o efeito nas pressões de acordo com as alterações operacionais da estação elevatória e do reservatório, bem como a partir da exportação de água para a parcela de rede que é, preferencialmente, abastecida pelo outro subsistema.

Figura 12 - Subsistemas do SAA estudado



Fonte: Companhia de Saneamento (2020)

A modelagem hidráulica foi realizada com o auxílio do software EPANET, amplamente utilizado para simular a modelagem dirigida pela pressão e obtenção de dados de vazões. Para o modelo hidráulico, utilizou-se as informações do sistema atual da cidade, como cotas do terreno, comprimentos, diâmetros e rugosidades das tubulações, obtidas junto à Companhia de Saneamento e, também, por meio da coleta *in loco*.

O desenho no EPANET foi iniciado pela rede de distribuição, pois de acordo com Rego (2016) é a unidade com maior detalhamento por conta da quantidade de nós e tubulações.

Inicialmente foi necessário redesenhar a área analisada, pois cada nó deve representar a intersecção de tubulações, como representado na Figura 13. De acordo com o Manual do EPANET (2009), os nós são pontos de rede de união dos trechos.

Figura 13 - Subsistema abastecido pelo poço



Fonte: autoria própria (2021)

Os dados fornecidos pela Companhia de Saneamento foram inseridos individualmente em cada tubulação e cada nó existente no EPANET. Para que possa ser realizada a verificação hidráulica é necessário inserir (ROSSMAN, 2009):

Dados dos nós:

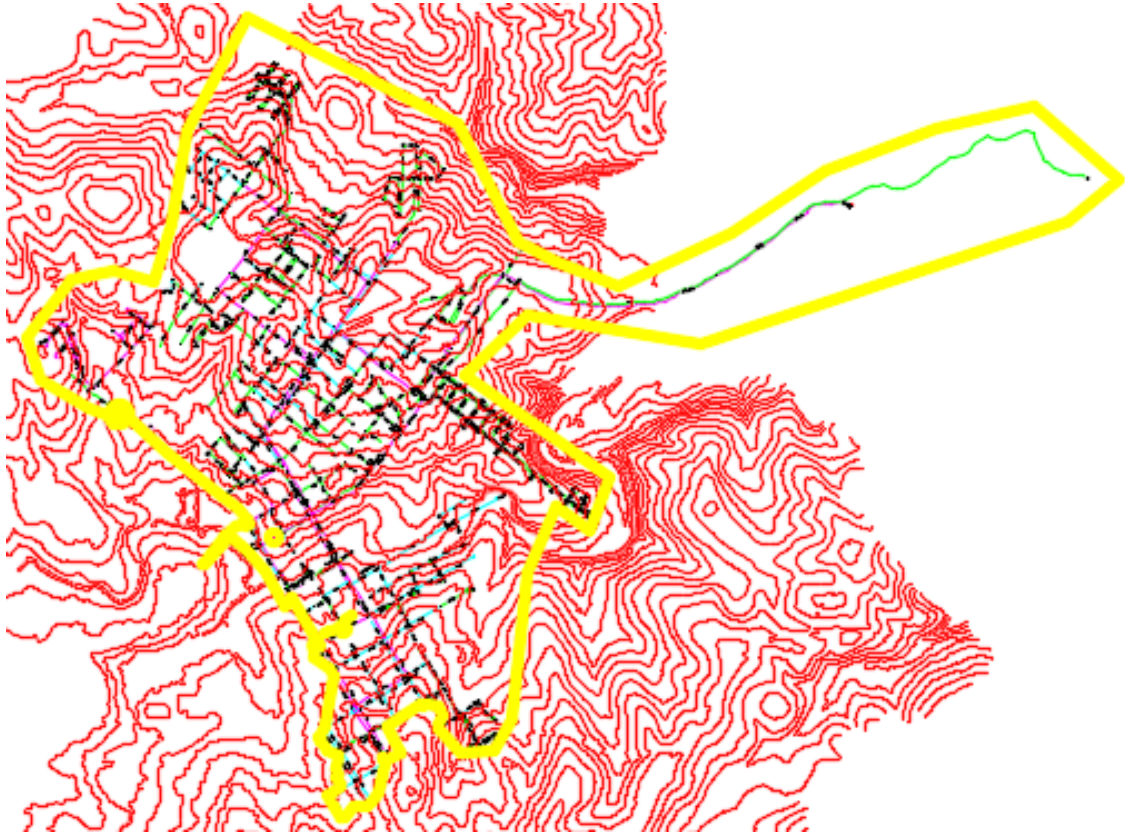
- Identificação do nó;
- Cota (m);
- Consumo base (l/s);
- Coordenadas X e Y do nó (m).

Dados das tubulações:

- Identificação do trecho;
- Nó inicial;
- Nó final;
- Comprimento do trecho (m);
- Diâmetro da tubulação (mm);
- Rugosidade da tubulação (mm).

Para a inserção das cotas foram disponibilizadas as curvas topográficas apresentadas no arquivo do software para desenho AutoCAD, fornecido pela Companhia de Saneamento, conforme a Figura 14.

Figura 14 – Curvas topográficas



Fonte: Companhia de Saneamento (2020)

Com os dados das curvas topográficas, foram inseridas manualmente as cotas em seus respectivos nós, como representado na Figura 15.

Figura 15 – Cota nos nós



Fonte: autoria própria (2021)

O consumo nos nós, foi definido a partir dos dados disponibilizados pela Companhia de Saneamento. A área abastecida pelo poço possui em média consumo diário de 1.408.730 L. Com isso, pode-se obter o consumo de água área estudada, de 16,30 L/s. Como a área possui 676 nós, pode-se obter o consumo em cada nó, igual a 0,024 L/s.

O comprimento de cada trecho foi adicionado automaticamente pelo EPANET, durante a exportação dos dados do arquivo produzido no software de desenho AutoCAD. Para realizar a exportação dos dados foi necessária a utilização do *software* EpaCAD. Logo, a modelagem procedeu de duas formas, pela importação do desenho da rede e seus respectivos comprimentos do AutoCAD e a inserção manual das outras propriedades.

A área abastecida pelo poço possui 733 tubulações, que formam uma rede de abastecimento de 46.443,5 m. O diâmetro de cada tubulação foi inserido manualmente em suas respectivas tubulações, observou-se os dados do arquivo no software AutoCAD para realizar a inserção, como representado na Figura 16, onde as tubulações estão divididas por cores. A cor verde está presente nos tubos com DN 50, a cor rosa nas tubulações com diâmetros maiores que 50 mm, como DN 63, DN 75,

Figura 17 – Diâmetros das tubulações



Fonte: autoria própria (2021)

No arquivo do AutoCAD, estão apresentados os materiais de cada tubulação, a partir disso, os dados de rugosidade foram determinados com base no Quadro 5. Observa-se que no projeto há a presença de 3 tipos diferentes de materiais que compõem as tubulações, PEAD, PVC e PVC de FoFo.

Quadro 5 – Rugosidade dos materiais

Característica da tubulação	Novos	Usados 10 anos	Usados 20 anos
PVC, até DN 25	137,5	135	132,5
PVC, 125<DN<550	140	137,5	135
PVC, 550<DN<1500	142,5	140	137,5
PEAD, até DN 125	140	137,5	135
PEAD, 125<DN<550	142,5	140	137,5
PEAD, 550<DN<1500	145	142,5	140

Fonte: adaptado Azevedo Netto et al. (2018)

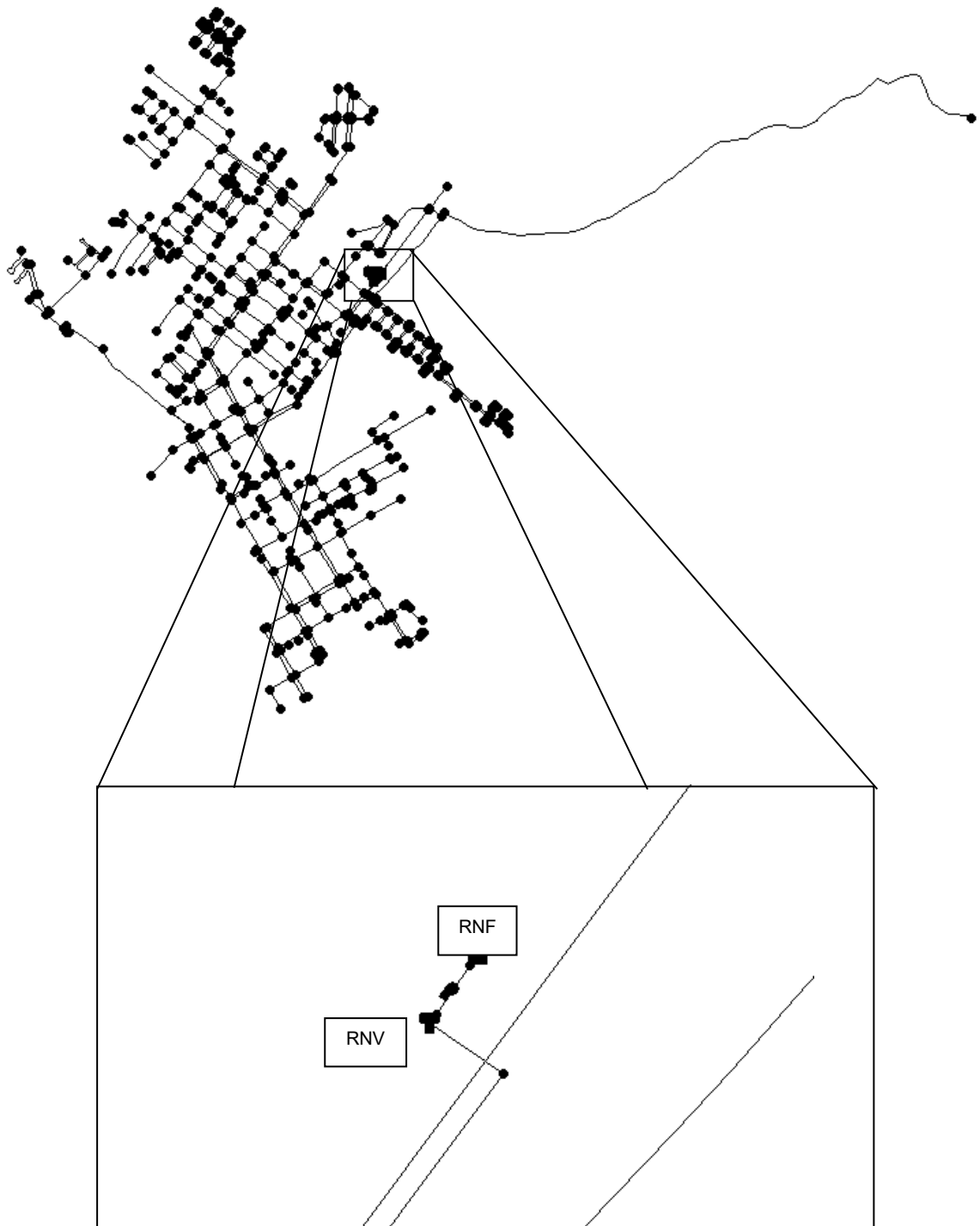
Para a inserção das rugosidades nas tubulações foram utilizados dados para tubulações utilizadas a 20 anos.

Na simulação foi inserido um reservatório de nível fixo como aporte de água, que representa o poço, onde o principal parâmetro a ser inserido nas propriedades do reservatório é o nível de água, e em seguida um reservatório de nível variável, onde são inseridos o diâmetro do reservatório e os níveis máximo, mínimo e inicial (ROSSMAN, 2009). No controlador, o poço é apresentado como RNF 1, o conjunto motobomba é descrito como bomba 5 e o reservatório como RNV 7.

Além disso, na saída do RNF foi inserida uma válvula de retenção (CV) que previne que a inversão da vazão (ROSSMAN, 2009).

O diâmetro do reservatório (RNV), que possui formato cilíndrico, foi obtido através do volume útil (460 m^3) e altura útil (3,47 m), logo obtém-se que o diâmetro é 13 m. Para modelar a entrada de vazão no reservatório de nível variável (RNV) foi necessária a inserção de um sistema de adução em que um reservatório (RNF) de maior cota o abastece, a partir de um sistema de bombeamento, como está destacado na Figura 18, para posterior simulação hidráulica das diferentes condições operacionais destas unidades.

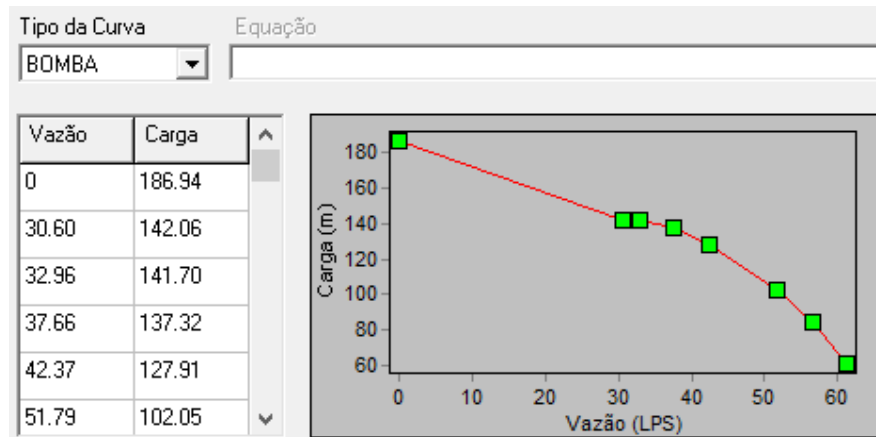
Figura 18 - Projeto EPANET



Fonte: autoria própria (2021)

Para a inserção da bomba foram utilizados os dados da curva da bomba, apresentados na Figura 19.

Figura 19 – Curva da bomba



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Os dados da curva da bomba estão apresentados na Tabela 1, onde H (m) é a altura manométrica e Q (L/s) a vazão.

Tabela 1 – Dados para curva da bomba

H (m)	Q (L/s)
186,94	0,00
142,06	30,60
141,70	32,96
137,32	37,66
127,91	42,37
102,05	51,79
84,10	56,50
60,69	61,21

Fonte: EBARA (2017); Silva (2021)

Além dos dados de consumo, também foi necessário inserir a potência da bomba, obtida pela equação 1, onde há o equacionamento da relação entre as potências consumidas é diretamente proporcional ao cubo da relação das rotações (GOMES E CARVALHO, 2012).

$$\frac{Pot_2}{Pot_1} = \frac{N_2^3}{N_1^3} \quad (1)$$

Pot_1 : Potência motriz na condição 1 (W);

Pot_2 : Potência motriz na condição 2 (W);

N_1 : rotação do motor na condição 1 (rpm);

N_2 : rotação do motor na condição 2 (rpm).

A potência nominal da bomba é 150 HP e sua rotação nominal é 3540 rpm. Para determinar a potência na condição real, tem-se que a frequência do motor é 51

Hz, que representa uma rotação de 3060 rpm. A partir da Equação 1 pode-se determinar que a potência é 96,88 HP.

Além da inserção da bomba foram inseridas as cotas nos reservatórios, o RNF que representa o poço, teve como cota 782,9 m, que é o nível de água no poço, como foi apresentado na Figura 8. Do mesmo modo, o RNV representa o reservatório que está apoiado ao terreno na cota 938 m.

Para simulação do comportamento das pressões com relação ao consumo nos nós, foi inserido em cada nó o consumo-base, como explicado anteriormente, e após isso foi inserido um padrão de consumo com fatores multiplicativos adimensionais que representam a variação do consumo durante as horas do dia.

Para isso, foi obtida a curva de consumo adimensional, com valores de consumo a cada hora, como apresentado na Tabela 2. Os dados foram obtidos a partir da curva 3 apresentada na Figura 11.

Tabela 2 – Consumo adimensional

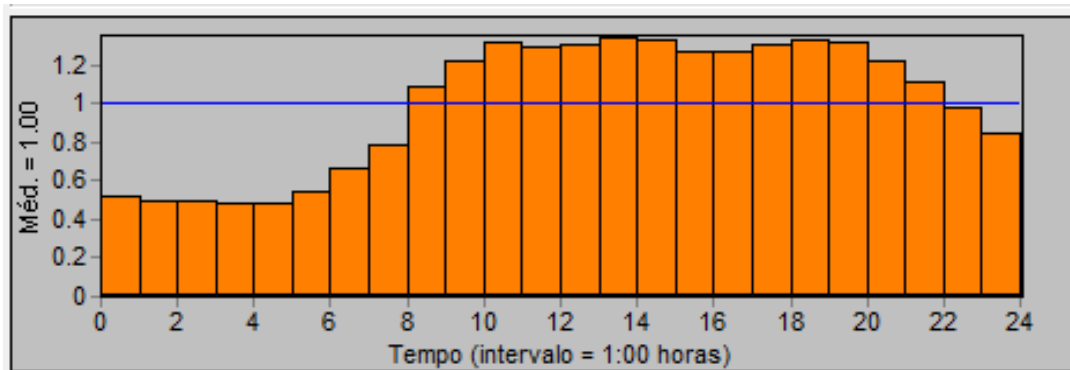
Horas	Consumo
1	0,521
2	0,501
3	0,491
4	0,481
5	0,481
6	0,541
7	0,661
8	0,791
9	1,091
10	1,221
11	1,321
12	1,291
13	1,301
14	1,341
15	1,331
16	1,271
17	1,271
18	1,301
19	1,331
20	1,311
21	1,221
22	1,111
23	0,981
24	0,841

Fonte: adaptado de Silva (2021)

A partir da Tabela 2, nota-se que o horário com menor consumo é as 4 horas e o horário com maior consumo é as 14 horas. Assim, as pressões analisadas com o consumo mínimo e máximo, serão apresentadas nesses horários.

No EPANET a inserção do padrão de consumo está representada na Figura 20, onde a média de consumo é 1, para respeitar o consumo diário fornecido.

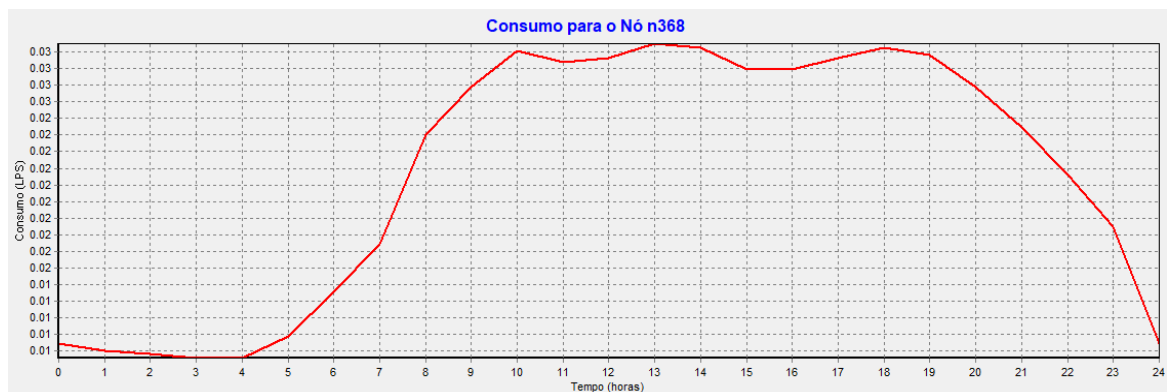
Figura 20 – Padrão de Consumo



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

A variação de consumo nos nós é a mesma em todos, já que é definida pela multiplicação do consumo-base com os fatores multiplicativos de consumo, que são os mesmos para todos os nós, como representado na Figura 21.

Figura 21 – Variação do consumo nos nós



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Além disso, a rede possui um *booster* que abastece as áreas com menor pressão. Para a análise mais próxima da realidade, foram obtidas informações do *booster* inserido na rede. Sabe-se que a pressão de saída do *booster* é sempre 30 mca, assim insere-se um reservatório de nível fixo com essa altura de água para

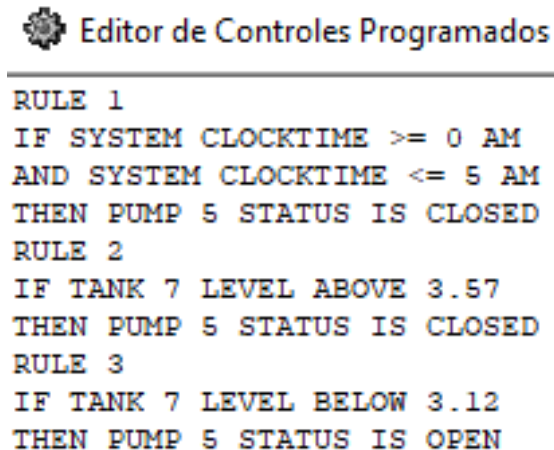
representar a pressão de saída. A cota do terreno onde a bomba está inserida é 127,7 m, assim o nível inserido para o reservatório é de 157,7 m.

Com isso, as primeiras simulações foram realizadas considerando a rede de abastecimento sem o *booster*, e também o comportamento da mesma após a inserção.

4.2.2 Simulação em condição atual de funcionamento

Para a simulação da situação atual do sistema de abastecimento, foi inserido como nível mínimo 3,12 m, que é o valor adotado atualmente pela companhia de saneamento. Assim, o controle programado, está representado na Figura 22.

Figura 22 – Controle programado para a condição atual



Editor de Controles Programados

```

RULE 1
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 0 AM
AND SYSTEM CLOCKTIME <= 5 AM
THEN PUMP 5 STATUS IS CLOSED
RULE 2
IF TANK 7 LEVEL ABOVE 3.57
THEN PUMP 5 STATUS IS CLOSED
RULE 3
IF TANK 7 LEVEL BELOW 3.12
THEN PUMP 5 STATUS IS OPEN

```


Fonte: autoria própria (2021)

Na Figura 22, pode-se observar que a programação é realizada em inglês e é responsável pelo controle do sistema motobomba, onde a regra 1 para funcionamento o mantém desligado entre as 0 e 5 horas. Além disso, a regra 2 programa a bomba para desligar quando o reservatório atingir o nível de 3,57 m e a regra 3 determina que a bomba deve ser ligada quando o nível do reservatório for menor que 3,12 m. Com isso, pode-se perceber o comportamento do sistema e posteriormente compará-lo às novas simulações.

4.2.3 Simulação para determinar o nível mínimo do reservatório

Para realizar a simulação hidráulica no software EPANET, foi programado o acionamento da bomba, através de um controle, representado na Figura 23.

Figura 23 – Controle programado para determinar o nível mínimo do reservatório

 Editor de Controles Programados

```

RULE 1
IF TANK 7 LEVEL ABOVE 3.57
THEN PUMP 5 STATUS IS CLOSED
RULE 2
IF TANK 7 LEVEL BELOW 0.1
THEN PUMP 5 STATUS IS OPEN

```

Fonte: autoria própria (2021)

A programação na Figura 23 apresenta como regra 1 o desligamento da bomba quando o nível do reservatório ultrapassa 3,57 m, e a regra 2 é o comando para ligar a bomba quando o nível do reservatório for menor que 0,1 m.

Em cada simulação o nível de acionamento da bomba foi acrescido em 10 cm, sempre observando o comportamento da rede. A simulação foi realizada observando as pressões na rede e obteve-se o nível mínimo do reservatório quando todos os nós possuíram pressões maiores que 10 mca, como determinado pela NBR 12218 (ABNT, 2017). Além da análise de pressões na rede, após a simulação pode-se obter a representação da carga hidráulica no reservatório, a perda de carga nas tubulações e a vazão nas tubulações e na bomba.

Para a determinação perda de carga hidráulica na tubulação, de acordo com o Manual do EPANET (2009), a fórmula mais utilizada é a de Hazen-Williams que é utilizada apenas para água e representada pela equação 2.

$$P = 10,674 * C^{-1,852} * d^{-4,871} * l \quad (2)$$

Onde:

P : perda de carga unitária (m/m);

C : coeficiente de rugosidade ($m^{0,367}/s$);

d : diâmetro da tubulação (m);

l : comprimento da tubulação (m).

Além da perda de carga, pode-se analisar a vazão nas tubulações, como representado na Equação 3.

$$Q = v * A \quad (3)$$

Onde:

Q : vazão (m³/s);

v : velocidade média do escoamento (m/s);

A : área da seção transversal (m²).

Com a inserção de todos os dados no software EPANET 2.0, pode-se determinar a carga hidráulica para reservatório.

A carga hidráulica é a representação do nível de água no reservatório, ou seja, a cota do reservatório somada ao nível de água no seu interior. Deste modo, os reservatórios de nível fixo são representados por carga hidráulica constante, constituindo origens de água externas à rede.

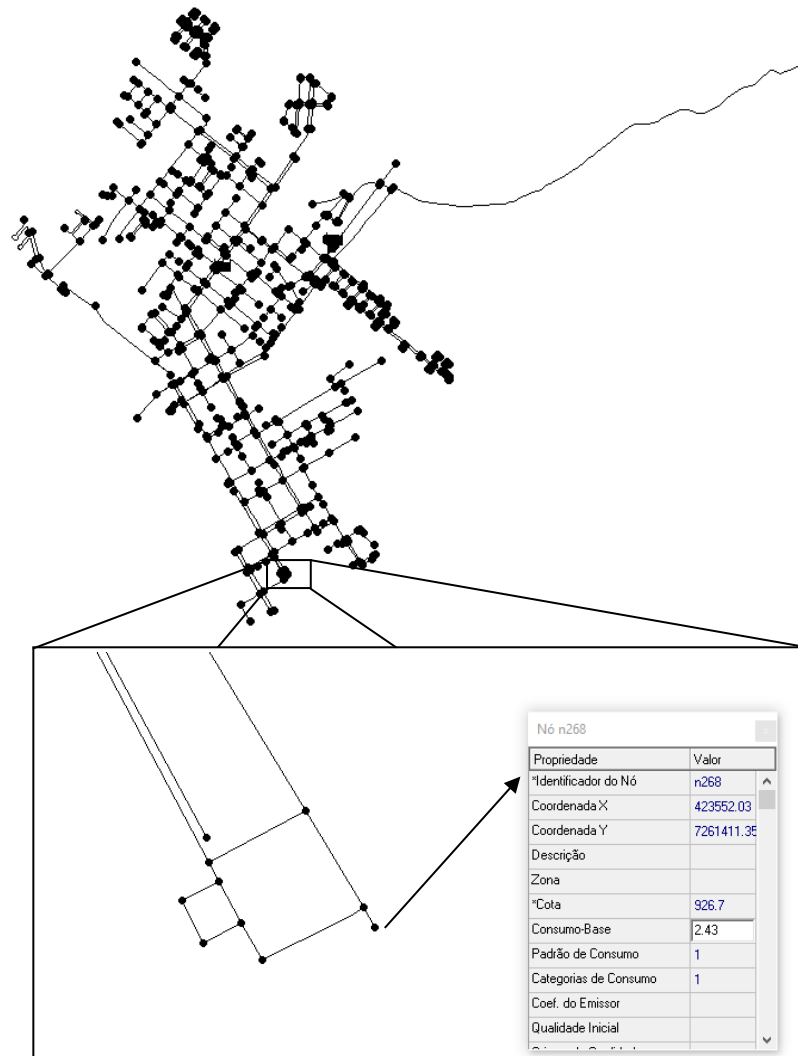
4.2.4 Simulação hidráulica com exportação de água

Para os dias em que há exportação de água, será considerado um nó como um grande consumidor, consumindo a diferença entre o consumo médio e máximo. O consumo máximo é representado pelos dias em que há exportação de água.

O consumo médio é 16,30 L/s em toda a rede e quando há exportação de água o consumo é de 18,74 L/s, logo a diferença entre os dois consumos é de aproximadamente 2,43 L/s. Insere-se este valor de consumo no nó extremo representado na Figura 24, que faz ligação com a área do subsistema abastecido pelo manancial superficial.

Assim, a simulação foi realizada do mesmo modo, através de um controle programado, variando o nível a cada 10 cm.

Figura 24 – Localização do grande consumidor



Fonte: autoria própria (2021)

4.2.5 Simulação para desligamento da bomba em horário de ponta

Se houver funcionamento da bomba em horário de ponta, pode-se programar o software para manter a bomba desligada nesse horário, na tentativa de otimizar o funcionamento do sistema, garantindo menores gastos com energia. O horário de ponta, em que a energia é mais cara, é entre 18 e 21 horas. Deste modo, para programar o sistema para não funcionar nesse horário deve ser inserido um controle como apresentado na Figura 25, onde a regra de funcionamento apresentada programa o desligamento do conjunto motobomba no horário de ponta.

Figura 25 – Controle programado para a bomba desligar em horário de ponta

Editor de Controles Programados

```

RULE 1
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 6 PM
AND SYSTEM CLOCKTIME <= 9 PM
THEN PUMP 5 STATUS IS CLOSED
  
```

Fonte: autoria própria (2021)

Esse não funcionamento pode acarretar em níveis menores no reservatório, podendo até serem menores que o nível mínimo determinado. Por isso, o desligamento deve ser avaliado de forma criteriosa para conseguir atender a demanda.

4.2.6 Simulação com aumento de consumo na rede

Considera-se que ocorra aumento da população na rede de distribuição do subsistema abastecido pelo poço, conseqüentemente isso gera um aumento no consumo. Na simulação será considerado um aumento progressivo do consumo nos nós, de 10% a 50%, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Aumento percentual do consumo

Simulação	Consumo em cada nó (l/s)	Consumo total da rede (l/s)
Atual	0,024	16,3
Aumento de 10%	0,0264	17,93
Aumento de 20%	0,0288	19,56
Aumento de 30%	0,0312	21,19
Aumento de 40%	0,0336	22,82
Aumento de 50%	0,036	24,45

Fonte: autoria própria (2021)

Com isso, para cada porcentagem de aumento foi realizada a simulação variando o nível de reservatório a cada 10 cm, com o objetivo de atender as pressões mínimas na rede, que é 10 mca, conforme o informado na NBR 12218 (ABNT, 2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

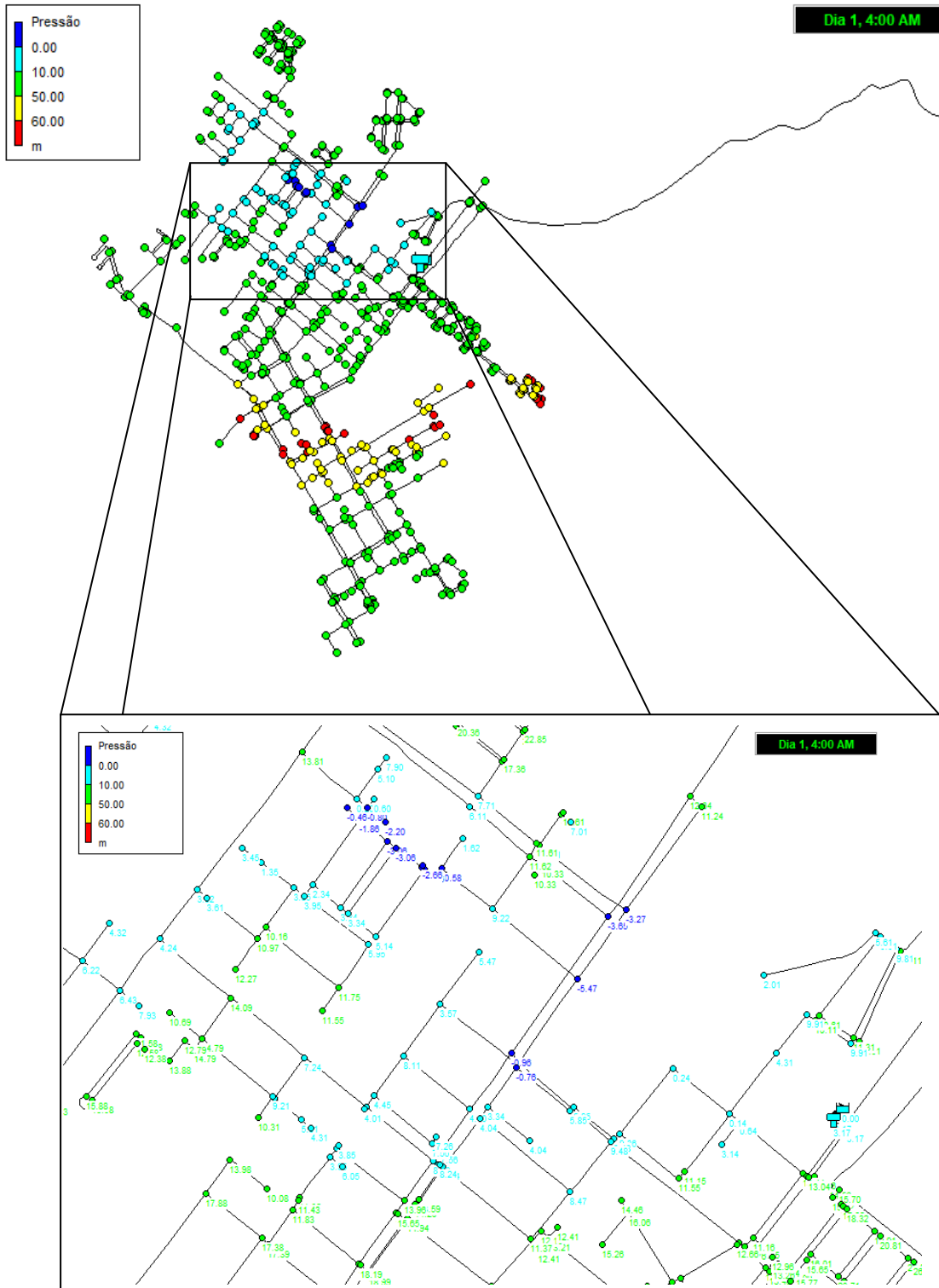
Os resultados serão apresentados considerando a avaliação dos níveis do reservatório e das pressões na rede com relação a dias sem exportação e com exportação de água. Além disso, também são apresentados resultados de um aumento percentual de consumo na rede de distribuição.

5.1 Inserção do *booster*

A rede possui um *booster* que abastece as áreas com menor pressão, mas para analisar esse comportamento, primeiramente foi realizada uma simulação sem a inserção do *booster*, para observar a necessidade do mesmo.

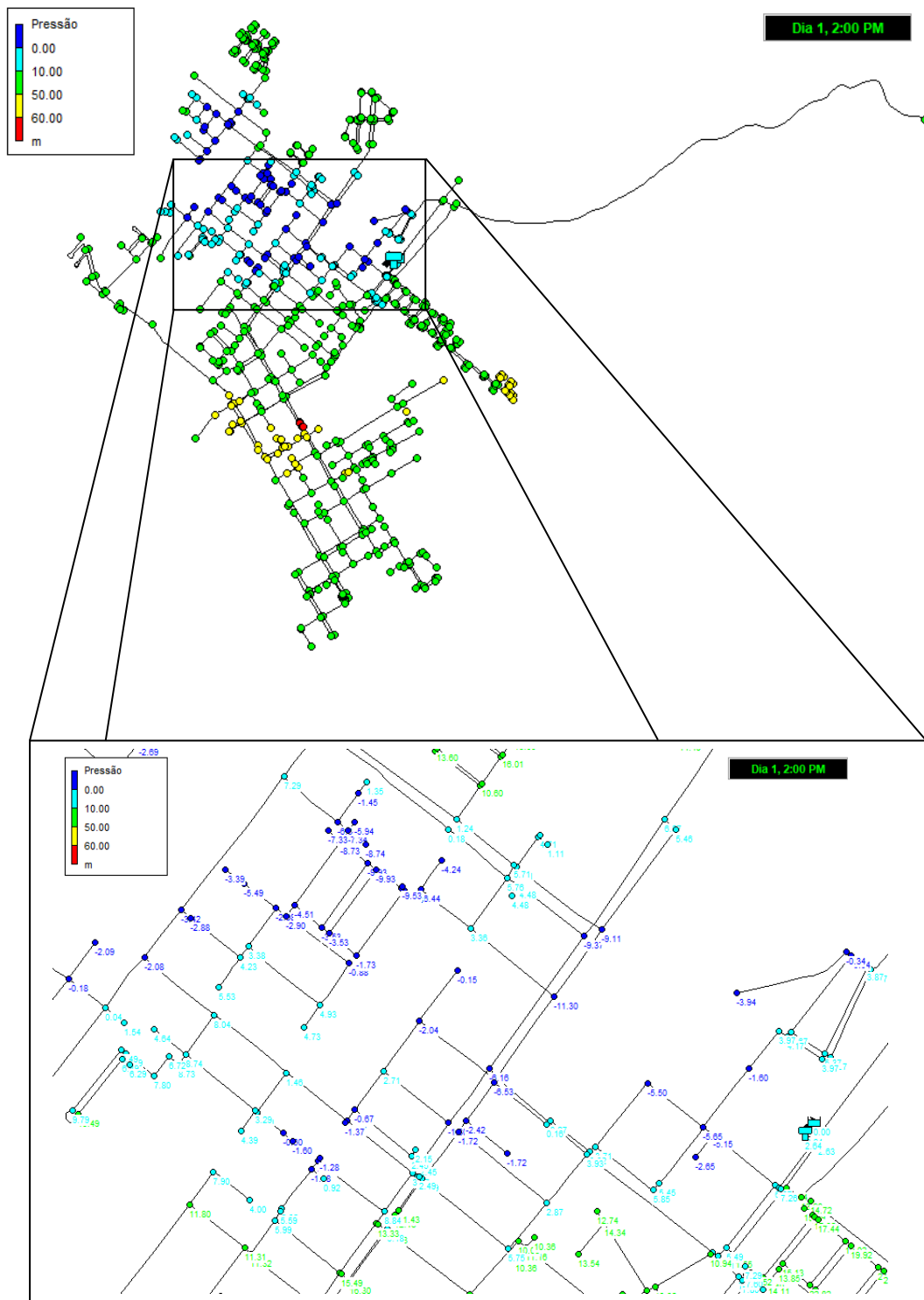
Foi considerada a análise com reservatório em condição atual de funcionamento. Os dados de pressão obtidos nos horários de maior e menor consumo na rede estão representados nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

Figura 26 – Pressões nos nós às 4 horas sem o booster



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Figura 27 – Pressões nos nós às 14 horas sem o *booster*



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Com base nas Figuras 26 e 27, pode-se perceber que mesmo com o passar das horas, as regiões com pressões mínimas e máximas são praticamente as mesmas.

Para suprir a demanda das áreas com pressão negativa, é necessário a inserção de um *booster* para que a água seja fornecida com pressões adequadas. No subsistema, há a existência de um *booster* e a área abastecida pelo mesmo pode ser observada na Figura 28.

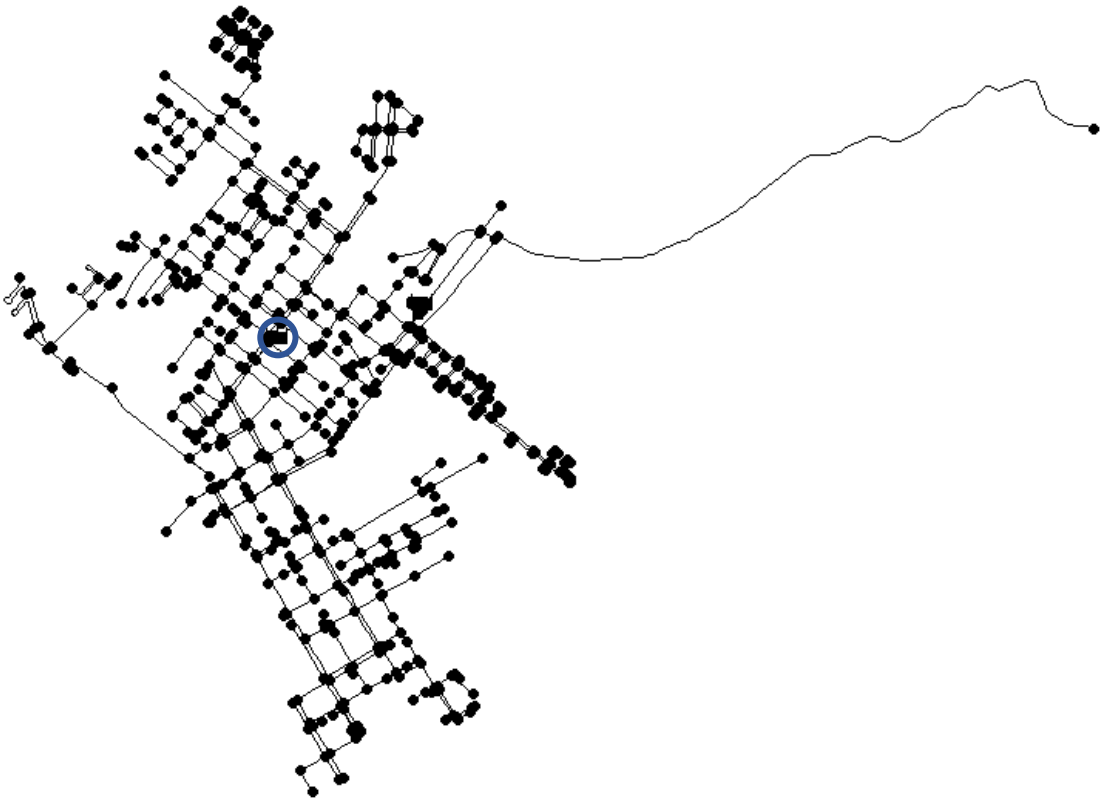
Figura 28 – Área abastecida pelo *booster*



Fonte: Companhia de Saneamento (2021)

Com a análise das Figuras 26, 27 e 28 pode-se notar a semelhança da região onde há as menores pressões e a área abastecida pelo *booster*. Assim, explica-se a necessidade do mesmo para que a região possua as pressões dentro dos limites estabelecidos pela NBR 12218 (ABNT, 2017). A localização do *booster* que possui pressão de saída igual a 30 mca, está representada na Figura 29, circulado na cor azul.

Figura 29 – Localização do *booster*



Fonte: autoria própria (2021)

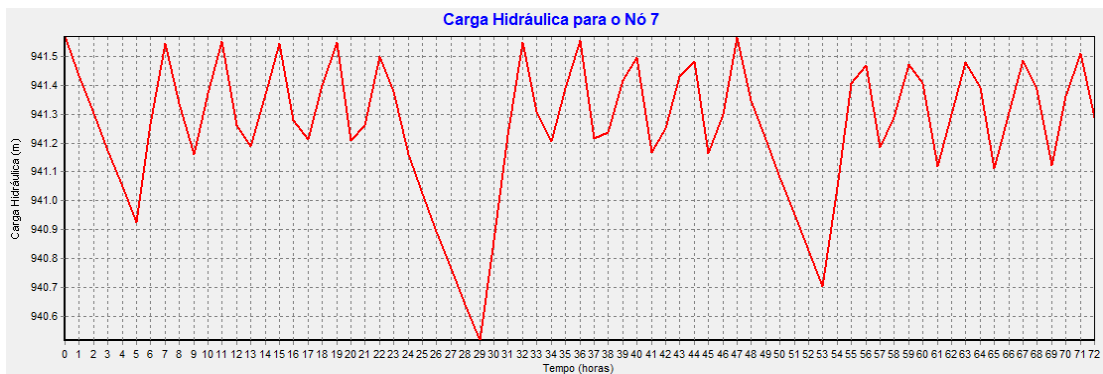
5.2 Análise da simulação em condição atual de funcionamento

O funcionamento atual do sistema operado por chave-boia estabelece nível mínimo de água no reservatório superior é de 3,12 m e nível máximo é de 3,57 m, ou seja, 0,45 m o de desnível operacional.

5.2.1 Simulação sem exportação de água

Em todos os nós foi inserido o consumo de 0,024 L/s, que é o consumo médio em cada nó da região abastecida pelo poço. A carga hidráulica do reservatório, com simulação em 72 horas, pode ser observada na Figura 30, onde o nó 7 é o RNV.

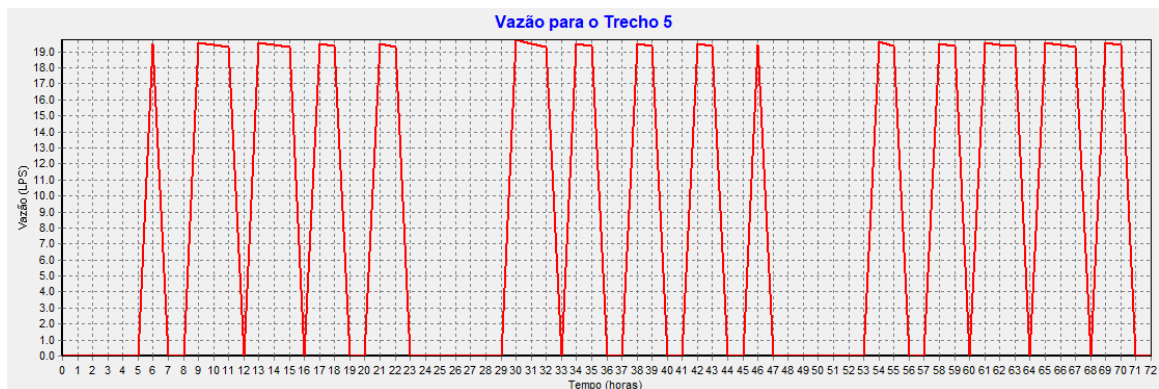
Figura 30 – Carga hidráulica no reservatório, condição atual sem exportação



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Com isso, observa-se que o nível de operação do reservatório varia entre 3,12 m (carga hidráulica 941,12 m) e 3,57 m (carga hidráulica 941,57 m). Os mínimos locais, observados na Figura 30, representam os horários em que a bomba está programada para ficar desligada, assim o reservatório atinge níveis menores. Além disso, também pode-se observar o comportamento da bomba que abastece o reservatório, representada na Figura 31, onde o trecho 5 é a tubulação da bomba.

Figura 31 – Vazão na bomba, condição atual sem exportação



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

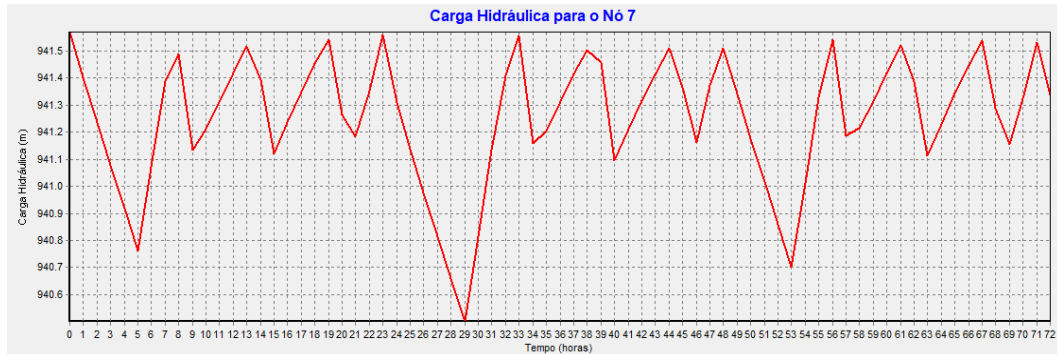
Como a programação do funcionamento da bomba foi adicionada de acordo com o sistema atual, a bomba permanece desligada das 0 às 5 horas, após isso há 5 acionamentos da bomba que se mantém em funcionamento, em média, por 16 horas.

5.2.2 Simulação com exportação de água

Para dias com exportação de água foi inserido o consumo de 2,43 L/s no nó mais extremo, representado um consumo de água que seria exportado para a área

abastecida pelo outro manancial do SAA. Com isso, a carga hidráulica do reservatório é apresentada na Figura 32.

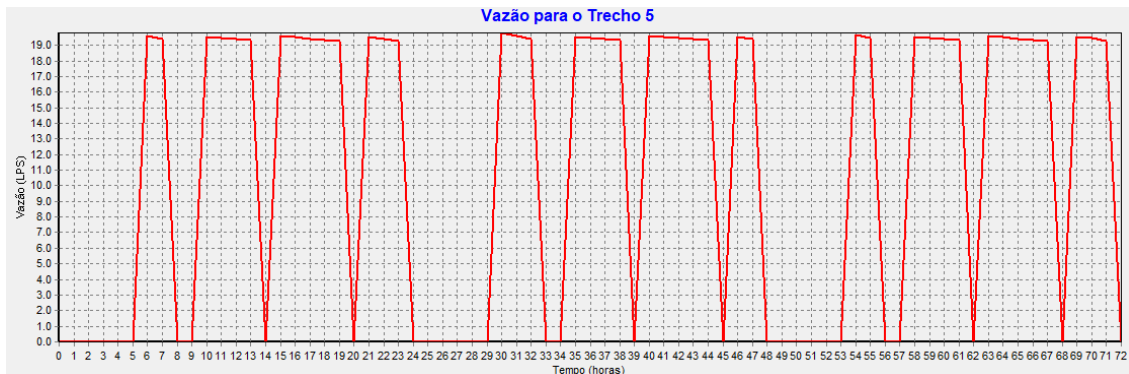
Figura 32 – Carga hidráulica no reservatório, condição atual com exportação



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

O reservatório em dias de exportação possui o mesmo funcionamento, variando o nível de operação entre 3,12 m (carga hidráulica 941,12 m) e 3,57 m (carga hidráulica 941,57 m). Além disso, o nível só ultrapassa o mínimo previsto nos horários em que a bomba está programada para não ligar. Com isso, pode-se observar o comportamento da bomba na Figura 33.

Figura 33 – Vazão na bomba, condição atual com exportação



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

A bomba foi acionada 4 vezes e se manteve em funcionamento por 18 horas diárias, quando houve simulação da exportação.

A diferença efetiva entre as duas simulações, Figura 30 e 32, é o comportamento do reservatório em dias sem exportação e com exportação de água, respectivamente. Deste modo, pode-se observar que em dias sem exportação a bomba é acionada 5 vezes, mas permanece ligada por 16 horas e em dias sem

exportação o acionamento ocorre 4 vezes durante o dia, permanecendo ligada por 18 horas.

5.3 Análise da simulação hidráulica sem exportação de água

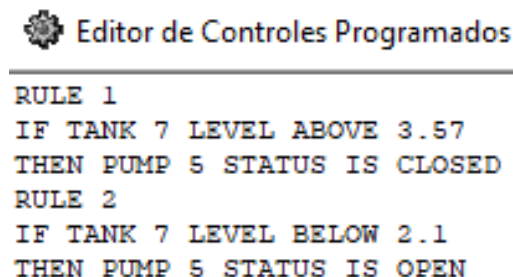
Com a inserção dos dados e do *booster*, pode-se realizar a simulação hidráulica para o subsistema abastecido pelo poço. Para determinar o nível mínimo do reservatório, foram realizadas diversas simulações alterando os níveis em que a bomba será acionada.

Com o nível máximo do reservatório a 3,57 m, foram inseridos os controles programados variando o nível mínimo. Para isso, deve-se adicionar um modo de comportamento do reservatório, uma simulação com controle programado, como apresentado na Figura 34.

O controle programado tem como finalidade regular o funcionamento da bomba, mantendo-a desligada se o nível do reservatório atingir o nível máximo e realiza o acionamento da bomba quando o reservatório atingir o nível mínimo inserido.

Após diversas simulações, pode-se observar que o nível mínimo de operação para a que a rede de distribuição atenda as pressões requisitadas pela NBR 12218 (ABNT, 2017), foi de 2,1 m. As simulações foram realizadas considerando 72 horas de funcionamento para melhor análise do comportamento dos níveis do reservatório, da bomba e das pressões na rede.

Figura 34 – Controle programado do nível mínimo do reservatório sem exportação



```

Editor de Controles Programados


---

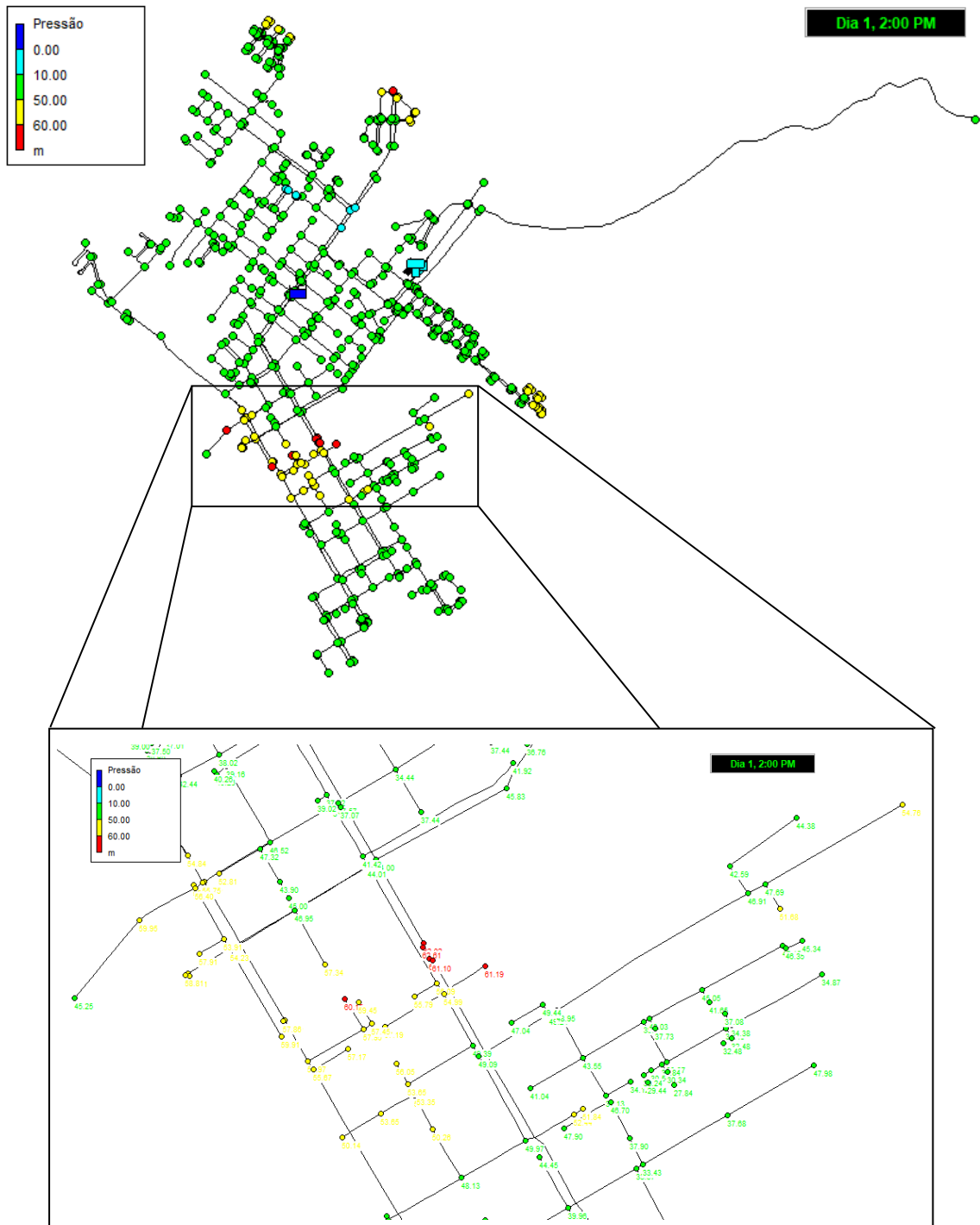

RULE 1
IF TANK 7 LEVEL ABOVE 3.57
THEN PUMP 5 STATUS IS CLOSED
RULE 2
IF TANK 7 LEVEL BELOW 2.1
THEN PUMP 5 STATUS IS OPEN

```

Fonte: autoria própria (2021)

Como o horário de menor consumo é às 4 horas e o horário de maior consumo é às 14 horas, as pressões analisadas nesses horários estão representadas nas Figuras 35 e 36. Para as eventuais condições de sobre pressões (nós em amarelo e vermelho), podem ser utilizadas válvulas redutoras de pressão.

Figura 36 – Pressões na rede sem exportação às 14 horas

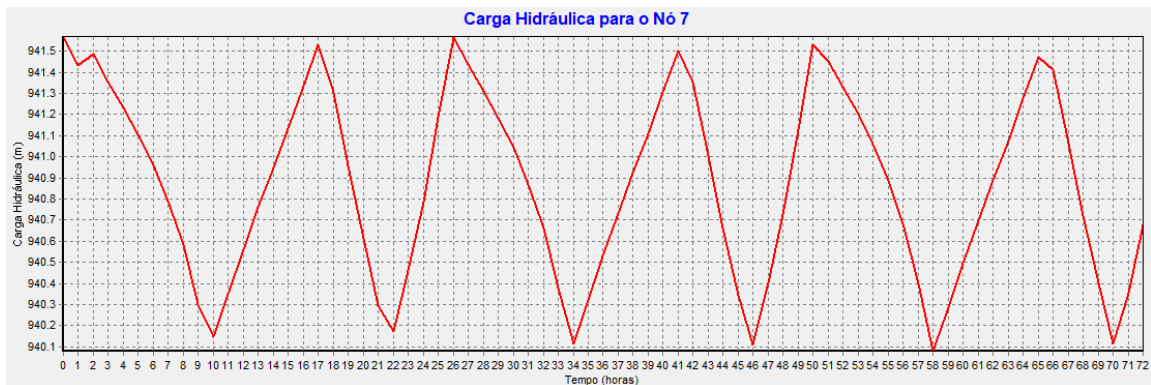


Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Com a análise das Figuras 35 e 36, e comparando com a Figura 15, onde há a representação das cotas dos nós, nota-se que os nós com maiores pressões, são os que possuem as menores cotas. Além disso, pode-se perceber que nos horários em que há maior consumo as pressões nos nós são menores.

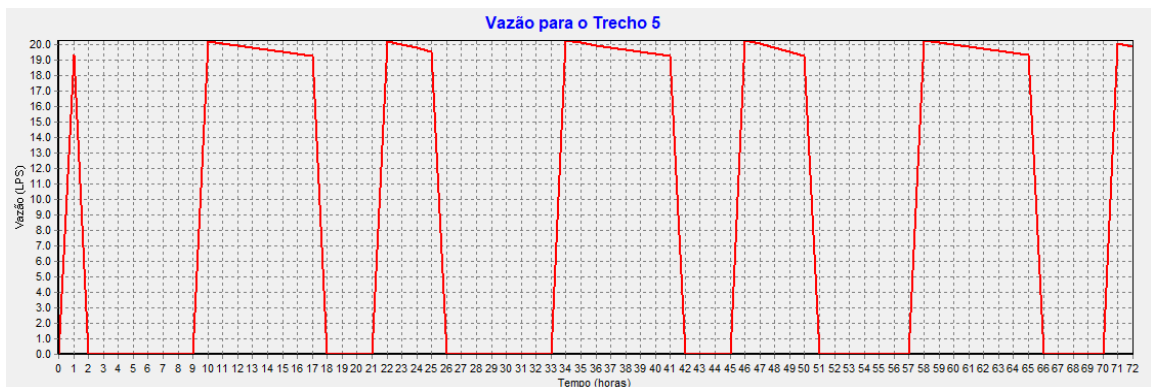
Para os dias em que não há exportação de água, o funcionamento do reservatório é descrito pelo gráfico apresentado na Figura 37 e a vazão da bomba na Figura 38. Deve-se ressaltar que, nessa simulação, foi considerado o desligamento da bomba quando o nível do reservatório atingisse o máximo, que é 3,57 m e o acionamento quando atingisse o nível mínimo, de 2,1 m, possuindo desnível operacional de 1,47 m.

Figura 37 – Carga Hidráulica no reservatório sem exportação



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Figura 38 – Vazão na bomba sem exportação



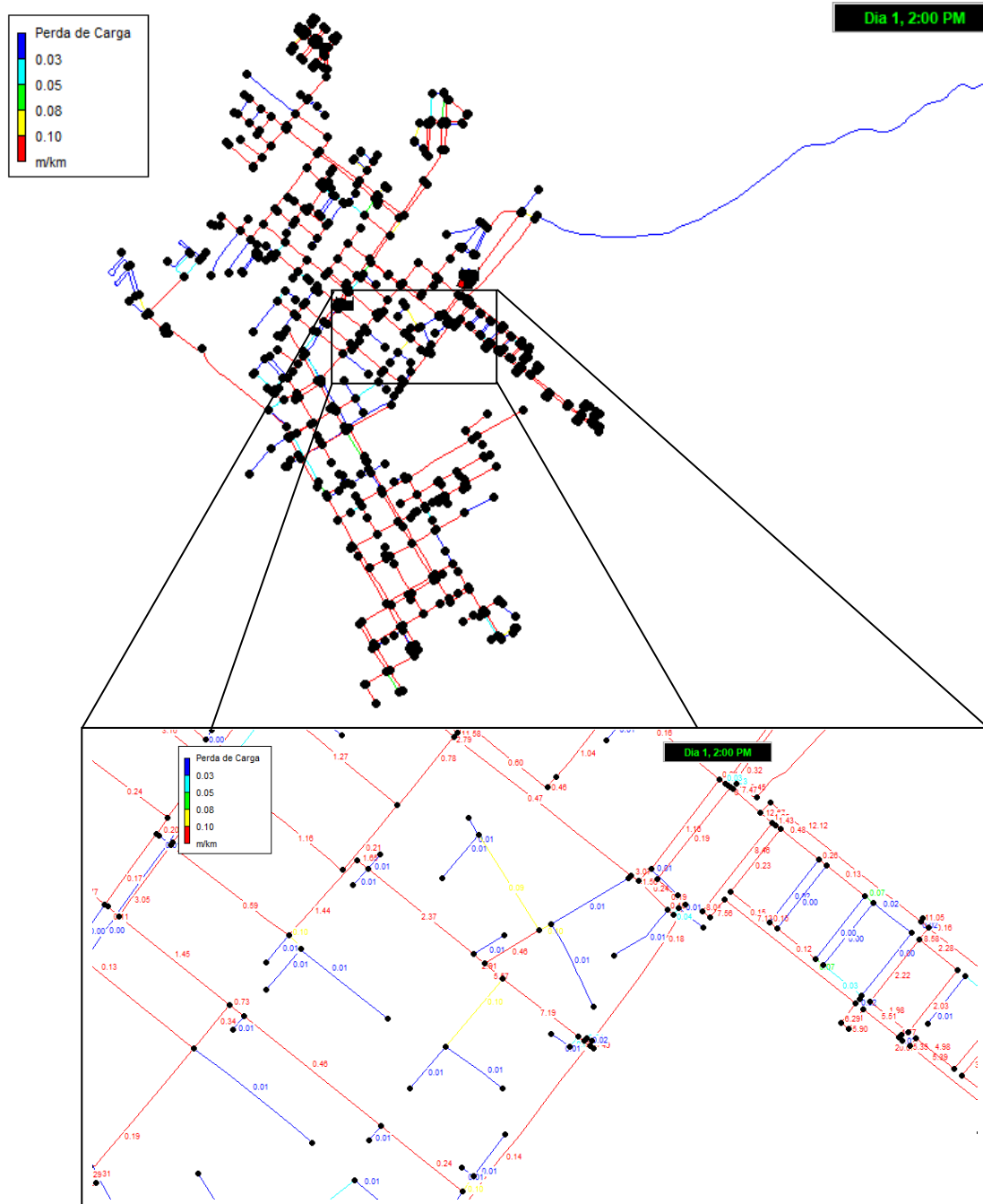
Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Analisando as Figuras 38 e 39, nota-se que a bomba não permaneceu ligada nos horários de ponta, em que o custo da energia é maior. Além disso, pode-se perceber que em 24 horas há o acionamento da bomba durante 3 momentos do dia, permanecendo ligada por 14 horas.

Com esse funcionamento, as vazões e perdas de carga na rede de distribuição estão apresentadas nas Figuras 39 e 40, onde pode-se observar que quanto maior a vazão maior é a perda de carga e a velocidade.

contrário ao desenho da rede no software EPANET 2.0. Além disso, pode-se observar os dados de perda de carga na Figura 40, onde a perda de carga é inversamente proporcional ao diâmetro e ao coeficiente de rugosidade, e diretamente proporcional ao comprimento da tubulação.

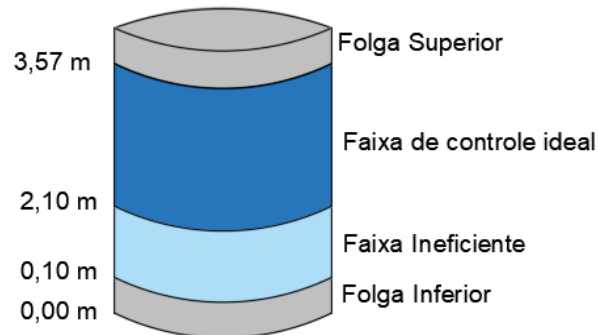
Figura 40 – Perda de carga nas tubulações sem exportação



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Para dias sem exportação de água o nível mínimo de operação do reservatório é 2,1 m, como apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Níveis de operação do reservatório para dias sem exportação



Fonte: autoria própria (2021)

5.4 Análise da simulação hidráulica com exportação de água

As simulações também foram realizadas para os dias de maior consumo, representados pelos dias em que há exportação de água para o outro subsistema do SAA.

Nas simulações para os dias com exportação de água, a vazão de consumo total na rede passa a ser 18,74 L/s, onde 2,43 L/s estão centralizados em apenas um dos nós. Foi observado que, para atender as pressões na rede exigidas pela NBR 12218 (ABNT, 2017), o nível de operação mínimo foi de 2,3 m.

Deve-se ressaltar que nessa simulação foi considerado o desligamento da bomba quando o nível do reservatório atingisse o máximo, que é 3,57 m e o acionamento da bomba quando chegar no nível mínimo de 2,3 m, como apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Controle programado, nível mínimo do reservatório com exportação



Editor de Controles Programados

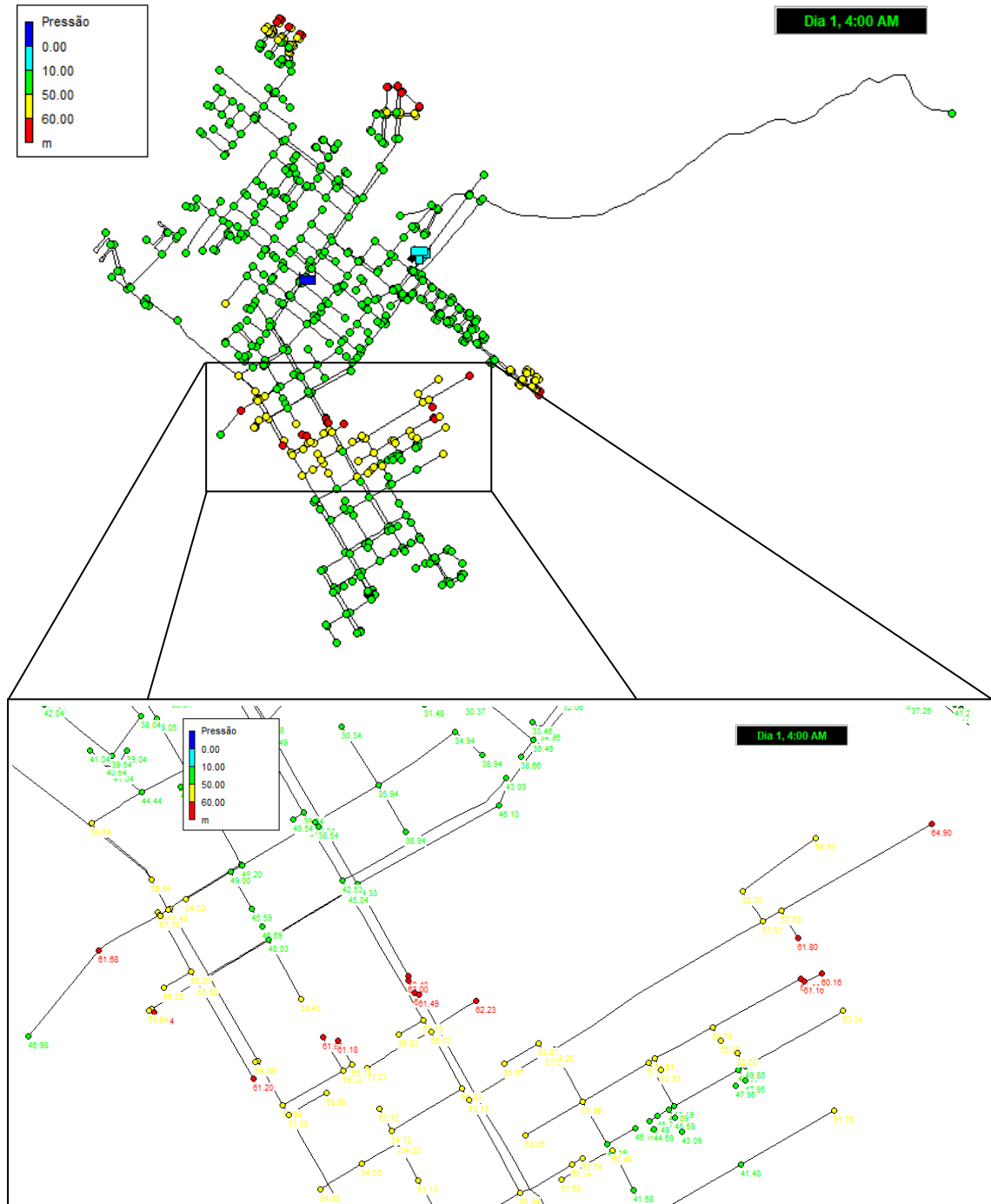
```

RULE 1
IF TANK 7 LEVEL ABOVE 3.57
THEN PUMP 5 STATUS IS CLOSED
RULE 2
IF TANK 7 LEVEL BELOW 2.3
THEN PUMP 5 STATUS IS OPEN
  
```

Fonte: autoria própria (2021)

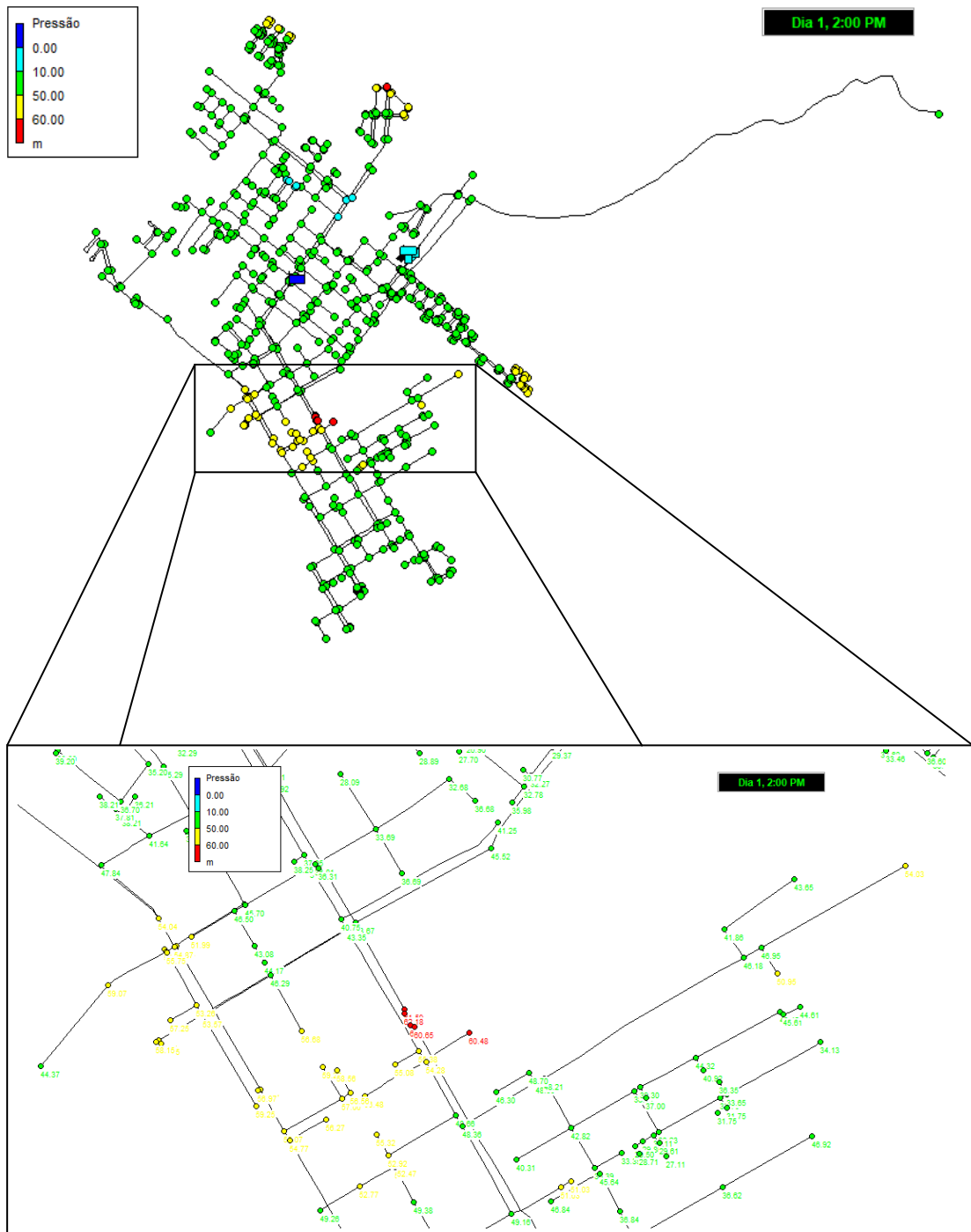
As pressões nos horários de maior consumo, em dias de exportação de água podem ser representadas nas Figuras 43 e 44.

Figura 43 – Pressão nos nós com exportação às 4 horas



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Figura 44 – Pressão nos nós com exportação às 14 horas

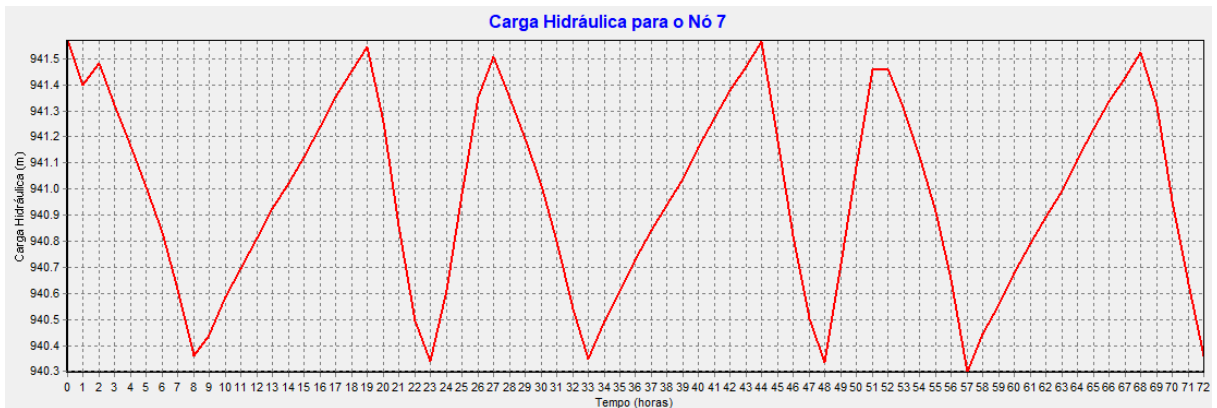


Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Com relação as simulações nos dias com exportação, nota-se que as pressões nos nós são menores do que nos dias sem exportação, já que quando o consumo na rede aumenta as pressões nos nós diminuem.

Com a simulação realizada em 72 horas, a carga hidráulica no reservatório de nível variável está representada na Figura 45.

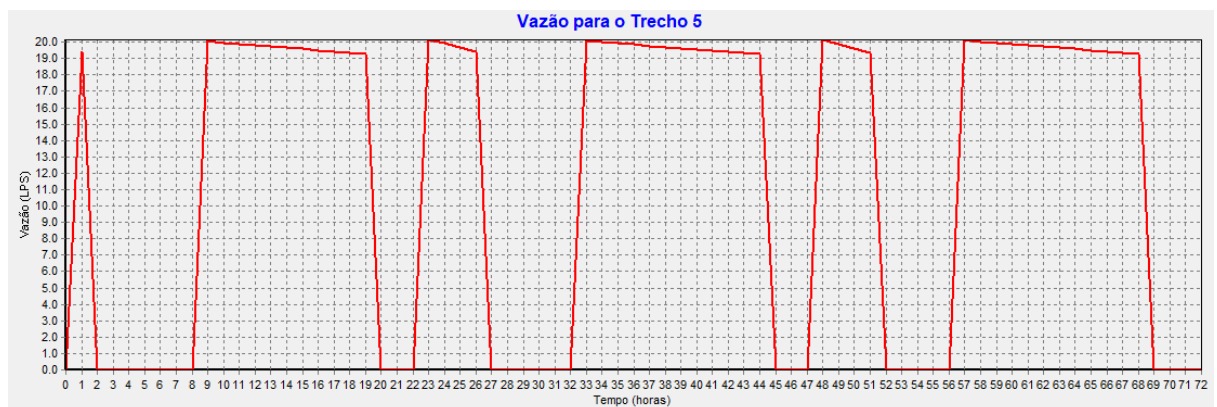
Figura 45 – Carga Hidráulica no reservatório com exportação



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

A partir da Figura 45, observa-se que os níveis de carga hidráulica variam entre 940,3 m e 941,57 m. Com isso, pode-se observar os acionamentos da bomba, como apresentado na Figura 46.

Figura 46 – Vazão na bomba com exportação



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Em dias de exportação de água a bomba será acionada 3 vezes, permanecendo ligada 16 horas do dia. Além disso, pode-se perceber que no horário de ponta a bomba permaneceu ligada por 2 horas.

Em uma tentativa de diminuir os gastos pode-se programar a bomba para não funcionar das 18 às 21 horas. Para isso, foi inserido um programa no software EPANET com a finalidade de manter a bomba desligada no horário de ponta, como representado na Figura 47.

Figura 47 – Controle programado para desligar no horário de ponta, simulação com exportação

Editor de Controles Programados

```

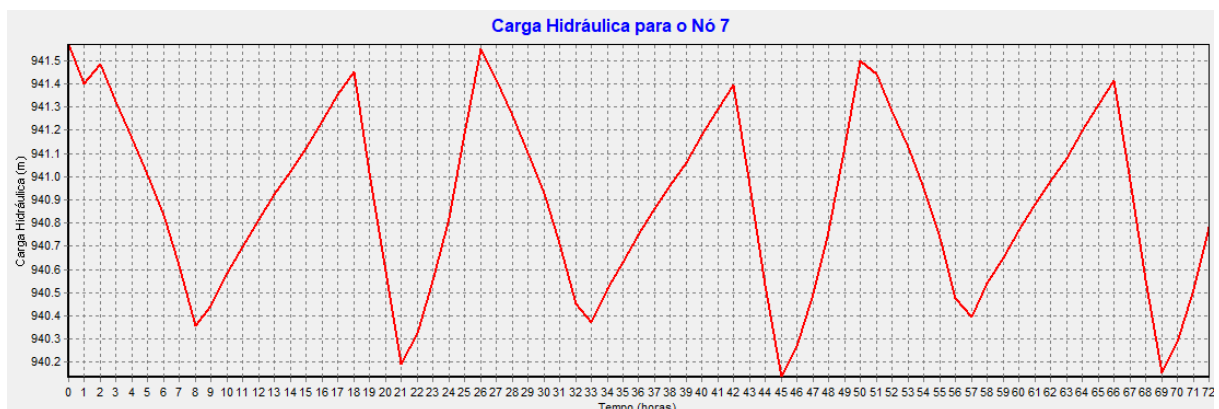
RULE 1
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 6 PM
AND SYSTEM CLOCKTIME <= 9 PM
THEN PUMP 5 STATUS IS CLOSED
RULE 2
IF TANK 7 LEVEL ABOVE 3.57
THEN PUMP 5 STATUS IS CLOSED
RULE 3
IF TANK 7 LEVEL BELOW 2.3
THEN PUMP 5 STATUS IS OPEN
  
```

Fonte: autoria própria (2021)

Na Figura 47 pode-se observar que a regra 1 mantém a bomba desligada no horário de ponta, a regra 2 controla a bomba para desligar quando o nível do reservatório atingir 3,57 m e a regra 3 programa a bomba para ligar se o nível do reservatório for menor que 2,3 m.

Com isso, o novo comportamento do reservatório pode ser observado na Figura 48, através dos dados de carga hidráulica.

Figura 48 – Carga hidráulica do reservatório com exportação, sem bombear no horário de ponta



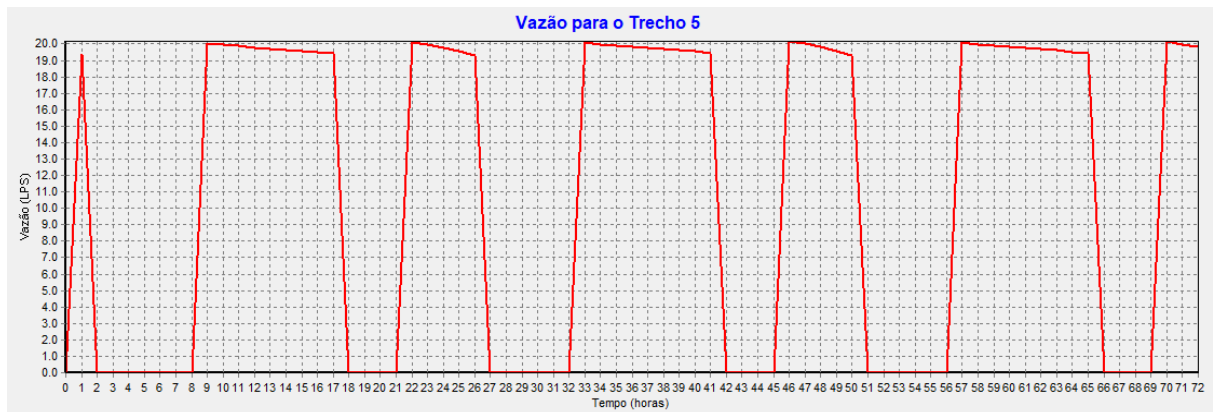
Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

A partir da Figura 48, observa-se que os níveis de carga hidráulica variam entre 940,1 m e 941,57 m, ultrapassando em 20 cm o nível mínimo do reservatório. Esses picos em que o nível é menor que o mínimo acontecem nos horários de ponta em que a bomba foi programada para permanecer desligada. Com isso, alguns nós,

adquirem valores de pressão um pouco menores que os recomendados pela NBR 12218 (ABNT, 2017). Deste modo, deve ser avaliado se essa programação para não funcionamento em horário de ponta durante os dias em que há exportação é realmente eficaz.

Nesse comportamento, acontecem 3 acionamentos na bomba e esta mantém-se funcionando por 16 horas no dia., como apresentado na Figura 49.

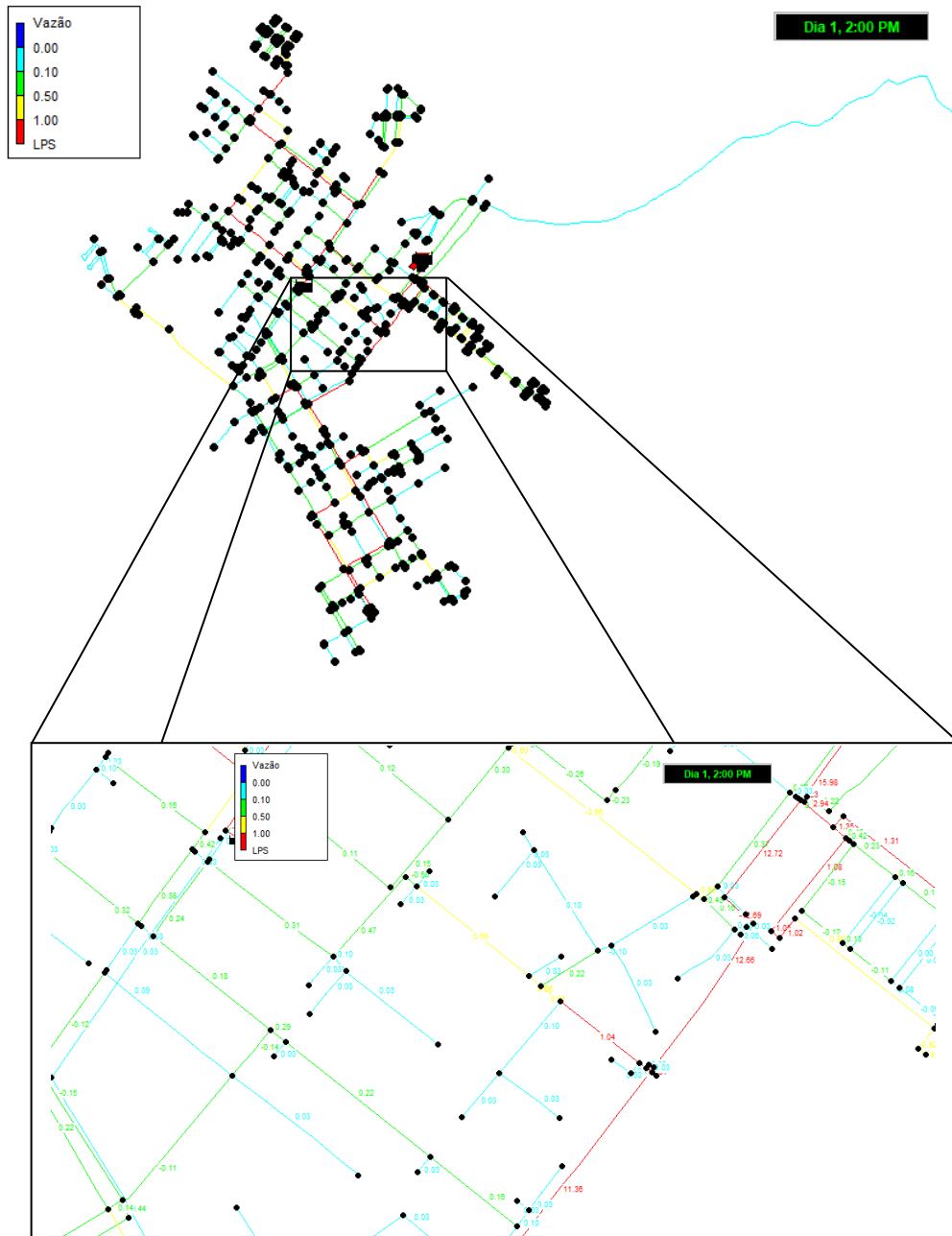
Figura 49 – Vazão na bomba com exportação, sem funcionar no horário de ponta



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Com a simulação realizada no EPANET, sem o desligamento no horário de ponta, pode-se observar as vazões nas tubulações às 14 horas, como apresentado na Figura 50, em que os valores das vazões são maiores nas tubulações que possuem maior diâmetro.

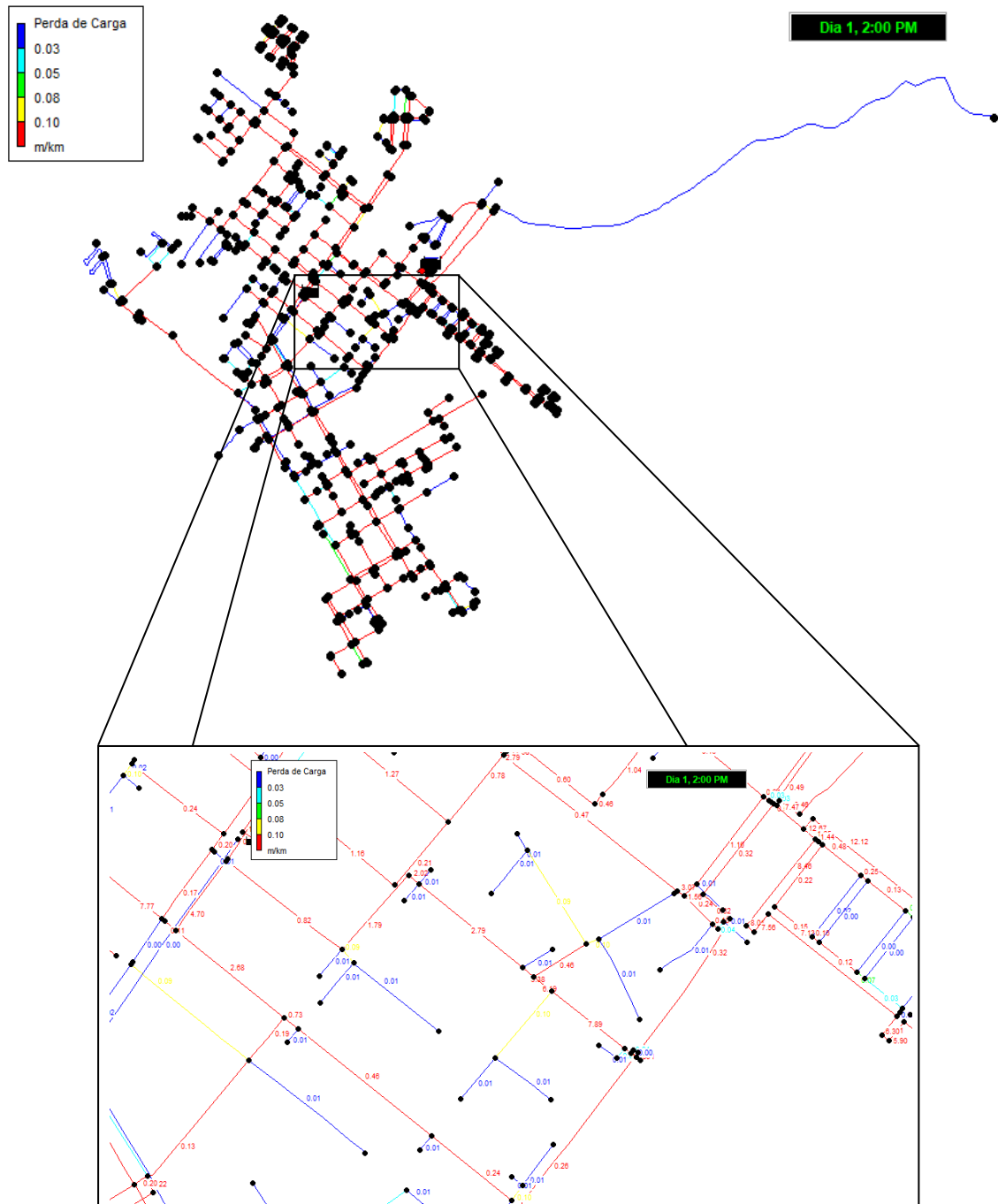
Figura 50 – Vazão nas tubulações às 14 horas, simulação com exportação



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Além disso, realizando a simulação, também pode-se obter os valores da perda de carga das tubulações, como representado na Figura 51.

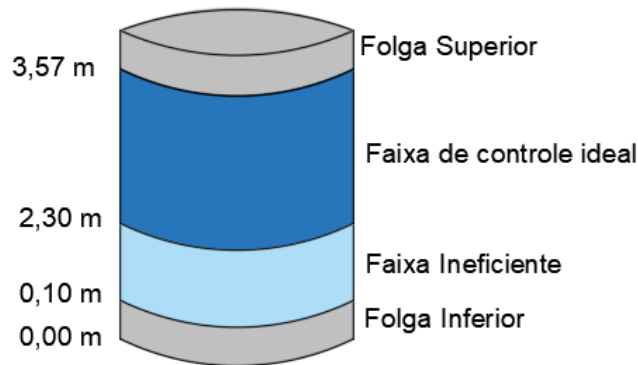
Figura 51 – Perda de carga nas tubulações às 14 horas, simulação com exportação



Fonte: gerado no EPANET 2.0 (2021)

Deste modo, o reservatório nos dias com exportação possui nível mínimo de operação 2,3 m e nível máximo de 3,57 m, como representado na Figura 52.

Figura 52 – Níveis do reservatório para dias com exportação



Fonte: autoria própria (2021)

5.5 Simulação variando o consumo na rede de distribuição

As simulações foram realizadas considerando aumentos no consumo na rede de distribuição. Deste modo, o nível mínimo do reservatório sofrerá alteração, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Simulação de variação de consumo

Simulação	Consumo em cada nó (L/s)	Nível mínimo do reservatório (m)	Horário de funcionamento do conjunto motobomba (h)
Atual	0,024	2,1	14
Aumento de 10%	0,0264	2,3	16
Aumento de 20%	0,0288	2,6	16
Aumento de 30%	0,0312	3,0	21
Aumento de 40%	0,0336	3,3	21
Aumento de 50%	0,036	Maior que 3,57	-

Fonte: autoria própria (2021)

Pode-se observar que com aumento de 40% do consumo, o nível de operação do reservatório é de 0,27 m e com consumo maior que este o reservatório passa a ser ineficiente para atender as pressões na rede. Além disso, quanto maior o consumo na rede, mais tempo a bomba terá que funcionar. Caso haja um consumo maior que 40% do consumo médio atual, a proposta para tornar o sistema mais eficiente seria o aumento da capacidade de reserva, ou seja, aumento do reservatório ou a construção de mais um reservatório para suprir a demanda do sistema.

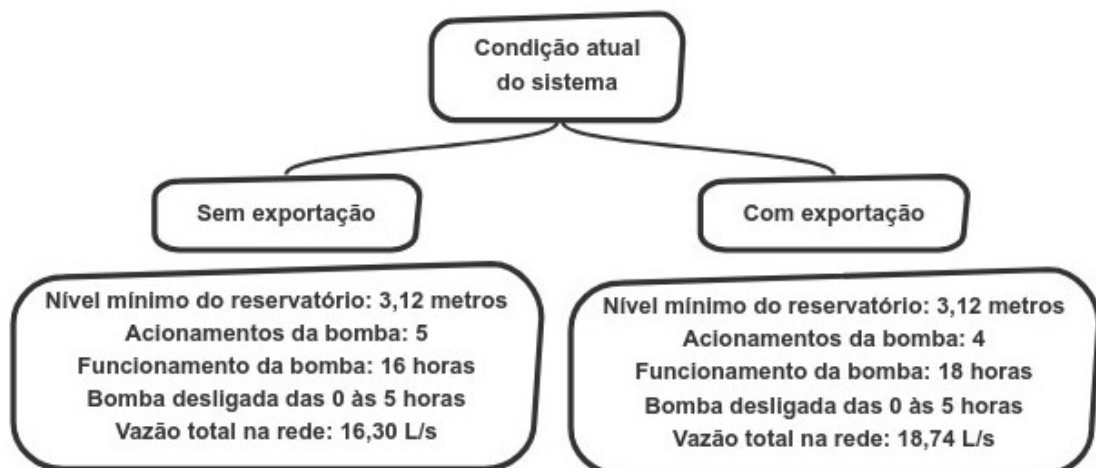
Se houver aumento de consumo na rede, deve ser avaliado se é mais vantajoso manter os conjuntos motobomba funcionando por mais tempo, ou o

aumento da capacidade de reservação. As análises do sistema devem ser realizadas de forma criteriosa, pois tudo impacta em custos que devem ser avaliados.

5.6 Comparativo dos resultados das simulações

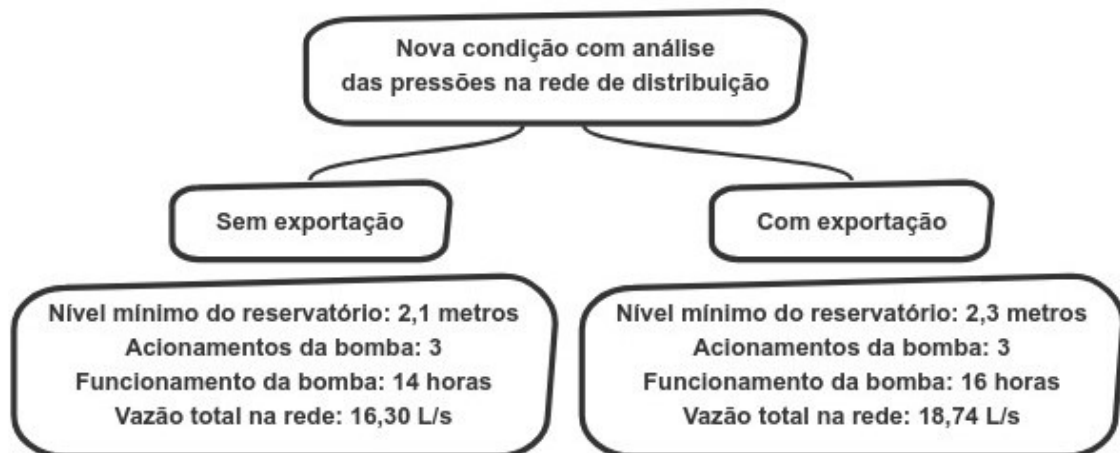
Após todas as simulações realizadas, nas Figura 53, 54 e 55, pode-se observar um comparativo da variação dos níveis do reservatório em todas as simulações, o acionamento dos bombeamentos e o horário de funcionamento da bomba na simulação da condição atual do sistema e da nova condição que foi obtida através da análise das pressões na rede.

Figura 53 – Comparativo dos resultados obtidos na condição atual do sistema



Fonte: autoria própria (2021)

Figura 54 – Comparativo dos resultados obtidos na nova condição



Fonte: autoria própria (2021)

Figura 55 – Comparativo dos resultados obtidos na variação do consumo



Fonte: autoria própria (2021)

A análise dos comparativos permite observar que com o novo modelo de simulação, com maior nível operacional do reservatório, há a diminuição em 2 horas de funcionamento do conjunto motobomba. Além disso, nota-se que com o aumento percentual do consumo, o nível mínimo do reservatório aumenta, com a finalidade de suprir a demanda do sistema.

CONCLUSÃO

O escopo deste trabalho foi a realização da simulação hidráulica de um sistema de abastecimento de água, com objetivo de avaliar as condições operacionais da rede, especialmente no que tange as pressões mínimas e máximas. As simulações do sistema abastecido por captação subterrânea foram realizadas no software EPANET 2.0, para avaliar o comportamento do sistema de bombeamento, os níveis de água do reservatório e a rede de distribuição de água. No estudo, foram considerados cenários sem e com exportação de água do reservatório avaliado para outro, no mesmo SAA.

As simulações hidráulicas do sistema contribuem com a promoção da eficiência energética de SAAs, em resposta aos gastos com as falhas no sistema de saneamento, indicados pelo Plano Nacional de Eficiência Energética (2011).

Atualmente, a Companhia de Saneamento adota como desnível de operação do reservatório 45 cm, já que o nível máximo é 3,57 m e o mínimo 3,12 m. Nos dias em que há maior número de acionamentos do sistema de bombeamento são os dias em que há menor consumo de água, quando o reservatório abastece apenas a rede avaliada, sem exportar água. Isso ocorre porque, nesse cenário, os níveis operacionais máximo e mínimo do reservatório são atingidos e, com isso, o sistema de bombeamento é acionado e desligado. Nos dias em que há maior consumo, tanto pela rede, quanto por exportação, ocorre um menor número de acionamentos, mas a bomba permanece ligada por mais tempo, já que o consumo passa a ser maior que a vazão bombeada e, conseqüentemente, o nível máximo, que denota o desligamento do sistema, acaba não sendo atingido.

Com a simulação hidráulica, pode-se determinar um novo padrão de funcionamento para o sistema, onde o nível mínimo que o reservatório pode atingir em dias sem exportação é 2,1 m, e 2,3 m, nos dias com exportação. Esses valores possibilitam utilização mais racional do reservatório, sem deixar de atender a pressão mínima de 10 mca na rede de abastecimento.

Cabe ressaltar que, ao utilizar melhor o volume do reservatório, pode-se evitar a operação do sistema de bombeamento no período de ponta e diminuir o número de acionamentos ao longo do dia, o que contribui para a vida útil dos equipamentos.

Por fim, destaca-se que o controle das pressões nas tubulações proporciona a diminuição das perdas físicas por vazamentos. Assim, a proposta para trabalhos futuros seria avaliar as perdas de água na rede de distribuição, relacionando essa informação com a variação das pressões.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12211**: Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

_____. **ABNT NBR 12214**: Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. **ABNT NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. **ABNT NBR 12217**: Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **ABNT NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 2017.

AVILA, E. C. G. **Estudo da variação de pressões de serviço em pontos da rede de abastecimento de água da cidade de Itatiba**. 2007. Monografia - Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco, Itatiba, 2007.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. 9 ed. Editora Bluncher. São Paulo, 2018. 632 p.

BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento. **Avaliação de Sistemas de Bombeamento de Água: Manual de Eficiência Energética**. 2011. Disponível em: <https://publications.iadb.org/en/avaliacao-de-sistemas-de-bombeamento-de-agua-manual-de-eficiencia-energetica>. Acesso em 01 nov. 2021.

BOUZON, M.; COELHO, A.S.; RODRIGUEZ, C. M. T. Determinação do padrão de operação ótimo para o custo energético de um sistema de distribuição de água. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v.13, n. 2, p. 500-519, abr./jun. 2013.

CHAVES, M.T.L.; LIMA, G. S.; ALVES, M. F. A.; CAVALCANTE, D. M.; TAVARES, R. G. Avaliação da Qualidade da água de mananciais do estado de Pernambuco por caracterização de parâmetros físico-químicos. **Revista de Geografia**, Recife, v.37, n. 2, 2020.

COMPANHIA DE SANEAMENTO. **Área abastecida pelo booster - 2021**. Não publicado.

COMPANHIA DE SANEAMENTO. **Dados do poço - 2003**. Não publicado.

COMPANHIA DE SANEAMENTO. **Dados do reservatório e do conjunto motobomba do subsistema abastecido pelo poço- 2020**. Não publicado.

COMPANHIA DE SANEAMENTO. **Projeto da rede de abastecimento - 2020**. Não publicado.

EBARA. **Catálogo de seleção de curvas e cabos**. CT 255-09-17. 2017. Disponível em: < <http://tubogeo.com.br/wp-content/uploads/2018/03/Catalogo-Ebara.pdf>>.

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

FRANCATO, A. L. **Otimização Multiobjetivo para a Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

FREIRE, M. R. **Modelo para setorização de Redes de Distribuição de Água**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Fundação Nacional de Saúde (FUNASA). **Manual de Saneamento**. 4 ed. Brasília: Funasa, 2017.

GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. **Manual de Sistemas de Bombeamento: eficiência energética**. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2012.

HELLER, L. PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

IANCU J., DIMACHE A. N., GEORGESCU S. C., GEORGESCU, A. M. **EPANET modeling of an urban groundwater field**. Technical University of Civil Engineering Bucharest, Hydraulics and Environmental Protection Department. Romania, 2019.

KURITZA, J. C. **Metodologia para avaliação da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água com velocidade de rotação variável**. 2017. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

LACERDA, I. S. **Regras de operação para sistemas de abastecimento de água com baixo nível de automação e sujeitos a incertezas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (Brasil), 2009.

LIMA, G. de.; TUCCI, C. E. M.; ESTIGONI, M. V.; COLOSSI, B. R.; MOL, M. L. **Uso de Mananciais Subterrâneos e Superficiais como Alternativa para Abastecimento Público ao Longo do Rio Doce**. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Campinas – São Paulo, 2018. **Anais eletrônicos: e-ISSN 2179-9784**. São Paulo, 2018.

LUCENA, K. F. M. **Aplicação de modelos de otimização na operação de sistemas elevatórios em redes de abastecimento de água**. **Revista Principia – Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 51, p. 166-180, set. 2020.

MUNIZ, G. **Medida de Eficiência Energética no sistema de abastecimento de água do Rio das Velhas na região metropolitana de Belo Horizonte**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

NOLLI, N. A. V. **Investigação experimental do comportamento de fraturas em tubos de PVC submetidos à variações de pressão**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

ORELLANA, A. MARTIM, A. L. S. S.; ZUFFO, A. C.; DALFRÉ FILHO, J. G. Contribuição ao planejamento de reabilitação de redes de distribuição de água.

Revista Iberoamericana del Agua, 2018. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1495991>>. Acesso em: 14 de set. de 2021.

PALO, P. R. **Avaliação da eficácia de modelos de simulação hidráulica na obtenção de informações para diagnóstico de perdas de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

PEDROSA, H. T. S.; MENDONÇA, M. H. V. de; GALVÃO, L. C. R. Definição do Abastecimento de água com intermitências através de simulação hidráulica – Estudo de caso – São Bento do Uma -PE. *In: 30° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*. Natal, 2019. **I- 232**. Natal, 2019.

PEDROSA, H. T. S. Otimização Operacional de reservatório na busca da eficiência energética (Reservatório de Jordão de 90.000 m³, Sistema Pirapama-PE). *In: 30° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, Natal. 2019. **XI-005**. Natal, 2019.

Plano Nacional de Eficiência Energética – Premissas e diretrizes básicas, Ministério de minas e energia/Secretaria de planejamento e desenvolvimento energético, 2011.

PNCDA - Programa Nacional de Combate ao Desperdício de água. - **DTA D1. Controle de Pressão na Rede**. Brasília: Secretaria de Política Urbana, 1999.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. EESC-USP, São Carlos, 2006.

PROCEL SANEAR. **Plano de Ação Procel Sanear**. Eletrobrás, 2006.

REGO, A. A. C. **Integração de ferramentas SIG para otimização de sistema adutor com recurso ao EPANET**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2007.

REGO, A. G. **Desenvolvimento e aplicação de metodologia para avaliação de desempenho hidroenergético de sistemas de abastecimento de água**. 2016. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos, Universidade Federal do Pará. Belém, 2016.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2.0: Manual do Usuário** Tradução e adaptação de Heber Pimentel Gomes e Moisés Menezes Salvivo. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba, 2009.

SILVA, J. H. F. **Exploração das potencialidades do programa EPANET na Simulação Hidráulica de Sistemas de Abastecimento de água**. 2008. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Portugal, 2008.

SILVA, J. P. S. da. **Modelo de sistema de automação aplicado à operação de redes de abastecimento hídrico**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Energia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SILVA, P. H. B. **Análise hidroenergética de sistema de abastecimento de água: estudo de caso em sistema com captação subterrânea**. 2021. Monografia – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

SOUZA, J. D. S.; CAVALCANTI, M. B.; SANTOS, T. A. S.; MACEDO, J. E. S.; BEZERRA, S. T. M. Aplicação de um modelo se simulação hidráulica dirigido pela pressão em um sistema de distribuição de água. 30° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal, 2019. **I-186**. Natal, 2019.

SUZUMURA, M.; SOARES, D. Maximização da gestão de pressão através da implantação do controle pelo ponto crítico. *In*: CONGRESSO ABES FENASAN. São Paulo – SP, 2017. **XI-003**. São Paulo, 2017.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3 ed. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo, 2005.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **EPANET**, 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/epanet>. Acesso em: 16 de abril de 2021.

WIDIARTI, W.Y.; WAHYUNI, S; WIYONO, R.U.A.; HIDAYAH, E.; HALIK, G.; SISINGGHI, D. **Evaluation of pipe network distribution system using EPANET 2.0 (a case study of the city of Jember)**. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2020.