

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAIO BARRETO DE OLIVEIRA REIS

**SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE CENÁRIOS: ESTUDO DE CASO NO SISTEMA DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE GUARAVERA-PR**

LONDRINA

2022

CAIO BARRETO DE OLIVEIRA REIS

**SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE CENÁRIOS: ESTUDO DE CASO NO SISTEMA DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE GUARAVERA-PR**

**HYDRAULIC SCENARIO SIMULATION: CASE STUDY IN THE GUARAVERA-PR
WATER SUPPLY SYSTEM**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Ajadir Fazolo

Coorientadora: Profª. Ligia Flávia Antunes Batista

LONDRINA

2022



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

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

CAIO BARRETO DE OLIVEIRA REIS

**SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE CENÁRIOS: ESTUDO DE CASO NO SISTEMA DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE GUARAVERA - PR**

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

Data de aprovação: 21/06/2022

Mariane Kempka
Doutora em recursos hídricos e saneamento ambiental
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Renato Leandro Beregula
Mestre em recursos hídricos
Universidade Federal do Mato Grosso

Ajadir Fazolo
Doutor em engenharia hidráulica e saneamento
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2022

Dedico este trabalho a Deus, minha família e todas as pessoas que estiveram comigo nesse período de graduação.

AGRADECIMENTOS

Esse tópico é um dos mais importantes desse trabalho para mim, porque considero a gratidão algo impensável de se recusar. Alguns sacrifícios precisaram ser feitos até a minha graduação se concretizar, mas eles não foram só meus, muitas pessoas e a UTFPR, acreditaram em mim desde os meus primeiros passos no curso de Engenharia Ambiental até agora no fim, por isso, gostaria de citar alguns nomes por todo o apoio que me deram.

Primeiramente queria honrar a Deus pela oportunidade que me deu de estudar na UTFPR e de conhecer Londrina, a minha família, em especial, minha mãe Denise de Oliveira Reis e meu avô Manoel Barreto de Oliveira Filho, aos meus orientadores Ajadir Fazolo e Lígia Flávia Antunes Batista aos quais aprendi a ter profunda admiração, aos amigos que fiz em especial: Marcos Cordeiro Moreira, Gabriel Shindi Taketomi, Felipe Elias Teodoro Moraes, Cristian Noronha e Cláudia Chagas e a UTFPR.

Há muitos outros nomes que eu gostaria de estar digitalizando nessa parte, mas infelizmente não é possível, porém espero que se sintam representadas pelos nomes e instituições que citei anteriormente e quero que saibam que eu sou grato e ciente de qualquer mínimo esforço que tenham feito para alavancar minha carreira acadêmica.

A vitória está reservada para aqueles que estão
dispostos a pagar o preço.
(Sun Tzu)

RESUMO

O objetivo deste trabalho, foi modelar e simular hidraulicamente o comportamento do sistema de abastecimento de água (SAA) de Guaravera, PR. O SAA considerado é composto por dois poços profundos, bombas e adutoras de recalque de água tratada, e reservatório elevado de sobras, além da rede de distribuição de água. Os dados foram obtidos a partir de fontes abertas, disponíveis na internet. Na modelagem e simulações dinâmicas foi utilizado o software Epanet, alimentado por dados de arquivo Autocad e do QGIS. Foram simulados (4) quatro cenários: 1) injeção da água na rede de distribuição pela bomba submersível do poço (B1) e reservatório elevado de sobras (REL); 2) injeção da água na rede de distribuição pela bomba centrífuga com motor externo (B2) abastecida pelo reservatório apoiado (RAP) e abastecendo o reservatório elevado de sobras (REL); 3) injeção da água na rede de distribuição pela bomba (B2) associada a inversor de frequência, abastecida pelo RAP e 4) abastecimento da rede pelo REL, alimentado pela bomba B2. Dentre os principais resultados das modelagens e simulações podem citar a vazão máxima de 13,17 L/s no horário de 12h:30min e a vazão mínima de 3,37 L/s no horário das 4h:30min, a população estimada para o ano de 2050 foi de 3093 habitantes, as maiores pressões nos nós analisados (n35,n48 e n66) ocorreram no cenário 2 no horário das 4h:30min com 67.87 m.c.a, 33.76 m.c.a e 22.15 m.c.a respectivamente. As menores pressões nos nós analisados (n35, n48 e n66) aconteceram no cenário 4 no horário das 12h:30min com 44.28 m.c.a, 10.45 m.c.a e 1,09 m.c.a respectivamente. Esses resultados principais indicam que o SAA atende as demandas atual e futura de água por outro lado, a topografia da área abastecida e a configuração da rede de distribuição testada, não permitem o atendimento das pressões, recomendadas pela NBR 12.218/2017, em nenhum cenário, apenas por manobras operacionais. A injeção da água na rede de distribuição com bombeamento associado ao inversor de frequência (cenário 3), apresentou menores variações das pressões nos nós, o que possivelmente, reduz os danos e rompimentos nas tubulações minimizando as perdas de água. Além disso, no cenário 3, os custos com energia elétrica para o bombeamento, foram os mais baixos, com 0,52 kWh/m³ e R\$ 146,7 por dia.

Palavras-chave: Modelagem Hidráulica, Epanet, Perdas de água, Rede de distribuição, Qgis e Autocad

ABSTRACT

The objective of this work was to model and hydraulically simulate the behavior of the water supply system (WAS) in Guaravera, PR. The SAA considered is composed of two deep wells, pumps and pipelines for the discharge of treated water, and an elevated leftover reservoir, in addition to the water distribution network. Data were obtained from open sources, available on the internet. The Epanet software was used for modeling and dynamic simulations, fed by data from Autocad and QGIS files. Four scenarios were simulated: 1) injection of water into the distribution network by the submersible pump in the well (B1) and elevated leftover reservoir (REL); 2) injection of water into the distribution network by a centrifugal pump with an external motor (B2) supplied by the supported reservoir (RAP) and supplying the elevated leftover reservoir (REL); 3) injection of water into the distribution network by the pump (B2) associated with a frequency inverter, supplied by the RAP and 4) supply of the network by the REL, fed by the B2 pump. Among the main results of the modeling and simulations, the maximum flow of 13.17 L/s at 12h:30min pm and the minimum flow of 3.37 L/s at 4h:30min am can be mentioned, the estimated population for the year 2050 was 3093 inhabitants, the highest pressures at the analyzed nodes (n35, n48 and n66) occurred in scenario 2 at 4h:30min am with 67.87 m.c.a, 33.76 m.c.a and 22.15 m.c.a respectively. The lowest pressures at the analyzed nodes (n35, n48 and n66) occurred in scenario 4 at 12h:30min with 44.28 m.c.a, 10.45 m.c.a and 1.09 m.c.a respectively. these main results indicate that the SAA the current and future demands of water met on the other hand, the topography of the water supplied area meets, the topography of the supplied area does not allow the service of people, recommended by NBR 12.218/2017, in none, just for operational maneuvers. The injection of water into the distribution network with pumping associated with the frequency inverter (scenario 3) presented smaller pressure variations at the nodes, which possibly reduces damage and ruptures in the pipes minimizing water losses. In addition, in scenario 3, electricity costs for pumping were the lowest, with 0.52 kWh/m³ and R\$ 146.7 per day.

Keywords: Hydraulic Modeling, Epanet, Water Loss, distribution network, Qgis,

Autocad

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de abastecimento de água	20
Figura 2 - Adutora por gravidade	22
Figura 3 - Adutora por recalque	22
Figura 4 - Adutora mista	22
Figura 5 - Configurações de rede de distribuição	24
Figura 6 - Interface básica do software EPANET	27
Figura 7 - Distrito de Guaravera, Londrina - PR.	34
Figura 8 - Mapa do Paraná destacando o município de Londrina	35
Figura 9 – Localização geográfica dos poços profundos P-01 e P-02	36
Figura 10 – Adutora de água tratada (azul) e rede de distribuição (vermelho)..	37
Figura 11 – Reservatório elevado de água do Distrito de Guaravera, Londrina, PR.	38
Figura 12 – Rede de distribuição de água do Distrito de Guaravera, Londrina, PR.	39
Figura 13 - Etapas experimentais	40
Figura 14 - Rede de distribuição de água.....	41
Figura 15 – Rede de distribuição de água do Distrito de Guaravera, Londrina, PR desenhada e georreferenciada em ambiente CAD	41
Figura 16 - Modelo digital de elevação	42
Figura 17 – Determinação das áreas de influência de cada nó utilizando a ferramenta polígono de Voronoi modificado do QGIS	43
Figura 18 – Configurações do sistema de abastecimento de água simuladas nos cenários	44
Figura 19 – Cenários do SAA simulado no Epanet	45
Figura 20 – Padrão de consumo	47
Figura 21 - Padrão de velocidade	47
Figura 22– Valores adotados dos custos de energia elétrica nos horários de ponta e fora de ponta.....	48
Figura 23 – Padrão de preço de energia elétrica	48
Figura 24 - Localização dos nós com menor cota (n35), maior cota (n66) e intermediária (n48)	54
Figura 25 - Relatório de energia para os 04 cenários	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Capacidade potencial de produção e volume máximo produzido ...	36
Gráfico 2 - Distribuição de água nos diversos setores de Guaravera	40
Gráfico 3 – Estimativa da população atendida pelo sistema de abastecimento de água no período 2022 a 2050	50
Gráfico 4 – Volumes mensais produzidos e consumidos	51
Gráfico 5 – Variação temporal dos consumos per capita eletivo e médio no período de 2011 a 2020	52
Gráfico 6 – Cotas topográficas da rede de distribuição de água	53
Gráfico 7- Variação temporal da pressão nos nós n35, n48 e n66 para os quatro cenários.....	55
Gráfico 8 - Isolinhas de pressão geradas às 4h:30 para os quatro cenários	57
Gráfico 9 - Isolinhas de pressão geradas às 12h:30 para os quatro cenários ...	58
Gráfico 10 - Número de nós por faixa de pressão, em cada cenário, às 4h:30..	59
Gráfico 11 - Número de nós por faixa de pressão, em cada cenário, às 12h:30	59
Gráfico 12- Variação temporal da vazão da bomba B1 e nível d'água no reservatório elevado (RNV1) no cenário 1	60
Gráfico 13 - Variação temporal das vazões das bombas B1 e B2 e nível d'água no reservatório elevado (RNV1) no cenário 2	61
Gráfico 14 - Variação temporal das vazões das bombas B1 e B2 e nível d'água no reservatório apoiado (RNV2) no cenário 3.....	62
Gráfico 15 - Variação temporal das vazões das bombas B1 e B2 e nível d'água no reservatório elevado (RNV1) no cenário 4	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ações operacionais para a diminuição do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água.....	29
Quadro 2 - Controles adotados para a operação dos sistemas de abastecimento de água.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critério de avaliação do rendimento dos conjuntos motobomba com motor externo	29
Tabela 2 - Critério de avaliação do rendimento dos conjuntos motobomba com motor submersível	30
Tabela 3 - Demanda de água pela população ao longo do tempo	50
Tabela 4 - Parâmetros adotados e as vazões médias de água produzida e distribuída	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Coef.	Coeficiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
RAP	Reservatório apoiado
REL	Reservatório elevado
RNV	Reservatório de nível variável
RNF	Reservatório de nível fixo
SAA	Sistema de abastecimento de água
B1	Bomba submersível
B2	Bomba de motor externo
SNIS	Sistema nacional de informações sobre saneamento

LISTA DE SÍMBOLOS

Nr	Velocidade de rotação assíncrona
f	Frequência da rede
p	Número de pólos do motor
s	Escorregamento
P	Pressão
Q	Vazão máxima diária
qe	Consumo per capita efetivo
K1	Coefficiente de variabilidade máxima diária
q unitária	Vazão por unidade de área
A	Area total
qm	Consumo per capita médio
L/s	Litros/segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo geral.....	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1	Sistemas de abastecimento de água	20
3.2	Partes de sistema de abastecimento de água	20
3.3	Modelagem hidráulica.....	25
3.3.1	EPANET	25
3.4	Eficiência Energética	27
3.5	Conversores de frequência	30
3.6	Aplicação de SIG em saneamento	32
4	MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1	Descrição da área de estudo.....	34
4.2	Descrição Do Sistema De Abastecimento De Água (SAA)	35
4.2.1	Poços	35
4.2.2	Aduтора.....	37
4.2.3	Reservatório	37
4.2.4	Rede.....	38
4.2.5	Ligações de água	39
4.3	Etapas do estudo.....	40
4.3.1	Aduтора e Rede De Distribuição De Água	40
4.3.2	Modelo Digital De Elevação (MDE)	42
4.3.3	QGIS	43
4.3.4	EPANET: Simulação de cenários	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1	Demanda de água.....	50
5.1.1	Estimativa da população futura	50
5.1.2	Estimativa dos consumos per capita e perdas de água	51
5.2	Análises das diferentes configurações (cenários) do SAA	53
5.2.1	Características topográficas da área de estudo	53
5.2.2	Análise das pressões na rede de distribuição de água	54

6	CONCLUSÕES	66
7	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de abastecimento de água (SAA) são formados por mananciais, estações de bombeamento, tubulações, reservatórios de nível fixo, reservatórios de nível variável, válvulas e outros elementos, os quais são responsáveis pelo abastecimento dos pontos de consumo, tendo a finalidade de atender, dentro de condições sanitárias e hidráulicas, a cada um desses pontos de consumo de uma localidade ou setor de abastecimento (TIBURCIO & DE CASTRO, 2007).

Os SAA quando gerenciados de forma ineficaz por parte das concessionárias de saneamento, causam impactos ambientais e econômicos. Para se minimizar esses problemas, são necessárias medidas que resultem na melhoria do funcionamento dos sistemas de abastecimento de água e dos serviços prestados pelas empresas de saneamento. Uma das ferramentas que podem ser utilizadas para tal fim é a modelagem hidráulica das redes de abastecimento, seguida da calibração do modelo, pode gerar informações e dados que contribuam no diagnóstico e na redução dos índices de perdas e no uso mais eficiente de energia (CUNHA *et al.*, 2015).

Os modelos constituem os instrumentos computacionais mais consagrados no campo de projeto e dimensionamento hidráulico de sistemas de abastecimento de água. Um software que contém uma diversidade de recursos é o EPANET, o qual foi desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (EPA) (ROSSMAN, 2000), e tem distribuição gratuita.

No entanto, uma das tarefas que mais consomem tempo e esforço ao se tentar simular computacionalmente uma rede real de distribuição de água, consiste em compor um arquivo com os dados de entrada da rede como por exemplo as cotas topográficas e as coordenadas geográficas. O motivo de tal dificuldade é a quantidade de dados necessários à simulação. Além de consumir tempo, quanto maior for a rede, maior é a probabilidade de erros na formação do referido arquivo de entrada (TIBURCIO & DE CASTRO, 2007).

Assim, para que um SAA opere de forma eficiente, é indispensável o uso de ferramentas de análise que sejam robustas, de fácil utilização, permitam a leitura de grandes quantidades de dados e forneçam resultados consistentes para subsidiar a resolução dos conflitos e para auxiliar a gestão integrada do sistema de abastecimento.

Para isso, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG`s) utilizam gerenciadores de banco de dados que permitem a manipulação de informações e integram modelos de otimização e de simulação utilizando algoritmos matemáticos específicos (TIBURCIO & DE CASTRO, 2007).

O SIG oferece um vasto potencial para análise de dados espaciais e vêm se tornando cada vez mais utilizado, não somente para atender demandas de mercado, mas também no meio acadêmico. Entretanto, há uma opinião generalizada de que SIG é o remédio para a solução de todos os problemas que envolvem dados espaciais. Muito além de se limitar somente às possibilidades oferecidas por esse software, o bom profissional deve procurar, à medida do possível, aproveitar as potencialidades de SIG para desenvolver suas próprias interfaces para aplicações específicas.

O objetivo deste trabalho foi modelar e simular hidraulicamente o sistema de abastecimento do distrito de Guaravera, no Município de Londrina – PR, procurando combinar a aplicação de ferramentas SIG, como o software QGIS, AutoCad e o modelador hidráulico Epanet.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Simular hidraulicamente o sistema de abastecimento de água de Guaravera, no município de Londrina, PR, utilizando os softwares QGIS, AutoCad e Epanet.

2.2 Objetivos específicos

- Obter o Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo;
- Inserir os dados topológicos da rede de distribuição e o consumo de água nos nós, no Epanet, utilizando os softwares AutoCad e QGIS;
- Modelar o funcionamento do bombeamento da água e da rede de distribuição de água em quatro diferentes configurações (cenários);
- Avaliar as alternativas considerando o atendimento das demandas, pressões nos nós e consumo de energia elétrica.

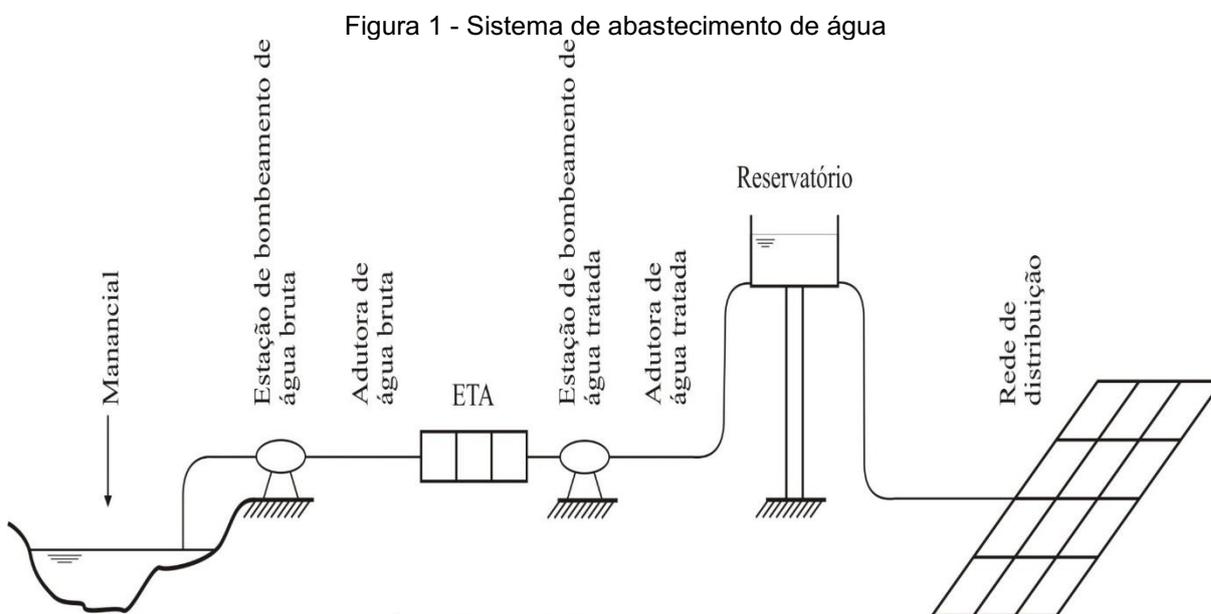
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Sistemas de abastecimento de água

Segundo GOMES (2019), um sistema de abastecimento de água consiste em um conjunto de equipamentos, obras e serviços voltados para o suprimento de água a comunidades, para fins de uso doméstico, industrial e público. Nesse sentido, GOMES (2019) ainda salienta que os sistemas de abastecimento de água devem garantir um atendimento contínuo às demandas da comunidade, considerando os aspectos da quantidade, qualidade, eficiência do processo produtivo e acima de tudo, respeito ao meio ambiente.

3.2 Partes de sistema de abastecimento de água

As partes de um sistema de abastecimento de água são: manancial, captação, estação elevatória, adutora, estação de tratamento de água, reservatório e rede de distribuição como consta na (Figura 1).



Fonte: Gomes, (2019)

Manancial: é o corpo de água superficial ou subterrâneo, de onde é retirada a água para o abastecimento. Com o dever de fornecer vazão suficiente para atender a demanda da água no período de projeto, com qualidade adequada sob o ponto de vista sanitário.

Captação: conjunto de estruturas e dispositivos, construídos ou montados junto ao manancial, para a retirada de água destinada ao sistema de abastecimento.

Estação elevatória: conjunto de obras e equipamentos destinados a recalcar a água para a unidade seguinte. Em sistemas de abastecimento de água, geralmente há várias estações elevatórias, tanto para o recalque de água bruta, como para o recalque de água tratada.

De acordo com SILVA et al. (2014), a estação de bombeamento é um subsistema essencial em sistemas de abastecimento; ela é responsável por impulsionar a água contra a gravidade, vencendo desníveis geométricos e perdas de carga, devendo chegar em quantidade e pressão suficiente ao ponto atendido, como o consumidor direto e os reservatórios de armazenamento. Assim, as bombas são equipamentos capazes de converter trabalho mecânico em diversos tipos de energia (mecânica, cinética e potencial).

Nos últimos anos, o custo da energia elétrica nos sistemas de bombeamento do setor de saneamento no Brasil tem se tornado um tema de análise, devido ao elevado consumo (GOMES, 2019), segundo o SNIS em 2014 as despesas atingiram cerca de R\$ 3,5 bilhões.

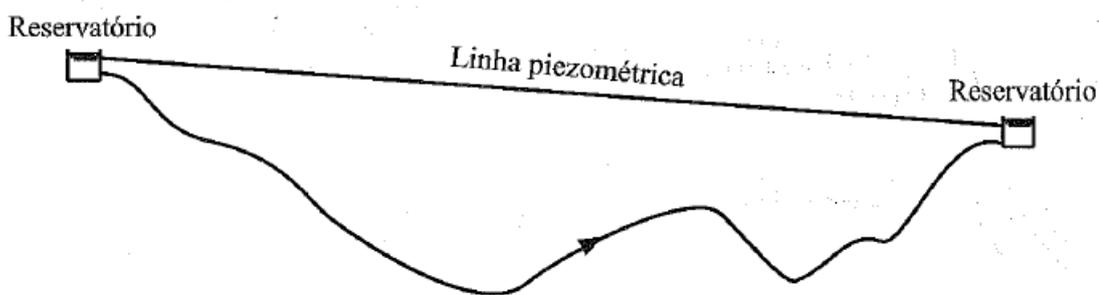
Parte significativa da energia gasta nos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário se deve à ineficiência energética, estimada, atualmente, em média, 25% da energia gasta no mundo. Esta ineficiência é derivada do emprego de equipamentos de bombeamento de baixo rendimento (obsoletos, antigos ou mal dimensionados), do excesso de perda de carga hidráulica nas linhas adutoras e nas tubulações das redes de abastecimento, da ausência de manutenção, das perdas reais de água, de procedimentos operacionais inadequados, dentre outros fatores (RIBEIRO et al. 2019).

Para GOMES, (2009), mais de 90% dos gastos com energia elétrica das empresas de saneamento devem-se às estações elevatórias de água e esgoto. Devido à importância da energia elétrica dentro da estrutura de custo da produção de água em sistemas de abastecimento de água, as ações de otimização do processo operacional das empresas de saneamento quase sempre estão focadas na redução do consumo de energia elétrica. Como o dimensionamento de uma rede hidráulica é matematicamente indeterminado, admitindo várias soluções ou alternativas de projeto, a busca de uma solução ótima de um sistema de abastecimento de água, com

ênfase no menor custo operacional, quase sempre passa pela necessidade da redução do consumo de energia elétrica.

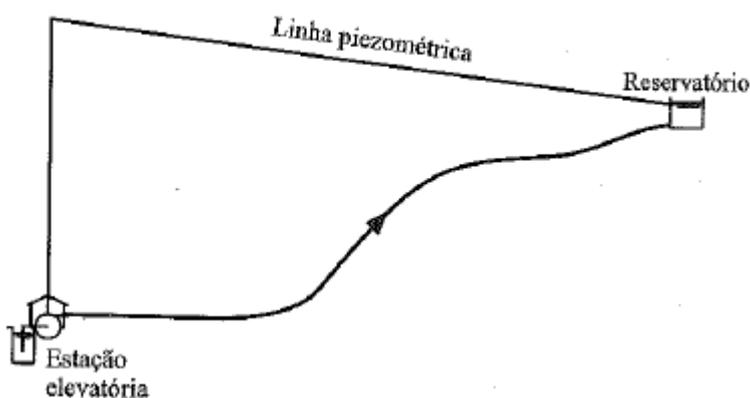
Adutora: canalização que se destina conduzir água entre as unidades que precedem a rede de distribuição. As adutoras são classificadas como: adutora por gravidade, adutora de recalque e adutoras mistas. E cada uma delas está representada nas Figuras 2, 3 e 4 respectivamente.

Figura 2 - Adutora por gravidade



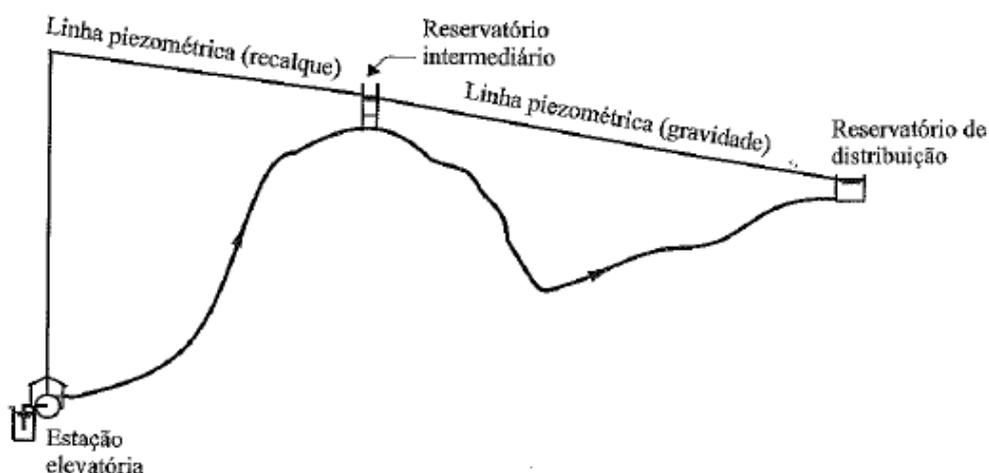
Fonte: TSUTYIA (2006).

Figura 3 - Adutora por recalque



Fonte: TSUTYIA (2006)

Figura 4 - Adutora mista



Fonte: TSUTYIA (2006)

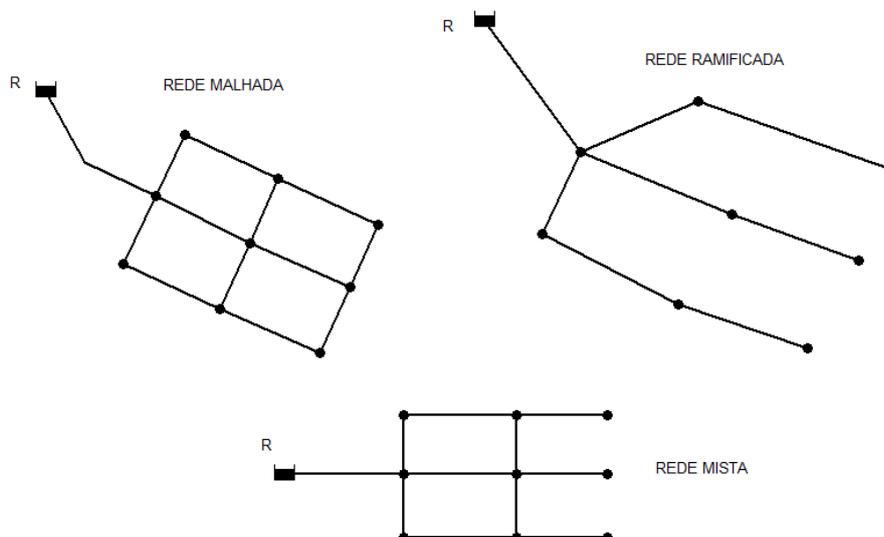
Estação de tratamento de água: conjunto de unidades destinado a tratar a água de modo a adequar as suas características aos padrões de potabilidade.

Reservatório: é o elemento do sistema de distribuição de água destinado a regularizar as variações entre as vazões de adução e distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição.

Rede de distribuição: parte do sistema de abastecimento de água formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendada.

São mostradas na Figura 5 as configurações de redes de distribuição nos sistemas de abastecimento de água.

Figura 5 - Configurações de rede de distribuição



Fonte: Gomes (2019)

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, por meio da NBR12218 (2017), que trata do Projeto de Rede de Distribuição de Água para o Abastecimento Público, estabelece que a pressão dinâmica mínima em qualquer ponto nas tubulações distribuidoras deve ser de 100 kPa (≈ 10 mca). A pressão máxima recomendada pela referida Norma é de 500 kPa (≈ 50 mca).

Segundo GOMES (2019), o limite de pressão superior nas redes deve ser imposto, pelos seguintes aspectos:

- Quanto maiores forem as pressões requeridas, maior será o custo energético de bombeamento, pois este custo é diretamente proporcional à altura manométrica de impulsão;
- Para maiores pressões na rede, as tubulações serão mais exigidas por necessitarem de maiores pressões nominais, sendo estas de maior custo;
- As possibilidades de rompimento das tubulações aumentam, com o aumento das pressões dinâmicas e estáticas da rede;
- As perdas físicas de água crescem com o aumento das pressões de serviço, pois a vazão nas fissuras ou juntas dos tubos aumenta com o acréscimo da pressão;
- As vazões nos pontos de consumo crescem com o aumento das pressões disponíveis

3.3 Modelagem hidráulica

Uma rede de abastecimento de água é um circuito fechado que conduz água potável por meio de condutos forçados. Em condutos forçados, as principais variáveis hidráulicas de interesse de estudo são a pressão e a vazão. A modelagem hidráulica nada mais é do que a aplicação da equação de energia na malha de condutos, permitindo a determinação teórica das variáveis pressão e vazão em cada um de seus trechos e nós (ABRAHÃO, 2020).

Ainda, de acordo com ABRAHÃO (2020), antes da era da informação, a malha era dividida em trechos, nas plantas analógicas, e os cálculos eram feitos em planilhas a partir de equações como a de Hazen-Williams, da Continuidade, da Energia (ou Bernoulli), Darcy-Weisbach, Chezy-Manning, entre outras. Dada a altura do reservatório, a cota dos nós e a vazão era possível determinar a pressão em cada nó, verificando os pontos críticos de abastecimento. Os cálculos eram feitos manualmente ou em ábacos, evoluindo depois para o uso em calculadoras científicas. Com a evolução do poder computacional, o cálculo passou ser feito por softwares.

Conforme PLADEVALI et al. (2020), hoje há um grande nível de sofisticação nos softwares de modelagem hidráulica, com uma variedade enorme de recursos e funcionalidades, que muito facilitaram sua operação e usabilidade, com destaque para o WaterCAD/WaterGems e o SewerCAD/SewerGems da Bentley Systems, o InfoWater/InfoSewer, da Innowyze e o SIGWATER, esse último uma interessante iniciativa em software livre, responsável pela integração de três outros softwares livres: o QGIS, o EPANET e o PostgreSQL.

3.3.1 EPANET

O aplicativo de software EPANET foi desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (EPA), com a finalidade de modelar sistemas de distribuição de água. De acordo com a própria (EPA) o EPANET é uma ferramenta utilizada por engenheiros com os objetivos de: projetar e dimensionar novas infraestruturas de água, reformar infraestruturas antigas, otimizar operações de tanques e bombas, reduzir o uso de energia, investigar problemas de qualidade da água e se preparar para emergências, modelar ameaças de contaminação e avaliar a resiliência a ameaças de segurança ou desastres naturais.

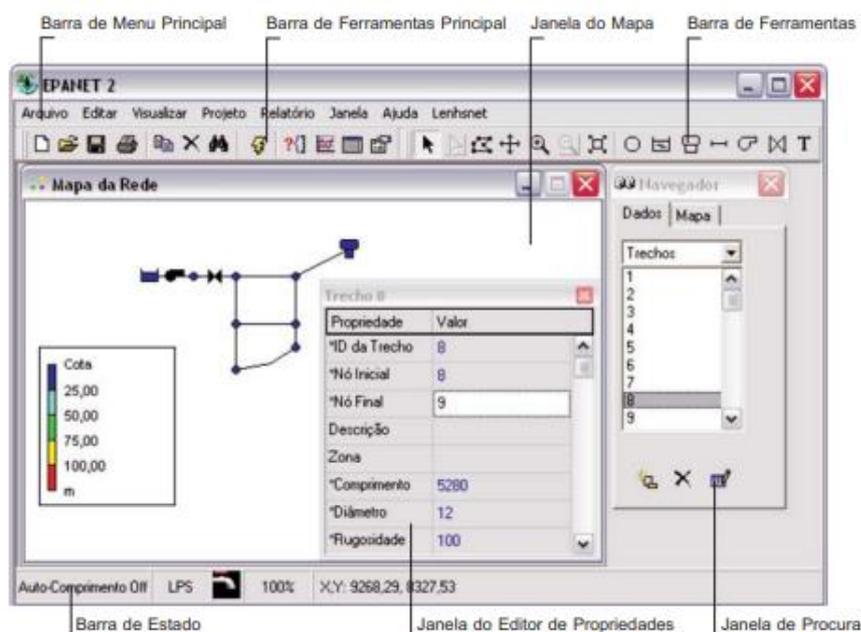
As diversas funções disponibilizadas pelo EPANET permitem em um ambiente gráfico integrado a possibilidade de: examinar mapas de rede de acordo com códigos de cores, organizar tabelas de dados, desenhar gráficos em séries temporais, perfis de conduta, frequências e ainda produz relatórios específicos de energia, calibração e reação (GOMES, 2019)

As ferramentas de simulação hidráulica, que são destaque no programa EPANET, conforme citadas por (ROSSMAN, 2000), são:

- Dimensão ilimitada do número de componentes da rede analisada;
- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos etc.;
- Modelagem de bombas de velocidade constante ou variável;
- Cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo;
- Modelagem dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão;
- Modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- Modelagem da relação entre pressão e vazão efluente de dispositivos emissores (aspersores de irrigação, ou consumos dependentes da pressão);
- Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controles simples, dependentes de uma só condição (altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controles com condições múltiplas.

A interface básica do software EPANET é representada na Figura 6.

Figura 6 - Interface básica do software EPANET



Fonte: ROSSMAN (2000)

3.4 Eficiência Energética

O conceito de eficiência energética pode ser entendido, como a utilização de uma menor quantidade de energia que resulte em um mesmo produto ou serviço, através da abstenção de desperdícios, do uso de equipamentos eficientes e do aperfeiçoamento dos processos produtivos (GOMES,2019).

A ineficiência energética dos sistemas de abastecimento e de esgotamento sanitário, acarreta perdas significativas de gastos de energia. Aproximadamente 25% da energia gasta nesses sistemas se deve a ineficiência energética. Isto é devido ao emprego de equipamentos de bombeamento de baixo rendimento, do excesso de perda de carga hidráulica nas linhas adutoras e nas tubulações das redes de abastecimento, da ausência de manutenção, das perdas reais de água, de procedimentos operacionais inadequados, dentre outros fatores (GOMES E CARVALHO, 2012).

Existem dois fatores principais para se buscar a eficiência energética: o conhecimento efetivo e a informação. Pois, é extremamente necessário o conhecimento do comportamento das grandezas envolvidas nos processos, que associados a interpretação fundamentada em conhecimentos técnicos, possibilita o embasamento necessário para almejam-se resultados significativos. Os projetos voltados para o aumento da eficiência energética podem ser divididos em três partes:

o diagnóstico do projeto propriamente dito, a de implantação e o acompanhamento das medidas indicadas no projeto. (GOMES, 2010)

As medidas adotadas que levam a uma melhor eficiência energética de acordo com SNIS (2018) referente aos equipamentos, grandezas elétricas e grandezas hidráulicas são:

- Uso de conjuntos motobomba bem dimensionados e mais eficientes;
- Modulação da carga (inversores de frequência);
- Monitoramento e comando remoto centralizado.
- Redução da perda de carga das tubulações (redução de incrustações em adutoras; modificação do projeto geométrico de barriletes, eliminação de ar no sistema por introdução de ventosas, etc.);
- Redução da altura manométrica pela mudança de traçado da adutora; pela redução de velocidade bombeada;
- Dimensionamento correto da capacidade dos reservatórios;
- Operação adequada dos reservatórios, impedindo-se que operem apenas como caixa de passagem.
- Setorização da distribuição adequada em relação às pressões operacionais.

Em um sistema de abastecimento de água, as perdas de energia elétrica ocorrem desde a captação até a distribuição de água nos ramais prediais. Para que essas perdas sejam diminuídas são necessárias ações que impeçam o gasto excessivo no consumo de energia elétrica. Dentre as quais podemos citar: diminuição da potência dos equipamentos, controle operacional e ajustes dos equipamentos. E cada uma dessas ações pode ser composto por medidas de engenharia (GOMES,2019).

De acordo com TSUTIYA, (2006), existem quatro áreas de oportunidade para melhoria da eficiência energética em sistemas de abastecimento de água:

1. O uso racional de água no consumidor (per capita de água) da região abrangente, reduzindo também o consumo energético;
2. A configuração e operação do sistema, em relação aos seus sistemas de produção (captação, tratamento e configuração da distribuição) e à estrutura (uso de válvulas

reduzoras de pressão, atrito gerado por materiais da tubulação, excesso de perda de carga, entre outros);

3. A otimização da eficiência eletromecânica de bombas e motores.

4. A redução de perdas de água na distribuição, que exigirá que se bombeie menos água para um mesmo volume de consumo autorizado.

As ações como também suas respectivas medidas de engenharia estão resumidas no quadro 1.

Quadro 1 - Ações operacionais para a diminuição do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água

Diminuição da potência dos equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Melhoria do rendimento do conjunto motobomba; • Redução das perdas de carga nas tubulações • Redução das perdas de água no sistema;
Controle Operacional	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização de inversores de frequência; • Alteração no sistema de bombeamento e reservação; • Automação e controle do sistema de distribuição;
Ajustes dos equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Correção do fator de potência • Alteração da tensão de alimentação • Contratação de tarifa adequada

GOMES (2019)

Com relação ao rendimento dos conjunto motobombas, valores de referência para motores externos são mostrados na Tabela 1 e motores submersíveis (Tabela 2).

Tabela 1 - Critério de avaliação do rendimento dos conjuntos motobomba com motor externo

Intervalo de potências (kW)		Valores sem credibilidade (%)	Rendimento insuficiente e baixa confiabilidade (%)	Rendimento insuficiente (%)	Rendimento mediano (%)	Bom rendimento (%)	Bom rendimento, mas baixa confiabilidade (%)	Valores sem credibilidade (%)
de	a							
5,6	15,7	< 16	de 16 a 20	de 20 a 52	de 52 a 64	de 64 a 83	de 83 a 120	>120
15,7	38	< 16	de 16 a 20	de 20 a 56	de 56 a 58	de 68 a 83	de 83 a 125	>125
38	96	< 16	de 16 a 20	de 20 a 60	de 60 a 72	de 72 a 83	de 83 a 131	>131
96	261	< 16	de 16 a 20	de 20 a 64	de 64 a 72	de 72 a 83	de 83 a 131	>131

Fonte: Ferreira e Oliveira, 2017

Tabela 2 - Critério de avaliação do rendimento dos conjuntos motobomba com motor submersível

Intervalo de potências (kW)		Valores sem credibilidade (%)	Rendimento insuficiente e baixa confiabilidade (%)	Rendimento insuficiente (%)	Rendimento mediano (%)	Bom rendimento (%)	Bom rendimento, mas baixa confiabilidade (%)	Valores sem credibilidade (%)
de	a							
5,6	15,7	< 16	de 16 a 20	de 20 a 35	de 35 a 50	de 50 a 55	de 55 a 79	>79
15,7	38	< 16	de 16 a 20	de 20 a 47	de 47 a 57	de 57 a 62	de 62 a 89	>89
38	96	< 16	de 16 a 20	de 20 a 57	de 57 a 62	de 62 a 67	de 67 a 96	>96
96	261	< 16	de 16 a 20	de 20 a 59	de 59 a 63	de 63 a 68	de 68 a 96	>96

Fonte: Ferreira e Oliveira, 2017

3.5 Conversores de frequência

O conversor de frequência (também conhecido como inversor de frequência) é um equipamento eletrônico que proporciona a oscilação da rotação do motor elétrico e conseqüentemente da rotação do rotor da bomba, resultando na alteração da vazão e da pressão fornecida pelo conjunto motobomba. No caso de estações elevatórias com bombas de velocidade de rotação fixa, no instante em que a vazão requerida ao sistema de bombeamento é diminuída, pela redução da demanda de água da rede de abastecimento, a pressão impulsionada na rede sobe para valores acima dos aceitáveis, conseqüentemente as vazões dos vazamentos presentes na tubulação e nos orifícios aumenta consideravelmente, produzindo perdas reais nas conduções. (GOMES E CARVALHO,2012)

O uso de um conversor de frequência, permite que a velocidade de rotação dos motores das bombas varie, e conseqüentemente, ocorre a variação da vazão e da altura manométrica para níveis adequados ao contexto da demanda de água pela rede de abastecimento ao longo dia. De acordo com (EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE, 2004), a utilização de conversores de frequência possibilita uma economia de energia de 30 a 50%. Resumindo, o emprego da bomba com a velocidade de rotação variável, poderá reduzir o consumo de energia elétrica e de perdas reais de água nos sistemas de distribuição de água ao longo do tempo. (GOMES E CARVALHO,2012)

O cálculo para saber qual velocidade será utilizada no sistema em um determinado instante do dia está presente na equação 1.

$$N_r = \frac{120 f(1 - s)}{p} \quad (1)$$

Fonte: GOMES (2019)

Sendo:

N_r = Velocidade de rotação assíncrona (rpm)
 f = Frequência da rede (Hz)
 s = Escorregamento (adimensional)
 p = Número de pólos do motor (adimensional)

As vantagens em se empregar um inversor de frequência a um sistema de abastecimento de acordo com (GOMES, 2019) são:

- Aumento da confiabilidade do sistema;
- Partida e parada suaves (rampas);
- Redução dos custos operacionais;
- Redução do estresse mecânico sobre o enrolamento do motor;
- Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações;
- Controle da corrente do motor elétrico;
- Economia de energia.
- Aumento do fator de potência;
- Eliminação da necessidade de válvulas para partir e parar o bombeamento
- Melhor controle do processo;
- Minimiza a necessidade de paradas do sistema ou elimina os saltos de produção.
- Possibilita a automação do sistema;
- Contribui para diminuir o número de rompimentos nos tubos;

Por outro lado, as desvantagens apontadas por (GOMES,2019) são:

- Causa interferências na rede elétrica de alimentação;
- Aumento da temperatura ao operar com frequência mais baixa;
- Custos de implantação elevados;

3.6 Aplicação de SIG em saneamento

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) consistem em ferramentas capazes de tratar a informação em toda a sua complexidade. Suas funções consistem em coletar, modelar, armazenar e analisar informações que descrevem propriedades físicas do mundo geográfico, permitindo assim gerenciar e tratar informações geográficas (ELMASRI E NAVATHE, 2004).

Os softwares SIGs de acordo com CÂMARA & MEDEIROS (1998) caracterizam os dados geográficos permitindo sua utilização como ferramentas para produção de mapas, como suporte para análise espacial de fenômenos, ou como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

O número majoritário das ferramentas atuais utiliza processos manuais e não permite a integração direta e automática com outros pacotes de *software*. A geração manual de rotas envolve a intervenção direta do projetista, tornando o processo relativamente menos dinâmico. Nesse sentido, o uso de SIG e de ferramentas e aplicações que permitam a automação desse processo provoca uma diminuição de custos de construção e manutenção e reduz consideravelmente o tempo na tomada de decisão (AMARAL *et al.*, 2020).

De acordo com Abrahão (2020), o maior inconveniente do EPANET e da maioria dos softwares de modelagem hidráulica é a ausência de uma interface funcionalmente adequada de desenho das redes, o que faz com que se dispenda muitíssimo tempo na criação da malha, pois ela deve ser desenhada trecho a trecho, com a inserção manual de seus atributos, como comprimento, diâmetro e cotas. O SIG veio proporcionar aos softwares de modelagem hidráulica justamente o que eles mais precisavam: o desenho das redes, com sua topologia, dimensões, atributos (material, diâmetro, idade) e cotas. O usuário não precisa mais dispende tempo na construção do modelo, basta importá-lo do SIG. Também se ganhou em versatilidade: simulações, estudos de alternativas; avaliação de contingências passaram a poder ser realizadas rapidamente, uma vez dispondo de um modelo confiável. Isso permitiu um aumento extraordinário na utilização dessa tecnologia, de modo que hoje é impensável dissociá-las.

A crescente utilização de sensores em campo, para medir pressões e vazões principalmente, muito favoreceu a utilização dos softwares de modelagem hidráulica,

pois eles conseguem transformar os dados enviados do campo em informação, inserindo-os no contexto da rede, melhorando a calibração do modelo e a assertividade das análises (ABRAHÃO, 2020).

Desta forma, com a utilização de ferramentas computacionais, como modelos hidráulicos e Sistemas de Informações Geográficas (SIG`s), é possível padronizar os procedimentos, dar auxílio nos processos de análise, operação, planejamento e tomada de decisão em sistemas de distribuição de água, dando assim suporte para a solução dos complexos problemas de planejamento (OLIVEIRA, 2009).

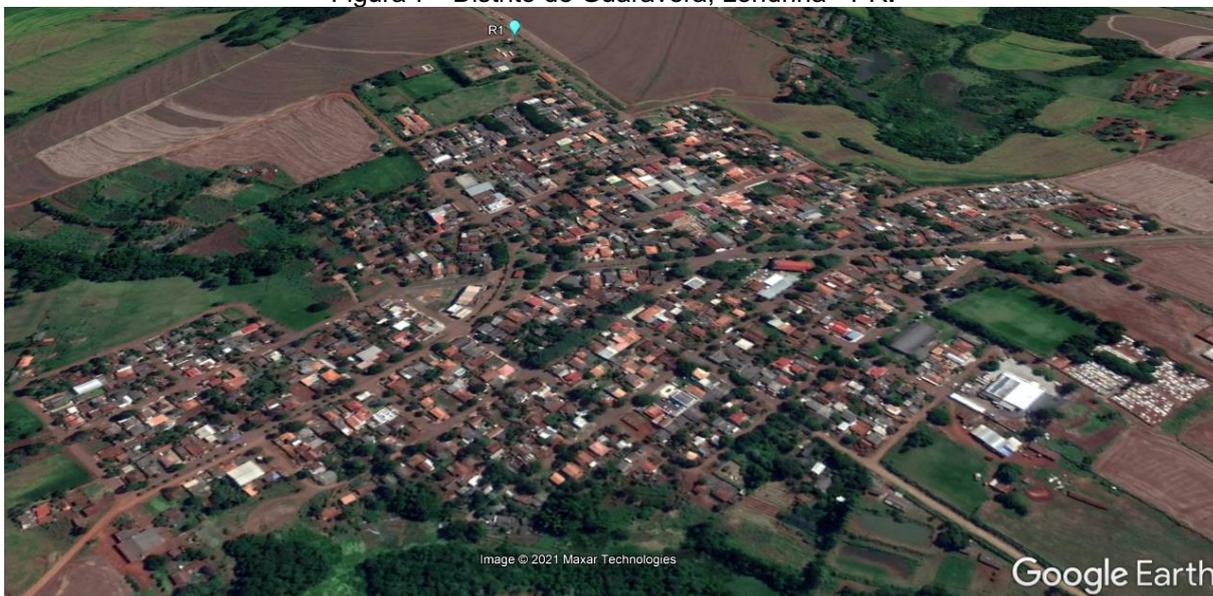
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área de estudo

O distrito de Guaravera (Figura 7) fica localizado a 44 km da cidade de Londrina, PR, tem uma área total de 177,3 km². A população total é estimada em 5000 habitantes, com, aproximadamente, 2677 habitantes (2021) residindo na sede.

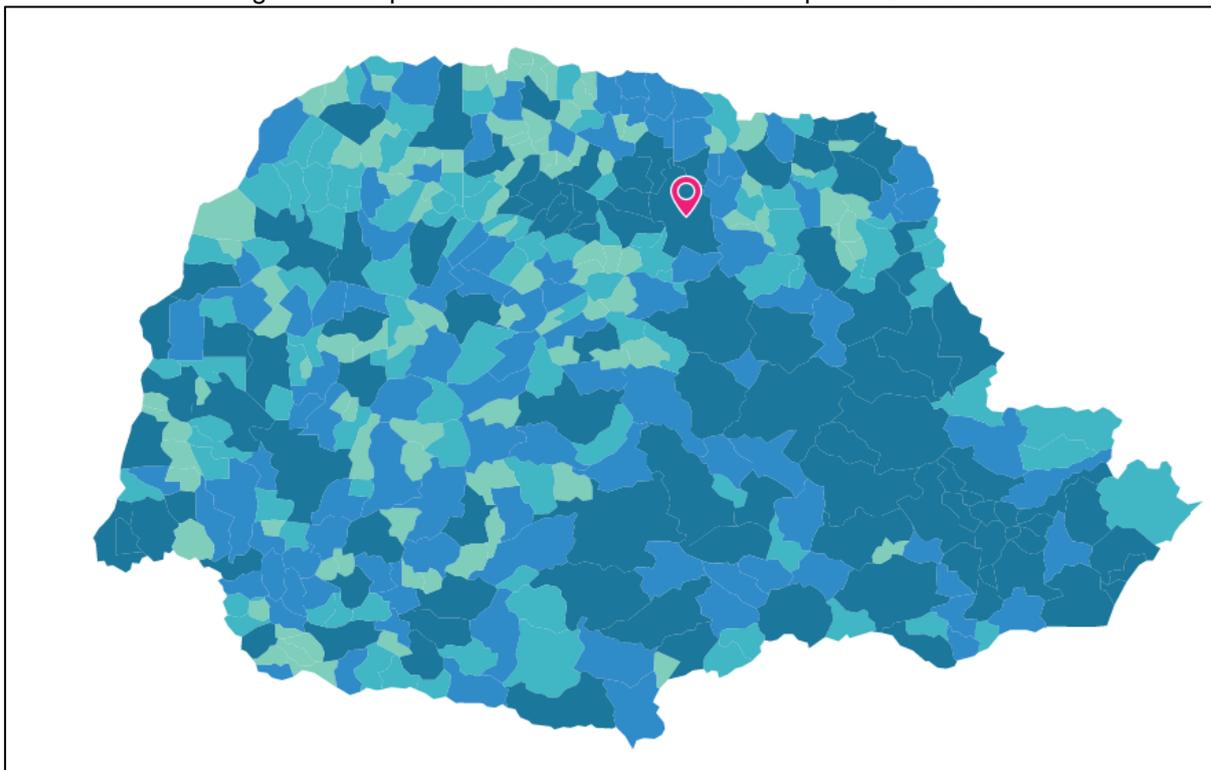
Se localiza na latitude 23°36'46''Sul e longitude 51°11'14'' Oeste (UTM = 7.388.931 N e UTM = 481.400 L).

Figura 7 - Distrito de Guaravera, Londrina - PR.



Fonte: GoogleEarth, (2021)

Figura 8 - Mapa do Paraná destacando o município de Londrina



Fonte: IBGE (2022)

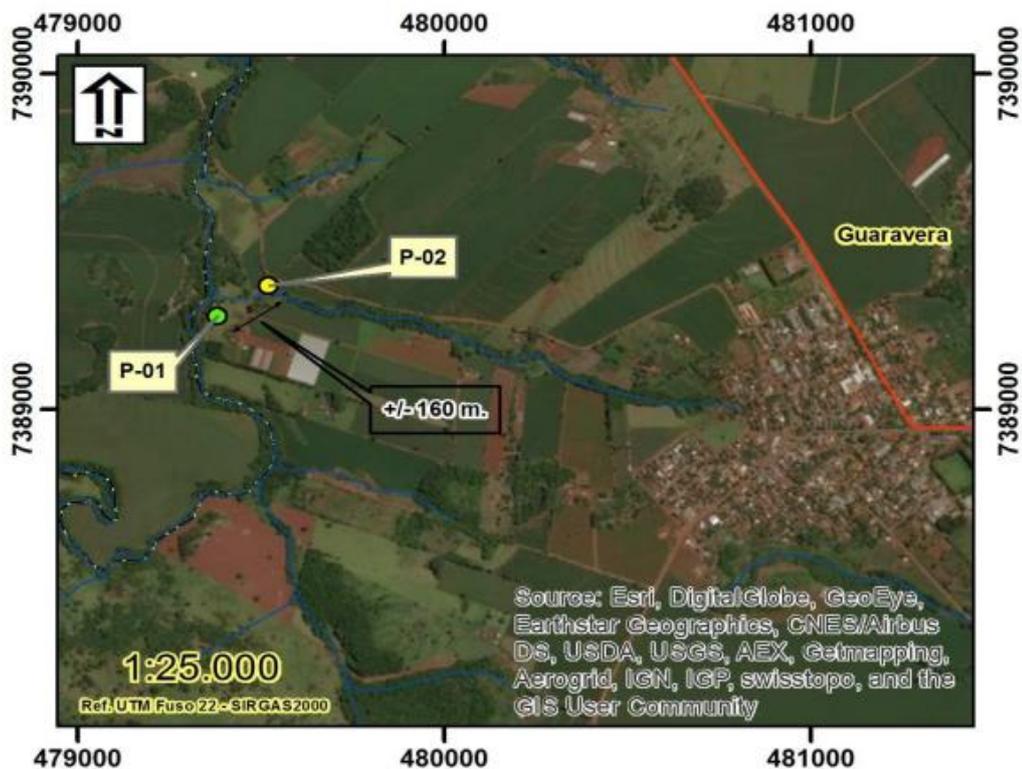
4.2 Descrição Do Sistema De Abastecimento De Água (SAA)

4.2.1 – Poços

O SAA capta água em dois poços profundos (Figura 9). O poço 1 (P-01), cujas coordenadas geográficas são 7388990 UTM (Norte/Sul) e 479654 UTM (Leste/Oeste), tem cota topográfica de 500 m, nível dinâmico 11m, vazão de bombeamento outorgada de 30 m³/h e profundidade igual a 150 m (SIAGAS,2022).

O poço 2 (P-02) entrou em operação em setembro de 2018. Fica localizado nas coordenadas geográficas 7388412 UTM (Norte/Sul) e 479570 UTM (Leste/Oeste), com cota do terreno igual 507 m, nível dinâmico 100 m, vazão de bombeamento outorgada de 36 m³/h e profundidade de 300 m (SANEPAR,2016).

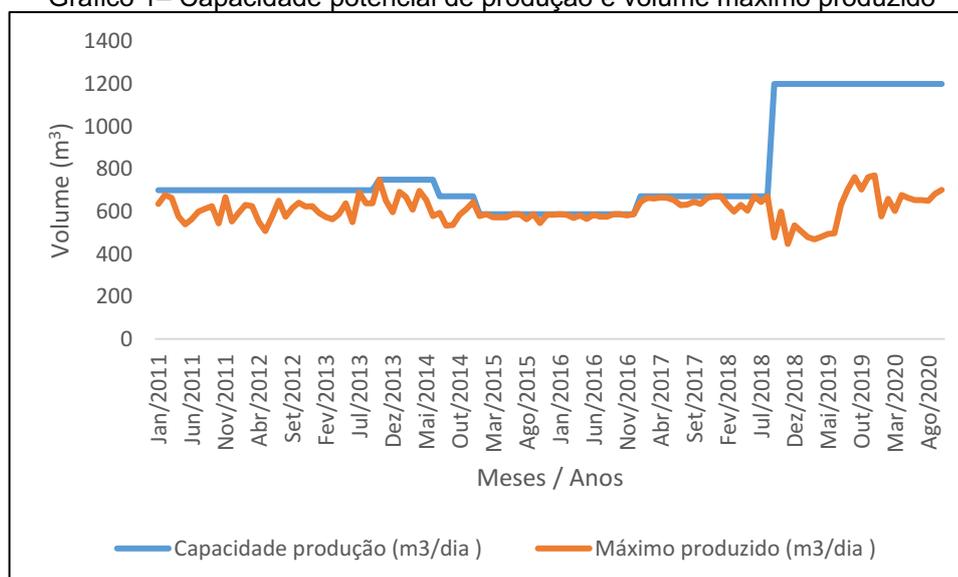
Figura 9– Localização geográfica dos poços profundos P-01 e P-02



Fonte: (SANEPAR,2016)

No gráfico 1 se observa os dados da série histórica com os volumes potenciais de produção de água e os volumes máximos diários consumidos. Pode-se constatar que, após a entrada em operação do Poço P-02, a produção supera os valores consumidos. Em 2019, a demanda máxima alcançou 770 m³/dia e a produção potencial de 1200 m³/dia.

Gráfico 1– Capacidade potencial de produção e volume máximo produzido



Fonte: SANEPAR (2022)

4.2.2– Adutora

Na Figura 10 são apresentadas a adutora de água tratada (linha azul) e rede de distribuição de água. A adutora é composta por tubulações de ferro dúctil K7 DN 100, (DI 105,8 mm), com 1011 metros, e PVC, DN 100 (DI 108,4 mm), com 787 metros de comprimento.

Figura 10 – Adutora de água tratada (azul) e rede de distribuição (vermelho)



Fonte: AutoCad (2022)

4.2.3– Reservatório

O sistema de abastecimento de água conta com um reservatório elevado (Figura 11), capaz de armazenar 75 m³ (diâmetro de 3m e altura de 12 m). Considerando, a capacidade de reserva recomendada, correspondente a 1/3 do dia de maior consumo (770 m³/dia em 2019), se constata, um déficit de 180 m³.

Figura 11 – Reservatório elevado de água do Distrito de Guaravera, Londrina, PR.

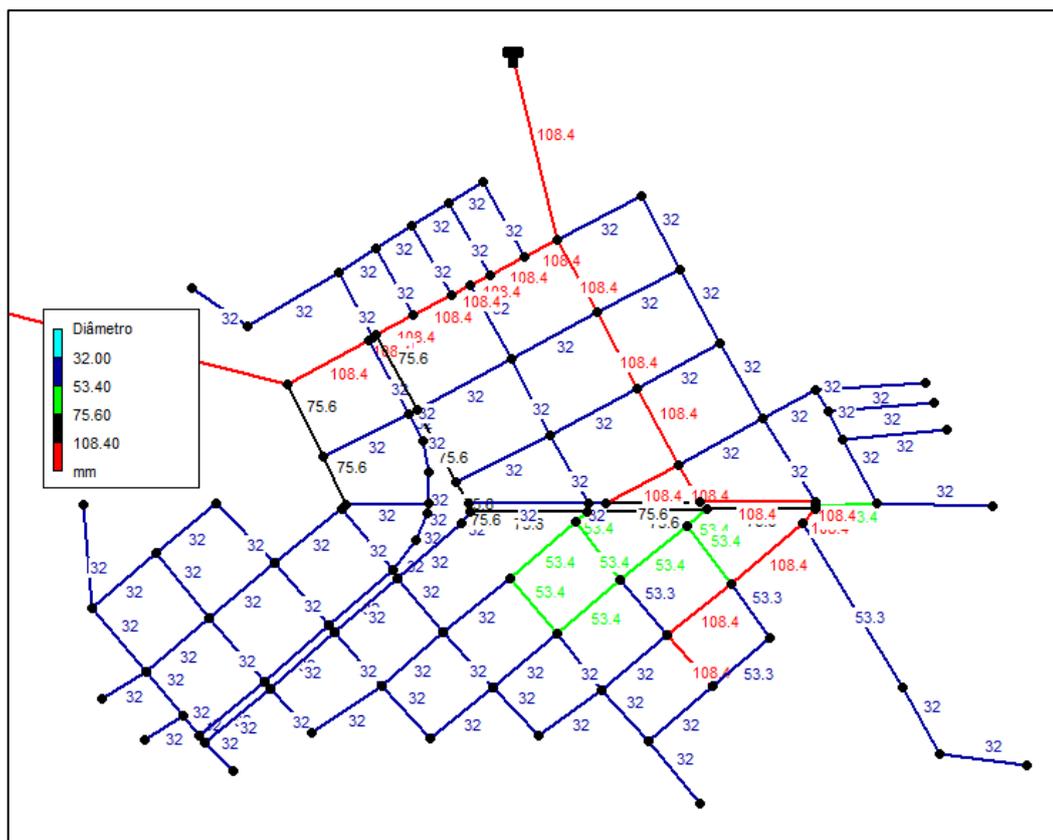


Fonte: GOOGLE EARTH (2022)

4.2.4 - Rede

A rede de distribuição de água, apresentada na figura 12, é formada por tubulações de PVC, com diâmetros entre 108,4 mm e 32,0 mm e extensão total aproximada de 13586 m.

Figura 12 – Rede de distribuição de água do Distrito de Guaravera, Londrina, PR.

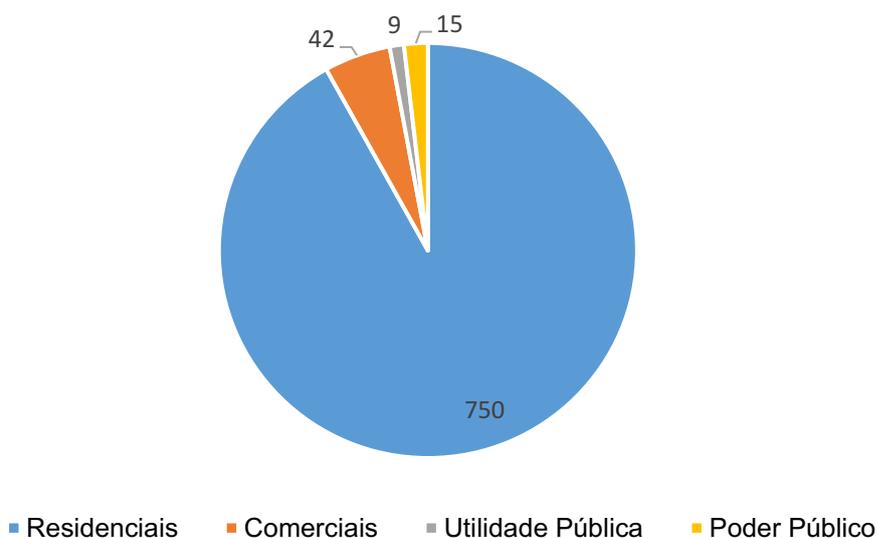


Fonte: Autoria própria (2022)

4.2.5 - Ligações de água

A distribuição das ligações de água por cada setor de Guaravera estão dispostas no gráfico 2.

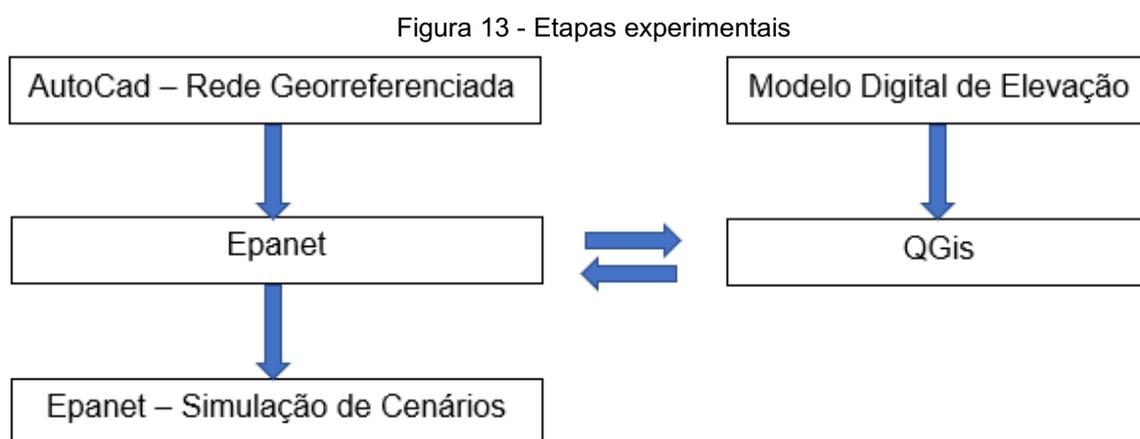
Gráfico 2 - Distribuição de água nos diversos setores de Guaravera



Fonte: Autoria própria (2022)

4.3 Etapas do estudo

A Figura 13, esquematiza a sequência de etapas desenvolvidas no trabalho.



Fonte: Autoria própria (2022)

4.3.1 Rede De Distribuição De Água

O traçado da rede de distribuição de água, foi obtido consultando a base de dados do Programa SEDU/PARANACIDADE (Site: <https://paranainterativo.pr.gov.br/>),

No AutoCad, o arquivo contendo o traçado da adutora e da rede de distribuição foi salvo na extensão .dxf e convertida para a extensão .inp, por meio do software EpaCad, e inserido no Epanet.

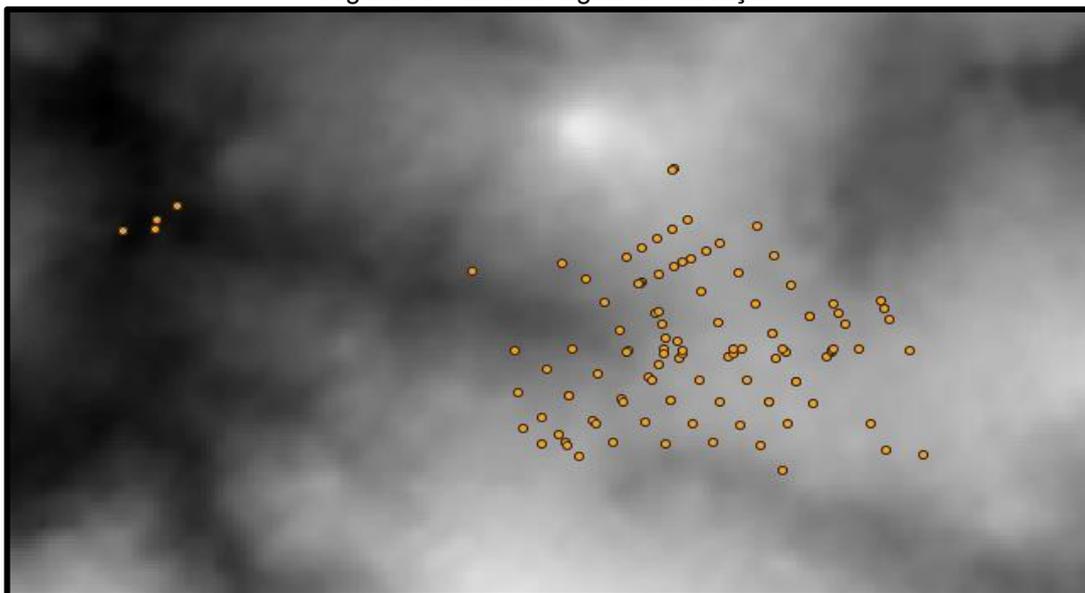
Do Epanet, os dados da adutora e rede de distribuição foram exportados, abertos no software Excel e gerados arquivos na extensão .csv, compatíveis com o QGIS.

O objetivo de se utilizar o QGIS, foi automatizar a extração das cotas e o cálculo das demandas (consumo base) nos nós.

4.3.2 - Modelo Digital De Elevação (MDE)

O MDE foi obtido pelo satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite) que utilizou sensor de microondas PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), com resolução espacial de 12,5 m a partir de interferometria, com a obtenção do MDE foi possível a extração das cotas topográficas ilustrado na figura 16. Os dados são distribuídos gratuitamente pela JAXA. O PALSAR é um radar de abertura sintética que opera na Banda L, capaz de obter imagens diurnas ou noturnas e em quaisquer condições atmosféricas (BARBOSA et al. 2019).

Figura 16 - Modelo digital de elevação



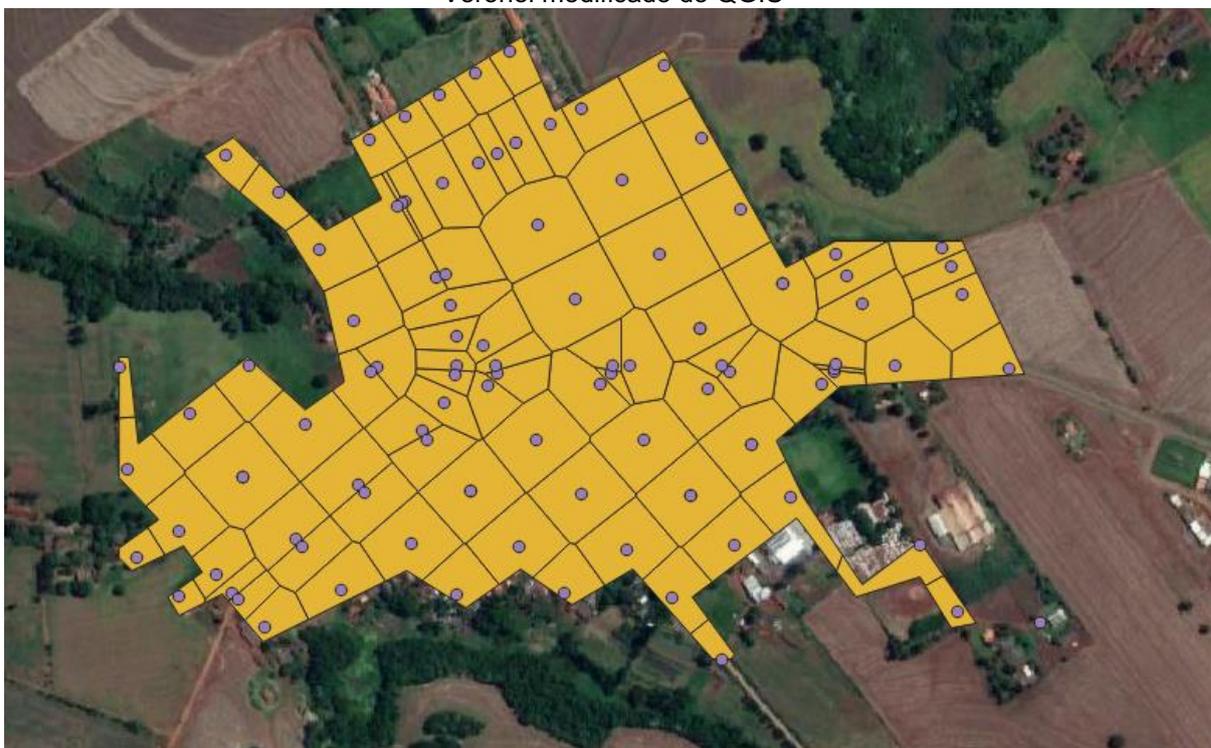
Fonte: Aatoria própria

4.3.3 – QGIS

No software QGIS, foi inserido o Modelo Digital de Elevação (camada raster) e adicionada camada de texto delimitada com as informações dos nós e as respectivas coordenadas geográficas. Em seguida, foram extraídas as cotas topográficas dos nós.

Para a estimativa dos consumos base, foram geradas as áreas de influência de cada nó, por meio da ferramenta Polígono de Voronoi modificada (Figura 17).

Figura 17 – Determinação das áreas de influência de cada nó utilizando a ferramenta polígono de Voronoi modificado do QGIS



Fonte: Autoria própria (2022)

Para o cálculo do consumo base em cada nó, inicialmente, foi determinada a vazão distribuída média (Equação 2), e obtida a vazão unitária (Equação 3), dada em $L/s.m^2$.

O consumo base nos nós foi obtido multiplicando-se a área de influência do nó (m^2) pela vazão unitária ($L/s.m^2$), para a demanda média atual (2021) e futura (2050). Nas simulações, adotou-se o maior valor

$$Q_{\text{distribuída média}} = \frac{P q_e K_1}{86400} \quad (2)$$

Fonte: GOMES (2019)

Sendo Q a vazão distribuída média (L/s), P a população a ser abastecida (hab), q_e o consumo per capita efetivo (L/hab.dia), K_1 o coeficiente do dia de maior consumo.

$$q_{\text{unitária}} = \frac{Q_{\text{distribuída média}}}{\text{Área total}} \quad (3)$$

Fonte: Autoria própria (2022)

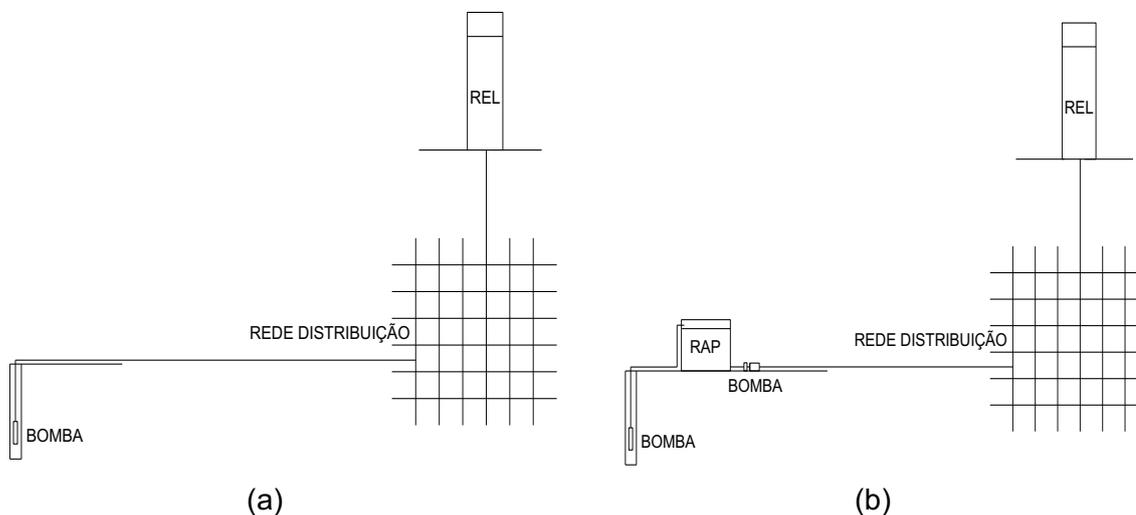
Sendo $q_{\text{unitária}}$ a vazão unitária (L/s m²) e Q a vazão distribuída média (L/s).

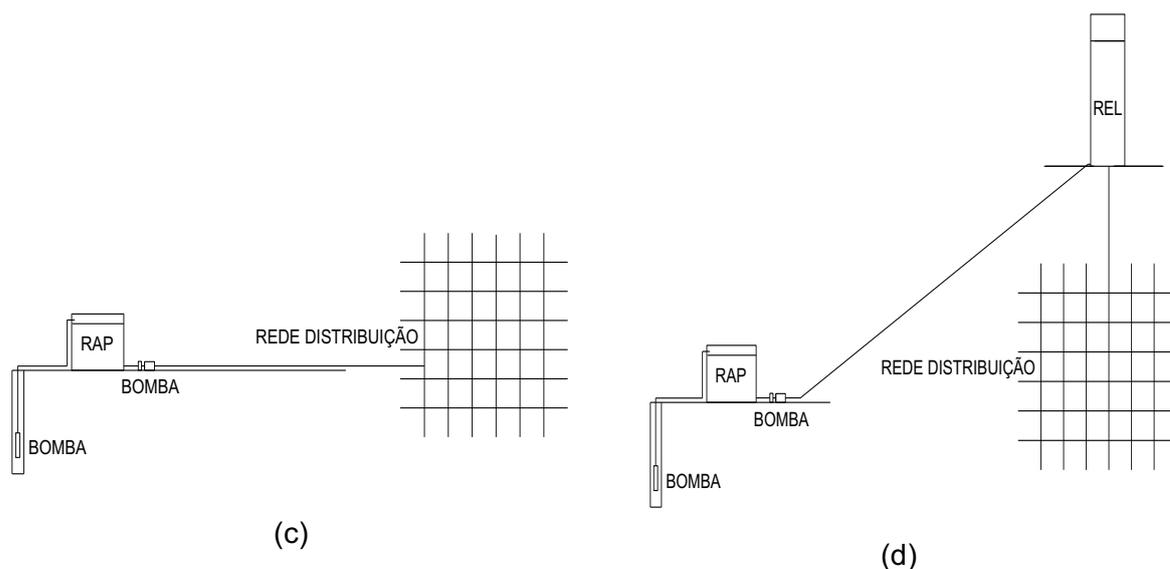
A vazão (consumo base) em cada nó, foi obtida pela multiplicação da vazão unitária ($q_{\text{unitária}}$) pela área de influência do nó.

4.3.4 - EPANET: Simulação de cenários

Os dados gerados no software QGIS (cotas e áreas), foram importados pelo software EPANET, a fim de realizar simulações considerando 04 configurações do sistema de abastecimento de água (Figura 18) e (Figura 19). O objetivo foi analisar a energia consumida nos sistemas de bombeamento e o comportamento das pressões e das vazões nos nós da rede de distribuição de água.

Figura 18 – Configurações do sistema de abastecimento de água simuladas nos cenários



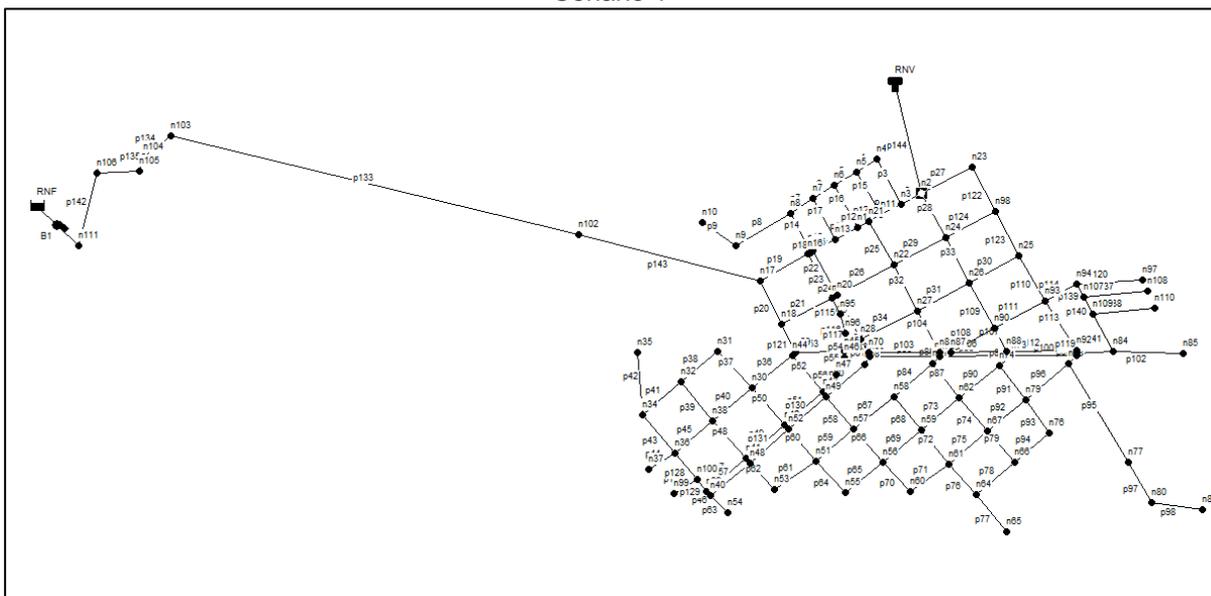


Fonte: Autoria própria (2022)

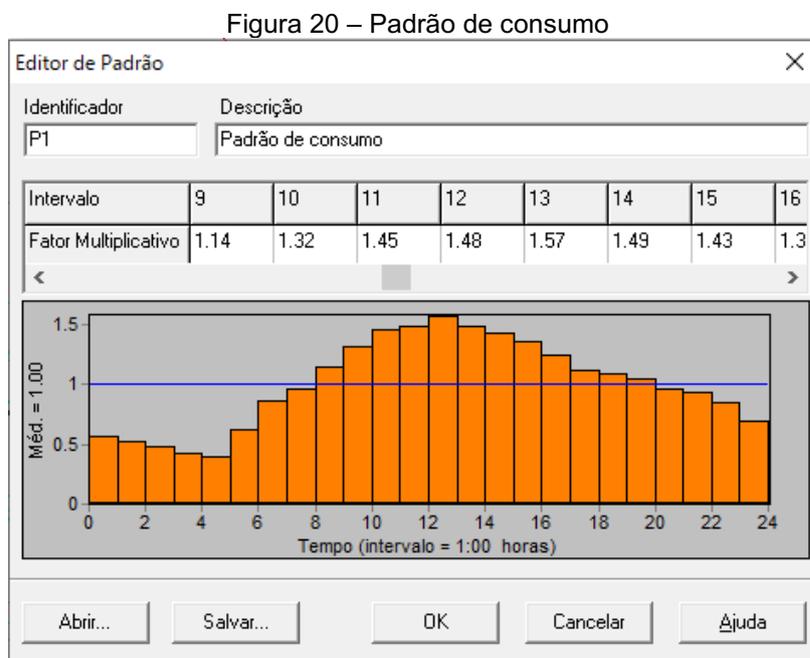
- (a) Cenário 1 - Injeção da água na rede pela bomba submersível do poço, com o reservatório elevado de sobras (REL).
 (b) Cenário 2 - Injeção da água na rede por bomba centrífuga, com os reservatórios apoiado (RAP) e de sobras (REL)
 (c) Cenário 3 - Injeção da água na rede por bomba centrífuga, com reservatórios apoiado (RAP) e inversor de frequência
 (d) Cenário 4 - Abastecimento da rede de distribuição a partir de reservatório elevado (REL), abastecido por bomba de motor externo e reservatório apoiado (RAP)

Figura 19 – Cenários do SAA simulado no Epanet

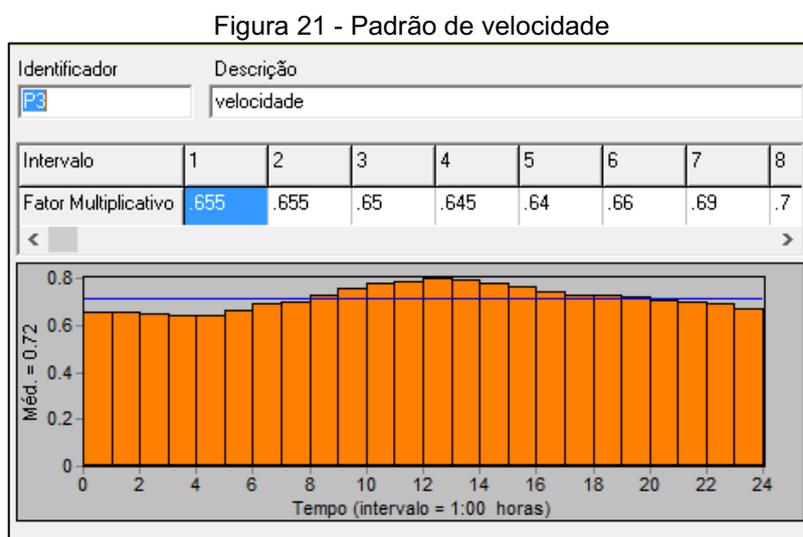
Cenário 1



Para as simulações dinâmicas, em todos os cenários, foi adotado, o padrão de consumo adaptado da Figura 20 e especificamente para o cenário 3 um padrão de velocidade que simula um inversor de frequência na Figura 21.



Fonte: Autoria própria (2022)



Fonte: Autoria própria (2022)

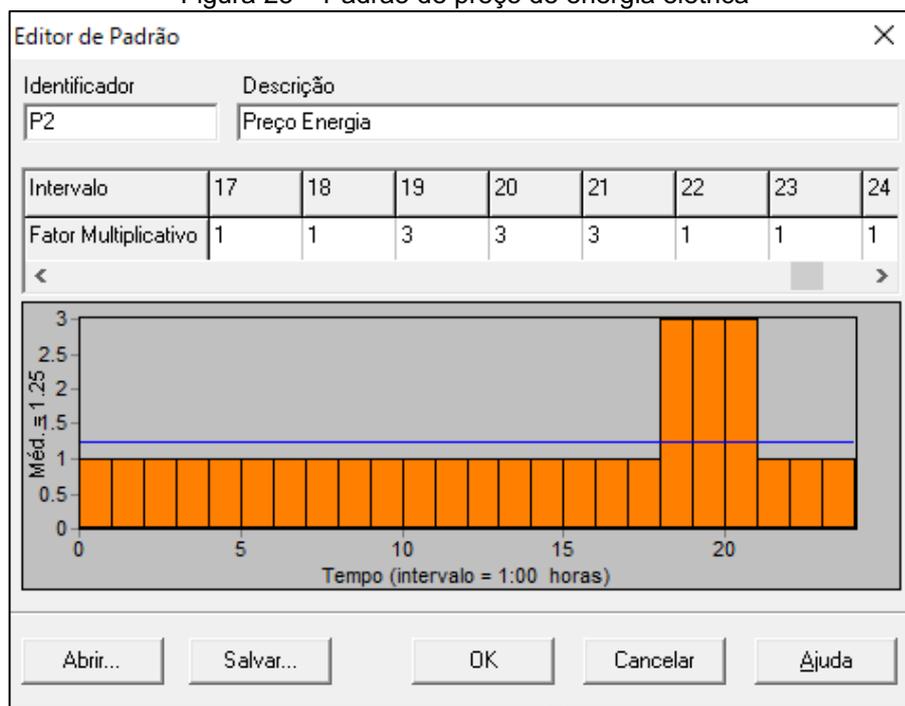
Foi considerado o custo de energia de R\$ 0,30042 /kWh, (fora de ponta) e R\$ 0,89927 /kWh (no horário de ponta das 18h às 21h) (Figura 22). O padrão do preço de energia (Figura 23) foi adotado considerando o custo de 3 vezes superior no período das 18h às 21h.

Figura 22– Valores adotados dos custos de energia elétrica nos horários de ponta e fora de ponta

		Comercial	
		Água, Esgoto e Saneamento	
		TE (R\$/kWh)	TUSD (R\$/kWh)
B1 - Residencial	B3 - Comercial		
B2 - Rural	B4 - Iluminação Pública		
Água, Esgoto e Saneamento			
Convencional	Sem imposto	0,27157	0,25372
	Com imposto	0,40412	0,37755
		Fora de Ponta	
Branca	Sem imposto	0,25884	0,20188
	Com imposto	0,38518	0,30042
		Intermediário	
Branca	Sem imposto	0,25884	0,40310
	Com imposto	0,38518	0,59985
		Ponta	
Branca	Sem imposto	0,41160	0,60431
	Com imposto	0,61250	0,89927

Fonte: COPEL (2022)

Figura 23 – Padrão de preço de energia elétrica



Fonte: Autoria própria (2022)

As condições operacionais foram definidas por meio de controles simples (Quadro 2), que relacionam o funcionamento das bombas (liga/desliga) com os níveis dos reservatórios. Foram adotados valores, de modo que os níveis dos reservatórios e as pressões na rede não resultassem valores negativos.

Quadro 2 - Controles adotados para a operação dos sistemas de abastecimento de água

Cenário	Controle simples
1	PUMP B1 OPEN IF NODE RNV BELOW 10.0 PUMP B1 CLOSED IF NODE RNV ABOVE 12.0
2	PUMP B1 OPEN IF NODE RNV1 BELOW 1.6 PUMP B1 CLOSED IF NODE RNV1 ABOVE 4.0 PUMP B2 CLOSED IF NODE RNV1 BELOW 1.9 PUMP B2 OPEN IF NODE RNV2 BELOW 10.0 PUMP B2 CLOSED IF NODE RNV2 ABOVE 12.0
3	PUMP B1 OPEN IF NODE RNV BELOW 1.6 PUMP B1 CLOSED IF NODE RNV ABOVE 4.0
4	PUMP B1 OPEN IF NODE RNV1 BELOW 1.6 PUMP B1 CLOSED IF NODE RNV1 ABOVE 4.0 PUMP B2 CLOSED IF NODE RNV1 BELOW 1.8 PUMP B2 OPEN IF NODE RNV2 BELOW 10.0 PUMP B2 CLOSED IF NODE RNV2 ABOVE 12.0

Fonte: Aatoria própria (2022)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados em dois tópicos principais: i) estudo da demanda de água atual (2022) e futura (2050) e, ii) simulação dos (04) quatro cenários de abastecimento utilizando o software EPANET.

5.1 Demanda de água

Para a demanda de água, de acordo com GOMES (2019), levou-se em consideração os seguintes aspectos: previsão da população, estimativas das perdas, estimativas do consumo, variações do consumo e alcance do projeto.

5.1.1 Estimativa da população futura

A Tabela 3, mostra a população abastecida e a taxa anual de crescimento no período de 2015 a 2021.

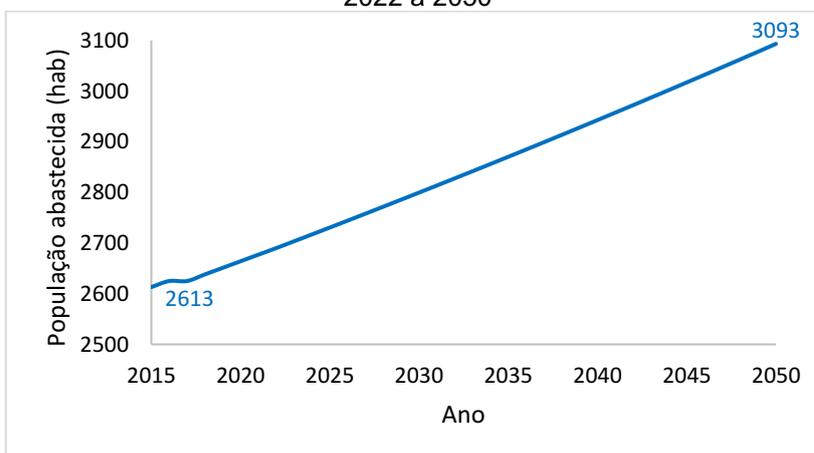
Tabela 3 - Demanda de água pela população ao longo do tempo

Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
População (hab.)	2613	2626	2625	2639	2652	2665	2678
Taxa de crescimento (ano)		0,49%	0,00%	0,49%	0,49%	0,50%	0,50%

Fonte: SANEPAR (2022)

Observa-se na Tabela 3 que, nos últimos anos, a taxa de crescimento anual foi de 0,5%. Com base nisso, foi adotado esse valor (0,5%), para projeção das populações futuras, até o ano de 2050 (Gráfico 3).

Gráfico 3 – Estimativa da população atendida pelo sistema de abastecimento de água no período 2022 a 2050

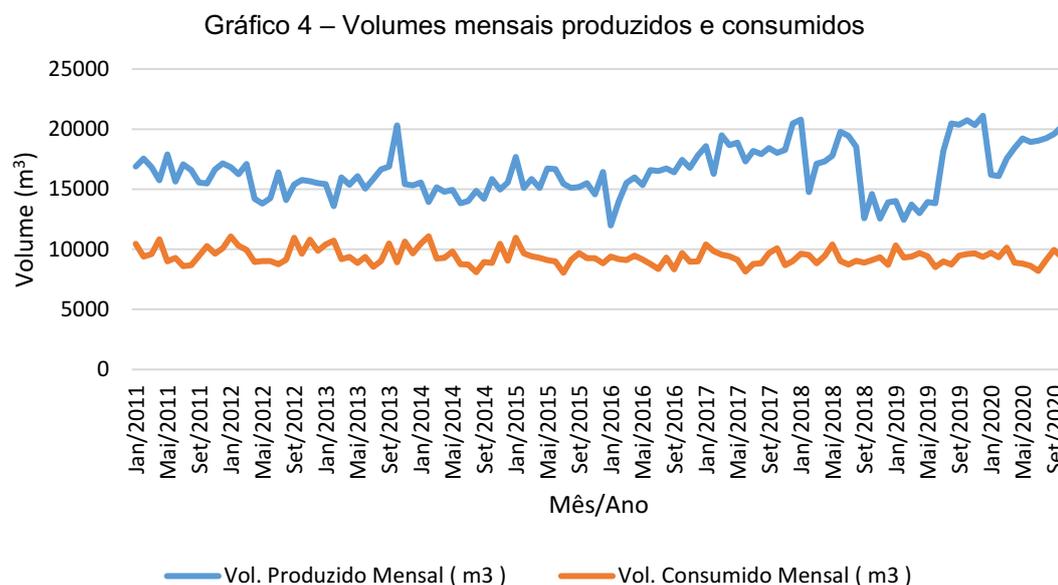


Fonte: Autoria própria (2022)

O Gráfico 3 mostra que a população abastecida no Distrito de Guaravera, foi estimada em 3093 habitantes, no ano de 2050. Para 2021, considerou-se a população igual a 2678 habitantes.

5.1.2 Estimativa dos consumos per capita e perdas de água

No Gráfico 4 são apresentados os volumes mensais produzidos e consumidos no período de janeiro de 2011 a setembro de 2020.



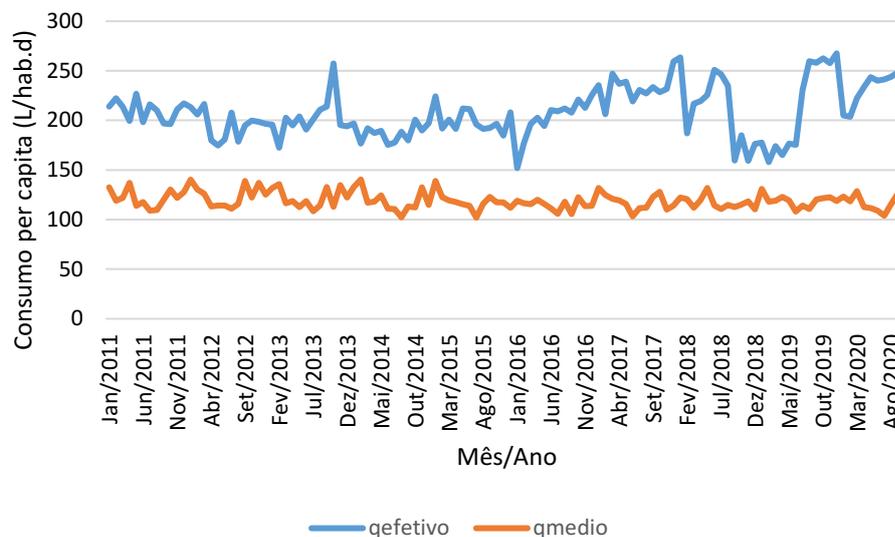
Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar no gráfico 4 que, o volume médio consumido apresenta estabilidade, com variações sazonais, possivelmente atribuídas a época do ano (verão/inverno), enquanto o volume produzido, apresenta pouca variação até meados de 2016. Após este período, se constata oscilação na produção de água, ocasionada, principalmente, pelas perdas de água na rede de distribuição.

Assim, foram consideradas as médias dos valores mensais (janeiro 2011 a outubro 2020), obtendo-se 17122 m³ e 9389 m³, respectivamente, para o volume mensal produzido e consumido.

O consumo per capita médio (q_m) e o consumo per capita efetivo (q_e) foram obtidos, dividindo-se os volumes produzido e consumido médios, pela população abastecida (2678 hab), resultando em q_e igual a 208 L/hab.dia, e q_m de 116 L/hab.dia. A série histórica dos valores de q_m e q_e , são mostrados no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Variação temporal dos consumos per capita eletivo e médio no período de 2011 a 2020



Fonte: Autoria própria (2022)

As perdas médias na distribuição de água foram estimadas pela diferença entre os volumes produzido e faturado, obtendo-se o valor de 44%.

De acordo com a política da Companhia de Saneamento, a partir de 2030 a meta a ser alcançada é reduzir as perdas na distribuição para 25%.

Desta forma, em 2050, adotando-se q_m ligeiramente superior, de 120 L/hab.dia, e perdas de 25%, resulta q_e igual a 160 L/hab.dia.

A variação do dia de maior consumo pelo consumo médio (K_1), considerando o período de 2015 a 2021, oscilou entre 1,11 (2017) a 1,39 (2019). A Companhia de Saneamento recomenda, para projetos futuros no Distrito de Guravera, o valor de K_1 igual a 1,3.

A Tabela 4, resume os parâmetros adotados e as vazões médias de água produzida e distribuída, em 2021 e projetada para 2050. Para as simulações foram adotados os maiores valores, correspondentes a demanda atual (2021).

Tabela 4 - Parâmetros adotados e as vazões médias de água produzida e distribuída

Ano	Pop (hab)	$q_{médio}$ (L/hab.d)	Perdas (%)	$q_{efetivo}$ (L/hab.d)	K_1	$Q_{média}$ produzida (L/s)	$Q_{média}$ distribuída (L/s)
2021	2678	116	44%	208	1,3	10,1*	8,4
2050	3093	120	25%	160	1,3	8,9*	7,4

* Tempo de funcionamento das bombas submersíveis (20 h/d) conforme outorga dos poços

Fonte: Autoria própria (2022)

5.2 Análises das diferentes configurações (cenários) do SAA

Os diferentes cenários permitem a análise de muitos parâmetros, porém decidiu-se priorizar a pressão, vazão e o consumo de energia, considerando aspectos como horários, cotas e custos.

5.2.1 – Características topográficas da área de estudo

As curvas de níveis (isolinhas) obtidas pela interpolação das cotas topográficas nos nós, extraídas por meio do QGIS, são apresentadas no Gráfico 6. Se observam áreas com cotas acima de 590 m na região do reservatório elevado e na parte inferior direita, enquanto cotas inferiores a 560 m em alguns nós da rede, localizadas na região central esquerda.



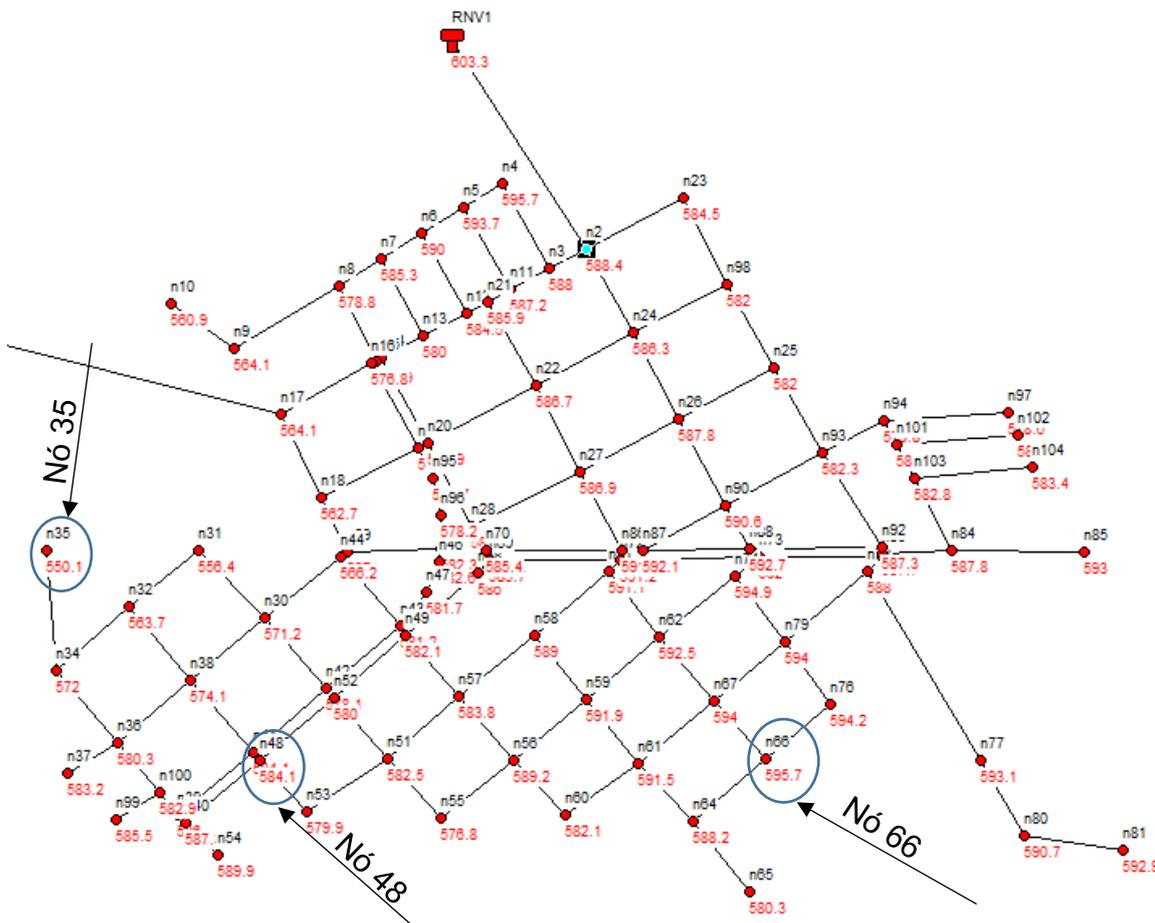
Fonte: A autoria própria (2022)

Os nós dessas áreas foram considerados críticos para o atendimento das pressões na rede, entre 10 mca e 50 mca.

Assim, foram selecionados os nós 35 (ponto baixo com cota 550,1m), 48 (ponto intermediário, cota 584,1 m) e 66 (ponto alto com cota 595,7 m) destacados na Figura

24. O fundo do reservatório de nível variável está na cota 603,3 m, resultando em diferenças de níveis de 19,2 m no nó 35 e de 7,6 m no nó 66.

Figura 24 - Localização dos nós com menor cota (n35), maior cota (n66) e intermediária (n48)



Fonte: Autoria própria (2022)

5.2.2 – Análise das pressões na rede de distribuição de água

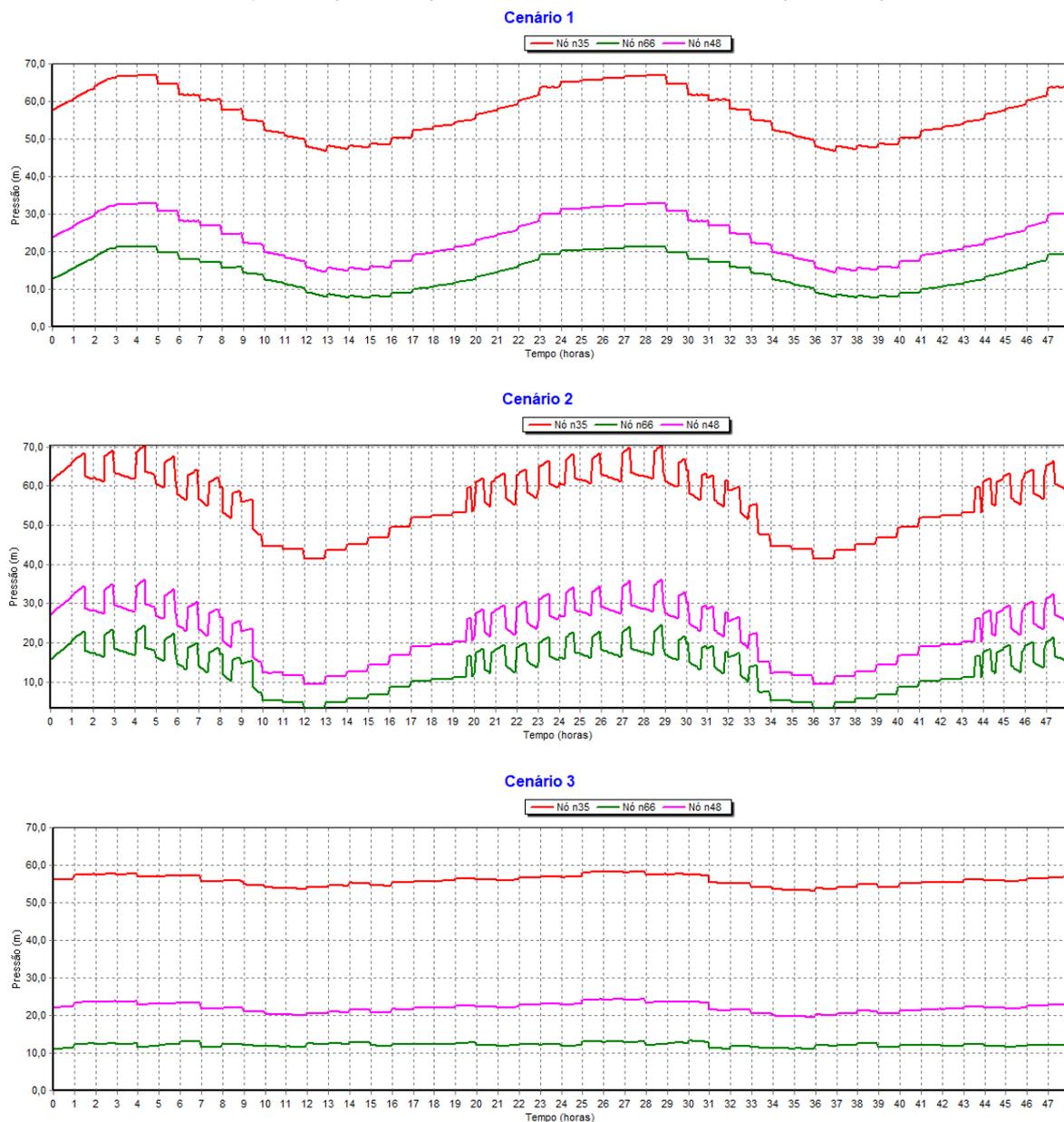
No Gráfico 7 são apresentadas as variações das pressões, ao longo do período de simulação de 48 h, nos nós n35, n48 e n66.

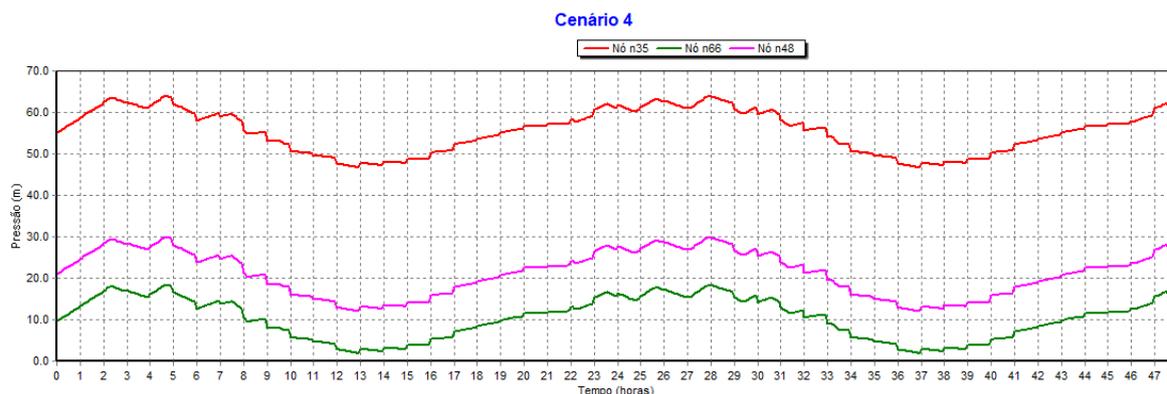
Como era de se esperar, a pressão nos nós aumenta nos períodos de menor consumo (madrugada), e reduz nas horas em que o consumo é maior (início da tarde).

Pode-se notar também, que em nenhum dos quatro cenários, as pressões mínimas e máximas desejáveis, de 10 mca e 50 mca, respectivamente, são atendidas integralmente. Isto se deve, principalmente, pela topografia da área e características da rede de distribuição, sendo difícil adequar as pressões apenas por manobras operacionais.

O nó n35, com a menor cota topográfica, apresenta as maiores pressões, em geral, acima de 50 mca. Por outro lado, no nó n66, exceto no cenário 3, as pressões são inferiores a 10 mca nos horários de maior consumo.

Gráfico 7- Variação temporal da pressão nos nós n35, n48 e n66 para os quatro cenários





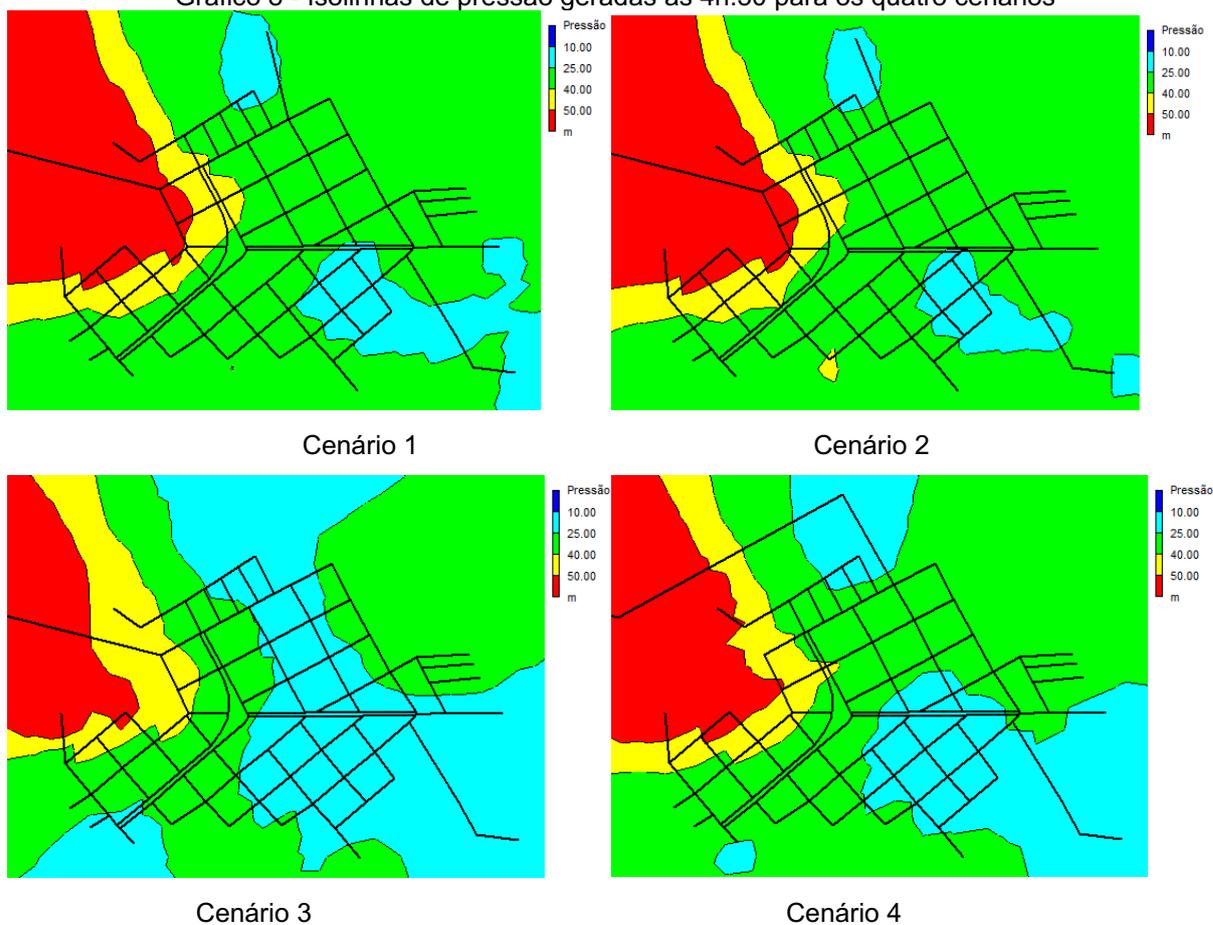
Fonte: Autoria própria (2022)

Além disso, no cenário 2, são verificadas variações bruscas de pressão na rede de distribuição, possivelmente pelos constantes acionamentos e paradas da bomba de recalque. Estas variações de pressão, podem ocasionar transientes hidráulicos e, conseqüentemente, danos e rompimentos nas conexões e tubulações, elevando as perdas de água na rede de distribuição.

Em contrapartida, com a utilização do inversor de frequência (cenário 3), as pressões se mantêm relativamente constantes.

Observando o Gráfico 8, se constata que as maiores pressões ocorrem entre às 4h e 5h, e que as pressões são mínimas acontecem das 12h às 13h. Assim, foram geradas isolinhas de pressão às 4h:30 e 12h:30 (Gráficos 8 e 9).

Gráfico 8 - Isolinhas de pressão geradas às 4h:30 para os quatro cenários

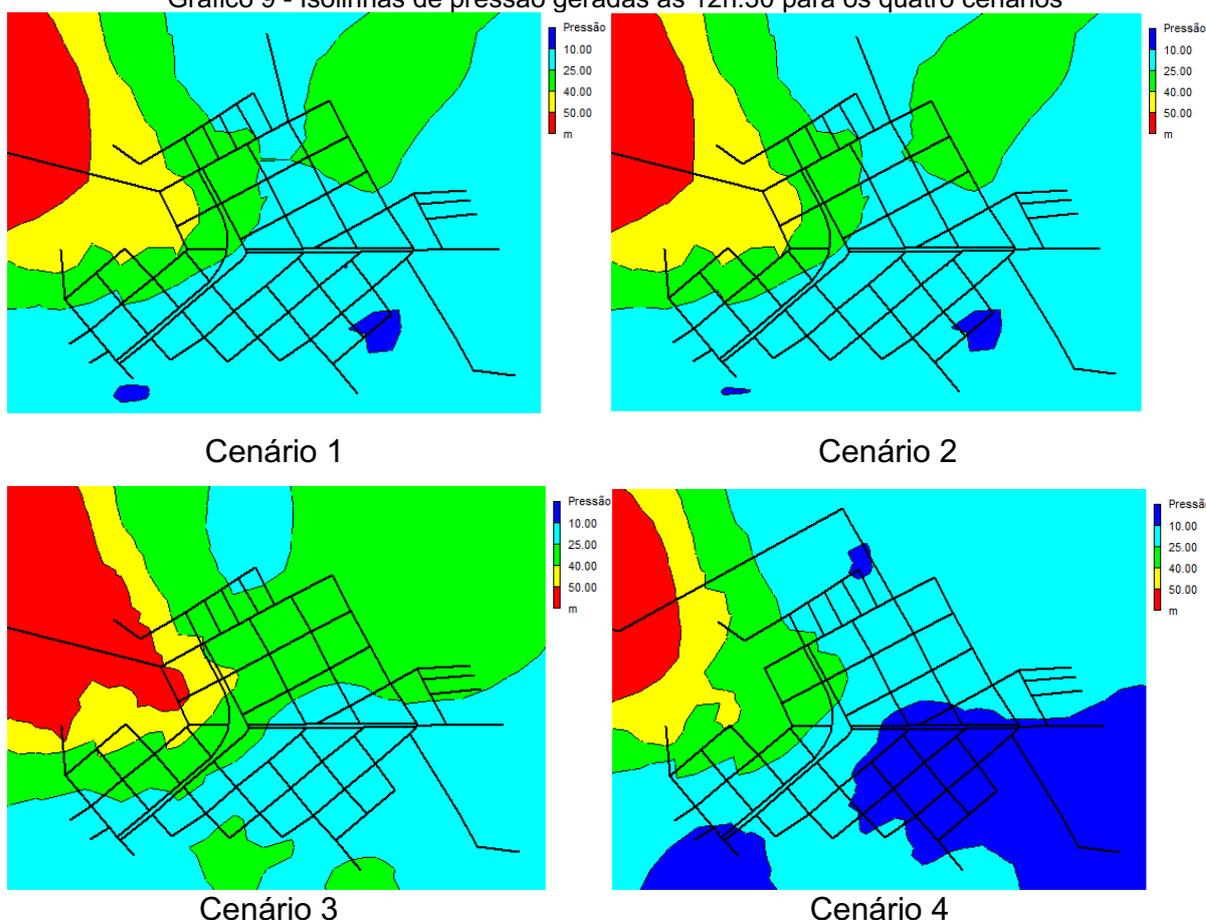


Fonte: Autoria própria (2022)

Se verifica, em todos os cenários, que no horário das 4h30, as pressões são superiores a 10 mca em todos os nós da rede, e nas áreas de cotas mais baixas, ultrapassam 50 mca.

Da mesma forma, as isolinhas de pressão, às 12h30, podem ser visualizadas no gráfico 9.

Gráfico 9 - Isolinhas de pressão geradas às 12h:30 para os quatro cenários



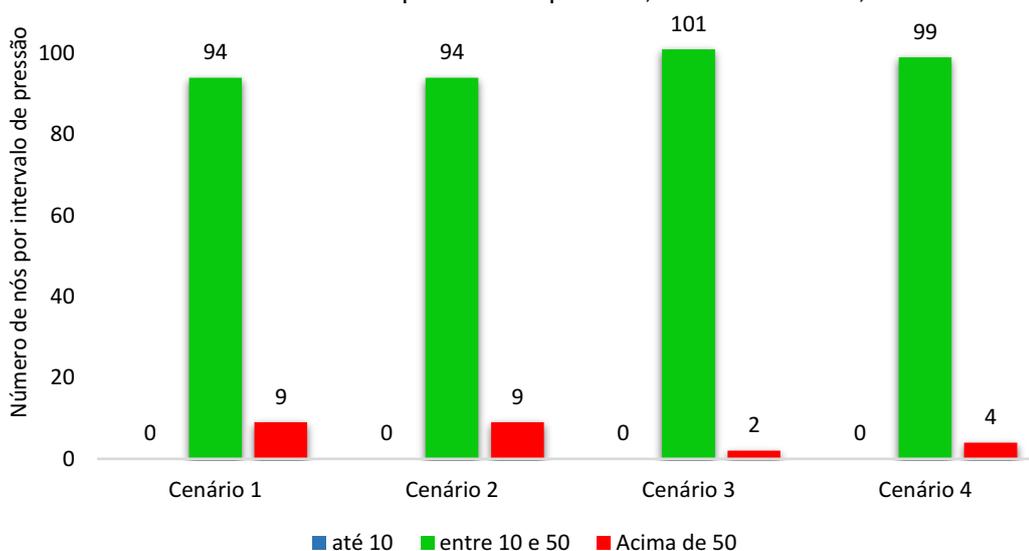
Fonte: Autoria própria (2022)

No horário das 12h30, as simulações hidráulicas mostram que nos cenários 1, 2 e 4 ocorrem pressões abaixo de 10 mca nos pontos altos da rede e ausência de sobre pressão. Já no cenário 3, nenhum nó tem pressão inferior a 10 mca, porém, nas cotas mais baixas a pressão ultrapassa 50 mca.

Os Gráfico 10 e 11 quantificam o número de nós, por faixas de vazão, em cada cenário. Fica evidenciado que, às 4h30, nenhum nó, nos quatro cenários, tem pressão inferior a 10 mca e, mais de 90% dos nós apresentam pressões adequadas, chegando a 98% no cenário 3.

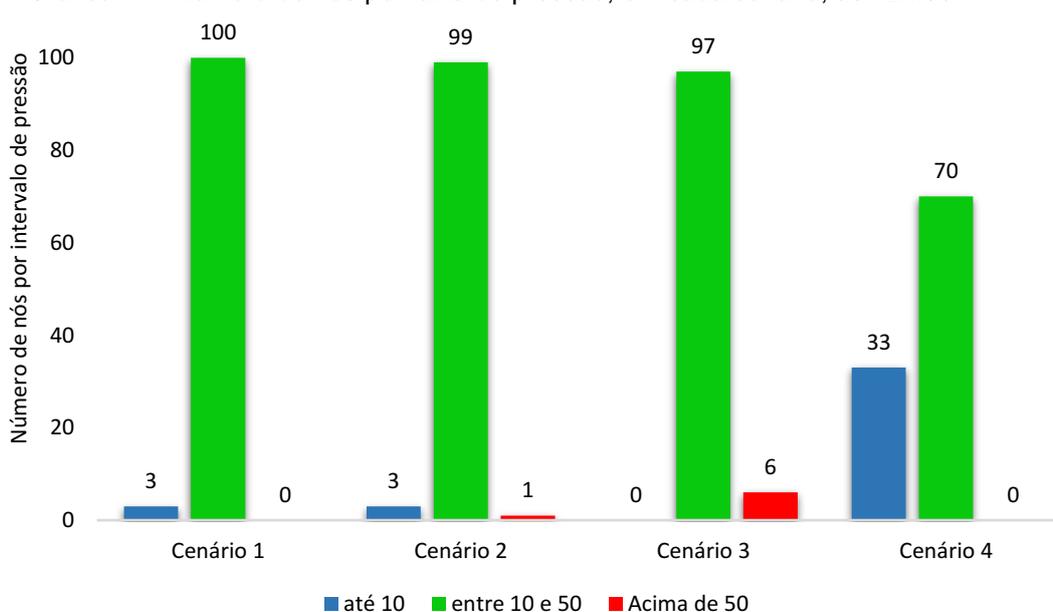
No horário das 12h30, exceto no cenário 4, em que 32% dos nós tem pressão abaixo de 10 mca, nos demais cenários, mais de 94% dos nós tem pressões entre 10 mca e 50 mca. O cenário 4 é o único que não há injeção da água bombeada na rede. Pode-se inferir, que pela pequena diferença de cotas entre o reservatório e as áreas mais elevadas, há dificuldade de manter pressões mínimas na rede com esta configuração, mesmo mantendo o reservatório elevado com níveis elevados de água.

Gráfico 10 - Número de nós por faixa de pressão, em cada cenário, às 4h:30



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 11 - Número de nós por faixa de pressão, em cada cenário, às 12h:30

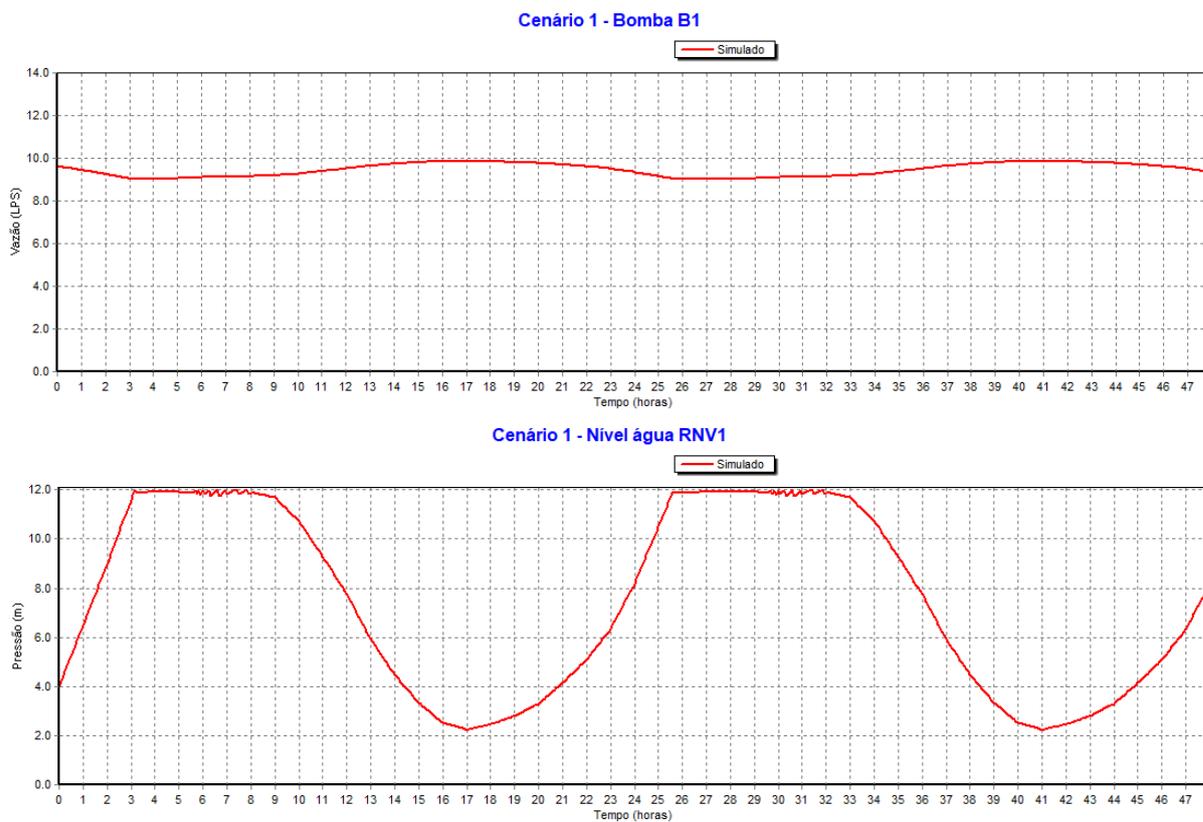


Fonte: Autoria própria (2022)

Desta forma, os controles operacionais no reservatório elevado (RNV2), foram ajustados para a bomba ligar quando o nível mínimo de água alcançasse 10 m e desligasse no nível máximo (12m).

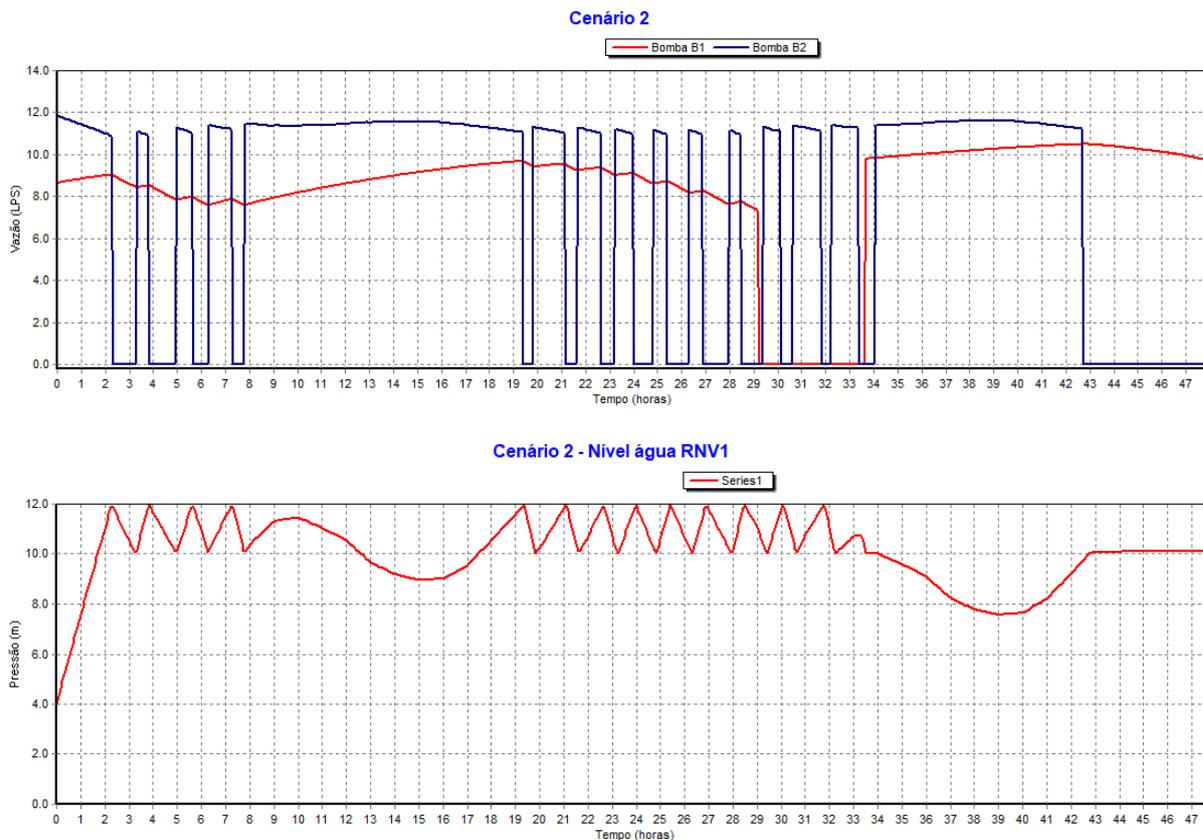
O comportamento das vazões das bombas (B1-Bomba submersível e B2-Bomba de motor externo) e dos níveis dos reservatórios (RNV1 ou REL, Reservatório Elevado e RNV2 ou RAP, Reservatório Apoiado), nos diferentes cenários estão presentes dos Gráficos 12 ao 15.

Gráfico 12- Variação temporal da vazão da bomba B1 e nível d'água no reservatório elevado (RNV1) no cenário 1



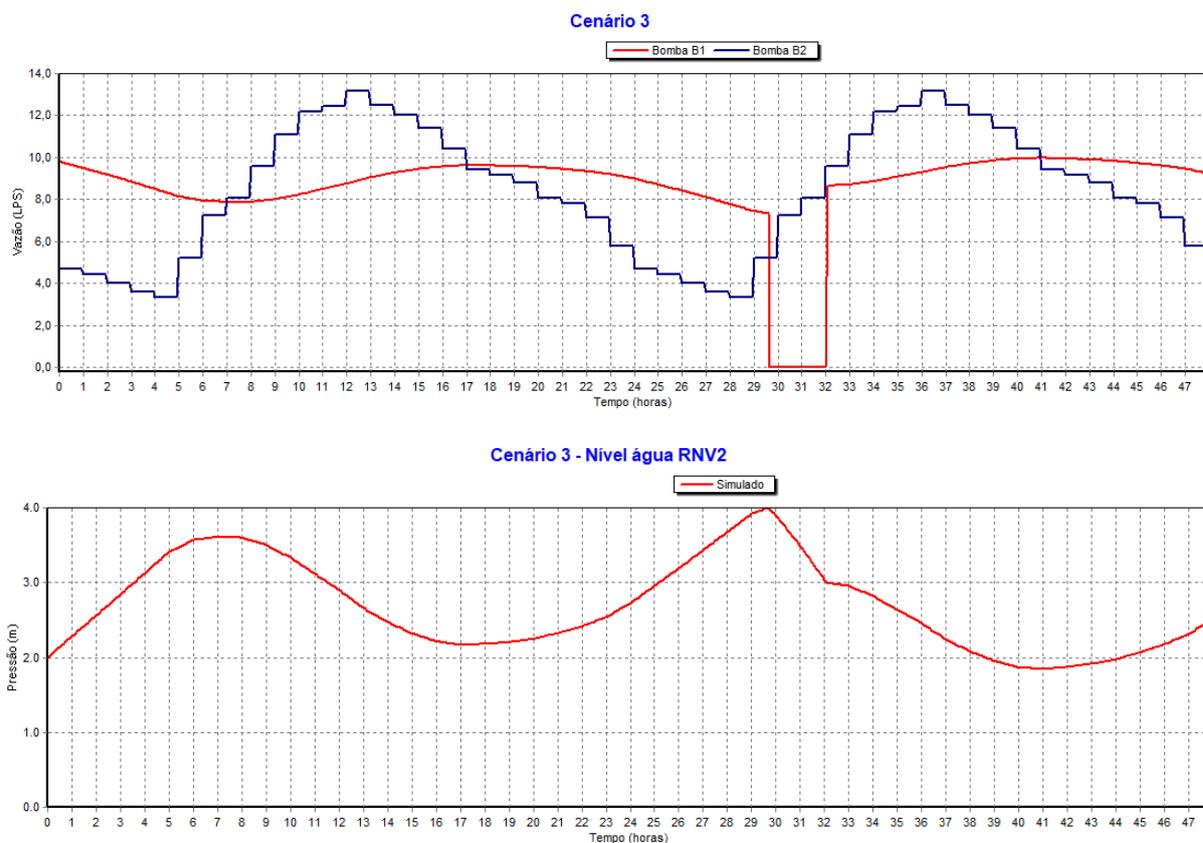
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 13 - Variação temporal das vazões das bombas B1 e B2 e nível d'água no reservatório elevado (RNV1) no cenário 2



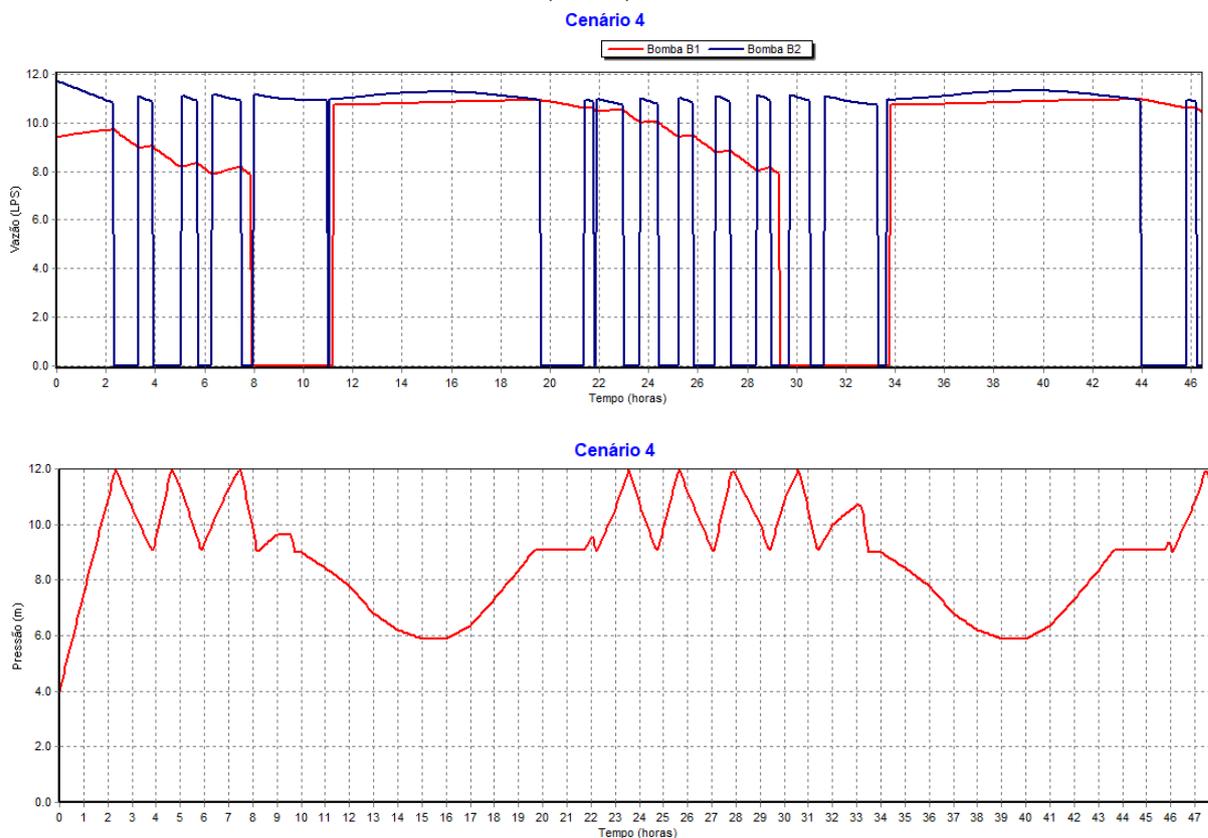
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 14 - Variação temporal das vazões das bombas B1 e B2 e nível d'água no reservatório apoiado (RNV2) no cenário 3



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 15 - Variação temporal das vazões das bombas B1 e B2 e nível d'água no reservatório elevado (RNV1) no cenário 4



Fonte: Autoria própria (2022)

Nos Gráficos 13 e 15, relativos aos cenários 2 e 4, se observa que a bomba B2 é acionada com mais frequência (liga/desliga), uma vez que o volume útil de armazenamento é reduzido (cerca de 14 m³), buscando atender as demandas e pressões na rede de distribuição. Entretanto, nos horários de maior consumo de água, os níveis de água reduzem para cerca de 9 m, no cenário 2, e 6 m no cenário 4, insuficientes para manter as pressões mínimas adequadas nos pontos altos da rede de distribuição.

No Gráfico 12, relativo ao cenário 1, embora o nível no REL chegue próximo de 2 m, a injeção de água diretamente na rede ameniza a ocorrência de pressões baixas nos nós.

O relatório de energia, nos cenários testados pode ser visualizado na Figura 25.

Se observa que o tempo de funcionamento da bomba 1 (bomba submersível) foi superior a 83,74% (20 h) em todos os cenários. Embora tenha sido modelada uma única fonte de água, a existência de dois poços profundos, com tempo de

funcionamento outorgado de 20 h/d, permite a produção de água durante 24 horas diárias.

Os rendimentos médios das bombas submersíveis (50%) e das bombas com motor externo (75%) foram baseados nas Tabelas 1 e 2 para conjuntos com boas eficiências.

Apesar do consumo da energia elétrica ser muito variável, dependendo do sistema de abastecimento considerado, TSUTIYA (2006) apresenta um índice médio de referência de 0,6 kWh/m³ de água produzida (bombeada).

Nos cenários testados, apenas o 1 apresentou valor superior (0,69 kWh/m³), resultando um custo diário de R\$ 197,31. O cenário 3, com o bombeamento acoplado ao inversor de frequência, foi a alternativa de operação mais econômica (0,52 kWh/m³ e R\$ 146,7 por dia).

Exceto no cenário 1, o consumo de energia elétrica da bomba submersível representa, em torno de, 12% do total.

Figura 25 - Relatório de energia para os 04 cenários

Bomba	Porcentagem Utilização	Rendimento Médio	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia
B1	90.33	55.00	0.69	23.68	23.97	197.31
Custo Total						197.31
Tarifa de Consumo Máx						0.00

Cenário 1

Bomba	Porcentagem Utilização	Rendimento Médio	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia
B1	90.73	55.00	0.07	2.22	2.35	18.69
B2	76.25	75.00	0.50	20.34	20.91	142.25
Custo Total						160.94
Tarifa de Consumo Máx						0.00

Cenário 2

Bomba	Porcentagem Utilização	Rendimento Médio	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia
B1	94.99	55.00	0.07	2.21	2.32	19.29
B2	100.00	75.00	0.45	14.14	25.16	127.42
Custo Total						146.70
Tarifa de Consumo Máx						0.00

Cenário 3

Bomba	Porcentagem Utilização	Rendimento Médio	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia
B1	83.74	55.00	0.07	2.47	2.57	19.53
B2	78.10	75.00	0.50	20.01	20.78	145.11
Custo Total						164.64
Tarifa de Consumo Máx						0.00

Cenário 4

Fonte: Autoria própria (2022)

6 CONCLUSÕES

Este trabalho possibilitou, por meio da modelagem e simulação hidráulica, representar e compreender melhor as condições operacionais do sistema de abastecimento de água de Guaravera, PR, nas 04 diferentes configurações.

A utilização do programa Epanet, em conjunto com o AutoCad e QGIS, dinamizaram a inserção dos dados para modelagem e simulações das unidades que compõem o sistema de água.

O sistema de produção atende as demandas atual e futura (2050). Mesmo com aumento populacional, a redução das perdas, de 45 % (atual) para 25% (a partir de 2030), deve reduzir o consumo de água no futuro.

Com base na modelagem e simulação dos 04 cenários pode-se concluir que:

- O volume de reservação atual (75 m^3) é insuficiente para garantir o abastecimento de água com pressões adequadas nos pontos de consumo;
- As características topográficas e da rede de distribuição, não permitem o atendimento das pressões, em todos os nós, recomendadas pela NBR 12.218/2017, apenas por manobras operacionais. Possivelmente, são necessárias intervenções estruturais (instalação de válvulas redutoras de pressão, otimização de diâmetros, entre outras), para adequar as pressões nos pontos de consumo;
- O cenário 3 (injeção da água na rede de distribuição com bombeamento associado ao inversor de frequência), apresentou menores variações das pressões nos nós, possivelmente, reduzindo danos e rompimentos nas tubulações e minimizando as perdas de água, estimadas atualmente em 45%. Também os custos com energia elétrica com o bombeamento, foram os mais baixos, com $0,52 \text{ kWh/m}^3$ e R\$ 146,7 por dia.

7 REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12.218. Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento. p.1-23, 2017.

ABRAHÃO, N.C. Aplicações SIG para empresas de saneamento básico. 1ª edição. ABES. São Paulo, Brasil, 2020.

AMARAL, Francisco Eudes do et al. Uso de técnicas de geoprocessamento na otimização do traçado de sistemas adutores de abastecimento de água com a utilização de uma base de dados de alta definição. Engenharia Sanitaria e Ambiental, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 381-391, mar. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020193734>

BARBOSA, V.R.F., CICERELLI, R. E., DE ALMEIDA, T. Análise comparativa entre modelos digitais de elevação (MDE) do satélite ALOS. XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. De 14 a 17 de abril de 2019. Santos. SP. 2019.

CÂMARA, G., MEDEIROS, J. S. Princípios básicos em Geoprocessamento. In: ASSAD, Eduardo D.; SANO, Edson E. Sistemas de Informações Geográficas. Aplicações na agricultura. 2. ed. Brasília: Embrapa, 1998. 434 p. 3-11.

<http://dx.doi.org/10.5216/reec.v10i1.33076>CUNHA, Agne Pereira da et al. CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDRÁULICO DE REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA VIA MODELO INVERSO. Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 36-49, 25 jul. 2015. Universidade Federal de Goiás. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v10i1.33076>**Erro! A referência de hiperlink não é válida..**

ELMASRI, R.; NAVHATE, S.B. (2004) Fundamentals of Database Systems 4. ed. Boston: Addison Wesley. 1030 p.

FERREIRA, R. C.; OLIVEIRA, A. L. Manual de Cálculo do Consumo Energético Normalizado e do Potencial de Economia em Instalações de Bombeamento, Brasília. 2017.

GOMES, H. P. Eficiência hidráulica e energética em saneamento. 2 ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009.

GOMES, Heber Pimentel et al. Abastecimento de Água. João Pessoa: Lenhs - Ufpb, 2019. 464 p.

GOMES, Heber Pimentel; CARVALHO, Paulo Sérgio O. de. **MANUAL DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO Eficiência Energética**. João Pessoa: Editora Universitária – Ufpb, 2012.

OLIVEIRA, H. A. Uso de simuladores hidráulicos e aplicativos de geoprocessamento para diagnóstico operacional de sistemas de distribuição de água – estudo de caso: setor Sacomã, município de São Paulo. 2011. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Hidráulica e Saneamento) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, R. M. Uso de sistemas de informações geográficas na operação de sistemas de distribuição de água. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, p. 98, 2009

PLADEVALL, Luiz Roberto Gravina et al. Melhoria da gestão operacional de sistemas de abastecimento de água através do SIG integrado à modelagem hidráulica. In: ENCONTRO TÉCNICO AESABESP, 32., 2021, São Paulo. MELHORIA DA GESTÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA ATRAVÉS DO SIG INTEGRADO À MODELAGEM HIDRÁULICA. São Paulo: Aesabesp, 2020. p. 1-12. Prefeitura de Londrina. Distrito de Guaravera. Disponível em: <https://portal.londrina.pr.gov.br/distritos-da-zona-rural/distrito-de-guaravera>. Acesso em: 26 nov. 2021.

RIBEIRO, A.C.V. C.; MARQUES, M.G.; E, D, TEIXEIRA; DAI PRÁ, M. CASTIGLIO, G. S.; LORENZIN, A. E. Metodologia para otimização da seleção de bombas em diagnósticos hidroenergéticos. In: Atas do XVI Seminário Ibero-americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem Técnico, Lisboa, 15-17 julho, 2019.

ROSSMAN, L.A. EPANET Users Manual. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio. 2000.

SANEPAR. **Termo de referência 065/2016 - USGH para perfuração do poço 02 distrito de Guaravera do município de Londrina.** Londrina: Prefeitura de Londrina, 2016.

SANEPAR. **Quadro Confronto Produção x Demanda.** Londrina: Companhia de Saneamento, 2022.

SIAGAS. **Poço: 3500018570.** Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=3500018570>. Acesso em: 06 jun. 2022.

SILVA, C. O. Modelagem de rede de distribuição de água com ênfase no controle de perdas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, UFPB, João Pessoa, PB, p. 112, 2014.

TIBURCIO, E., CASTRO, M. A. Uma implementação em SIG para suporte ao dimensionamento hidráulico em sistemas de fornecimento de água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17º. 2007, São Paulo. Anais... São Paulo, 2007.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Abastecimento de Água. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p. 659. 2006.