

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

LARISSA DE CASTRO BONADIO

PROGRAMAÇÃO DAS BOMBAS HIDRÁULICAS PARA OTIMIZAÇÃO
ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA
UTILIZANDO PYTHON E O *SOFTWARE* EPANET

BAURU - SP

Janeiro/2023

LARISSA DE CASTRO BONADIO

**PROGRAMAÇÃO DAS BOMBAS HIDRÁULICAS PARA OTIMIZAÇÃO
ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO
PYTHON E O *SOFTWARE* EPANET**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de
Bacharelado em Ciência da Computação da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências, Câmpus
Bauru.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Edilaine Martins Soler

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a Andréa Carla
Gonçalves Vianna

BAURU

Janeiro/2023

B697p

Bonadio, Larissa de Castro

Programação das bombas hidráulicas para otimização energética em sistemas de abastecimento de água utilizando Python e o software EPANET / Larissa de Castro Bonadio. -- Bauru, 2023

76 f. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciência da Computação) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru

Orientadora: Edilaine Martins Soler

Coorientadora: Andréa Carla Gonçalves Vianna

1. Otimização. 2. Sistema de Abastecimento de Água. 3. EPANET. 4. Python. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências, Bauru.

Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Larissa de Castro Bonadio

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de
Bacharelado em Ciência da Computação da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências, Câmpus
Bauru.

Banca Examinadora

Prof^a. Dra. Andréa Carla Gonçalves Vianna

Departamento de Computação da Faculdade de Ciências
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Prof^a. Dra. Simone das Graças Domingues Prado

Departamento de Computação da Faculdade de Ciências
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Prof^a. Dra. Adriana Cristina Cherri Nicola

Departamento de Matemática da Faculdade de Ciências
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Bauru, 16 de janeiro de 2023

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a minha família, principalmente à minha irmã, que me fizeram chegar até aqui, com o apoio, resistência e incentivo aos meus estudos.

Também agradeço aos professores que me deram aula, em especial as mulheres, por demonstrar tanta afeição pela profissão, determinação, ensinamentos e inspiração, ainda mais em uma área majoritariamente masculina.

Por fim, deixo meus agradecimentos à UNESP, que me proporcionou diversas amizades, oportunidades e aprendizados durante esses quatro anos de curso.

RESUMO

A água é um recurso natural e essencial que garante o bem-estar e saúde da população. Para a população humana usufruir desse recurso é fundamental a utilização dos sistemas de abastecimento de água. Em diversas etapas de seu funcionamento a energia elétrica é usada, principalmente pelas bombas hidráulicas, as quais são empregadas para viabilizar a transferência de água de um ponto inferior para um superior, contudo esse processo apresenta um alto custo energético. Neste contexto, para auxiliar o desenvolvimento do planejamento da operação das bombas hidráulicas, os modelos e métodos de otimização e simuladores hidráulicos são utilizados como ferramenta. Desse modo, esse trabalho desenvolveu um *software*, em linguagem de programação Python, que verifica a aplicabilidade da solução obtida pelo modelo matemático de otimização energética desenvolvido por Parras (2020), de forma a analisar a solução proposta por ele, e simulá-la no simulador hidráulico EPANET.

PALAVRAS-CHAVES: Otimização. Sistema de Abastecimento de Água. EPANET. Python.

ABSTRACT

Water is a natural and essential resource that guarantees the well-being and health of the population. For the human population to enjoy this resource, the use of water supply systems is essential. In several stages of its operation, electrical energy is used, mainly by hydraulic pumps, which are used to enable the transfer of water from a lower point to a higher one, however this process has a high energy cost. In this context, to help the development of planning the operation of hydraulic pumps, models and methods of optimization and hydraulic simulators are used as a tool. Thus, this work developed a software, in Python programming language, that verifies the applicability of the solution obtained by the mathematical model of energy optimization developed by Parras (2020), in order to analyze the solution proposed by him, and simulate it in the EPANET hydraulic simulator.

KEYWORDS: Optimization. Water supply system. EPANET. Python.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Abastecimento de Água.....	16
Figura 2 – Tipos de reservatórios de água.....	19
Figura 3 – Esquema de rede ramificada.....	20
Figura 4 – Esquema de rede malhada em anéis.....	21
Figura 5 – Esquema de rede malhada em blocos.....	21
Figura 6 – Configuração básica do ambiente de trabalho do EPANET.....	27
Figura 7 – Botões de atalho para a edição do mapa da rede.....	28
Figura 8 – Página de dados da janela navegador.....	28
Figura 9 – Página de tempos da janela de dados navegador.....	29
Figura 10 – Página de energia da janela de dados do navegador.....	29
Figura 11 – Aba de edição dos controles da janela de dados do navegador.....	30
Figura 12 – Página do mapa da janela navegador.....	30
Figura 13 – Editor de propriedades.....	31
Figura 14 – Componentes físicos de um sistema de distribuição de água.....	31
Figura 15 – Exemplo de curvas de bombas.....	34
Figura 16 – Exemplo de curvas de rendimento.....	35
Figura 17 – Exemplo de arquivo de dados na categoria de componentes da rede.....	36
Figura 18 – Exemplo de arquivo de dados na categoria de operação do sistema.....	37
Figura 19 – Exemplo de arquivo de dados na categoria de opções de simulação e relatório... 38	
Figura 20 – Sistema de abastecimento hipotético proposto por Parras (2020).....	49
Figura 21 – Sistema de abastecimento hipotético de Parras (2020) no EPANET.....	49
Figura 22 – Curva para cada bomba de captação.....	50
Figura 23 – Curva para cada bomba que eleva água para o reservatório apoiado.....	51
Figura 24 – Curva da bomba que eleva água para o reservatório elevado.....	51
Figura 25 – Curva da bomba que transfere água do reservatório apoiado para o elevado.....	52
Figura 26 – Fluxograma do algoritmo geral.....	54
Figura 27 – Interface inicial.....	55
Figura 28 – Interface que recebe as informações adicionais da rede.....	56
Figura 29 – Interface para o <i>download</i> do arquivo de dados modificado.....	57
Figura 30 – Política de operação das bombas da rede – Cenário 1: Rendimento das bombas de 60% com tubulação nova.....	60

Figura 31 – Balanço de Vazão – Cenário 1: Rendimento das bombas de 60% e tubulação nova.....	62
Figura 32 – Carga Hidráulica e Vazão – Cenário 1: Rendimento das bombas de 60% e tubulação nova.....	62
Figura 33 – Política de operação das bombas da rede – Cenário 2: Rendimento das bombas de 70% com tubulação nova.....	63
Figura 34 – Balanço de Vazão – Cenário 2: Rendimento das bombas de 70% e tubulação nova.....	65
Figura 35 – Carga Hidráulica e Vazão – Cenário 2: Rendimento das bombas de 70% e tubulação nova.....	65
Figura 36 – Política de operação das bombas da rede – Cenário 3: Rendimento das bombas de 60% com tubulação antiga.....	66
Figura 37 – Balanço de Vazão – Cenário 3: Rendimento das bombas de 60% e tubulação antiga.....	68
Figura 38 – Carga Hidráulica e Vazão – Cenário 3: Rendimento das bombas de 60% e tubulação antiga.....	68
Figura 39 – Política de operação das bombas da rede – Cenário 4: Rendimento das bombas de 70% com tubulação antiga.....	69
Figura 40 – Balanço de Vazão – Cenário 4: Rendimento das bombas de 70% e tubulação antiga.....	71
Figura 41 – Carga Hidráulica e Vazão – Cenário 4: Rendimento das bombas de 70% e tubulação antiga.....	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Palavras-chaves utilizadas na categoria de componentes da rede.....	36
Quadro 2 – Palavras-chaves utilizadas na categoria de operação do sistema.....	37
Quadro 3 – Palavras-chaves utilizadas na categoria de opções de simulação e relatório.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Demandas de cada nó consumidor em cada período.....	53
Tabela 2 – Fator de atrito de Darcy–Weisbach.....	53
Tabela 3 – Pressão nos nós consumidores e reservatórios – Cenário 1: Rendimento das bombas de 60% com tubulação nova.....	61
Tabela 4 – Pressão nos nós consumidores e reservatórios – Cenário 2: Rendimento das bombas de 70% com tubulação nova.....	64
Tabela 5 – Pressão nos nós consumidores e reservatórios – Cenário 3: Rendimento das bombas de 60% com tubulação antiga.....	67
Tabela 6 – Pressão nos nós consumidores e reservatórios – Cenário 4: Rendimento das bombas de 70% com tubulação antiga.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kV	Kilovolts
kW	Kilowatts
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
tW	Terawatts
TWh	Terawatts por hora
WNTR	<i>Water Network Tool for Resilience</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.2	Organização da Monografia.....	16
2	SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA	17
2.1	Sistema de Abastecimento de Água.....	17
2.1.1	Manancial.....	18
2.1.2	Captação.....	18
2.1.3	Adução	18
2.1.4	Tratamento	19
2.1.5	Reservatório	19
2.1.6	Rede de Distribuição.....	21
2.1.7	Termos e conceitos técnicos relacionados ao sistema de abastecimento de água.....	23
2.2	Energia Elétrica.....	23
3	SIMULADOR HIDRÁULICO EPANET	27
3.1	Ambiente de Trabalho.....	27
3.2	Modelo de Sistema de Distribuição de Água.....	32
3.2.1	Nó.....	33
3.2.2	Reservatório de nível fixo.....	33
3.2.3	Reservatório de nível variado	33
3.2.4	Tubulação.....	33
3.2.5	Bomba.....	34
3.2.6	Válvula.....	34
3.2.7	Curva da bomba	34
3.2.8	Curva de rendimento.....	35
3.2.9	Padrões temporais	36

3.2.10	Controle simples	36
3.2.11	Arquivo de dados	36
4	MODELO MATEMÁTICO DE PARRAS	40
4.1	Função Objetivo.....	40
4.2	Restrições para o Cálculo da Demanda Contratada	44
4.3	Cálculo do Volume de Água nos Reservatórios	44
4.4	Restrições para as Zonas de Pressão	45
4.5	Restrições para o Volume de Água nos Reservatórios	45
4.6	Restrição para a Vazão de Água Captada	46
4.7	Restrições para os Acionamentos das Bombas	46
5	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZADA	50
6	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	55
6.1	Python	56
6.2	Interface Gráfica	56
6.3	Modelo Computacional.....	58
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
7.1	Cenário de Simulação 1: Rede de Abastecimento de Água com Tubulação Nova e bombas com Rendimento de 60%	61
7.2	Cenário de Simulação 2: Rede de Abastecimento de Água com Tubulação Nova e Bombas com Rendimento de 70%.....	64
7.3	Cenário de Simulação 3: Rede de Abastecimento de Água com Tubulação Antiga e Bombas com Rendimento de 60%	67
7.4	Cenário de Simulação 4: Rede de Abastecimento de Água com Tubulação Antiga e Bombas com Rendimento de 70%	70
8	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável à sobrevivência humana, ela garante o bem-estar e saúde para a população. Para que todos tenham acesso a este recurso em quantidade e qualidade, os sistemas de abastecimento de água são utilizados. De acordo com a última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, realizada em 2017, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), dos 5570 municípios brasileiros, apenas 22 não possuem rede de distribuição de água.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2021), os sistemas de abastecimento de água são formados por conjuntos de equipamentos, infraestruturas e serviços, que tem por finalidade atender o consumo de água doméstico, comercial, industrial e de serviços públicos.

Em diversas etapas de um sistema de abastecimento, é essencial o uso de energia elétrica. Sua utilização é dada principalmente pelas estações elevatórias, que viabilizam a transferência de água de um ponto inferior para um ponto superior, por meio de bombas hidráulicas. Essas estações são empregadas para a captação de água em poços, rios e em estações de tratamento de água, para o transporte de água entre reservatórios e para o abastecimento dos reservatórios de distribuição.

O levantamento feito pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2020) apontou que os serviços de água e esgoto consomem 13,9 TWh, desse total 12,4 TWh, equivalente a 89,2% é utilizado somente pelos sistemas de abastecimento de água. Tsutiya (2001) especifica que as bombas hidráulicas consomem aproximadamente 95% de toda a energia elétrica utilizada em um sistema de abastecimento de água.

Na prática, para a operação das bombas hidráulicas o procedimento frequentemente usado é o acionamento delas quando o nível mínimo do reservatório é atingido, até que o nível máximo seja alcançado. Contudo, esse procedimento mostra-se ineficiente no ponto de vista energético, uma vez que no Brasil e em muitos outros países, as tarifas de energia elétrica são dinâmicas, ou seja, possuem valores diferentes de acordo com o horário do dia. O período que possui tarifas energéticas mais altas é chamado de horário de ponta.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o horário de ponta brasileiro refere-se ao período composto por três horas diárias consecutivas, estabelecidas pela empresa distribuidora. Este período é determinado a partir da curva de carga do sistema elétrico, para toda a área de concessão, com exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais (ANEEL, 2015). No estado de São Paulo o horário de ponta é definido entre às 18 e 21 horas.

Neste contexto, é evidenciado a necessidade de desenvolver um planejamento da operação das bombas hidráulicas pertencentes a rede de abastecimento, de modo a controlar e respeitar os níveis de volume de água nos reservatórios. Com isso, pretende-se evitar o funcionamento das bombas no horário de ponta e garantir o atendimento da demanda. Vale ressaltar que esse tipo de planejamento possui uma alta complexidade, devido às dimensões que um sistema pode ter, a demanda que deve atender, assim como as diversas ligações entre seus reservatórios.

À vista disso, nas últimas décadas, inúmeros modelos e métodos de otimização para o planejamento da operação das bombas hidráulicas em um sistema de abastecimento, foram propostos na literatura, como em Toledo et al. (2008), Bagirov et al. (2013), Sousa (2013), Ghaddar et al. (2015), Soler et al. (2016), Parras (2020), entre outros.

O modelo matemático proposto por Parras (2020) se destaca dos outros por se tratar de um modelo de otimização linear inteiro misto completo, que tem como objetivo minimizar os custos com energia elétrica de um sistema de abastecimento de água ao mesmo tempo que utiliza restrições que facilitam a operação da rede e garante o atendimento total da demanda.

Além disso, por ser um modelo matemático linear inteiro misto, sua solução é viável computacionalmente, e pode ser feita por *solvers* de otimização, como demonstrado em Parras (2020) e Faccioli (2021), que utilizaram o *solver* CPLEX para a implementação e resolução do modelo.

Com a finalidade de auxiliar o planejamento e operação de sistemas de abastecimento, existem os simuladores hidráulicos que reproduzem esse tipo de sistema, e que proporcionam a visualização de seus componentes e funcionamento. O *software* EPANET (Rossman et al, 2009) é amplamente utilizado para a execução de simulações estáticas e dinâmicas do desempenho hidráulico e de qualidade da água de uma rede.

Utilizando o modelo matemático desenvolvido por Parras (2020), Faccioli (2021) realizou testes numéricos com duas redes de distribuição. A partir da solução obtida pelo modelo, a programação da operação das bombas foi testada e avaliada no simulador hidráulico EPANET, de modo a observar a viabilidade das soluções.

1.1 Objetivos

Neste trabalho, o principal objetivo foi desenvolver um *software* capaz de automatizar a comunicação entre o simulador hidráulico EPANET e o modelo matemático de otimização energética proposto por Parras (2020), de modo a analisar e viabilizar a aplicabilidade prática

da solução obtida, verificando a operação do modelo para a operação de sistemas de abastecimento reais. Para isso foi necessário: Implementar e resolver o modelo matemático proposto por Parras (2020), utilizando a linguagem de programação Python, suas bibliotecas e o *solver* CPLEX; realizar testes numéricos com o modelo implementado e analisar a viabilidade das soluções obtidas em sistemas reais através de simulações com o *software* EPANET.

1.2 Organização da Monografia

O presente trabalho foi estruturado em sete capítulos. Inicialmente, o capítulo 1 refere-se à introdução e o principal objetivo do trabalho, juntamente com a estruturação da monografia.

Os capítulos 2 e 3 referem-se ao referencial teórico. No capítulo 2 é apresentado uma detalhada conceitualização dos sistemas de abastecimento de água e seu funcionamento, como também aborda aspectos importantes sobre a energia elétrica. No capítulo 3 o simulador hidráulico EPANET é exposto, de modo a apresentar o seu funcionamento e os componentes utilizados para desenvolver uma rede de distribuição de água.

Por sua vez, os capítulos 4 e 5 apresentam o referencial metodológico, uma vez que o capítulo 4, aborda o matemático de otimização energética desenvolvido por Parras (2020), em conjunto com breves considerações sobre sua composição. No capítulo 5 é definida e explorada a rede de distribuição de água utilizada nos testes numéricos.

No capítulo 6 é abordada a implementação computacional realizada para o desenvolvimento do trabalho, nele são evidenciadas as tecnologias utilizadas.

No capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos a partir dos testes numéricos realizados, acompanhados com as discussões.

Por fim, no capítulo 8 são expostas as conclusões acerca do trabalho, assim como apresentadas sugestões de desenvolvimento de projetos futuros.

2 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA

Neste tópico são conceitualizados os principais aspectos dos sistemas de abastecimento de água que foram estudados para o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, o tópico apresenta termos técnicos relacionados ao tema, assim como uma breve caracterização da energia elétrica.

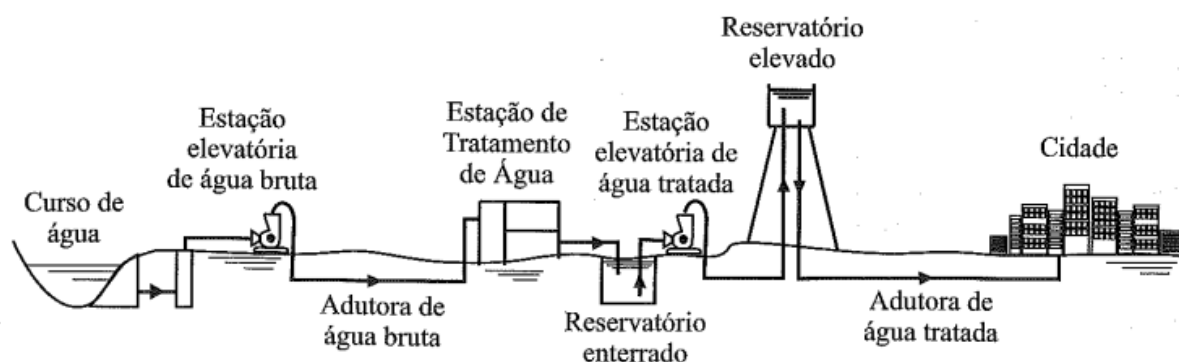
2.1 Sistema de Abastecimento de Água

De acordo com Netto e Fernández (2018), o Sistema de Abastecimento de Água (SAA), é definido pelo conjunto de obras, equipamentos e serviços atribuídos para o abastecimento de água potável para fins de consumo doméstico, serviços públicos, industriais, dentre outros. Além disso, a água distribuída pelo sistema deve ser fornecida em quantidade, qualidade e continuamente, respeitando os requisitos necessários ao fim a que se destina.

Semelhante ao conceitualizado pelos autores, Tsutiya (2006) descreve que o sistema de abastecimento de água tem como principal objetivo fornecer ao consumidor final água de boa qualidade para seu uso, seja em quantidade adequada e pressão suficiente.

Os autores Netto e Fernández (2018), ainda definem os principais componentes da estrutura de um SAA, e apontam a necessidade de seis elementos: o manancial, a captação, a adução, o tratamento, o reservatório e a rede de distribuição. A seguir, na Figura 1, um sistema de abastecimento de água completo é ilustrado, e logo em seguida seus componentes são detalhados.

Figura 1 – Sistema de Abastecimento de Água.



Fonte: Tsutiya (2006).

2.1.1 Manancial

Segundo Tsutiya (2006), o manancial é definido como o corpo de água subterrânea ou superficial, no qual é retirado a água para o abastecimento. Ele deve garantir o fornecimento de água de qualidade, sob o ponto de vista sanitário, e atender a demanda de água nos períodos pretendidos.

Netto e Fernández (2018) ainda apontam as principais diferenças entre o manancial subterrâneo e o superficial. O primeiro origina-se dos lençóis freáticos, que podem emergir à superfície ou serem elevados pelas bombas hidráulicas, normalmente possuem ótima qualidade, e seu consumo pode ser feito após a desinfecção. Já o manancial superficial é formado por córregos, lagos, rios e represas, e para seu consumo é necessário o tratamento completo na água.

2.1.2 Captação

Para Tsutiya (2006), o conjunto de equipamentos e dispositivos construído junto ao manancial, que faz a retirada de água destinada ao sistema de abastecimento é denominado captação. Além disso, seu principal objetivo é conduzir a água captada para a estação de tratamento, através da utilização do sistema de adução.

2.1.3 Adução

Lira (2014) aponta que a adução garante o transporte de água, seja bruta ou tratada, por meio de combinações entre adutoras e tubulações ou canais e estações elevatórias, e podem ser classificadas em relação a:

- Natureza da água transportada:
 - Água bruta, na qual o transporte acontece entre a captação da água até a estação de tratamento;
 - Água tratada, em que o transporte acontece entre a estação de tratamento até os reservatórios de distribuição.
- Energia utilizada para o escoamento da água:
 - Através da gravidade, utilizada quando existe um desnível entre o ponto inicial e final da adução;
 - Através de recalque, quando existe a necessidade do uso de um conjunto moto-bomba, para o escoamento;

- Ou ambos, na qual a distribuição de água acontece utilizando partes por recalque e partes por gravidade.
- Modo de escoamento:
 - Adutora em conduto livre, em que a superfície é mantida sob o efeito da pressão atmosférica, ou seja, os condutos podem ser abertos ou fechados e a água não ocupa inteiramente a seção de escoamento.
 - Adutora em conduto forçado, na qual a seção de escoamento é inteiramente ocupada, de forma que a pressão interna se torna superior à pressão atmosférica. Com esse tipo de escoamento a água consegue se mover nos dois sentidos, descendente a partir da gravidade, e no ascendente, utilizando recalque.

2.1.4 Tratamento

De acordo com o Ministério da Saúde (2006), o processo de tratamento, que acontece na Estação de Tratamento de Água (ETA), tem por objetivo tornar a água potável para o consumo, ou seja, suas características devem obedecer aos princípios sanitário, na qual remove organismos patogênicos e substâncias químicas que representam riscos à saúde, e a estética, que trata os aspectos visíveis e organolépticas.

O órgão brasileiro ainda ressalta e sintetiza as principais etapas para o tratamento da água, citadas abaixo.

- Clarificação, que promove a remoção de impurezas através de diversos processos unitários, como a coagulação, floculação, sedimentação, flotação e filtração;
- Desinfecção feita para inativar organismos patogênicos;
- Fluoretação na qual oferece prevenção da cárie dentária;
- Estabilização da água, para controlar a corrosividade e a formação de depósitos excessivos de substâncias insolúveis na água.

2.1.5 Reservatório

Após o tratamento feito, a água segue para os reservatórios que compõem o sistema, nos quais, segundo Guimarães, Carvalho e Silva (2007), são unidades hidráulicas capazes de oferecer armazenamento e/ou passagem da água para atender a demanda da população, garantindo boas condições de pressão e vazão.

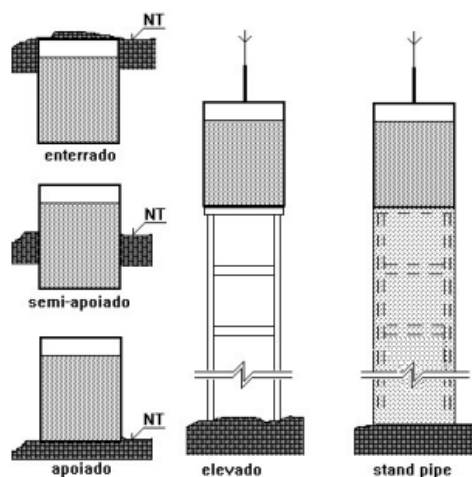
De acordo com De Pádua (2006) os reservatórios apresentam como principais objetivos a regularização entre as vazões de adução e de distribuição, o condicionamento das pressões na rede de distribuição e a reserva de água para combate de incêndios e situações emergentes.

Os autores Guimarães, Carvalho e Silva (2007) ainda classificam os reservatórios de forma como são construídos, sendo elas:

- Os enterrados, aqueles que se encontram completamente abaixo do solo;
- Os semienterrados, que apresentam uma parte acima e abaixo do solo;
- Os apoiados, que estão acima e apoiados sobre o solo;
- Os elevados, aqueles que apresentam uma estrutura de elevação, na qual estão apoiados;
- Os *standpipe*, que também apresentam uma estrutura de elevação, mas que tem por objetivo manter contínuo o perímetro da seção transversal da edificação.

Na Figura 2, é possível observar cada um dos tipos de reservatórios citados.

Figura 2 – Tipos de reservatórios de água.



Fonte: Guimarães, Carvalho e Silva (2007).

Além da classificação acima, Tsutiya (2006) também define os reservatórios de acordo com a sua localização dentro do sistema de abastecimento de água.

- Montante: está localizado antes da rede de distribuição e, obrigatoriamente, faz a passagem de água para o envio aos centros consumidores.
- Jusante: encontra-se após a rede de distribuição, e faz o armazenamento de água para complementar o abastecimento, principalmente quando existe alta demanda em determinados horários.

2.1.6 Rede de Distribuição

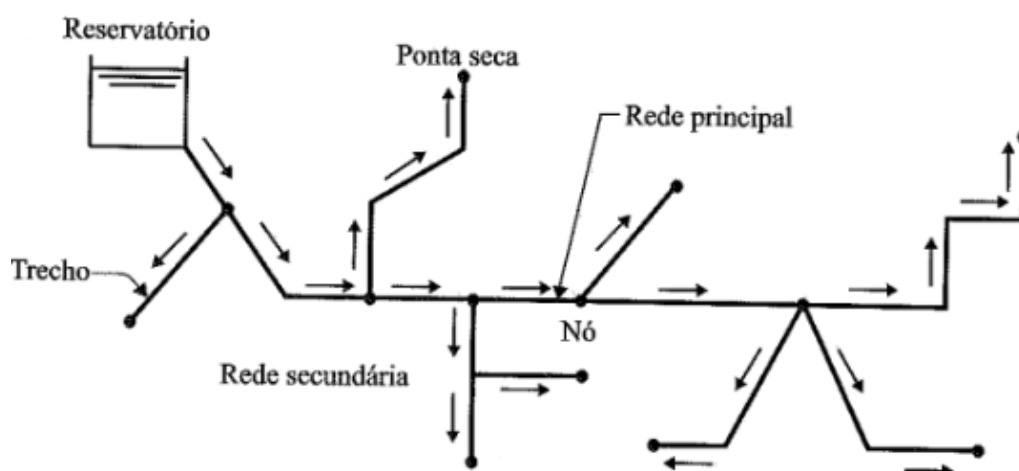
Por fim, a rede de distribuição garante a condução da água para os diversos pontos de consumo, de forma a assegurar a chegada da quantidade de água desejada, sob as pressões estabelecidas e preservando a qualidade do líquido (NETTO; FERNÁNDEZ, 2018).

Ainda, segundo Netto e Fernández (2018), a estrutura da rede de distribuição é constituída por um conjunto de tubulações interligadas e órgãos acessórios, como bombas e válvulas, que são utilizadas estrategicamente para atender a demanda estabelecida. Tsutiya (2006) classifica a rede em dois tipos: a ramificada e a malhada.

A rede ramificada tem como principal característica uma tubulação principal, chamada de tronco, que se une a diversas outras tubulações secundárias, para garantir a distribuição de água. Esse tipo de rede ainda se subdivide em outras duas. A primeira, chamada de espinha de peixe, apresenta uma tubulação principal na qual origina-se várias tubulações secundárias. Já a outra rede, chamada de grelha, possui uma tubulação que compreende as tubulações principais em paralelo.

Sua principal desvantagem está na sua manutenção, uma vez que caso seja necessária, toda a rede de distribuição é afetada. Na Figura 3, é possível observar o esquema de uma rede ramificada.

Figura 3 – Esquema de rede ramificada.



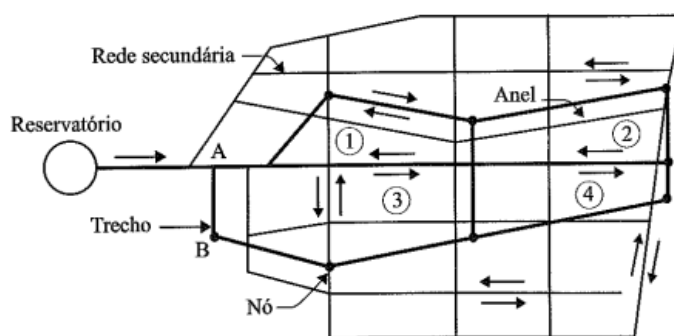
Fonte: Tsutiya (2006).

Já a rede do tipo malhada é constituída por diversas tubulações principais, que formam blocos ou anéis, de modo a fornecer o abastecimento de água por diferentes caminhos.

A rede malhada em anéis possui tubulações centrais, que alimenta as secundárias. Já a rede do tipo malhada em blocos possui dois pontos de alimentação que interligam diversas tubulações.

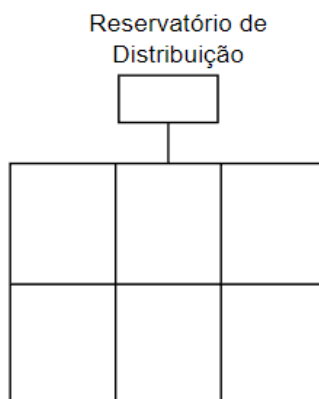
A principal vantagem da rede malhada é garantir a funcionalidade da rede, mesmo que essa apresente falhas ou esteja em manutenção. As categorias da rede malhada citadas acima podem ser observadas na Figura 4 e na Figura 5, respectivamente.

Figura 4 – Esquema de rede malhada em anéis.



Fonte: Tsutiya (2006).

Figura 5 – Esquema de rede malhada em blocos.



Fonte: Adaptado de Tsutiya (2006).

Além das classificações acima, a rede de distribuição de água ainda pode ser identificada de acordo com o modo como o transporte de água é feito, sendo uma rede simples ou dupla. A rede simples faz apenas o transporte de água tratada, já a rede dupla se divide em uma rede de água tratada e outra de água bruta.

Ademais, Tsutiya (2006) ressalta a extrema importância que um bom planejamento, investimentos e manutenções na infraestrutura faz para o funcionamento completo de um sistema de abastecimento de água, uma vez que ao longo dos anos com o deterioramento dos

materiais, os rompimentos e vazamentos tornam-se mais frequente, afetando a qualidade da distribuição de água.

2.1.7 Termos e conceitos técnicos relacionados ao sistema de abastecimento de água

Para melhor compreensão do funcionamento de um sistema de abastecimento de água e do problema abordado, nesta seção são conceitualizados componentes e termos técnicos relacionados a este, e que são citados no decorrer deste trabalho.

- **Altura geométrica:** diferença física entre o nível de líquido na fonte de água e o ponto mais alto da tubulação de descarga, ou do nível do reservatório;
- **Bombas hidráulicas:** normalmente são da classe centrífuga, e são responsáveis pelo transporte de água pelo sistema de abastecimento, quando esse não é feito pela gravidade. Elas podem fazer a captação de água dos mananciais, enviar água para os reservatórios e a transferência entre eles, e também para centros consumidores. Seu funcionamento é feito através do uso de energia elétrica, o que é a causa dos custos elevados para as empresas de saneamento;
- **Centro consumidor:** representação de bairro ou aglomerado de bairros, em que a água deve ser fornecida, de forma a atender as necessidades da população local;
- **Demanda:** quantidade de água necessária para atender o centro consumidor;
- **Rendimento da bomba:** é a relação entre a energia fornecida pelo seu motor e a energia absorvida pela bomba, uma vez que ela precisa de uma potência maior do que consome em virtude das perdas internas;
- **Rugosidade:** medidas das saliências da parede de tubos e tubulações;
- **Tubos e tubulações:** conduto usado para oferecer transporte de fluidos, geralmente de seção transversal circular e de comprimento limitado pelo tamanho de fabricação ou de transporte;
- **Vazão:** volume de líquido que atravessa uma seção em uma determinada unidade de tempo. Sua unidade de medida no Brasil, é dada geralmente por m^3/s .

2.2 Energia Elétrica

Segundo o Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto (2021), desenvolvido pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a energia elétrica é utilizada para movimentar infraestruturas eletromecânicas dos sistemas de abastecimento, desde a captação,

na condução para as estações de tratamento e na estrutura de armazenamento (reservatório) até a distribuição de água para os centros consumidores.

O estudo feito aponta que em 2020, o consumo com energia elétrica direcionado para os sistemas de abastecimento de água apresentou um aumento de 4,8% em relação ao ano de 2019. Essa conjuntura refletiu nas despesas com energia elétrica dos prestadores de serviços de água e esgoto que, em 2019 alcançou R\$ 7,1 bilhões, e no ano seguinte foi de R\$ 7,4 bilhões.

Para o SNIS, o aumento também está associado aos reajustes tarifários de energia elétrica do Sistema de Bandeiras Tarifárias (verde, amarela e vermelha) e devido a fundação de novos sistemas de água e esgoto, assim como a ampliação dos já existentes.

De acordo com a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (2018), o alto custo energético está entre as três principais despesas dos prestadores de serviços de saneamento, isso chega a representar 30% das despesas operacionais. Além disso, o órgão ressalta que aproximadamente 95% do consumo de energia no saneamento é devido às instalações de bombeamento.

Neste contexto, é fundamental o interesse dos prestadores de serviços de água e esgoto diminuírem os custos com energia elétrica, principalmente com o planejamento da operação das bombas hidráulicas, de modo a reduzir os custos sem prejudicar o abastecimento de água. No Brasil, essas tarifas de energia elétrica são definidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Segundo o Ministério do Planejamento (2016), os custos energéticos são definidos a partir da estrutura tarifária que associa os quantitativos de consumo de energia elétrica e de demanda de potência ativa, quando existe. O quantitativo do consumo é determinado pela modalidade de fornecimento de energia, do período de utilização no decorrer do dia e da época do ano.

A ANEEL (2021) pontua que existem duas categorias de grupo de consumo: A e B. O grupo A é composto por unidades consumidoras que se utilizam de tensão maior ou igual a 2,3 kV, ou atendem sistemas subterrâneos de distribuição em tensão menor que 2,3 kW. Além disso, esse grupo possui seis subdivisões, sendo elas:

- Subgrupo A1: utiliza a tensão de conexão maior ou igual a 230 kV;
- Subgrupo A2: utiliza a tensão de conexão maior ou igual a 88 kV e menor ou igual a 138 kV;
- Subgrupo A3: utiliza a tensão de conexão igual a 69 kV;

- Subgrupo A3a: utiliza a tensão de conexão maior ou igual a 30 kV e menor ou igual a 44 kV;
- Subgrupo A4: utiliza a tensão de conexão maior ou igual a 2,3 kV e menor ou igual a 25 kV;
- Subgrupo AS: utiliza a tensão de conexão menor que 2,3 kV, em sistemas subterrâneos de distribuição;

Neste grupo o fornecimento de tensão é definido pela tarifa binômia, em que a cobrança é feita de acordo com a demanda contratada e a energia consumida, na qual a primeira é a potência, em kW, disponibilizada mensalmente, acordada entre fornecedor e a empresa, e a última é a potência, em kW, consumida durante um período de tempo pré-estabelecido.

Para este grupo, a ANEEL (2021) estabeleceu que a contratação da demanda por consumidor deve possuir um valor mínimo de 2,3 kV por hora. Ainda, como uma forma de evitar a sobrecarga do sistema, o órgão definiu que caso haja a ultrapassagem da demanda contratada em mais de 10%, a distribuidora deve adicionar ao faturamento a cobrança de uma tarifa, que pode ser três vezes mais cara do que a tarifa de demanda contratada.

Ademais, a agência reguladora divide as tarifas do grupo A em três modalidades de fornecimento, sendo elas:

- Convencional: modalidade caracterizada por possuir apenas as tarifas de consumo de energia elétrica (kWh) e de demanda de potência (kW). Ela não possui uma segmentação horária no dia.
- Horo-sazonal verde: modalidade que possui tarifas diferenciadas de consumo de energia, de acordo com o horário de utilização do dia e os períodos do ano, mas que mantém uma única tarifa de demanda de potência. Vale ressaltar que nesta modalidade, as tarifas energéticas se tornam até cinco vezes mais caras, quando a energia elétrica é utilizada no horário de ponta.
- Horo-sazonal azul: modalidade caracterizada por ter diferentes tarifas de consumo de energia, assim como de demanda de potência, de acordo com os horários de utilização durante o dia e os períodos do ano. De forma similar a categoria horo-sazonal verde, aqui as tarifas possuem custos elevados quando o consumo acontece no horário de ponta.

Já o grupo B, é definido pelas unidades consumidoras com conexão em tensão menor que 2,3 kV, e se subdivide em quatro grupos, sendo eles:

- Subgrupo B1: residencial;

- Subgrupo B2: rural;
- Subgrupo B3: demais classes;
- Subgrupo B4: iluminação pública.

Segundo a ANEEL (2021), destaca-se que as empresas de saneamento básico são classificadas como consumidores do grupo A, sendo indicado o uso da modalidade horosazonal verde ou azul para a estruturação tarifária.

3 SIMULADOR HIDRÁULICO EPANET

Para Rossman et al (2009), o EPANET é um *software* capaz de executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição pressurizada.

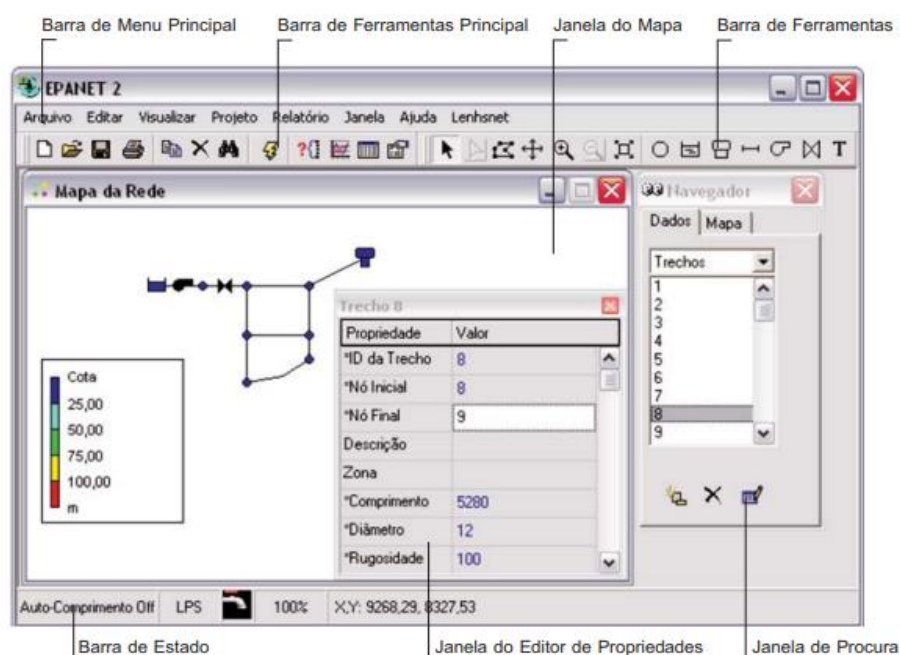
O EPANET foi desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA), dos Estados Unidos, em 1993. Atualmente, ele está na sua versão 2.2 como uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição, aperfeiçoando o conhecimento sobre os componentes e funcionamento de um sistema de abastecimento, desde a captação, tratamento, transporte, até a distribuição para o consumo. Ademais, o programa também oferece suporte para a investigação de estratégias alternativas de gerenciamento do sistema, de modo a melhorar a qualidade da água do sistema.

No ambiente *Windows*, o programa disponibiliza uma interface integrada para edição de dados de entrada da rede, execução de simulações hidráulicas e de qualidade de água e visualização dos resultados em diversos formatos (gráficos e tabelas).

3.1 Ambiente de Trabalho

O EPANET está disponível para *download* no *website* oficial do *United States Environmental Protection Agency*, em sua versão mais recente 2.2, contudo também existe a possibilidade de *download* na versão em português-br, baseada na versão 2.0. Sua distribuição é dada por um único arquivo que contém o programa de configuração. Para sua instalação, basta executar o arquivo baixado. Na Figura 6, é exibida a configuração básica do ambiente de trabalho do *software*.

Figura 6 – Configuração básica do ambiente de trabalho do EPANET.



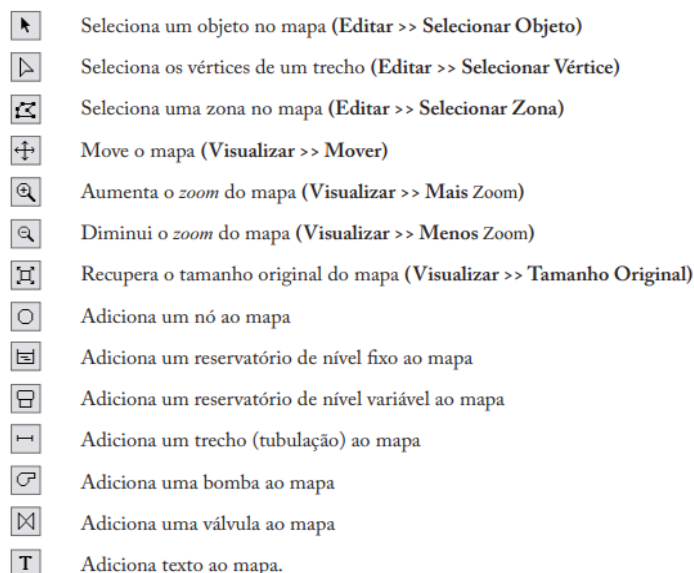
Fonte: Rossman et al (2009).

A barra de menu principal apresenta um conjunto de menus utilizados para controlar o programa, sendo eles:

- Menu arquivo: no qual permite abrir, fechar e salvar arquivos de dados e imprimi-los;
- Menu editar: que apresenta comandos para edição e cópia;
- Menu visualizar: apresenta controles para a visualização do mapa da rede;
- Menu projeto: que inclui comandos relativos à análise do projeto atual;
- Menu relatório: composto por comandos utilizados para análise dos resultados, de diversas formas, da simulação feita;
- Menu ajuda: que contém comandos que fornecem informações de ajuda sobre a utilização do programa;

A barra de ferramentas principal viabiliza atalhos para as operações mais frequentes, desde a criação e edição de arquivos, como também a simulação e visualização dos resultados obtidos. Já a barra de ferramentas do mapa é composta por botões que permite trabalhar com os componentes do Mapa da Rede, exemplificados na Figura 7.

Figura 7 – Botões de atalho para a edição do mapa da rede.

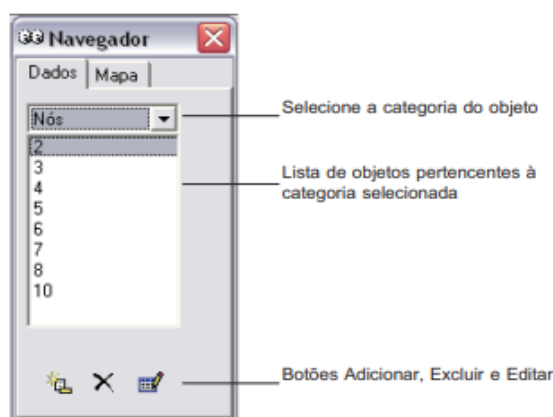


Fonte: Rossman et al (2009)

A janela do mapa permite a apresentação esquemática de duas dimensões dos objetos que constituem um sistema de distribuição de água. As propriedades dos objetos que estão dentro do mapa podem ser editadas, assim como suas legendas. Além disso, novos objetos podem ser adicionados diretamente ao mapa, como também os já existentes podem ser editados, apagados ou reposicionados. Por fim, durante a simulação da rede, cada objeto apresenta suas informações, como os identificadores, valores numéricos e símbolos específicos.

A janela de navegador apresenta duas opções de visualização, a de dados e o mapa. A de dados, detalhada na Figura 8, permite o acesso a diversos objetos que compõem a rede em análise, ordenada por categorias. Os botões concedem a edição do objeto selecionado.

Figura 8 – Página de dados da janela navegador.



Fonte: Rossman et al (2009).

Vale destacar que dentre as categorias do objeto, existe a de Opções, que usualmente faz a pré-configuração dos dados para a simulação. Entre as opções tem-se o Tempos, que especifica a duração total e os períodos do horizonte de planejamento da simulação, além de outras informações, como ilustra a Figura 9.

Figura 9 – Página de tempos da janela de dados navegador.

Tempos Opções	
Propriedade	h:min
Duração Total	24:00
Intervalo de Cálculo Hidráulico	1:00
Intervalo de Cálculo de Qualidade	0:05
Intervalo de Tempo Padrão	1:00
Tempo de Início Padrão	0:00
Intervalo de Tempo do Relatório	1:00
Tempo de Início do Relatório	0:00
Tempo de Início da Simulação	0:00
Estatística	NONE

Fonte: Elaborado pela autora.

A subcategoria de Energia, recebe as referências de rendimento de bombeamento, o preço da energia, o padrão de preço e a carga de demanda, como mostra a Figura 10.

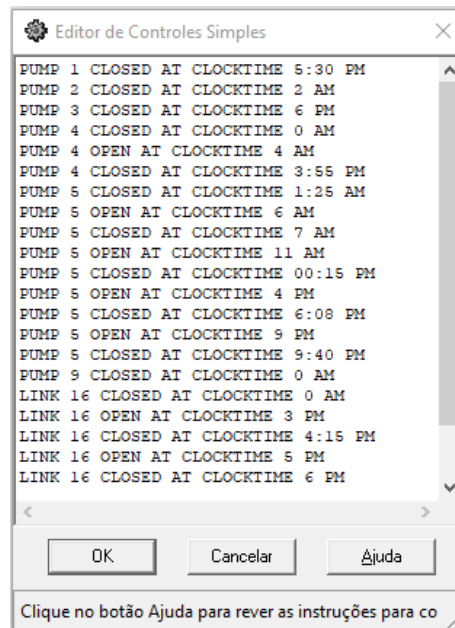
Figura 10 – Página de energia da janela de dados do navegador.

Energia Opções	
Propriedade	Valor
Rendimento de Bombeamento (%)	60
Preço do kWh	0
Padrão de Preço	
Carga de Demanda	0

Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, a subcategoria de Controle, Figura 11, apresenta as instruções que relacionam as condições de operação de uma bomba com o período do dia ou a altura da água no reservatório, que serão usadas durante a simulação hidráulica.

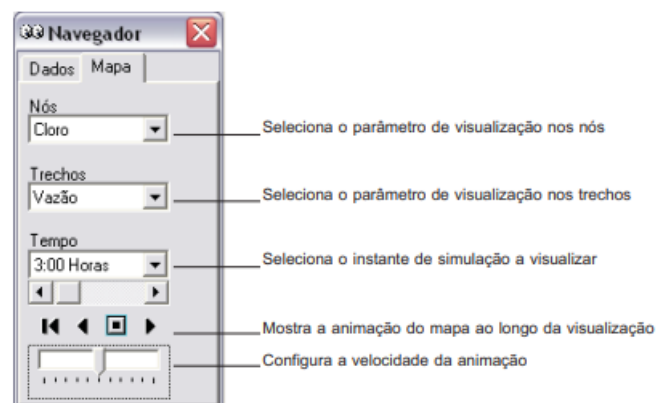
Figura 11 – Aba de edição dos controles da janela de dados do navegador.



Fonte: Elaborado pela autora.

Já a do Mapa, detalhado na Figura 12, fornece o acesso aos parâmetros relacionados a nós e/ou trechos e o instante de simulação a visualizar. Também apresenta os controles para a simulação da rede, o que permite observar a evolução dos parâmetros pré-selecionados ao longo do período da simulação.

Figura 12 – Página do mapa da janela navegador.



Fonte: Rossman et al (2009).

A janela do Editor de Propriedades, Figura 13, é normalmente usada para editar as propriedades dos nós e trechos da rede, as legendas e as opções de simulação, sua exibição pode ser feita quando um destes objetos é selecionado. É nesta janela que os objetos da rede recebem as identificações e os valores estabelecidos para executar a simulação.

Figura 13 – Editor de propriedades.

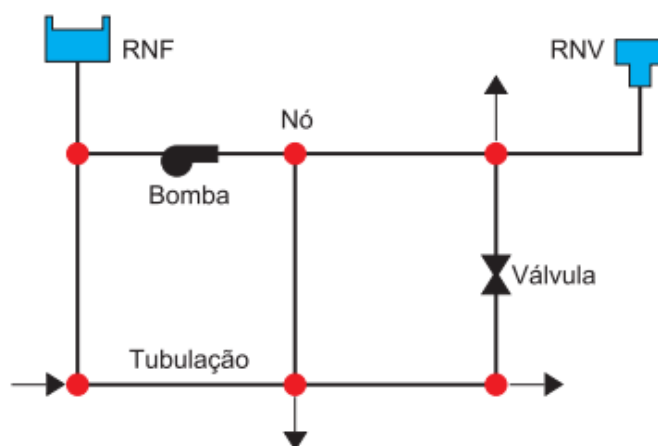
Propriedade	Valor
*Identificador do Tre	21
*Nó Inicial	9
*Nó Final	3
Descrição	
Zona	1950
*Comprimento	1000
*Diâmetro	200
*Rugosidade	100

Fonte: Rossman et al (2009).

3.2 Modelo de Sistema de Distribuição de Água

De acordo com Rossman et al (2009), o EPANET faz a modelagem de um sistema de distribuição de água como sendo um conjunto de trechos ligados a nós. Esses trechos representam as tubulações, bombas e válvulas de controle, já os nós representam conexões, reservatório de nível fixo e reservatórios de nível variável. A Figura 14 exemplifica o modo como esses objetos podem constituir uma rede.

Figura 14 – Componentes físicos de um sistema de distribuição de água.



Fonte: Rossman et al (2009).

Abaixo os componentes físicos e não físicos disponibilizados pelo *software* para a construção de uma rede de distribuição de água são conceitualizados, em seguida é apresentada a janela de edição do componente, que coleta as informações para a simulação da rede.

3.2.1 Nó

Os nós são utilizados para unir os trechos para a formação da rede, eles que fornecem a entrada e saída de água da rede. Em sua criação é informado o consumo base, esse parâmetro define se um nó representa apenas uma ligação entre trechos, isto quando não existe consumo ou se é um nó consumidor, ou seja, se possui uma demanda a ser atendida.

3.2.2 Reservatório de nível fixo

O Reservatório de Nível Fixo (RNF) é considerado um nó especial que representa um volume de armazenamento de água de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante. Geralmente simula o comportamento de lagos, rios ou aquíferos, de modo a simbolizar um ponto de origem de qualidade da água.

Para a simulação da rede, o objeto recebe em suas propriedades informações sobre o nível e qualidade da água.

3.2.3 Reservatório de nível variado

O Reservatório de Nível Variado (RNV) também é considerado um nó especial, porém esse tipo de reservatório possui uma capacidade de armazenamento de água limitado, e o seu volume varia ao longo da simulação.

Dessa forma, informações como diâmetro, altura de água inicial, mínima e máxima e de qualidade da água inicial, são necessárias para a simulação hidráulica. Esses dados são utilizados como base para a operação desses reservatórios, com isso, o EPANET interrompe a saída ou entrada de vazão se for atingido o nível de altura de água mínima ou máxima respectivamente.

3.2.4 Tubulação

As tubulações, também chamadas de trechos, fazem o transporte de água entre os diversos pontos da rede. Parâmetros como nó inicial e final, diâmetro do tubo, comprimento, coeficiente de rugosidade e estado (aberto ou fechado) são informados a partir das propriedades do componente. Vale ressaltar que o escoamento dentro da tubulação acontece sob pressão e acontece dos pontos com carga hidráulica mais elevada para a mais baixa.

3.2.5 Bomba

No EPANET, as bombas hidráulicas são consideradas trechos da rede que transferem energia para o escoamento, de modo a aumentar a sua altura manométrica. Antes da simulação hidráulica, é necessário informar os nós inicial e final e a curva da bomba, dado a partir da combinação de valores de altura manométrica e a vazão. Destaca-se ainda que o escoamento da bomba é feito unidirecionalmente.

Ainda, as bombas podem operar em períodos pré-estabelecidos ou de acordo com determinadas condições de operação na rede. No simulador também é possível definir o consumo energético, o custo de bombeamento (a partir de uma tabela de preços) e o rendimento do conjunto motor-bomba (utilizando a curva de rendimento).

3.2.6 Válvula

As válvulas se caracterizam por serem trechos limitadores de pressão ou vazão em um determinado ponto da rede. No EPANET existem diversos tipos de válvulas, mas a usualmente utilizada é a Válvula Reguladora de Vazão, tradução do inglês *Flow Control Valve* (FCV), que faz a limitação do valor da vazão. Ao utilizar este tipo de válvula, o programa emite uma advertência caso a vazão não possa ser mantida, sem que haja um aumento da carga hidráulica na válvula.

3.2.7 Curva da bomba

A curva da bomba representa uma relação entre a altura manométrica e a vazão, de modo a definir as condições de funcionamento da bomba de acordo com a velocidade de rotação nominal. Para uma curva da bomba ser válida é necessário que a altura manométrica seja inversamente proporcional à vazão.

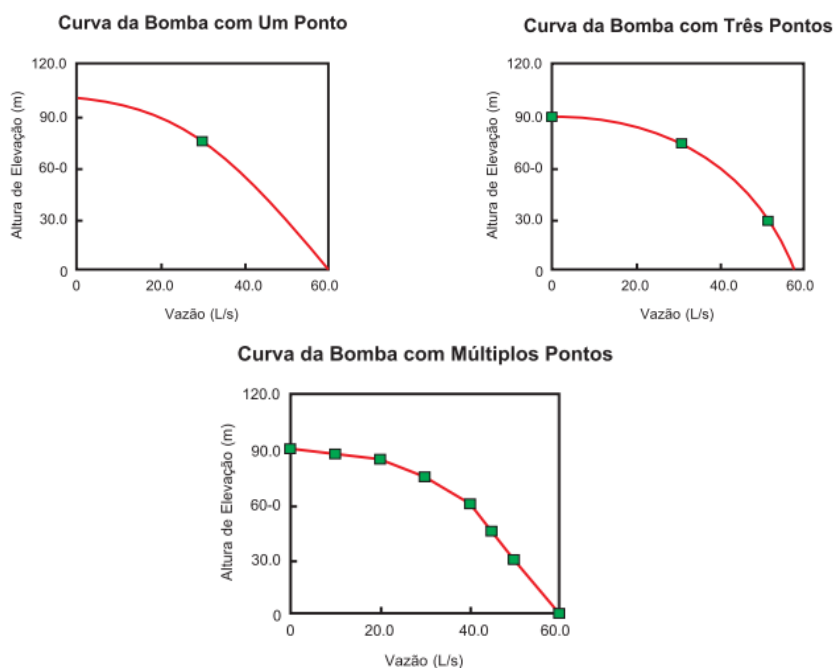
Dentro do EPANET, a curva da bomba pode ser definida a partir de um ponto, com três pontos ou com múltiplos pontos, ilustradas na Figura 15.

Na curva com apenas um ponto, um único par de valores de vazão e altura manométrica é fornecido, de modo a representar o ponto ótimo de funcionamento da bomba. O EPANET, automaticamente, incluiu dois outros pontos à curva, um que estabelece a vazão como nula e a carga sendo 133% da carga nominal e outro onde a vazão é o dobro da nominal e a altura manométrica é nula.

A curva com três pontos é definida a partir da entrada de três pontos de operação, sendo eles: o ponto de vazão mínimo (vazão e carga nulo ou mínimo), o de vazão nominal (vazão e carga para o ponto ótimo de funcionamento) e o de vazão máximo.

Por fim, a curva com múltiplos pontos é criada a partir de quatro pontos ou mais, com pares de valores de vazão e altura manométrica, com esses pontos o simulador hidráulico cria a curva com os segmentos de reta que liga os pontos entre si.

Figura 15 – Exemplo de curvas de bombas.

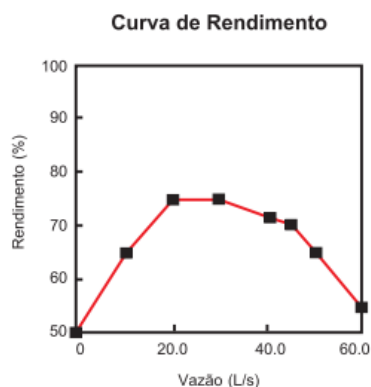


Fonte: Rossman et al (2009).

3.2.8 Curva de rendimento

A curva de rendimento relaciona o rendimento do grupo com a vazão bombeada, exemplificada na Figura 16. Ela faz a representação do rendimento do conjunto moto-bomba e considera as perdas mecânicas e elétricas na própria bomba e no seu motor, respectivamente. Caso a curva não seja fornecida, o EPANET considera uma constante global para o rendimento, através da opção de energia, incluída na janela do navegador.

Figura 16 – Exemplo de curvas de rendimento.



Fonte: Rossman et al (2009).

3.2.9 Padrões temporais

Um padrão temporal é determinado a partir de um conjunto de fatores multiplicativos que podem ser aplicados ao valor de uma determinada grandeza, para assim representar a variação desta ao longo do tempo. O consumo de um nó, os esquemas de bombeamento, assim como o padrão de preço podem estar associados a um padrão temporal.

3.2.10 Controle simples

Os controles são definidos a partir de um conjunto de instruções que determinam a forma como a rede opera durante sua simulação. Seu objetivo é especificar o estado do objeto selecionado em função do tempo. O controle simples faz a alteração do estado de um trecho com base na altura da água de um reservatório, ou a pressão de um nó ou o instante de uma simulação.

Sua escrita é iniciada com o tipo do objeto (bomba ou trecho), seu identificador, o estado (aberto ou fechado) e o instante do dia que ocorre a alteração (horário informado deve ser até 12 horas, indicando AM para manhã e PM para tarde). Neste trabalho o controle simples foi utilizado para definir alterações de estado das bombas hidráulicas e trechos durante o período de simulação.

3.2.11 Arquivo de dados

O projeto feito no EPANET pode ser exportado para um arquivo de texto, que é escrito em formato de texto ASCII, e que possui várias categorias de dados e propriedades dos textos que são usados como identificadores.

Este arquivo, que foi gerado no formato INP, organiza-se em seções, na qual cada seção é iniciada com uma palavra-chave inserida entre parêntesis, nas Tabelas 1, 2 e 3 são listadas as palavras-chaves utilizadas para definir uma seção, de acordo com as categorias de componentes da rede, operação do sistema e opções de simulação e relatório, assim como as Figuras 17, 18 e 19 exemplificam a formatação dos componentes no arquivo de dados.

Quadro 1 – Palavras-chaves utilizadas na categoria de componentes da rede.

Componentes da Rede	Informações contida na seção
[TITLE]	Título e/ou descrição da rede.
[JUNCTIONS]	Identificador do nó, cota topográfica, se possui demanda e identificador do padrão (se tem demanda).
[RESERVOIRS]	Identificador do RNF e cota topográfica.
[TANKS]	Identificador do RNV, cota topográfica, altura inicial, mínima e máxima de água, diâmetro, volume máximo e curva de volume.
[PIPES]	Identificador do trecho, nó inicial, nó final, comprimento, diâmetro, coeficiente de rugosidade, coeficiente de perda de carga singular e estado (aberto ou fechado).
[PUMPS]	Identificador da bomba, nó inicial, nó final, padrão que define a curva da bomba.
[VALVES]	Identificador da válvula, nó inicial, nó final, diâmetro, tipo, parâmetro de controle e coeficiente de perda de carga singular.

Fonte: Adaptado de Rossman et al (2009)

Figura 17 – Exemplo de arquivo de dados na categoria de componentes da rede.

```
[JUNCTIONS]
;ID      Elev      Demand      Pattern
2        90        0
9        93        1        6        ;

[RESERVOIRS]
;ID      Head      Pattern
1        90        ;

[TANKS]
;ID      Elevation  InitLevel  MinLevel  MaxLevel  Diameter  MinVol  VolCurve
6        100        5          5         16.75     17        0
7        120        0.635     0.634     6.34      6.34      0
;

[PIPES]
;ID      Node1      Node2      Length  Diameter  Roughness  MinorLoss  Status
7        4          6          200     250       0.019     0          Open ;
8        5          7          200     250       0.019     0          Open ;

[PUMPS]
;ID      Node1      Node2      Parameters
1        1          2          HEAD BombasCaptacao ;
2        1          2          HEAD BombasCaptacao ;

[VALVES]
;ID      Node1      Node2      Diameter  Type  Setting  MinorLoss
11       12       11       100       FCV  25       0        ;
```

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 2 – Palavras-chaves utilizadas na categoria de operação do sistema.

Operação do Sistema	Informações contida na seção
[CURVES]	Identificação do componente, par de valores (x e y) usados para determinar a equação da curva.
[PATTERNS]	Identificador do padrão e os fatores multiplicativos (organizados de acordo com o período de tempo)
[ENERGY]	Porcentagem do rendimento de bombeamento global, preço do kWh, padrão de preço e carga de demanda.
[STATUS]	Identificador do componente e estado (aberto ou fechado) ou configuração específica.
[CONTROLS]	Comandos utilizados pelos controles simples.
[RULES]	Regras utilizadas pelos controles programados.
[DEMANDS]	Identificador do nó, demanda, padrão e categoria.

Fonte: Adaptado de Rossman et al (2009)

Figura 18 – Exemplo de arquivo de dados na categoria de operação do sistema.

```
[PATTERNS]
;ID                               Multipliers
;Fator multiplicativo referente a demanda do nó 9
Demandanó9      50      80      90      100      100      130
Demandanó9      150      180      180      190      200      200
Demandanó9      170      150      140      160      170      190
Demandanó9      270      265      285      180      190      100
;Fator multiplicativo referente a demanda do nó 10
Demandanó10     20      20      25      40      45      35
Demandanó10     40      35      40      30      40      45
Demandanó10     35      25      30      40      50      45
Demandanó10     63      65      68      30      40      30
;Preço da energia kWh
PreçoKWh         0.20      0.20      0.20      0.20      0.20      0.20
PreçoKWh         0.20      0.20      0.20      0.20      0.20      0.20
PreçoKWh         0.20      0.20      0.20      0.20      0.20      0.20
PreçoKWh         0.60      0.60      0.60      0.20      0.20      0.20

[CURVES]
;ID                               X-Value      Y-Value
;BOMBA: Curva das bombas de captação
BombasCaptação   250      4
;BOMBA: Curva das 2 bombas de elevação reservatório apoiado
BombasElevação    150      21
;BOMBA: Curva da bomba de transferência entre os reservatórios
BombaTransferencia 50      4
;BOMBA: Curva da bomba de elevação reservatório elevado
BombaResElevado   150      35

[CONTROLS]
PUMP 2  CLOSED AT CLOCKTIME 01:25 AM

[ENERGY]
Global Efficiency  70
Global Price       0
Demand Charge     0
```

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 3 – Palavras-chaves utilizadas na categoria de opções de simulação e relatório.

Operação do Sistema	Informações contida na seção
[OPTIONS]	Unidade de vazão, fórmula de perda de carga, densidade, rugosidade relativa, número máximo de iterações, erro máximo de convergência, se não convergir (continuar ou não), padrão, fator de consumo, expoente para a fórmula do emissor, relatório de estado (sim ou não), CHECKFREQ, MAXCHECK e DAMPLIMIT.
[TIMES]	Duração total, intervalo de cálculo hidráulico, intervalo de cálculo de qualidade, intervalo de tempo padrão, tempo de início padrão, intervalo de tempo do relatório, tempo de início de simulação e estatística.
[REPORT]	Estado (sim ou não), sumário (sim ou não), quantidade de páginas.

Fonte: Adaptado de Rossman et al (2009).

Figura 19 – Exemplo de arquivo de dados na categoria de opções de simulação e relatório.

```

[TIMES]
Duration                24:00
Hydraulic Timestep      1:00
Quality Timestep        0:05
Pattern Timestep        1:00
Pattern Start           0:00
Report Timestep         1:00
Report Start            0:00
Start ClockTime         0:00
Statistic               None

[REPORT]
Status                  No
Summary                 No
Page                    0

[OPTIONS]
Units                   CMH
Headloss                D-W
Specific Gravity        1
Viscosity               1
Trials                  40
Accuracy                0.001
CHECKFREQ               2
MAXCHECK                10
DAMPLIMIT               0
Unbalanced              Continue 10
Pattern                 1
Demand Multiplier       1.0
Emitter Exponent        0.5
Quality                 None mg/L
Diffusivity             1
Tolerance               0.01

```

Fonte: Elaborado pela autora

4 MODELO MATEMÁTICO DE PARRAS

Em problemas de otimização energética de sistemas de abastecimento de água, o principal objetivo é determinar o acionamento de cada uma das bombas, em cada período do horizonte de planejamento, com o intuito de minimizar os custos com energia elétrica e atender as demandas estabelecidas.

Em vista disso, a seguir será descrito o modelo matemático proposto por Parras (2020), que foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho, para determinar o planejamento da operação das bombas hidráulicas em sistemas de abastecimento de água, com o objetivo de otimizar o faturamento de energia elétrica.

A seguir são apresentados os índices, conjuntos que são utilizados no modelo de Parras (2020), já os parâmetros e as variáveis usadas são descritos após cada função e restrição que aparece.

Índices:

$p = 1, 2, \dots, P$; referem-se aos pontos de captação superficiais;

$b = 1, 2, \dots, B$; referem-se aos pontos de captação subterrâneos;

$e = 1, 2, \dots, E$; referem-se às estações de tratamento de água;

$r = 1, 2, \dots, R$; referem-se aos reservatórios;

$k = 1, 2, \dots, K$; referem-se aos nós consumidores;

$t = 1, 2, \dots, T$; referem-se aos períodos do horizonte de planejamento;

Conjuntos:

S_r : $\{j, \text{ tal que o reservatório } j \text{ pode receber água do reservatório } r\}$;

U_r : $\{j, \text{ tal que o reservatório } j \text{ pode enviar água para o reservatório } r\}$;

$N_{c_{pe}}$: $\{nc, \text{ tal que a bomba } nc \text{ transporta água do ponto de captação superficial } p \text{ para a estação de tratamento } e\}$;

$N_{s_{br}}$: $\{ns, \text{ tal que a bomba } ns \text{ transporta água do ponto de captação subterrâneo } b \text{ para o reservatório } r\}$;

$N_{e_{er}}$: $\{ne, \text{ tal que a bomba } ne \text{ transporta água da estação de tratamento } e \text{ ao reservatório } r\}$;

$N_{t_{rj}}$: $\{nt, \text{ tal que a bomba } nt \text{ transporta água do reservatório } r \text{ ao reservatório } j\}$.

4.1 Função Objetivo

A função objetivo (1) minimiza todos os custos com energia elétrica nas operações de bombeamento de água. Ela é dividida em cinco partes, a primeira refere-se aos custos de energia elétrica usada pela potência consumida pelas bombas de captação de pontos superficiais somado

com os custos de acionamento dessas bombas. A segunda parte descreve os custos energéticos referente à potência consumida pelas bombas de captação de pontos subterrâneos mais os custos de acionamento dessas bombas. A terceira parte compete aos custos de energia elétrica da potência consumida pelas bombas de elevação somado aos custos de acionamento dessas bombas. A quarta parte refere-se aos custos energéticos relativos à potência consumida pelas bombas de transferências mais os custos de acionamento dessas bombas. E por fim, a quinta parte aborda os custos com a demanda energética contratada.

$$\begin{aligned} \min \sum_{p=1}^P \sum_{e=1}^E \sum_{nc \in N_{pe}} \sum_{t=1}^T (Pc \cdot X_{pet}^{nc} \cdot N_h \cdot Ck_t + \alpha_{pet}^{nc} \cdot ca) + \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R \sum_{ns \in N_{br}} \sum_{t=1}^T (Pn \cdot I_{brt}^{ns} \cdot N_h \cdot Ck_t + \delta_{brt}^{ns} \cdot ca) + \\ \sum_{e=1}^E \sum_{r=1}^R \sum_{ne \in N_{er}} \sum_{t=1}^T (Pe \cdot Y_{ert}^{ne} \cdot N_h \cdot Ck_t + \gamma_{ert}^{ne} \cdot ca) + \sum_{r=1}^R \sum_{j \in S_j} \sum_{nt \in N_{rj}} \sum_{t=1}^T (Pt \cdot Z_{rjt}^{nt} \cdot N_h \cdot Ck_t + \beta_{rjt}^{nt} \cdot ca) + (D \cdot td) \end{aligned} \quad (1)$$

Em que:

Variáveis de decisão:

X_{pet}^{nc} : fração do período t em que a bomba nc é ligada para captar água do ponto superficial p para a estação de tratamento e ;

I_{brt}^{ns} : fração do período t em que a bomba ns é ligada para captar água do ponto subterrâneo b para o reservatório r ;

Y_{ert}^{ne} : fração do período t em que a bomba ne é ligada para elevar água da estação de tratamento e para o reservatório r ;

Z_{rjt}^{nt} : fração do período t em que a bomba nt é ligada para transferir água do reservatório r para o reservatório j ;

D : demanda energética (kW) contratada por dia.

$$\alpha_{pet}^{nc} = \begin{cases} 1, & \text{se a bomba de captação } nc \text{ do ponto superficial } p \text{ para a estação de tratamento } e \text{ é acionada no período } t ; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$\delta_{brt}^{ns} = \begin{cases} 1, & \text{se a bomba de captação } ns \text{ do ponto subterrâneo } b \text{ para o reservatório } r \text{ é acionada no período } t ; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$\gamma_{ert}^{ne} = \begin{cases} 1, & \text{se a bomba de elevação } ne \text{ da estação de tratamento } e \text{ para o reservatório } r \text{ é acionada no período } t ; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$\beta_{rjt}^{nt} = \begin{cases} 1, & \text{se a bomba de transferência } nt \text{ do reservatório } r \text{ para o reservatório } j \text{ é} \\ & \text{acionada no período } t ; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

Parâmetros:

ck_t : custos (em reais) do kW no período t ;

Nh : número de horas em cada período;

ca : custo de acionamento;

td : taxa (em $R\$/kW$) para contratação de demanda energética;

Pc : potência consumida (em kW) pelas bombas de captação de pontos superficiais;

Pn : potência consumida (em kW) pelas bombas de captação de pontos subterrâneos;

Pe : potência consumida (em kW) pelas bombas de elevação;

Pt : potência consumida (em kW) pelas bombas de transferência.

As potências Pc , Pn , Pe e Pt , presentes na função objetivo, são calculadas a partir das equações (2), (3), ((4) e (5), respectivamente.

$$Pc = \frac{(H_{pe} + F_{pe} \cdot \frac{L_{pe}}{D_{pe}} \cdot \frac{V_{pe}^2}{2 \cdot g}) \cdot Q_{pe}^{nc} \cdot 0,735499}{270 \cdot \eta_{pe}^{nc}} \quad (2)$$

em que se tem os seguintes parâmetros:

H_{pe} : altura geométrica (m) do ponto de captação superficial p até a estação de tratamento e ;

F_{pe} : fator de atrito de Darcy–Weisbach (adimensional) calculado para a tubulação que liga o ponto de captação superficial p a estação de tratamento e ;

L_{pe} : comprimento da tubulação (m) do ponto de captação superficial p até a estação de tratamento e ;

D_{pe} : diâmetro da tubulação (m) do ponto de captação superficial p a estação de tratamento e ;

V_{pe} : velocidade (m/s) de escoamento do líquido calculada para a tubulação que liga o ponto de captação superficial p a estação de tratamento e ;

g : aceleração da gravidade, dada por $9,8 \text{ m/s}^2$;

Q_{pe}^{nc} : vazão (m^3/h) da bomba nc que capta água do ponto superficial p para a estação de tratamento e ;

η_{pe}^{nc} : rendimento (%) do conjunto motor-bomba da bomba de captação superficial nc do ponto de captação superficial p para a estação de tratamento e .

$$Pn = \frac{(H_{br} + F_{br} \cdot \frac{L_{br}}{D_{br}} \cdot \frac{V_{br}^2}{2g}) \cdot Q_{br}^{ns} \cdot 0,735499}{270 \cdot \eta_{br}^{ns}} \quad (3)$$

em que tem-se os seguintes parâmetros:

H_{br} : altura geométrica (m) do ponto de captação subterrâneo b até o reservatório r ;

F_{br} : fator de atrito de Darcy–Weisbach (adimensional) calculado para a tubulação que liga o ponto de captação subterrâneo b até o reservatório r ;

L_{br} : comprimento da tubulação (m) do ponto de captação subterrâneo b até o reservatório r ;

D_{br} : diâmetro da tubulação (m) do ponto de captação subterrâneo b até o reservatório r ;

V_{br} : velocidade (m/s) de escoamento do líquido calculada para a tubulação que liga o ponto de captação subterrâneo b até o reservatório r ;

Q_{br}^{ns} : vazão (m³/h) da bomba ns que capta água do ponto de captação subterrâneo b até o reservatório r ;

η_{br}^{ns} : rendimento (%) do conjunto motor-bomba da bomba de captação ns do ponto de captação subterrâneo b até o reservatório r .

$$Pe = \frac{(H_{er} + F_{er} \cdot \frac{L_{er}}{D_{er}} \cdot \frac{V_{er}^2}{2g}) \cdot Q_{er}^{ne} \cdot 0,735499}{270 \cdot \eta_{er}^{ne}} \quad (4)$$

em que tem-se os seguintes parâmetros:

H_{er} : altura geométrica (m) da estação de tratamento e até o reservatório r ;

F_{er} : fator de atrito de Darcy–Weisbach (adimensional) calculado para a tubulação que liga a estação de tratamento e até o reservatório r ;

L_{er} : comprimento da tubulação (m) da estação de tratamento e até o reservatório r ;

D_{er} : diâmetro da tubulação (m) da estação de tratamento e até o reservatório r ;

V_{er} : velocidade (m/s) de escoamento do líquido calculada para a tubulação que liga a estação de tratamento e até o reservatório r ;

Q_{er}^{ne} : vazão (m³/h) da bomba ne que capta água da estação de tratamento e até o reservatório r

η_{er}^{ns} : rendimento (%) do conjunto motor-bomba da bomba de elevação ne da estação de tratamento e até o reservatório r ;

$$Pt = \frac{(H_{rj} + F_{rj} \cdot \frac{L_{rj}}{D_{rj}} \cdot \frac{V_{rj}^2}{2g}) \cdot Q_{rj}^{nt} \cdot 0,735499}{270 \cdot \eta_{rj}^{nt}} \quad (5)$$

em que tem-se os seguintes parâmetros:

H_{rj} : altura geométrica (m) do reservatório r até o reservatório j ;

F_{rj} : fator de atrito de Darcy–Weisbach (adimensional) calculado para a tubulação que liga o reservatório r até o reservatório j ;

L_{rj} : comprimento da tubulação (m) do reservatório r até o reservatório j ;

D_{rj} : diâmetro da tubulação (m) do reservatório r até o reservatório j ;

V_{rj} : velocidade (m/s) de escoamento do líquido calculada para a tubulação que liga o reservatório r até o reservatório j ;

Q_{rj}^{nt} : vazão (m³/h) da bomba ne que capta água do reservatório r até o reservatório j ;

η_{rj}^{nt} : rendimento (%) do conjunto motor-bomba da bomba de transferência nt do reservatório r até o reservatório j ;

4.2 Restrições para o Cálculo da Demanda Contratada

A restrição (6) certifica-se que a potência consumida durante todo o dia pelo sistema não ultrapasse $(1 + u)$ vezes a demanda energética contratada, tal que u representa a porcentagem de ultrapassagem permitida pela empresa fornecedora de energia elétrica. Vale ressaltar que neste modelo, a demanda energética contratada é determinada por dia e é tratada como variável de decisão, assim o modelo também pode ser usado para determinar o valor ótimo de demanda energética a ser contratada para atender a demanda estabelecida.

$$\begin{aligned} & \sum_{p=1}^P \sum_{e=1}^E \sum_{t=1}^T \sum_{nc \in N_{pe}} (Pc \cdot X_{pet}^{nc} \cdot N_h) + \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \sum_{ns \in N_{br}} (Pn \cdot I_{brt}^{ns} \cdot N_h) + \sum_{e=1}^E \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \sum_{ne \in N_{er}} (Pe \cdot Y_{ert}^{ne} \cdot N_h) \\ & + \sum_{r=1}^R \sum_{j \in S_j} \sum_{t=1}^T \sum_{nt \in N_{rj}} (Pt \cdot Z_{rjt}^{nt} \cdot N_h) \leq (1 + u) \cdot D \end{aligned} \quad (6)$$

As restrições (7) estabelecem um valor de demanda mínima de energia elétrica contratada por dia, de forma a respeitar a exigência da empresa fornecedora de energia elétrica.

$$D \geq D_{min} \quad (7)$$

em que tem-se o parâmetro:

D_{min} : Demanda mínima (em kW) a ser contratada.

4.3 Cálculo do Volume de Água nos Reservatórios

As restrições (8) fazem o gerenciamento do volume de água dos reservatórios. Estes levam em consideração a água recebida por captação (superficial, subterrânea e transferência),

e subtrai a água transferida, a demanda que deve atender e a porcentagem de perda de água causada por vazamento ou problemas estruturais.

$$\begin{aligned} \phi_{rt} = (1 - \theta_{r,t-1}) \cdot \phi_{r,t-1} + \sum_{e=1}^E \sum_{r=1}^R \sum_{ne \in N_{er}} (Q_{er}^{ne} \cdot Y_{ert}^{ne} \cdot N_h) + \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R \sum_{ns \in N_{br}} (Q_{br}^{ns} \cdot I_{brt}^{ns} \cdot N_h) + \\ + \sum_{r=1}^R \sum_{j \in U_j} \sum_{nt \in N_{jr}} (Q_{jr}^{nt} \cdot Y_{jrt}^{nt} \cdot N_h) - \sum_{r=1}^R \sum_{j \in S_j} \sum_{nt \in N_{rj}} (Q_{rj}^{nt} \cdot Z_{rjt}^{nt} \cdot N_h) - W_{rt} \end{aligned} \quad (8)$$

em que tem-se a variável de decisão:

ϕ_{rt} , que representa o volume de água (m³) do reservatório r no período t .

e os parâmetros:

θ_{rt} : fração de água no reservatório r perdida por vazamento durante o período t ;

W_{rt} : demanda (em m³) que o reservatório r deve atender no período t .

4.4 Restrições para as Zonas de Pressão

As restrições (9) garantem que as zonas de pressão e a altura da água dos reservatórios sejam respeitadas. Essas restrições consideram que todos os reservatórios do sistema são cilíndricos, de modo a apresentar em sua equação o cálculo da altura da água no reservatório através da função do volume e do raio da base.

$$Pd_{min} + H_{rk} + CT_k^{max} \leq \frac{\phi_{rt}}{\pi \cdot (r \cdot b_r)^2} \leq Pe_{max} + CT_k^{min}, \quad r = 1, \dots, R; \quad t = 1, \dots, T \quad (9)$$

em que tem-se os seguintes parâmetros:

Pd_{min} : pressão dinâmica mínima (*mca*) da rede;

Pe_{max} : pressão estática máxima (*mca*) da rede;

CT_k^{max} : cota topográfica (m) do nó consumidor k que está na zona de pressão mais alta;

CT_k^{min} : cota topográfica (m) do nó consumidor k que está na zona de pressão mais baixa;

rb_r : raio (m) da base do reservatório r ;

H_{rk} : perda de carga (m) do trecho da rede que liga o reservatório r até o nó consumidor k que está na zona de pressão mais alta;

4.5 Restrições para o Volume de Água nos Reservatórios

As restrições (10) asseguram que exista um volume de água mínimo de segurança nos reservatórios, normalmente usados para casos de emergência ou incêndios. Além disso, um volume máximo de água nos reservatórios também foi estabelecido para respeitar sua capacidade máxima.

$$\phi_r^{min} \leq \phi_{rt} \leq \phi_r^{max}, \quad r = 1, \dots, R; \quad t = 1, \dots, T \quad (10)$$

em que tem-se os seguintes parâmetros:

ϕ_r^{min} : volume (m³) mínimo de água permitido para o reservatório r ;

ϕ_r^{max} : volume (m³) máximo de água permitido para o reservatório r .

As restrições (11) estabelecem o volume inicial de água para cada um dos reservatórios do sistema.

$$\phi_{r0} = \phi_{r0}^0, \quad r = 1, \dots, R; \quad (11)$$

em que o parâmetro ϕ_{r0}^0 representa o volume (m³) de água no reservatório r no início do horizonte de planejamento.

As restrições (12) garantem que no final do horizonte de planejamento a quantidade água de cada reservatório fique entre $(1 - \Lambda)$ e $(1 + \Lambda)$ em relação ao nível de água inicial.

$$(1 - \Lambda) \cdot \phi_{r0} \leq \phi_{rT} \leq (1 + \Lambda) \cdot \phi_{r0}, \quad r = 1, \dots, R \quad (12)$$

em que tem-se o seguinte parâmetro:

Λ : percentual de variação entre o volume de água no reservatório no primeiro período e no último período do horizonte de planejamento.

4.6 Restrição para a Vazão de Água Captada

As restrições (13) determinam que o volume da água captada no manancial e enviado para a estação de tratamento, subtraindo as perdas do sistema, será enviado para os reservatórios de distribuição.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{e=1}^E \sum_{nc \in N_{pe}} \sum_{t=1}^T (1 - \theta_{et}) \cdot Q_{pe}^{nc} \cdot X_{pet}^{nc} \cdot N_h = \sum_{e=1}^E \sum_{r=1}^R \sum_{ne \in N_{er}} \sum_{t=1}^T Q_{er}^{ne} \cdot Y_{ert}^{ne} \cdot N_h \quad (13)$$

em que o parâmetro θ_{et} representa a fração de água perdida por vazamento na estação de tratamento e durante o período t .

4.7 Restrições para os Acionamentos das Bombas

Para minimizar os desgastes na estrutura do sistema de abastecimento de água, as restrições (14), (15), (16) e (17) determinam um limite máximo de acionamentos para cada bomba do sistema durante o horizonte de planejamento.

$$\sum_{t=1}^T \alpha_{pet}^{nc} \leq \alpha_{max}, \quad p = 1, \dots, P; \quad e = 1, \dots, E; \quad t = 1, \dots, T; \quad nc \in N_{pe} \quad (14)$$

em que tem-se o seguinte parâmetro:

α_{max} : número máximo de acionamento das bombas de captação de pontos superficiais

$$\sum_{t=1}^T \delta_{brt}^{ns} \leq \delta_{max}, b = 1, \dots, B; r = 1, \dots, R; t = 1, \dots, T; ns \in N_{br} \quad (15)$$

em que tem-se o seguinte parâmetro:

δ_{max} : número máximo de acionamento das bombas de captação de pontos subterrâneos.

$$\sum_{t=1}^T \gamma_{ert}^{ne} \leq \gamma_{max}, e = 1, \dots, E; r = 1, \dots, R; t = 1, \dots, T; ne \in N_{er} \quad (16)$$

em que tem-se o seguinte parâmetro:

γ_{max} : número máximo de acionamento das bombas de elevação.

$$\sum_{t=1}^T \beta_{rjt}^{nt} \leq \beta_{max}, r = 1, \dots, R; j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, T; nt \in N_{rj} \quad (17)$$

em que tem-se o seguinte parâmetro:

β_{max} : número máximo de acionamentos das bombas de transferência.

A fim de garantir que as bombas possam continuar ligadas pelo período t inteiro ou em apenas uma fração dele, temos as restrições (18), (19), (20) e (21), para as bombas de captação de pontos superficiais, para as bombas de captação de pontos subterrâneos, para as bombas de elevação e por fim, para as bombas de transferência, respectivamente.

$$0 \leq X_{pet}^{nc} \leq 1, \quad p = 1, \dots, P; e = 1, \dots, E; t = 1, \dots, T; nc \in N_{pe} \quad (26)$$

$$0 \leq I_{brt}^{ns} \leq 1, \quad b = 1, \dots, B; r = 1, \dots, R; t = 1, \dots, T; ns \in N_{br} \quad (27)$$

$$0 \leq Y_{ert}^{ne} \leq 1, \quad e = 1, \dots, E; r = 1, \dots, R; t = 1, \dots, T; ne \in N_{er} \quad (28)$$

$$0 \leq Z_{rjt}^{nt} \leq 1, \quad r = 1, \dots, R; t = 1, \dots, T; j \in S_r; nt \in N_{rj} \quad (29)$$

As restrições (22), (23), (24) e (25) asseguram, respectivamente, que se $X_{pet}^{nc} > 0$, então $A_{pet}^{nc} = 1$, se $I_{brt}^{ns} > 0$, então $S_{brt}^{ns} = 1$, se $Y_{ert}^{ne} > 0$, então $B_{ert}^{ne} = 1$ e se $Z_{rjt}^{nt} > 0$, então $C_{rjt}^{nt} = 1$.

em que tem-se as seguintes variáveis de decisão:

$$X_{pet}^{nc} \leq A_{pet}^{nc}, \quad p = 1, \dots, P; e = 1, \dots, E; t = 1, \dots, T; nc \in N_{pe} \quad (22)$$

$$A_{pet}^{nc} = \begin{cases} 1, & \text{se } X_{pet}^{nc} > 0 \text{ (ou sejam se há captação pela bomba } nc); \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$I_{brt}^{ns} \leq S_{brt}^{ns}, \quad b = 1, \dots, B; \quad r = 1, \dots, R; \quad t = 1, \dots, T; \quad ns \in N_{br} \quad (23)$$

$$S_{brt}^{ns}: \begin{cases} 1, & \text{se } I_{brt}^{ns} > 0 \text{ (ou sejam se há captação pela bomba } ns); \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$Y_{ert}^{ne} \leq B_{ert}^{ne}, \quad e = 1, \dots, E; \quad r = 1, \dots, R; \quad t = 1, \dots, T; \quad ne \in N_{rj} \quad (24)$$

$$B_{ert}^{ne}: \begin{cases} 1, & \text{se } Y_{ert}^{ne} > 0 \text{ (ou sejam se há captação pela bomba } ne); \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$Z_{rjt}^{nt} \leq C_{rjt}^{nt}, \quad r = 1, \dots, R; \quad j = 1, \dots, J; \quad t = 1, \dots, T; \quad nt \in N_{rj} \quad (25)$$

$$C_{rjt}^{nt}: \begin{cases} 1, & \text{se } Z_{rjt}^{nt} > 0 \text{ (ou sejam se há captação pela bomba } nt); \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Para assegurar que se uma bomba da rede se manteve acionada pelo período t inteiro, não será necessário acioná-la novamente no período $t + 1$ tem-se as restrições (26), (27), (28) e (29), para as bombas de captação superficial, subterrânea, elevação e transferência, respectivamente.

$$\alpha_{pet}^{nc} \geq A_{pet}^{nc} - X_{p,e,t-1}^{nc}, \quad p = 1, \dots, P; \quad e = 1, \dots, E; \quad t = 1, \dots, T; \quad nc \in N_{pe} \quad (26)$$

$$\delta_{brt}^{ns} \geq S_{brt}^{ns} - I_{b,r,t-1}^{ns}, \quad b = 1, \dots, B; \quad r = 1, \dots, R; \quad t = 1, \dots, T; \quad ns \in N_{br} \quad (27)$$

$$\gamma_{ert}^{ne} \geq B_{ert}^{ne} - Y_{e,r,t-1}^{ne}, \quad e = 1, \dots, E; \quad r = 1, \dots, R; \quad t = 1, \dots, T; \quad ne \in N_{er} \quad (28)$$

$$\beta_{rjt}^{nt} \geq C_{rjt}^{nt} - Z_{r,j,t-1}^{nt}, \quad r = 1, \dots, R; \quad j = 1, \dots, J; \quad t = 1, \dots, T; \quad nt \in N_{rj} \quad (29)$$

As restrições (30), (31), (32) e (33) impõem as condições das bombas no início do horizonte de planejamento ($t = 0$).

$$X_{pe0}^{nc} = X_0^{nc} \quad (30)$$

em que tem-se o parâmetro:

X_0^{nc} : condição inicial das bombas de captação de mananciais superficiais;

$$I_{br0}^{ns} = I_0^{ns} \quad (31)$$

em que tem-se o parâmetro:

I_0^{ns} : condição inicial das bombas de captação de mananciais subterrâneos;

$$Y_{er0}^{ne} = Y_0^{ne} \quad (32)$$

em que tem-se o parâmetro:

Y_0^{ne} : condição inicial das bombas de elevação;

$$Z_{rj0}^{nt} = Z_0^{nt} \quad (33)$$

em que tem-se o parâmetro:

Z_0^{nt} : condição inicial das bombas de transferência.

E por fim, as restrições (34) e (35) definem as variáveis binárias.

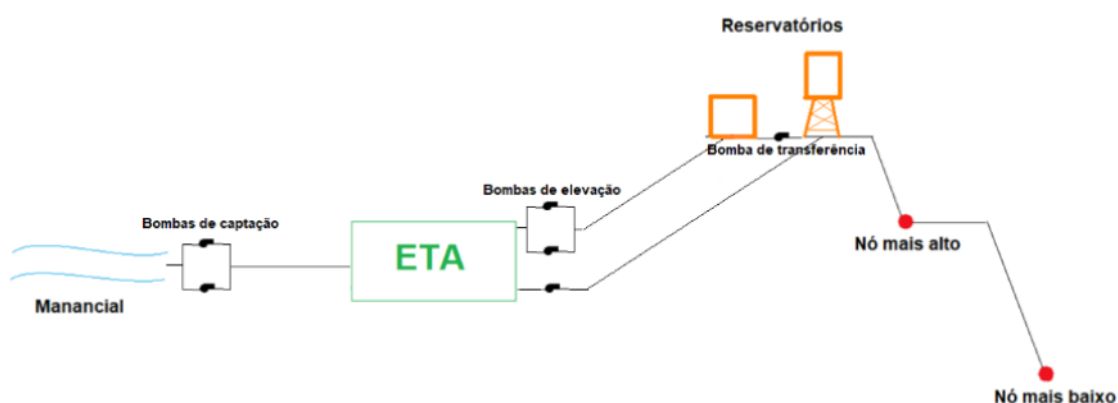
$$\begin{aligned} &\alpha_{pet}^{nc} \in \{0, 1\}, \delta_{brt}^{ns} \in \{0, 1\}, \gamma_{ert}^{ne} \in \{0, 1\}, \beta_{rjt}^{nt} \in \{0, 1\}, \\ &nc \in N_{pe}; ns \in N_{br}; ne \in N_{er}; nt \in N_{rj}; \\ &p = 1, \dots, P; b = 1, \dots, B; e = 1, \dots, E; r = 1, \dots, R; t = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} &A_{pet}^{nc} \in \{0, 1\}, S_{brt}^{ns} \in \{0, 1\}, B_{ert}^{ne} \in \{0, 1\}, C_{rjt}^{nt} \in \{0, 1\}, \\ &nc \in N_{pe}; ns \in N_{br}; ne \in N_{er}; nt \in N_{rj}; \\ &p = 1, \dots, P; b = 1, \dots, B; e = 1, \dots, E; r = 1, \dots, R; t = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (35)$$

5 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZADA

Para a realização dos testes numéricos deste trabalho foi utilizada a rede hipotética desenvolvida por Parras (2020), que é ilustrada na Figura 20. A rede é composta por um manancial superficial de água e não possui pontos de captação subterrânea. Dessa forma, a água é captada e transportada para a estação de tratamento, em seguida ela é levada para os reservatórios e distribuída para os centros consumidores.

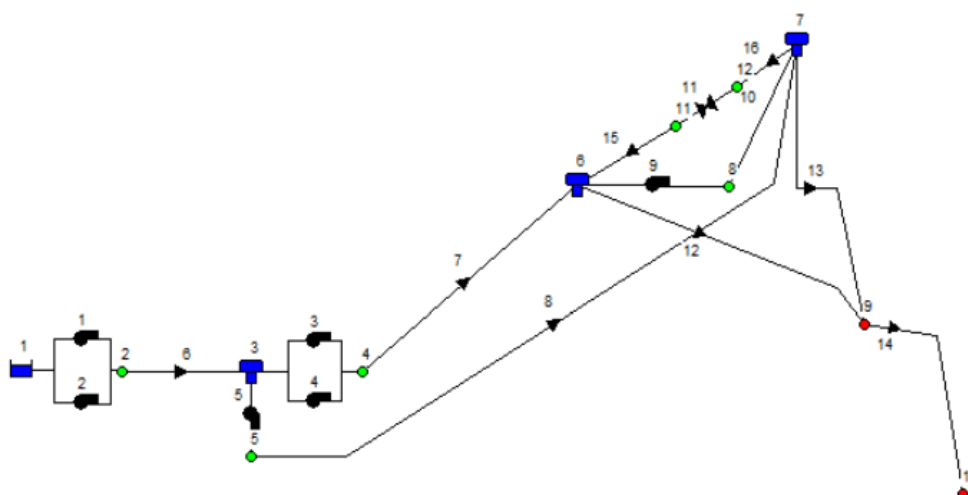
Figura 20 – Sistema de abastecimento hipotético proposto por Parras (2020).



Fonte: Parras (2020)

Em Faccioli (2021) foi elaborada a rede de Parras (2020) no EPANET, a qual é ilustrada na Figura 21, e utilizada neste trabalho.

Figura 21 – Sistema de abastecimento hipotético de Parras (2020) no EPANET.

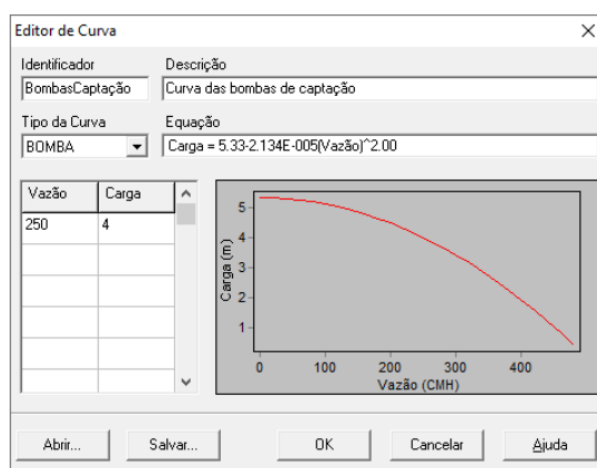


Fonte: Faccioli (2021)

A rede proposta é constituída por tubulações de ferro fundido, e todos os condutores possuem um escoamento forçado, ou seja, a água ocupa toda a seção de escoamento e a pressão interna é sempre superior à pressão atmosférica.

Ela é composta por duas bombas hidráulicas idênticas em paralelo (1 e 2) para a captação superficial da água, no EPANET a vazão é dada como variável, mas além disso é necessário informar a curva da bomba, dessa forma as vazões utilizadas por Parras (2020), foram aproximadas de modo a relacionar a vazão com a altura manométrica. Com isso, para as bombas de captação aproximou-se a curva da bomba à $250 \text{ m}^3/\text{h}$, ilustrada na Figura 22.

Figura 22 – Curva para cada bomba de captação



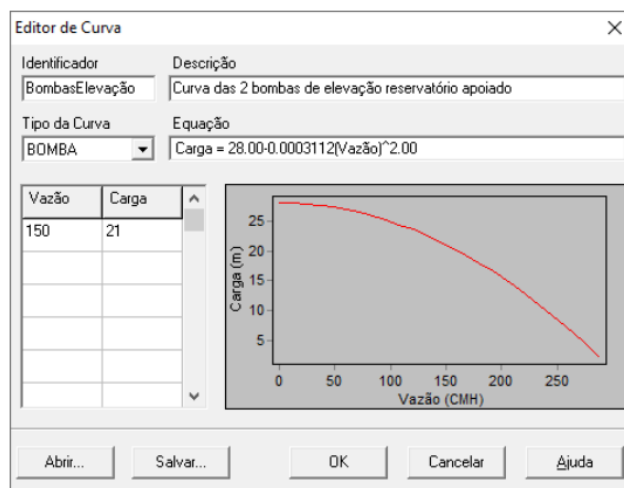
Fonte: Faccioli (2021)

Ainda destaca-se que os nós em verde, exibidos na Figura 21, são considerados auxiliares, ou seja, são usados para interligar objetos da rede, e não dispõem de nenhum consumo.

Após a captação da água, ela segue para a estação de tratamento de água (3), por dentro da tubulação com 150 metros de comprimento e 200 milímetros de diâmetro. A ETA dispõe de uma altura de água inicial e mínima de 0 metros, uma altura máxima de 1,6 metros com 20 metros de diâmetro.

Em seguida, a água segue para os reservatórios. Para o transporte da água para o reservatório apoiado (6) são usadas duas bombas idênticas em paralelo (3 e 4), com uma vazão aproximada de $150 \text{ m}^3/\text{h}$, de acordo com o ilustrado na Figura 23 .

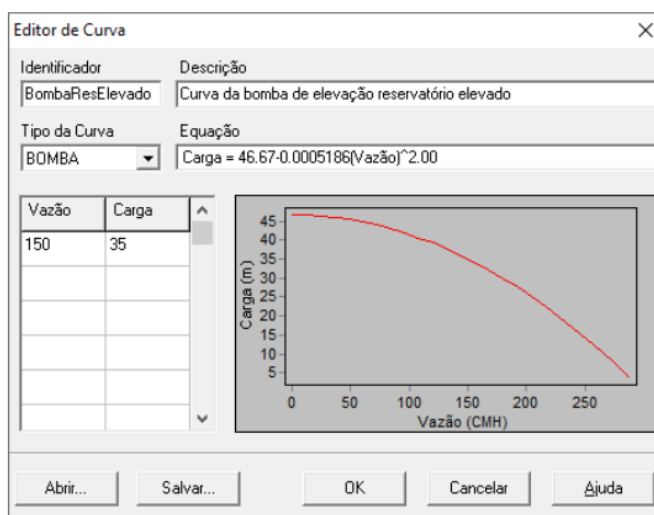
Figura 23 – Curva para cada bomba que eleva água para o reservatório apoiado



Fonte: Faccioli (2021)

Já para o transporte de água para o reservatório elevado (7), a bomba (5) é utilizada, também, com uma vazão aproximada de $150 \text{ m}^3/\text{h}$, conforme a Figura 24. Ambas as tubulações usadas para o transporte possuem 200 metros de comprimento e 250 milímetros de diâmetro.

Figura 24 – Curva da bomba que eleva água para o reservatório elevado.



Fonte: Faccioli (2021)

Os dois reservatórios utilizados são cilíndricos e fazem a distribuição de água para os pontos (9 e 10), que representam os centros consumidores.

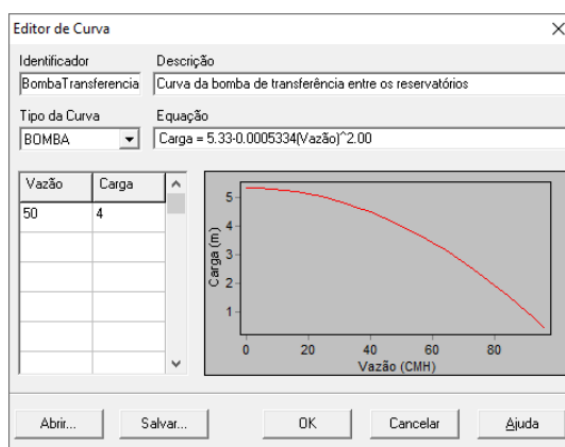
O reservatório apoiado (6) possui uma altura de 16,75 metros, com um diâmetro de 17 metros e uma capacidade máxima de 3800 m^3 , e uma mínima de $1134,9 \text{ m}^3$. Já o reservatório

elevado possui uma torre de 20 metros, uma altura de 6,34 metros, com um diâmetro de 6,34 metros, sua capacidade máxima é de 200 m^3 e mínima de 20 m^3 .

Além de fazerem a distribuição da água, os reservatórios podem realizar a transferência de água entre si, utilizando duas tubulações, na qual cada uma possui 100 metros de comprimento com 100 milímetros de diâmetro.

A transferência de água do reservatório apoiado para o elevado ocorre através de uma bomba hidráulica (9), que possui uma vazão aproximada de $50 \text{ m}^3/\text{h}$, exibido na Figura 25. Já a transferência do reservatório elevado para o apoiado acontece por gravidade e apenas uma válvula reguladora de vazão (11) é usada para manter a vazão fixa em $25 \text{ m}^3/\text{h}$.

Figura 25 – Curva da bomba que transfere água do reservatório apoiado para o elevado



Fonte: Faccioli (2021)

Por fim, a água sai dos reservatórios para os nós consumidores (9 e 10), indicados pela cor vermelha, por meio da tubulação com 1000 metros de comprimento e 290 milímetros para cada.

Dentro do EPANET, foram estabelecidas as cotas topográficas dos componentes da rede. Para o manancial (1) e a ETA (2), foi indicado uma cota de 90 metros, para o reservatório apoiado (6) foi imposto uma cota de 100 metros, para o elevado (7), devido sua torre de 20 metros, foi indicado uma cota de 120 metros. Ademais, os nós consumidores (9 e 10) possuem uma cota de 93 e 80 metros, respectivamente.

Em seu projeto, Parras (2020) associou as demandas energéticas aos reservatórios, porém essa associação não é possível no EPANET. Dessa forma, a demanda foi distribuída pelos consumidores, e a demanda referente ao reservatório apoiado foi associado ao nó mais alto (9) e a demanda do reservatório elevado foi associado ao nó mais baixo (10).

As demandas são apresentadas na Tabela 1 e foram geradas aleatoriamente em intervalos pré-definidos. Na Tabela 2 é apresentado o fator de atrito de Darcy–Weisbach, valor que representa a rugosidade das tubulações novas e antigas, tais valores foram usados por Parras (2020).

Tabela 1 – Demandas de cada nó consumidor em cada período.

Períodos	Demanda em m^3 do nó 9	Demanda em m^3 do nó 10
1	50	20
2	80	20
3	90	25
4	100	40
5	100	45
6	130	35
7	150	40
8	180	35
9	180	40
10	190	30
11	200	40
12	200	45
13	170	35
14	150	25
15	140	30
16	160	40
17	170	50
18	190	45
19	270	63
20	265	65
21	285	68
22	180	30
23	190	40
24	10	30

Fonte: Adaptado de Parras (2020).

Tabela 2 – Fator de atrito de Darcy–Weisbach.

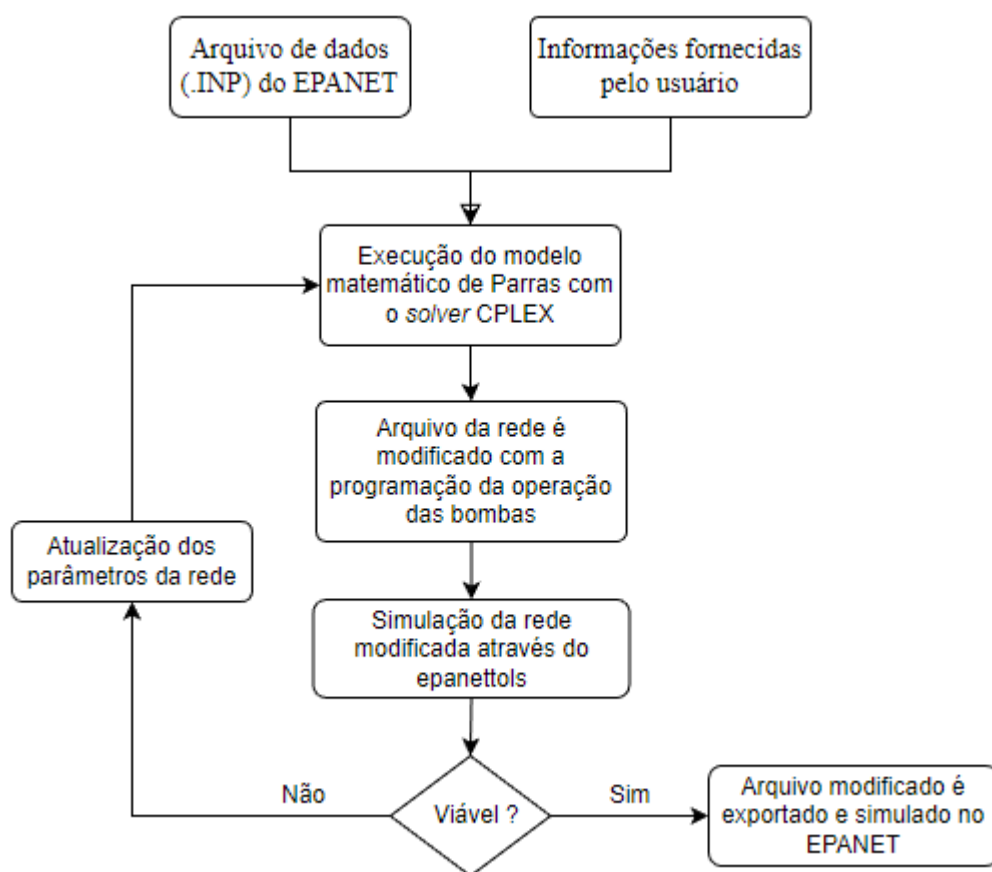
Bomba	Tubulação Nova	Tubulação Antiga
Captação	0,020	0,054
Elevação	0,019	0,048
Transferência	0,025	0,072
Abastecimento	0,019	0,046

Fonte: Adaptado de Parras (2020).

6 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Para este trabalho foi proposto a automatização do processo de implementação, investigação e análise das soluções obtidas pelo modelo matemático de otimização energética desenvolvido por Parras (2020), quando aplicado em uma rede de distribuição de água e testado no simulador hidráulico EPANET. Dessa forma, o fluxograma abaixo, ilustrado na Figura 26, apresenta a visão geral das etapas do processo de elaboração e construção do algoritmo geral.

Figura 26 – Fluxograma do algoritmo geral.



Fonte: Elaborado pela autora

Inicialmente, a rede de distribuição utilizada foi desenhada no EPANET e, em seguida, as propriedades de cada um dos objetos foram inseridas, assim como indicado o conjunto de opções para a simulação. Por fim, a rede criada foi exportada do simulador, gerando o arquivo de dados, este sendo um arquivo com extensão INP.

Contudo, mesmo com as informações fornecidas pelo arquivo de dados, foi necessário obter dados adicionais para resolver o modelo matemático. Dessa forma, para tornar o processo

mais intuitivo e que facilitaria a comunicação com o simulador hidráulico, foi proposto a criação de uma interface gráfica.

A seguir é detalhada a linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento das implementações computacionais, assim como as bibliotecas usadas para a elaboração da interface gráfica e do modelo computacional.

6.1 Python

Em sua documentação, feita pelo Python *Software Foundation* (2022), o Python é definido como uma linguagem de programação de código aberto, poderosa e fácil de usar e aprender. Sua estrutura de dados é de alto nível, o que a torna eficiente e simples para a programação orientada a objetos.

A linguagem foi selecionada devido a sua compatibilidade com o *software* EPANET, que disponibiliza uma biblioteca de vínculo dinâmico, também chamada de *Programmer's Toolkit*. Ela permite o acesso a diversas funcionalidades do programa. Destaca-se ainda que o Python também possui bibliotecas direcionadas para a comunicação do *software*, que podem ser utilizadas para criar, editar e simular redes de distribuição de água.

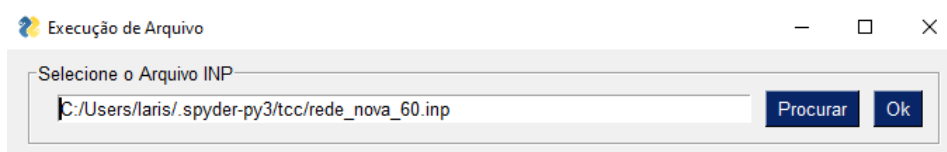
Outro fator decisivo para sua escolha foi a grande diversidade de bibliotecas que a linguagem apresenta, principalmente para a elaboração de modelos e métodos de otimização, para a construção de interfaces gráficas e possibilitar o acesso a *solvers* comerciais eficientes.

6.2 Interface Gráfica

Para o desenvolvimento da interface gráfica em Python, foi utilizada a biblioteca PySimpleGUI, uma vez que ela possui uma estrutura simples e intuitiva, além de possuir objetos e modelos de várias outras bibliotecas de interface da linguagem escolhida.

Como descrito anteriormente, foi necessário a criação desse programa secundário para receber as informações adicionais da rede. Sendo assim, inicialmente o usuário deve fornecer o arquivo de dados (aquele exportado do EPANET), como ilustra a Figura 27.

Figura 27 – Interface inicial.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após verificar sua existência, o usuário então é redirecionado para o painel no qual deve apresentar as informações adicionais, Figura 28, sendo elas:

- Tipo de tubulação utilizada na rede, para que o modelo identificar o coeficiente de rugosidade que vai ser usado na simulação da rede;
- A demanda energética contratada por dia, uma vez que ela varia a partir de fatores externos, como a demanda a ser atendida, rendimento do conjunto de bombeamento, dentre outros;
- A taxa a ser paga pela contratação de demanda energética;
- A porcentagem de ultrapassagem da demanda energética permitida para que não haja taxas adicionais;
- O custo de acionamento das bombas e o número máximo de acionamento que cada bomba do conjunto (captação, subterrânea, elevação e transferência) pode realizar;
- Identificar na rede o reservatório de nível variado que é tratado como estação de tratamento de água, uma vez que o EPANET não apresenta essa diferenciação;
- Identificar, caso exista, o trecho que é utilizado para o transporte de água entre reservatórios, que não possui bomba hidráulica e faz a transferência por gravidade.

Figura 28 – Interface que receber as informações adicionais da rede.

Execução de Arquivo

Selecione o Arquivo INP

C:/Users/laris/.spyder-py3/tcc/rede_nova_60.inp

Procurar Ok

Informações Adicionais

Tipo de Tubulação: ☒ Nova ☐ Antiga

Demanda energética contratada por dia 8276.00 kW

Taxa para contratação de demanda energética 5.12 R\$/kW

Porcentagem de ultrapassagem 0 %

Custo de acionamento das bombas R\$ 2.00

Número de acionamentos máximos para cada bomba de captação superficial 5

Número de acionamentos máximos para cada bomba de captação subterrânea 5

Número de acionamentos máximos para cada bomba de elevação 5

Número de acionamentos máximos para cada bomba de transferência 5

Informações dos Componentes

Insira o ID do reservatório que representa a Estação de Tratamento de Água (ETA) da rede 3

Insira o ID do trecho que é usado para transferência entre reservatórios (Caso não exista insira "0") 16

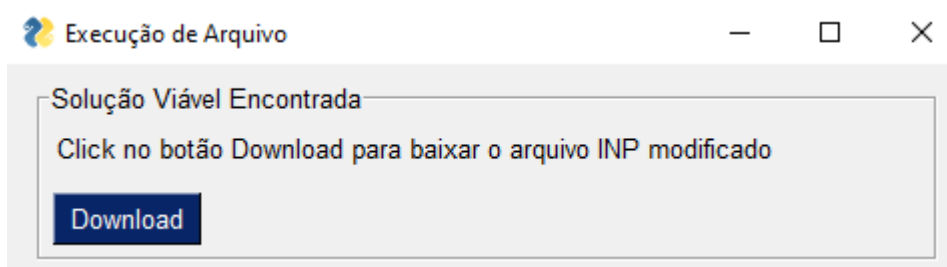
Executar Sair

Fonte: Elaborada pela autora.

Após inserir essas informações e selecionar a opção de executar, o software gera um novo arquivo de dados e executa o modelo computacional, obtendo a programação da operação das bombas, em seguida sua solução é testada, de forma a verificar sua viabilidade. Com isso, caso seja viável, o arquivo modificado é apresentado ao usuário.

Por fim, o usuário tem a opção de baixar o novo arquivo, como mostra a Figura 29, e esse novo arquivo pode ser importado para o software EPANET e simulado.

Figura 29 – Interface para o *download* do arquivo de dados modificado.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.3 Modelo Computacional

Para a implementação do modelo matemático de Parras (2020), foram utilizados a biblioteca Pyomo, *Water Network Tool for Resilience* (WNTR) e o EpanetTools.

O Pyomo é uma biblioteca direcionada para a formulação, resolução e análise de modelos de otimização. Ela foi escolhida pois possui uma alta performance, além de oferecer suporte para elaboração de Problemas de Programação Linear Inteira Mista e a possibilidade de se conectar com o *solver* CPLEX.

Vale destacar que a elaboração do modelo computacional foi fundamentada nas implementações descritas no livro *Pyomo – Optimization Modeling in Python*, escrito por Hart et al (2017).

A biblioteca WNTR foi utilizada para acessar as informações fornecidas pelo arquivo com extensão INP, de modo a viabilizar a comunicação entre os dados de entrada e o modelo computacional implementado. Essa biblioteca foi usada devido a sua compatibilidade com redes criadas dentro do EPANET, já que ela possibilita a leitura, edição e simulações da rede, a partir do arquivo de dados exportado.

Já a biblioteca *EpanetTools* foi empregada para analisar a rede modificada, ou seja, após solucionar o modelo, a nova programação é inserida no arquivo INP, e esse arquivo então é simulado dentro do programa secundário.

Em sua simulação é gerado o arquivo de relatório, que tem extensão RPT, nele é apresentado os erros e advertências gerados durante o processo. Caso seja encontrado algum problema, o programa faz o tratamento do erro e/ou advertência, de modo a fazer uma nova alteração na rede, essa sendo na própria infraestrutura. Com a mudança no arquivo, ele passa novamente pelo modelo matemático, para obter um novo planejamento da programação da operação das bombas, que em seguida será simulada, e sua viabilidade testada.

Esse processo iterativo, de verificar a aplicabilidade da solução obtida pelo modelo matemático é feito até que o arquivo de relatório identifique uma simulação bem-sucedida, assim apresentando o arquivo final para o usuário.

Durante os testes realizados foi evidenciado que os erros e advertências encontrados foram solucionados através da modificação física de determinados componentes, principalmente do diâmetro das tubulações que compõem o sistema, isto mostra que esses problemas ocorrem devido a inviabilidade da rede funcionar com a estrutura feita, mas a partir de adaptações a rede tem um bom funcionamento.

Ademais, as implementações realizadas para esse trabalho foram disponibilizadas na plataforma do GitHub (2022), dessa forma o código pode ser visualizado, modificado e adaptado por qualquer usuário do site.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para simular os cenários propostos, o *software* secundário recebeu os dados de entrada através do arquivo INP, exportado do EPANET, e do usuário. Após a execução do modelo computacional, desenvolvido em Python, a programação das bombas do sistema foi inserida no arquivo, sua viabilidade testada e a rede modificada foi simulada no EPANET, de modo a obter os resultados descritos neste tópico.

Vale ressaltar que as simulações foram feitas em um notebook Lenovo, com um processador AMD Ryzen 5 3500U e placa de vídeo Radeon Vega Mobile Gfx, com uma memória RAM de 8 GB e sistema operacional *Windows* 10.

Para as simulações foi considerado duas condições para as tubulações, nova e antiga, assim como dois valores de rendimento para o conjunto motor-bomba, de 60% e 70%. Com isso, este trabalho simulou quatro diferentes cenários: tubulação nova e bombas com rendimento de 60%, tubulação nova e bombas com rendimento de 70%, tubulação antiga e bombas com rendimento de 60% e tubulação antiga com rendimento de 70%.

Destaca-se que nos testes numéricos foram usados 24 períodos de uma hora cada, para compor o horizonte de planejamento de um dia, também foi determinado que não houve perda de carga dentro do sistema. Considerou-se um custo de R\$ 0,20 por kW consumido, exceto nos horários de ponta (intervalo entre às 18 horas e 21 horas) onde o custo é o triplo, ou seja, R\$ 0,60.

Além disso, foi estabelecida uma taxa de R\$ 5,12 por kW para a demanda energética contratada, e um custo de acionamento das bombas igual a R\$ 2,00, destaca-se ainda que a demanda energética contratada por dia variou de acordo com o cenário, de modo a verificar as demandas estabelecidas nos nós consumidores, assim como o rendimento do sistema de bombeamento.

Para os valores de pressão dinâmica mínima e pressão estática máxima, estipulou-se os valores convencionais de 10 mca e 50 mca, respectivamente, o que foi determinado em Netto et al. (2015).

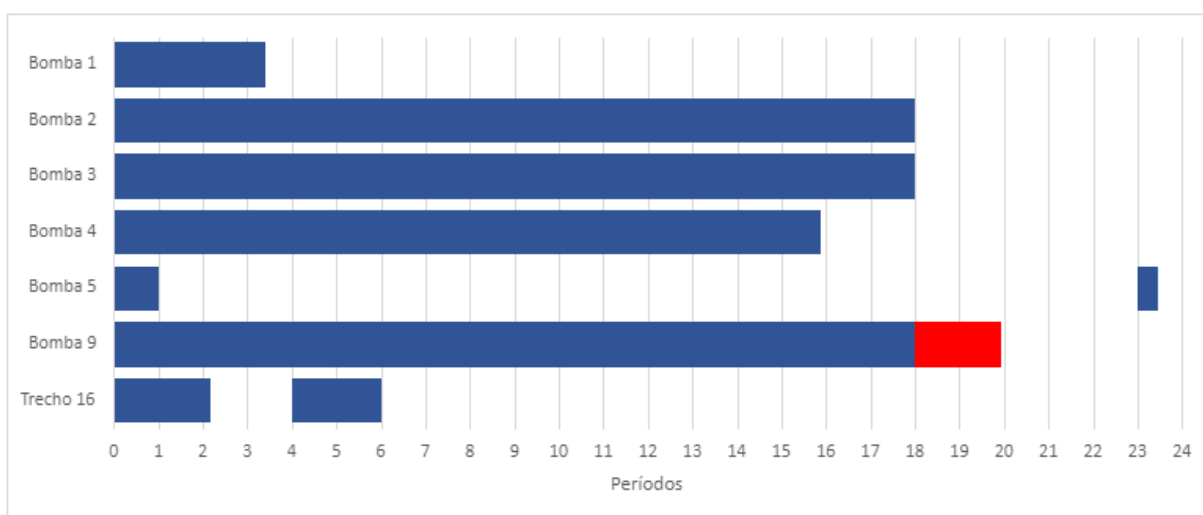
Por fim, cada cenário, com sua respectiva solução obtida pelo modelo matemático, foi simulado no *software* EPANET. Ademais, nas simulações feitas diversos aspectos da rede foram analisados, de modo a verificar a viabilidade dos resultados.

7.1 Cenário de Simulação 1: Rede de Abastecimento de Água com Tubulação Nova e bombas com Rendimento de 60%

Neste primeiro cenário de testes, foi considerado que as tubulações do sistema são novas e o rendimento do conjunto motor-bomba é igual a 60%, para a demanda energética contratada por dia foi considerado o valor de 8.276,00 *kW*, assim como Parras (2020).

A Figura 30 ilustra graficamente os períodos em que as bombas hidráulicas operaram, de acordo com a solução obtida. Em vermelho é destacado as operações que aconteceram no período de ponta.

Figura 30 – Política de operação das bombas da rede - Cenário 1: Rendimento das bombas de 60% com tubulação nova.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, notou-se que a simulação no EPANET foi bem-sucedida, contudo, a Bomba 9, que faz a transferência do reservatório apoiado para o reservatório elevado, operou durante o horário de ponta, isso ocorre pois não é possível atender a demanda total deste período sem ligar a bomba. Mesmo com o funcionamento de uma bomba no horário em que o custo energético é mais alto, o valor obtido da função objetivo foi de R\$ 42.462,02, 3,96% menor do que o publicado por Parras (2020), que foi de R\$ 44.213,30.

Ao analisar os componentes físicos da rede, notou-se que não houve alterações. Em relação aos valores de pressão mínima e máxima nos nós consumidores foram obtidos 10,85 *mca* e 31,58 *mca*, respectivamente, o que respeitou a restrição imposta, como mostra a Tabela 3, destaca-se ainda que na mesma são apresentadas as pressões nos reservatórios, nos quais obedeceram os níveis mínimo e máximo estabelecidos, tais dados foram gerados pelo

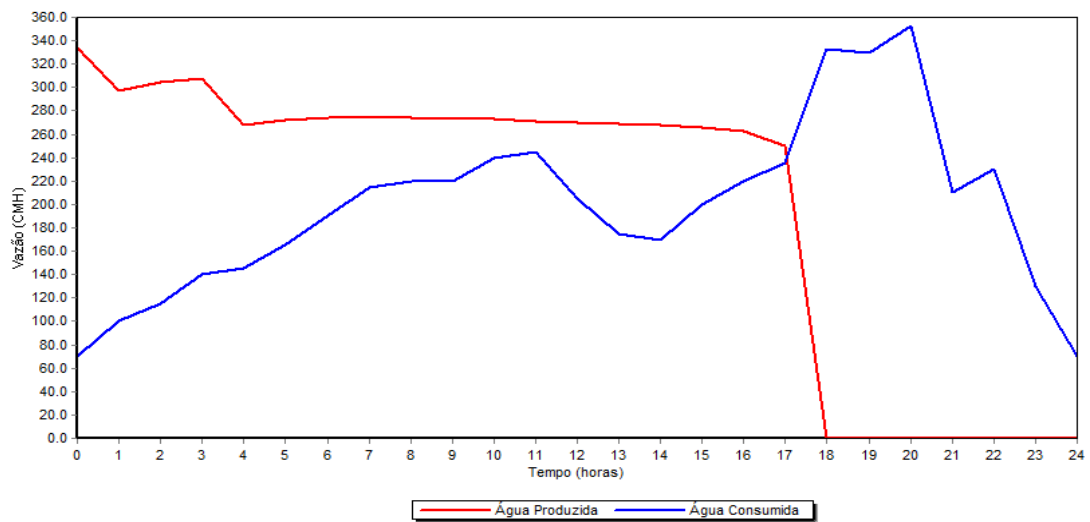
EPANET, e dispostos na tabela abaixo. A Figura 31 exibe o balanço de vazão da água captada e consumida.

Tabela 3 – Pressão nos nós consumidores e reservatórios - Cenário 1: Rendimento das bombas de 60% com tubulação nova.

Tempo (horas)	Pressão (m) Nó 9	Pressão (m) Nó 10	Pressão (m) RNV 6	Pressão (m) RNV 7
00:00	18.61	31.58	5.00	0.63
01:00	13.16	26.13	6.71	0.63
02:00	14.14	27.09	7.84	0.63
03:00	14.80	27.70	8.82	0.63
04:00	15.52	28.39	9.60	0.63
05:00	15.94	28.86	10.31	0.63
06:00	16.10	28.99	10.87	0.63
07:00	16.04	28.96	11.26	0.63
08:00	16.20	29.09	11.52	0.63
09:00	16.41	29.34	11.73	0.63
10:00	16.20	29.09	11.92	0.63
11:00	16.18	29.05	12.01	0.63
12:00	17.04	29.96	12.07	0.63
13:00	17.79	30.74	12.31	0.63
14:00	18.22	31.16	12.66	0.63
15:00	18.07	30.96	13.01	0.63
16:00	17.83	30.67	13.15	0.63
17:00	17.14	30.01	12.76	0.63
18:00	14.35	27.11	12.34	6.02
19:00	12.96	25.71	10.87	4.36
20:00	10.85	23.58	9.42	0.63
21:00	12.73	25.67	7.86	0.63
22:00	11.42	24.32	6.94	0.63
23:00	12.04	24.98	5.92	0.63
24:00	13.20	26.17	6.49	0.63

Fonte: Elaborado pela autora.

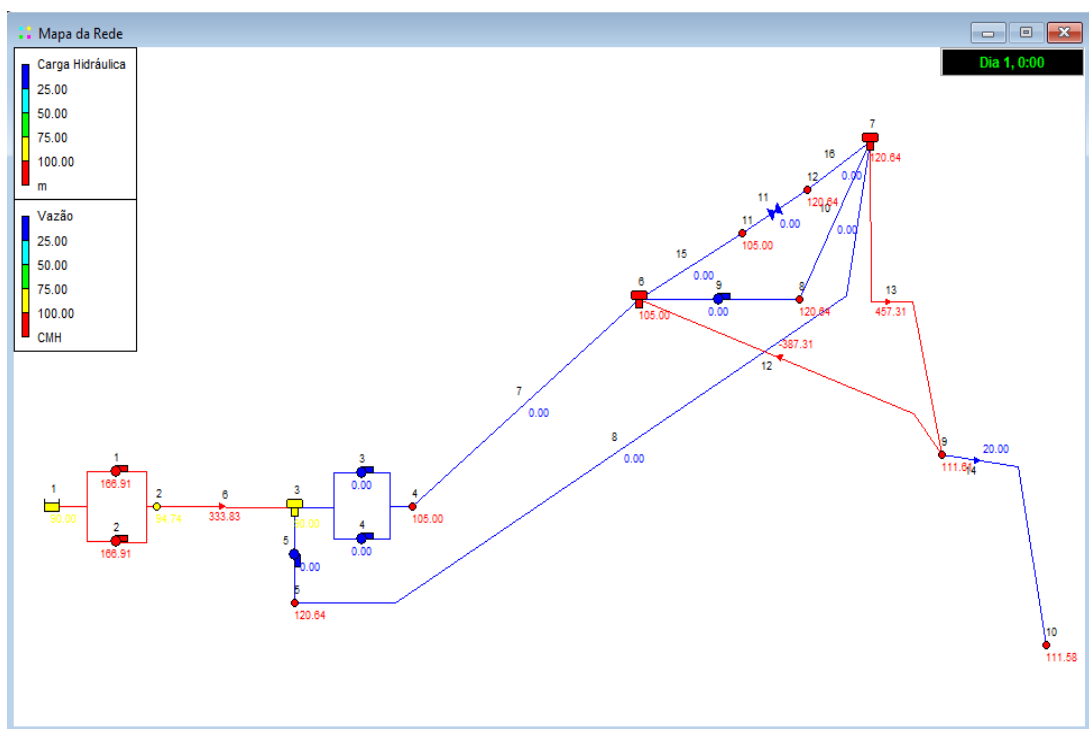
Figura 31 – Balanço de Vazão - Cenário 1: Rendimento das bombas de 60% e tubulação nova.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, na Figura 32 é possível observar a execução bem-sucedida da solução obtida pelo programa, no EPANET, juntamente com as informações de carga hidráulica dos nós e a vazão dos trechos no período inicial da simulação.

Figura 32 – Carga Hidráulica e Vazão - Cenário 1: Rendimento das bombas de 60% e tubulação nova.



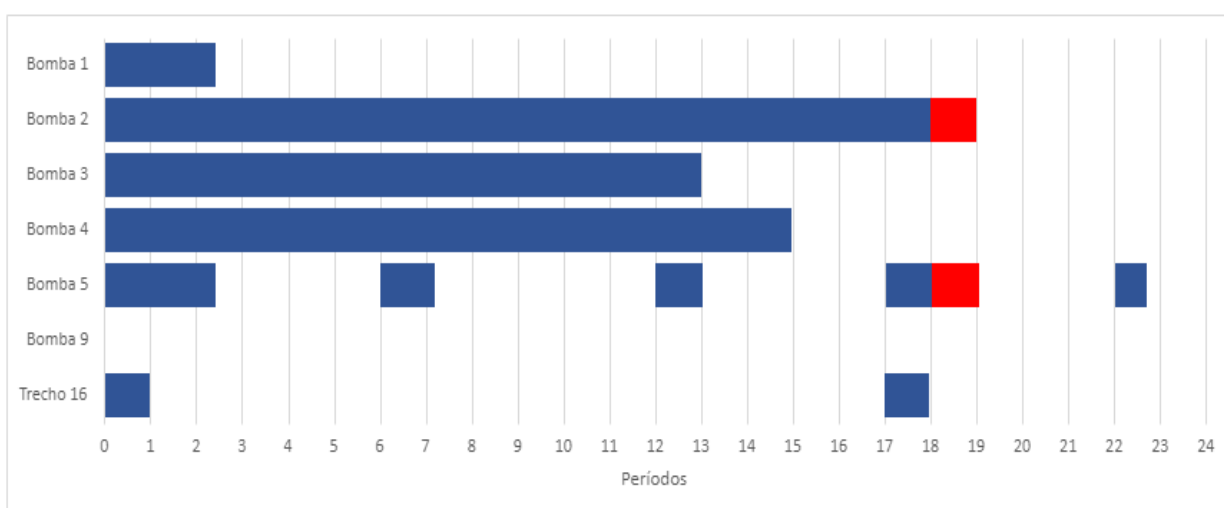
Fonte: Elaborada pela autora.

7.2 Cenário de Simulação 2: Rede de Abastecimento de Água com Tubulação Nova e Bombas com Rendimento de 70%

Neste segundo cenário de testes, foi considerado que as tubulações do sistema são novas e o rendimento do conjunto motor-bomba é igual a 70%, o valor da demanda energética contratada por dia foi de 7.093,70 *kW*.

O gráfico da Figura 33 ilustra a programação de liga-desliga das bombas hidráulicas do sistema obtidas a partir da execução do *software* secundário. Os horários das bombas que operaram no período de ponta estão destacados em vermelho.

Figura 33 – Política de operação das bombas da rede - Cenário 2: Rendimento das bombas de 70% com tubulação nova.



Fonte: Elaborado pela autora.

A solução obtida pelo *software* secundário mostrou-se viável, uma vez que a simulação feita no EPANET foi bem-sucedida, além de não ter apresentado alteração em sua estrutura física. Todavia, a bomba de captação 2, e a de transferência 5 permanecem ligadas durante o horário de ponta, de modo a atender a demanda total determinada pelo sistema.

Os valores de pressão mínima e máxima nos nós consumidores foram respeitados, apresentando os valores de 10,44 e 34,88 *mca*, respectivamente. Semelhante a isso, as pressões nos reservatórios variaram dentro do esperado, e os níveis de mínimo e máximo foram obedecidos. Essas informações foram retiradas do relatório do EPANET e exibidas na Tabela 4. Na Figura 34 é exibido o balanço da vazão captada e consumida.

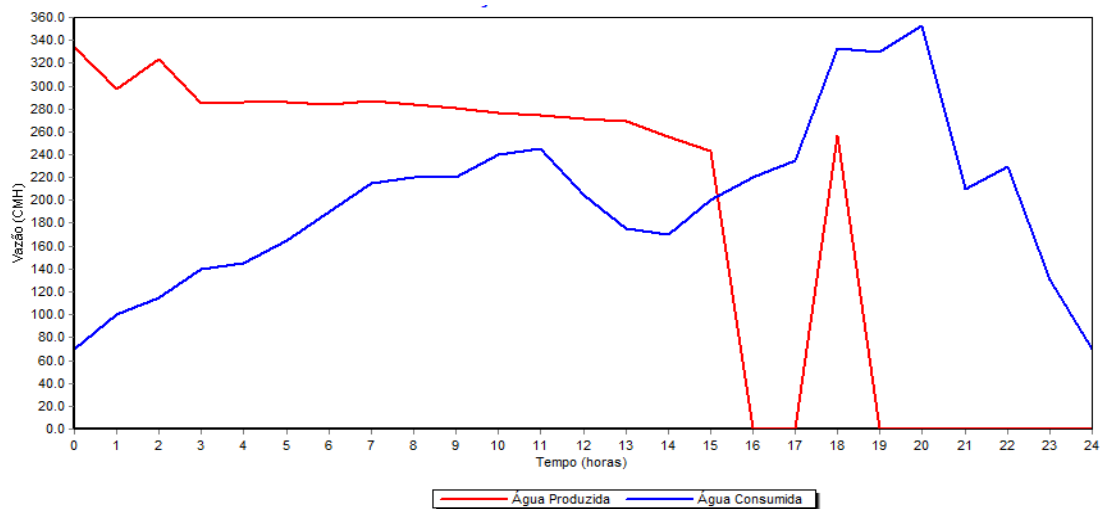
Em relação ao valor final da função objetivo, Parras (2020) obteve R\$ 37.899,76, já o *software* secundário apresentou um valor final de R\$ 37.453,74, representando um custo 1,18% mais baixo.

Tabela 4 – Pressão nos nós consumidores e reservatórios - Cenário 2: Rendimento das bombas de 70% com tubulação nova.

Tempo (horas)	Pressão (m) Nó 9	Pressão (m) Nó 10	Pressão (m) RNV 6	Pressão (m) RNV 7
00:00	18.61	31.58	5.00	0.63
01:00	13.16	26.13	6.71	0.63
02:00	21.93	34.88	7.84	6.28
03:00	15.75	28.64	9.76	0.63
04:00	16.36	29.23	10.43	0.63
05:00	16.66	29.58	11.03	0.63
06:00	16.72	29.61	11.49	0.63
07:00	16.95	29.87	12.17	0.63
08:00	17.03	29.93	12.35	0.63
09:00	17.14	30.07	12.45	0.63
10:00	16.84	29.73	12.56	0.63
11:00	16.75	29.62	12.58	0.63
12:00	17.55	30.46	12.58	0.63
13:00	18.25	31.20	12.77	0.63
14:00	18.14	31.08	12.59	0.63
15:00	17.49	30.38	12.43	0.63
16:00	16.23	29.07	11.55	0.63
17:00	14.96	27.83	10.58	0.63
18:00	19.30	32.06	9.58	6.06
19:00	12.47	25.22	10.38	0.63
20:00	10.44	23.17	9.00	0.63
21:00	12.32	25.26	7.45	0.63
22:00	11.01	23.90	6.52	0.63
23:00	12.15	25.09	6.04	0.63
24:00	12.18	25.14	5.46	0.63

Fonte: Elaborado pela autora.

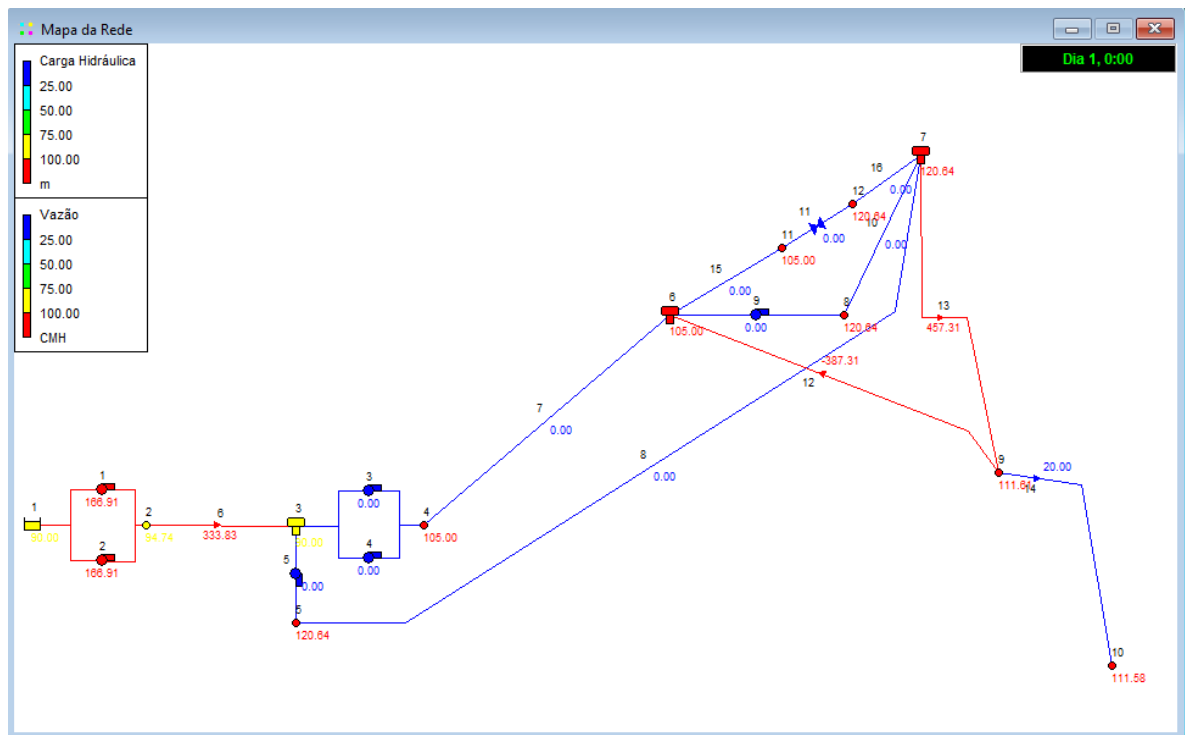
Figura 34 – Balanço de Vazão - Cenário 2: Rendimento das bombas de 70% e tubulação nova.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 35 exibe a execução bem-sucedida da solução obtida pelo *software*, no simulador hidráulico EPANET, juntamente com as informações de carga hidráulica dos nós e a vazão dos trechos no período inicial da simulação.

Figura 35 – Carga Hidráulica e Vazão - Cenário 2: Rendimento das bombas de 70% e tubulação nova.



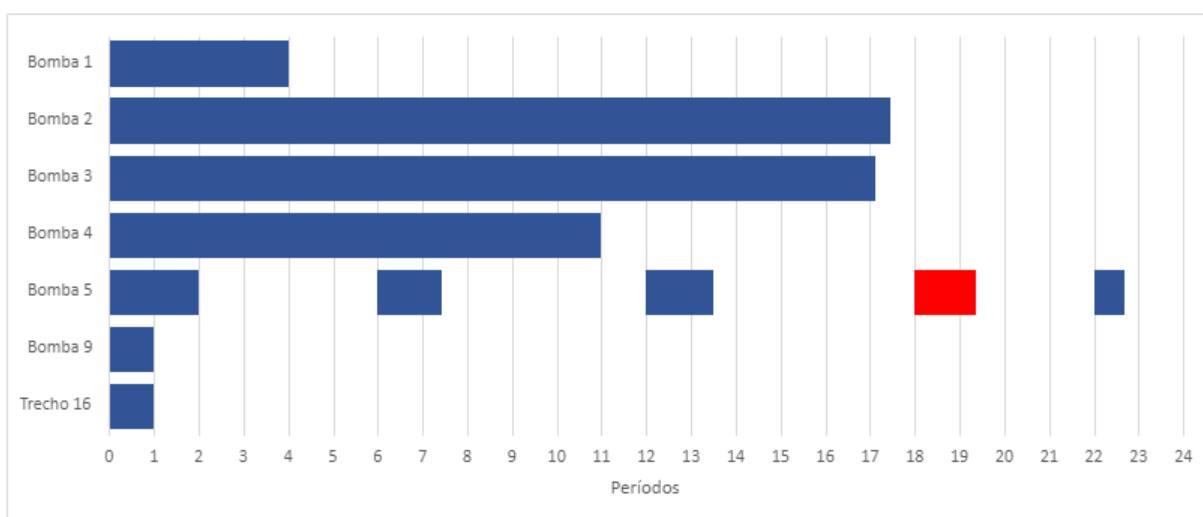
Fonte: Elaborado pela autora.

7.3 Cenário de Simulação 3: Rede de Abastecimento de Água com Tubulação Antiga e Bombas com Rendimento de 60%

Para o terceiro cenário de teste foi considerado que as tubulações do sistema são antigas e o rendimento do conjunto motor-bomba igual a 60%, já para a demanda energética contratada por dia foi determinado o valor de 22.154,00 *kW*.

A Figura 36 ilustra graficamente os períodos em que as bombas operaram, de acordo com a solução dada pelo modelo matemático, foi sinalizado em vermelho os horários de ponta que as bombas permaneceram ligadas.

Figura 36 – Política de operação das bombas da rede - Cenário 3: Rendimento das bombas de 60% com tubulação antiga.



Fonte: Elaborado pela autora.

A solução fornecida pelo programa criado apresentou-se viável, tornando a simulação no EPANET bem-sucedida, destaca-se que o programa não modificou a estrutura física da rede. Entretanto, como no cenário anterior, a bomba 5 funciona durante o período de ponta, elevando os custos energéticos, isso é devido a necessidade de atender as demandas pré-determinadas pelo sistema.

No que se refere aos valores de pressão mínima e máxima dos nós consumidores, os valores obtidos foram de 10,06 e 34,72 *mca*, respectivamente, isso mostra que os valores impostos, de 10 e 50 *mca* foram respeitados. Ademais, as pressões nos reservatórios também ficaram abaixo do limitado, de modo que os níveis de mínimo e máximo foram obedecidos, os dados citados acima foram retirados do relatório do EPANET e dispostos na Tabela 5. Já na Figura 37 é exibido o balanço da vazão captada e consumida.

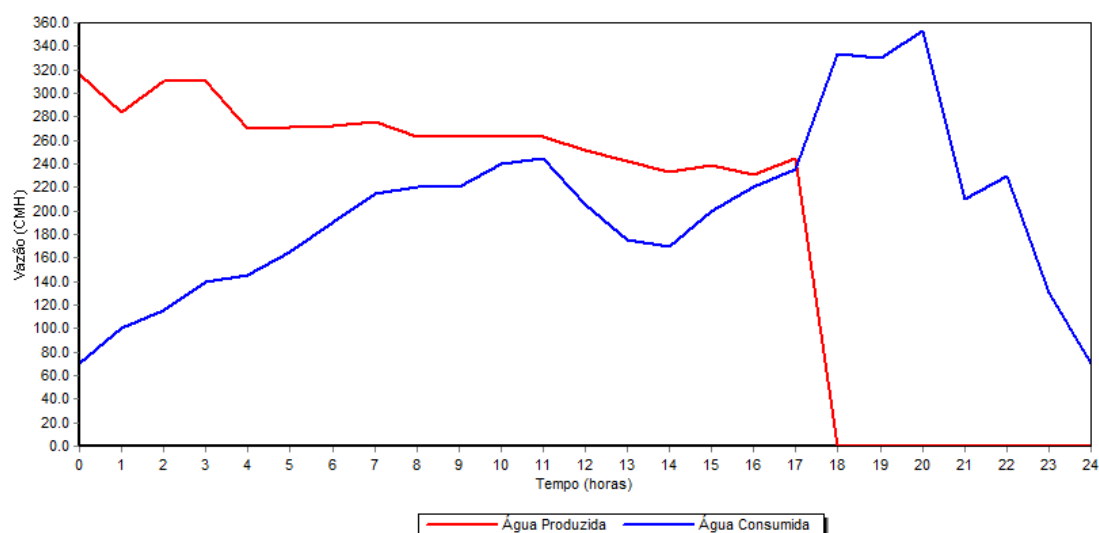
Como resultado, tem-se que a função objetivo obteve R\$ 113.551,48, um valor 4,03% mais baixo se comparado com o fornecido por Parras, que foi de R\$ 118.321,65.

Tabela 5 – Pressão nos nós consumidores e reservatórios - Cenário 3: Rendimento das bombas de 60% com tubulação antiga.

Tempo (horas)	Pressão (m) Nó 9	Pressão (m) Nó 10	Pressão (m) RNV 6	Pressão (m) RNV 7
00:00	18.56	31.53	5.00	m
01:00	13.07	26.03	6.63	0.63
02:00	21.77	34.72	7.76	0.63
03:00	15.37	28.26	9.42	6.26
04:00	16.00	28.86	10.12	0.63
05:00	16.32	29.23	10.75	0.63
06:00	16.37	29.26	11.23	0.63
07:00	20.57	33.49	11.72	0.63
08:00	15.98	28.87	11.43	1.28
09:00	16.19	29.13	11.64	0.63
10:00	15.95	28.84	11.84	0.63
11:00	15.93	28.79	11.92	0.63
12:00	16.32	29.23	11.46	0.63
13:00	16.62	29.57	11.22	0.63
14:00	16.62	29.55	11.13	0.63
15:00	16.03	28.92	11.08	0.63
16:00	15.44	28.28	10.89	0.63
17:00	14.86	27.73	10.64	0.63
18:00	11.33	24.09	9.68	0.63
19:00	18.22	30.96	8.22	0.63
20:00	10.06	22.78	9.04	6.33
21:00	12.24	25.17	7.48	0.63
22:00	10.90	23.79	6.56	0.63
23:00	12.40	25.33	6.32	0.63
24:00	12.45	25.42	5.74	0.63

Fonte: Elaborado pela autora.

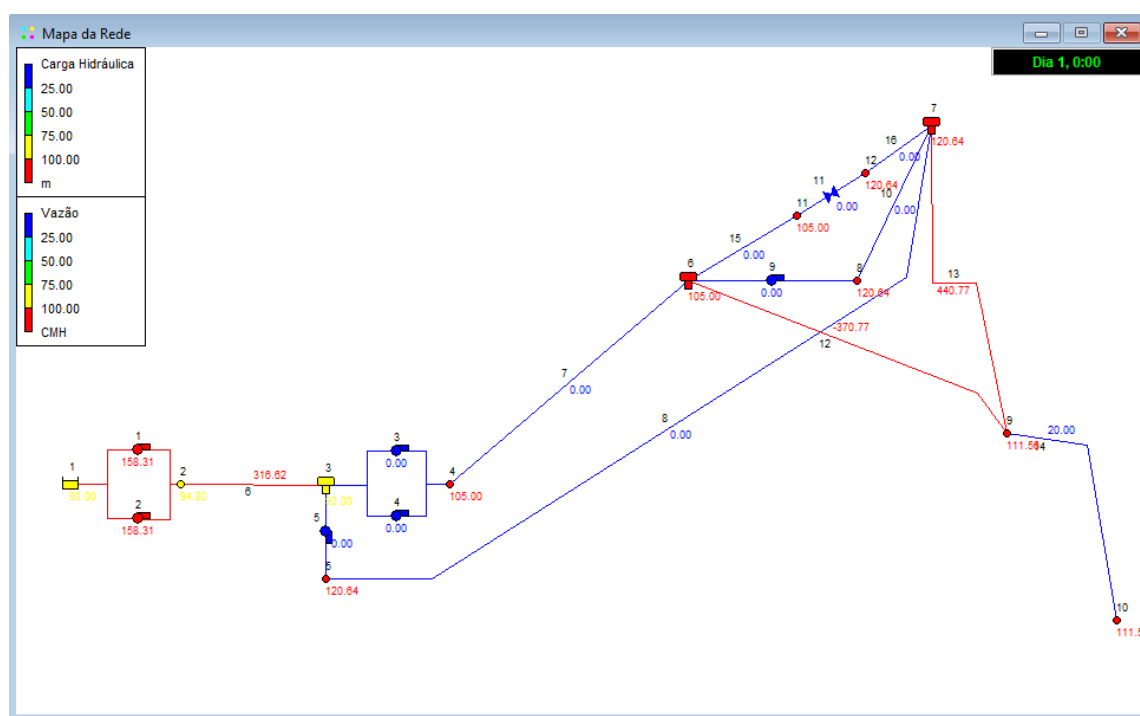
Figura 37 – Balanço de Vazão - Cenário 3: Rendimento das bombas de 60% e tubulação antiga.



Fonte: Elaborado pela autora.

Abaixo, na Figura 38, é mostrada a execução bem-sucedida feita no EPANET, com os resultados obtidos através do *software* secundário. Na figura, é exibida dados sobre a carga hidráulica dos nós e a vazão dos trechos no período inicial da simulação feita.

Figura 38 – Carga Hidráulica e Vazão - Cenário 3: Rendimento das bombas de 60% e tubulação antiga.



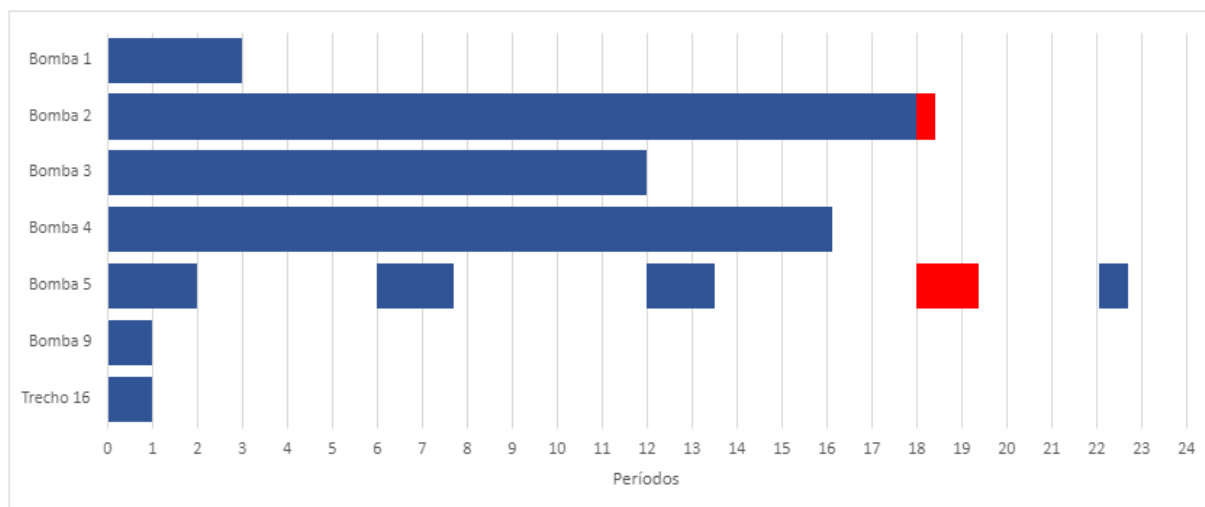
Fonte: Elaborado pela autora.

7.4 Cenário de Simulação 4: Rede de Abastecimento de Água com Tubulação Antiga e Bombas com Rendimento de 70%

No quarto e último cenário de teste, foi considerado que as tubulações do sistema são antigas e o rendimento do conjunto motor-bomba igual a 70%. Para a demanda energética foi estabelecido o mesmo valor proposto por Parras (2020), de 18.989,00 *kW*.

Abaixo, na Figura 39 é apresentado graficamente a programação da operação das bombas hidráulicas do sistema, que foram obtidas a partir da execução do modelo de otimização de Parras. No gráfico, as bombas que operaram no período de ponta foram sinalizadas em vermelho.

Figura 39 – Política de operação das bombas da rede - Cenário 4: Rendimento das bombas de 70% com tubulação antiga.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que, assim como os outros cenários, as bombas 2 e 5 permaneceram ligadas no horário de ponta, de modo a atender a demanda do sistema. No EPANET, a solução obtida foi simulada e executada com sucesso, contudo ao verificar os componentes do sistema notou-se que os trechos 12, 13 e 14 sofreram modificações em seu diâmetro, que antes eram de 290 milímetros, e passaram para 383.

Sabe-se que essa alteração se fez necessária devido à pressão negativa apresentada no decorrer da simulação, como existe uma simulação dentro do *software* secundário (feita através da biblioteca *epanettools*), o erro foi identificado e as mudanças estruturais feitas, para assim uma nova programação da operação das bombas ser obtida, simuladas e apresentada para o usuário final como solução ótima.

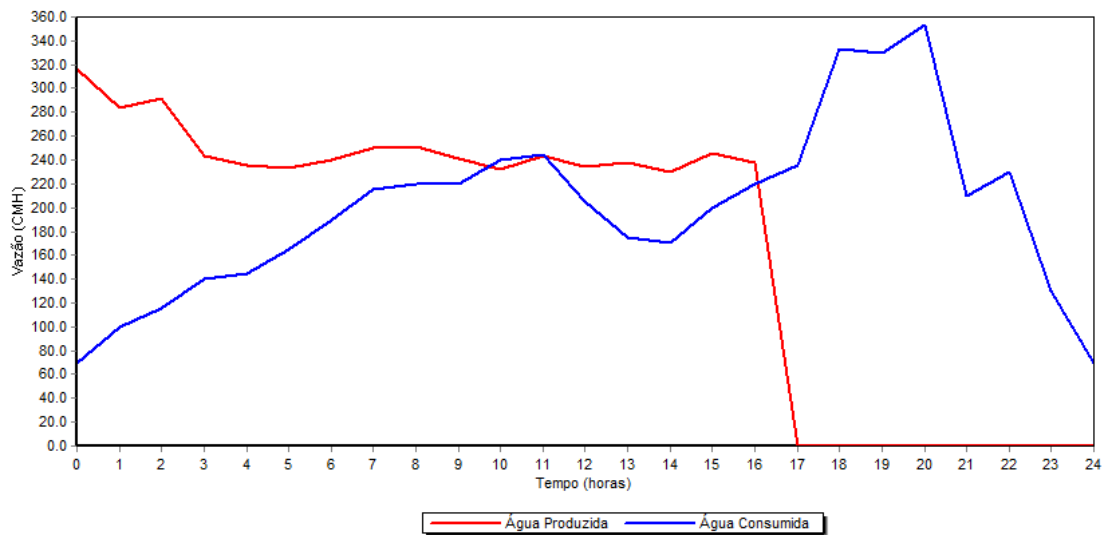
Nesse cenário, as pressões de mínima e máxima variaram entre 12,05 e 36,52 *mca*, respeitando os valores pré-estabelecidos de 10 e 50 *mca*, respectivamente. Assim como os nós, os reservatórios também obtiveram as pressões dentro do esperado, então os níveis de mínimo e máximo foram obedecidos, tais valores foram retirados do relatório de simulação do EPANET e dispostos na Tabela 6. A Figura 40 mostra o balanço da vazão captada e consumida. Por fim, a função objetivo desse cenário foi igual a R\$ 97.330,25, 4,03% mais barato, enquanto o determinado por Parras (2020), foi de R\$ 101.421,00.

Tabela 6 – Pressão nos nós consumidores e reservatórios - Cenário 4: Rendimento das bombas de 70% com tubulação antiga.

Tempo (horas)	Pressão (m) Nó 9	Pressão (m) Nó 10	Pressão (m) RNV 6	Pressão (m) RNV 7
00:00	19.22	32.21	5.00	0.63
01:00	15.42	28.41	8.57	0.63
02:00	23.54	36.52	8.91	6.26
03:00	16.65	29.62	9.92	0.63
04:00	16.75	29.71	10.04	0.63
05:00	16.77	29.75	10.14	0.63
06:00	16.68	29.65	10.15	0.63
07:00	23.27	36.25	10.05	6.31
08:00	18.68	31.66	12.31	0.63
09:00	18.33	31.32	11.96	0.63
10:00	17.91	30.88	11.64	0.63
11:00	17.51	30.47	11.26	0.63
12:00	17.32	30.30	10.86	0.63
13:00	17.27	30.25	10.67	0.63
14:00	17.23	30.21	10.61	0.63
15:00	17.07	30.04	10.59	0.63
16:00	16.79	29.75	10.41	0.63
17:00	15.82	28.79	9.53	0.63
18:00	14.15	27.08	8.49	0.63
19:00	15.05	27.99	9.37	0.63
20:00	13.71	26.64	8.21	0.63
21:00	13.08	26.07	6.65	0.63
22:00	12.05	25.02	5.73	0.63
23:00	12.92	25.90	6.15	0.63
24:00	12.50	25.49	5.58	0.63

Fonte: Elaborado pela autora.

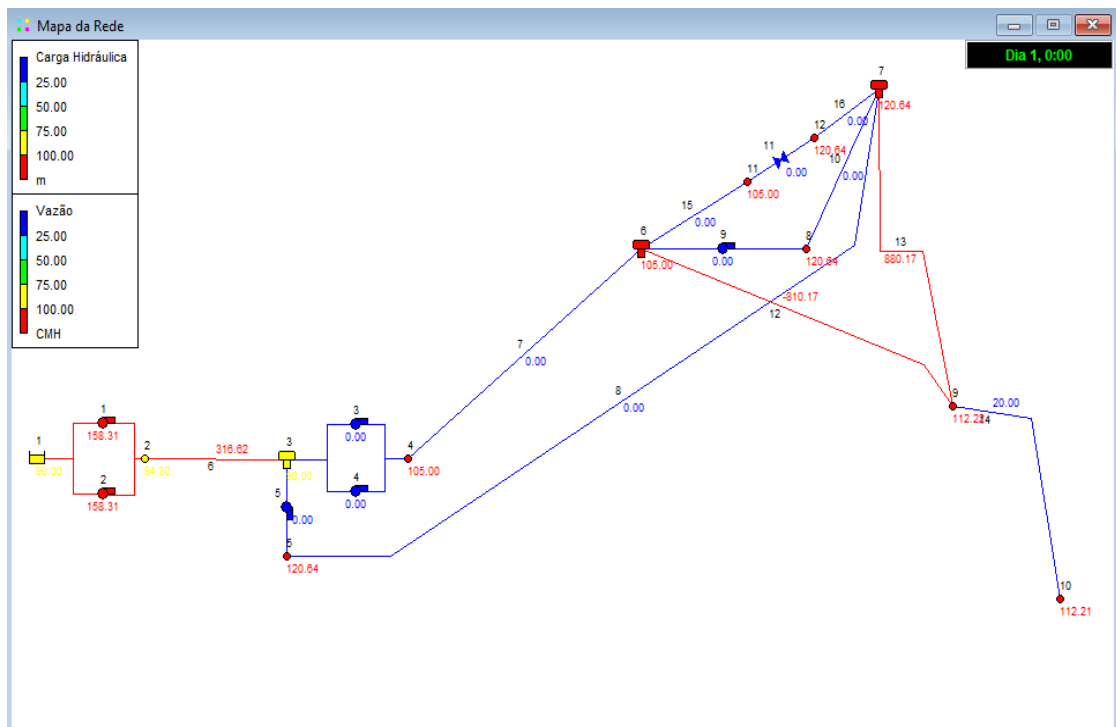
Figura 40 – Balanço de Vazão - Cenário 4: Rendimento das bombas de 70% e tubulação antiga.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 41, é exibida a execução feita no EPANET, ela apresenta informações sobre carga hidráulica dos nós e a vazão dos trechos no período inicial da simulação feita.

Figura 41 – Carga Hidráulica e Vazão - Cenário 4: Rendimento das bombas de 70% e tubulação antiga.



Fonte: Elaborado pela autora.

8 CONCLUSÃO

A água é um recurso indispensável para a população, e para que todos tenham acesso a ela, em qualidade e quantidade, os sistemas de abastecimento de água devem funcionar de modo constante e adequadamente. Nesse tipo de sistema, o mal funcionamento pode gerar altos custos energéticos, devido ao constante funcionamento das bombas hidráulicas, assim como a falta de atendimento das demandas impostas.

Dessa forma, as empresas de saneamento básico procuram otimizar os gastos com energia elétrica, através do planejamento operacional das bombas hidráulicas, sempre respeitando a demanda que deve ser atendida, assim como o bom funcionamento do sistema de abastecimento de água. Para essa finalidade, utilizam-se como ferramentas os modelos e métodos matemáticos de otimização energética e programas computacionais de simulação.

Neste contexto, o presente trabalho apresentou a automatização do processo de verificação da aplicabilidade das soluções obtidas pelo modelo matemático de Parras (2020), de modo a simular, em cenários diferentes, o planejamento da operação das bombas hidráulicas obtidas, e testá-las utilizando o *software* EPANET.

Para isso, foi realizada a implementação computacional de um *software* secundário, utilizando a linguagem de programação Python, que desenvolveu um processo iterativo para verificar a solução dada pelo modelo matemático, de modo a testá-la e modificá-la até obter uma saída ótima, de modo que a simulação no EPANET seja viável.

Em conclusão, as simulações realizadas, utilizando o programa secundário, e em seguida o simulador hidráulico EPANET, mostraram um funcionamento eficiente das redes, de modo que as demandas, em todos os períodos, e os limites físicos dos componentes foram respeitados, assim como a programação da operação das bombas foram obedecidas. Contudo, destaca-se que algumas melhorias na infraestrutura de rede foram realizadas, de modo automatizado, para que as demandas impostas fossem atendidas.

Ademais, destaca-se que trabalhos futuros podem ser realizados, principalmente verificando a viabilidade do *software* secundário desenvolvido, com o propósito de analisar a aplicabilidade de redes de distribuição mais complexas, prever alterações estruturais dos componentes da rede, assim como investigar o uso de outros *solver* comerciais dentro dele.

REFERÊNCIAS

ANNEEL. **Postos Tarifários**. 2015. Disponível em: <<https://antigo.aneel.gov.br/postos-tarifarios>>. Acesso em: 01 Nov. 2022.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 1000**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>>. Acesso em: 05 Dez. 2022.

BAGIROV, Adil M. et al. An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 57, n. 3-4, p. 873-886, 2013.

DE PÁDUA, Valter Lúcio. **Abastecimento de água para consumo humano**. Editora UFMG, 2006.

FACCIOLI, A. R. **Otimização energética em sistemas de abastecimento de água utilizando o EPANET**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru. 2021. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/214923>>. Acesso em: 20 Out. 2022.

GHADDAR, B. et al. A lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks. **European Journal of Operational Research**. Elsevier, v. 241, n. 2, p. 490–501, 2015.

GITHUB. Modelo Computacional de Parras. 2022. Disponível em: <<https://github.com/larissabonadio/modeloComputacionalParras>>. Acesso em: 12 Dez. 2022.

GUIMARÃES, A. J. A.; CARVALHO, D. d.; SILVA, L. d. Saneamento básico. **Rio de Janeiro: UFRJ**, p. 1–3, 2007.

HART, William E. et al. **Pyomo-optimization modeling in python**. Berlin: Springer, 2017.

IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/30/84366?ano=2017>>. Acesso em: 22 Out. 2022.

LIRA, Osman de Oliveira. Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS. 2014.

Ministério da Saúde. **Manual de procedimentos de vigilância em saúde ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano**. 2006. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_procedimentos_agua_consumo_humano.pdf>. Acesso em: 26 Nov. 2022.

Ministério do Planejamento. **Como Analisar Gastos com Energia Elétrica**. 2016. Disponível em: <<https://www.gov.br/compras/pt-br/agente-publico/logistica-publica-sustentavel/materiais-de-apoio/biblioteca-digital/cartilha-energia-como-analisar-gastos-com-energia-eletrica-mpog.pdf>>. Acesso em: 02 Dez. 2022.

NETTO, José Martiniano de A.; FERNÁNDEZ, Miguel Fernández Y. **Manual de hidráulica**. São Paulo: Editora Blucher, 2015. *E-book*. ISBN 9788521208891.

PARRAS, I. G. **Modelo matemático para a otimização energética em sistemas de abastecimento, considerando zonas de pressão e condições estruturais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru. 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/193069>>. Acesso em: 30 Out. 2021.

Python Software Foundation. Documentation Python. 2022. Disponível em: <<https://docs.python.org/3.12/tutorial/index.html>>. Acesso em 20 Dez. 2022.

ROSSMAN, L. A. et al. Manual do Usuário: Epanet 2.0 Brasil. Tradução e Adaptação: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), 2009.

Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Eficiência Energética**. 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/biblioteca/Vol.5GestaodeEnergia.pdf>>. Acesso em: 01 Dez. 2022.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto Visão Geral**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2021.pdf>. Acesso em: 25 Out. 2022.

SOLER, E. M. et al. Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água. **Production, SciELO Brasil**, v. 26, n. 2, p. 385–401, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/157653>>. Acesso em: 21 Out. 2022.

SOUSA, A. C. **Otimização Hidroenergética da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3598>>. Acesso em: 27 Out. 2022.

TOLEDO, F. et al. **Logística de distribuição de água em redes urbanas: racionalização energética. Pesquisa Operacional**. SciELO Brasil, v. 28, n. 1, p. 75–91, 2008.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. São Paulo: Departamento de engenharia hidráulica e sanitária da escola politécnica da Universidade de São Paulo, 3ª Edição. 2006. ISBN 85-900823-6-9.

TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. [S.l.]: ABES, 2001.

US EPA. EPANET Software. Disponível em: <<https://www.epa.gov/water-research/epanet>>. Acesso em: 17 Dez. 2022.