

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Felipe Ronssani Dezotti

**ANÁLISE CRÍTICA DA MODELAGEM HIDRÁULICA DO SISTEMA  
DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SÃO GABRIEL/RS**

Santa Maria, RS  
2023

Felipe Ronssani Dezotti

**ANÁLISE CRÍTICA DA MODELAGEM HIDRÁULICA DO SISTEMA DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SÃO GABRIEL/RS**

Trabalho de Conclusão apresentada ao Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheiro Sanitarista e Ambiental**.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Piccilli.

Santa Maria, RS  
2023

**Felipe Ronssani Dezotti**

**ANÁLISE CRÍTICA DA MODELAGEM HIDRÁULICA DO SISTEMA DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SÃO GABRIEL/RS**

Trabalho de Conclusão apresentada ao Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheiro Sanitarista e Ambiental**.

Aprovado em 10 de março de 2023:

---

**Daniel Gustavo Allasia Picilli, Prof. Dr. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientador)**

---

**Leandro Conceição Pinto, Prof. Dr. (UFSM)**

---

**João Francisco Carlexo Horn, Prof. Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2023

## RESUMO

### ANÁLISE CRÍTICA DA MODELAGEM HIDRÁULICA: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA – SÃO GABRIEL/RS

AUTOR: Felipe Ronssani Dezotti  
ORIENTADOR: Daniel Gustavo Allasia Picilli

A modelagem hidráulica computacional é uma ferramenta poderosa para realizar a simulação do sistema de distribuição de água, pois ela é capaz de processar milhares de linhas de dados e realizar milhares de cálculos para chegar ao equilíbrio hidráulico da rede. Para que seja efetivo o resultado da simulação, é necessário que a elaboração do modelo hidráulico esteja condizente com as reais características das estruturas e as informações da operação. O presente trabalho busca realizar uma análise crítica do modelo hidráulico computacional do sistema de abastecimento de água da São Gabriel Saneamento, responsável pelo abastecimento de água do município de São Gabriel/RS. A simulação foi realizada por Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023b) utilizando o programa EPANET 2.0 e o presente trabalho fez uma avaliação crítica sobre o relatório final referente a elaboração e os resultados obtidos do modelo hidráulico computacional utilizando o programa EPANET 2.2, identificando as divergências nos dados e informações fornecidas para construção do modelo e o que foi efetivamente utilizado e foi realizada uma avaliação quanto ao uso desses dados e informações versando as informações e metodologias utilizadas para elaboração do arquivo de simulação com o que há de informação disponível sobre o assunto. Para isso, foi necessário o levantamento das informações utilizadas no período da simulação, como cadastro da rede de água com material, diâmetro e extensão, acessórios instalados e as configurações de operação, a localização dos reservatórios, suas alturas, volumes, dimensões e nível de água, a localização das estações elevatórias e bombas utilizadas, dados de consumo para cada ligação e localização das ligações na rede de distribuição, dados de medição de vazão e pressão. A abordagem do trabalho será realizada inicialmente comparando os resultados da simulação com os dados reais medidos e posteriormente identificando o que pode ser alterado para estar de acordo com as recomendações da literatura e melhorar a calibração do modelo hidráulico.

**Palavras-chave:** Modelagem Hidráulica. Sistema de Abastecimento de Água. EPANET.

## **ABSTRACT**

### **HYDRAULIC MODELING CRITICAL ANALYSIS: WATER DISTRIBUTION SYSTEM – SÃO GABRIEL/RS**

**AUTHOR:** Felipe Ronssani Dezotti  
**ADVISOR:** Daniel Gustavo Allasia Picilli

Computational hydraulic modeling is a powerful tool for simulating the water distribution system, it is capable of processing thousands of lines of data and making thousands of calculations to reach the hydraulic balance of the network. For the simulation result to be effective, the development of the hydraulic model must be consistent with the real structures characteristics and operations information. This study aims to conduct a critical analysis of the computational hydraulic model of the São Gabriel Saneamento's water supply system, responsible for water supply in the city of São Gabriel/RS. The simulation was done by Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023b) using the EPANET 2.0 program and the present work made a critical evaluation of the final report referring to the elaboration and results obtained from the computational hydraulic model using the EPANET 2.2, identifying the divergences in the data and the information provided for the construction of the model and what was actually used and an evaluation was carried out regarding the use of these data and information, comparing with the information and methodologies used to produce the simulation file with the information that is available on the subject. It was necessary to gather information used during the simulation period, such as the water network registry with material, diameter and extension, installed accessories and operation configurations, the location of reservoirs, their heights, volumes, dimensions, and water level, the location of lift stations and pumps used, consumption data for each connection, and the location of connections in the distribution network, flow and pressure measurement data. The work approach will be carried out initially by comparing the simulation results with the actual measured data and later identifying what can be changed to comply with the literature recommendations and improve the calibration of the hydraulic model.

**Keywords:** Hydraulic Modeling. Water distribution system. EPANET.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Curva de demanda de água anual .....	18
FIGURA 2 – Curva de demanda de água diária .....	19
FIGURA 3 – Curvas características de uma bomba .....	26
FIGURA 4 – Croqui reservatório do tipo Intze .....	28
FIGURA 5 – Curva de volume de água armazenada para diferentes tipos reservatórios .....	28
FIGURA 6 – Reservatório de montante .....	29
FIGURA 7 – Reservatório de jusante .....	30
FIGURA 8 – Reservatório intermediário .....	30
FIGURA 9 – Painel de edição dos nós .....	36
FIGURA 10 – Painel de edição de RNV .....	37
FIGURA 11 – Painel de edição de trechos .....	38
FIGURA 12 – Painel de edição de válvulas .....	39
FIGURA 13 – Painel de edição de bombas .....	41
FIGURA 14 – Curva altura-vazão de um ponto .....	42
FIGURA 15 – Curva altura-vazão de três pontos .....	43
FIGURA 16 – Curva de volume de um reservatório .....	43
FIGURA 17 – Localização de São Gabriel .....	45
FIGURA 18 – Esquema de abastecimento da saída da ETA .....	47
FIGURA 19 – Setores de Abastecimento .....	47
FIGURA 20 – Mapa hipsométrico do município .....	48
FIGURA 21 – Localização e zona de abastecimento dos <i>boosters</i> .....	49
FIGURA 22 – Associação FT para cada adutora. ....	50
FIGURA 23 – Localização dos PTs .....	51
FIGURA 24 – Cadastro técnico do sistema de distribuição de água .....	54
FIGURA 25 – Enchimentos dos reservatórios em um período de 24 hora .....	56
FIGURA 26 – Frequência de operação dos motores .....	57
FIGURA 27 – Localização dos sensores FT. ....	58
FIGURA 28 – Gráfico das vazões instantâneas por sensor .....	59
FIGURA 29 – Gráfico PT 15 e PT16 .....	60
FIGURA 30 – Erro calculado entre o padrão de demanda Centro e Gabrielense .....	62
FIGURA 31 – Comparação traçado da adutora real versus simulado .....	65
FIGURA 32 – Conexão da adutora afetada .....	66

FIGURA 33 – Comparação vazão simulada versus vazão medida FT-02 e FT-03. ....	70
FIGURA 34- Comparação vazão simulada versus medida FT-04 .....	70
FIGURA 35 – Calibração do reservatório fictício de R-01 e R-02.....	71
FIGURA 36 – Calibração reservatório R-10.....	72
FIGURA 37 – Calibração PT 16 .....	73
FIGURA 38 – Calibração PT 15 .....	74
FIGURA 39 – Gráfico pressão no PT1 .....	85
FIGURA 40 – Gráfico pressão no PT2 .....	85
FIGURA 41 – Gráfico pressão no PT3 .....	86
FIGURA 42 – Gráfico pressão no PT4 .....	86
FIGURA 43 – Gráfico pressão no PT5 .....	87
FIGURA 44 – Gráfico pressão no PT6 .....	87
FIGURA 45 – Gráfico pressão no PT7 .....	88
FIGURA 46 – Gráfico pressão no PT8 .....	88
FIGURA 47 – Gráfico pressão no PT9 .....	89
FIGURA 48 – Gráfico pressão no PT10 .....	89
FIGURA 49 – Gráfico pressão no PT11 .....	90
FIGURA 50 – Gráfico pressão no PT12 .....	90
FIGURA 51 – Gráfico pressão no PT13 .....	91
FIGURA 52 – Gráfico pressão no PT14 .....	91
FIGURA 53 – Gráfico pressão no PT15 .....	92
FIGURA 54 – Gráfico pressão no PT16 .....	92
FIGURA 55 – Gráfico pressão no PT 17 .....	93
FIGURA 56 – Gráfico pressão no PT18 .....	93
FIGURA 57 – Gráfico pressão no PT19 .....	94
FIGURA 58 – Gráfico pressão no PT20 .....	94
FIGURA 59 – Calibração R-01 e R-02 .....	95
FIGURA 60 – Calibração R-04.....	95
FIGURA 61 – Calibração R-05 .....	96
FIGURA 62 – Calibração R-06.....	96
FIGURA 63 – Calibração R-08.....	97
FIGURA 64 – Calibração R-09.....	97
FIGURA 65 – Calibração R-10.....	98
FIGURA 66 – Calibração PT-01 .....	99

FIGURA 67 – Calibração PT-02 .....	99
FIGURA 68 – Calibração PT-03 .....	100
FIGURA 69 – Calibração PT-04 .....	100
FIGURA 70 – Calibração PT-05 .....	101
FIGURA 71 – Calibração PT-06 .....	101
FIGURA 72 – Calibração PT-07 .....	102
FIGURA 73 – Calibração PT-08 .....	102
FIGURA 74 – Calibração PT-09 .....	103
FIGURA 75 – Calibração PT-10 .....	103
FIGURA 76 – Calibração PT-11 .....	104
FIGURA 77 – Calibração PT-12 .....	104
FIGURA 78 – Calibração PT-13 .....	105
FIGURA 79 – Calibração PT-14 .....	105
FIGURA 80 – Calibração PT-15 .....	106
FIGURA 81 – Calibração PT-16 .....	106
FIGURA 82 – Calibração PT-17 .....	107
FIGURA 83 – Calibração PT-18 .....	107
FIGURA 84 – Calibração PT-19 .....	107
FIGURA 85 – Calibração PT-20 .....	108

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Consumo diária de água estimado .....	16
QUADRO 2 – Coeficiente C por material de tubulação .....	23
QUADRO 3 – Coeficiente de perda de carga localizada para algumas peças .....	25
QUADRO 4 – Resumo das informações dos reservatórios.....	55
QUADRO 5 – Bombas instaladas no sistema de abastecimento de água .....	57
QUADRO 6 – Calibração da vazão.....	71
QUADRO 7 – Calibração dos reservatórios.....	73
QUADRO 8 – Calibração dos PT.....	75
QUADRO 10 – Grau de enchimento dos reservatórios .....	83

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associações Brasileira de Normal Técnicas
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
EEAT	Estação elevatória de água tratada
ETA	Estação de tratamento de água
FT	<i>Flow telemetry</i>
MDE	Modelo digital de elevação
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento
PT	<i>Pressure telemetry</i>
RDA	Rede de distribuição de água
RNF	Reservatório de nível fixo
RNV	Reservatório de nível variado
SAA	Sistema de abastecimento de água
SI	Sistema Internacional de Unidades
SNIS	Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento
VRP	Válvula redutora de pressão

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta h$	Perda de carga
A	Área
C	Coefficiente de rugosidade de Hazen-Williams
Cd	Coefficiente de descarga
cv	Cavalo vapor
D	Diâmetro
f	fator de atrito de Darcy
g	Aceleração da gravidade
Hm	Altura manométrica
J	Perda de carga linear
K	Coefficiente de rugosidade
K1	Coefficiente da hora de maior consumo
K2	Coefficiente do dia de maior consumo
kPa	Quilo Pascal
L/hab/dia	Litros por habitante por dia
L/s	Litros por segundo
m.c.a	Metros de coluna de água
N	Potência
NPSH	Net Positive Suction Head
P	Pressão
Q	Vazão
$\rho$	Massa específico do fluido
RPM	Rotações por minuto
v	Velocidade
Vmacromedido	Volume macromedido
Vmicromedido	Volume micromedido
$\gamma$	Peso específico do fluido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVO .....	15
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1	DEMANDA DE ÁGUA.....	16
<b>2.1.1</b>	<b>Consumo.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Perdas de água na distribuição.....</b>	<b>19</b>
2.2	SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA .....	20
<b>2.2.1</b>	<b>Rede de distribuição de água.....</b>	<b>21</b>
2.2.1.1	Pressão na rede .....	22
2.2.1.2	Perda de carga.....	22
<b>2.2.2</b>	<b>Estação elevatória.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Reservatório.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Peças acessórios.....</b>	<b>31</b>
2.2.4.1	Válvulas .....	31
2.2.4.2	Medidores .....	32
2.3	PLANIALTIMETRIA .....	32
2.4	MODELAGEM HIDRÁULICA .....	33
<b>2.4.1</b>	<b>Conceito.....</b>	<b>33</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Aplicações.....</b>	<b>33</b>
<b>2.4.3</b>	<b>EPANET.....</b>	<b>34</b>
2.4.3.1	Dados físicos.....	35
2.4.3.2	Nós.....	36
2.4.3.3	Trechos .....	38
2.4.3.4	Dados não físicos.....	41
2.4.3.5	Padrões.....	41
2.4.3.6	Curvas.....	42
2.4.3.7	Controles.....	44
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>45</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	45
3.2	SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ESTUDADO .....	46

<b>3.2.1</b>	<b>Modo de operação.....</b>	<b>46</b>
3.3	MÉTODO .....	52
<b>3.3.1</b>	<b>Informações e Dados da Operação do Sistema de Distribuição de Água.....</b>	<b>53</b>
3.3.1.1	Demanda de água.....	53
3.3.1.2	Cadastro técnico.....	53
3.3.1.3	Reservatórios .....	54
3.3.1.4	Bombas .....	56
3.3.1.5	Medições de campo .....	58
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
4.1	INCOSISTÊNCIAS E ANÁLISE CRÍTICA .....	61
<b>4.1.1</b>	<b>Demandas .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Rede de distribuição .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Reservatórios.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Estações elevatórias .....</b>	<b>68</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Calibração .....</b>	<b>69</b>
4.2	RESULTADO DO MODELO HIDRÁULICO.....	69
<b>4.2.1</b>	<b>Vazão.....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Reservatórios.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Pressão .....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE A – NÍVEL DE ÁGUA DOS RESERVÓRIOS .....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE B – PRESSÃO NOS PTS.....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE C – CALIBRAÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA DOS RESERVATÓRIOS .....</b>	<b>95</b>
	<b>APÊNDICE D – CALIBRAÇÃO DOS PTS .....</b>	<b>99</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das cidades requer ampliação dos sistemas de abastecimento de água, conforme determina o Art. 11-B da Lei nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020), conhecida como o Novo Marco Legal do Saneamento Básico,

Os contratos de prestação dos serviços públicos de saneamento básico deverão definir metas de universalização que garantam o atendimento de 99% da população com água potável e de 90% (noventa por cento) da população com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033 [...].

Analisando a situação atual em que o Brasil se encontra, conforme dados do Sistema Nacional do Desenvolvimento sobre Saneamento -SNIS (2021), tem-se que esse possui índice de abastecimento de água de 84,2%, 14,8% abaixo do exigido, ou seja, 34,2 milhões de brasileiros não possuem acesso a água, o que corresponde a aproximadamente 3 vezes a população do Rio Grande do Sul (IBGE, 2021).

Diante desta informação, entende-se que existirá uma demanda grande por ferramentas e profissionais, inicialmente para o projeto e execução, e, posteriormente, para operar esses sistemas de abastecimento. Uma das ferramentas existentes são os modelos hidráulicos, que buscam representar o funcionamento de uma rede de distribuição em meio digital. Eles permitem, entre outras opções, a representação do controle do escoamento da água nas tubulações, pressões, demandas de água, níveis de reservatórios, funcionamento de bombas, consumo de energia e válvulas, além de equacionar o transporte, mistura e transformações de algumas substâncias químicas no interior das redes e reservatórios (COELHO, LOUREIRO e ALEGRE, 2006)

Conforme Pereira, Sales e Medeiros (2018), a modelagem hidráulica de sistemas de abastecimentos de água (SAA) pode ser utilizada como instrumento para buscar soluções operacionais e de infraestrutura e para compreender esses sistemas bem como diagnosticar problemas que estejam acarretando nas deficiências operacionais. Ainda conclui que a modelagem hidráulica possibilita agilidade para realizar análises críticas e salienta ser indispensável na gestão e planejamento de um sistema de abastecimento de água.

Nesse sentido, a empresa São Gabriel Saneamento, concessionária responsável pelo abastecimento de água e esgotamento sanitário no Município de São Gabriel/RS, buscou uma representação virtualizada do seu sistema de distribuição de água, por meio da modelagem hidráulica, com o objetivo de verificar a viabilidade técnica de intervenções a serem executadas

no sistema, onde o foco principal da utilização do modelo hidráulico era a determinação da viabilidade técnica para a execução da setorização do sistema de distribuição de água do Município (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022e).

Seguindo esta linha, o tema proposto trata-se da análise da modelagem hidráulica do diagnóstico do sistema de distribuição de água, realizada por meio do software EPANET 2.0 pela empresa Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a) para a empresa São Gabriel Saneamento, com o objetivo de identificar inconsistências entre os dados e informações disponibilizados e utilizados pela empresa para realizar a elaboração do modelo hidráulico e então analisar criticamente essas inconsistências versando com as informações presentes na literatura do tema para elencar sugestões que possam aperfeiçoar o modelo hidráulico existente.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo geral

Realizar uma análise crítica do relatório de elaboração e resultados do modelo hidráulico computacional do sistema de abastecimento de água de São Gabriel/RS realizado pela Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023b) e identificar informações e configurações dos componentes físicos e não físicos do modelo que possam ser aprimorados.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar criticamente o relatório e o modelo hidráulico computacional entregue pela Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a e 2023b) e identificar inconsistências entre os dados de operação do sistema de distribuição de água e as informações referentes as unidades operacionais que foram disponibilizados para elaboração do modelo hidráulico e os dados e informações que utilizados;
- Pontuar recomendações sobre as inconsistências identificadas na análise crítica que possam ser pertinentes para a melhoria nos resultados da simulação, alcançando maior precisão e coerência na calibração do modelo hidráulico;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DEMANDA DE ÁGUA

A importância da água é indiscutível, é um recurso renovável, entretanto finito e escasso em algumas regiões e, conseqüentemente, com o crescimento populacional ao longo dos anos houve um aumento da demanda do seu uso (LUNARDI, J.; RABAIOLLI, J. A., 2013)

#### 2.1.1 Consumo

O consumo de água é relativo de acordo com as necessidades básicas, disponibilidade do recurso, características culturais. Esse é o caso do Brasil, que devido a sua grande extensão territorial desenvolve uma população heterogênea com costumes variados, tornando esta quantificação mais difícil de ser realizada (HAFNER, 2007).

O consumo pode ser dividido em seis tipos: doméstico, comercial, industrial, público, especial e perdas e desperdícios. A utilização da água por cada tipo varia conforme clima, padrão de vida, hábitos, sistema de cobrança, qualidade da água, custo da tarifa, setor do comércio, setor da indústria, saúde, estado de conservação da rede de distribuição, entre outros fatores (AZEVEDO NETO *et al.*, 1998).

Por meio da base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) pode-se observar alguns dados referentes ao Brasil. Segundo os indicadores do ano de 2021, o consumo per capita médio do país foi de 150,66 L/hab./dia, já para o Rio Grande do Sul não há grande discrepância, estando acima da média do país em 1 L/hab./dia. O município de São Gabriel por outro lado, apresenta um forte desvio da média estadual, possuindo apenas um consumo per capita de aproximadamente 135 L/hab./dia (SNIS, 2021).

Segundo Macintyre (2010), o consumo per capita de água para residências pode variar de 120 L/hab./dia até 400 L/hab./dia. Seguindo a linha apresentada por Macintyre, residências de médio valor consomem 150 L/hab./dia, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Consumo diária de água estimado

(continua)

<b>Tipo de prédio</b>	<b>Unidade</b>	<b>Consumo L/dia</b>
Apartamentos	Per capita	200
Apartamentos de luxo	Per capita	300 a 400
Residência de luxo	Per capita	300 a 400

Quadro 1 – Consumo diária de água estimado

(conclusão)

Residência de médio valor	Per capita	150
Residência popular	Per capita	120 a 150

Fonte: Adaptado de Macintyre (2010).

Azevedo Netto *et al.* (1998) explica que em um sistema de abastecimento público de água a vazão varia constantemente, especialmente em função do clima, por exemplo, onde países tropicais historicamente apresentam maior consumo de água no verão. Ainda explicita a variação do consumo de água em função do horário do dia, em que no período noturno a vazão fica abaixo da média diária, enquanto que próximo ao meio dia as vazões máximas são atingidas. Essas variações no consumo ocorrem em diferentes escalas temporais, desde períodos anuais, mensais, diários e instantâneos.

O autor ainda exemplifica dois casos peculiares:

- Os dias de menor consumo, no período de um ano, foram nos domingos chuvosos após períodos de chuvas consecutivas;
- Os dias de maior consumo, no período de um ano, ocorrem nos dias após longos períodos sem chuva e que coincidem com elevações de temperatura.

As variações temporais de vazão são conhecidas há bastante tempo e é necessário levá-las em consideração na concepção de um SAA. Tsutiya (2006) estabelece alguns critérios e parâmetros de projeto para tal, sendo um desses critérios os coeficientes de variações de vazão K1 e K2. O coeficiente K1 é representado pela relação entre o volume consumido no dia de maior consumo no ano e o volume médio diário consumido no ano e é calculado pela Equação ( 1 ).

$$K_1 = \frac{\text{maior consumo diário no ano}}{\text{consumo médio diário no ano}} \quad (1)$$

O coeficiente K2 representa a relação entre a maior vazão no período de uma hora e a vazão média do dia de maior consumo. É calculado pela ( 2 ).

$$K_2 = \frac{\text{maior consumo horário}}{\text{consumo médio diário}} \quad (2)$$

A ABNT/NBR 12.211 (1992) determina que K1 e K2 devem ser calculados com dados reais da operação, porém nem sempre é possível ter esse controle, então a ABNT/NBR 9649 (1986) estipula valores de K1 e K2 que podem ser utilizados como parâmetro de projeto, sendo eles  $K1 = 1,2$  e  $K2 = 1,5$ .

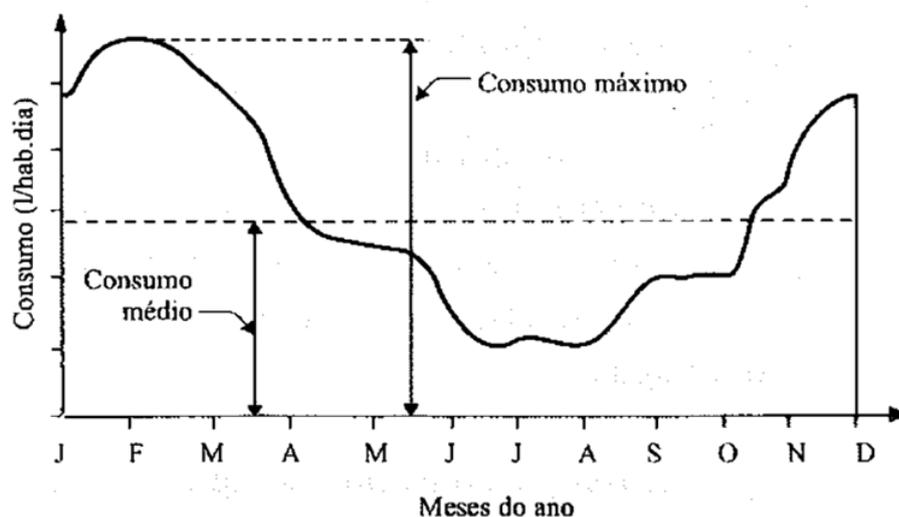
Azevedo Netto *et al.* (1998) recomenda valores do coeficiente K1 entre 1,1 e 1,4 e valores do coeficiente K2 entre 1,5 e 2,3. Ainda, complementa indicando que as menores variações dos valores de K1 acontecem em cidades com pouca variação climática e que os maiores valores de K2 acontecem em cidades onde as residências possuem baixa ou nenhuma incidência de reservatórios internos.

Essas mesma variações representadas por K1 e K2, podem ser determinadas para todas as 24 horas do dia ou para todos os dias de um ano. Desta forma pode ser plotado um gráfico contendo a curva de demanda ao longo de um dia ou ao longo de um ano.

Exemplos de curvas de demanda anual e diárias são apresentadas nas Figura 1 e Figura 2.

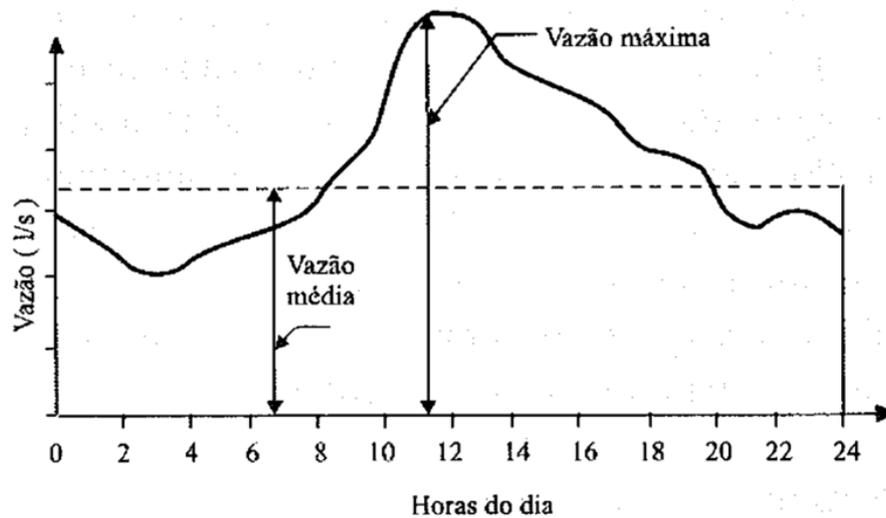
Tsutiya (2006) realizou um estudo para a Região Metropolitana de São Paulo, onde foram analisados 3,5 anos de dados de 22 setores de abastecimento distintos, onde foram obtidas as curvas de consumo de cada setor, e afirma que as menores vazões acontecem próximo as 3h, a vazão máxima ocorre próximo das 12h e a vazão média entre 7h-8h e 18h-23h. Ainda, salienta que nos setores analisados, onde há maior participação de unidades comerciais, as vazões máximas foram cerca de 15% mais baixas nos finais de semana.

Figura 1 – Curva de demanda de água anual



Fonte: Tsutiya (2006).

Figura 2 – Curva de demanda de água diária



Fonte: Tsutiya (2006)

### 2.1.2 Perdas de água na distribuição

Quando tratamos de perdas em um sistema público de distribuição de água, elas são identificadas em dois tipos, as perdas reais, que correspondem ao volume de água de vazamentos na rede de distribuição, seja por rompimentos, manutenção, expurgo, fissuras e folgas e extravasamento de reservatórios, e as perdas aparentes, que estão relacionadas à falha de contabilização no consumo, ou seja, erro de medição, onde incluem fraudes, ligações clandestinas e falhas de cadastro comercial (TSUTIYA, 2006).

A diferença dos tipos de perda está no impacto para a concessionária. Enquanto a perda real representa desperdício de um produto, e seus custos inerentes, ela também reduz a vazão da rede para as pontas secas e reduz a pressão. Já as perdas aparentes representam a perda de faturamento pela empresa (TSUTIYA, 2006).

De certa forma, o impacto para o sistema de distribuição, sem que haja possibilidade de compensação, ocorre devido as perdas reais, uma vez que é considerada como desperdício. As perdas reais podem ser determinadas a partir da diferença do volume macromedido e micromedido, isto é, o volume medido na saída de reservatórios, estações elevatórias ou ETA e os volumes medidos nos pontos de entrega de água.

A partir desses volumes, é possível determinar o índice de perdas conforme segue Equação ( 3 ):

$$\text{Índice de perdas} = \frac{V_{\text{macromedido}} - V_{\text{micromedido}}}{V_{\text{macromedido}}}. \quad (3)$$

Dentre as prováveis causas das perdas reais, a mais difícil de ser detectada são os vazamentos provenientes de fissuras ou folgas nas tubulações e peças, uma vez que esses podem ser classificados como perdas não visíveis, como o nome indica, não é simples detectar sua ocorrência e localização (TSUTIYA, 2006)

Heller (2010) explica que a pressão é o fator mais importante quando se analisa as perdas de água, por possuírem forte influência na operação do sistema. Considerando que os vazamentos que ocorrem nas tubulações podem ser generalizados como orifícios de pequenas dimensões, podemos estimar as vazões por meio da equação de descarga de orifícios dada pela (4.

$$Q = Cd.A.(2gP)^{0,5} \quad (4)$$

Sendo:

Q = Vazão em m<sup>3</sup>/s

Cd = Coeficiente de descarga, adimensional

A = Área, em m<sup>2</sup>

g = aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>

P = pressão, em m.c.a

O coeficiente de descarga Cd = 0,5 leva em consideração que o orifício possui abertura fixa, porém quando considera-se tubos de PVC, material flexível e utilizado com frequência em sistemas de abastecimento de água, quando se aumenta a pressão no interior da tubulação, o diâmetro expande e, conseqüentemente, o tamanho do orifício torna-se maior. Desta forma, o coeficiente exponencial se torna variável, apresentando valores na faixa de 0,5 a 2,5 (HELLER, 2010).

## 2.2 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Azevedo Netto *et al.* (1998) descreve o sistema de abastecimento de água como um conjunto de obras de engenharia, equipamentos e serviços com o objetivo de fornecer água potável para uma comunidade. No Brasil, o aumento de redes de abastecimento de água ocorreu entre 1970 e 1980 devido a implantação do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), o qual

proporcionou o atendimento de água potável para cerca de 90% da população urbana (TSUTIYA, 2006).

O SAA pode sofrer alterações conforme as características do local analisado, principalmente topografia, população atendida e manancial (TSUTIYA, 2006). A ABNT/NBR 12.586 (1992) descreve o SAA como um conjunto de canalizações, instalações e equipamentos com o objetivo de captar, tratar, reservar e distribuir água, mas pode-se expandir a descrição nas seguintes partes de acordo com Tsutiya (2006):

- Manancial: corpo d'água, podendo ser subterrâneo ou superficial, onde é retirada o recurso para o abastecimento, deve fornecer quantidade e qualidade conforme projeto;

- Captação: conjunto de equipamentos e estruturas para a retirada de água;

- Estação Elevatória: conjunto de estruturas com o objetivo de favorecer o recalque do fluido com o intuito de elevar o nível e compensar as perdas de carga;

- Adutora: Canalização principal, responsável por transportar a água da captação para a Estação de Tratamento de Água, desta para o reservatório ou rede de distribuição.

- Estação de Tratamento de Água: Conjunto de estruturas com o objetivo de melhorar as características física, química e biológica da água captada para que possa ser consumida.

- Reservatório: Conjunto de estruturas com o objetivo de armazenar a água após o tratamento, amortizar as flutuações cíclicas e sazonais de consumo, além de garantir a regularidade das pressões.

- Rede de distribuição: conjunto de canalizações com o objetivo de transportar a água do reservatório ou adutora para os ramais prediais. As redes de distribuição serão descritas em maiores detalhes no tópico 2.2.1.

### **2.2.1 Rede de distribuição de água**

Conforme a ABNT/NBR 12.218 (1994) a rede de distribuição de água é parte do SAA, formada por tubulações, peças e acessórios que transportam a água potável para os consumidores. A rede é constituída por tubulações, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável. Os principais parâmetros que são utilizados para caracterizar o correto funcionamento da rede de distribuição de água são as perdas de água do sistema, perdas de carga, e as vazões e pressões nos diferentes pontos da rede.

### 2.2.1.1 Pressão na rede

Para a realização do dimensionamento das redes de distribuição é necessário que seja considerado a pressão dinâmica mínima e pressão estática máxima, sendo a primeira necessária para fazer com que a água chegue ao seu destino e a segunda preservar a tubulação contra possíveis vazamentos e rompimentos da rede (PADOVANI, 2019).

Segundo a ABNT/NBR 12218 (2017), a pressão estática máxima deve ser 400 kPa, ou 40 metros de coluna de água (m.c.a), podendo chegar em 500 kPa, ou 50 m.c.a, em regiões com topografia acidentada, e a pressão dinâmica mínima é de 100 kPa, ou 10 m.c.a, entretanto, sugere-se que sempre que possível as pressões devem ficar entre 250 e 300 kPa, com o objetivo de reduzir perdas reais. A NBR também descreve que os valores acima da máxima e abaixo da mínima podem ser aceitas, desde que justificados tecnicamente ou economicamente.

### 2.2.1.2 Perda de carga

Segundo Macintyre (2010), a perda de carga é a energia que o fluido perde ao escoar por um tubo e ela resulta do atrito do fluido com as paredes internas das tubulações e do atrito interno do líquido, representada pela sua viscosidade, e da resistência ao escoamento em função da rugosidade do tubo e de alterações de sentido e direção. Azevedo Netto *et al.* (1998) explica que a dificuldade de encontrar uma solução analítica para a perda de carga levou pesquisadores a elaborar fórmulas empíricas baseadas nas conclusões de experimentos realizados, sendo a perda de carga:

- a) diretamente proporcional ao comprimento da tubulação;
- b) inversamente proporcional a uma potência do diâmetro;
- c) função de uma potência da velocidade média;
- d) variável com a rugosidade dos tubos;
- e) independente da posição do tubo;
- f) independente da pressão interna;
- g) função de uma potência da relação entre viscosidade e a densidade do fluido.

Sendo ela classificada em dos tipos: a localizada e a distribuída.

Assim, pode-se afirmar que qualquer alteração no diâmetro e na parede interna do tubo terão influência na perda de carga. Fato que pode ocorrer pela deposição de substâncias nas paredes, corrosão do material ou a tuberculização que ocorrem com o passar do tempo (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

Existem diversas equações para o cálculo da perda de carga distribuída como cita Azevedo Netto *et al.* (1998) as fórmulas de Darcy, Levt-Vallot, Manning, Flamant, Biegeleisen-Bukowsky, Lawford, Scobey, Fair-Whipple-Hsiao e Hazen-Williams.

O método mais utilizado na engenharia sanitária americana para calcular a perda de carga nas tubulações é através da fórmula de Hazen-Williams (Equação (5)) (PORTO, 2006). A fórmula de Hazen-Williams é empírica e é fruto do estudo estatístico de milhares de experimentos de mais de trinta pesquisadores, que resultou na criação do coeficiente C de rugosidade, o qual é quase que uma função exclusiva da natureza das paredes (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

$$J = 10,643 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (5)$$

Sendo:

J = Perda de carga linear, em m.c.a/m;

Q = Vazão do escoamento, em m/s;

C = Coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams, adimensional;

D = Diâmetro, em m.

A grande adesão da fórmula de Hazen-Williams desencadeou uma série de estudos para a determinação do coeficiente C para diversos materiais, diâmetros e idade de condutos.

Recomenda-se a utilização da fórmula de Hazen-Williams em sistemas de tubulações com diâmetro maiores que 50 mm (2") e velocidades de até 3 m/s (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998), fator muito positivo para a engenharia no Brasil, visto que a ABNT/NBR 12.218 (1994) determina que o diâmetro mínimo para rede de abastecimento público de água seja de 50 mm e a velocidades de até 3,5 m/s, apesar de recomendar a utilização de outra fórmula para o cálculo da perda de carga.

O Quadro 2 apresenta o coeficiente de rugosidade C para alguns materiais.

Quadro 2 – Coeficiente C por material de tubulação

(continua)

<b>Tubos</b>	<b>Novos</b>	<b>Usados ± 10 anos</b>	<b>Usado ± 15 anos</b>
PVC ou resina com fibra, juntas tipo PB ou luva, até DN 125	137,5	135	132,5

Quadro 2 – Coeficiente C por material de tubulação

(conclusão)

PVC ou resina com fibra, juntas tipo PB ou luva, 125 < DN < 550	140	137,5	135
PVC ou resina com fibra, juntas tipo PB ou luva, 550 < DN < 1.500	142,5	140	137,5
PEAD, polipropileno outros termoplásticos, juntas soldadas, até DN 125	140	137,5	135
PEAD, polipropileno outros termoplásticos, juntas soldadas, 125 < DN < 550	142,5	140	137,5
PEAD, polipropileno outros termoplásticos, juntas soldadas, 550 < DN < 1.500	145	142,5	140
Cimento-amianto	140	135	125

Fonte: Adaptado de Azevedo Netto e Fernández. (2015).

A perda de carga localizada ocorre nas peças acessórios do sistema, como curvas, tês, válvulas, etc. Por estas causarem alterações de direção no fluxo, turbulência e variação da velocidade, elas transformam parte da energia do escoamento em calor e som (MACINTYRE, 2010).

De acordo com Porto (2006), para a maioria das peças acessórios não se tem um estudo analítico desenvolvido para realizar os cálculos da perda de carga localizada, sendo as informações existentes oriundas de experimentos, isso devido à grande variação de fatores para cada tipo de peça. Ainda, afirma que a presença das perdas de carga localizadas alteram tanto o escoamento a jusante quanto a montante.

Porto (2006) apresenta em detalhe o equacionamento para algumas peças acessórios mais comuns, como alargamentos e estreitamentos, cotovelos e curvas, registro gaveta e válvula borboleta, para determinação de coeficientes com maior precisão. A equação geral utilizada para a perda de carga localizada (Equação (6)) depende unicamente da velocidade do fluido, da gravidade no local e um coeficiente K determinado experimentalmente para cada tipo de peça acessório, conforme segue Quadro 3 – Coeficiente de perda de carga localizada para algumas peças.

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

$\Delta h$  = Perda de carga localizada na peça, em m.c.a;

$K$  = Coeficiente de perda de carga localizada, adimensional;  
 $g$  = gravidade,  $m/s^2$ .

Importante tomar nota de que o coeficiente  $K$  para perda de carga localizada é determinado experimentalmente e está intrinsicamente relacionado à turbulência gerada na peça, assim os valores propostos pela literatura são valores médios.

Quadro 3 – Coeficiente de perda de carga localizada para algumas peças

Peça	K	Peça	K
Ampliação Gradual	0,1 a 0,3	Pequena derivação (ferrule)	0,03 a 0,05
Redução Gradual	0,15 a 1,25	Saída afogada em reservatório	0,9 a 1,0
Bocais	2,75 a 5,00	Tê, passagem direta	0,5 a 0,7
Controlador de vazão	2,50	Tê passagem + saída lateral	1,30 a 1,60
Curva de 90° curta	0,9 a 1,2	Tê bifurcação simétrica	1,5 a 2,0
Curva de 90° longa	0,4	Válvula gaveta aberta 100%	0,02 a 0,04
Curva de 45° curta	0,3 a 0,5	Válvula borboleta aberta 100%	0,30 a 0,50
Curva de 45° longa	0,13 a 0,28	Válvula controladora de pressão	2,50 a 10,00

Fonte: Adaptado de Azevedo Netto *et al.* (2015).

Em projetos de rede de distribuição de água que possuem diâmetros e comprimentos das tubulações relativamente grandes, onde o comprimento retilíneo for maior ou igual a 1000 vezes o diâmetro, segundo Porto (2006), geralmente, as perdas localizadas não chegam a 5% da perda de carga total, então é possível desprezar as perdas de carga localizadas, visto que o valor está contido na variação do erro da especificação do coeficiente  $K$  na perda de carga distribuída.

### 2.2.2 Estação elevatória

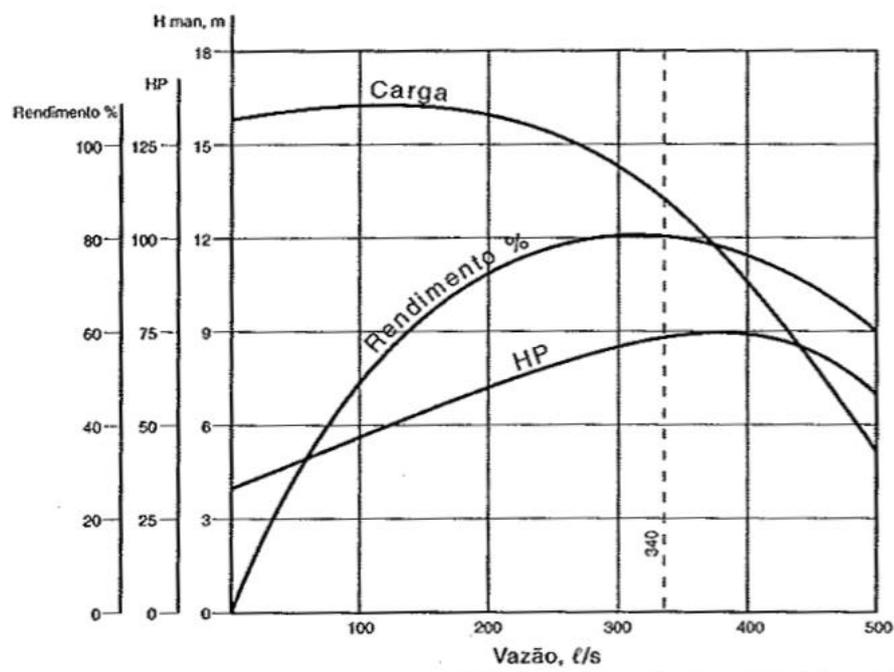
A estação elevatória tem como finalidade transportar um fluido de um local de cota altimétrica mais baixa para outra mais alta e a estrutura mecânica responsável por isso é a bomba. A bomba é capaz de mandar uma quantidade de vazão de água com uma determinada pressão. Essa pressão é a altura manométrica, que vai ser representada pela diferença de cota altimétrica do local de onde se deseja mandar água até o nível de água final acrescido da perda de carga da tubulação (PORTO, 2006).

Segundo Shammas e Wang (2018), atualmente, a maior parte dos sistemas elevatórios de água são constituídos das bombas centrífugas, onde o rotor transfere parte da sua energia

rotacional para o fluido, aumentando sua vazão e pressão na tubulação de recalque (TSUTIYA, 2006). A bomba centrífuga opera, usualmente, com velocidade de rotação e diâmetro do rotor fixos, no entanto, seu comportamento varia de acordo a vazão e pressão na saída da bomba. A vazão e a pressão possuem um grau de dependência entre si, onde para uma determinada altura manométrica exigida, a vazão se ajustará de acordo, mantendo um equilíbrio constante entre os parâmetros de pressão e vazão. (TSUTIYA, 2006).

A relação entre a altura manométrica e a vazão de saída de uma bomba é fornecida pelo fabricante e os parâmetros são inversamente proporcionais elevado a um expoente, ou seja, quando a altura manométrica diminui, a vazão aumenta e o contrário também ocorre, essa relação entre um parâmetro e outro, se plotada em um gráfico, forma uma curva chama curva altura-vazão. Além dessa curva, a curva de potência consumida, rendimento da bomba e o NPSH são conhecidas como as curvas características da bomba (TSUTIYA, 2006). A Figura 3 demonstra as curvas altura-vazão, de rendimento e de potência consumida.

Figura 3 – Curvas características de uma bomba.



Fonte: Azevedo Netto *et al.* (1998).

A curva altura-vazão de uma bomba pode ser modificada a partir da alteração da velocidade de rotação do rotor (TSUTIYA, 2006). Apesar da alteração da curva não ser fornecida pelo fabricante, ela pode ser deduzida a partir da lei da semelhança.

A lei da semelhança afirma que:

- a) a vazão é diretamente proporcional à variação da rotação (Equação ( 7 ));
- b) a pressão é diretamente proporcional ao quadrado da variação da rotação (Equação ( 8 ));
- c) a potência é diretamente proporcional ao cubo da variação da rotação (Equação ( 9 )).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{RPM_1}{RPM_2} \quad (7)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{RPM_1}{RPM_2} \right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{P_1}{P_3} = \left( \frac{RPM_1}{RPM_2} \right)^3 \quad (9)$$

Sendo:

RPM = rotação, em revoluções por minuto

Q = Vazão

H = Altura manométrica

P = Pressão

### 2.2.3 Reservatório

O reservatório é uma estrutura capaz de armazenar um volume de água, no entanto em um SAA ele também possui outras funções. Tsutiya (2006) pontua algumas das principais finalidades como sendo o armazenamento, que permite a regularização do consumo de água, uma vez que este não é linear no tempo e submete a rede de distribuição a grandes variações de vazão. Desta forma, o reservatório é utilizado para armazenar a vazão excedente no período em que a demanda por água é baixa e disponibilizar quando houver maior demanda.

O reservatório ainda é utilizado como método de prevenção à falta de água, na ocasião de qualquer falha na produção ou distribuição, o volume no reservatório consegue amenizar ou ainda tornar despercebido qualquer inconveniência.

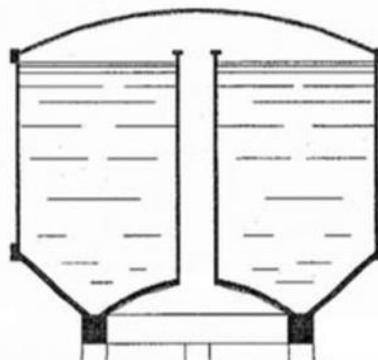
Outra funcionalidade dos reservatórios é a regularização de pressões na rede de distribuição, uma vez que ele pode agir como intermediário da adução para a distribuição e

ainda por consequência a estabilização das pressões auxilia na operação de estações elevatórias para abastecimento dos reservatórios. As bombas são capazes de atingir o rendimento máximo de energia por permanecerem sempre na mesma faixa de altura manométrica que foram projetadas (TSUTIYA, 2006).

Reservatórios adotam formatos diferentes e não existem restrições quanto a isso, usualmente, reservatório enterrados, semienterrados e apoiados adotam estruturas circulares ou retangulares, mas não se limitando a elas. Nos reservatórios elevados há uma grande variedade de formatos, cabendo a definição ao projetista (TSUTIYA, 2006).

Conhecendo o formato, as dimensões e o nível de água no reservatório é possível calcular esse volume, tarefa excepcionalmente trivial para um reservatório de geometria simples. Quando partimos para reservatórios de diferentes formato o cálculo já se torna árduo, como é o caso do reservatório do tipo Intze (Figura 4), que possui em sua base uma calota esférica e paredes com inclinação de 45° nas laterais.

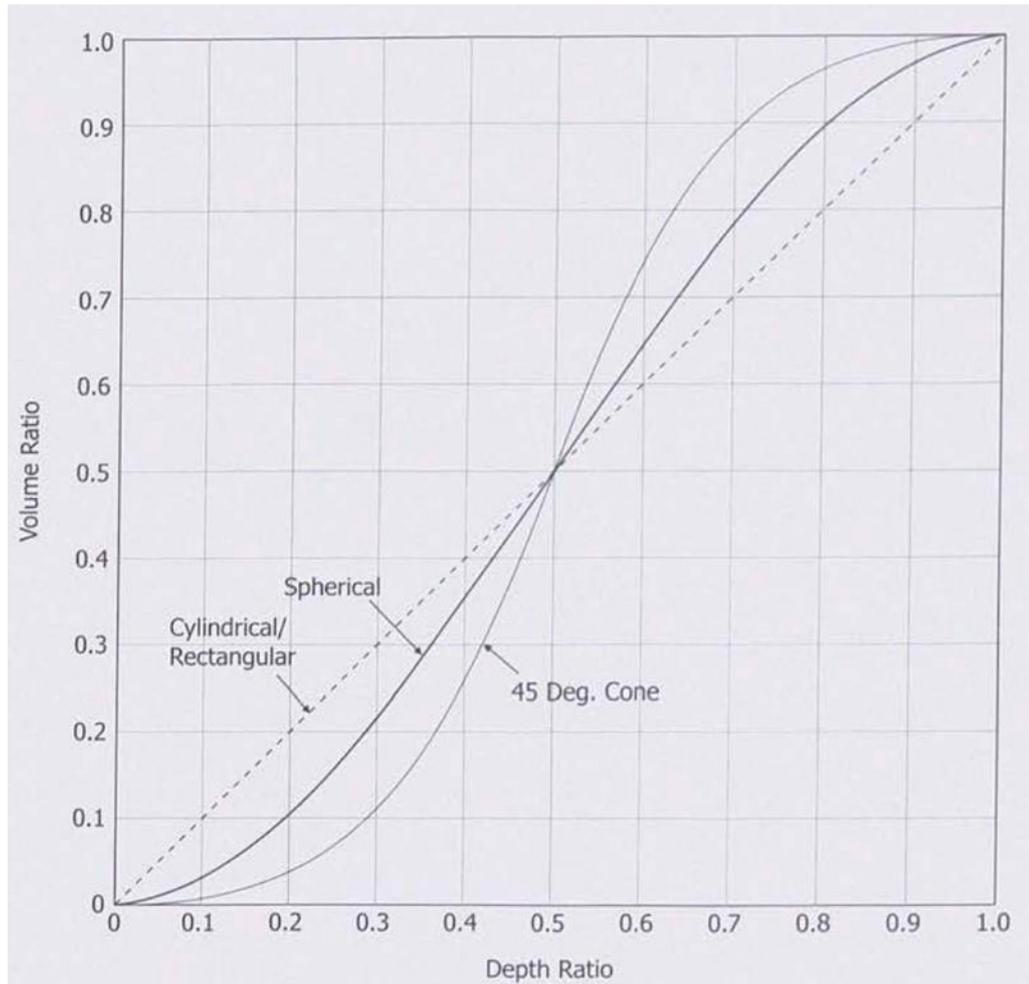
Figura 4 – Croqui reservatório do tipo Intze



Fonte: (DIAS, 2016).

Walski *et al.* (2003) apresenta a curva de volume armazenado pelo nível de água para reservatórios cilíndricos e retangulares (linhas tracejada), esféricos (linha contínua) e cones (linha mais tênue), conforme Figura 5.

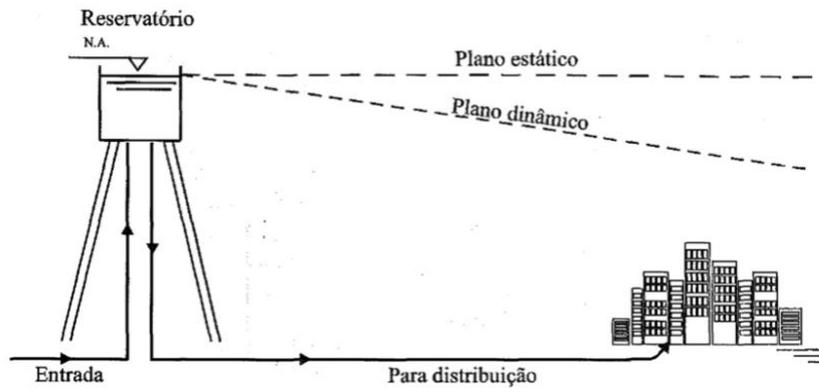
Figura 5 – Curva de volume de água armazenada para diferentes tipos reservatórios



Fonte: Walski *et al.* (2003).

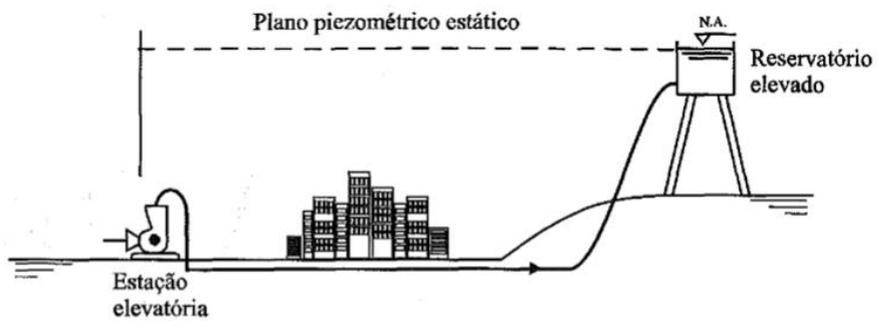
Os reservatórios podem ser classificados de acordo com sua localização no sistema de distribuição, o que tem influência na sua operação. Os reservatórios de montante (Figura 6) estão localizados no início do sistema de distribuição, são o ponto inicial do abastecimento da rede de distribuição. Os reservatórios de jusante (Figura 7), também conhecidos como reservatórios de sobras, são utilizados como último ponto de abastecimento do sistema de distribuição, isto é, na hora de menor consumo ele enche e na hora de maior consumo ele abastece a rede. Usualmente, esse reservatório é configurado com uma única tubulação para respectiva entrada e saída de água. Ainda é possível classificar o reservatório como intermediário (Figura 8), onde ele fica localizado em uma posição intermediária na rede de adução.

Figura 6 – Reservatório de montante



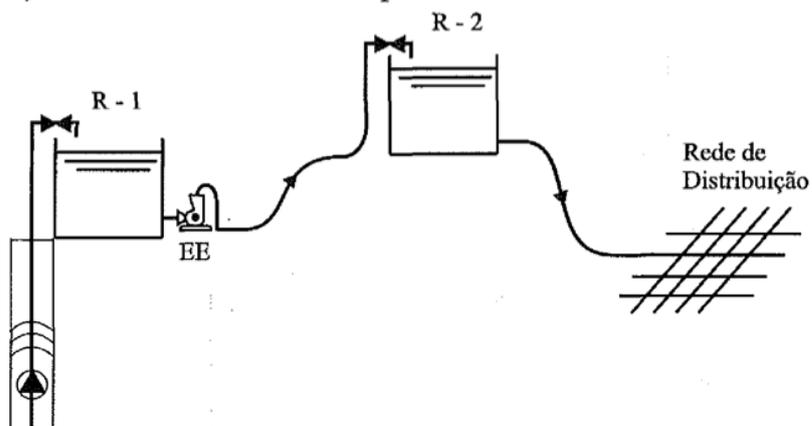
Fonte: Tsutiya (2006).

Figura 7 – Reservatório de jusante



Fonte: Tsutiya (2006).

Figura 8 – Reservatório intermediário



Fonte: Tsutiya (2006).

## 2.2.4 Peças acessórios

Azevedo Netto *et al.* (1998) separa as peças acessórios de uma tubulação em dois tipos: acessórios estruturais e acessórios operacionais.

Os acessórios estruturais são elementos que correspondem a integridade física das tubulações sendo elas: juntas de construção, juntas de montagem, juntas de dilatação e/ou expansão, ancoragens, suportes e apoios e entradas e saídas (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

Já os acessórios operacionais são elementos que integram a rede de distribuição de água.

### 2.2.4.1 Válvulas

As válvulas são um tipo de acessório utilizado para delimitar e isolar os setores de manobra (ABNT, 1994). Não se limitando a essas funções, as válvulas são utilizadas para permitir, bloquear ou regular o fluxo de água que passa por ela (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998). Alguns dos tipos de válvulas utilizadas para bloquear a passagem da água são as válvulas gavetas, borboleta e rotativa. As válvulas com essa funcionalidade são conhecidas como válvulas de manobra (TSUTIYA, 2006).

A válvula de gaveta possui uma cunha que quando fechada atravessa a tubulação e veda a passagem de água. Quando aberta, a cunha retrai e permite a passagem livre da água. Frequentemente é utilizada para regular a vazão, função que não é ideal para seu funcionamento, sendo ela, ou totalmente aberta, ou totalmente fechada. Contudo não há impedimento técnico para seu uso parcialmente aberta para reduzir a vazão, quando se há baixas pressões e a estanqueidade da rede não é um fator crucial (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

Azevedo Netto *et al.* (1998) afirma que toda válvula reguladora de vazão é uma redutora de pressão, ou seja, elas dissipam energia e são passíveis de cavitação, vibração e erosão. Tsutiya (2006) classifica esse tipo de válvula como sendo válvulas reguladoras de pressão (VRP).

As válvulas de altitude, também conhecidas como válvula de alívio de pressão e válvula de controle de pressão, são utilizadas com o objetivo de reduzir a pressão máxima a jusante (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

Tsutiya (2006) define ainda um outro tipo de válvula: a válvula sustentadora de pressão (VSP), que é utilizada para manter a pressão a montante dela constante.

#### 2.2.4.2 Medidores

Os medidores são acessórios da rede utilizados para monitorar a vazão e pressão em um ponto. Os medidores de vazão podem ter seu medidor do tipo diferencial de pressão, velocimétrico e eletrônico. Ambos são capazes de medir a velocidade do escoamento e utilizam a equação da continuidade para determinar a vazão instantânea (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

As pressões são medidas utilizando manômetros, que são equipamentos capazes de medir a diferença de pressão no interior de um tubo e da pressão atmosférica, ou seja, ele mede a pressão relativa para o local onde se encontra (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

### 2.3 PLANIALTIMETRIA

Segundo definição da ABNT/NBR 13.133 (2021), um levantamento planialtimétrico corresponde ao método que projeta detalhes topográficos em um plano horizontal e determina a altura de uma superfície de referência.

O modelo digital de elevação (MDE) “representa as altitudes da superfície topográfica agregada aos elementos geográficos existentes sobre ela, como cobertura vegetal e edificações.” (IBGE, [20--]). Chagas et al. (2010) afirma que no Brasil os MDEs são produzidos pelos próprios usuários e que não existe um órgão no Brasil para normatização e procedimentos para a criação de mais modelos.

Alguns dos MDE disponíveis hoje são feitos a partir de dados obtidos por sensores instalados em satélites de alguns programas espaciais, sendo alguns desses: SRTM e ASTER. Outro método para obter um MDE é a partir de Cartas de curvas de nível.

O SRTM possui uma resolução espacial de 30 metros para locais fora dos Estados Unidos da América. O ASTER possui resolução espacial de 30 metros (EROS, 2018; NASA, [20--]).

Pereira e Fujita ([201-]) compararam um MDE de referência, que foi gerado a partir de levantamento planialtimétrico, com o MDE de WORLDDDEM, ALOS, SRTM e ASTER em escala de 1:2000 e concluíram que a resolução espacial do SRTM e do ASTER comprometem a morfologia do terreno. No entanto, quando analisados isoladamente, o MDE do ASTER apresentou mais semelhança com o MDE de referência que o MDE do SRTM.

Chagas et al. (2010) comparou o MDE gerado a partir de curvas de nível de uma Carta com o MDE gerado do SRTM e do ASTER para uma escala de 1:50.000. Foi concluído que a

Carta apresentou o melhor MDE e que o MDE do SRTM foi o que mais se aproximou deste. Já o MDE do ASTER foi caracterizado como não satisfatório.

## 2.4 MODELAGEM HIDRÁULICA

### 2.4.1 Conceito

O modelo hidráulico não é exatamente algo novo, antes do advento dos computadores, também se fazia necessário criar projetos para rede de distribuição de água, no entanto esses cálculos eram feitos manualmente. De acordo com Coelho, Loureiro e Alegre (2008), a simulação em meio digital permite, com certa margem de erro, analisar e prever o comportamento hidráulico do sistema.

A criação de um modelo hidráulico digital traz a facilidade da simulação de diferentes cenários, indicando viabilidade de execução de intervenções, diagnóstico de problemas, modificação de estruturas dos sistemas e sua operação.

Para isso, é necessário ter um modelo calibrado. A calibração do modelo consiste em ajustar os dados de entrada para que o modelo represente o comportamento observado em campo. A calibração permite reproduzir as condições existentes, a um nível de confiança aceitável para cada aplicação. Conforme Heller (2010, p.794), “calibrar um modelo hidráulico é uma arte, ciência e trabalho de investigação.”

### 2.4.2 Aplicações

A modelagem hidráulica é uma ferramenta utilizada em diversas etapas da vida útil de um sistema de distribuição de água. Ela é utilizada por projetistas, na sua concepção e expansão, e pelos operadores e ainda nas áreas de análise, desenvolvimento, operação e manutenção do sistema (SAVIC; KAPELAN; JONKERGOUW P, 2009).

Pereira, Sales e Medeiros (2018) utilizaram da modelagem hidráulica como meio de diagnóstico para um sistema de distribuição de água com perdas de 62,14%. Simulado um cenário considerando uma redução do índice de perdas para 25%, os autores identificam que o controle da vazão de perda seria suficiente para atender o sistema atual sem que houvesse a necessidade do aumento de produção de água.

Costa *et al.* (2019) utiliza da modelagem hidráulica para estudar três cenários futuros de crescimento do consumo do município estudado no horizonte de 19 anos. Os cenários

compreendem: somente aumento do consumo, aumento do consumo com reforço às tubulações existentes e aumento do consumo com reforço às tubulações existentes e setorização da rede de distribuição de água com implantação de reservatórios. Foi posteriormente verificado que nenhum dos cenários foi capaz de atingir os parâmetros especificados pela ABNT/NBR 12.218 (1994). No entanto, o uso da ferramenta foi fundamental para a identificação de que será necessário repensar em uma solução para adequar o sistema.

Qi *et al.* (2018) simulou um grande número diferentes rompimentos na rede para dois sistemas de distribuição de água distintos: um operado por reservatórios e outro por bombas, com o objetivo de avaliar o impacto dos vazamentos ocorrido no modelo hidráulico no que tange o volume perdido, falta de água na rede, nós e trechos com redução significativas de pressão e trechos com direção de fluxo invertido e com aumentos de velocidade de condução. Os resultados obtidos por Qi *et al.* (2018) permitiram a identificação de informações pertinentes para os operadores do sistema, que possibilitam a criação de planos de contingência para amenização dos impactos, como nos casos simulados, e planos de manutenção e gestão para a rede.

Tendo em vista os estudos realizados fazendo uso da modelagem hidráulica, pode ser utilizada para obter diagnósticos dos sistemas de distribuição de água, projetar o crescimento populacional, expansão da infraestrutura e ser utilizada como ferramenta de gestão pelas concessionárias.

### 2.4.3 EPANET

O programa mais utilizado para a modelagem hidráulica de redes de distribuição de água é o EPANET (ROSSMAN, 2000b), um *software* de código aberto desenvolvido em 1993 pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (ROSSMAN, 2000b). Ele é capaz de realizar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água para redes de distribuição pressurizadas (ROSSMAN, 2000<sup>a</sup>).

Segundo Rossman (2000b, p. 46):

O módulo de simulação hidráulica do EPANET calcula a carga hidráulica nos nós e a vazão nos trechos, para um conjunto fixo de níveis nos RNFs, alturas nos reservatórios de nível variável e consumos para uma sucessão de pontos, ao longo do tempo. Em cada intervalo de cálculo, os níveis de água nos reservatórios de nível fixo e os consumos nos nós são atualizados, de acordo com o padrão temporal que lhes está associado, enquanto que a altura de água no reservatório de nível variável é atualizada em função da vazão de saída.

Para determinar a carga hidráulica e vazão em um ponto do sistema, o programa utiliza o método do balanço hídrico, ou seja, ele resolve a equação da continuidade para os nós, e a equação da conservação de energia para os trechos, simultaneamente. Os cálculos exigidos para aplicação do procedimento não são todos lineares e, para esses casos, são utilizados métodos iterativos para alcançar o resultado. O EPANET utiliza o Método do Gradiente para esse procedimento.

O programa ainda utiliza diversas técnicas para resolução do equilíbrio hidráulico além do balanço hídrico para a carga hidráulica, entre elas se destacam (COELHO; LOUREIRO; ALEGRE, 2006):

- Método de Hardy-Cross para o cálculo das redes malhadas;
- Método de Newton-Raphson para o calcula das redes malhadas;
- Método da Teoria Linear;
- Método da Minimização de Energia.

As simulações estáticas, ou também chamadas de instantâneas, podem ser utilizadas para um instante de tempo, e as simulações dinâmicas são simulações executadas em um intervalo de tempo com período definido. Para a simulação dinâmica, o EPANET, por padrão, utiliza intervalo de tempo de 1 hora.

É possível utilizar unidades imperiais ou do sistema internacional de unidades (SI). Para o cálculo da perda de carga é possível optar pelo uso da fórmula de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning.

No manual do EPANET, escrito por Rossman (2000a), é possível identificar todos os objetos, propriedades e demais informações sobre o programa.

#### 2.4.3.1 Dados físicos

Os dados físicos são a representação virtual das estruturas de um sistema de abastecimento de água, nisto podemos enquadrar o cadastro de rede de distribuição de água, os conjuntos motobomba, válvulas e reservatórios (COELHO, LOUREIRO e ALEGRE, 2006). O programa classifica todos os dados físicos do sistema em dois tipos de objetos: nós e trechos (ROSSMAN, 2000a).

### 2.4.3.2 Nós

Os nós são objetos pontuais utilizados para identificar os dois vértices de um trecho de tubulação, porém não se limitam a esta funcionalidade. Os nós possuem atributos como a cota altimétrica, demandas de água, padrão de demanda e coeficientes de emissão, que são utilizados para simular o escoamento em um orifício com descarga em pressão atmosférica, podendo simular aspersores de irrigação ou perdas de água na tubulação (ROSSMAN, 2000b). A Figura 9 apresenta o painel de edição dos atributos de um nó.

Os nós podem ser especializados para determinada função, sendo elas: reservatório de nível fixo (RNF) e reservatório de nível variado (RNV) (COELHO, LOUREIRO e ALEGRE, 2006). Apesar de possuírem atributos diferentes, o programa interpreta ambos os tipos de reservatórios como nós (ROSSMAN, 2000b).

Figura 9 – Painel de edição dos nós

Propriedade	Valor
*Identificador do Nó	3
Coordenada X	3789.89
Coordenada Y	8670.21
Descrição	
Zona	
*Cota	0
Consumo-Base	0
Padrão de Consumo	
Categorias de Consumo	1
Coef. do Emissor	
Qualidade Inicial	
Origem de Qualidade	

Fonte: Autor (2023).

Desta forma, reservatórios são nós que possuem a capacidade de armazenar determinado volume de água, no caso do RNF esse volume é virtualmente infinito, e o RNV varia sua altura manométrica conforme nível de enchimento.

Os RNV possuem atributos e configurações de operação únicos para seu tipo, além da cota altimétrica ser obrigatória para todos nós, eles ainda possuem outros quatro atributos

únicos e duas configurações, conforme a Figura 10. A cota altimétrica para esses nós especiais faz referência à cota de fundo dos reservatórios (COELHO, LOUREIRO e ALEGRE, 2006; ROSSMAN, 2000b).

Os demais atributos fazem referências as características do próprio reservatório, como nível mínimo, hidráulicamente semelhante a altura do reservatório, nível inicial de água, que se refere ao nível de água no reservatório no início dos cálculos hidráulicos do programa, altura máxima de enchimento e diâmetro.

Quanto a sua operação, eles podem ser configurados para extravasar na ocasião de a vazão de entrada de água ser superior à vazão de saída e o nível de água ser igual a altura máxima de enchimento, e sua curva de enchimento. Se não for preenchida o campo da curva de enchimento, esta será considerado como linear.

Figura 10 – Painel de edição de RNV

Propriedade	Valor
*Identificador do RNV	5
Coordenada X	3577.13
Coordenada Y	4561.17
Descrição	
Zona	
*Cota	0
*Altura de Água Inicial	10
*Altura de Água Mínima	0
*Altura de Água Máxima	20
*Diâmetro	50
Volume Mínimo	
Curva de Volume	
Modelo de Mistura	Mixed
Fração de Mistura	
Coef. Reação	
Qualidade Inicial	
Origem de Qualidade	

Fonte: Autor (2023).

### 2.4.3.3 Trechos

Os trechos são elementos que possuem a capacidade de conduzir água entre nós. Eles obrigatoriamente precisam se conectar em nós nas duas extremidades, o nó inicial e o nó final. Esses elementos representam as tubulações da rede, possuindo propriedades como diâmetro da tubulação, que deve ser considerado o diâmetro interno, e o coeficiente de rugosidade. Os trechos podem ser inseridos com seu comprimento calculado automaticamente pelo programa, que quando utilizado em um plano georreferenciado tornam a inserção dos trechos mais simples, reduzindo a quantidade de informações necessárias para serem preenchidas, ademais é possível inserir manualmente (ROSSMAN, 2000b).

O “estado do trecho” pode ser configurada como aberta, fechada ou um trecho atuando com uma válvula de retenção instalada. Quando aberta, funciona como uma tubulação qualquer, quando fechado é considerada inexistente pelo programa e quando configurada como válvula de retenção, o fluxo só é permitido no sentido do nó inicial para o nó final.

Os trechos, assim como os nós, também possuem especializações. Eles podem atuar como válvulas ou como bombas, respectivamente, limitando a vazão ou pressão e adicionando energia ao escoamento entre o nó inicial e nó final. Em ambos os casos, o programa os interpreta como trechos.

Ainda é possível determinar um coeficiente de perda de carga localizada para cada trecho. A Figura 11 apresenta o painel de edição dos trechos.

As válvulas podem atuar de seis maneiras distintas: válvula redutora de pressão (PRV), válvula de controle de pressão (PSV), válvula de perda de carga fixa (PBV), válvula reguladora de vazão (FCV), válvula de controle de perda de carga ou válvula borboleta (TCV) e válvula genérica (GPV) (COELHO, LOUREIRO e ALEGRE, 2006). A Figura 12 tem-se o painel de edição de válvulas.

Figura 11 – Painel de edição de trechos

Propriedade	Valor
*Identificador do Trecho	2
*Nó Inicial	2
*Nó Final	3
Descrição	
Zona	
*Comprimento	1941.67
*Diâmetro	100
*Rugosidade	100
Coef. Perda de Carga Singular	0
Estado Inicial	Open
Coef. Reação no escoamento	
Coef. Reação na Parede	

Fonte: Autor (2023).

Figura 12 – Painel de edição de válvulas

Propriedade	Valor
*Identificador da Válvula	1
*Nó Inicial	1
*Nó Final	2
Descrição	
Zona	
*Diâmetro	100
*Tipo	PRV
*Parâmetro de Controle	0
Coef. Perda de Carga Singular	0
Estado Fixo	None

Fonte: Autor (2023).

- PRVs limitam a pressão máxima a jusante da válvula, o nó final, para um valor configurado. Ela pode atuar de três formas distintas:
  - Se a pressão de montante da válvula for maior que o valor configurado, então a jusante da válvula a pressão será igual ao valor configurado;
  - Se a pressão de montante da válvula for menor que o valor configurado, então a válvula não causa influência;

- Se a pressão de montante da válvula for menor que a pressão de jusante, então a válvula se fecha.
- PSVs mantém o valor de pressão configurado fixo a montante da válvula. Ela pode atuar de três formas distintas:
  - Se a pressão de jusante da válvula for menor que o valor configurado, então a pressão de montante da válvula é o valor configurado;
  - Se a pressão de jusante é maior que o valor configurado, então a válvula não causa influência;
  - Se a pressão de jusante é maior que a pressão de montante, então a válvula se fecha.
- PBVs causam uma perda de carga fixa na válvula e é utilizada para inserir uma perda de carga conhecida ou desejada.
- FCVs limitam a vazão de passagem na válvula para um valor configurado.
  - Se a vazão for menor que o valor configurado, a válvula permanece aberta.
- TCVs simulam válvulas parcialmente fechadas ao ajustar o coeficiente de perda de carga localizada. Cada válvula possui uma relação entre o grau de fechamento da válvula e o correspondente de perda de carga localizada que gera.
- GPV podem ser utilizadas para representar turbinas, escoamento em poços ou válvulas de retenção de vazão reduzida.

Algumas conexões não são permitidas dentro do EPANET, sendo elas:

- a) PRV, PSV e FCV não podem se conectar diretamente a RNF ou RNV;
- b) Duas PRVs não podem partilhar o mesmo nó final;
- c) Duas PSVs não podem partilhar o mesmo nó inicial;
- d) PSV não podem se conectar a jusante de um PRV.

As bombas adicionam energia ao sistema na forma de altura manométrica. Desta forma, o comportamento da bomba, isto é, aumento de altura manométrica e vazão será dado pela curva característica, operando conforme especificado, ou ainda por uma potência fixa definida, onde a bomba fornece valor constante de energia para todas as combinações de vazão e altura manométrica (ROSSMAN, 2000b).

É possível simular uma bomba operando com velocidade reduzida ou aumentada, como, por exemplo, com o uso de inversores de frequência, por meio do campo “regulação de velocidade”. O programa então aplica a lei das semelhanças para obter a nova curva característica da bomba. Outra curva possível de ser utilizada é a curva de rendimento e o padrão

de preço para obter os resultados referentes ao consumo de energia elétrica e o custo monetário da operação, respectivamente (ROSSMAN, 2000b).

O painel de edição da bomba é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Painel de edição de bombas

Propriedade	Valor
*Identificador da Bomba	1
*Nó Inicial	1
*Nó Final	2
Descrição	
Zona	
Curva da Bomba	
Potência	
Regulação de Velocidade	
Padrão	
Estado Inicial	Open
Curva de Rendimento	
Preço de Energia	
Padrão de Preço	

Fonte: Autor (2023).

#### 2.4.3.4 Dados não físicos

Dados não físicos não são objetos da simulação, ou seja, são informações adicionais, e em alguns casos obrigatórias, como o padrão de consumo, que remetem a seus objetos e suas propriedades.

#### 2.4.3.5 Padrões

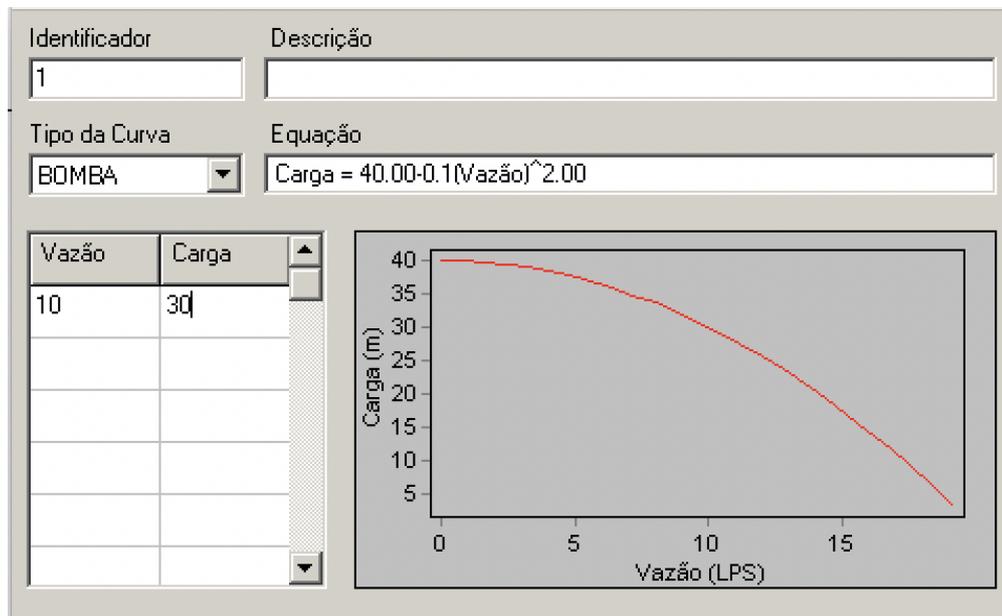
Os padrões são informações temporais aplicadas às configurações de nós e trechos. Esses podem ser aplicados aos nós para determinar o padrão de demanda de água ao longo do dia, para definir o K1 por exemplo, nas válvulas para alterar suas configurações como perda de carga, pressão e vazão, e nas bombas para alterar a velocidade de operação da bomba.

### 2.4.3.6 Curvas

Segundo Rossman (2000b, p. 41), “as curvas são objetos que contêm pares de dados representando uma relação entre duas grandezas”. As curvas disponíveis no EPANET são: curva característica da bomba (altura-vazão), curva de rendimento (eficiência de operação da bomba), curva de enchimento (do reservatório) e curva de perda de carga (para válvulas).

A curva altura-vazão pode ser definida de três formas distintas: utilizando somente os dados do ponto ótimo de operação da bomba, utilizando três pontos, sendo eles o ponto ótimo, o ponto de menor vazão e o ponto de maior vazão, e utilizando mais de três pontos. Da primeira maneira, o programa automaticamente gera uma curva completa que possui altura manométrica 33% maior que altura manométrica ideal e uma vazão 100% maior (ROSSMAN, 2000b). A Figura 14 mostra um exemplo do painel de edição de curva altura-vazão e uma curva de um ponto para vazão de 10 L/s para uma altura manométrica de 30 m.c.a.

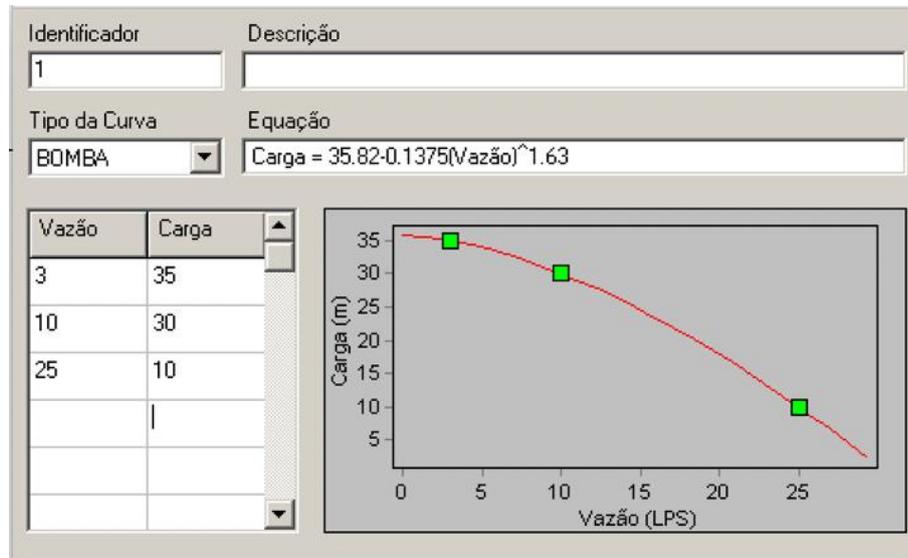
Figura 14 – Curva altura-vazão de um ponto



Fonte: Autor (2023).

O segundo modo é utilizando três pontos característicos da curva (Figura 15), onde são inseridas as informações do ponto ótimo de operação, a vazão máxima da bomba e a vazão mínima. Desta maneira o programa ajusta uma curva exponencial que abranja os três pontos cruciais da bomba.

Figura 15 – Curva altura-vazão de três pontos



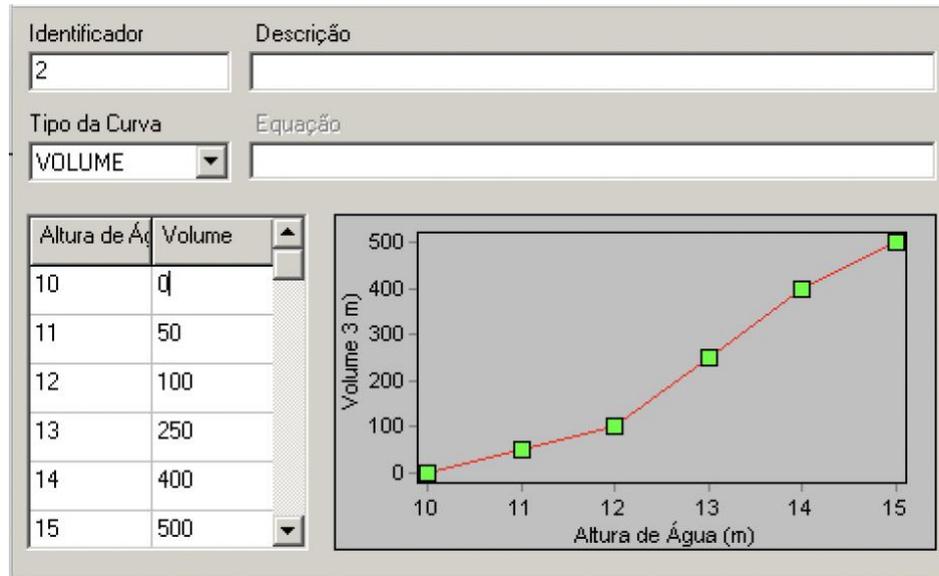
Fonte: Autor (2023).

E o terceiro modo, para representar fielmente o comportamento da bomba, é possível inserir pontos com intervalos de vazão pequenos de forma que o segmento de reta entre os pontos possa ser utilizado como curva. Importante notar que para o EPANET utilizar a curva altura-vazão nas bombas é necessário que ela seja constantemente decrescente.

A curva de rendimento é utilizada para calcular a eficiência de operação do conjunto motobomba. Ela relaciona a vazão recalçada com o rendimento. Caso não seja fornecida uma curva para a bomba, será utilizada um rendimento global, isto é, um valor único de rendimento para toda a faixa de operação (ROSSMAN, 2000b).

A curva de volume é utilizada para agregar mais precisão à simulação de enchimento e esvaziamento dos reservatórios. Ela relaciona a altura de água do reservatório com o volume armazenado. A Figura 16 apresenta uma curva de enchimento qualquer para um reservatório de 500 m<sup>3</sup> com altura mínima de água de 10 m e máxima de 15 m. A curva de enchimento de um reservatório deve relacionar as alturas de água do reservatório, ou seja, se o reservatório possui nível inicial de 10 m e máximo de 15 m, então a curva deve iniciar em 10 m e terminar em 15 m.

Figura 16 – Curva de volume de um reservatório



Fonte: Autor (2023).

Semelhantemente as demais curvas, a curva de perda de carga relaciona a vazão com a perda de carga absoluta, comumente utilizada para GPVs.

#### 2.4.3.7 Controles

Os controles são instruções que realizam alterações na configuração de trechos, bombas e válvulas que podem verificar os resultados simulados em nós e RNV no intervalo de tempo da simulação e o período em que simulação se encontra para realizar alterações nas configurações (ROSSMAN, 2000b). Os controles podem ser do tipo simples, como um comando direto, ou do tipo programa, utilizando uma combinação de informações de nós e tempo.

Os controles simples podem alterar as propriedades de um trecho, bombas ou válvulas com base nos parâmetros calculados de nós, como pressão e nível do RNV, ou um instante da simulação. Por exemplo, é possível fechar um trecho se a altura do reservatório estiver acima de um certo nível ou ainda alterar a velocidade de uma bomba em um determinado período da simulação (ROSSMAN, 2000b).

Os controles programados são utilizados quando é necessário uma combinação de informações de um ou mais nós ou período, podendo executar mais de um comando com a mesma regra e utilizar operadores lógicos como IF, THEN, AND e OR.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho desenvolvido busca explorar o modelo hidráulico de diagnóstico do sistema de distribuição de água da São Gabriel Saneamento, previamente elaborado pela empresa Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente e o relatório final entregue referente a elaboração e resultados obtidos e identificar os dados utilizados e as técnicas empregadas para sua elaboração e versando com o material disponível na literatura do tema.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de São Gabriel está localizado na porção sudoeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 17), próximo à fronteira com o Uruguai, e possui uma população de 62.187 habitantes considerando o ano de referência de 2021, com área territorial de 5.053.460 km<sup>2</sup>, dos quais 18,31 km<sup>2</sup> são urbanizados, conforme dados do IBGE para 2019 (IBGE, 2023).

Figura 17 – Localização de São Gabriel



Fonte: Autor (2023).

Segundo SNIS (2021), o município conta com uma população urbana de 55.343 habitantes em 2021 e o índice de cobertura de abastecimento de água é de 100%, contando com 19.695 ligações de água na rede de distribuição.

A prefeitura municipal, em 2011, lançou o edital da licitação nº 02/2011 referente a concessão dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário do município de São Gabriel (SÃO GABRIEL, 2011), o qual teve como vencedora a empresa São Gabriel Saneamento, a qual é atualmente responsável pelos serviços (SÃO GABRIEL, 2012). A empresa possui modelo hidráulico computacional do seu sistema de distribuição de água da área urbana do município, item que será abordado nesse trabalho.

### 3.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ESTUDADO

A empresa São Gabriel Saneamento ao assumir o serviço de abastecimento de água do município da antiga concessionária, não recebeu o cadastro técnico do sistema de abastecimento de água e, portanto, contratou a empresa Geomon Ambiental para realizar o levantamento do sistema existente e a criação do cadastro técnico-operacional do sistema de abastecimento de água (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, [201-]).

Nos anos seguintes da assunção dos serviços, a empresa iniciou o processo de modernização do sistema de abastecimento de água com a implantação do centro de controle operacional e a instalação de 29 pontos de telemetria espalhados pela rede de distribuição, reservatórios e adutoras permitindo o controle em tempo real da pressão, volume armazenado e vazão do sistema respectivamente (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, [201-]).

#### 3.2.1 Modo de operação

A água produzida na ETA é enviada para a casa de mistura, local onde é realizada a cloração e fluoretação, e em seguida armazenada nos reservatórios R-01 (1500 m<sup>3</sup>) e R-02 (650 m<sup>3</sup>) que estão conectados entre si e operando como um único reservatório de dois volumes.

O reservatório menor é utilizado como poço de sucção para as elevatórias da casa de bombas, EEAT Centro Nova e EEAT Gabrielense, que recalcam água para toda extensão da cidade.

O reservatório maior é utilizado como poço de sucção para a elevatória EEAT Centro Auxiliar, localizada no prédio da ETA. Esta foi a primeira elevatória instalada no Município e atualmente é utilizada como reforço à EEAT Centro Nova, operando em paralelo a ela, em períodos de maior consumo na rede de distribuição.

A Figura 18 mostra o funcionamento do sistema de distribuição internos à ETA.

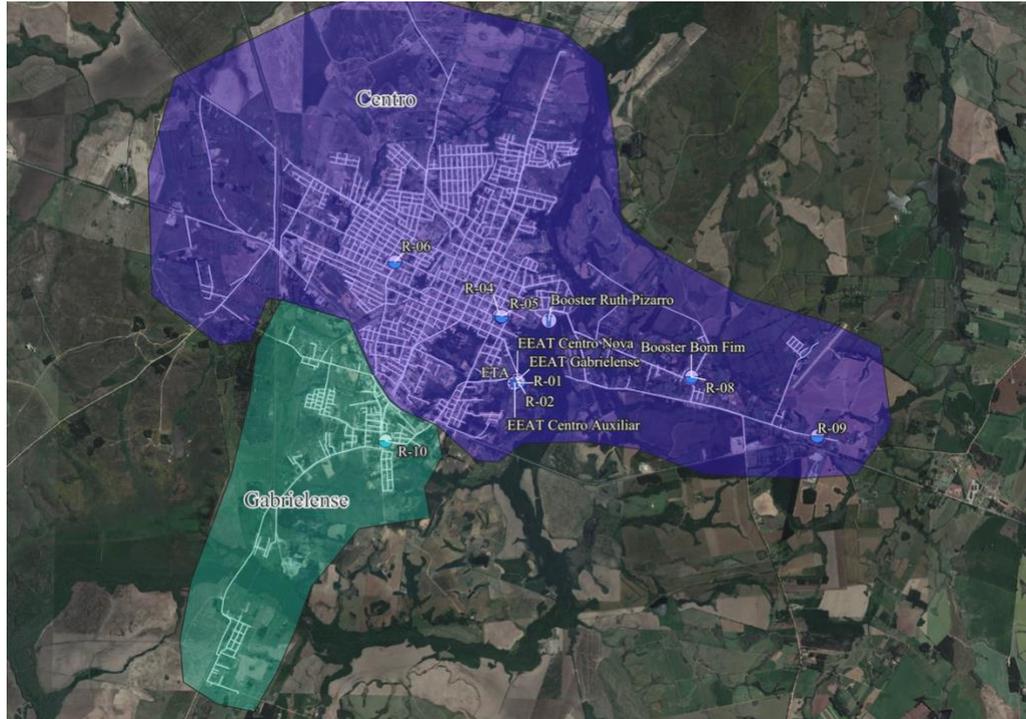
Figura 18 – Esquema de abastecimento da saída da ETA



Fonte: Adaptado de São Gabriel Saneamento (2022a)

O funcionamento das elevatórias é separado em dois setores, setor Centro, abastecidos pelas elevatórias EEAT Centro Nova e Auxiliar, e setor Gabrielense, abastecido pela EEAT Gabrielense, conforme apresentado na Figura 19.

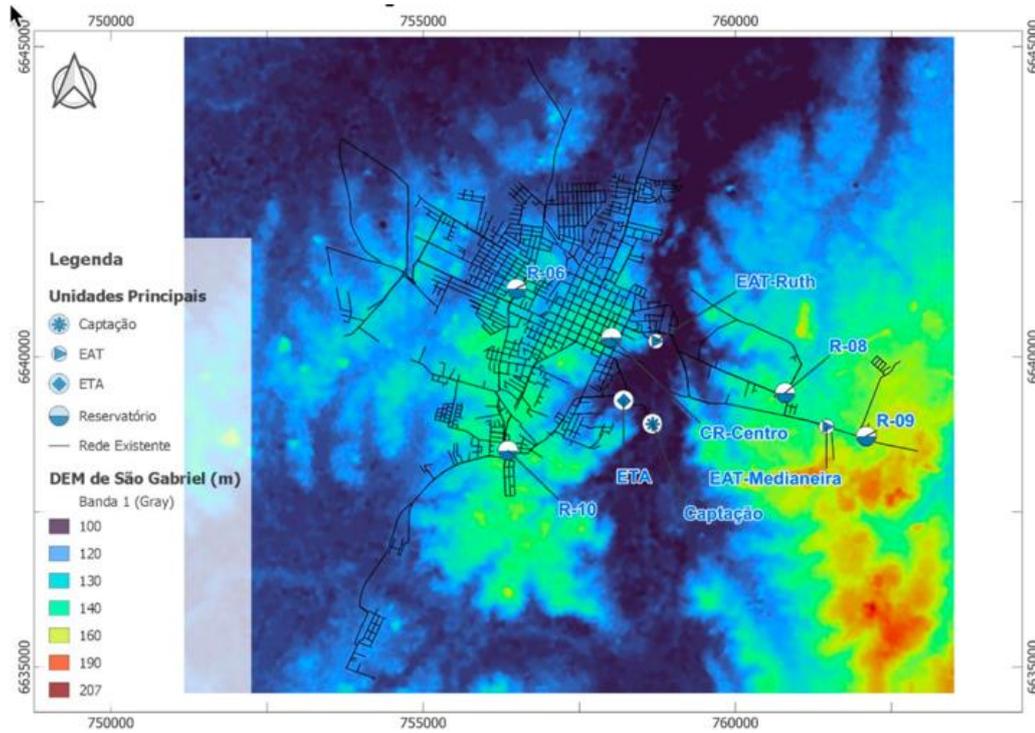
Figura 19 – Setores de Abastecimento



Fonte: Adaptado de São Gabriel Saneamento (2022a)

A rede de distribuição está diretamente interligada às adutoras das elevatórias, assim como os reservatórios e *boosters* do sistema distribuição. Desta forma, o sistema é inteiramente dependente das bombas localizadas na ETA para realizar o abastecimento da cidade e os reservatórios instalados operam como reservatórios de jusante, ou de sobra, enchendo no período em que há menor consumo na rede de distribuição, momento em que as pressões são maiores. O relevo do município está apresentado na Figura 20

Figura 20 – Mapa hipsométrico do município

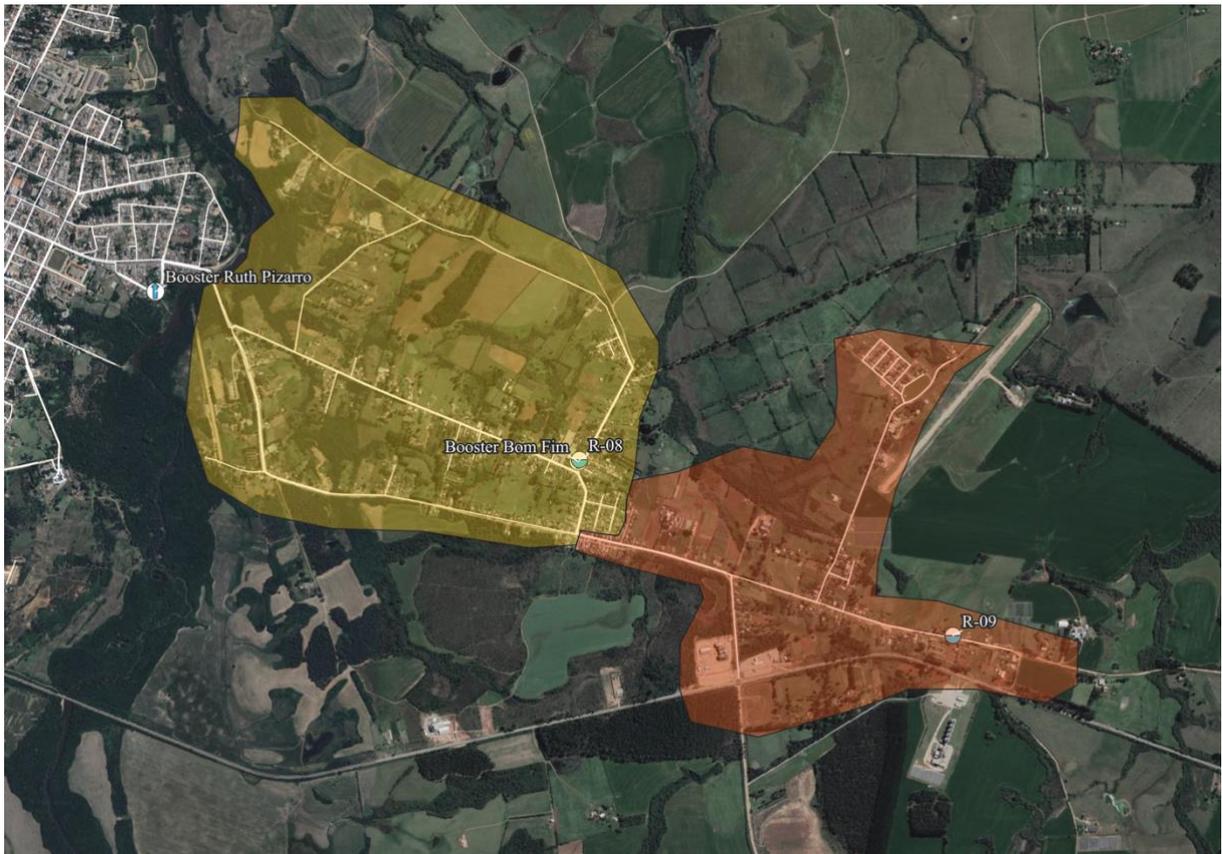


Fonte: Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a)

Para abastecer as zonas altas da cidade, são utilizados *boosters* para elevar a pressão manométrica nesses locais. Estes possuem uma operação liga e desliga, sendo controlados de acordo com o nível dos reservatórios ligados a jusante do seu recalque.

O *booster* Ruth Pizzaro é controlado pelo nível de água do reservatório R-08 e o *booster* Bom Fim, localizado junto com o reservatório R-08, é controlado pelo nível de água do reservatório R-09. O local dos boosters e as zonas abastecidas por eles e os reservatórios de controle são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – Localização e zona de abastecimento dos *boosters*.



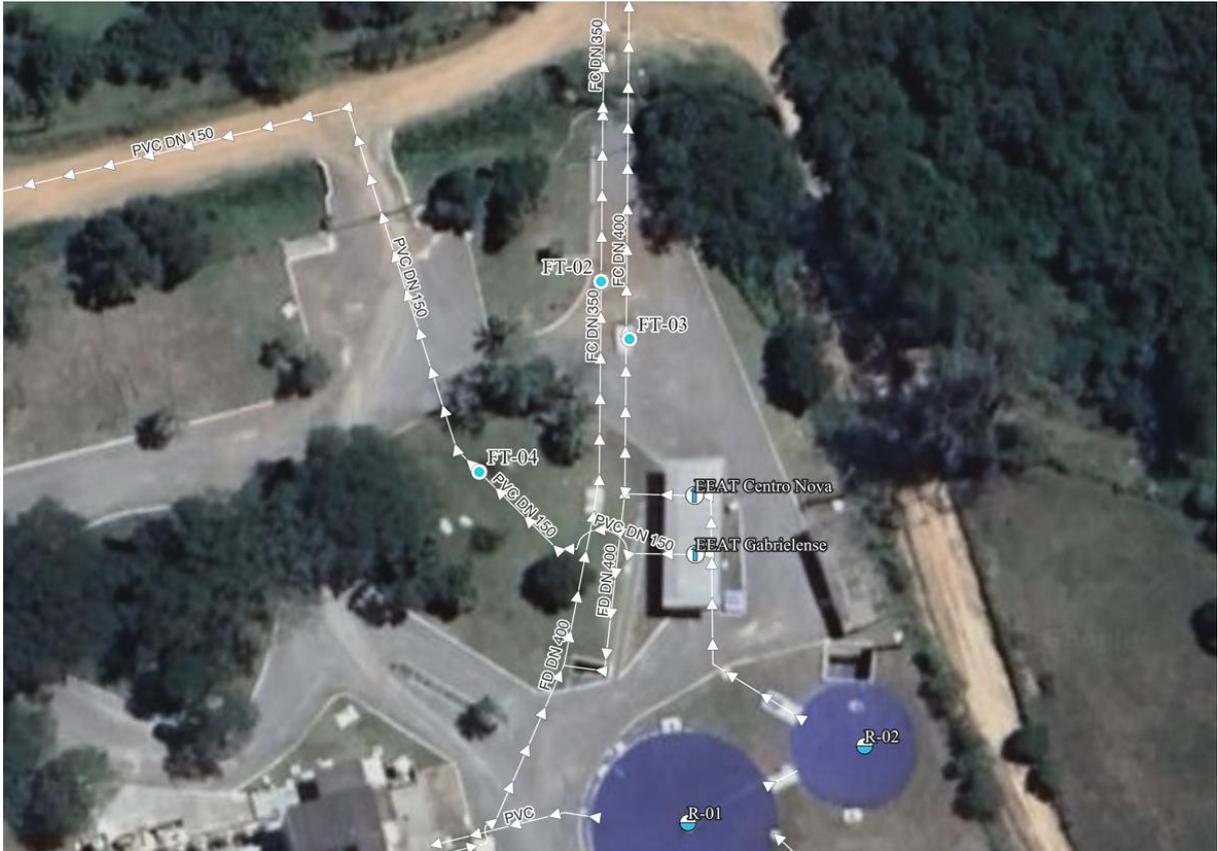
Fonte: Adaptado de São Gabriel Saneamento (2022a)

No sistema distribuição há diversos sensores para monitoramento por telemetria de pressão, vazão e nível de água dos reservatórios. Cada reservatório possui um sensor de nível ultrassônico que se comunica diretamente com o Centro de Controle de Operação (CCO) da ETA a porcentagem de enchimento do reservatório.

Os sensores utilizados para medição de vazão são chamados de *flow telemetry* (FT) traduzido como telemetria de vazão e é denominado pelas letras FT no sistema interno da São Gabriel Saneamento. Para cada adutora das elevatórias localizadas na ETA existe um sensor ultrassônico para medição de vazão instantânea, apresentados conforme a Figura 22.

O FT-02 está associado a vazão da adutora do Centro de 350 mm, o FT-03 está associado a vazão da adutora do Centro de 400 mm e o FT-04 está associado a vazão da adutora do Gabrielense de 150 mm.

Figura 22 – Associação FT para cada adutora.



Fonte: Adaptado de São Gabriel Saneamento (2022a).

Os pontos de pressão são chamados de *pressure telemetry* (PT) traduzido como telemetria de pressão e são denominados pelas letras PT

Os medidores de pressão (PT) são sensores de pressão eletrônicos da Marca Schneider e são utilizados como balizadores para a operação do sistema de distribuição. Os operadores do sistema são capazes de identificar quando os sensores apresentam um comportamento inesperado e rapidamente buscar um diagnóstico para o problema. A localização de todos os PTs está apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Localização dos PTs



Fonte: Adaptado de São Gabriel Saneamento (2022a).

### 3.3 MÉTODO

O método adotado para a realização da análise crítica consiste em:

1. Avaliar o conjunto de dados e informações referentes a operação das unidades operacionais do sistema de distribuição de água da empresa São Gabriel Saneamento que foram disponibilizadas para a empresa Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente para elaboração do modelo hidráulico e contrastar com o conjunto de dados e informações que foram efetivamente utilizados pela empresa responsável para elaboração;
2. Identificar as inconsistências entres os dois grupos de dados e informações;
3. E avaliar criticamente as inconsistências versando com recomendações da literatura
4. Verificar os resultados da simulação do sistema de distribuição de água com as medições reais;
5. Elencar sugestões para aperfeiçoar o modelo hidráulico;

### **3.3.1 Informações e Dados da Operação do Sistema de Distribuição de Água**

#### **3.3.1.1 Demanda de água**

O sistema comercial da empresa São Gabriel Saneamento possui a base cadastral de todos os clientes e ligações de água. Entre as informações das ligações de água estão o consumo mensal lido em cada hidrômetro. Desta forma, foi disponibilizado o volume consumido por cada uma das ligações e a associação dos respectivos hidrômetros a suas coordenadas geográficas para o mês de dezembro de 2021. Segundo Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a), os dados fornecidos continham 21.110 ligações e a vazão total média medida nos hidrômetros foi de 110,75 L/s.

Ainda relacionado a vazão do sistema, segundo São Gabriel Saneamento (2022d) o índice de perdas para dezembro de 2021 foi de 36,9%, enquanto para janeiro de 2022 o índice foi de 29,8%. Este possui volume relacionado as perdas, não sua localização definida, bem quanto se refere-se a perdas reais e/ou perdas comerciais.

#### **3.3.1.2 Cadastro técnico**

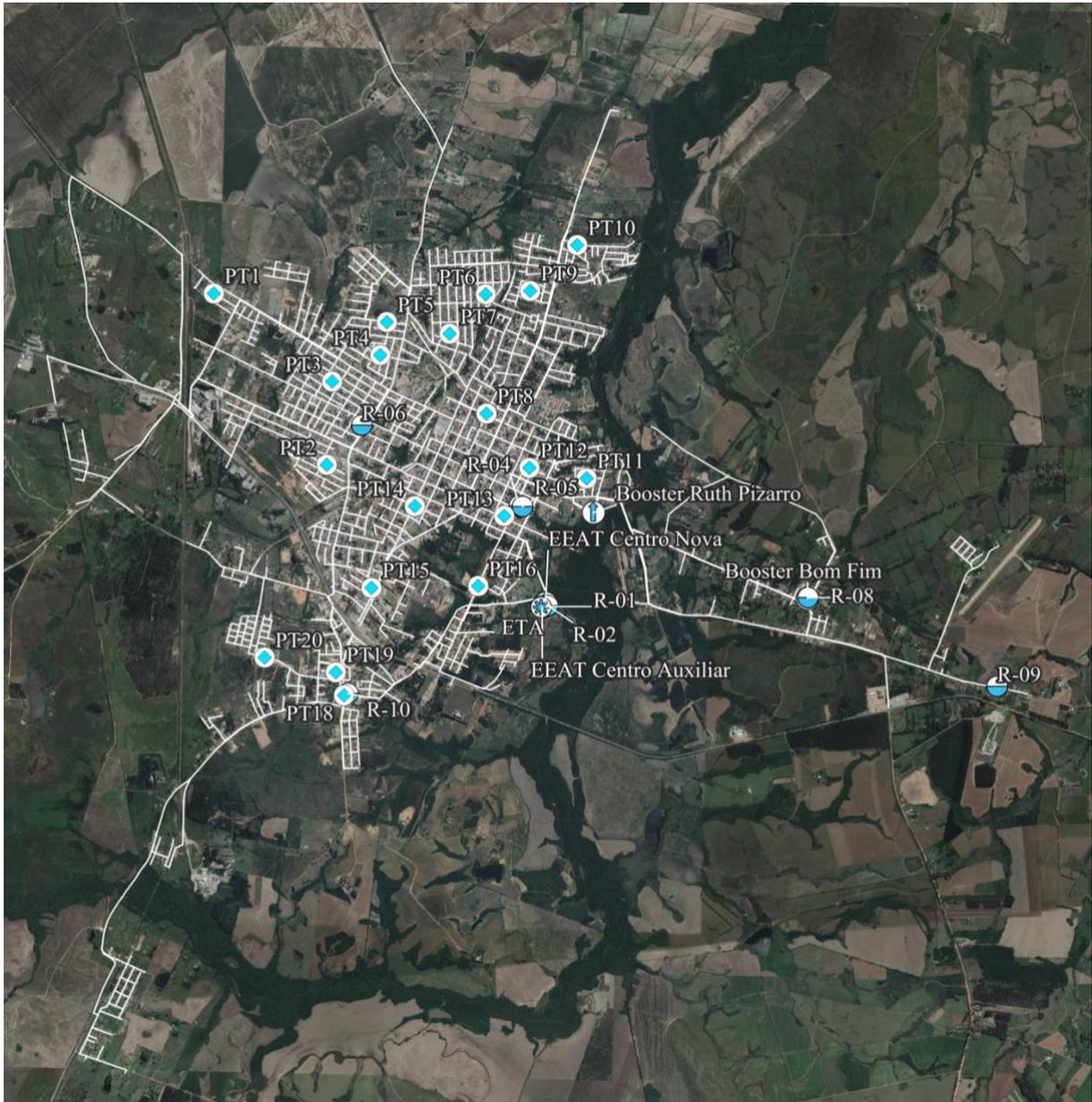
Para os dados físicos, foi disponibilizado o cadastro técnico elaborado pela Geomon Ambiental (2013) e o cadastro técnico georreferenciado adaptado por São Gabriel Saneamento (2022a). O cadastro técnico contém o traçado da rede de abastecimento de água, a posição georreferenciada das tubulações, diâmetros nominais e materiais, a localização das válvulas e seus tipos (válvula gaveta e VRP), a localização dos reservatórios, as cotas dos níveis de água mínimo, médio e máximo e a localização das estações elevatórias (SÃO GABRIEL SANEMAENTO, 2022).

A rede de distribuição possui condutos de fibrocimento para as redes primárias e PVC para as redes secundárias e redes primárias de reforço (GEOMON AMBIENTAL, 2013; SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022).

As válvulas instaladas no sistema de abastecimento de água são todas do tipo gaveta, que são utilizadas como válvulas de manobra, e seus diâmetros são os mesmos das tubulações em que estão conectadas. As VRPs instaladas são do tipo válvula de altitude, no entanto nenhuma está em operação e as válvulas de manobra existentes operam na posição aberta, desta forma elas não serão apresentadas em detalhamento (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022).

A Figura 24 mostra a localização de todas as unidades operacionais e PTs do sistema de distribuição de água.

Figura 24 – Cadastro técnico do sistema de distribuição de água



Fonte: São Gabriel Saneamento (2022a).

### 3.3.1.3 Reservatórios

No sistema, o reservatório R-03, localizado na ETA, é utilizado somente para a lavagem dos filtros do sistema produtor de água (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, [201-]) e, portanto,

não foi levado em consideração para a estruturação do modelo hidráulico. Os reservatórios R-01 e R-02 funcionam como um amortecedor de vazão, para a vazão consumida e a vazão produzida. Os reservatórios R-04 e R-05 estão localizados no mesmo terreno e possuem o mesmo volume, mas estão em cotas diferentes e possuem formatos diferentes, contudo, estão conectados entre si e operam como se fossem um único reservatório (GEOMON AMBIENTAL, 2013).

O Quadro 4 apresenta um resumo das informações dos reservatórios.

Quadro 4 – Resumo das informações dos reservatórios

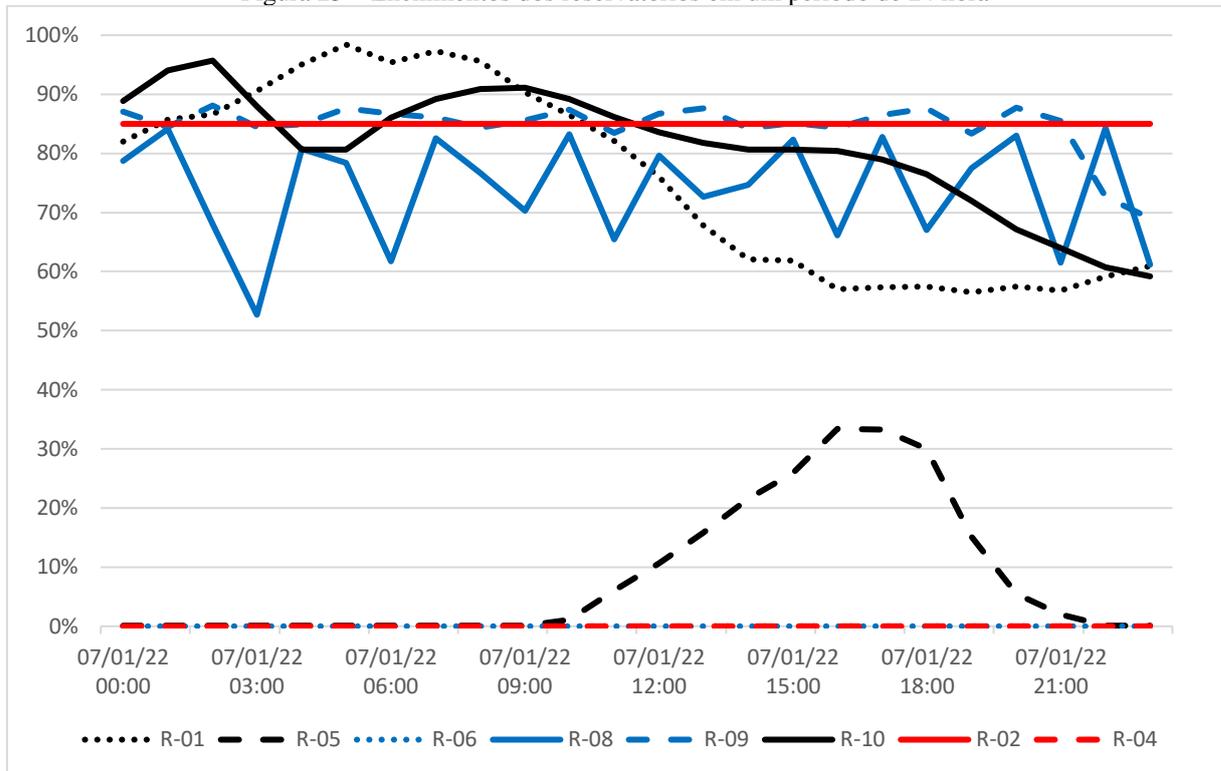
(Reservatórios)	Altura do fundo acima do terreno (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Nível mínimo (m)	Nível médio (m)	Nível máximo (m)
R-01	- 4	1500	93,72	95,72	97,72
R-02	- 4	650	93,72	95,72	97,72
R-03	-	130	-	-	-
R-04	13	250	139,7	141,7	143,7
R-05	16	250	139,7	141,7	143,7
R-06	17,5	500	138,6	140,6	142,6
R-08	10	100	143	145	147
R-09	4,5	30	-	-	-
R-10	5,5	500	143	145	147

Fonte: Adaptado de São Gabriel Saneamento (2022b).

Os reservatórios elevados são todos do tipo Intze, exceto o reservatório R-09, que é circular e de fibra de vidro (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, [201-]), no entanto não se tem acesso aos seus projetos construtivos originais para determinação exata de seus volumes, altura de nível de água e conseqüente determinar a curva de enchimento deles. As informações existentes referentes aos reservatórios é o seu volume aproximado e nível de água mínimo, médio e máximo (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022b).

Outra informação relevante aos reservatórios está na variação no nível de água. Esses dados são expressos em porcentagem e o nível de água pode ser obtido pela multiplicação pela altura do compartimento. A Figura 25 mostra a operação de enchimento e esvaziamento dos reservatórios no período de 24 horas. Nos reservatórios elevados, o sensor de nível aponta para o centro, e como estes são do tipo Intze, ele somente passa a ler o nível de água que está acima da calota esférica do fundo, gerando um volume que não é efetivamente medido (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022b).

Figura 25 – Enchimentos dos reservatórios em um período de 24 hora



Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b)

Nota-se que o R-04 e R-06 permanecem sempre com enchimento em 0%, e R-02 em 85%. Isto pode ser explicado pelo fato de o R-04 e o R-02 não possuírem sensores para medição de nível, uma vez que operam em paralelo com outros reservatórios que já possuem medição, sendo, respectivamente, R-05 e R-01, ou seja, o grau de enchimento pode ser considerado o mesmo. O sensor do R-06 está em funcionamento, no entanto não há pressão suficiente na rede para que a água alcance o nível mínimo para o sensor realizar a medição (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022b).

#### 3.3.1.4 Bombas

Todas as estações elevatórias do município utilizam inversor de frequência para controle de velocidade dos motores com o objetivo de reduzir a vazão de recalque e o excesso de pressão na rede (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022b) e, por consequência, a redução do consumo de energia. O Quadro 5 apresenta a relação da bomba instalada em cada estação elevatória e os dados de operação ótima segundo o fabricante das bombas.

Quadro 5 – Bombas instaladas no sistema de abastecimento de água

Elevatórias	Bomba	Dados de Operação Ótima		
		Rotação (rpm)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	AMT (mca)
EEAT Gabrielense	KSB METN 80-50-200GG	3560	27	87,5
EEAT Centro Nova	KSB METN 250-200-400GG	1791	162	60
Booster Ruth Pizarro	KSB MEGANORM 080-050-125GG	3545	68,4	30,5
Booster Bom Fim	KSB MEGANORM 050-032-125GG	3487	20,88	25
EEAT Centro Auxiliar	WORTHINGTON 6 LN-18	1460	262	67

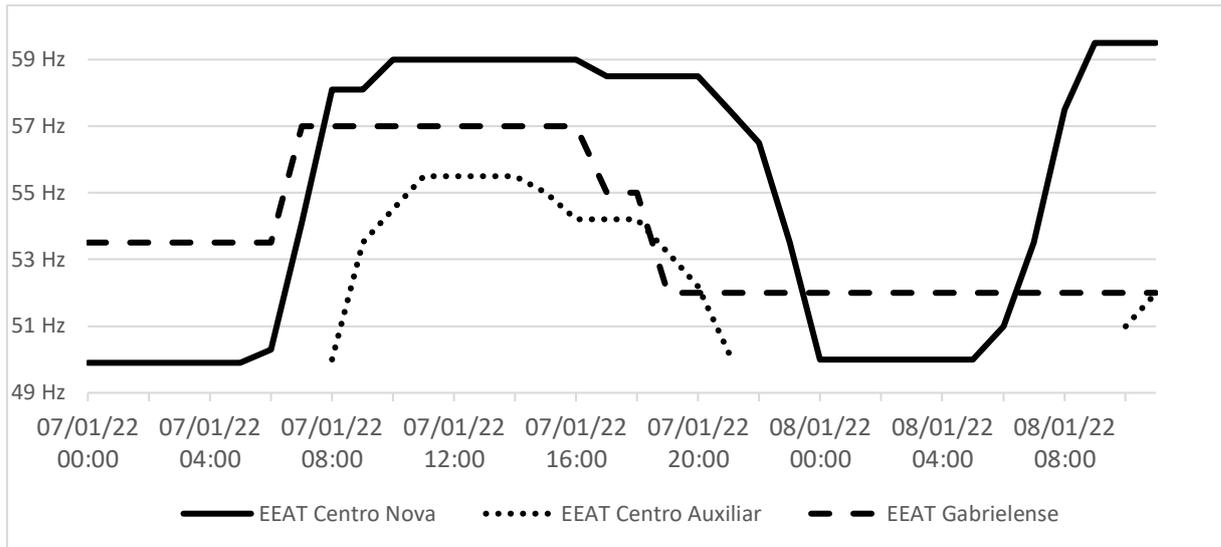
Fonte: Adaptado de São Gabriel Saneamento (2022b).

As bombas da EEAT Centro e Gabrielense ocupam a mesma casa de bombas, localizada na ETA, que possui uma profundidade de aproximadamente 4 m (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022d). A bomba da EEAT Centro Auxiliar está localizada no prédio principal da ETA e está a uma profundidade de aproximadamente 1,5 m do nível do terreno (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, [20--])

A frequência de operação dos motores dos *boosters* é fixa, sendo o Booster Ruth Pizarro operado a 45 Hz e o Booster Bom Fim a 60 Hz (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022b). A Figura 26 indica o histórico da frequência da operação dos motores para as demais elevatórias. Foram enviadas também a curva característica das bombas listadas, exceto a EEAT Centro Auxiliar a qual não foi localizado o arquivo, no entanto não foi especificado o diâmetro do rotor utilizado em cada bomba (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022e).

De início, não foi possível relacionar a frequência de operação dos motores com uma determinada vazão em virtude de que as bombas estão conectadas diretamente a rede de distribuição, por tanto a pressão de recalque varia constante e a vazão não pôde ser determinada.

Figura 26 – Frequência de operação dos motores



Fonte: Adaptado de São Gabriel Saneamento (2022b).

### 3.3.1.5 Medições de campo

Foram realizadas coletas de dados de vazão e de pressão referentes ao sistema de distribuição que são utilizados para realizar a calibração do modelo hidráulico. Para a vazão, foram fornecidos os dados dos três sensores das adutoras de saída da ETA referentes as elevatórias Centro e Gabrielense (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022b).

Conforme apresentado anteriormente no tópico referente ao Modo de Operação do sistema de distribuição, as adutoras das EEAT Centro possuem tubulações de fibrocimento em diâmetro nominal de 350 e 400 mm associadas aos sensores FT-02 e FT-03 respectivamente. A adutora da EEAT Gabrielense possui tubulação de PVC de diâmetro nominal de 150 mm e está associadas ao sensor FT-04 (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022a).

O vínculo dos sensores FT para cada adutora pode ser identificada na Figura 27, no entanto estas não estão representadas na localização correta e o ponto demarcado é meramente ilustrativo. A vazão instantânea de cada adutora é apresentada na Figura 28.

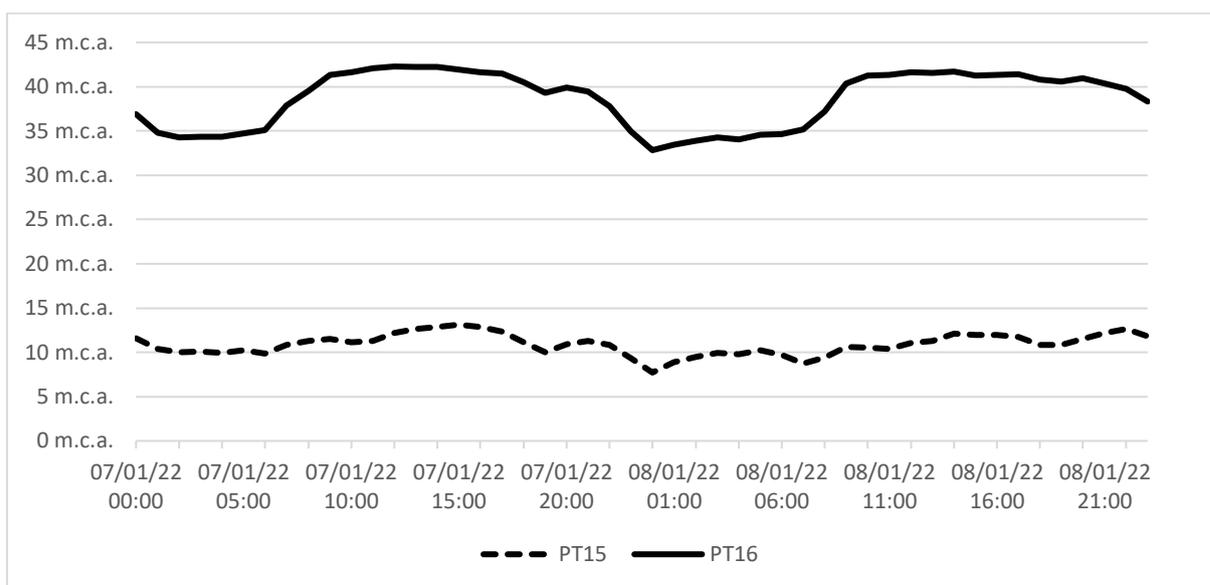
Figura 27 – Localização dos sensores FT.



balizadores da operação de abastecimento (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, [2015]). A Figura 29 mostra o gráfico das pressões nesses dois pontos.

Os gráficos dos demais PTs pode ser encontrado no Apêndice A.

Figura 29 – Gráfico PT 15 e PT16



Fonte: Adaptado de São Gabriel Saneamento (2022b).

## 4 RESULTADOS

A partir dos dados e informações apresentados no item anterior, a empresa SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, (2023b) elaborou o modelo hidráulico computacional do SAA, selecionando os dias 7 e 8 de janeiro para a calibração do modelo, sendo estes os dias em que os dados de operação disponíveis não apresentaram falhas de medição durante o decorrer do período. A empresa Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a) considerou para a calibração do modelo um erro médio de 20% entre os dados de calibração e os resultados obtidos da simulação hidráulica do sistema.

A apresentação dos dados e informações utilizados durante as etapas da elaboração do modelo e as inconsistências identificadas entre o conjunto de dados e informações fornecidos serão apresentados a seguir juntamente com a análise crítica dessas inconsistências e, ao final, será apresentado os resultados de calibração do modelo hidráulico elaborado pela Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a, 2023b).

### 4.1 INCOSISTÊNCIAS E ANÁLISE CRÍTICA

#### 4.1.1 Demandas

A demanda de água de cada ligação foi atribuída ao respectivo trecho de rede em que está conectada com seu respectivo consumo dividido entre os dois nós em que se encontra tal trecho de rede. Para isso foi utilizada a ferramenta “Service Connection” do plugin QGISRED (REDHISP; WaterPi, 2022) para QGIS (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023a).

Segundo Bentley (2019), este método é indicado como mais preciso para alocação de demandas se comparado a atribuição para o nó que esteja localizado mais próximo ao consumo, pois é possível que o nó mais próximo não seja correspondente ao trecho em que a demanda está conectada.

A vazão total média de consumo foi de 110,75 L/s e a vazão de perdas utilizada para o modelo hidráulico foi referente ao índice médio de perdas de janeiro de 2022 de 29,8%, totalizando 47 L/s. Desta forma, a vazão total do sistema ficou em 157,75L/s (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023a).

No entanto, o consumo utilizado para as demandas de água no modelo hidráulico foi referente ao mês anterior aos dados utilizados para calibração. Enquanto o consumo é referente ao mês de dezembro de 2021, o índice de perdas utilizado refere-se ao mês de janeiro de 2022.

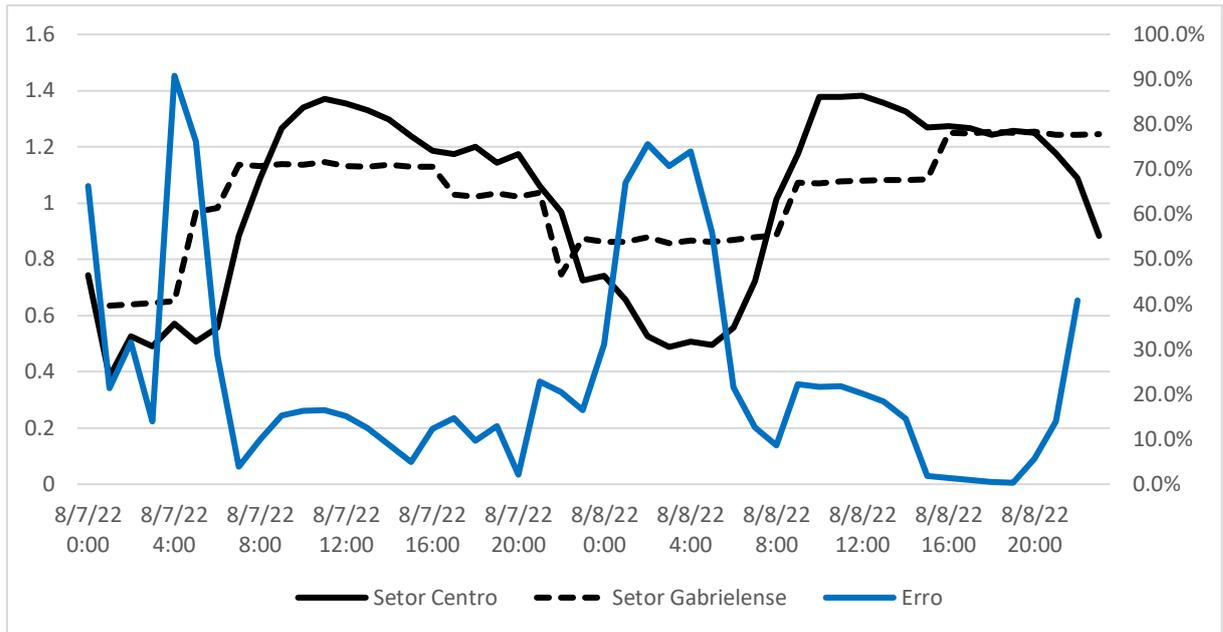
Conforme São Gabriel Saneamento (2022b) o consumo total de água lido nos hidrômetros para o mês de janeiro de 2022 foi de 279.766 m<sup>3</sup> de água, o que resultaria em uma vazão média de 107,93 L/s.

O consumo medido das ligações utilizadas referente ao mês de dezembro foi 2,61% acima do mês utilizado para calibração, o que resulta em um acréscimo médio de 4,77 % na perda de carga conforme equação de Hazen-Williams. Tendo em vista que não se tem plena ciência da condição operacional de todas as tubulações no sistema esse aumento da perda de carga poderia ser atribuído as incertezas de alocação dos coeficientes de rugosidade dos trechos.

O padrão de consumo utilizado para todas as ligações de água seguiu o comportamento da vazão de saída das adutoras do centro EEAT Centro Nova e Auxiliar que foram medidas pelos sensores FT-02 e FT-03 e o padrão foi determinado por meio dos coeficientes de variação de vazão horária em função da vazão média diária (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023a).

Desta forma não houve separação quanto ao padrão de demanda para os diferentes setores do sistema de abastecimento reproduzindo diferenças no consumo de aproximadamente 90% as 5h do dia 07/01/2022 e aproximadamente 75% durante a madrugada do dia 08/01/2022 conforme Figura 30. De forma geral, o erro médio dos erros medidos ficou em 24,4%, porcentagem acima do que é considerado como calibrado para o modelo hidráulico.

Figura 30 – Erro calculado entre o padrão de demanda Centro e Gabrielense



Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a) e Autor (2023)

É possível buscar mais exatidão ao padrão de demanda segregando ligações comerciais das residências, apesar de não ter sido fornecida tal informação. Como as ligações comerciais, em alguns casos, não ocorre fora dos dias úteis, é possível que haja reduções médias de 15% nos finais de semana para as regiões que possuem maior densidade de ligações comerciais.

É possível identificar no modelo hidráulico que o padrão de demanda das perdas foi considerado como sendo constante ao longo do dia e distribuída igualmente entre todos os nós do modelo hidráulico (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023b).

Essa alocação de perdas pode não refletir a realidade, uma vez que as redes de distribuição sofrem variações de vazão e pressão ao longo do dia. Ao utilizar uma vazão constante para todos os nós, independentemente das condições de operação, o resultado gera uma superestimação e subestimação das vazões em diferentes períodos da simulação, visto que a vazão por um orifício, ou fissura, varia conforme a pressão no local.

Para que a vazão simulada da perda se aproxime da vazão real de perdas, é possível utilizar a ferramenta do EPANET 2.2 de coeficiente de descarga dos nós, desta forma a vazão possuirá relação direta com a pressão ao considerar a vazão de perda como uma descarga para a atmosfera por meio de um orifício. No entanto, não há levantamento quanto a localização das perdas de água na distribuição, quantidade ou magnitude dos vazamentos existentes para realizar uma distribuição de vazão precisa.

#### 4.1.2 Rede de distribuição

Inicialmente, o cadastro da rede de distribuição georreferenciado foi transferido para o programa QGIS e as informações foram manipuladas para que coincidissem com os objetos utilizados pelo EPANET (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023a). Como o cadastro técnico do sistema de distribuição de água é georreferenciado, o traçado da rede estava em escala real e por tanto pode ser utilizado para manipulação para extração do comprimento de cada trecho. Ademais, as informações quanto ao processo de tratamento dos dados de diâmetro e material não foram especificados no relatório produzido pela empresa Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

As características das tubulações presentes no cadastro técnico foram classificadas por seu material, diâmetro nominal, diâmetro interno e coeficiente de rugosidade, sendo considerados coeficientes para tubos novos e tubos existentes (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023a).

Essa etapa do tratamento de dados resultou na conversão do diâmetro nominal, presente no cadastro técnico, em diâmetro interno, sendo este o diâmetro correto a ser utilizado no EPANET para realizar os cálculos hidráulicos da rede.

O coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams utilizado para todos os condutos de PVC foi de 130 e para condutos de fibrocimento de 120 (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023a). Como não foram indicados a idade da rede de distribuição, a Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a) considerou o pior cenário, onde no relatório os coeficientes de Hazen-Williams são classificados com “novos” e “existentes”, sendo optado pelo “existentes”. No entanto, na literatura mais recente, já existem dados atualizados para os coeficientes de rugosidade discriminados por diâmetros. Considerando o cenário mais crítico para tubulações com mais de 20 anos e diâmetros menores de DN 125, o coeficiente de rugosidade para PVC seria de 132,5, para  $125 < DN < 550$  o coeficiente é de 135 e fibrocimento de 125.

O uso dos coeficientes desatualizados e sem a classificação dos coeficientes por diâmetro gera diferenças na perda de carga de 3,6%, 7,2% e 7,8% respectivamente que, apesar de não se saber as datas exatas de todas as tubulações, a São Gabriel Saneamento (2022e) assumiu a operação da rede de distribuição na assunção dos serviços sem o devido conhecimento das condições operacionais e estruturais dessas tubulações, sendo esta uma incerteza mais significativa para determinação do coeficiente que o erro identificado pela atualização dos coeficientes.

Conforme o modelo hidráulico da Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023b), as duas adutoras de saída da ETA para a região central foram desenhadas conforme o cadastro técnico da São Gabriel Saneamento (2023a), no entanto a simulação considerou somente a adutora de 400mm em funcionamento, enquanto a adutora paralela a ela, de 350 mm, permaneceu desativada. Essa alteração provavelmente foi realizada para facilitar o processo de calibração do sistema, visto que na realidade existem dois pontos de medição de vazão, combiná-los em um trecho único facilitaria o acompanhamento da elaboração do modelo hidráulico.

Ainda, essa alteração desvia todo o fluxo para uma adutora (marcação em roxo na Figura 31) de forma que há um aumento da perda de carga na tubulação, elevação da altura manométrica na bomba e redução da vazão, além de causar uma alteração do fluxo da água a jusante, onde a adutora de 400 mm é interligada na adutora de 350 mm, que precisa inverter o sentido do fluxo para seguir o abastecimento pela rua Plácido de Castro conforme mostra a Figura 32. A adutora apresentada na Figura 32 é o trecho final da adutora de 400 mm apresentada na Figura 31. As adutoras são contínuas e não apresentam qualquer desvio no seu traçado entre as duas figuras.

Figura 31 – Comparação traçado da adutora real versus simulado



Fonte: São Gabriel Saneamento (2022)

Figura 32 – Conexão da adutora afetada



Fonte: São Gabriel Saneamento (2022).

A empresa Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a) extraiu o relevo do município do modelo digital de elevação (MDE) do programa *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023a).

O MDE do ASTER não é o mais indicado para a aplicação em escala urbana, aproximadamente 1:2000, uma vez que apresenta grande erro quando comparada com outros MDEs como Cartas, WORDLDEM ou ALOS.

Para a criação do MDE e a extração das cotas, o relatório da Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a) não especificou os métodos utilizados.

Ao avaliar os nós do modelo hidráulico da Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023b), a cota utilizada para os nós da rede de distribuição é referente a cota do terreno extraída do modelo digital de elevação, exceto para os nós localizados no terreno da ETA, onde foram utilizados as informações da cota do nível de água máximo dos reservatórios enterrados da ETA, R-01 e R-02, presentes no cadastro técnico, como referência para a cota do terreno no local, visto que a cota do nível de água máximo seria equivalente a cota do terreno, cota a qual não se tem informação a qual sistema de referência pertence.

As correções desses nós é fundamental, principalmente quando há o uso de bombas nessas locais, como é o caso das EEAT Centro e Gabrielense, em virtude de que o uso de cotas com referenciais cartográficos diferentes pode subestimar ou superestimar a pressão de recalque das bombas o que acarretará uma diferença na vazão recalçada por elas.

Outro ponto importante para essas elevatórias é a profundidade da casa de bombas, que esta localizada abaixo do nível do terreno, portanto a cota das bombas deve ser corrigida também pela diferença na profundidade da instalação de 4 m para a EEAT Centro Nova e EEAT Gabrielense e de 1,5m para EEAT Centro Auxiliar.

Para as peças acessórios da rede de distribuição, não foi identificado no relatório ou no modelo hidráulico da Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a, 2023b) indicativos da alocação de coeficientes de perdas localizadas. Como a rede de distribuição é composta por diversos trechos de grandes extensões que percorrem o comprimento de uma rua, as perdas de cargas localizadas apresentam-se em magnitude muito inferior as perdas de cargas distribuídas, por tanto a inclusão desses coeficientes não causaria impacto significativo na simulação hidráulica.

#### **4.1.3 Reservatórios**

A cota utilizada para os reservatórios R-01 e R-02 foram as mesmas apresentadas no cadastro técnico (GEOMON AMBIENTAL, 2013) e para os demais reservatórios, assim como os demais nós do modelo, as cotas foram extraídas do MDE (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023b).

O volume dos reservatórios e o nível mínimo e médio é conhecido pelo cadastro do sistema existente (GEOMON AMBIENTAL, 2013), no entanto suas dimensões não foram fornecidas por não se ter acesso ao projeto original (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022e). Verificou-se pelo modelo hidráulico que o diâmetro utilizado para os reservatórios foi determinado com base nas informações existentes de volume e da diferença de altura da cota de nível de água máximo e mínimo. Todas as unidades do sistema foram consideradas com o formato cilíndrico (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023b).

Na ausência dos projetos originais dos reservatórios, o diâmetro determinado é suficiente para uso no modelo hidráulico, porém é interessante que essa medição seja posteriormente verificada a partir de medições realizadas em campo.

Não foram utilizadas curvas de enchimento para os reservatórios, visto que foram considerados com o formato cilíndrico, o que condiz com os dados de medição dos sensores

que mede somente acima do fundo convexo dos reservatórios Intze, porém no modelo hidráulico não é levado em conta este formato convexo do fundo. Também, sem o acesso aos projetos construtivos, não é possível mensurar a magnitude do impacto que este volume desconsiderado terá na simulação.

Ainda foi identificado que a cota de fundo dos reservatórios foram inseridas conforme os dados levantados em campo, exceto para R-01 e R-02 (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023b).

#### **4.1.4 Estações elevatórias**

A análise da cota das EEAT localizadas na ETA foi realizada no item 4.1.2 juntamente com as demais cotas do modelo hidráulico.

A EEAT Centro Auxiliar foi inserida na mesma casa de bombas da EEAT Centro Nova e EEAT Gabrielense, localização incorreta, e sua conexão na adutora não estavam de acordo com o cadastro técnico (SÃO GABRIEL SANEAMENTO, 2022a) conforme apresentada na Figura 31 anteriormente. O impacto dessa alteração não deve ser significativo para a simulação, uma vez que não estão sendo levados em consideração as perdas de cargas localizadas e a diferença de distância das duas localizações é em torno de 50 m, o que não gera uma perda de carga expressiva.

Apesar da localização da EEAT não afetar a simulação, os trechos da adutora na saída da ETA que foram alterados de forma que houvesse alteração na operação da adutora e na rede de distribuição conforme apresentado com mais detalhamento no item 4.1.2.

A curva das bombas utilizada foi gerada automaticamente pelo EPANET 2.0 a partir de uma extrapolação do ponto ótimo de funcionamento de cada bomba pela falta de informação referente ao rotor utilizado em cada bomba (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023b).

É possível realizar a identificação do diâmetro dos rotores utilizados nas bombas e a partir da curva das bombas fornecidas será possível utilizar inúmeros pontos para representar a real curva da bomba no programa, que representarão o comportamento da bomba prevista pelo fabricante e pelo projeto das EEATs.

A frequência de operação dos motores pôde ser verificada no modelo hidráulico da Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023b) e identificado que os *boosters* estão utilizando as respectivas frequências de operação reais para seus motores na simulação, no entanto para

as demais elevatórias este dado não foi utilizada de acordo com os dados reais, sendo utilizados valores diferentes.

Para as EEAT Centro foi optado pelo uso de frequências em que o resultado da vazão das bombas coincidissem com os sensores de calibração FT-02 e FT-03 (adutora do setor Centro) e para a EEAT Gabrielense a variação da frequência do motor da bomba foi definida de acordo com o nível do reservatório R-10, que está diretamente ligado a adutora.

Desta forma, a vazão da adutora das EEAT Centro Nova e Auxiliar ficaram calibradas conforme as medições de vazão e nível de reservatório respectivamente.

Na situação da EEAT Gabrielense, percebe-se que apesar da variação do nível do reservatório R-10 estar semelhante ao nível de água simulado, a vazão de saída da adutora não corresponde aos valores observados em campo, indicando que há imprecisão das informações que deram origem a elaboração do modelo hidráulico, como por exemplo o padrão de demanda, conexões não apresentadas no cadastro técnico ou alocação errada de demandas.

#### **4.1.5 Calibração**

O único reservatório em que a calibração foi efetivamente trabalhada foi o R-10 conforme apresentado anteriormente. Os demais reservatórios tiveram seu comportamento condizente com as pressões da rede de distribuição.

## **4.2 RESULTADO DO MODELO HIDRÁULICO**

O processo de elaboração do modelo pela Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a) resultou na calibração das vazões, pressões e níveis de água dos reservatórios.

Para Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a), um ponto é considerado calibrado quando o erro médio do valor simulado for inferior a 20% em relação ao valor medido.

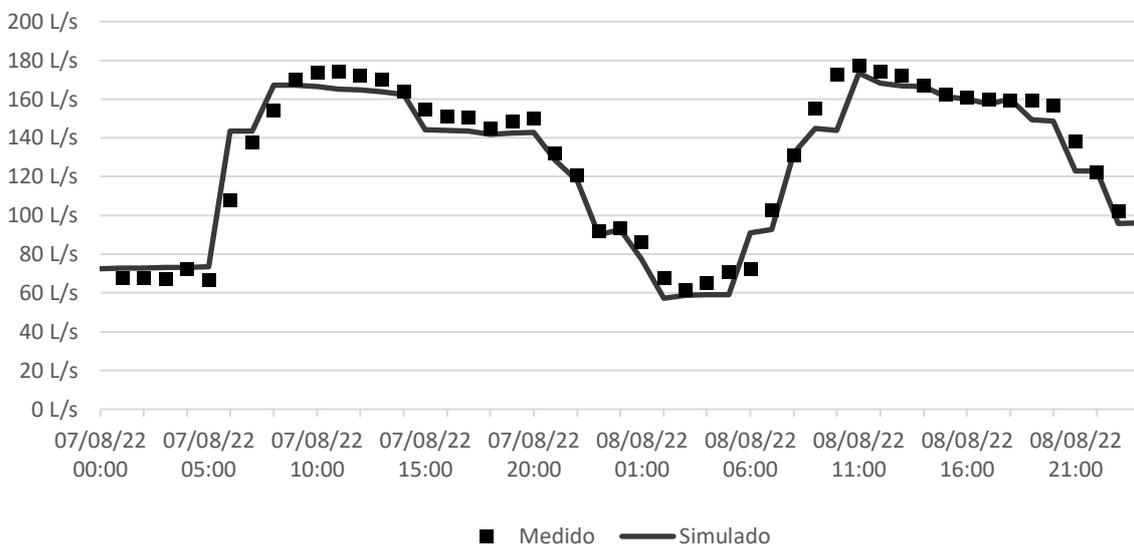
O erro médio é calculado pela determinação da média dos erros entre os valores simulados e os valores observados em campo e o coeficiente de correlação de Pearson é a métrica utilizada pelo EPANET 2.0 para definir a calibração dos dados simulados. Ele representa o grau de correlação entre duas séries de dados, onde valores próximos a 1 indicam bom grau de correlação e valores próximos 0 não há grau de correlação.

#### 4.2.1 Vazão

Observado que uma única adutora foi considerada na saída da ETA, os dados de vazão dos dois medidores, referentes as duas adutoras, foram somados e utilizados na adutora simulada (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023b).

Conforme a Figura 33, a vazão de saída total das duas EEAT Centro é semelhante a soma das vazões dos dois sensores, FT-02 e FT-03, uma vez que as bombas das EEAT Centro que recalcam água por essas adutoras foram configuradas para que a calibração fosse atingida.

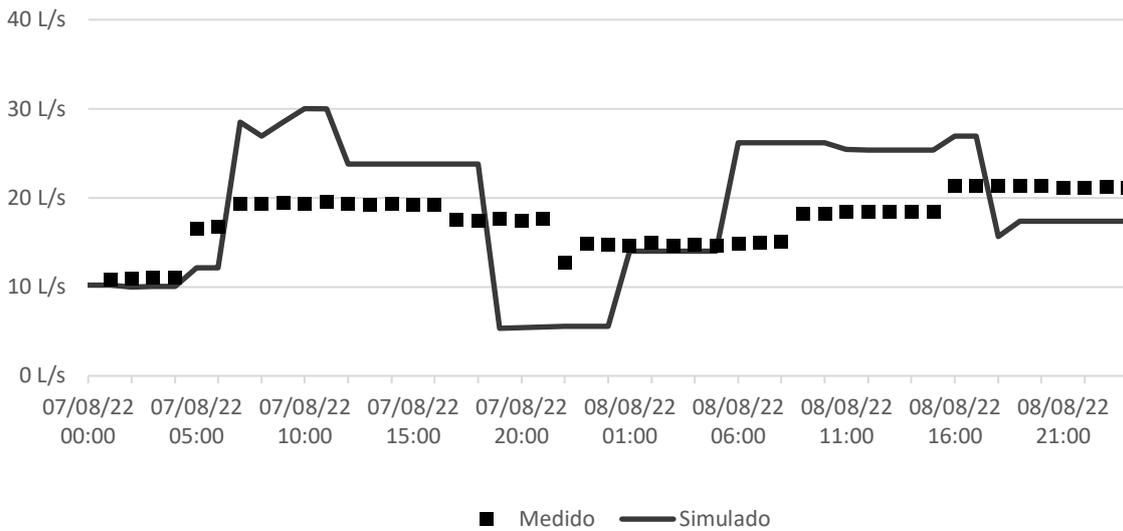
Figura 33 – Comparação vazão simulada versus vazão medida FT-02 e FT-03.



Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

A vazão do FT-04 não coincidiu com a vazão real medida em campo (Figura 34), visto que as bombas foram configuradas visando o reservatório R-10 a jusante da adutora, no entanto era esperado que, por consequência, a vazão também fosse calibrada, o que não aconteceu. Este fato pode se explicado pela utilização do padrão de demanda errado para o setor, conexões não apresentadas no cadastro técnico ou alocação errada de demandas.

Figura 34- Comparação vazão simulada versus medida FT-04



Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023b).

Os resultados obtidos para a calibração de vazão estão expressos no Quadro 6.

Quadro 6 – Calibração da vazão

Adutora	Erro médio	Correlação
FT-02 e FT-03	6,24%	0,97
FT-04	7,15%	0,51

Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

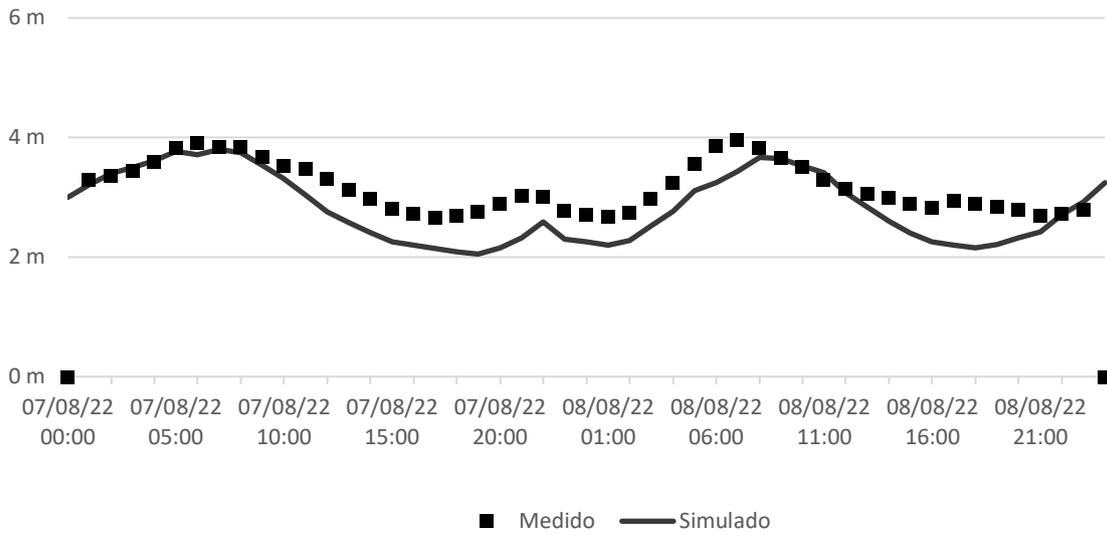
#### 4.2.2 Reservatórios

Para os reservatórios, o nível de água dos reservatórios R-01 apresentou comportamento semelhante ao observado em campo, seguindo as mesmas tendências de fluxo, porém é possível observar que há uma discrepância no nível de água com a passar do período da simulação conforme Figura 35.

O nível de água do reservatório R-10 apresentou bom ajuste da curva simulado e o medido em campo conforme Figura 36.

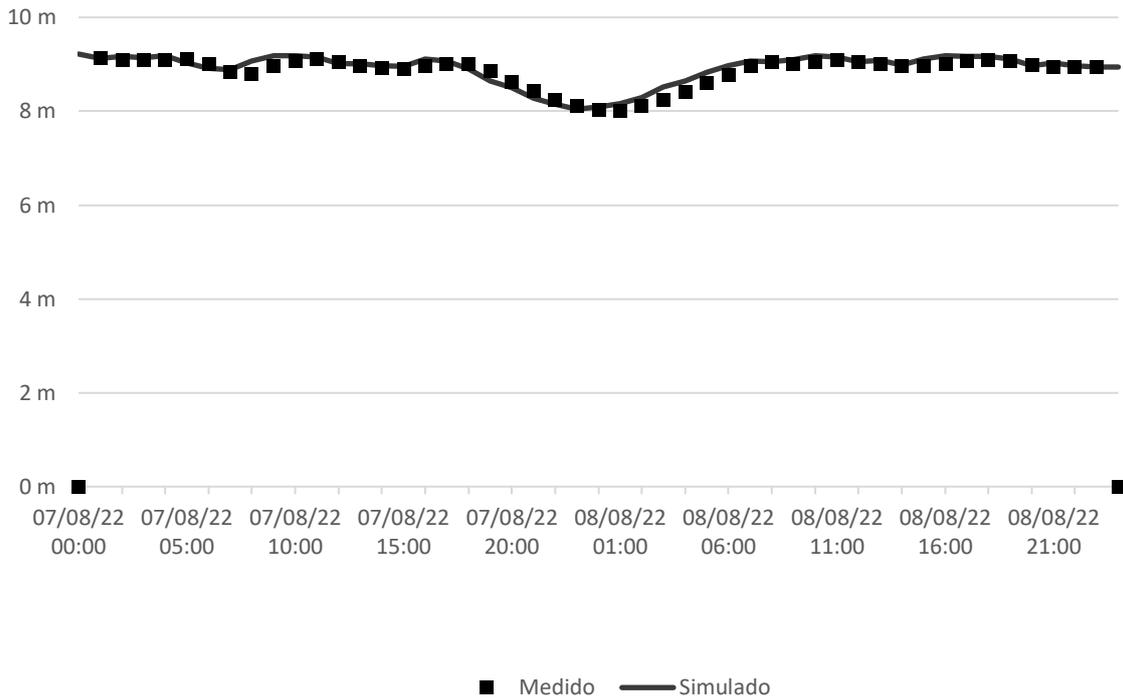
O gráfico do nível de água simulado e observado para os demais reservatórios pode ser encontrado no **Error! Reference source not found.**

Figura 35 – Calibração do reservatório fictício de R-01 e R-02



Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 36 – Calibração reservatório R-10



Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Os reservatórios não apresentaram erro médio superior a 20%, sendo um dos indicativos de que estão calibrados, entretanto, o grau de correlação dos reservatórios R-04 e R-05 ficou próximo de zero, o que indicaria que o comportamento do nível de água simulado não

corresponde ao comportamento real. Porém há uma ressalva a ser feita, o EPANET, mesmo que o reservatório não atinja o nível de água mínimo, ainda leva em consideração a pressão no local do reservatório (Figura 61 do **Error! Reference source not found.**), o que gera este erro no grau de correlação.

O R-08 e R-09 estão conectados a rede de distribuição onde há um *booster* instalado, por tanto o acionamento da bomba no período errado gera uma divergência no comportamento do nível de água, reduzindo o coeficiente de correlação.

Conforme expresso no Quadro 7.

Quadro 7 – Calibração dos reservatórios

<b>Reservatório</b>	<b>Erro médio</b>	<b>Correlação</b>
R-01 e R-02	8,4%	0,74
R-04 e R-05	11,7%	0,05
R-06	0,0%	1,00
R-08	3,4%	-0,28
R-09	4,3%	0,19
R-10	1,4%	0,95

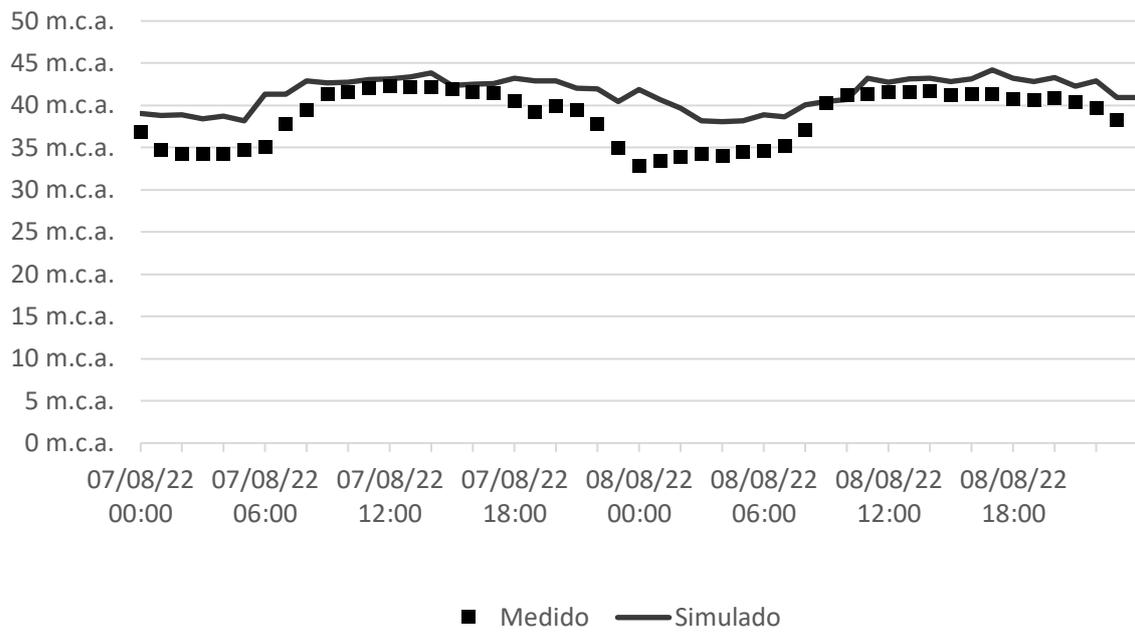
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

### 4.2.3 Pressão

Para a calibração do modelo, os dados dos PTs foram devidamente relacionados com os nós do modelo hidráulico onde estão localizados (SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2023a).

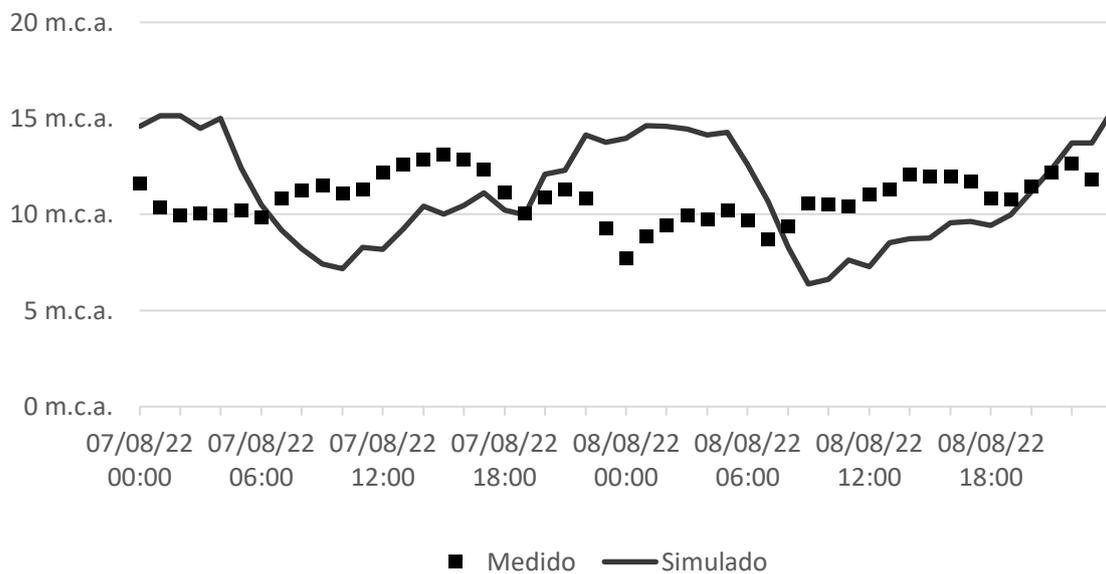
Os PTs apresentaram uma grande variação de resultados na calibração com alguns se aproximando dos dados observados, como o PT 16 (Figura 37) e outros com resultados opostos, como o PT 15 (Figura 38). O gráfico da calibração de todos os PTs pode ser encontrado no APÊNDICE D – CALIBRAÇÃO DOS PTS

Figura 37 – Calibração PT 16



Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 38 – Calibração PT 15



Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Pode-se notar que o PT-02, 12, 13, 14, 15 e 19 apresentaram coeficientes de correlação muito baixos, indicando que o comportamento da pressão não está de acordo com o comportamento observado em campo, indicando possivelmente uma falha no cadastro da rede de distribuição. Os PTs 14, 15 e 19 não ficaram calibrados, com um erro médio superior a 20%.

O PT 17 possivelmente apresenta defeito no sensor, uma vez que sua medição foi constante em todo o período dos dados de medição.

O erro médio encontrado para cada PT e seus coeficiente de correlação de Pearson estão apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 – Calibração dos PT

(continua)

PT	Erro médio	Correlação
PT-01	9,13%	0,56
PT-02	18,56%	-0,14
PT-03	8,62%	0,60
PT-04	14,18%	0,58
PT-05	11,31%	0,63
PT-06	10,70%	0,65
PT-07	12,74%	0,64
PT-08	19,38%	0,65
PT-09	13,72%	0,65
PT-10	13,56%	0,73
PT-11	17,90%	0,51
PT-12	8,95%	0,33
PT-13	15,60%	0,11
PT-14	32,60%	-0,43
PT-15	33,53%	-0,40
PT-16	6,36%	0,88
PT-17	61,89%	0,00
PT-18	13,74%	0,67
PT-19	24,81%	0,42
PT-20	16,04%	0,51

Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

## 5 RECOMENDAÇÕES

Diante do exposto, é notória a complexidade da infraestrutura um SAA e de sua operação, especialmente quando é necessário trabalhar com diversas variáveis de pressão, nível de reservatório e operação de bombas para manter o equilíbrio da rede e as condições de abastecimentos exigidos pela ABNT.

A partir da complexidade do sistema, surge a possibilidade do uso de novas tecnologias para acompanhar do desenvolvimento do saneamento, como é o caso dos modelos hidráulicos computacionais, tema deste estudo, cujo objetivo foi identificar no modelo hidráulico existente

do SAA do município de São Gabriel/RS, pontos de fragilidade e pontos de melhoria para se obter resultados mais consistentes.

Para realizar a avaliação do modelo hidráulico inicialmente se faz necessário entender a operação do SAA para que seja possível desmembrar a metodologia de elaboração do modelo e diagnosticar seus componentes físico e não físicos.

Desta forma, a análise seguiu da seguinte forma:

1. Operação do sistema
2. Demanda de água
3. Nós
4. Reservatórios
5. Trechos
6. Bombas
7. Calibração

Visto que a simulação hidráulica diz respeito ao fluxo da água, é interessante iniciar a análise pelo consumo de água do sistema completo, identificando a vazão total exigida das ligações, as vazões de perda e o padrão de demanda de cada uma e identificando os dados que foram utilizadas para determinação destas informações.

Os nós devem ser analisados com cuidado, pois possuem as configurações referentes as demandas de água, ou seja, o consumo no nó, o padrão de consumo e o coeficiente de descarga. Além disto, os nós também são os elementos que armazenam as informações das cotas, por tanto são elementos sensíveis para a avaliação dos resultados de pressão.

Os reservatórios, assim como o nó, possui informações de cota, para a cota do reservatório deve se ater ao referencial utilizado para os demais nós da rede de distribuição, pois a rede e os reservatórios, dependendo do tipo, localizam-se em locais diferentes relativos ao terreno. É importante que o nível de fundo, ou nível mínimo, do reservatório esteja correto, uma vez que este determina a cota a qual começará a ser armazenada água e que determinará a pressão nos nós em que ele abastece.

Os trechos da rede de distribuição devem ser verificados pelos seus diâmetros, coeficientes de rugosidade, coeficiente de perda localizada e o estado de abertura. As válvulas também devem ter seus diâmetros verificados, bem como seu tipo e se possui configuração ativa.

Para as bombas, a inserção da curva característica ditará o comportamento da bomba, sendo essencial para simulação do modelo correto da bomba. A regulação de velocidade,

utilizado no trabalho como a frequência de operação do motor, ditará se haverá alteração na curva característica da bomba, podendo aumentar ou diminuir a pressão e a vazão da bomba.

Por fim, a calibração indicará o resultado do modelo pela aproximação da simulação hidráulica com o SAA real, por meio do coeficiente de correlação de Pearson, gerado no próprio programa, e o erro médio calculado a partir dos dados gerados pela simulação.

Observados os dados medidos, informações disponibilizadas e os resultados do modelo hidráulico, a rede de distribuição se mostra em bom funcionamento, entregando as pressões mínimas e máximas exigidas pela legislação na maior parte da cidade, exceto pelo PT-15.

Os reservatórios R-04, R-05 e R-06 se mostraram insuficientes para SAA, com pouco volume armazenado neles, ou nenhum como no caso do R-06.

Analisando detalhadamente as informações fornecidas para elaboração do modelo hidráulico, a metodologia expressa no relatório da modelagem hidráulica entregue pela empresa e juntamente com o arquivo do modelo hidráulico, foi possível realizar um diagnóstico do modelo hidráulico por meio de uma avaliação crítica dos dados e informações utilizados.

Dentre os pontos levantados durante a realização deste estudo estão:

- Separação do padrão de consumo do setor Centro e Gabrielense;
- Classificação das demandas em Residencial e Comercial com adequação do padrão de consumo comercial para horário e dia comercial;
- Alteração da metodologia de distribuição de perdas, passando a utilizar o coeficiente de descarga dos nós;
- Corrigir a localização da EEAT Centro Auxiliar;
- Revisar a cota altimétrica das EEAT localizadas na ETA para utilizar o mesmo referencial dos demais nós do modelo;
- Corrigir o traçado e as ligações da adutora das EEAT Centro;
- Adequar a curva característica das bombas;
- Realizar medições de campo para verificar as dimensões dos reservatórios;
- Realizar levantamento de campo da rede de distribuição de água para identificar trechos e peças não cadastradas.

Entende-se que o levantamento da rede de distribuição seja um dos fatores mais relevantes para a calibração do modelo hidráulico, uma vez que a condução da água depende do traçado dos condutos. É essencial que o cadastro permaneça atualizado para que a calibração esteja sempre dentro dos parâmetros de precisão desejados.

Diante as alterações propostas, é esperado que haja melhorias no resultado da simulação, alcançando maior precisão e coerência na calibração do modelo hidráulico.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12586**: Cadastro de sistema de abastecimento de água. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12211**: Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133**: Execução de levantamento topográfico - Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626**: Instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229**: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9649**: Projeto de redes coletores de esgoto sanitário - Procedimento. Rio de Janeiro, 1986.
- AZEVEDO NETTO, José M. D. *et al.* **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1998.
- BAPTISTA, Márcio; LARA, Márcia. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.
- BENTLEY. **WaterGEMS CONNECTIONS Edition Help**. Exton, PA: Bentley, 2019.
- BRASIL. Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento.
- CHAGAS, C. S. et al. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 15, n. 2, p. 218-226, fev. 2010. ISSN 1807-1929. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/cMsFpP9T59xdNXKncvcpSzCc/?lang=pt#>. Acesso em 7 mar. 2023.
- COELHO, Sérgio T.; LOUREIRO, Dália; ALEGRE, Helena. **Modelação e análise de sistema de abastecimento de água**. Lisboa: LNEC, 2006.
- PEREIRA, Manoel F. A.; SALES, Lindolfo Neto O.; MEDEIROS, Djalma M. Modelagem hidráulica computacional como ferramenta de gestão para sistemas de abastecimento de água. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 29. 2018, São Paulo. **Anais eletrônicos** [...]. Rio Grande do Norte: UFRN, 2018. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/aesabesp/home>. Acesso em 7 mar. 2023.

COSTA, Juliana R. *et al.* Análise hidráulica da rede de distribuição de água da cidade de Jardim/CE a partir de modelo computacional. *In: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO DA ASSEMAE*, 49. 2019, Cuiaba. **Anais eletrônicos** [...]. Fortaleza: IFCE, 2019. Disponível em:

[https://sistema.trabalhosassemae.com.br/repositorio/2019/20/anais/Anais\\_49CNSA\\_Final\\_V1.pdf](https://sistema.trabalhosassemae.com.br/repositorio/2019/20/anais/Anais_49CNSA_Final_V1.pdf). Acesso em 16 mar. 2023.

COSTA, Adriana G. **Sistemas de abastecimento de água**. Fortaleza: Agência Nacional de Águas, 2015.

DIAS, José R. G. **Comportamento e dimensionamento estrutural de um reservatório elevado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016. p. 72.

Earth Resources Observation and Science Center. **USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled**. Reston, VA: USGS, 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non-void-filled>. Acesso em: 7 mar 2023.

FORMIGA, Klebber T.M. **Otimização multiobjetivo de projetos de redes de distribuição de água**. 2005. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. doi:10.11606/T.18.2016.tde-29012016-125410. Acesso em: 28 jan. 2023.

GEOMON AMBIENTAL. **Cadastro Rede de Água\_SG**. São Gabriel, RS: Geomon Ambiental, 2013.

HAFNER, Ana V. **Conervação e reúso de água em edificações - Experiências nacionais e Internacionais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

HELLER, Léo; DE PÁDUA, Valter L (org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. Belo Horizonte, ES: UFMG, 2010. 1 v.

HELLER, Léo; DE PÁDUA, Valter L (org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 2.ed. Belo Horizonte, ES: UFMG, 2010. 2 v.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/pt/inicio.html>. Acesso em: 01 fev. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **[Portal do] IBGE**. Rio de Janeiro: IBGE, [s. d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/10856-mde-modelo-digital-de-elevacao.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 7 mar. 2023.

LUNARDI, James; RABAIOLLI, Joel A. Valorização e preservação dos recursos hídricos na busca pelo desenvolvimento rural sustentável. **Revista Okara**, João Pessoa, v. 7, n. 1, p. 44-

62, mai. 2013. ISSN 1982-3878. Disponível em:  
<https://periodicos.ufpb.br/index.php/okara/article/view/15094/9135>. Acesso em 14 jan 2023

MACINTYRE, Archibald J. **Instalações hidráulicas: predias e industriais**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2010.

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometes. [Home] **ASTER**. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, [2---]. Disponível em:  
<https://asterweb.jpl.nasa.gov/index.asp>. Acesso em: 7 mar. 2023.

PEREIRA, J. S; FUJITA, R. H. **Uso de diferentes modelos digitais de elevação em mapeamentos urbanos: uma análise no município de Francisco Beltrão – PR**. [201-].

QI, Zhexian *et al.* A comprehensive framework to evaluate hydraulic and water quality impacts of pipe breaks on water distribution systems. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 54, n. 10, p. 8174-8195, out. 2018. ISSN 1944-7973. Disponível em:  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018WR022736>. Acesso em 16 mar. 2023.

Relatório de Estágio (Graduação Geografia Bacharelado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavél, [201-].

PORTO, Rodrigo D. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos, SP: EESC-USP, 2006.

REDHISP (coord); WaterPi. QGISRED. Versão 0.16. Valencia: WaterPi, 2022. Disponível em: <https://plugins.qgis.org/plugins/QGISRed/>.

ROCHA, Aristides. **História do saneamento**. 1. ed. São Paulo, SP: Blucher, 2016.

ROSSMAN, Lewis. **EPANET 2 User's Manual**. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2000a.

ROSSMAN, Lewis A. **Manual do Usuário**. Tradução: LEHNS. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2000b. Título original: EPANET 2 User's Manual.

SÃO GABRIEL. **Concorrência Pública 002/2011**. Compreende a concessão do Serviço Público de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário. São Gabriel, RS: Prefeitura Municipal, 2011.

SÃO GABRIEL. **Contrato 051/2012**. Contrato de Concessão para Exploração do Serviço Público de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário do Município de São Gabriel. São Gabriel, RS: Prefeitura Municipal, 2012.

SÃO GABRIEL SANEAMENTO. **059-22-Cadastro\_SANSYS-03**. São Gabriel, RS: São Gabriel Saneamento, 2022a.

SÃO GABRIEL SANEAMENTO. **Servidor Interno ETA**. São Gabriel, RS: São Gabriel Saneamento, 2022b.

SÃO GABRIEL SANEAMENTO. **Consumo total 21**. São Gabriel, RS: São Gabriel Saneamento, 2022c.

SÃO GABRIEL SANEAMENTO. **Servidor Interno**. São Gabriel, RS: São Gabriel Saneamento, 2022d.

SÃO GABRIEL SANEAMENTO. **Informação Interna**. São Gabriel, RS: São Gabriel Saneamento, 2022e.

SÃO GABRIEL SANEAMENTO. **Informação Interna**. São Gabriel, RS: São Gabriel Saneamento, [19--?].

SÃO GABRIEL SANEAMENTO. **Informação Interna**. São Gabriel, RS: São Gabriel Saneamento, [20--].

SÃO GABRIEL SANEAMENTO. **Informação Interna**. São Gabriel, RS: São Gabriel Saneamento, [201-].

SÃO GABRIEL SANEAMENTO. **Informação Interna**. São Gabriel, RS: São Gabriel Saneamento, [2015].

SAVIC, Dragan A.; KAPELAN, Zoran S.; JONKERGOUW, Philip M. R. Quo vadis water distribution model calibration?. **Urban Water Journal**, Reino Unido, v. 6, n. 1, p. 3-22, mar. 2009. ISSN: 1744-9006. DOI: <https://doi.org/10.1080/15730620802613380>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/221936223\\_Quo\\_vadis\\_water\\_distribution\\_model\\_calibration](https://www.researchgate.net/publication/221936223_Quo_vadis_water_distribution_model_calibration). Acesso em: 16 mar. 2023.

SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE. **Modelagem Hidráulica**: Sistema de Abastecimento de água São Gabriel/RS. Santa Cruz do Sul, RS: Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente, 2023a.

SUL MAGNA SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE. **060-22-ASH\_DIAG-02**. Santa Cruz do Sul, RS: Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente, 2023b.

SHAMMAS, Nazih K.; WANG, Lawrence K. **Abastecimento de água e remoção de resíduos**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2018.

TOMAZ, Plínio. **Aproveitamento de água da chuva**. 1. ed. São Paulo, SP: Navegar, 2003.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 2. ed. São Paulo, SP: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão de águas no Brasil**. Brasília, DF: UNESCO, 2001.

WALSKI, Thomas M. *et al.* **Advanced Water Distribution Modeling and Management**. Dayton: Civil and Environmental Engineering and Engineering Mechanics Faculty Publications, 2003.

## APÊNDICE A – NÍVEL DE ÁGUA DOS RESERVÓRIOS

A variação do nível de água dos reservatórios ao longo do período da simulação está apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 – Grau de enchimento dos reservatórios

(continua)

HORA	RESERVATÓRIOS (%)								
	R-01	R-02	R-03	R-04	R-05	R-06	R-08	R-09	R-10
07/01/22 00:00	82,0	85,0	11,4	0,0	0,1	0,0	78,7	87,1	88,9
07/01/22 01:00	85,7	85,0	53,4	0,0	0,1	0,0	84,1	84,5	94,0
07/01/22 02:00	86,6	85,0	0,4	0,0	0,1	0,0	68,0	88,1	95,7
07/01/22 03:00	90,6	85,0	35,1	0,0	0,1	0,0	52,7	84,5	88,0
07/01/22 04:00	95,1	85,0	89,1	0,0	0,1	0,0	80,8	84,9	80,7
07/01/22 05:00	98,4	85,0	62,0	0,0	0,1	0,0	78,4	87,6	80,6
07/01/22 06:00	95,4	85,0	36,1	0,0	0,1	0,0	61,7	86,7	86,0
07/01/22 07:00	97,3	85,0	0,1	0,0	0,1	0,0	82,6	86,1	89,2
07/01/22 08:00	95,6	85,0	24,6	0,0	0,1	0,0	76,7	84,4	90,9
07/01/22 09:00	90,3	85,0	77,3	0,0	0,1	0,0	70,3	85,6	91,1
07/01/22 10:00	86,5	85,0	39,5	0,0	1,1	0,0	83,2	87,4	89,2
07/01/22 11:00	82,1	85,0	0,1	0,0	6,1	0,0	65,5	83,5	86,2
07/01/22 12:00	76,0	85,0	26,6	0,0	10,7	0,0	79,6	86,7	83,6
07/01/22 13:00	67,8	85,0	59,2	0,0	15,8	0,0	72,7	87,6	81,8
07/01/22 14:00	62,1	85,0	0,1	0,0	21,6	0,0	74,7	84,3	80,7
07/01/22 15:00	61,8	85,0	10,3	0,0	26,0	0,0	82,3	85,2	80,6
07/01/22 16:00	57,0	85,0	60,4	0,0	33,4	0,0	66,1	84,4	80,4
07/01/22 17:00	57,3	85,0	82,7	0,0	33,3	0,0	82,8	86,5	79,0
07/01/22 18:00	57,5	85,0	86,0	0,0	30,0	0,0	67,0	87,6	76,5
07/01/22 19:00	56,5	85,0	21,4	0,0	15,2	0,0	77,5	83,4	72,0
07/01/22 20:00	57,5	85,0	5,8	0,0	5,5	0,0	83,0	87,7	67,1
07/01/22 21:00	56,8	85,0	59,2	0,0	2,0	0,0	61,5	85,5	64,0
07/01/22 22:00	59,2	85,0	0,1	0,0	0,1	0,0	84,3	72,7	60,7
07/01/22 23:00	60,9	85,0	22,3	0,0	0,1	0,0	61,2	69,0	59,2
08/01/22 00:00	59,0	85,0	42,5	0,0	0,1	0,0	68,0	85,8	60,6
08/01/22 01:00	63,5	85,0	0,2	0,0	0,1	0,0	86,2	76,5	64,3
08/01/22 02:00	70,3	85,0	1,5	0,0	0,1	0,0	73,8	66,1	69,1
08/01/22 03:00	77,3	85,0	36,1	0,0	0,1	0,0	53,3	69,9	75,0
08/01/22 04:00	83,5	85,0	79,7	0,0	0,1	0,0	78,1	85,9	80,7
08/01/22 05:00	90,0	85,0	89,6	0,0	0,1	0,0	84,6	74,7	85,6
08/01/22 06:00	96,0	85,0	91,9	0,0	0,1	0,0	65,9	64,6	89,1
08/01/22 07:00	98,0	85,0	77,4	0,0	0,1	0,0	58,2	80,6	89,6
08/01/22 08:00	95,8	85,0	34,5	0,0	0,1	0,0	83,7	80,1	86,5
08/01/22 09:00	89,7	85,0	50,5	0,0	0,1	0,0	68,4	65,0	82,0
08/01/22 10:00	82,3	85,0	41,4	0,0	0,1	0,0	72,4	73,8	75,6
08/01/22 11:00	81,4	85,0	1,2	0,0	0,1	0,0	85,0	81,4	68,6
08/01/22 12:00	78,4	85,0	30,6	0,0	1,1	0,0	67,8	86,6	63,6
08/01/22 13:00	72,7	85,0	40,3	0,0	3,6	0,0	82,0	65,6	61,5
08/01/22 14:00	64,8	85,0	5,4	0,0	6,2	0,0	71,2	70,6	60,2
08/01/22 15:00	59,2	85,0	67,2	0,0	8,7	0,0	72,9	83,1	59,3
08/01/22 16:00	59,8	85,0	2,7	0,0	9,6	0,0	83,1	79,8	58,3

Quadro 9 – Grau de enchimento dos reservatórios

(conclusão)

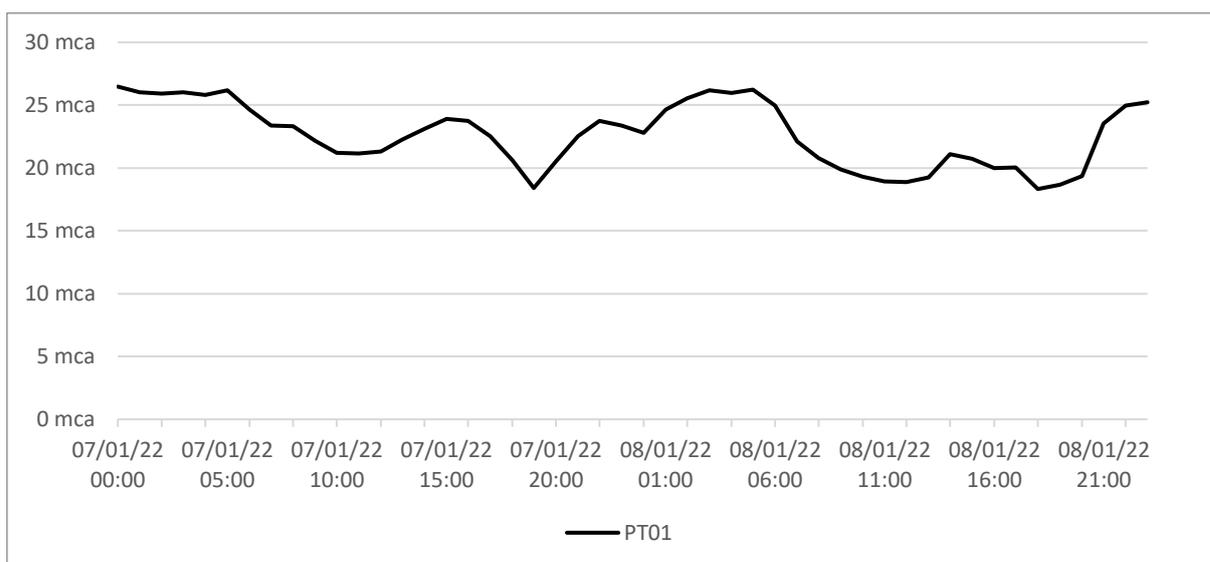
HORA	RESERVATÓRIOS (%)								
	R-01	R-02	R-03	R-04	R-05	R-06	R-08	R-09	R-10
08/01/22 17:00	60,2	85,0	13,8	0,0	14,4	0,0	65,8	65,7	57,0
08/01/22 18:00	58,7	85,0	70,2	0,0	12,6	0,0	77,2	77,5	55,9
08/01/22 19:00	56,6	85,0	9,0	0,0	8,2	0,0	81,3	86,9	54,5
08/01/22 20:00	56,3	85,0	3,5	0,0	7,3	0,0	66,5	74,9	52,2
08/01/22 21:00	56,1	85,0	31,1	0,0	5,6	0,0	83,3	80,5	52,4
08/01/22 22:00	58,0	85,0	74,2	0,0	5,4	0,0	71,6	88,0	55,3
08/01/22 23:00	63,1	85,0	0,2	0,0	1,2	0,0	73,9	87,0	60,7

Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

## APÊNDICE B – PRESSÃO NOS PTS

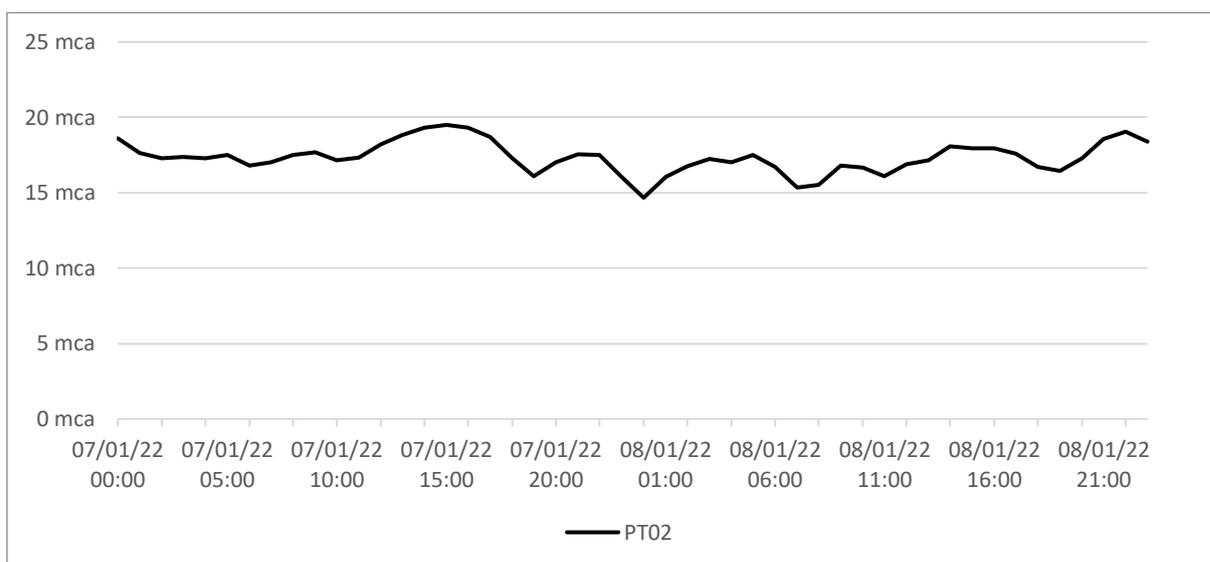
As medições de pressões dos PTs instalados e que estão em operação na rede de distribuição de água do município referentes ao período utilizado para elaboração do modelo hidráulico encontram-se nas Figura 39 até a Figura 58.

Figura 39 – Gráfico pressão no PT1



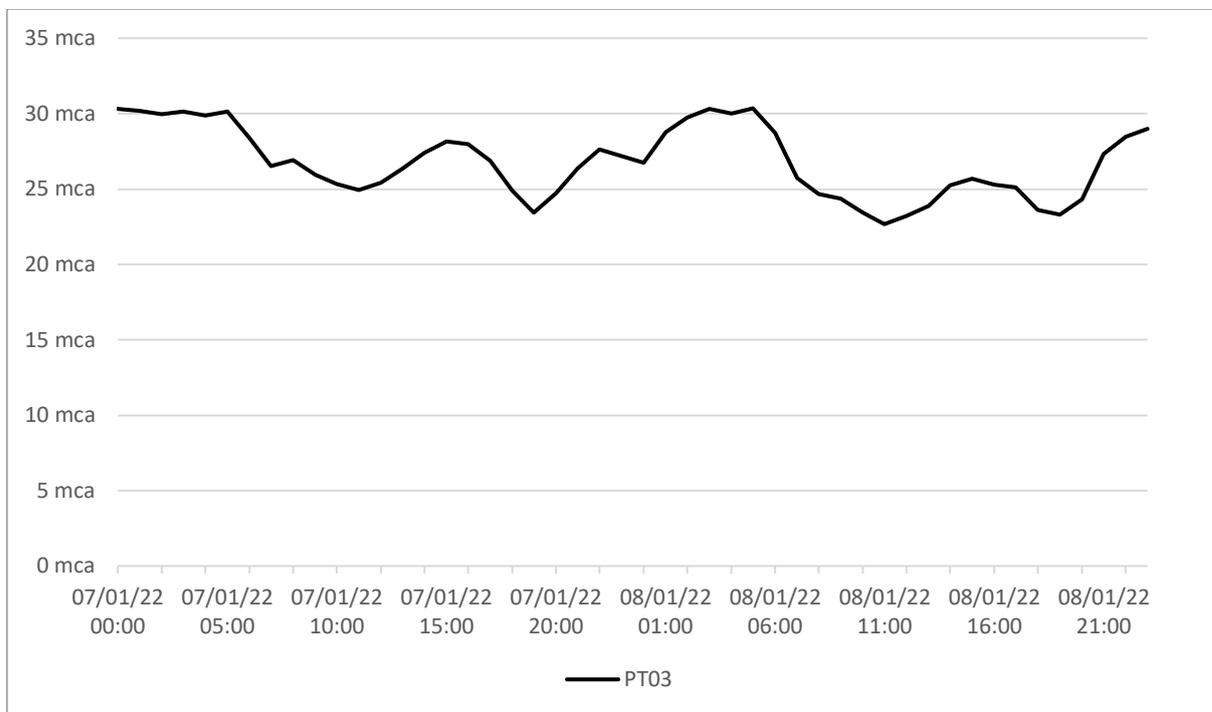
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 40 – Gráfico pressão no PT2



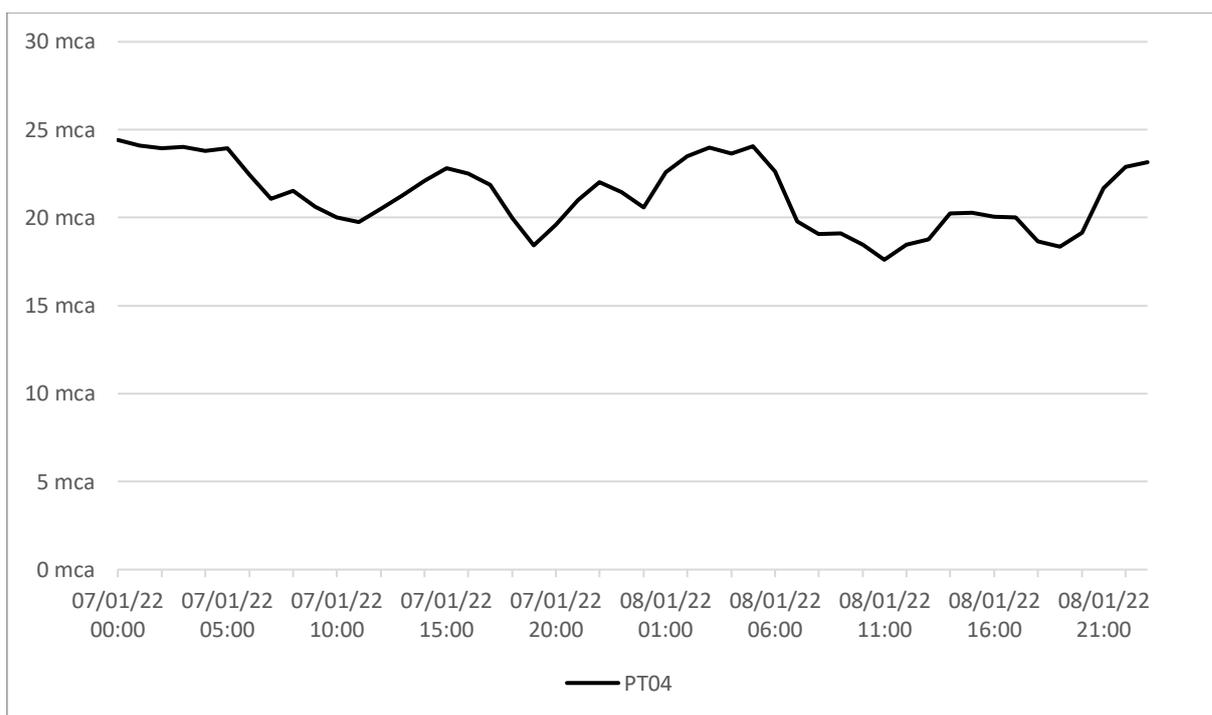
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 41 – Gráfico pressão no PT3



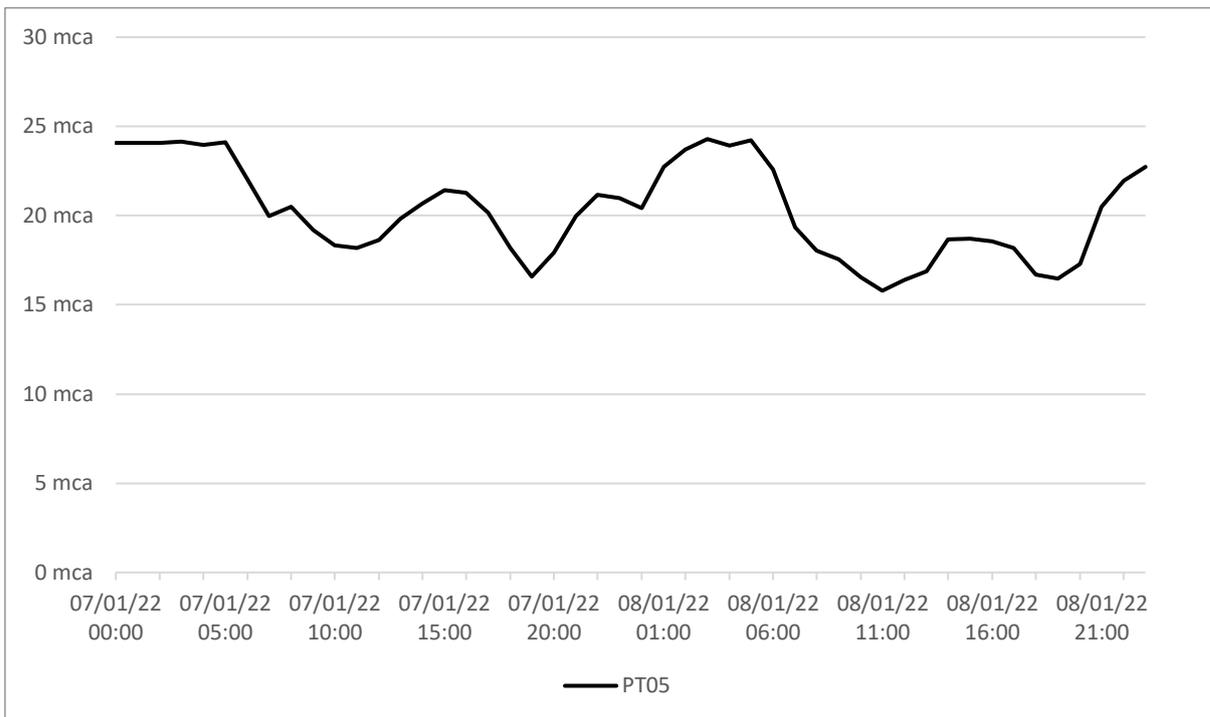
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 42 – Gráfico pressão no PT4



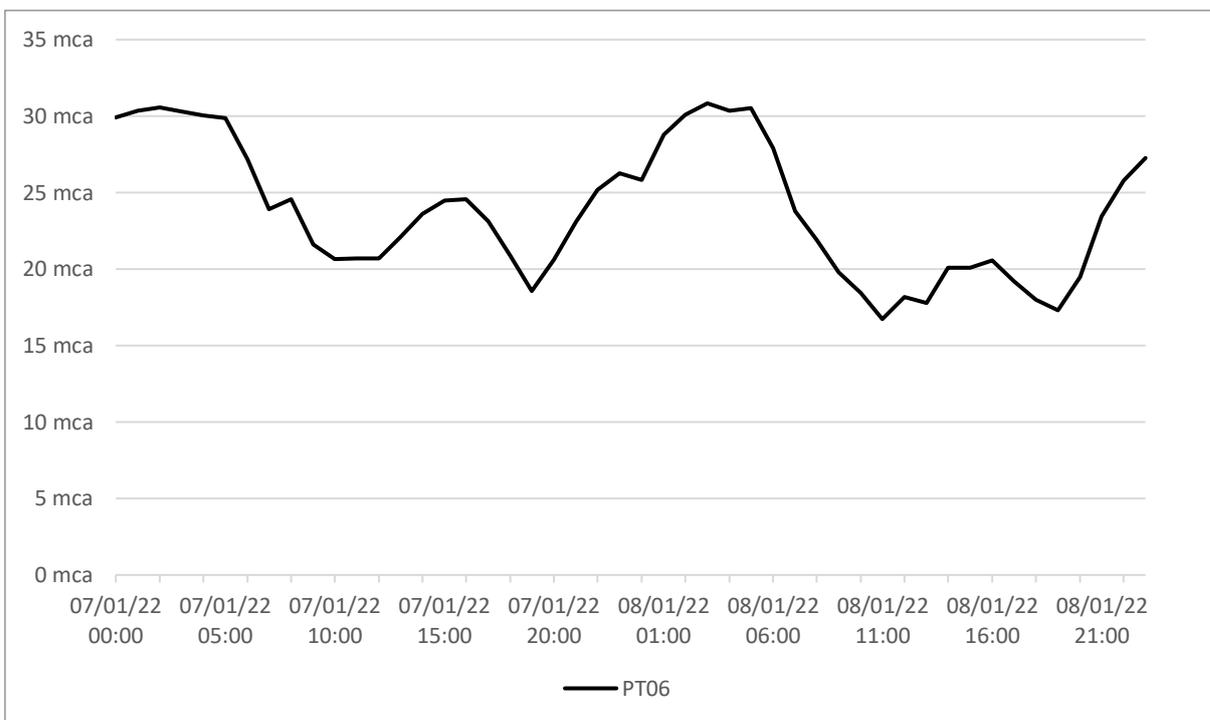
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 43 – Gráfico pressão no PT5



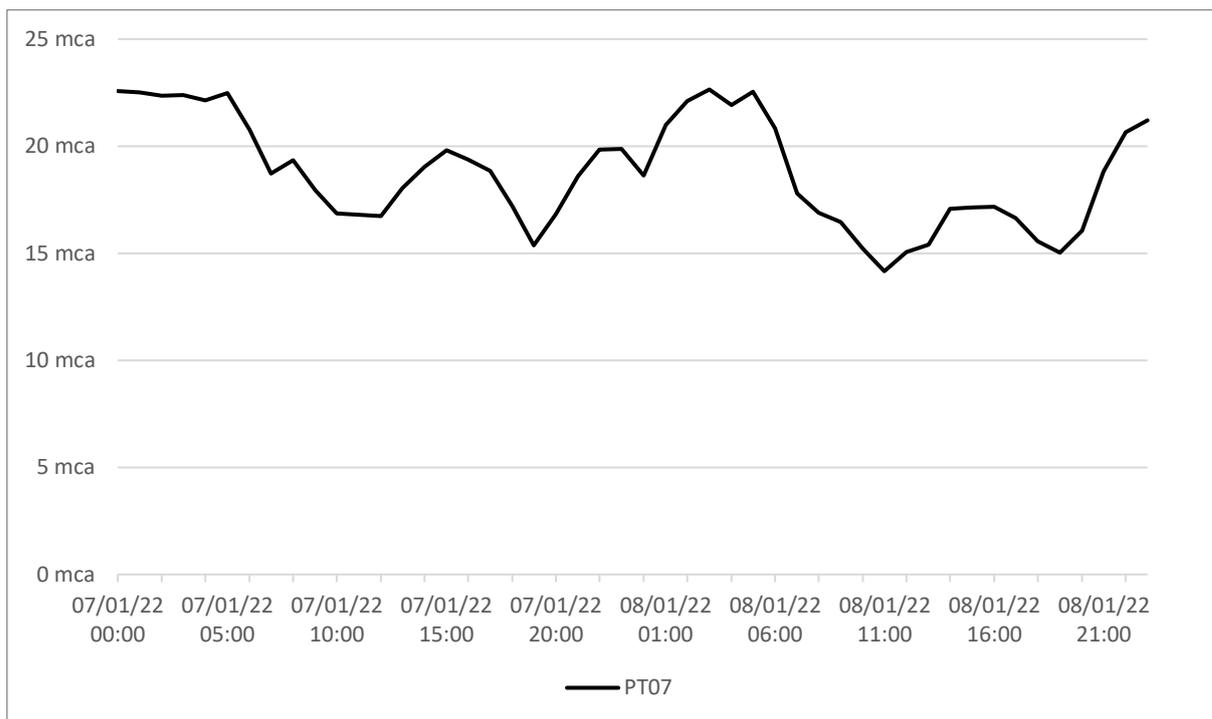
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 44 – Gráfico pressão no PT6



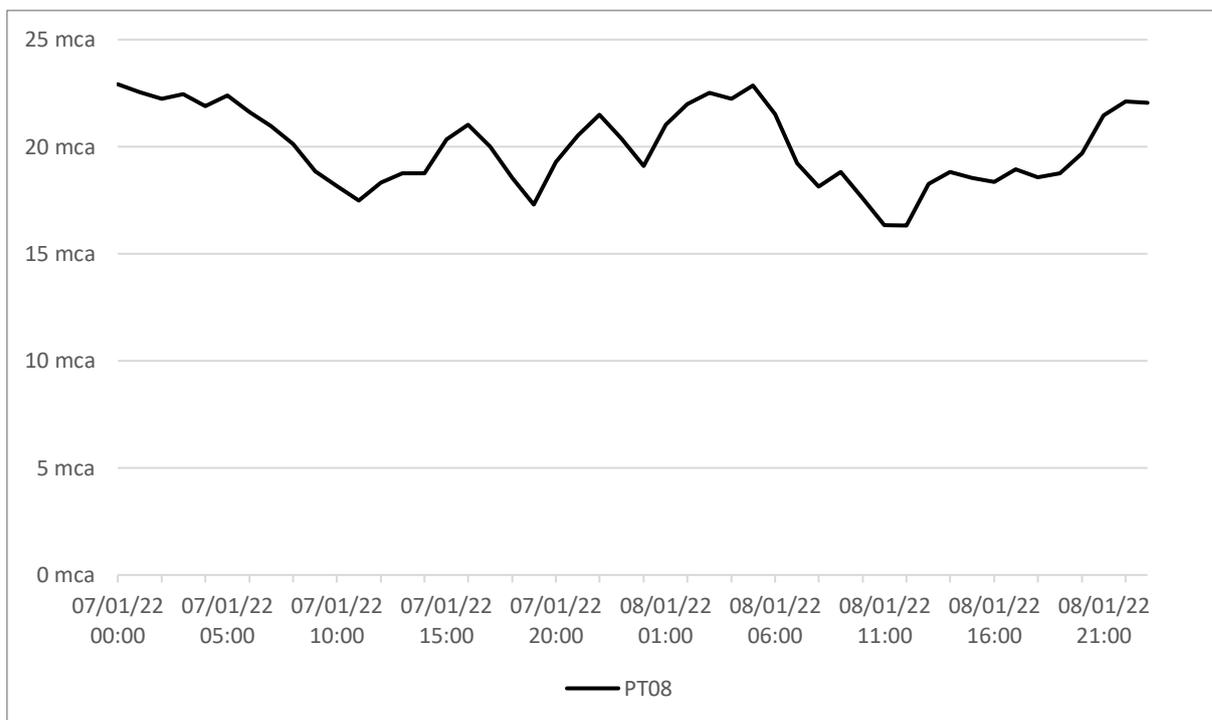
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 45 – Gráfico pressão no PT7



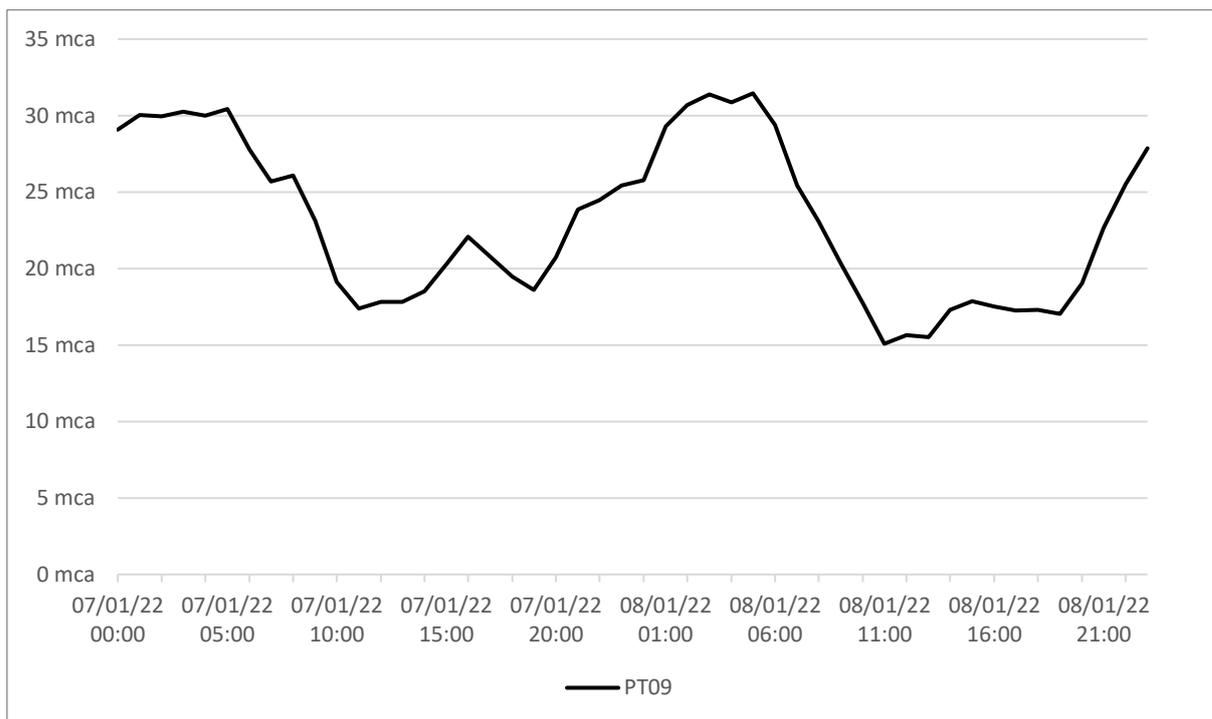
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 46 – Gráfico pressão no PT8



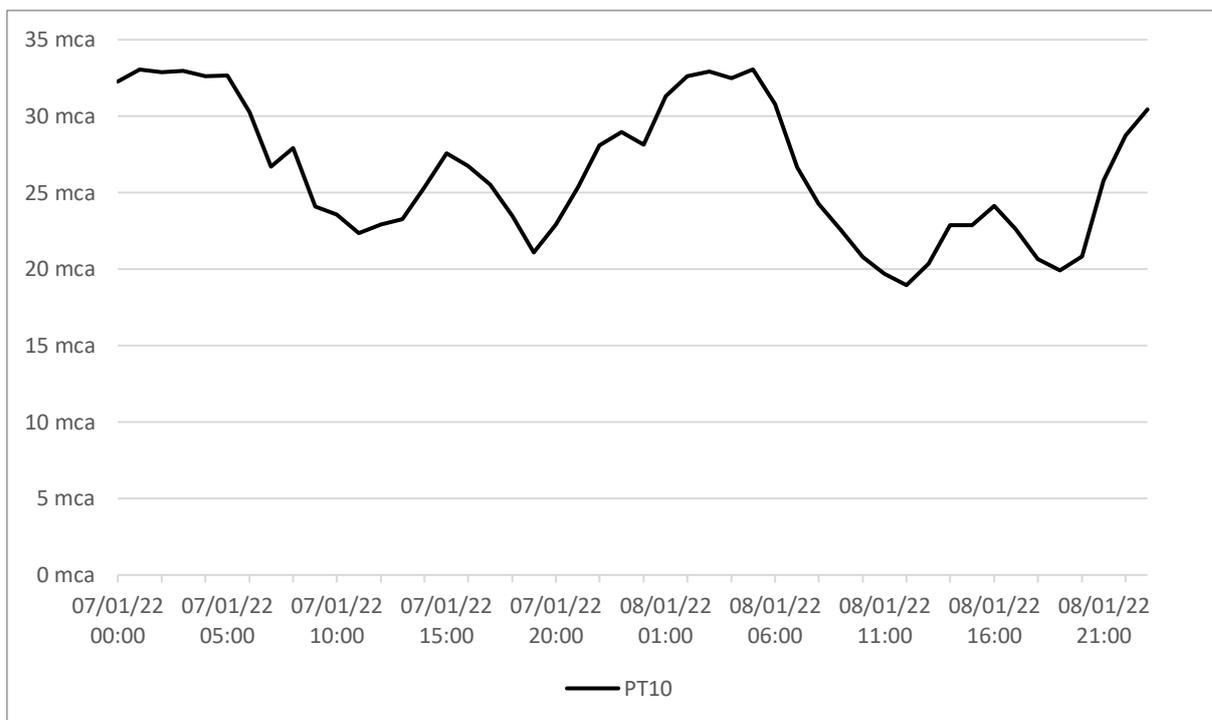
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 47 – Gráfico pressão no PT9



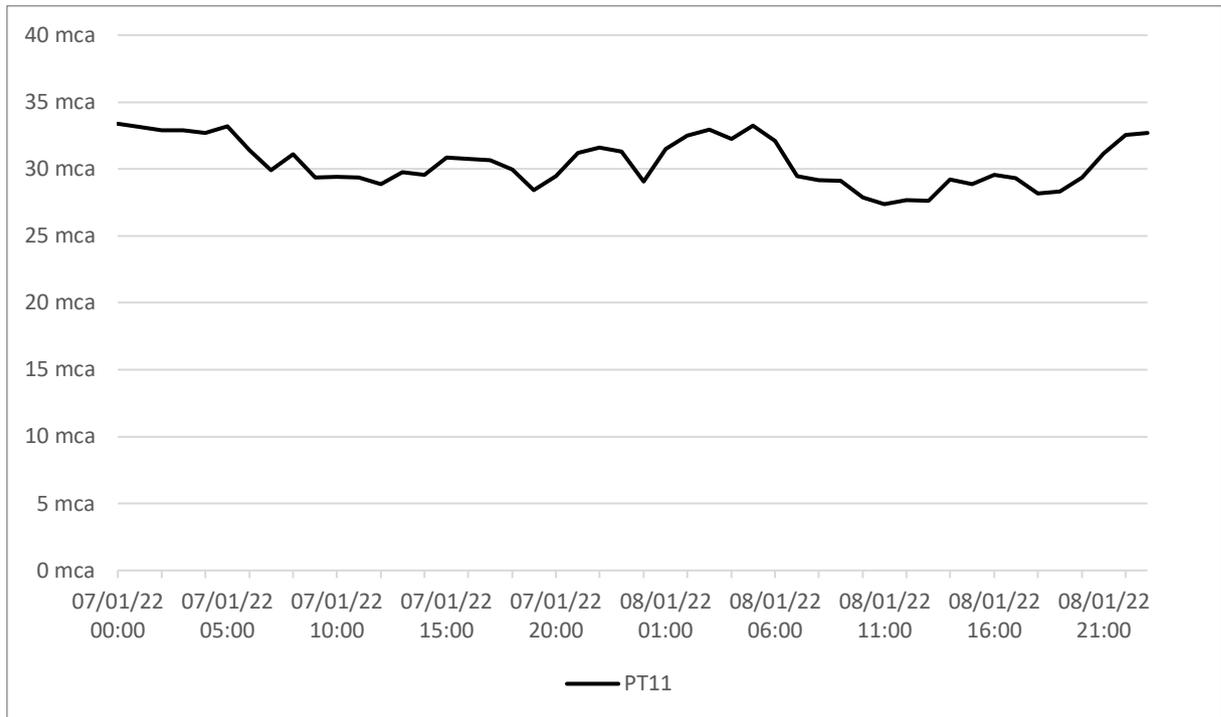
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 48 – Gráfico pressão no PT10



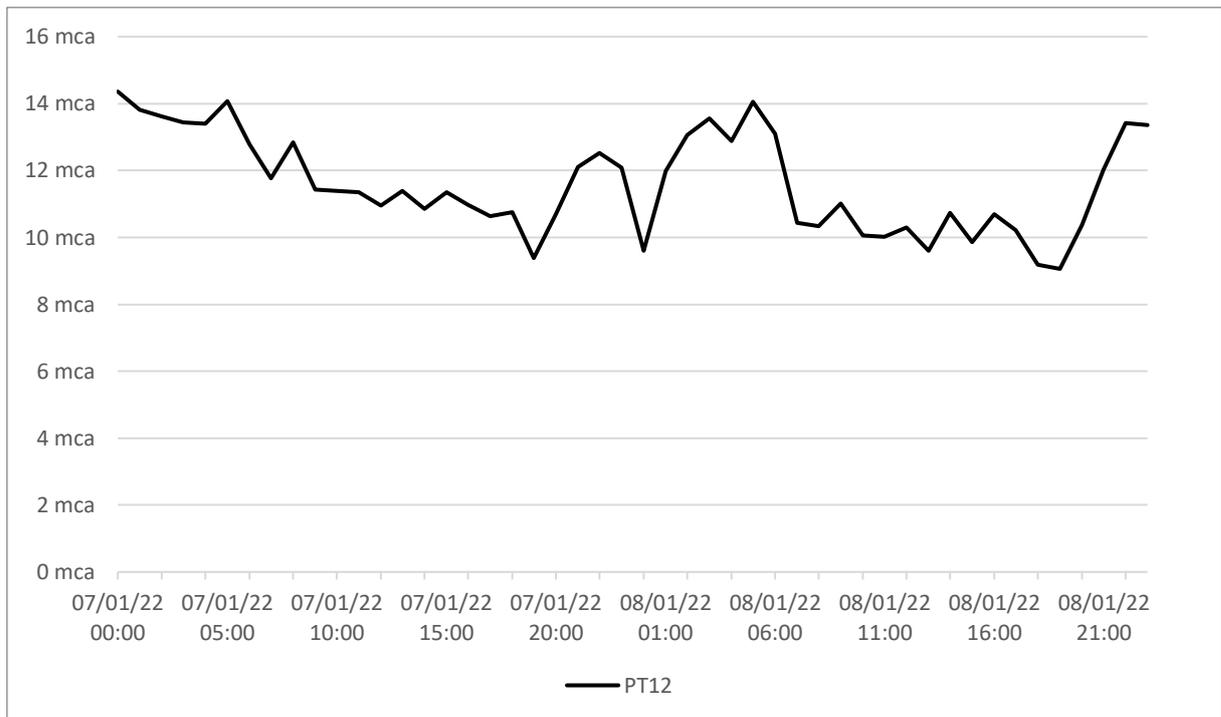
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 49 – Gráfico pressão no PT11



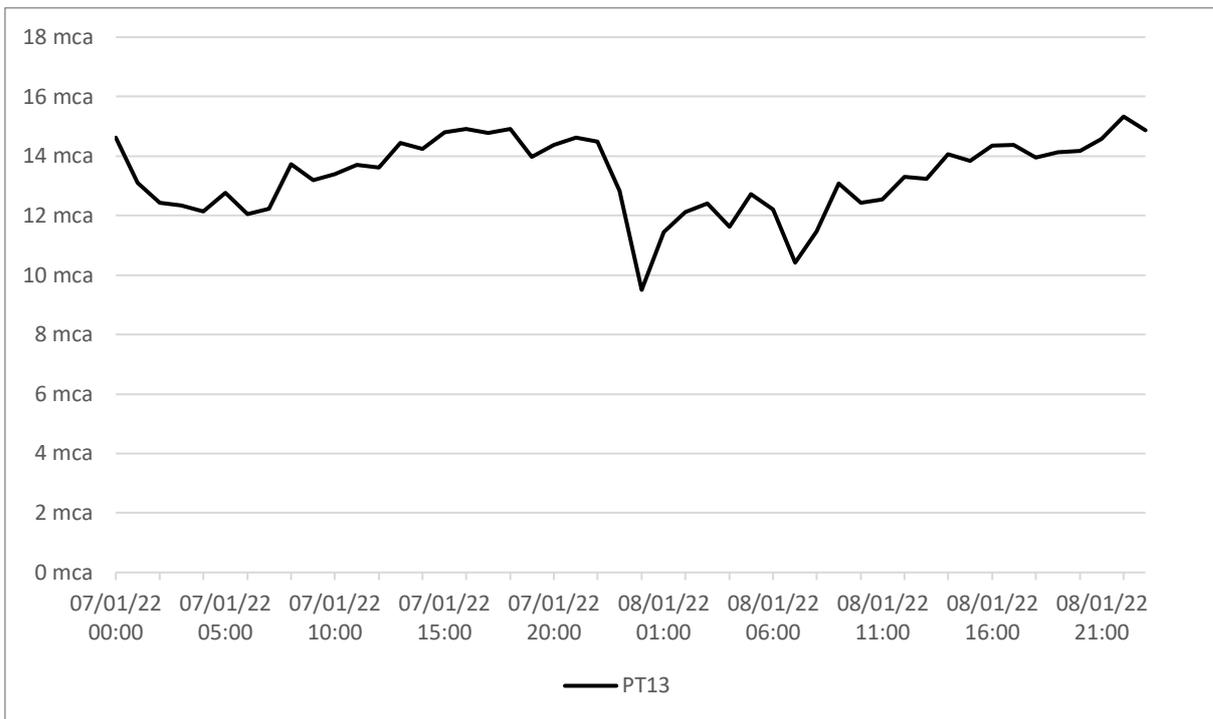
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 50 – Gráfico pressão no PT12



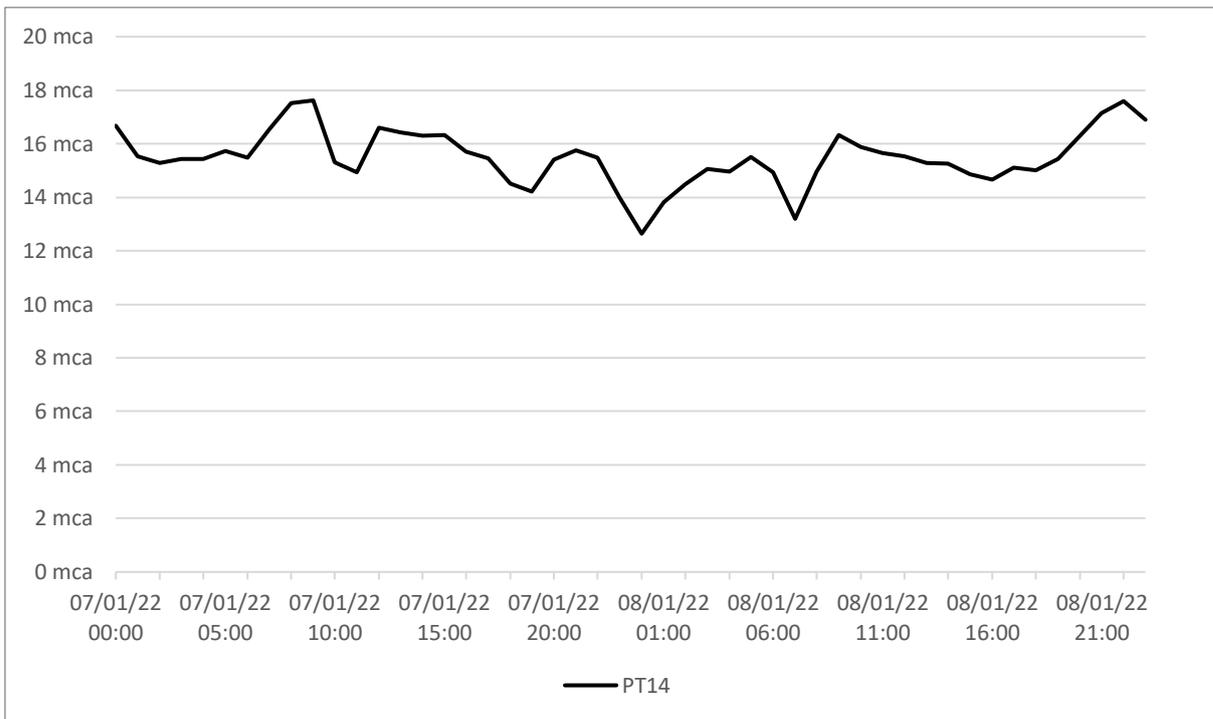
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 51 – Gráfico pressão no PT13



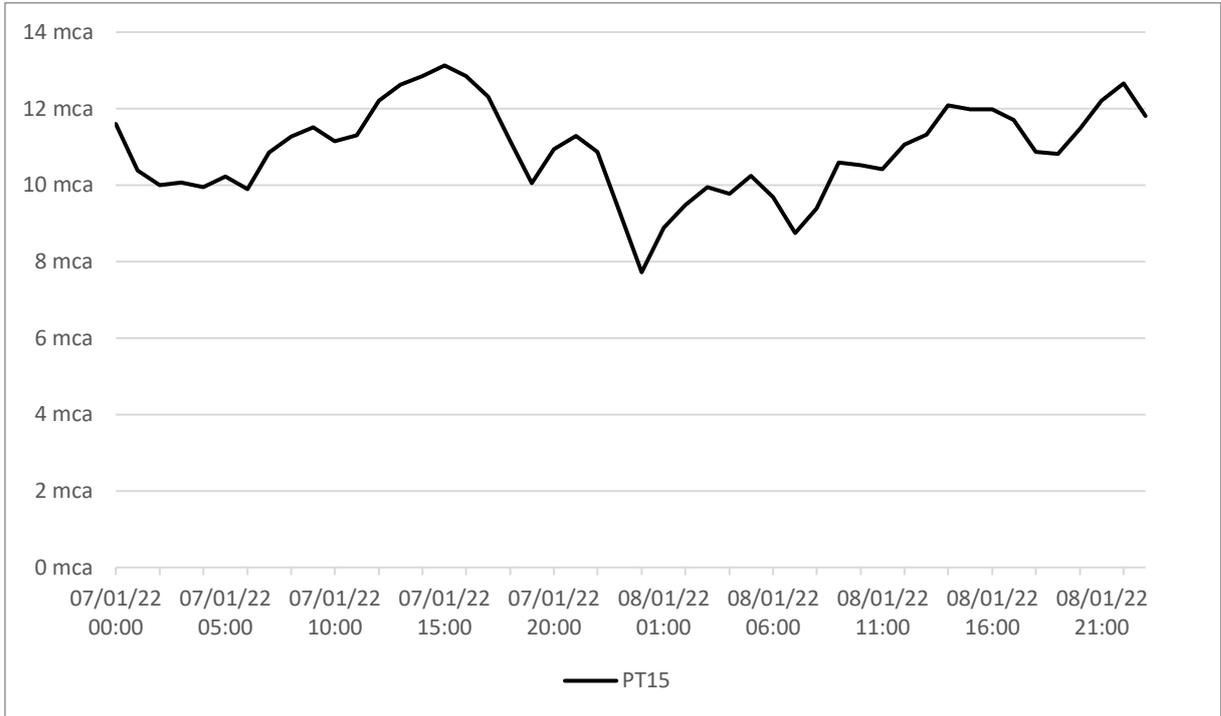
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 52 – Gráfico pressão no PT14



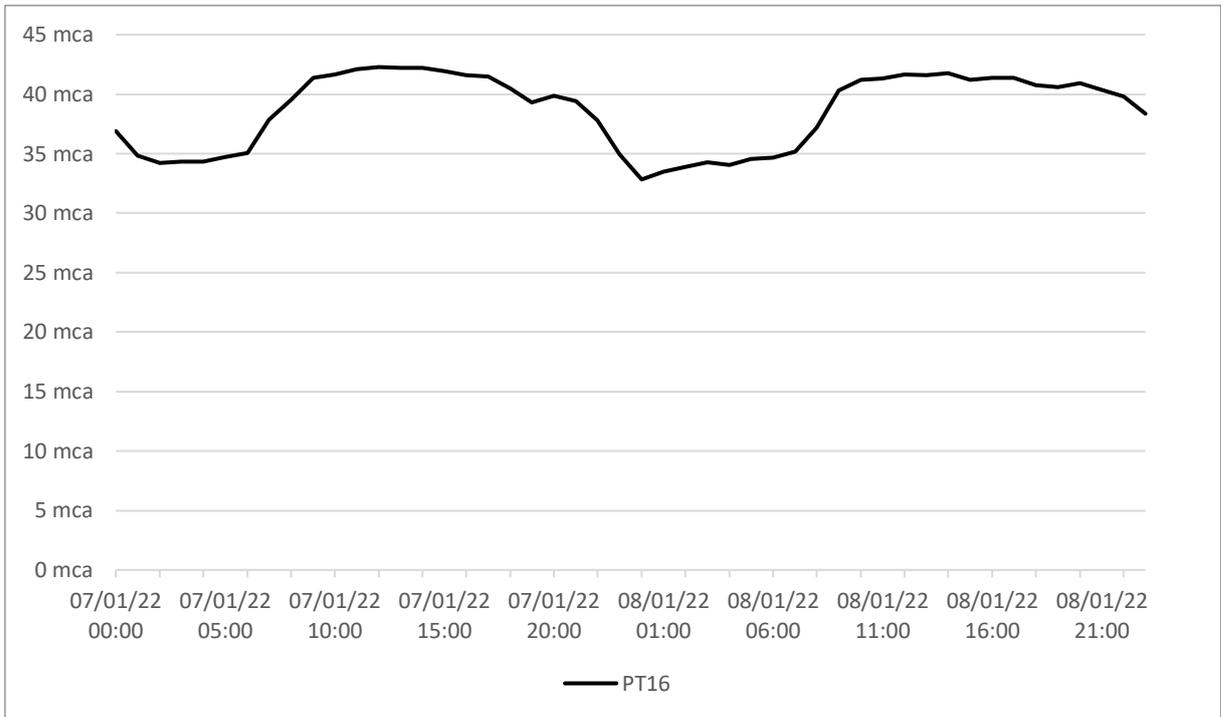
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 53 – Gráfico pressão no PT15



Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 54 – Gráfico pressão no PT16



Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 55 – Gráfico pressão no PT 17

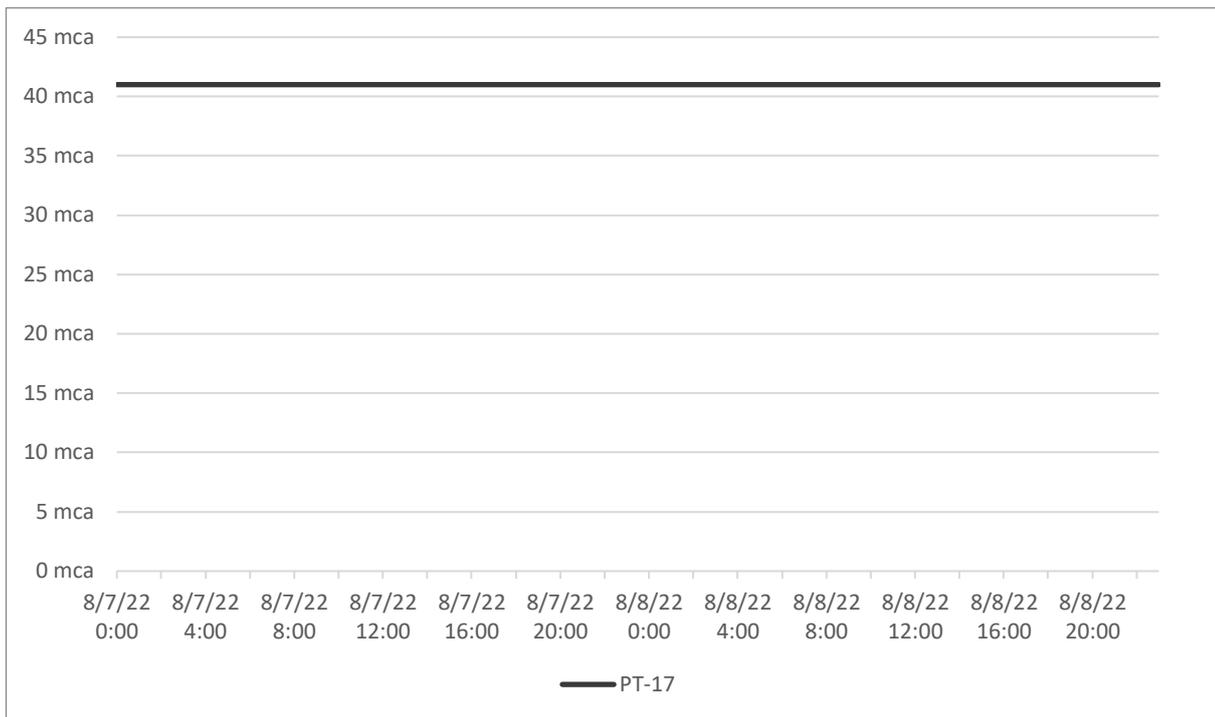
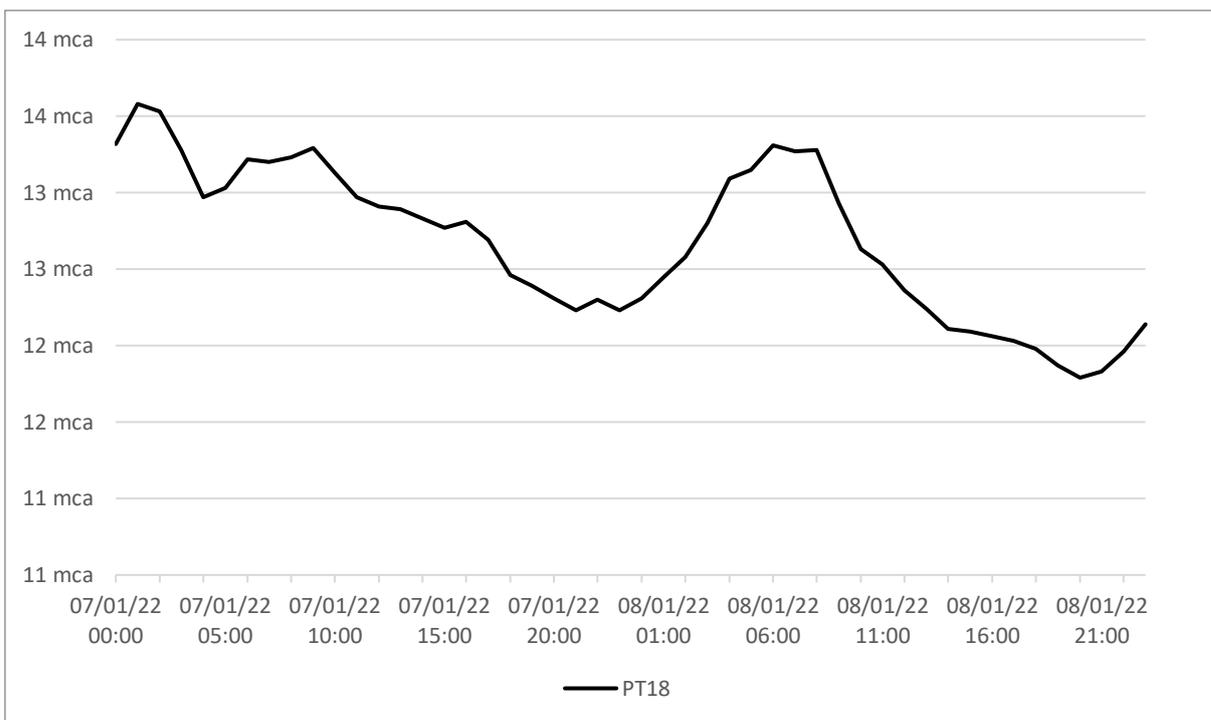
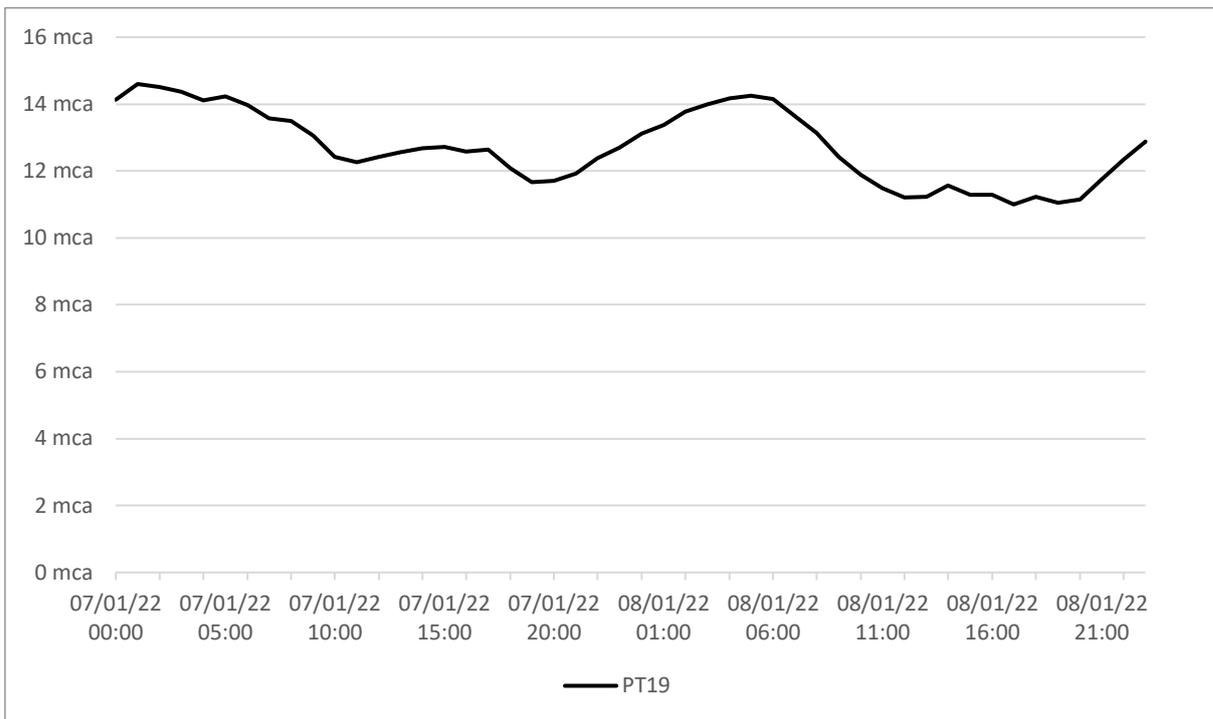


Figura 56 – Gráfico pressão no PT18



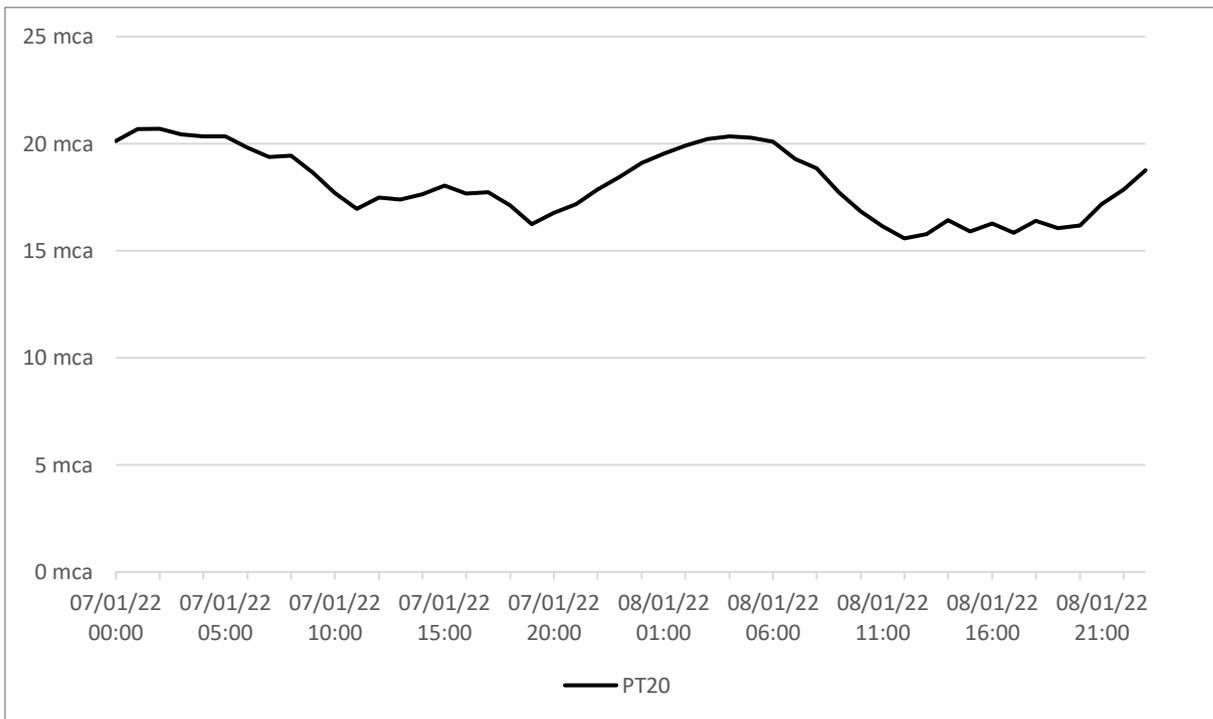
Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 57 – Gráfico pressão no PT19



Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

Figura 58 – Gráfico pressão no PT20

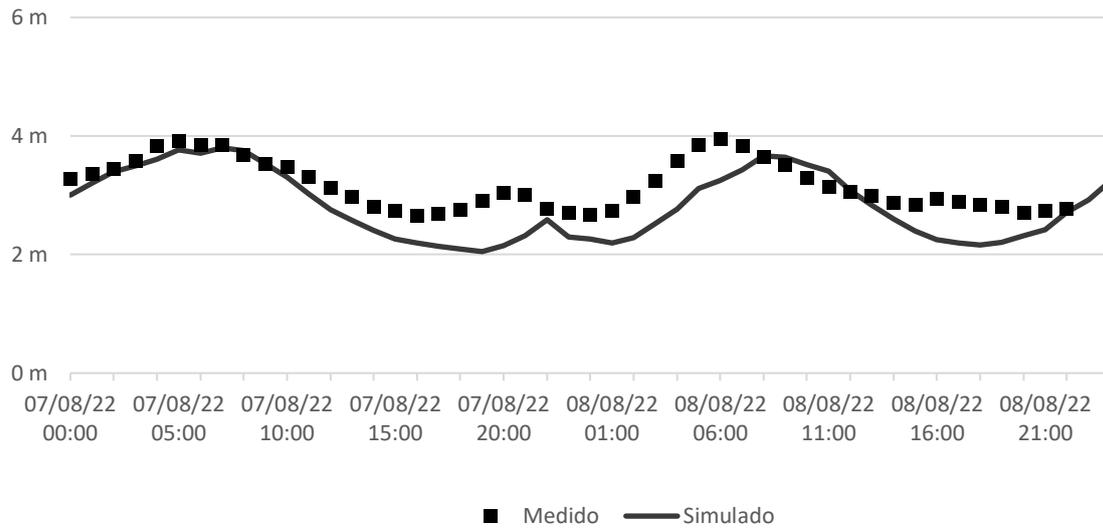


Fonte: São Gabriel Saneamento (2022b).

### APÊNDICE C – CALIBRAÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA DOS RESERVATÓRIOS

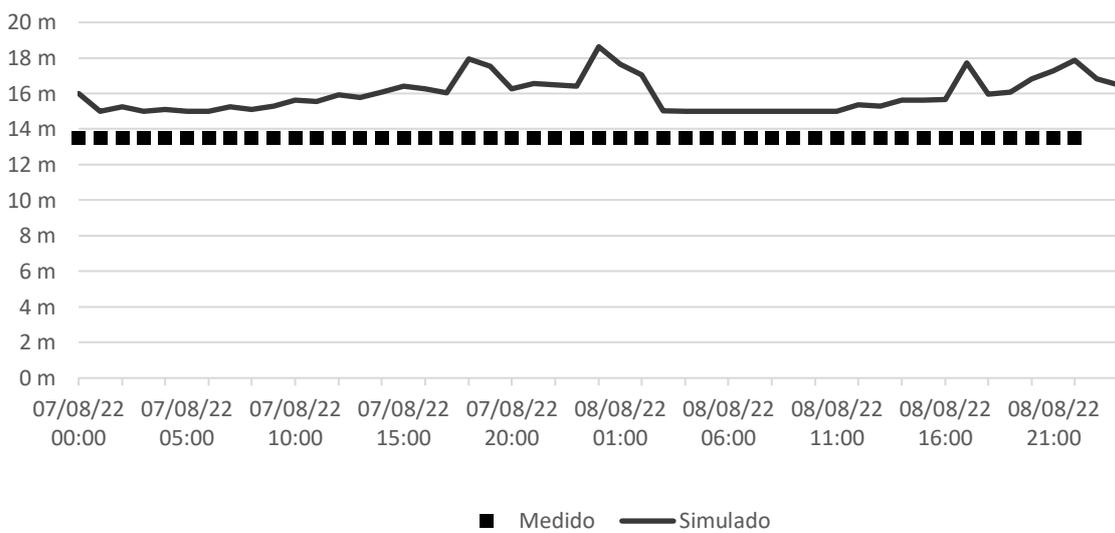
O gráfico comparativo dos reservatórios utilizados para calibração do modelo hidráulico encontram-se apresentados na Figura 59 até a Figura 65

Figura 59 – Calibração R-01 e R-02



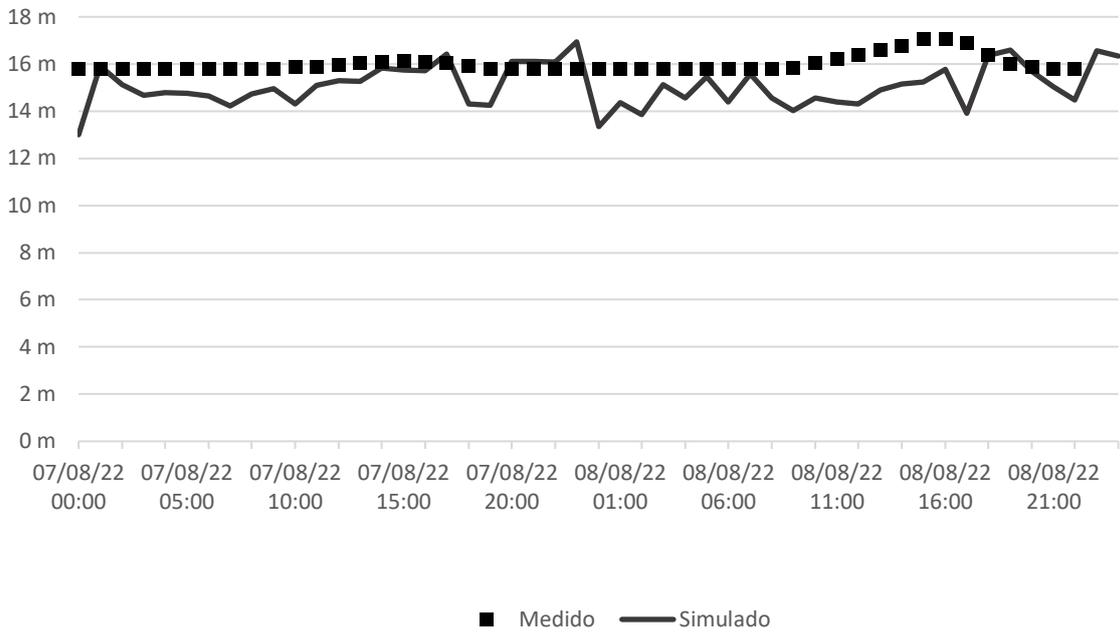
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 60 – Calibração R-04



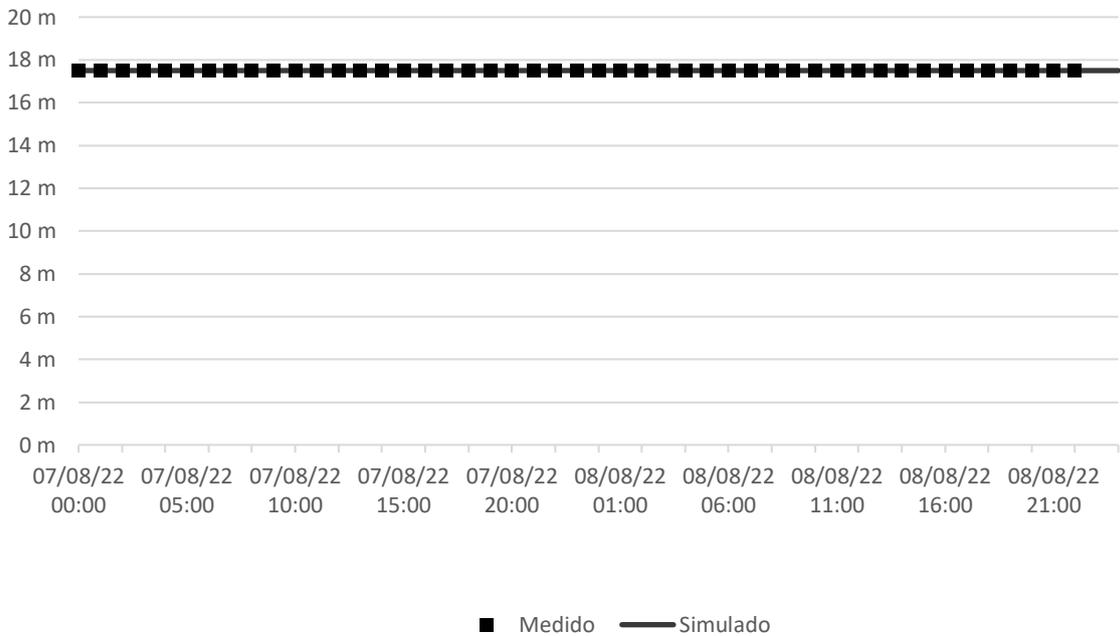
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 61 – Calibração R-05



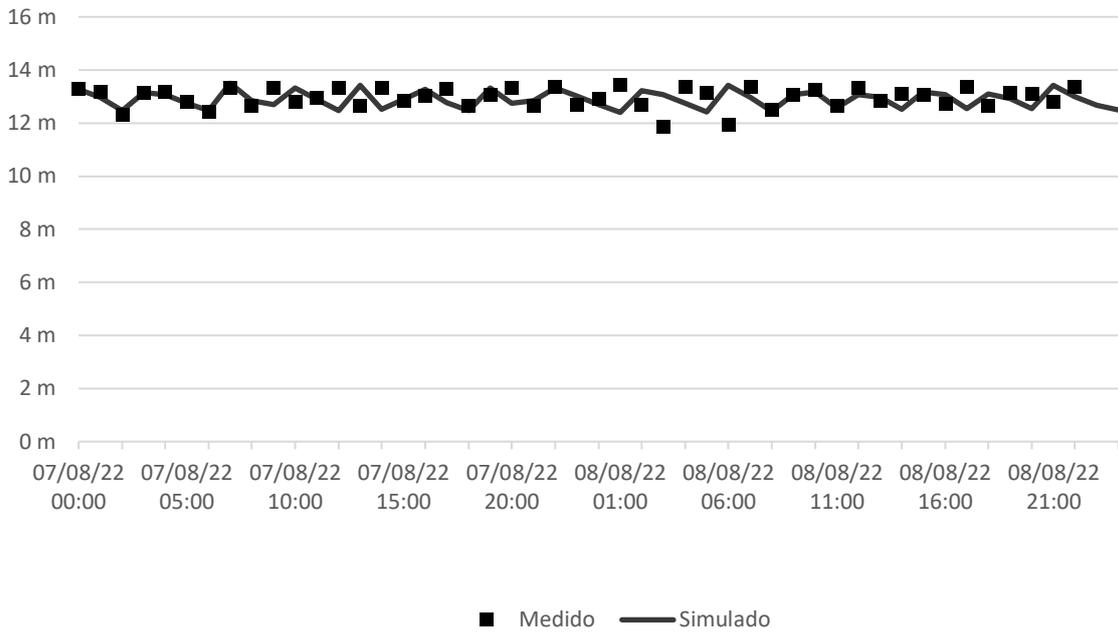
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 62 – Calibração R-06



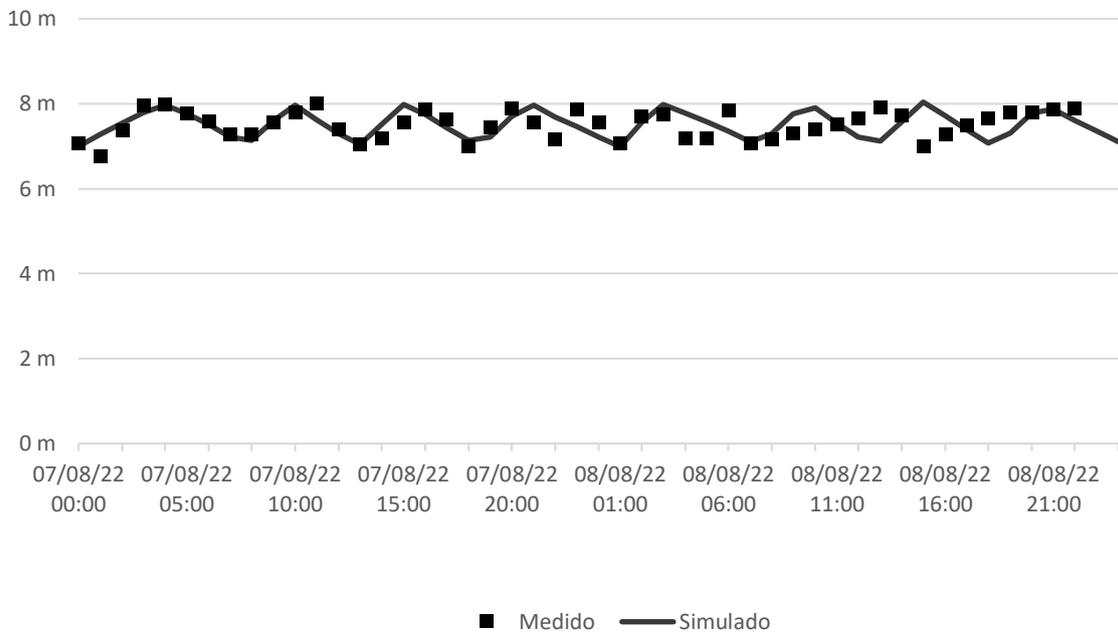
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 63 – Calibração R-08



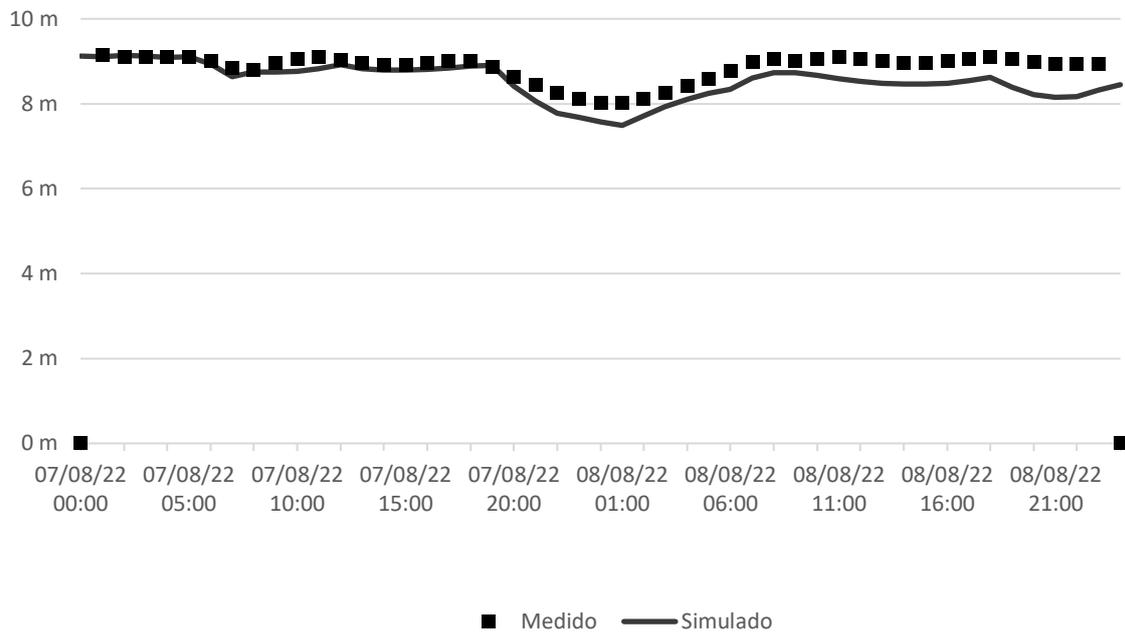
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 64 – Calibração R-09



Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 65 – Calibração R-10

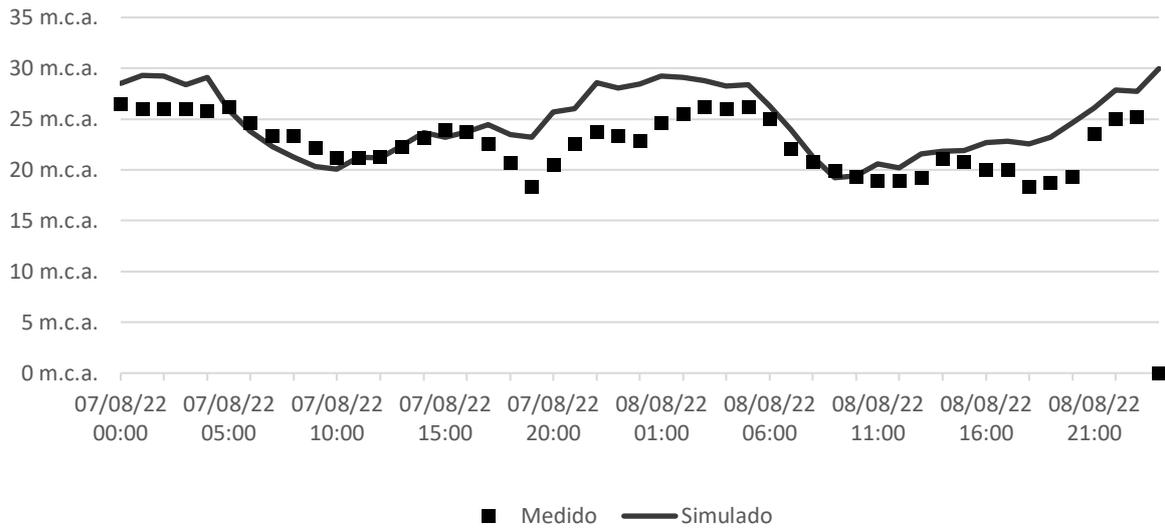


Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

## APÊNDICE D – CALIBRAÇÃO DOS PTS

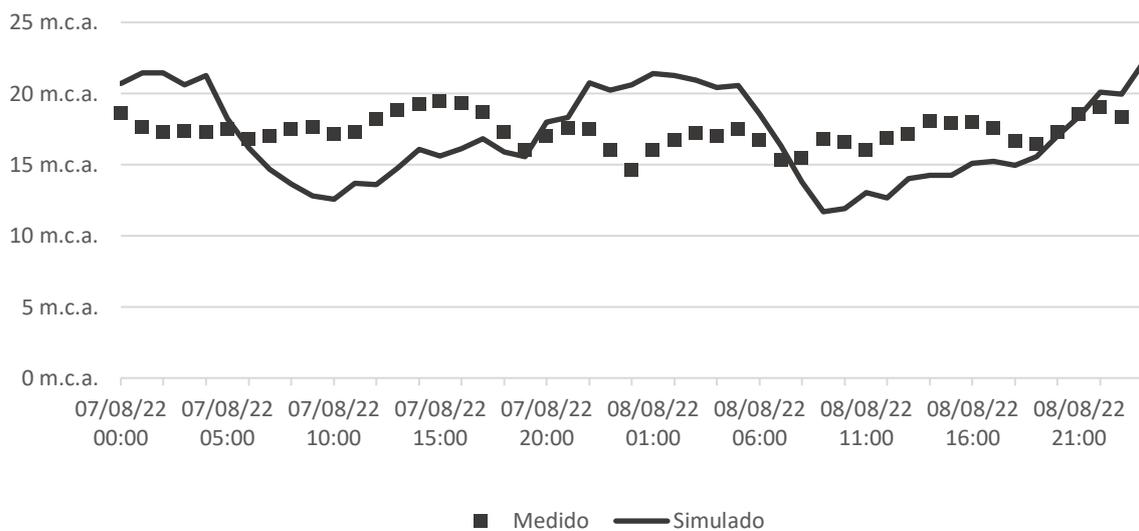
O gráfico comparativo dos PTs utilizados para calibração do modelo hidráulico encontram-se apresentados nas Figura 66 até a Figura 85.

Figura 66 – Calibração PT-01



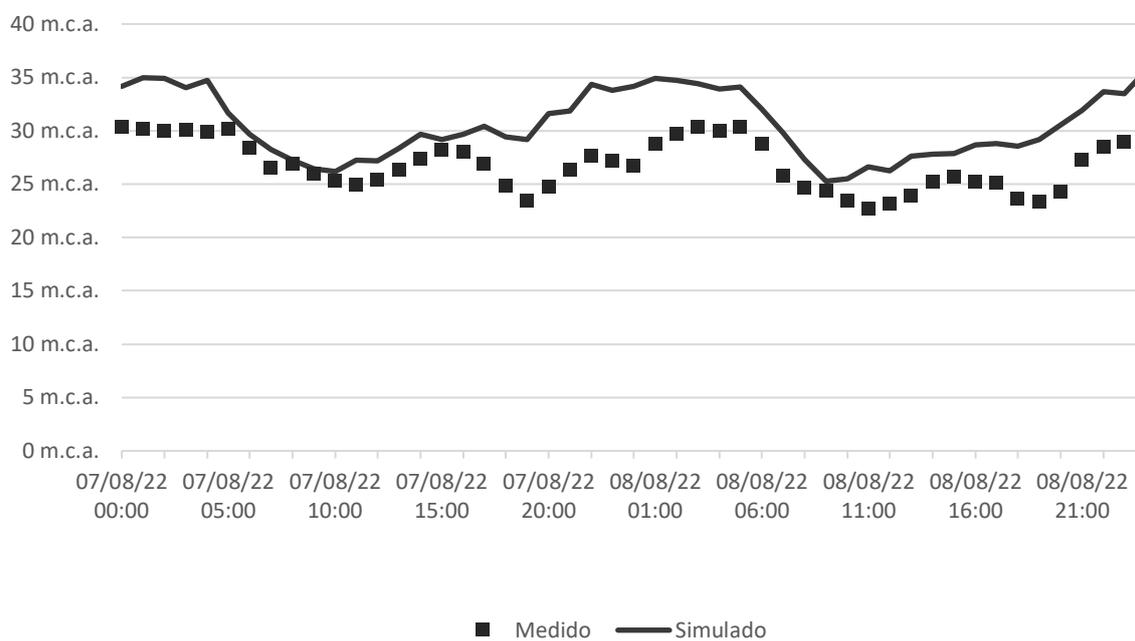
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 67 – Calibração PT-02



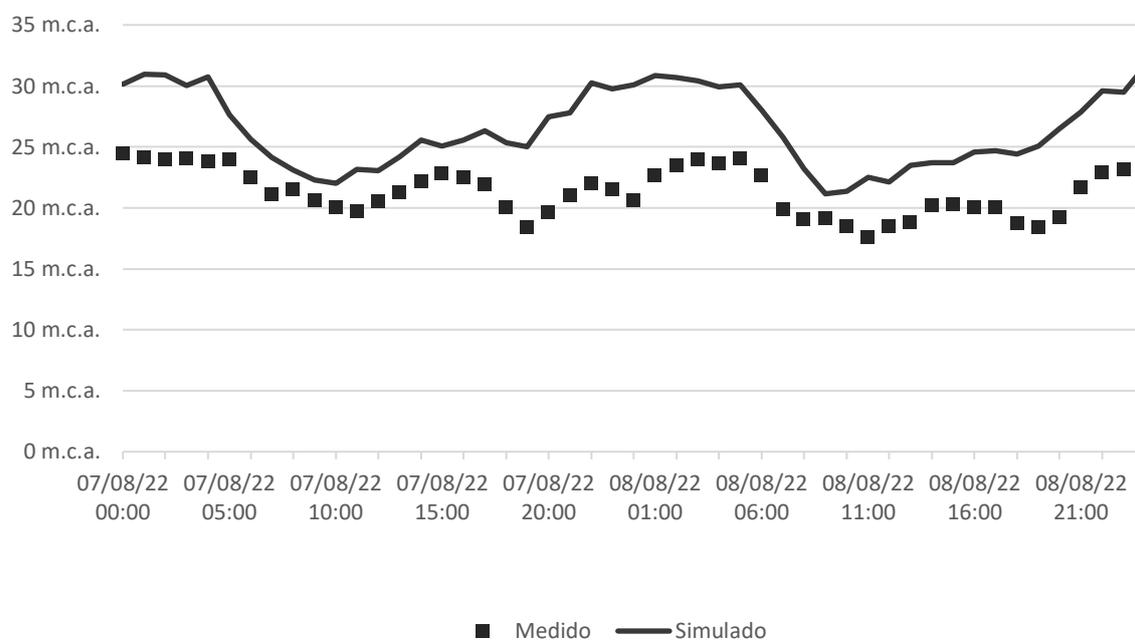
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 68 – Calibração PT-03



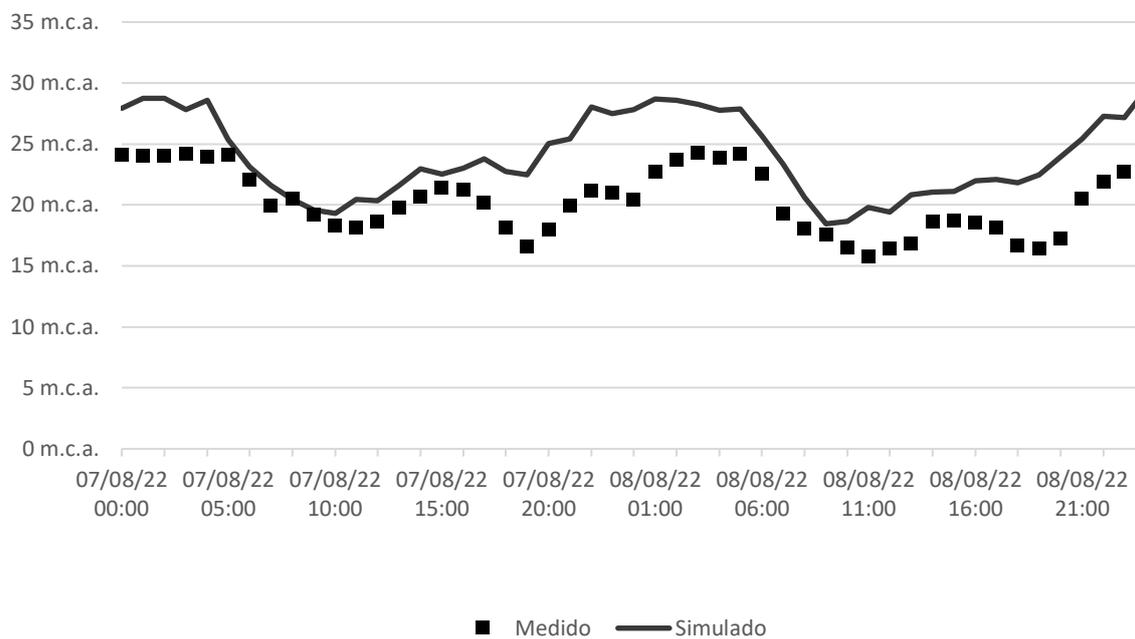
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 69 – Calibração PT-04



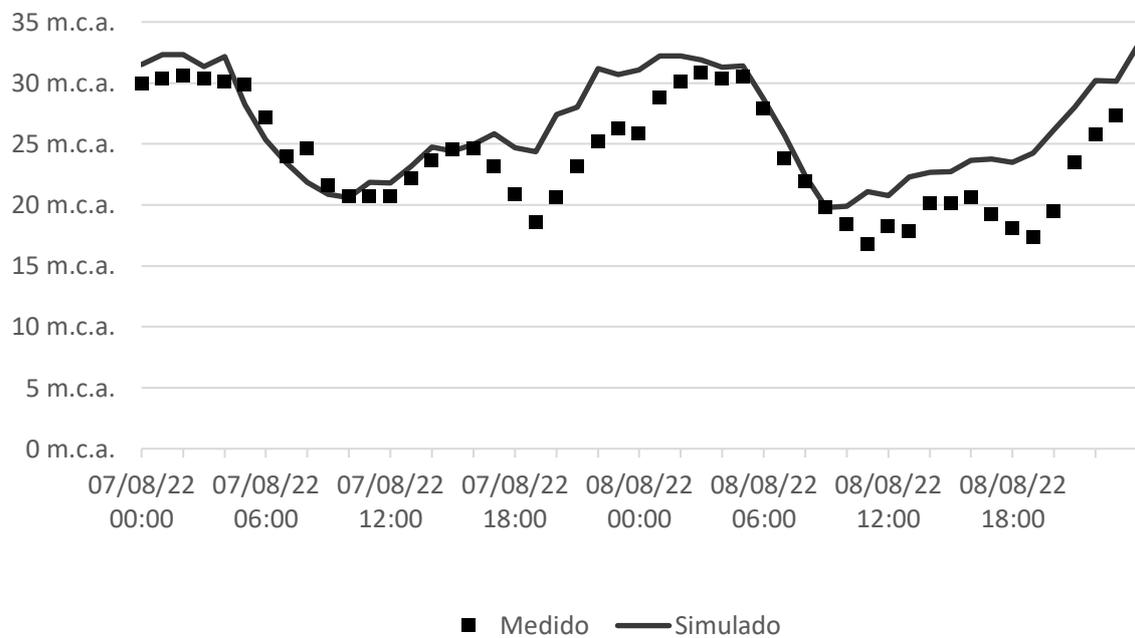
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 70 – Calibração PT-05



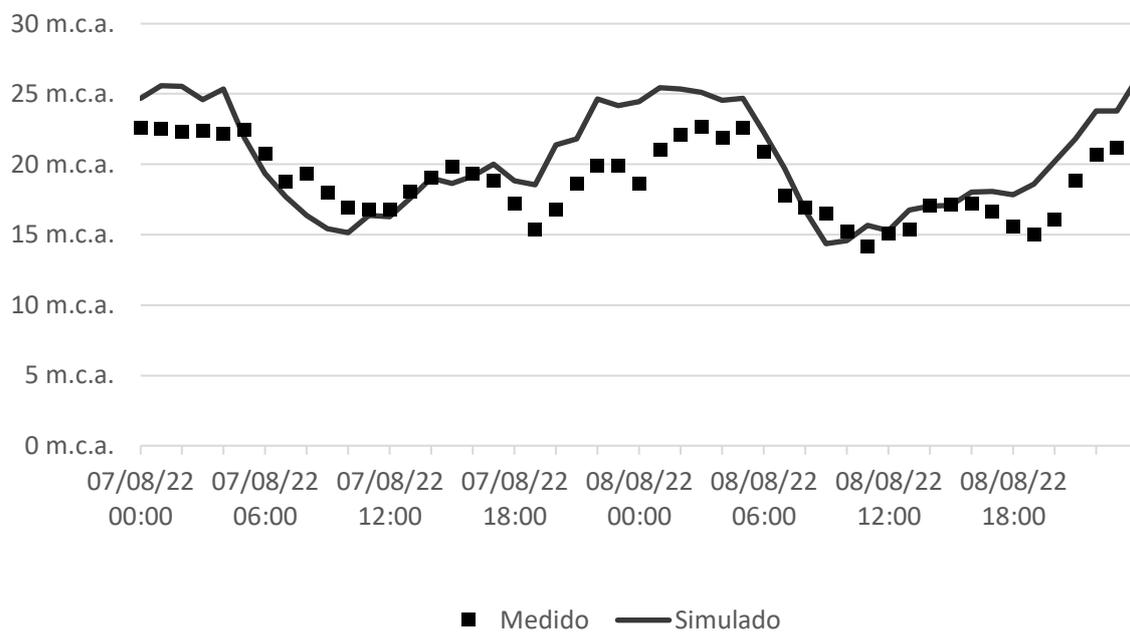
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 71 – Calibração PT-06



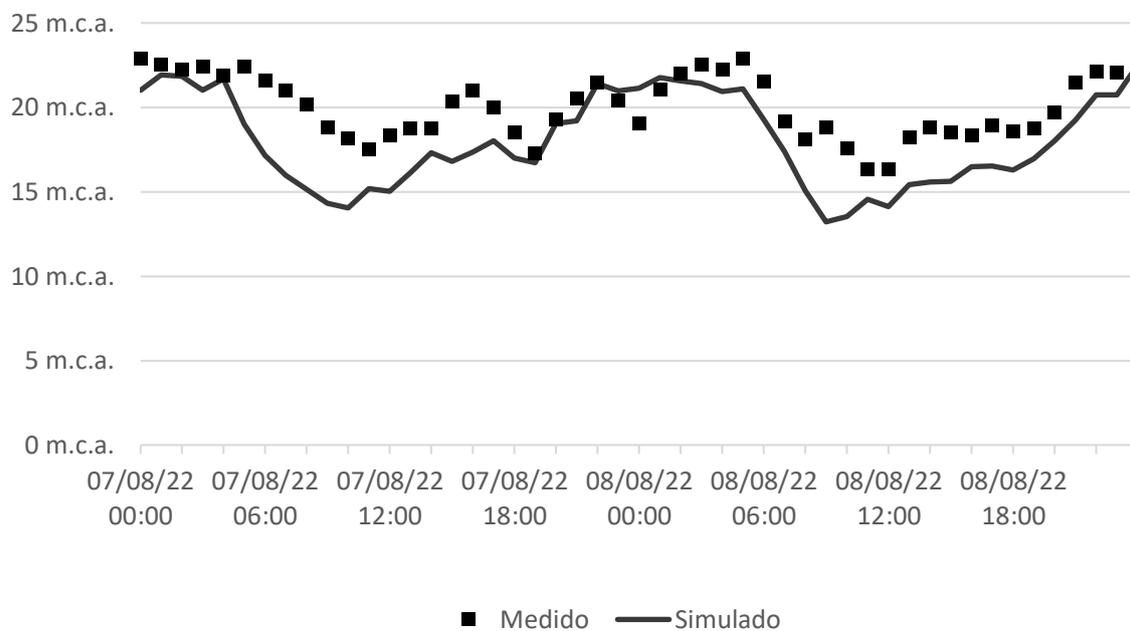
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 72 – Calibração PT-07



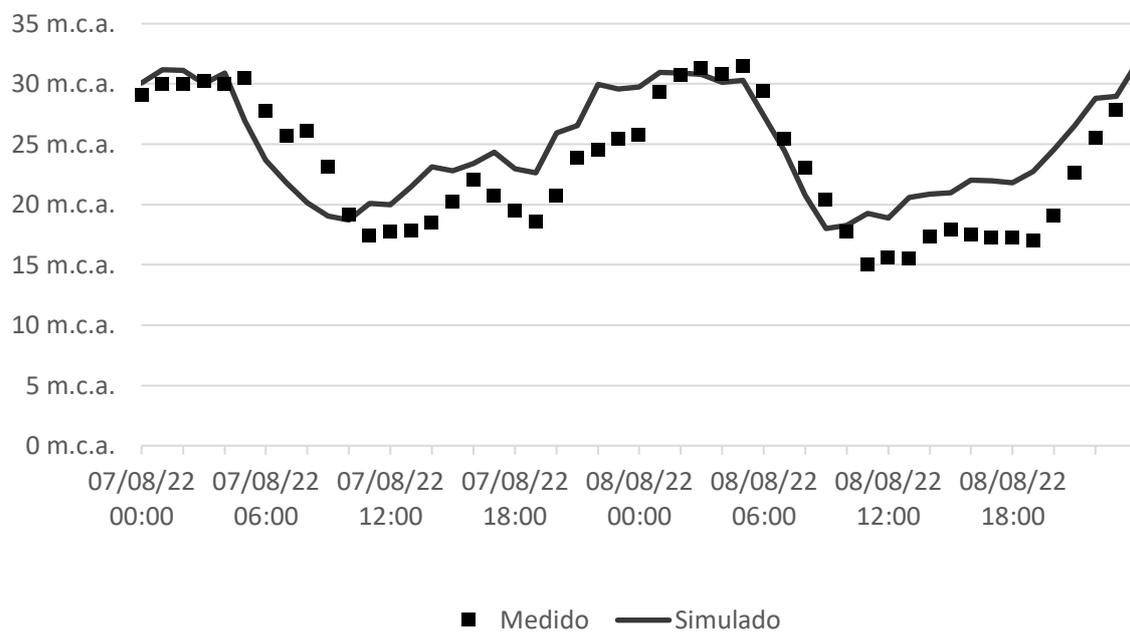
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 73 – Calibração PT-08



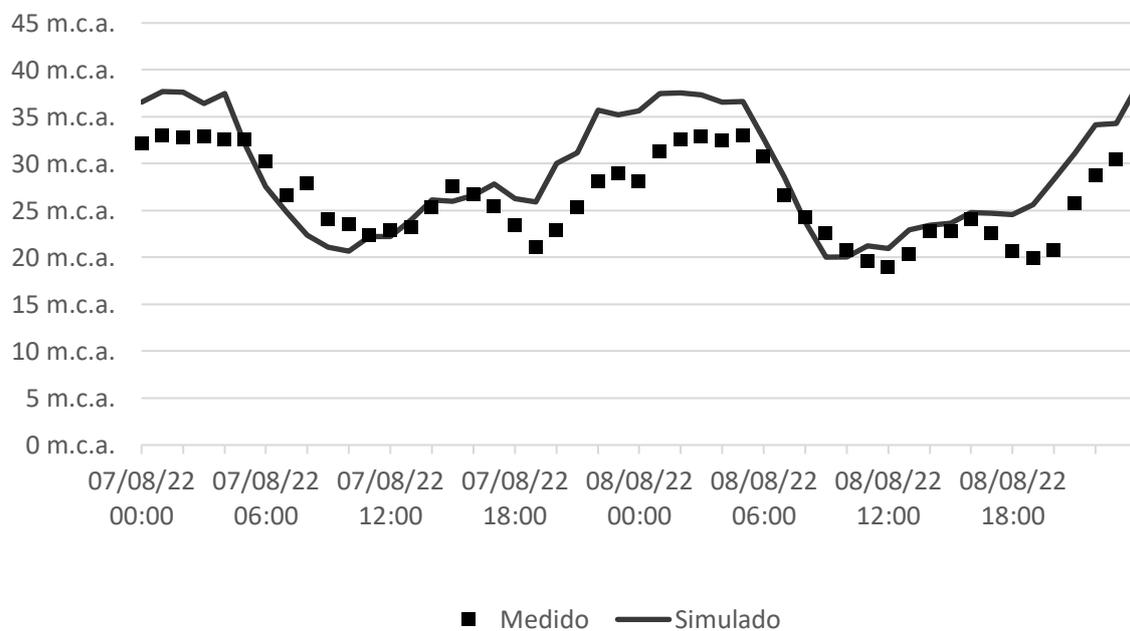
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 74 – Calibração PT-09



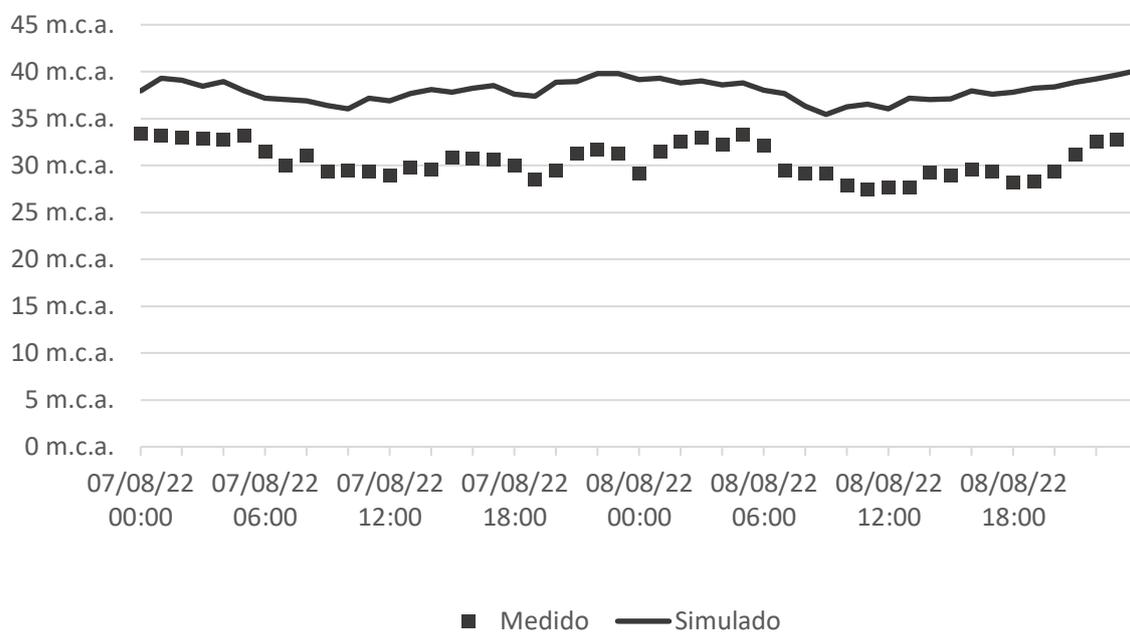
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 75 – Calibração PT-10



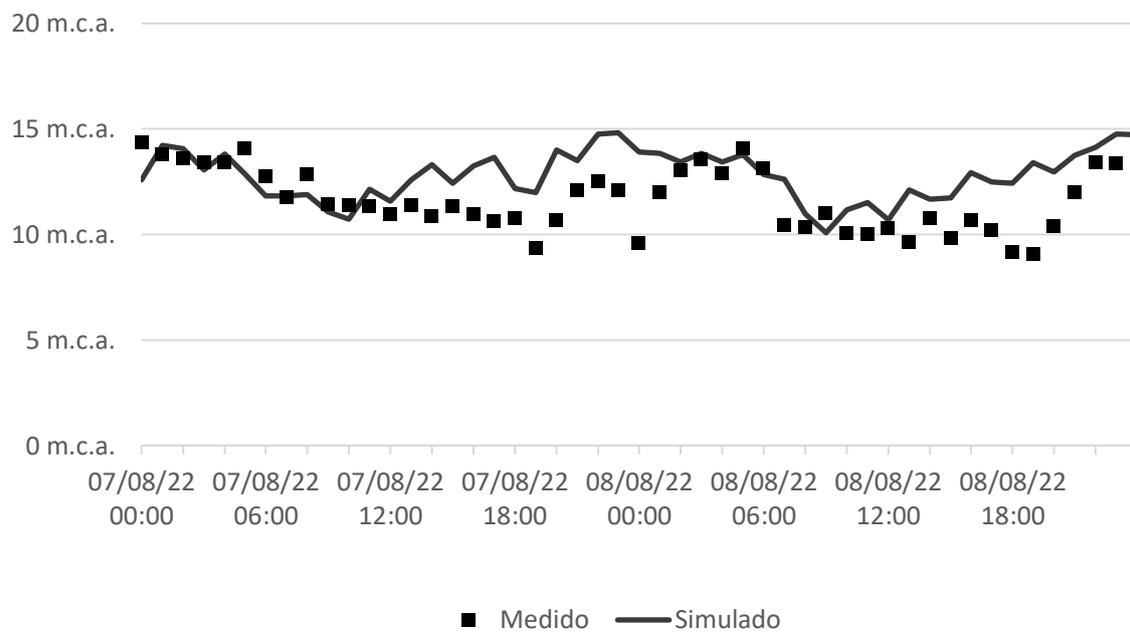
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 76 – Calibração PT-11



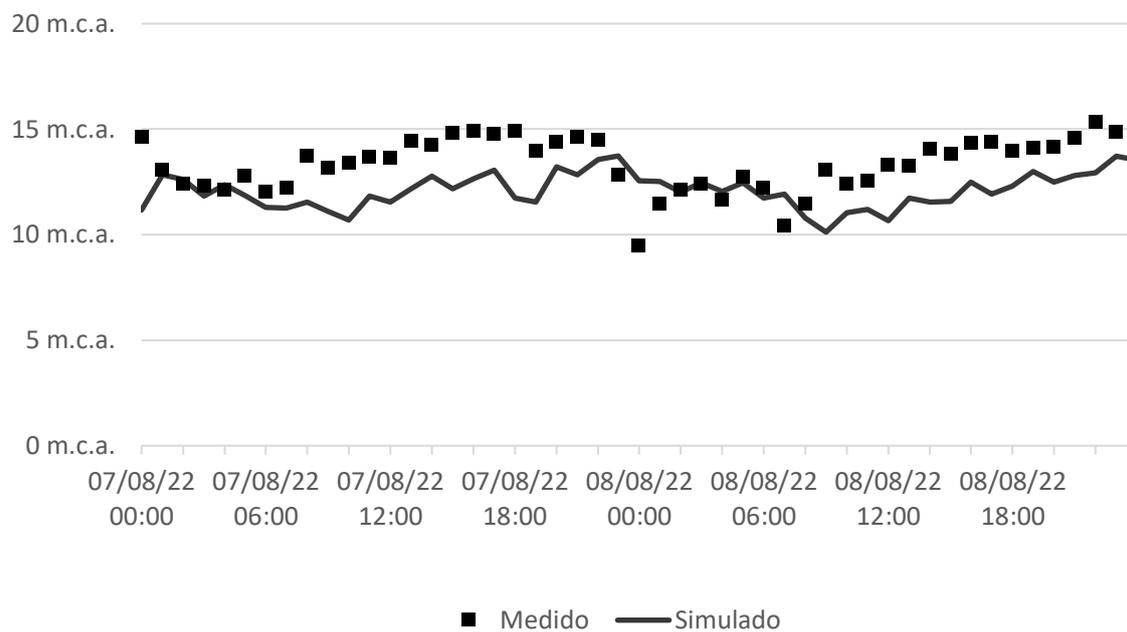
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 77 – Calibração PT-12



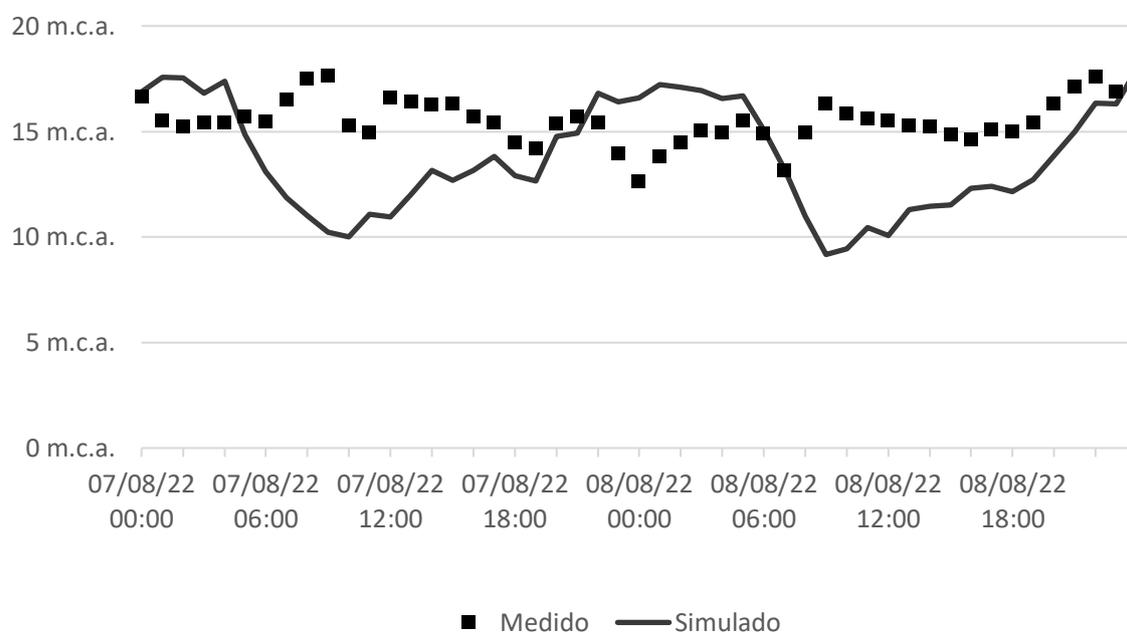
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 78 – Calibração PT-13



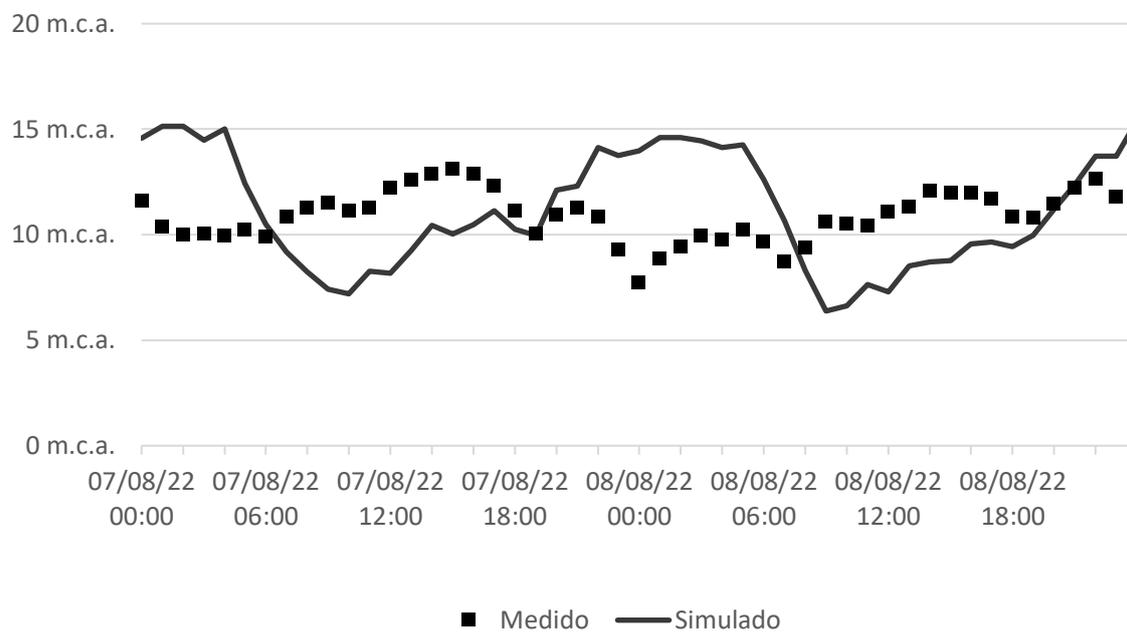
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 79 – Calibração PT-14



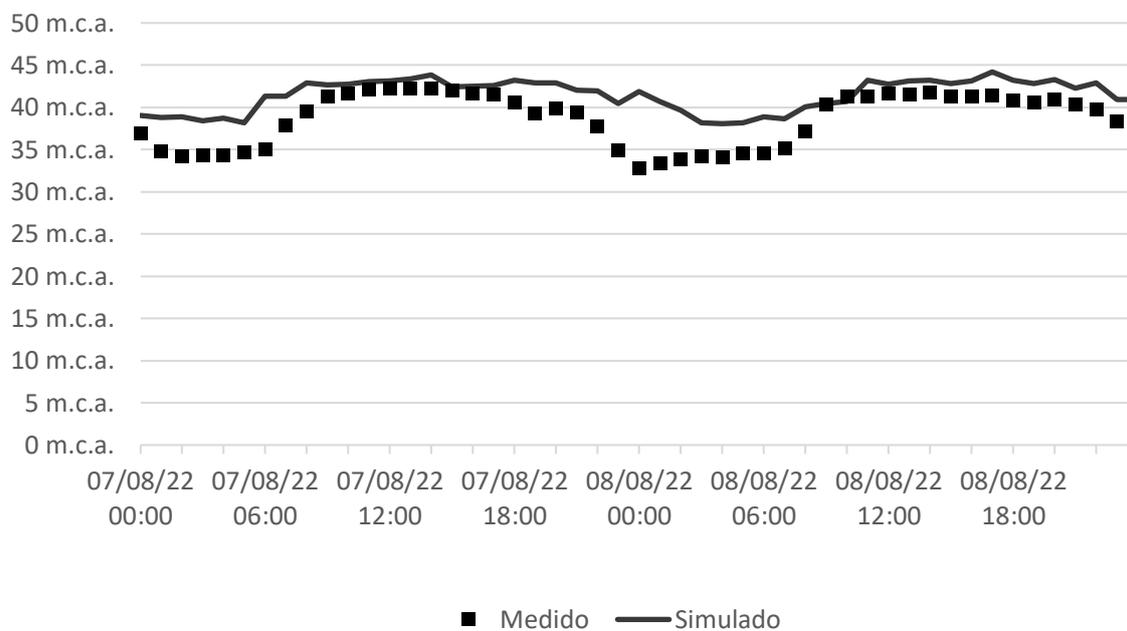
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 80 – Calibração PT-15



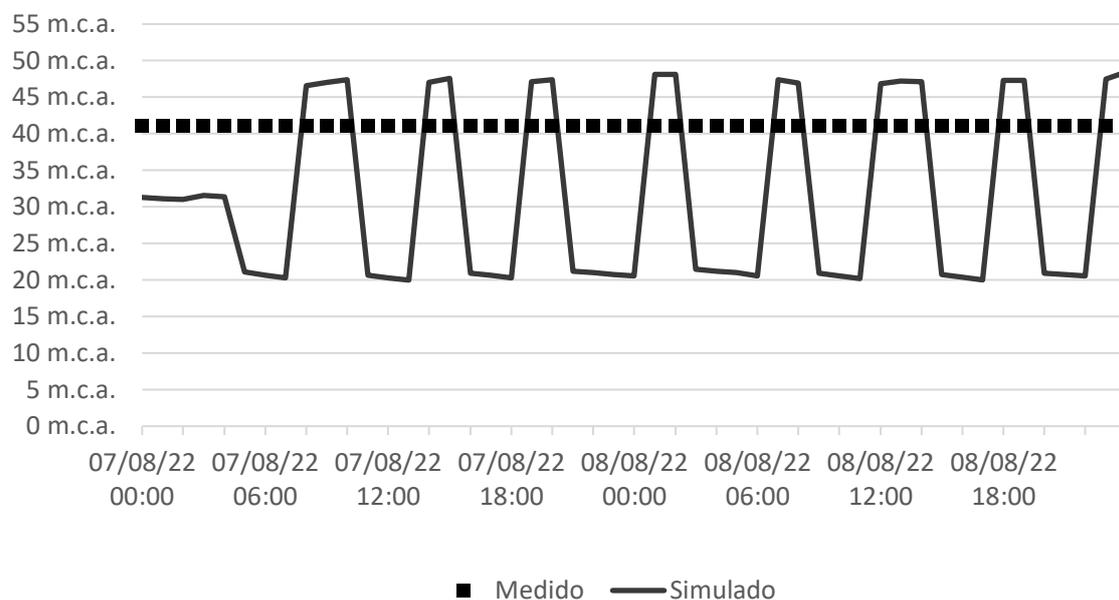
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 81 – Calibração PT-16



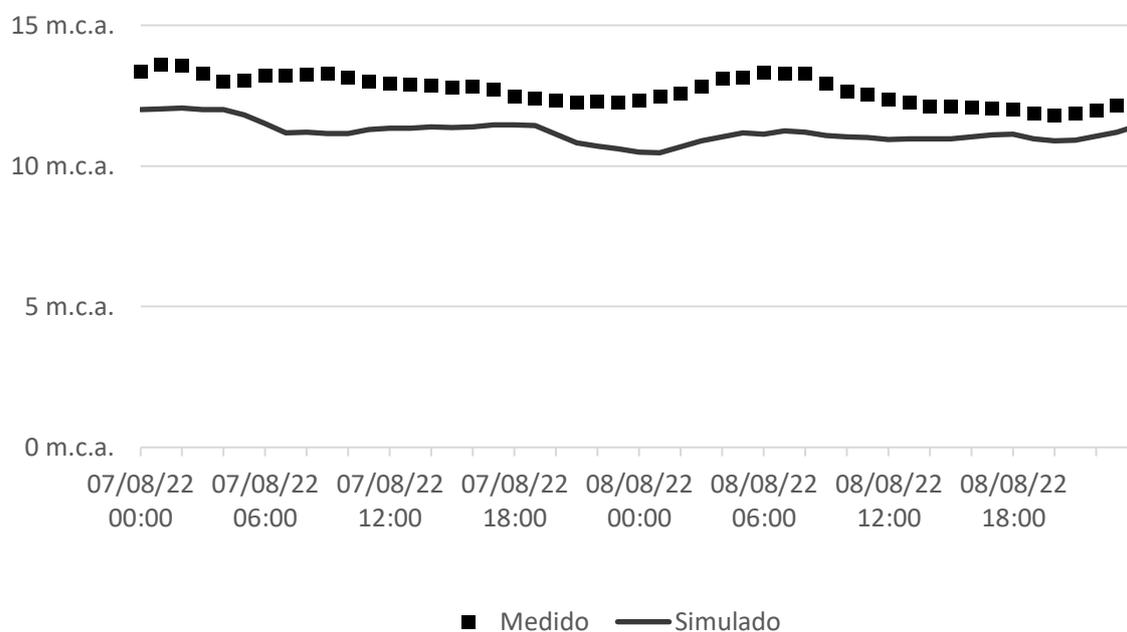
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 82 – Calibração PT-17



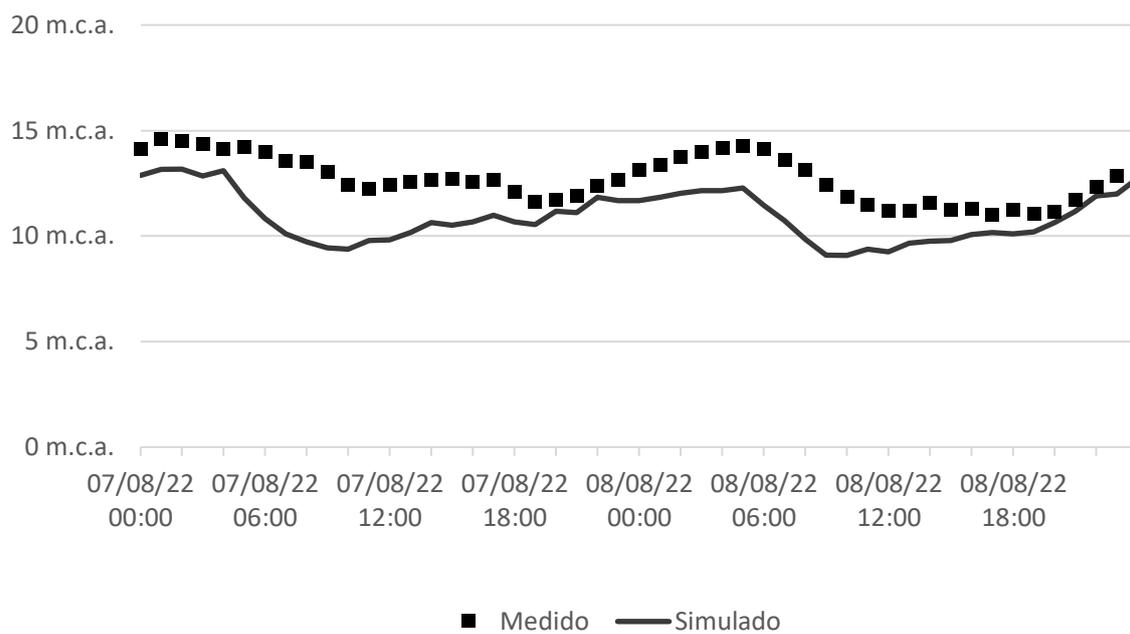
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 83 – Calibração PT-18



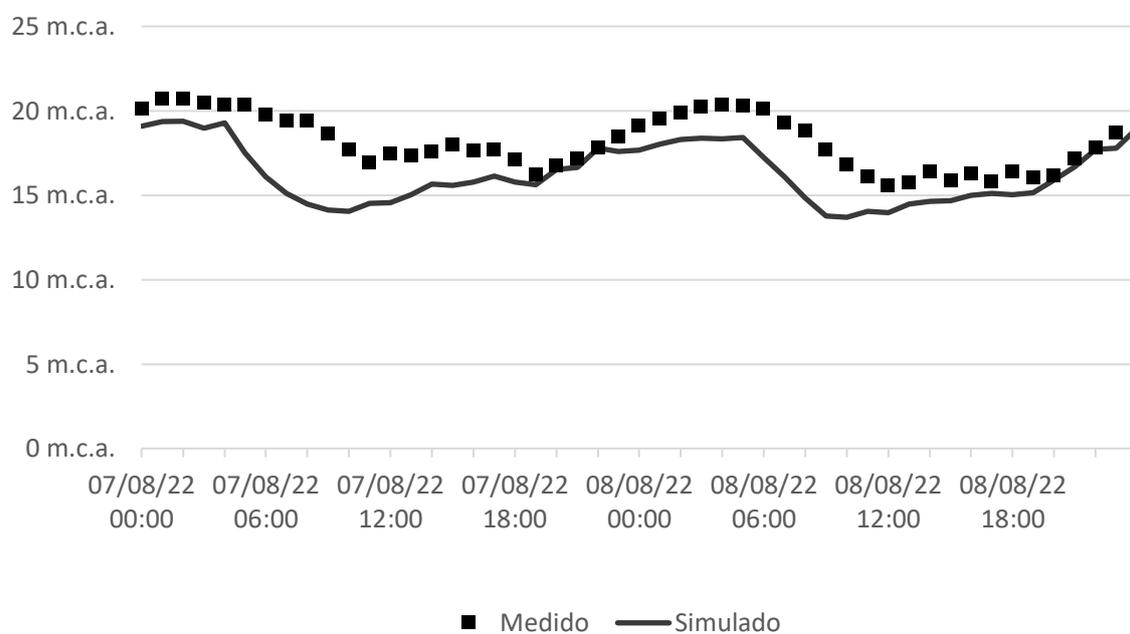
Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 84 – Calibração PT-19



Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).

Figura 85 – Calibração PT-20



Fonte: Adaptado de Sul Magna Saneamento e Meio Ambiente (2023a).