

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**  
**ENGENHARIA AMBIENTAL**

**ARIANE BISOLO**

**CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO E CALIBRAÇÃO DE UM SETOR DE**  
**ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM CAXIAS DO SUL**

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**ARIANE BISOLO**

**CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO E CALIBRAÇÃO DE UM SETOR DE  
ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM CAXIAS DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso entregue como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Me. Tiago Panizzon

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**ARIANE BISOLO**

**CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO E CALIBRAÇÃO DE UM SETOR DE  
ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM CAXIAS DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso entregue como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Me. Tiago Panizzon

**Banca Examinadora**

---

Prof. Me. Tiago Panizzon  
Universidade de Caxias do Sul

---

Prof. Dr. Juliano Rodrigues Gimenez  
Universidade de Caxias do Sul

---

Eng. Esp. Adriano Bolesina  
Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto

## RESUMO

Cada vez mais surgem novas ferramentas computacionais, sistemas de informação e técnicas com algoritmos de simulação que permitem um melhor entendimento de redes de distribuição de água potável e com isso uma melhor gestão operacional e de planejamento. A modelagem hidráulica é uma poderosa ferramenta computacional para estudo e análise do fluxo e o comportamento da água em diversos cenários, possibilitando uma melhor compreensão do SAA e otimizando tomadas de decisões relacionadas à gestão dos recursos hídricos. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo calibrar o modelo hidráulico de um setor localizado na zona oeste do município de Caxias do Sul - RS, que possui 14,53 km de extensão de rede e abastece 2.035 consumidores. Para modelar e calibrar o setor foi utilizado o software *WaterGEMS*, onde foram inseridos os dados coletados em campo e também os dados do cadastro técnico interno fornecidos pelo Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE) de Caxias do Sul, com a finalidade de avaliar a rede de distribuição de água e verificar se as pressões do mesmo estão condizentes com os valores estabelecidos na NBR 12.218 (ABNT, 2017). A calibração do sistema foi realizada com dados de vazão dos macromedidores monitorados por telemetria, e para a calibração das pressões foram coletados dados utilizando *dataloggers* por um período de 7 dias, sendo que a calibração foi realizada para dois desses dias. Na sequência avaliou-se os valores de pressões em todos os nós da rede, sendo identificados 96 pontos com valores acima da máxima recomendada pela norma. Para reduzir a pressão nesses pontos foi sugerida a criação de duas macrozonas, sendo uma abastecida diretamente pelo reservatório e outra seria implementada uma VRP na adutora principal. Foi analisada a possibilidade de redução do número de VRPs existentes na área, a realocação ou reconfiguração das mesmas, sendo que o estudo sugere a realocação de uma delas para cobrir uma área mais ampla e reconfiguração das demais, reduzindo a pressão de saída da válvula. Também foi verificada a perda de carga hidráulica da rede de distribuição com o propósito de identificar os trechos com alta perda de carga, e que necessitariam de substituição ou redimensionamento da rede. Neste sentido, foi projetado um reforço na rede de abastecimento, além da instalação de registros separadores de rede e interligação de redes, com o intuito de diminuir a elevada perda de carga hidráulica na região abastecida pela diretamente pelo reservatório, que era a área que mais possuía perda de carga. A ressetorização também foi necessária para reduzir os pontos com pressões fora dos valores estabelecidos em norma. A modelagem hidráulica se mostrou uma importante aliada para identificar problemas nas redes de abastecimento, garantindo que a água flua de forma eficiente e que a pressão da água seja adequada com a norma em todos os pontos.

**Palavras-Chave:** Sistema de Abastecimento de Água, Modelagem Hidráulica, Calibração.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tipos de vazamentos e ações de combate a perdas reais .....	19
Figura 2 - Componentes da Vazão Mínima Noturna .....	21
Figura 3- Imagem de satélite da área de estudo.....	35
Figura 4 – Reservatório da Zona Oeste .....	37
Figura 5 – Áreas de abastecimento do reservatório.....	37
Figura 6 - Delimitação e características da rede do setor modelado com as zonas de pressão	38
Figura 7 – Mapa da topografia do setor modelado .....	39
Figura 8 - Fluxograma metodológico .....	40
Figura 9 – Localização dos dataloggers de pressão instalados para este estudo .....	42
Figura 10 – Macromedidor do setor de estudo .....	43
Figura 11 - Perfil horário diário das vazões macromedidas no setor .....	48
Figura 12 - Perfil horário semanal das vazões macromedidas .....	49
Figura 13 – Padrão de demanda média.....	50
Figura 14 – Variação do coeficiente de correlação da perda aparente.....	51
Figura 15 – Variação da vazão de entrada do reservatório .....	52
Figura 16- Perfil de vazões da saída do reservatório no macromedidor MM 42 no dia 05/09/23 .....	53
Figura 17- Perfil de vazões da saída do reservatório no macromedidor MM42 no dia 06/09/23 .....	53
Figura 18- Perfil de vazões do setor de estudo no macromedidor MM73 no dia 05/09/23 ....	55
Figura 19 - Perfil de vazões do setor de estudo no macromedidor MM73 no dia 06/09/23 ....	55
Figura 20 – Teste de ajuste de calibração apenas reduzindo o diâmetro na saída da válvula ..	57
Figura 21 – Pressões modeladas para o Ponto 1, antes da calibração .....	58
Figura 22 – Pressões modeladas para o Ponto 1 para o dia 05/09/23, após a calibração .....	59
Figura 23 - Pressões modeladas para o Ponto 1 para o dia 06/09/23, após a calibração.....	59
Figura 24 - Pressões modeladas para o Ponto 2, antes da calibração .....	61
Figura 25 - Pressões modeladas para o Ponto 2 para o dia 05/09/23, após a calibração .....	62
Figura 26 - Pressões modeladas para o Ponto 2 para o dia 06/09/23, após a calibração .....	62
Figura 27 - Pressões modeladas para o Ponto 3, antes da calibração .....	64
Figura 28 - Pressões modeladas para o Ponto 3 para o dia 05/09/23, após a calibração.....	65
Figura 29 - Pressões modeladas para o Ponto 3 para o dia 06/09/23, após a calibração.....	65
Figura 30- Pressões modeladas para o Ponto 4, antes da calibração.....	67

Figura 31- Área de influência do ponto 4.....	67
Figura 32 – Pressões modeladas para o Ponto 4 para o dia 05/09/23, após a calibração .....	68
Figura 33 - Pressões modeladas para o Ponto 4 para o dia 06/09/23, após a calibração.....	68
Figura 34 - Pressões modeladas para o Ponto 5, antes da calibração .....	70
Figura 35 – Ligações que foram desativadas (em preto).....	70
Figura 36 - Pressões modeladas para o Ponto 5 para o dia 05/09/23, após a calibração .....	71
Figura 37 - Pressões modeladas para o Ponto 5 para o dia 06/09/23, após a calibração.....	71
Figura 38 - Zona de Pressão 1 (em azul).....	73
Figura 39 – Zona de Pressão 2 (em azul) .....	73
Figura 40 – Realocação da VRP.....	74
Figura 41 - Reforço de rede projetado (em azul).....	75
Figura 42 – Instalação de separadores (1 e 2) e interligação de rede (3) .....	75
Figura 43 – Ressorização da rede .....	76
Figura 44 – Pressões da rede modelada antes dos ajustes .....	77
Figura 45 – Pressões da rede modelada após os ajustes .....	78
Figura 46 – Perda de carga unitária antes da implementação do reforço de rede na Zona 1 ...	79
Figura 47 – Perda de carga unitária após a implementação do reforço de rede na Zona 1 .....	79

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Componentes do IWA de balanço hídrico para sistema de distribuição de água ....	17
Quadro 2 - Dados de entrada para o modelo hidráulico.....	24
Quadro 3 - Dados fornecidos pelo SAMAE.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de consumidores no setor de estudo.....	35
Tabela 2- Extensão das redes de distribuição no setor de estudo .....	36
Tabela 3 – Endereços das instalações de dataloggers de pressão .....	42
Tabela 4 – Vazão do perfil horário diário do setor, em L/s.....	49
Tabela 5 – Máximas vazões semanais, em L/s .....	49
Tabela 6 – Coeficientes de correlação .....	51
Tabela 7 - Valores de vazão estimados pelo software e macromedidos da saída do reservatório no macromedidor MM42.....	54
Tabela 8 - Valores de vazão estimados pelo software e macromedidos do setor de estudo no macromedidor MM 73 .....	56
Tabela 9 – Valores de pressão estimados pelo software e observados em campo no ponto 1..	60
Tabela 10 - Valores de pressão estimados pelo software e observados em campo no ponto 2	63
Tabela 11 - Valores de pressão estimados pelo software e observados em campo no ponto 3.	66
Tabela 12 - Valores de pressão estimados pelo software e observados em campo no ponto 4	69
Tabela 13 - Valores de pressão estimados pelo software e observados em campo no ponto 5	72
Tabela 14 – Alterações nas pressões das VRPs .....	77

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>13</b>
3.1	SISTEMA PÚBLICO DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA .....	13
3.1.1	Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água.....	14
3.1.1.1	Balço Hídrico – Método IWA .....	15
3.1.1.2	Perdas Aparentes .....	17
3.1.1.3	Perdas Reais.....	18
3.1.1.4	Vazão Mínima Noturna .....	20
3.2	MODELAGEM HIDRÁULICA DE REDES PRESSURIZADAS .....	21
3.2.1	Modelagem Hidráulica de Redes de Água .....	23
3.2.1.1	Consumos.....	24
3.2.1.2	Pressão na rede de água .....	26
3.2.1.3	Perda de carga na rede de água .....	28
3.2.2	Softwares para Modelagem Hidráulica de Redes Pressurizadas .....	30
3.2.3	Método <i>Hardy Cross</i> .....	31
3.2.4	Calibração de Modelos Hidráulicos .....	31
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>34</b>
4.1	DELIMITAÇÃO DO SETOR MODELADO .....	34
4.2	TOPOGRAFIA .....	38
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>40</b>
5.1	COLETA DE DADOS .....	41
5.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO .....	44

5.3	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO COM WATERGEMS .....	45
5.4	AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA .....	47
<b>6</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
6.1	CONSUMO MACROMEDIDO .....	48
6.2	CONSUMO MICROMEDIDO E PERDAS DE ÁGUA.....	50
6.3	CALIBRAÇÃO DA VAZÃO.....	52
6.4	CALIBRAÇÃO DAS PRESSÕES.....	56
6.4.1	Calibração de pressão no Ponto 1 .....	57
6.4.2	Calibração de pressão no Ponto 2 .....	60
6.4.3	Calibração de pressão no Ponto 3 .....	63
6.4.4	Calibração de pressão no Ponto 4 .....	66
6.4.5	Calibração de pressão no Ponto 5 .....	69
6.5	AVALIAÇÃO E PROPOSTAS DE MELHORIA NA REDE DE ABASTECIMENTO DO SETOR.....	72
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E LIMITAÇÕES DO ESTUDO .....</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As problemáticas envolvendo o sistema de abastecimento de água (SAA) impactam a sociedade como um todo, visto que a água é um recurso essencial à vida humana e um bem cada vez mais escasso. De acordo com Tsutiya (2006), a implementação de um SAA com a capacidade de transportar água em quantidade e qualidade adequadas é uma das prioridades das populações, devido a sua importância para suprir as necessidades relacionadas à saúde e ao desenvolvimento industrial.

Com o objetivo de proporcionar água de boa qualidade a um amplo espectro de consumidores, têm sido realizados esforços significativos para garantir um SAA adequado. No Brasil um grande progresso se deu nas décadas de 1970 e 1980 com a implantação do PLANASA – Plano Nacional de Saneamento – que possibilitou ao país a atingir cerca de 90% de atendimento da população urbana (Tsutiya, 2006).

A setorização das redes de água é de extrema importância para uma melhor gestão e controle do sistema, resultando em benefícios tanto para a empresa responsável pelo abastecimento quanto para os consumidores. Essa prática é fundamental para reduzir perdas, melhorar a pressão da água, equilibrar a distribuição, controlar a qualidade, proporcionar um melhor atendimento aos consumidores e garantir uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos.

Hoje, no município de Caxias do Sul, são poucas as áreas que são setorizadas. A ausência ou insuficiência de setorização na distribuição de água, associa-se com a potencial presença de maiores índices de perdas, na medida em que dificulta e retarda a detecção de pontos de vazamentos, tornando difícil de controlar as pressões da água na tubulação. Além disso, dificulta a execução do serviço de manutenção das redes, como por exemplo a interrupção programada do fornecimento (manutenção preventiva) quando necessário, e também as que não são planejadas (manutenção corretiva).

As redes de abastecimento de água estão sujeitas a maiores oscilações de pressões devido à, por exemplo, variações acentuadas de cotas topográficas, que é o caso do município. Neste sentido, a reformulação de setores e o planejamento adequando de futuros setores devem seguir os limites de pressão indicados no capítulo 5.3 da norma técnica NBR 12218 (ABNT, 2017), que está descrito no capítulo 3.2.1.2 - Pressão na rede de água deste trabalho.

Com o objetivo regular a pressão da água nas tubulações, são instaladas Válvulas Reguladoras de Pressão (VRP), que reduzem e estabilizam as pressões de modo a diminuir a quantidade de novos vazamentos e a vazão dos vazamentos existentes, porém, não é a única

alternativa para reduzir as pressões nas redes de distribuição e devem ser utilizadas em situações pontuais.

De acordo com o cadastro técnico interno do Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE) de Caxias do Sul, o município possui 2226 km de rede de distribuição e 310 VRPs (SAMAE, 2023). De acordo com o cadastro técnico a autarquia de abastecimento já possui sistema de monitoramento por telemetria para estações de bombeamento de água, controle de nível de reservatórios e macromedidores instalados em DMCs (Distrito de Macromedição e Controle), mas não existe nenhuma VRP com monitoramento por telemetria (SAMAE, 2023).

Visando a necessidade de elevar os níveis de eficiência, estão sendo desenvolvidas cada vez mais novas ferramentas computacionais, sistemas de informação e técnicas com algoritmos de simulação que permitem um melhor entendimento de redes de distribuição de água potável e com isso, uma melhor gestão operacional e de planejamento (Bentley, 2017).

A modelagem hidráulica é uma poderosa ferramenta que utiliza métodos matemáticos e computacionais para estudo e análise do fluxo e o comportamento da água em diversos cenários, sendo assim possível buscar uma melhor compreensão do sistema de distribuição por redes que compõe o SAA e tomadas de decisões relacionadas à gestão dos recursos hídricos melhores e mais rápidas. A modelagem hidráulica tem a capacidade de avaliar as variações de pressão e as perdas de água no sistema, proporcionando simultaneamente uma contribuição valiosa para a preservação do meio ambiente.

Neste trabalho foi realizado um estudo de caso por meio da criação de um modelo hidráulico e sua calibração utilizando o *software WaterGEMS* para um setor de abastecimento de água localizado na zona oeste de Caxias do Sul, no intuito de simular a operação e adquirir o entendimento do sistema avaliado, facilitando a compreensão de seu comportamento hidráulico em situações operacionais relacionadas principalmente às perdas de água, perdas de carga e pressões na rede de abastecimento. Os resultados obtidos por meio da modelagem hidráulica foram posteriormente utilizados para identificar os problemas de pressão na rede de abastecimento do setor de estudo e propor melhorias para a área de estudo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo realizar a modelagem hidráulica e a calibração de um setor de abastecimento de água localizado na zona oeste do município de Caxias do Sul, utilizando o software *WaterGEMS*.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho estão descritos a seguir:

- a) Definir a área de estudo;
- b) Sistematizar as informações referentes ao SAA;
- c) Elaborar o modelo hidráulico do setor, utilizando o software *WaterGEMS*, com base em dados do cadastro técnico do SAMAE e levantamentos de campo;
- d) Calibrar o modelo hidráulico;
- e) Avaliar o funcionamento hidráulico da rede do setor de distribuição de água em relação às pressões e perdas de carga e propor melhorias para o setor.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos próximos subcapítulos serão tratados temas relativos ao sistema de abastecimento de água como setorização e perdas no SAA, e também referentes à modelagem hidráulica, como parâmetros para cálculos do modelo, relação entre pressões e perdas reais, *softwares* para modelagem hidráulica de redes pressurizadas e calibração do modelo hidráulico.

#### 3.1 SISTEMA PÚBLICO DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Os Sistemas de Abastecimento de Água são um conjunto de instalações destinadas a captar, transportar, tratar, reservar e distribuir água, compreendendo as unidades operacionais necessárias ao abastecimento (Brasil, 2017). O objetivo principal do SAA é fornecer aos usuários água de boa qualidade, além de quantidade e pressões adequadas (Tsutiya, 2006).

De acordo com Hespanhol, Mierzwa e Braga Junior (2005), as partes que integram um sistema de abastecimento de água são:

- Manancial: é a fonte de onde a água é retirada para a captação da água bruta. Os mananciais podem ser superficiais ou subterrâneos. Deve ser escolhido visando a qualidade e a disponibilidade da água;
- Captação: estruturas necessárias para a captação da água dos mananciais;
- Adução: tubulações que ligam a captação ao tratamento ou o tratamento até o reservatório de distribuição. A adução pode ser por gravidade, recalque ou mista. Prioriza-se a adução por gravidade para evitar consumos excessivos com energia;
- Tratamento: trata-se a água para remover impurezas e microrganismos que causem mal à saúde, adequando aos padrões e normas de qualidade exigidos;
- Reservatório de distribuição: estruturas destinadas a reservar água e regularizar as variações de consumo em um SAA, permitindo além de pressões mais estáveis, um maior equilíbrio entre as vazões de adução e distribuição;
- Rede de distribuição: parte final de um SAA, responsável por distribuir a água dos reservatórios aos consumidores. Formada por tubulações e acessórios necessários, podem ter diferentes formatos de traçado.

A setorização de redes consiste na divisão da rede em setores isolados entre si (Costa, 2020). A NBR 12218 (ABNT, 2017) define o setor de manobra como a menor subdivisão da rede de distribuição, cujo fluxo da água pode ser isolado ou direcionado para permitir manutenções e/ou intervenções, mantendo o abastecimento do restante da rede.

Com a setorização é possível facilitar a manutenção e diminuir os impactos causados durante a execução dos serviços, como por exemplo, a interrupção do fornecimento, além de reduzir as perdas de água. A setorização possibilita maior controle de pressões da água na tubulação (SANESUL, 2020). Para definir um setor é preciso analisar as condições topográficas e o perfil dos consumidores da área (Motta, 2010).

### 3.1.1 Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água

As perdas são caracterizadas pela diferença do volume de água produzido e aquele micromedido nos pontos de consumo e podem ocorrer em qualquer etapa de um sistema de abastecimento de água, desde a captação até o ponto de consumo (Kusterko, 2015).

A instalação de macromedidores nas linhas alimentadoras são fundamentais para registrar o volume fornecido ao setor e, pela diferença entre o somatório das leituras registradas nos micromedidores, pode-se calcular a perda total ocorrida na distribuição, conhecendo o índice de perdas de cada setor (Venturini, 2003).

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), no ano de 2021 o índice de perdas nas redes de distribuição no estado do Rio Grande do Sul foi de 41,59% (Brasil, 2023). Uma das metas estabelecidas pelo Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) em relação à região Sul do país consistia em reduzir o índice de perdas na distribuição de água de 32%, em 2023, para 29%, até 2033 (Brasil, 2019).

De acordo com Andrade Sobrinho e Borja (2016), o controle das perdas de água em sistemas de abastecimento público se torna uma necessidade, uma vez que os volumes não contabilizados não são faturados. A quantificação das perdas é de suma relevância para os prestadores de serviço no que diz respeito à eficiência de distribuição de água, além de aspectos econômicos e ambientais. As perdas de água no sistema de abastecimento público são classificadas em dois tipos: perdas aparentes e perdas reais, que serão abordadas nos próximos subcapítulos 3.1.1.2 e 3.1.1.3 deste trabalho.

Existe uma estreita relação entre a pressão média na rede e a vazão de vazamento. Por meio de dados da vazão inicial ( $Q_0$ ) que se tem no vazamento, da pressão inicial que se tem na rede ( $p_0$ ) e atribuindo para a pressão final ( $p_1$ ) o valor que se deseja reduzir a pressão, é possível obter o valor da redução do volume de água perdida nos vazamentos ( $Q_1$ ). Esta relação foi teorizada como sendo expressa pela Equação (1) (Brasil, 2007):

$$Q_1 / Q_0 = (p_1 / p_0)^{N1} \quad (1)$$

Onde:

- $Q_1$  = Volume do vazamento final (m<sup>3</sup>/dia);
- $Q_0$  = Volume do vazamento inicial (m<sup>3</sup>/dia);
- $p_1$  = Pressão final (mca);
- $p_0$  = Pressão inicial (mca);
- $N_1$  = Coeficiente da relação pressão x vazamento – Os valores usuais são:
  - 0,50: Seção do tubo que não se altera com o vazamento (exemplos: tubos de ferro fundido e aço).
  - 1,00: Para uma avaliação simplificada. Pode-se dizer que na redução de 1 % no valor da pressão de um sistema, haverá uma redução de 1 % no vazamento.
  - 1,15: Para as condições gerais da rede de distribuição de água de um setor, onde se misturam os materiais, trechos com ferro fundido, PVC, aço, PEAD ou outro tipo de material.
  - 1,50: Seção do tubo que se altera com o vazamento (exemplos: tubos de PVC e PEAD).

#### 3.1.1.1 Balanço Hídrico – Método IWA

A International Water Association (IWA), criou um grupo de trabalho a fim de estudar, discutir e propor uma padronização mundial de terminologia, conceitos e indicadores de perdas nos SAA. Esses trabalhos desenvolvidos surgiram à tona por volta do ano 2000. O Brasil adotou esse entendimento por meio do Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS) do Ministério das Cidades e de várias companhias estaduais e municipais de saneamento (ABES, 2015).

A avaliação das perdas no balanço hídrico depende crucialmente da quantificação dos volumes delimitados. Esse processo é conduzido por meio da macromedição, que serve como a principal referência para o balanço hídrico total. A macromedição envolve a leitura dos volumes produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETA), os quais são distribuídos para a rede de abastecimento em subsetores ou outras subdivisões operacionais. Além disso, a micromedição também desempenha um papel fundamental. Essa etapa envolve a medição dos volumes de água na entrada dos consumidores finais a partir de leituras periódicas dos hidrômetros instalados (ABES, 2015).

Por meio desta técnica, é possível estabelecer prioridades nas ações de controle e redução, face à compreensão do impacto relativo de cada componente das perdas (Brasil, 2007). Com base nas considerações da IWA, as definições dos componentes do Balanço Hídrico são (Brasil, 2022):

- Volume Fornecido ao sistema: volume anual de água que entra em um sistema;
- Consumo Autorizado: volume de água anual medido ou não, que é fornecido para aos consumidores ou utilizado pela própria autarquia;
- Perdas de Água: diferença entre o volume que entra no sistema e o consumo autorizado;
- Consumo Autorizado Faturado: são os volumes que geram receita para as companhias, por meio do faturamento e emissão de contas aos consumidores finais;
- Consumo Autorizado Não Faturado: volume autorizado para uso, mas que não gera arrecadação para a companhia. É caracterizado por volumes medidos: usos da própria concessionária para lavagem de reservatórios e filtros, por exemplo, e não medidos: lavagem de logradouros, uso para manutenção de espaço públicos e combate a incêndios;
- Perdas Aparentes: são os volumes consumidos, mas não contabilizados, seja por erros de medição, fraudes ou erros de cadastro;
- Perdas Reais: volumes de água que são perdidos por meio de vazamentos na distribuição ou extravasamentos de reservatórios;
- Águas faturadas: representa a parcela de água que foi comercializada;
- Águas não faturadas: diferença entre o volume total de água que entra no sistema, e o consumo autorizado. Engloba não só as perdas reais e aparentes, mas também o consumo autorizado não faturado.

No Quadro 1 é apresentada matriz do Balanço Hídrico na concepção desenvolvida pelos pesquisadores da IWA (Brasil, 2022).

Quadro 1- Componentes do IWA de balanço hídrico para sistema de distribuição de água

<b>Volume Fornecido ao Sistema</b> (compensado para imprecisões conhecidas)	<b>Consumo Autorizado</b>	Consumo Autorizado Faturado	Consumo Medido Faturado	Água Faturada	
			Consumo Não Medido Faturado		
		Consumo Autorizado Não Faturado	Consumo Medido Não Faturado	Água Não Faturada (ANF)	
			Consumo Não Medido Não Faturado		
	<b>Perdas de Água</b>	Perdas Aparentes			Consumo Não Autorizado
					Imprecisão nos Hidrômetros e Erro no Manuseio de Dados
		Perdas Reais			Vazamento nas Redes
					Vazamentos e Extravasamentos em Reservatórios
	Vazamento em Ligações até o Hidrômetro				

Fonte: Brasil (2022).

### 3.1.1.2 Perdas Aparentes

A perda aparente, também chamada de perda não física ou comercial, é a água que é consumida, porém não é faturada pela companhia, ou seja, decorrente de erros de medição de volumes (submedição nos hidrômetros), fraudes, subestimações e erros no cadastro comercial da companhia de saneamento (ABES, 2015).

Para Cheung e Bezerra (2013), os erros de medição são considerados uma das principais causas de perdas aparentes nas companhias de abastecimento de água e ocorrem por diversos motivos. A existência de um parque de hidrômetros com uma ampla variedade de tamanho, tipo e classe, aliada a variação de padrões de consumo existentes nos sistemas, dificulta a correta especificação dos medidores pelos profissionais. As principais razões pelas quais não é medida com precisão a vazão fornecida são: fraudes, tempo em operação, qualidade da água, qualidade do medidor, regime de funcionamento da rede de distribuição, instalação incorreta, como por exemplo, hidrômetro inclinado, exposição ao sol ou calor extremo, dimensionamento errado, adulteração, falha na manutenção e reparação incorreta.

Os principais motivos que ocasionam erros no manuseio da conta dos clientes são: alteração no banco de dados das empresas, clientes que consomem água temporariamente sem registros de faturamento, erro de leituras dos medidores, erro humano na análise de dados e do faturamento e desatualização do cadastro dos clientes (Cheung; Bezerra, 2013).

O consumo não autorizado ocorre devido a consumidores que buscam consumir água sem pagar pelo seu uso. Dentre as causas mais comuns do consumo não autorizado, estão as ligações clandestinas, uso proibido de água nos pontos de descarga e hidrantes distribuídos ao longo do sistema de distribuição (Cheung; Bezerra, 2013).

As ações primárias mitigadoras para as perdas aparentes se resumem em evitar as suas causas. Quando não é possível, ou viável, parte-se para as seguintes ações secundárias (Philippi Jr; Galvão Jr, 2012):

- Treinamento de leituristas, visando à implantação de leitura computadorizada, com o auxílio de palms ou coletores similares;
- Certificação da qualidade de hidrômetros;
- Utilização de hidrômetros mais precisos ou com faixa de utilização otimizada;
- Acompanhamento da idade média do parque de hidrômetros (pesquisas indicam a viabilidade econômica na substituição de hidrômetros com mais de cinco anos);
- Acompanhamento do nível de utilização dos hidrômetros por volume;
- Medidores mecânicos utilizados em vazões superiores às nominais tendem a apresentar submedição antes do final de sua vida útil;
- Criação de equipes de combate a fraudes;
- Utilização de medidas e acessórios que dificultem a propagação de fraudes.

### 3.1.1.3 Perdas Reais

As perdas reais correspondem ao volume de água perdido nos vazamentos de adutoras, redes de distribuição, ramais prediais e extravasamento de reservatórios. Essas perdas, anteriormente denominadas perdas físicas, são propriamente as perdas do “produto água” (Motta, 2010).

As perdas reais geralmente são responsáveis pela maioria das perdas gerais de sistemas, e, em geral, são resultados de: pressões elevadas na rede de distribuição (acima de 50 mca), redes antigas (com mais de vinte anos), redes, adutoras ou conexões de materiais de baixa qualidade, sistemas mal gerenciados operacionalmente e má qualidade da mão de obra na execução de adutoras, redes e ramais (Philippi Jr; Galvão Jr, 2012).

Existem três tipos de vazamentos na rede de distribuição de água (ABES, 2015):

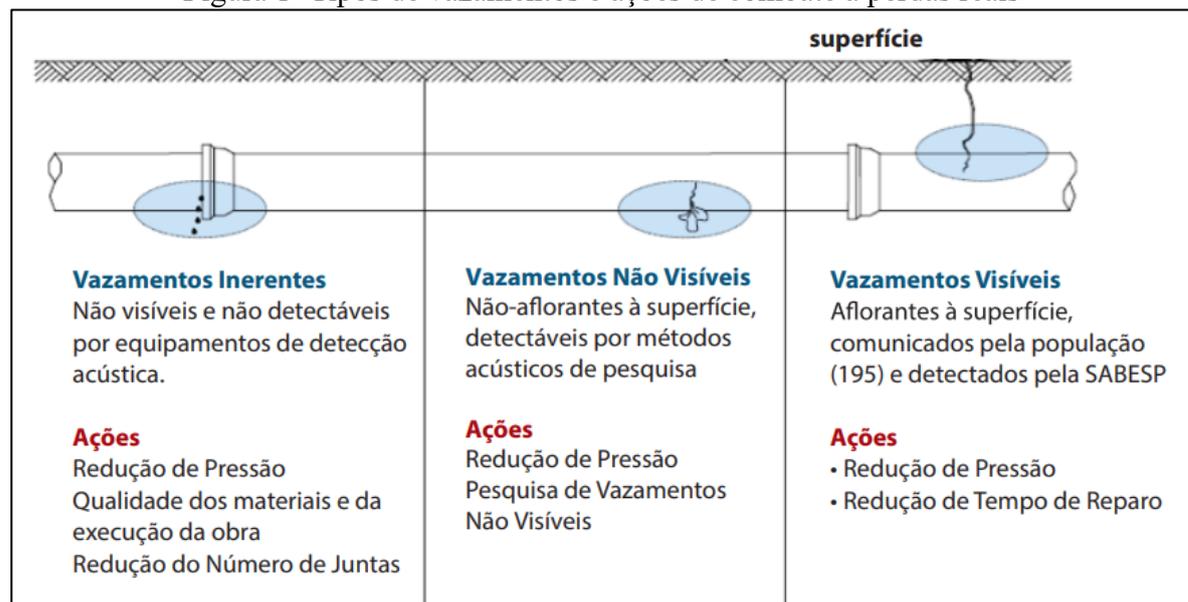
- Vazamentos Não Visíveis e Não Detectáveis (Inerentes): possuem baixas vazões e longa duração, não afloram à superfície do terreno e não são passíveis de serem identificados pelos equipamentos atuais de detecção acústica.

- Vazamentos Não Visíveis e Detectáveis: não afloram à superfície, mas são passíveis de identificação pelos equipamentos atuais de detecção acústica, cuja duração e respectivo volume perdido estão diretamente associados ao intervalo entre duas varreduras de pesquisa de vazamentos.

- Vazamentos Visíveis: com altas vazões e aflorantes à superfície, são vistos e comunicados pela população à operadora de saneamento para o reparo.

Os tipos de vazamentos podem ser visualizados na Figura 1, relacionando os tipos de ações que refletem na redução das perdas reais (FUNASA, 2014).

Figura 1- Tipos de vazamentos e ações de combate a perdas reais



Fonte: FUNASA (2014).

As perdas nos vazamentos em campo são medidas utilizando um recipiente com volume conhecido durante um determinado tempo. Quando não é possível medir a perda em campo, calcula-se por meio da peça com vazamento que foi retirada durante o reparo, utilizando a fórmula geral para pequenos orifícios, representada na Equação (2) (Brasil, 2007):

$$Q = C \times S \times \sqrt{2gh} \quad (2)$$

Onde:

- $Q$  = vazão calculada do vazamento (L/s);
- $C$  = coeficiente de rugosidade, adota-se o valor de 0,61;
- $h$  = pressão medida no local do vazamento (mca);
- $S$  = área da fissura por onde escoo o vazamento (cm<sup>2</sup>).

As ações primárias mitigadoras para as perdas reais se resumem em evitar ou reduzir as causas citadas anteriormente. Quando não é possível, parte-se para as seguintes ações secundárias (Philippi Jr; Galvão Jr, 2012):

- Ressetorização e criação de Distritos de Medição e Controle (DMCs);
- Monitoramento e mapeamento de pressões na rede de distribuição;
- Instalação de válvulas de redução de pressões na rede;
- Realização de manobras operacionais noturnas, evitando excesso de pressões;
- Investigação de vazamentos visíveis e ocultos;
- Substituição de trechos de adutoras ou rede comprometidas.

#### 3.1.1.4 Vazão Mínima Noturna

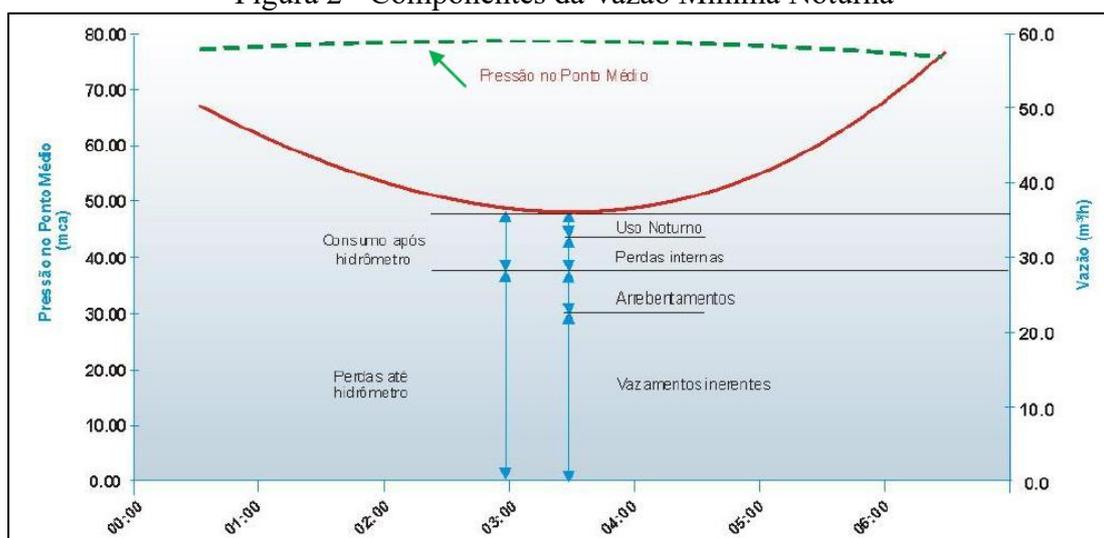
Outro método para determinar as perdas reais é a Vazão Mínima Noturna (VMN), um método vantajoso devido ao fato de que, no momento de sua ocorrência, há pouco consumo e as vazões são estáveis, estando uma parcela significativa do seu valor relacionada às vazões dos vazamentos (Tsutiya, 2006).

Um ponto importante a ser considerado neste método é que a vazão dos vazamentos é máxima durante a madrugada devido às pressões máximas na rede, mas durante o dia as pressões disponíveis diminuem devido ao aumento do consumo, reduzindo também as vazões de vazamento. Caso o valor da VMN obtido durante a madrugada fosse utilizado para as 24 horas de um dia, haveria uma superestimação do volume perdido (Darli, 2020). O acompanhamento da vazão mínima noturna é um forte indicador operacional no distrito, pois a sua elevação sinaliza a ocorrência de vazamentos (Santos; Montenegro, 2014).

Para chegar nos valores das perdas reais por meio da vazão mínima noturna, é necessário o conhecimento dos elementos que compõe essa vazão: consumo noturno residencial, consumo noturno não residencial, consumo noturno excepcional, perdas noturnas após o hidrômetro e perdas reais na rede de distribuição de água, representados na Figura 2 (Melato, 2010).

O pico de consumo geralmente se dá entre às 11 e 14 horas e o mínimo consumo entre às 03 e 04 horas. A vazão mínima noturna pode ser medida utilizando equipamentos de medição de vazão e pressão, desde que adotados procedimentos adequados de fechamento dos registros limítrofes do setor em análise (Santos, 2013).

Figura 2 - Componentes da Vazão Mínima Noturna



Fonte: Santos (2013).

### 3.2 MODELAGEM HIDRÁULICA DE REDES PRESSURIZADAS

Os modelos de sistemas de abastecimento de água são ferramentas práticas de apoio à decisão que podem ser usadas para construir vários cenários de gestão para melhorar a eficiência e confiabilidade das redes existentes e desenvolver novas redes (Abdulsamad, Abdulrazzaq, 2022).

O funcionamento dos modelos hidráulicos é baseado nos conceitos de conservação de massa e de conservação de energia. Assim, para cada nó em um sistema hidráulico em conduto forçado, a soma das vazões afluentes deve ser igual à soma das vazões efluente, e para cada anel deve ser verificada a equação de perda de carga (Heller; Pádua, 2016).

De acordo com Coelho et al. (2006), os modelos de simulação hidráulica são muito utilizados e conceituados no campo de projetos e de diagnósticos do funcionamento de sistemas de abastecimento de água, desta forma, sendo uma ferramenta importante ao discernimento e experiência dos profissionais envolvidos. Ele ainda aponta as utilizações mais comuns dos modelos de simulação hidráulica:

- Permitem o dimensionamento dos sistemas da forma mais eficaz, por meio da análise das topologias, escolhas de diâmetros e materiais, reservação necessária e instalações de elevatórias;

- Apoio à elaboração de planos de desenvolvimento estratégico, com recurso à simulação das grandes opções, em escala não detalhada, mas com projeções no tempo, sobretudo das solicitações (consumos);

- Reabilitação de sistemas deficientes e a programação das intervenções com redução dos impactos aos consumidores;

- Apoio a setorização dos sistemas, por meio das análises de viabilidade e impacto da criação dos setores;

- Auxílio no programa de controle e redução de perdas de água, por meio de análises para redução das pressões.

Mesmo sendo cada vez mais utilizada, a modelagem hidráulica nos SAA ainda é mal entendida, ou vista como algo complexo que depende de um cadastro extremamente completo, com diversos dados de medições. No entanto, a elaboração de modelos hidráulicos, mesmo com cadastros incompletos e dados duvidosos, pode ser vital para o entendimento de um SAA e auxiliar na localização de problemas na rede sem ser necessário realizar escavações ou algum trabalho de campo (Manzi, 2020).

Walski, et al. (2003) aponta que no modelo hidráulico devem ser inseridos quaisquer elementos que sejam importantes para o sistema ou possam potencialmente influenciar o sistema. Para a maioria dos modelos, este critério inclui:

- Grandes consumidores de água;
- Pontos de condições conhecidas, como pontos de amostragem;
- Pontos críticos com condições desconhecidas;
- Tubos de grande diâmetro;
- Canos que completam curvas importantes;
- Bombas, válvulas de controle, tanques e outros elementos de controle.

A modelagem hidráulica computacional permite ao usuário simular diversos cenários reais e testar possibilidades visando orientar as intervenções físicas no sistema por meio das melhores respostas dadas pelo software, economizando recursos da companhia e otimizando os serviços prestados (ASSEMAE, 2016).

Diante de um serviço de engenharia, múltiplas soluções devem ser consideradas no período de análises. Os Cenários e Alternativas permitem ao usuário modelar um número infinito de soluções de uma maneira rápida e organizada dentro de um só modelo. Ao executar

o modelo, gera-se uma grande quantidade de resultados, entre os quais pode-se citar: vazões, pressões, gradientes hidráulicos e níveis de reservatórios, para cada cenário (Bentley, 2017).

A utilização destes modelos visa o aumento na qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias, auxiliando na designação mais correta de recursos financeiros, além do aumento na segurança da operação e ajuda no planejamento e gestão dos sistemas de distribuição de água (Cunha; Pinto, 2014).

### 3.2.1 Modelagem Hidráulica de Redes de Água

Os dados de entrada são a base do trabalho, ou seja, os valores característicos da tubulação, situação como ligado/desligado para bombas ou aberto/fechado para registros e válvulas, níveis de reservatórios, pontos de funcionamento de bombas, entre outros. A partir desses dados, o software fará a análise de engenharia do sistema em estudo. Essas informações de entrada serão responsáveis pelos dados de saída calculados pelo *software*. Porém, é necessário ressaltar que quanto melhor a qualidade e a quantidade dos dados de entrada, maior será a precisão dos resultados, além de requerer conhecimento técnico para correta aplicação e interpretação do modelo hidráulico (Heller; Pádua, 2016).

Muitas vezes estas informações se encontram disponibilizadas em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), uma coleção organizada de *hardware* de computador, *software*, dados e pessoal projetado para capturar, armazenar, atualizar, manipular, analisar e exibir todas as formas de informações geograficamente referenciadas (Zhang, 2006). Desta forma, o SIG realiza integração de *softwares* de desenho com ferramentas de cartografia conectado a um banco de dados. O SIG pode ser utilizado para investigações científicas, organização de recursos e planejamento de evoluções (Sarzedas, 2009).

De acordo com Sarzedas (2009), o SIG é útil para o gerenciamento global de um SAA, podendo ser utilizado para armazenar todas as informações relativas aos consumidores, gerenciar informações técnicas, como dados da rede de distribuição, *boosteres*, registros e gerenciar informações administrativas. Também pode ser utilizado para armazenar a localização dos consumidores, dados econômicos e financeiros, assim como dados de consumo.

Para que a análise hidráulica seja útil ao que se destina, é necessário que a entrada de dados seja cuidadosa, pois dados de entrada ruins vão gerar resultados de saída igualmente ruins. Assim surge a necessidade de redobrar a atenção quando a entrada de informações é automatizada, seja por meio de interface com um SIG ou programas próprios de leitura de dados de cadastros em *Computer Aided Desing (CAD)*, pois podem ocorrer erros de conexão das redes

e acessórios (Heller; Pádua, 2016). Os autores apontam as informações de entrada necessárias para modelos de simulação de SAA, indicadas no Quadro 2. Além destes, outras informações poderão ser necessárias, dependendo da finalidade e da situação que se deseja simular.

Quadro 2 - Dados de entrada para o modelo hidráulico

<b>Elemento</b>	<b>Dados a fornecer para o software</b>
<b>Tubos</b>	Extensão
	Diâmetro
	C, para o caso de utilizar a expressão de Hazen-Williams ou $\epsilon$ , rugosidade, no caso de utilizar a expressão universal (Darcy-Weisbach)
<b>Nós (junções)</b>	Cota
	Demandas (curva horária - se for o caso)
<b>Fontes</b>	Nível de água ( <i>reservoirs</i> )
	Curva de variação sazonal (se for o caso)
<b>Reservatórios</b>	Nível máximo ( <i>tanks</i> )
	Nível mínimo ( <i>tanks</i> )
	Nível inicial ( <i>tanks</i> )
<b>Outros</b>	Bombas (curva característica)
	Válvulas (tipo, regulagem e curva característica - se for o caso)
	Concentração inicial e coeficientes de reação do produto químico em uso, quando do estudo da qualidade de água
	Regras de automação (tipos de comando para elevatórias, válvulas, etc.), normalmente comandadas por tempo, nível máximo e mínimo de reservatórios, pressão máxima ou mínima em determinado nó, etc.)

Fonte: Heller, Pádua (2016).

### 3.2.1.1 Consumos

É de fundamental importância para o planejamento e gerenciamento do SAA a previsão do consumo de água. As tubulações, estruturas e equipamentos são dimensionados em função das vazões, que dependem do consumo médio por habitante (Tsutiya, 2006).

Em um SAA, a quantidade de água demandada e a consumida varia constantemente em função da época do ano, dia da semana, hora do dia, condições climáticas, hábitos da população, etc (Azevedo Netto; Fernández, 2015).

Tsutiya (2006) elenca que vários são os fatores que influenciam o consumo de água, como: as condições climáticas, pois o consumo é maior no verão e em regiões mais quentes; os hábitos e nível de vida da população, afetam o consumo pois quanto mais elevado o poder econômico maior será o consumo; a natureza da cidade, devido as suas características podendo ser mais industrial ou residencial; a presença de hidrômetros, faz com que haja uma diminuição no consumo comparado com cidades que não possuem essa medição; a pressão na rede faz com que o consumo aumente; a existência de rede de esgoto influencia o aumento do consumo; e quanto menor o preço da água maior será o consumo.

Durante o dia, a demanda e consumo variam continuamente e, com isso, a vazão atinge os valores máximos por volta das 12 horas. No período da noite, o consumo atinge valores mínimos nas primeiras horas da madrugada, apresentando valores abaixo da média (Azevedo Netto; Fernández, 2015).

De acordo com a NBR 12218 (ABNT, 2017), é necessário adotar a vazão máxima de horizonte de projeto em cada etapa definida, de acordo com critério técnico da operadora responsável pelo sistema de abastecimento de água. Onde deve-se obter os coeficientes a partir dos dados existentes na localidade.

A rede de distribuição deve ser dimensionada tanto para o dia de maior consumo quanto para a hora de maior consumo. Para calcular os componentes dos sistemas, foram determinados os coeficientes K1, que é o coeficiente do dia de maior consumo, determinado pela relação entre o valor do consumo máximo diário ocorrido em um ano e o consumo médio diário relativo a esse mesmo ano, e o K2, que é o coeficiente da hora de maior consumo, definido pela relação entre a maior vazão horária e a vazão média do dia de maior consumo (Azevedo Netto; Fernández, 2015). Quando não existem dados históricos, a NBR 12218 (ABNT, 2017) recomenda a adoção de 1,2 para K1 e 1,5 para K2.

Segundo Tsutiya (2006), os consumidores são classificados em quatro categorias de consumo: público, industrial, comercial e doméstico.

A água para uso público é aquela utilizada para irrigação de parques e jardins, lavagem de ruas e passeio público, edifícios e sanitários de uso público, combate a incêndios, etc. (Tsutiya, 2006).

O uso de água nas indústrias reflete o tipo de produto ou serviço que está sendo produzido e os processos industriais associados. A intensidade do uso da água depende de vários

fatores, dentre eles, o tipo de processo e de produtos, tecnologias empregadas, boas práticas e maturidade da gestão. Quanto à utilização de água no processo produtivo, pode-se observar diversas funções, tais como: matéria-prima e reagentes; solventes de substâncias sólidas, líquidas e gasosas; lavagem e retenção de materiais contidos em misturas; veículo de suspensão; e operações envolvendo transmissão de calor (ANA, 2017).

Para uso comercial são diversas as atividades que utilizam deste recurso, desde os pequenos até grandes consumidores como: lanchonetes, restaurantes, hospitais, hotéis, postos de gasolina, lojas, shoppings centers, entre outros (Tsutiya, 2006).

A água para consumo doméstico pode ser dividida entre dentro e fora do domicílio. Na área interna, pode ser utilizada para ingestão, atividades higiênicas e de limpeza, preparo de alimentos, entre outros. Para a área externa, o maior volume corresponde à rega de gramados e jardins (Heller; Pádua, 2016).

De acordo com Tsutiya (2006), o consumo de água em uma residência depende de vários fatores, os quais podem ser agrupados em seis classes:

- Características físicas: temperatura do ar, intensidade e frequência de precipitação da chuva, etc;
- Renda familiar;
- Características da habitação: área do terreno, área construída do imóvel, número de habitantes, etc;
- Características do abastecimento de água: qualidade da água, pressão na rede;
- Forma de gerenciamento do SAA: micromedição, tarifas, etc;
- Características culturais da comunidade.

De acordo com a Organização das Nações Unidas, cada pessoa necessita de 3,3 mil litros de água por mês, ou seja, cerca de 110 litros de água por dia para atender as necessidades de consumo e higiene (SABESP, 2022). Conforme a NTS 181, o consumo médio residencial varia de 70 a 120 litros por dia per capita (SABESP, 2023). Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o consumo médio per capita no Brasil foi de 152,1 litros por dia no ano de 2020 (Brasil, 2022).

### 3.2.1.2 Pressão na rede de água

É de grande importância verificar as pressões nas tubulações do SAA para assegurar o funcionamento correto dos aparelhos, bem como a durabilidade das tubulações (Azevedo Netto; Fernández, 2015). A pressão de serviço na rede de distribuição de água é o parâmetro

operacional mais importante na vazão dos vazamentos e na frequência de sua ocorrência. A elevação da pressão de serviço nas redes de distribuição tem efeito duplo na quantificação dos volumes perdidos, pois além de aumentar a frequência de arrebentamentos, aumentam a vazão dos vazamentos (Tsutiya, 2006).

Existem três tipos de pressões a serem consideradas: a pressão estática, que é a pressão em qualquer ponto da tubulação considerando a água parada; a pressão dinâmica, que é a considerada com a água em movimento, quando é aberto uma torneira, por exemplo; e a pressão de serviço, classificada como a pressão máxima que um acessório da rede ou tubulação pode suportar durante o uso, garantindo segurança (Conterato; Espartel; Simionato, 2017).

Conforme a NBR 12218 (ABNT, 2017), a zona de pressão é a área abrangida pela divisão do setor de abastecimento, na qual a pressões estáticas máximas nas tubulações devem ser de 40 mca, podendo chegar a 50 mca em regiões com topografia acidentada, e a pressão dinâmica mínima deve ser de 10 mca, e ser referenciada ao nível do terreno.

Nos locais onde as pressões máximas e mínimas não obedecem aos limites prefixados, é necessário fazer uso de acessórios, como *boosteres* para atender os pontos mais elevados do setor onde a pressão é abaixo de 10 mca, e VRPs para reduzir as pressões em pontos em que as pressões máximas extrapolam os valores estabelecidos na NBR 12218 (Motta, 2010).

Gonçalves (1998) aborda que a determinação da Pressão Média do Setor (PMS) pode ser realizada das seguintes formas:

- A partir de curvas topográficas e do conhecimento do sistema, determinar os pontos de maior e menor pressão;
- Instalação de medidores de pressão em pontos escolhidos, obter os valores de pressões máximas e mínimas ( $P_{\text{máx}}$  e  $P_{\text{mín}}$ ) durante todo o dia, contabilizando como as médias horárias;
- Calcular a pressão média horária, utilizando a Equação 3:

$$PMH = \frac{(P_{\text{máx}} + P_{\text{mín}})}{2} \quad (3)$$

- Determinar o parâmetro S, que é a estimativa da proporção do sistema que possui pressões acima do valor da pressão média, baseado nas cotas obtidas;
- A PMS para cada período utilizando a Equação (4):

$$PMS = S \times P_{\text{máx}} + (1 - S) \times P_{\text{mín}} \quad (4)$$

Por meio da PMS é possível avaliar as pressões no setor ao longo do dia. Desta forma, pode-se relacionar a PMS com a vazão de entrada no sistema de maneira mais representativa, podendo definir a interferência de uma possível variação da pressão na vazão de entrada (Gonçalves, 1998).

Para atender aos limites de pressão mencionados no capítulo 3.1.1 da NBR 12218 de 2017, a rede de distribuição deve ser dividida em zonas de pressão, sendo cada zona abastecida por um reservatório ou estação elevatória. Normalmente, para atender uma zona alta, é utilizado um reservatório elevado ou um *booster*, e para atender uma zona baixa utiliza-se, geralmente, um reservatório e caso necessário uma válvula redutora de pressão. (Tsutiya, 2006)

De acordo com Oliveira (2013), a instalação de Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) pressupõe a delimitação de um subsetor perfeitamente isolado, configurando um Distrito de Medição e Controle (DMC). Um SAA seria totalmente eficiente se sua rede de distribuição atendesse ao nível de pressão mínimo aceitável, sem nunca comprometer o pleno fornecimento de água.

Segundo Tsutiya (2006), ainda há um entendimento incorreto de muitos profissionais da área operacional sobre as pressões na rede de distribuição, de que as pressões elevadas sejam um reflexo de um bom padrão de atendimento. As pressões elevadas na rede podem causar problemas para o cliente, como: aumento no número de vazamentos entre o hidrômetro e a caixa d'água residencial e danos nos dispositivos que controlam o nível de água no reservatório residencial, ocasionando um extravasamento.

Azevedo Netto e Fernández (2015) apontam o golpe de aríete como sendo outro problema ocasionado pela variação súbita de pressão em uma tubulação, normalmente associada a uma mudança de velocidade súbita (acelerando ou desacelerando a massa de água) que se traduz em uma “pancada” como se a tubulação sofresse uma “martelada”.

### 3.2.1.3 Perda de carga na rede de água

A perda de carga em tubulações é a diminuição de energia total em um fluido conforme ele flui ao longo de uma tubulação devido à resistência oferecida pela fricção do fluido contra as paredes internas da tubulação, curvas, conexões, mudanças na seção transversal da tubulação e outros componentes presentes no trajeto. As perdas de carga são diferenciadas em perdas de carga localizadas e perdas de carga distribuídas. As perdas de carga localizadas são causadas pela presença de singularidade, como trechos curvos e peças e dispositivos especiais. Nesses pontos, o líquido escoando perde mais energia do que em trechos retos. Já a perda de carga

distribuída ou contínua são as perdas de carga causadas pelo atrito do fluido com as paredes da tubulação em todo o comprimento (Conterato; Espartel; Simionato, 2017).

A perda de carga unitária é dada em metros por metro (m/m), e a perda de carga total é dada em metros de coluna de água (mca). Essa perda pode variar em função do tipo de material, da temperatura do fluido, da velocidade da tubulação, entre outros fatores (Conterato; Espartel; Simionato, 2017).

A rugosidade nas paredes internas das tubulações faz com que o fluxo da água resulte em perdas de energia pelo atrito interno. Esse processo é conhecido por perda de carga contínua ou perda de energia por atrito, e são calculadas utilizando diversas fórmulas empíricas (Salvino, 2012).

Uma das fórmulas empíricas mais amplamente empregadas é a fórmula *Hazen-Williams*. Essa fórmula surgiu de um estudo estatístico que levou em consideração dados experimentais previamente coletados de numerosas fontes, bem como observações dos próprios autores. Esses dados abrangiam uma variedade tão diversificada de materiais como tubos de aço, ferro fundido, concreto, alvenaria, madeira, latão (bronze), chumbo e vidro. A grande aceitação que teve a fórmula permitiu que fossem obtidos valores bem determinados do coeficiente C. Nessas condições, pode-se estimar o envelhecimento dos tubos (Azevedo Netto; Fernández, 2015). A fórmula de *Hazen- Williams* está expressa pela Equação 5 (Raminelli, 2021):

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

Onde:

- J = perda de carga unitária (m/m);
- Q = vazão (m<sup>3</sup>/s);
- C = Coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams, adimensional;
- D = Diâmetro do tubo (m)

A equação de Hazen- Williams também pode ser escrita em função da velocidade, conforme Equação 6:

$$V = 0,355 \cdot C \cdot D^{0,63} \cdot J^{0,54} \quad (6)$$

Em que:

- V = velocidade do escoamento (m/s)

Os valores de C são tabelados para vários materiais utilizados nas tubulações e para condições de envelhecimento destes materiais. Para a escolha do valor de C, é importante levar em consideração a idade da tubulação, tornando os resultados mais satisfatórios (Raminelli, 2021).

### 3.2.2 Softwares para Modelagem Hidráulica de Redes Pressurizadas

O software de modelagem é responsável por processar todas as informações do sistema que foram inseridas como dados de entrada (diâmetro e posição das tubulações, dados de consumo de água, funcionamento de bombas e válvulas, entre outras) e fornecer uma saída (resposta). A exemplo disso, a pressão em determinado ponto da rede, vazão de água em determinado trecho, variação do nível dos reservatórios e assim por diante (ASEMAE, 2016).

Existem diversos softwares de modelagem hidráulica, porém o EPANET tornou-se uma ferramenta popular na análise de redes de distribuição de água complexas e simples nos países desenvolvidos e em desenvolvimento do mundo (Ramana; Sudheerb; Rajasekharc, 2015). O EPANET oferece um ambiente integrado para edição de rede e dados de entrada, rodando simulações hidráulicas e de qualidade da água e visualizando os resultados em vários formatos, como: mapas de rede codificados por cores, tabelas de dados, gráficos de séries temporais e plotagens de contorno (Mehta et al, 2015).

Outro *software* utilizado para modelagem hidráulica é o *WaterGEMS* que é uma solução multiplataforma que leva o conceito de integração GIS e modelagem hidráulica avançada a um nível mais alto. O *WaterGEMS* possui avançados módulos de calibração, projeto automatizado, otimização energética, reabilitação de redes e ferramentas avançadas de gestão GIS que podem ser utilizadas simultaneamente com a modelagem hidráulica sintetizando diferentes ferramentas de análises com um nível de eficiência e versatilidade sem precedentes (Bentley, 2017).

Świtnicka, Suchorab e Kowalska (2017), afirmam que o *software WaterGEMS* aplicado com os módulos de algoritmo genético implementados, é uma ferramenta muito útil e universal que pode ser utilizada para apoiar o processo de tomada de decisão de manutenção e planejamento.

### 3.2.3 Método *Hardy Cross*

Tanto o *software* Epanet quanto o *WaterGEMS* utilizam o método de cálculo *Hardy Cross* para a realização dos cálculos hidráulicos. Este método possibilita o desenvolvimento dos cálculos, em sistemas simples, além de ser um método provido de significado físico, que facilita a análise dos resultados intermediários obtidos (Justino; Nogueira, 2013). Simões, Schulz e Porto (2017), apontam o método de *Hardy Cross* como sendo um dos mais conhecidos métodos iterativos para a solução de redes malhadas.

Esse método é considerado um método iterativo. Ele é utilizado para atingir o equilíbrio hidráulico de uma rede de distribuição, realizando várias iterações nas quais ocorre uma correção nas vazões de cada anel da rede (Souza, 2016).

Foi desenvolvido para dimensionar redes principais de abastecimento de água, fornecendo ao projetista uma forma simples de determinar a vazão e a perda de carga para cada trecho do sistema de anéis. Essas grandezas são compatíveis com as leis de conservação da massa e da energia (Jesus, 2019).

O método de *Hardy Cross* possui duas maneiras de aplicação: por compensação das perdas de carga, onde admite-se uma distribuição de pressões (ou perdas de carga por trecho) e assim calculam-se as vazões, e por compensação das vazões, sendo este modo o mais utilizado, onde admite-se uma distribuição das vazões e assim determina-se as perdas de carga (Tsutiya, 2006).

### 3.2.4 Calibração de Modelos Hidráulicos

O processo de calibração permite validar o modelo e denota que o modelo está pronto e capacitado para representar as diversas condições operacionais do sistema que precisem ser testadas. Deste modo, a resposta obtida por meio dele deve ser próxima da realidade do sistema.

A calibração do modelo diz respeito à etapa na qual os resultados da simulação realizados anteriormente são comparados e colocados à prova com os dados lidos em campo por meio de medidores de vazão, pressão e nível (ASSEMAE, 2016).

Para Soares et al. (2004), o procedimento para calibração de um modelo de rede pode ser dividido em seis etapas:

- Obtenção de dados cadastrais referentes às características físicas das tubulações e características dos componentes, elevações topográficas, consumos das quadras, incidência de vazamentos, dentre outros;

- Simplificação da rede, desconsiderando diâmetros inferiores a 150 mm, salvo algumas exceções (ponta de rede, proximidades de reservatórios, mudança de diâmetro, dentre outras);
- Divisão da rede em setores homogêneos, com a intenção de facilitar a identificação de um fator de ajuste global para cada setor;
- Detecção e reparo de vazamentos por meio de pesquisa de vazamentos;
- Instalação de medidores de pressão e vazão na rede, com a intenção de armazenar os dados simultaneamente com as informações relativas aos níveis dos reservatórios;
- Calibrar o modelo, de forma a obter o melhor ajuste entre os dados simulados e os observados em campo.

Salvino (2012) aponta como as principais variáveis aplicadas aos modelos de calibração a demanda, a topografia, a rugosidade, o diâmetro e as válvulas.

Em modelos hidráulicos de sistemas de abastecimento é comum, para fins de simplificação da rede de distribuição de água, agrupar em pontos específicos o consumo de água de uma área específica. A calibração por meio da demanda possibilita ter uma estimativa atual dos consumos nodais, podendo aparecer nesses resultados possíveis demandas não previstas no projeto original. As leituras das vazões para compor as demandas devem ser associadas com seus respectivos horários, já que durante as 24 horas do dia o consumo tem variações bastante específicas (Salvino, 2012).

A topografia em projetos de SAA é fundamental para avaliar o posicionamento correto dos reservatórios e estações elevatórias, assim como a definição da topologia da rede. Além disso, todos os nós têm suas cotas topográficas associadas para que seja realizada, utilizando o simulador hidráulico, o cálculo da carga hidráulica em cada nó. A inclusão da topografia como parâmetro de calibração vem da necessidade de se localizar possíveis erros em dados cadastrais da rede (Salvino, 2012).

A escolha pela rugosidade como variável no processo de calibração é justificada, principalmente, quando as tubulações da rede a ser calibrada são desconhecidas ou já têm certo tempo de uso (Salvino, 2012). O *WaterGEMS* trabalha com três tipos de fórmulas: *Darcy-Weisbach*, *Hazen-Williams* e *Mannings*.

O diâmetro interno das tubulações tem muita influência no cálculo das perdas e na solução das equações hidráulicas. Dependendo da qualidade da água e da velocidade, com o passar dos anos, é possível que haja um acúmulo de depósitos no seu interior, diminuindo a sua área útil. Outra razão para adicionar esta variável no processo de calibração é a de que ao se trabalhar com redes antigas onde não se tem o registro do seu diâmetro original, é possível ter

uma estimativa das tubulações que estão instaladas sem a necessidade de intervenções na rede (Salvino, 2012).

As válvulas são acessórios que possuem diversas funções em SAA. Cria-se DMCs, alimentados por um ou dois ramais monitorados e controlados por VRPs, garantindo assim pressões dentro dos limites aceitáveis. Sendo um elemento de significativa importância, torna-se um parâmetro essencial para calibrar o modelo (Salvino, 2012).

Segundo Silva et al. (2003), pode-se dizer que os procedimentos de calibração podem ser divididos basicamente em três categorias: iterativos, explícitos ou diretos e implícitos ou inversos.

O procedimento iterativo geralmente é baseado em tentativa e erro. Os parâmetros de calibração são ajustados a cada interação usando comparações entre pressões e vazões medidas e simuladas. A maioria das aplicações do procedimento iterativo são realizadas para redes de pequeno porte (Silva, 2003).

O método explícito ou também conhecido de analíticos ou diretos, resolvem um conjunto de equações que descrevem o comportamento hidráulico na rede (SILVA, 2003). Esse método tem como base a solução, em regime permanente, de equações e análise matricial em condições de contorno bem definidas, utilizando como base as equações clássicas da energia e da continuidade (Salvino, 2012).

Nos métodos implícitos ou inversos, as variáveis ou parâmetros desconhecidos são estimados, ou seja, valores são atribuídos às demandas, rugosidades e demais parâmetros hidráulicos, mediante utilização de algum procedimento ou algoritmo a fim de aproximar sua resposta em termos das variáveis de estado e de sua referência. Isso significa minimizar as diferenças, principalmente das pressões e vazões medidas e calculadas (Salvino, 2012).

## 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município de Caxias do Sul possui uma área territorial de 1.652.320 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 463.338 habitantes para o ano de 2022 (IBGE, 2023).

Conforme o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado do município, disposto na Lei Complementar n° 638 de 2020, a área de estudo está localizada sob a Zona Residencial 4 (ZR4), a qual é “destinada aos espaços urbanos para média densificação, tendo como função dar suporte ao uso residencial e atividades complementares à habitação, permitindo parcelamento de interesse social pela iniciativa privada” (Caxias do Sul, 2023).

O município está localizado sob um divisor de águas, sendo que 53% do município integra a Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas na porção norte e 47% integra a Bacia Hidrográfica do Rio Caí na porção sul (SAMAE, 2023).

O abastecimento da cidade de Caxias do Sul se inicia no represamento de arroios que formam as bacias de captação. Nessas bacias, a água é captada do manancial e bombeada até as Estações de Tratamento de Água (ETA). Nas ETAs, a água bruta passa pelos processos de tratamento, assim se tornando própria para consumo humano, seguindo padrões legais de potabilidade. A água potável é armazenada em reservatórios para posteriormente ser distribuída à população por meio de tubulações até os ramais prediais.

O município possui cinco ETAs abastecidas por cinco sistemas de abastecimento, sendo eles: Borges de Medeiros, Celeste Gobatto, Morro Alegre, Parque da Imprensa e Samuara. A área escolhida para estudo é abastecida pela ETA Parque da Imprensa, a qual atende 52,92% da população do município, cerca de 290 mil habitantes (SAMAE, 2023).

O consumo per capita do município em 2021 era de 123,95 litros de água consumidos por habitante por dia, sem considerar o índice de perdas na distribuição de água, o qual era de 46,6% (SNIS, 2021).

### 4.1 DELIMITAÇÃO DO SETOR MODELADO

A equipe do SAMAE realizou a delimitação do setor a ser modelado por meio do software *ArcGIS Pro*, observando as redes existentes do cadastro técnico interno e demarcando a área com um polígono. A área de estudo foi escolhida de maneira conjunta com a equipe do SAMAE, e é denominada como área macromedida MM73 – Planalto - Rio Branco. Para escolha da área foi levado em consideração se o setor era isolado, a presença de macromedidores, o

número de economias e o número de VRPs. Na Figura 3 está apresentada a imagem de satélite com a delimitação da área de estudo.

Figura 3- Imagem de satélite da área de estudo



Fonte: autora (2023).

A partir de acesso ao banco de dados local da autarquia de abastecimento, foram obtidas as seguintes informações: fonte de reservação de água, traçado da rede contendo o comprimento, diâmetro e material da tubulação, válvulas reguladoras de pressão, registros de operação, perfil de consumo diário e dados de macro e micromedição.

De acordo com o banco de dados interno do SAMAE, o setor de estudo possui 2.035 ligações de água (SAMAE, 2023), essas ligações foram divididas por categoria de consumo, apresentadas na Tabela 1, sendo a maior parte (88,16%) residencial.

Tabela 1 – Tipos de consumidores no setor de estudo

<b>Tipo</b>	<b>Nº de Consumidores</b>	<b>Porcentagem</b>
Comercial	39	1,92 %
Industrial	3	0,15 %
Público	7	0,34 %
Residencial	1.794	88,16 %
Terreno Baldio	192	9,43 %
<b>TOTAL</b>	<b>2.035</b>	<b>100 %</b>

Fonte: autora (2023), com base em dados do SAMAE (2023).

Na Tabela 2 está detalhada a extensão das redes, organizadas por diâmetro e material, sendo a maior parte (57%) da rede com 50 mm de diâmetro e em material PVC 6,3. A área de estudo possui uma extensão de 14,53 km de rede de distribuição total.

Tabela 2- Extensão das redes de distribuição no setor de estudo

<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Material</b>	<b>Extensão (m)</b>	<b>Porcentagem</b>
50	PVC 6,3	8.285,9	57,00 %
75	PVC 6,3	2.075,1	14,27 %
100	PVC 6,3	1.831,3	12,60 %
150	PVC DEFoFo	374,2	2,57 %
200	PVC DEFoFo	726,7	5,00 %
250	PVC DEFoFo	608,2	4,18 %
450	PVC DEFoFo 6,3	321,7	2,21 %
500	PVC DEFoFo 6,3	314,0	2,16 %
<b>TOTAL</b>		<b>14.537,1</b>	<b>100 %</b>

Fonte: autora (2023), com base em dados do SAMAE (2023).

O setor de estudo está localizado na zona oeste do município e é abastecido pelo Centro de Reservação da Zona Oeste, apresentado na Figura 4, sendo que o reservatório possui 25 metros de diâmetro e 6,5 metros de altura, com capacidade de armazenamento de 3.000 m<sup>3</sup> de água.

O reservatório não possui medidor de vazão na entrada, porém conta com um medidor de nível e um medidor de vazão na saída. O reservatório também possui um atuador automático na válvula de entrada onde é controlado seu enchimento. A válvula opera em horários específicos, desta forma, a válvula somente pode abrir entre 1h e 12h e das 14h às 18h, abrindo sempre que o reservatório atinge o nível de 4,5 metros e fechando quando atinge o nível de 6,5 metros.

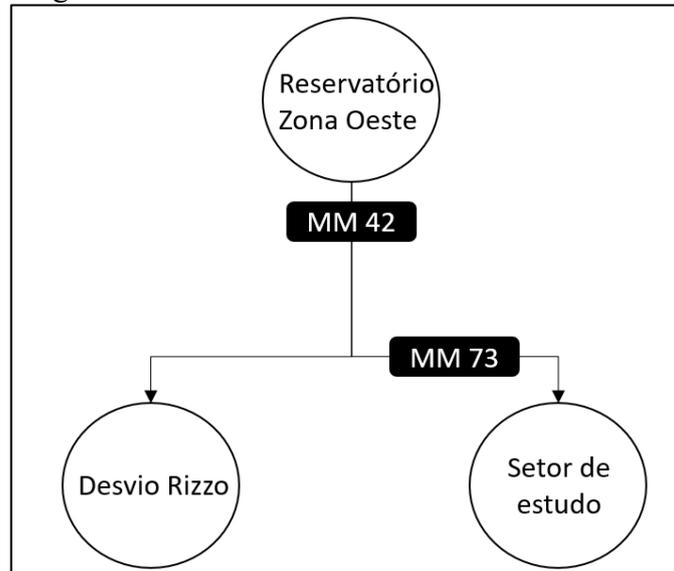
Figura 4 – Reservatório da Zona Oeste



Fonte: autora (2023).

Na saída do reservatório há um macromedidor denominado MM42, o reservatório abastece duas áreas, sendo elas: a área de estudo, que possui na entrada o macromedidor MM73, e a área que não é macromedida denominada Desvio Rizzo, conforme Figura 5.

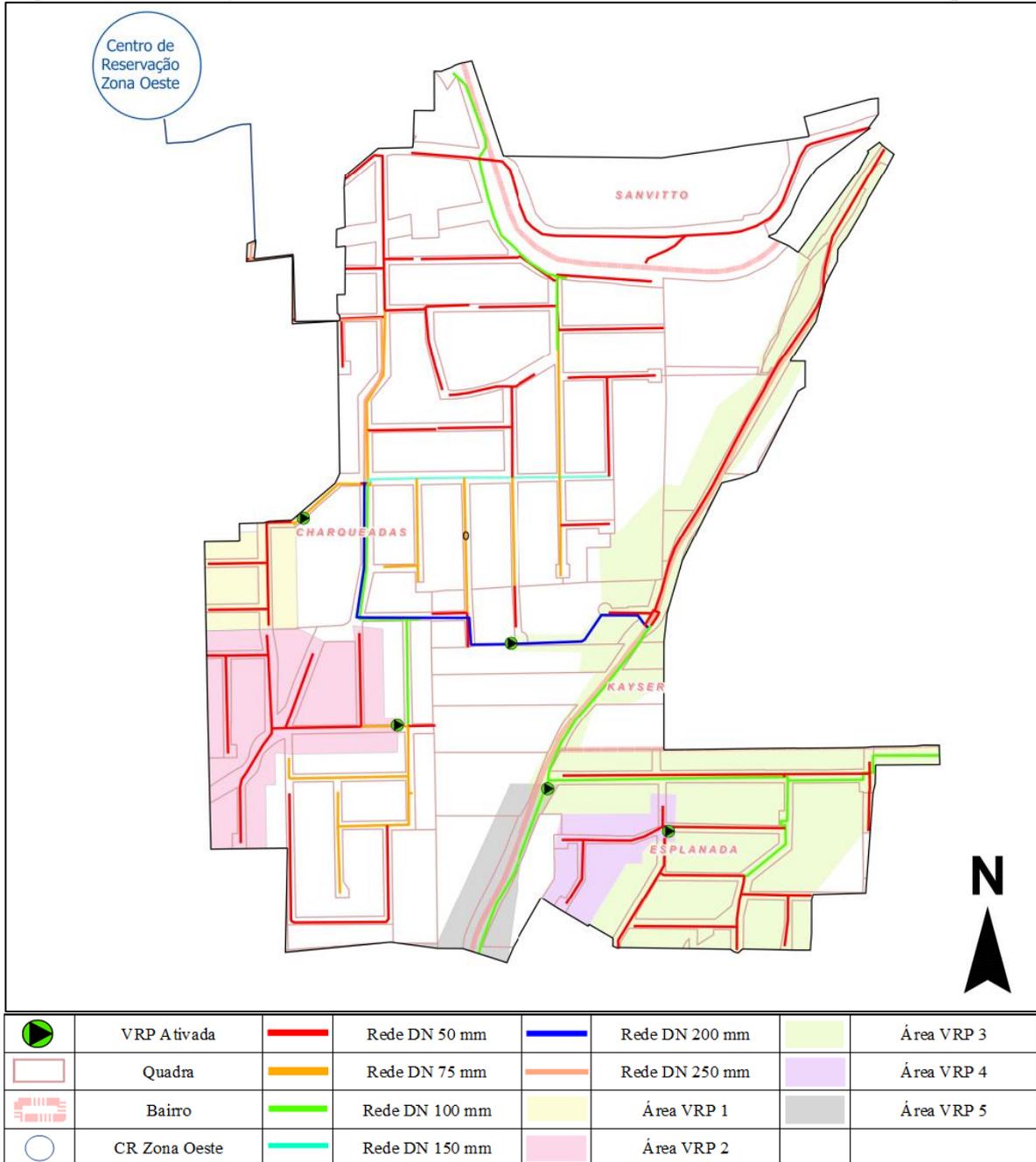
Figura 5 – Áreas de abastecimento do reservatório



Fonte: autora (2023)

Na área de estudo estão instalados 1 macromedidor na entrada do setor e 5 VRPs no perímetro da área. O setor delimitado está apresentado na Figura 6, juntamente com as zonas de pressão de cada VRP.

Figura 6 - Delimitação e características da rede do setor modelado com as zonas de pressão



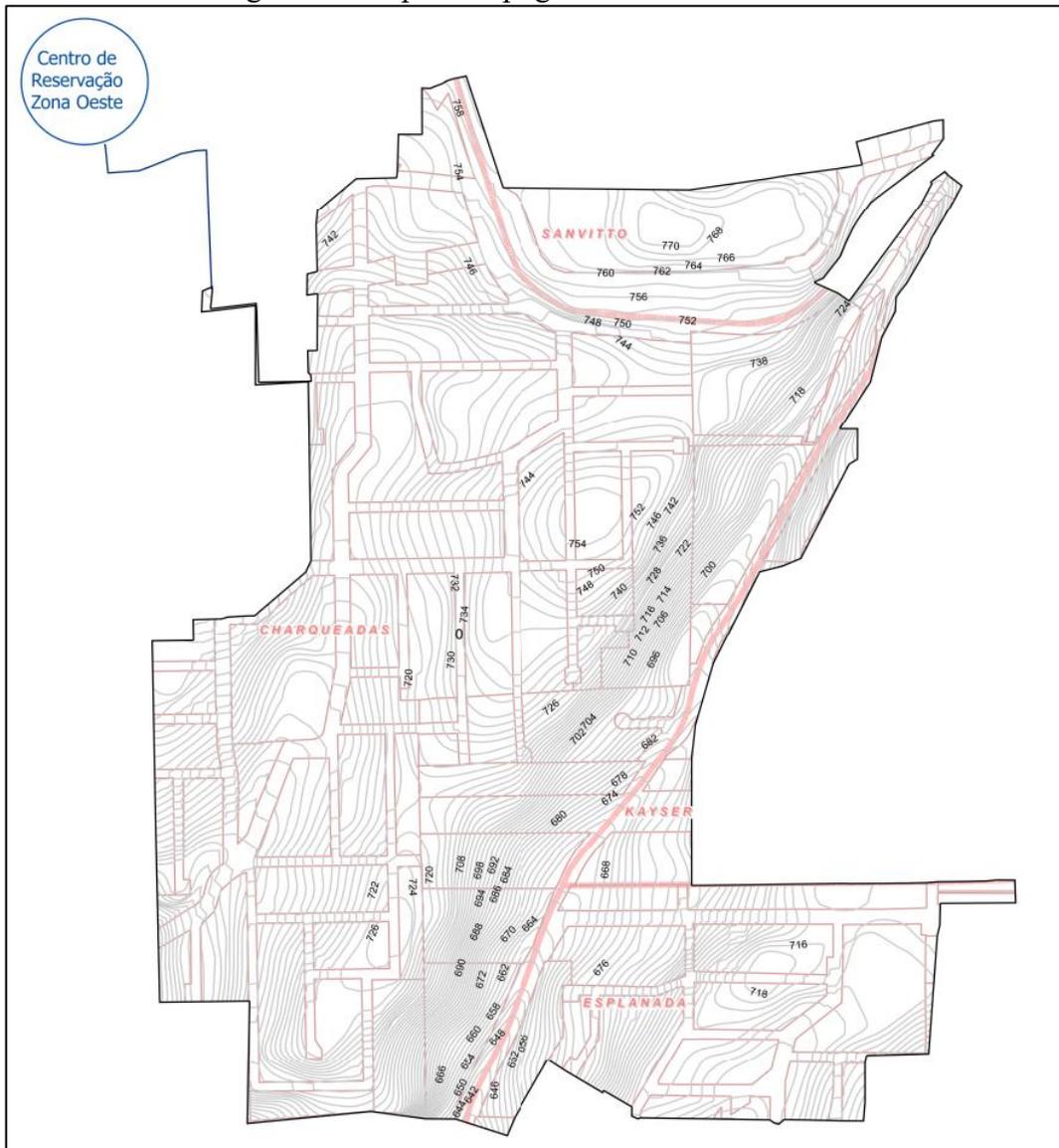
Fonte: autora (2023), com base em dados do SAMAE (2023).

## 4.2 TOPOGRAFIA

Os dados topográficos foram extraídos pelo SAMAE do levantamento aerofotogramétrico municipal dos anos 2013/2014 municipal disponibilizados na base de dados da prefeitura municipal por meio do site GeoCaxias (Caxias do Sul, 2023). Estes dados são disponibilizados em arquivos no formato dwg, que para serem inseridos no software de

modelagem hidráulica tiveram suas curvas de nível convertidas em arquivos shapefile pela autarquia de abastecimento utilizando o software ArcGIS Pro. Na Figura 7 estão apresentadas as curvas de nível, sendo que o terreno possui uma variação de 120 metros, situando-se entre as cotas 642 e 770 metros de altitude.

Figura 7 – Mapa da topografia do setor modelado



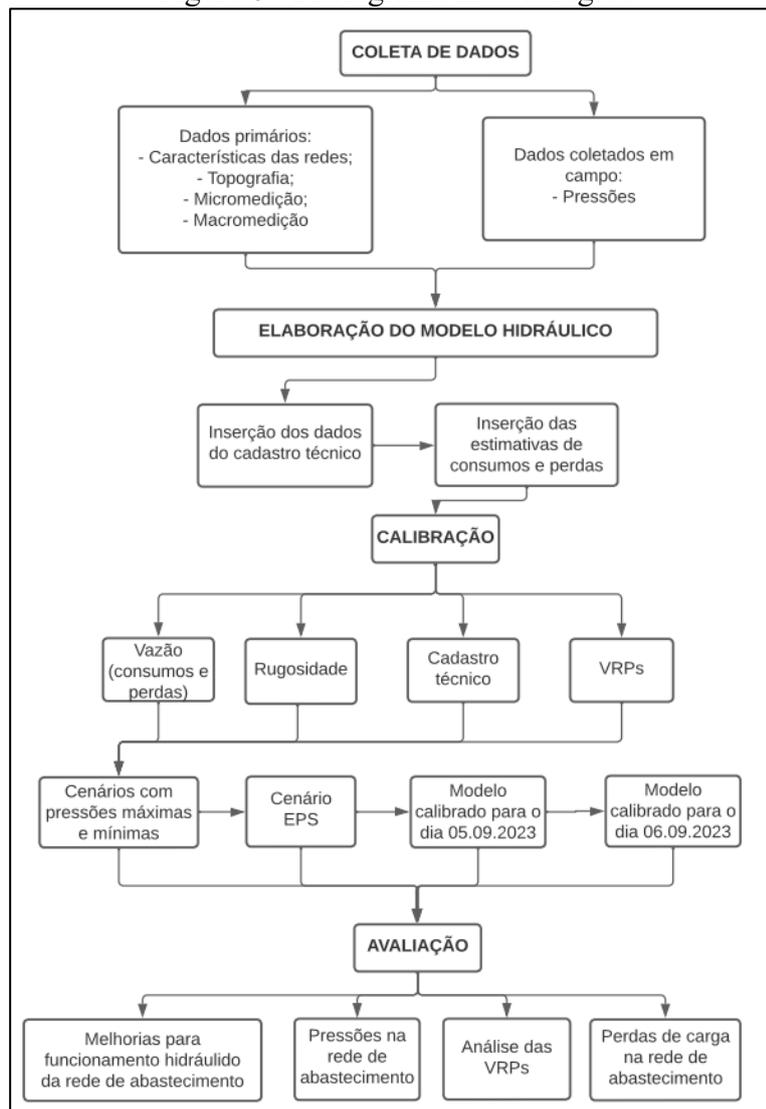
Fonte: autora (2023), com base em dados do GeoCaxias (2023).

## 5 METODOLOGIA

Para a elaboração deste trabalho foi realizada a avaliação do cadastro técnico interno da autarquia de abastecimento de água com vistas a verificar possíveis inconsistências entre o dado cadastrado e o existente em campo. Para isso, foram executados levantamentos em campo obtendo dados de pressões e estanqueidade do setor, verificando registros fechados. Com os dados da rede de distribuição e do volume distribuído e consumido, fornecidos pelo SAMAE, foi possível construir e calibrar o modelo hidráulico.

Nos próximos capítulos serão detalhados os procedimentos metodológicos utilizados para modelagem e calibração do setor e propostas de melhorias, conforme o fluxograma apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma metodológico



Fonte: autora (2023).

## 5.1 COLETA DE DADOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados do cadastro técnico interno do SAMAE, apresentados no Quadro 3:

Quadro 3 - Dados fornecidos pelo SAMAE

<b>Elementos</b>	<b>Informação Extraída do Cadastro Técnico</b>
Rede	Diâmetro, tipo do material, idade da rede, tipo de rede (adutora, rede de distribuição, ramal)
Consumo Micromedido	Volume mensal dos últimos 12 meses de cada consumidor
Volume Macromedido	Volume a cada 5 minutos, dos últimos 12 meses
Registros	Diâmetro, situação (aberto/fechado)
VRPs	Diâmetro, tipo de válvula, pressões
Reservatórios	Volume, medidas do reservatório e tipo de reservatório (elevado, apoiado, enterrado)

Fonte: autora (2023).

O SAMAE já possui o cadastro georreferenciado dos consumidores no *software* ArcGIS Pro, porém, os dados existentes no cadastro de cada consumidor estão no formato de polígono e foi preciso transformá-los em pontos utilizando o ArcGIS Pro para inseri-los no modelo hidráulico.

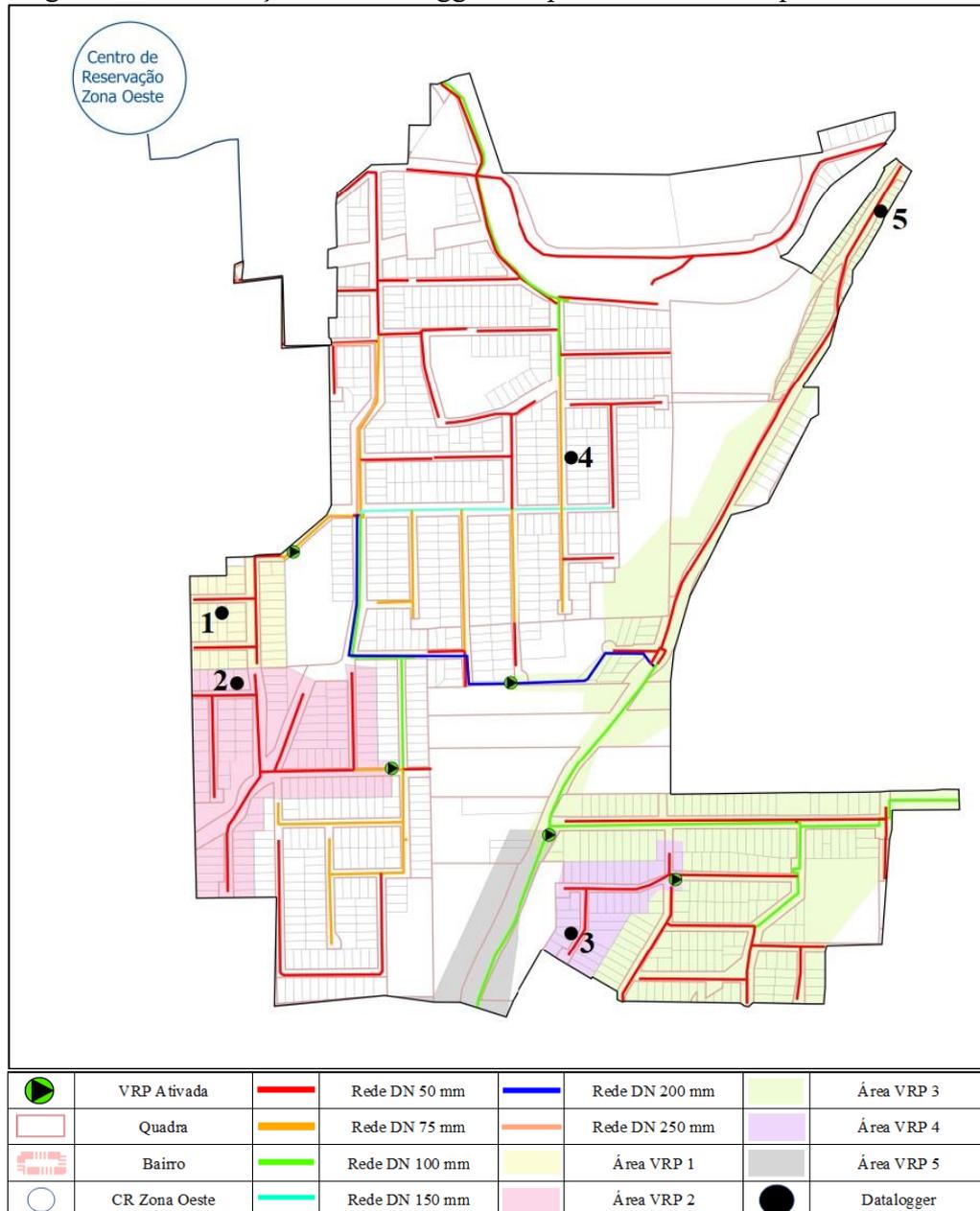
Também foram coletados dados de pressão na rede de água por meio da instalação de 5 *dataloggers* da marca Lamon, modelo DMP-01-DP, no período de 01/09/2023 à 07/09/2023. O *datalogger* consiste em um dispositivo eletrônico responsável por monitorar e registrar informações de forma contínua ao longo do tempo ou em relação a uma localização geográfica específica. Comumente empregado em contextos que exigem medições ao longo de um período determinado, esse aparelho utiliza instrumentos para coletar dados de variáveis de campo em tempo real, neste caso específico, o registro de pressões na rede de abastecimento de água (Altus Sistemas de Automação, 2023). Os equipamentos foram instalados por uma equipe do SAMAE nos endereços apontados na Tabela 3 e Figura 9, medindo a pressão durante os 06 dias.

Tabela 3 – Endereços das instalações de dataloggers de pressão

Ponto	Endereço	Nº Predial	Quadra	Lote
1	Rua Sergio Pontalti	34	3500	8
2	Rua Bruno Ravanello	703	4083	6
3	Rua Ruy Celestino Fadaneli	65	5435	5
4	Rua Ivonne Dalla Santa Zati	292	4069	6
5	Rua Vergínio Tonietto	17	1035	7

Fonte: autora (2023).

Figura 9 – Localização dos dataloggers de pressão instalados para este estudo



Fonte: autora (2023), com base em dados do SAMAE (2023).

O ponto 4 da Rua Ivonne Dalla santa Zatti recebe água diretamente do reservatório e os outros pontos possuem a influência de VRP.

A micromedicação é efetuada por meio de hidrômetros de velocidade convencionais, resultando apenas nos dados de consumo mensal ( $m^3/mês$ ). Por outro lado, a macromedicação é executada utilizando o macromedidor eletromagnético da marca Tricomex, ilustrado na Figura 10 com um diâmetro de 250 mm, o qual realiza medições em intervalos de 5 minutos.

Figura 10 – Macromedidor do setor de estudo



Fonte: autora (2023).

Com os dados de macromedicação do período de 01/01/2022 à 30/05/2023, foram geradas as curvas do perfil horário diário e a curva do perfil horário semanal utilizando o *software* Excel. Foram geradas as curvas do perfil horário diário e do perfil horário semanal com os percentis de 95%, 75%, 50%, 25% e 5%, calculando a mediana dos valores brutos.

Além disso, utilizando os dados provenientes da macromedicação, foram gerados os dados correspondentes ao consumo médio máximo diário e ao consumo médio diário, os quais foram utilizados para calcular o coeficiente do dia de maior consumo (K1). Adicionalmente, a partir dos valores da vazão máxima por hora e da média diária, determinou-se o coeficiente da hora de maior consumo (K2).

Estas informações foram inseridas no modelo hidráulico, e após a inserção desses dados foi realizada a calibração do mesmo, utilizando o *software* WaterGEMS.

## 5.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO

Para construir o modelo hidráulico foi utilizado o *software WaterGEMS* da *BentleySystems*, versão 10.04.00.108. O *WaterGEMS* realiza a modelagem por meio de elementos físicos onde é criado um conjunto de trechos conectados por nós. A tubulação é representada por esses trechos, e entre eles podem existir válvulas, registros, *boosters* e reservatórios.

No *WaterGEMS*, utilizando a ferramenta *ModelBuilder* foram importados os arquivos das redes de distribuição, válvulas, registros e reservatórios do sistema SIG em arquivos no formato *shapefile*, com as informações do cadastro técnico interno do SAMAE devidamente georreferenciadas. Na ferramenta *ModelBuilder* foi necessário relacionar a tabela de atributos extraídas do sistema SIG com as propriedades do modelo hidráulico no que se refere a informações como diâmetro, material, observações, situação, tipo, entre outros, no intuito de que toda a informação do cadastro técnico conste no modelo.

No perímetro do setor modelado não há reservatórios, porém, para a construção do modelo hidráulico é necessário informar a fonte de água, ou seja, de onde ela vem. Para isso, foi carregada para o modelo hidráulico a fonte de reservação devidamente georreferenciada, bem como suas dimensões e volume.

A importação dos dados de topografia do terreno foi efetuada utilizando a ferramenta TRex existente no *software*, a qual atribui a cada nó uma cota altimétrica, resultando em dados de elevação em cada junção do modelo.

Foram corrigidos erros de conectividade das redes em tubos, nós desconectados e redes duplicadas, por meio de ferramentas de verificação da rede existentes no software como: “Nós Órfãos”, “Tubos Duplicados”, “Localizar Elementos Inicialmente Isolados”, “Candidatos a Divisão de Tubos”, “Nós Terminais” e “Junções Terminais”. Com o modelo hidráulico já validado, sem apresentar erros de conectividade, foram importados os consumidores georreferenciados e os seus devidos consumos de água.

Para avaliar preliminarmente o comportamento hidráulico do setor, foi executada a simulação em estado estacionário (*steady state*) utilizando a vazão média anual do consumo micromedido, acrescida da perda de água no setor.

De acordo com dados internos não publicados dos serviços de pesquisa ativa de vazamento do SAMAE, cerca de 63% das perdas de água na rede de distribuição estão nos ramais dos consumidores (SAMAE, 2023), sendo assim, a vazão de perda real foi inserida como acréscimo no consumo de água de cada consumidor da área.

### 5.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO COM WATERGEMS

Para a obtenção de resultados fidedignos de modelagem, se faz necessário primeiramente realizar a calibração hidráulica do modelo.

Foram analisados os dados de pressão e vazão do sistema no período de 01/09/2023 à 07/09/2023, sendo que a calibração foi desenvolvida para os dias 05/09/2023 e 06/09/2023.

A calibração foi realizada em uma Simulação de Período Estendido (EPS), esse tipo de análise permite representar o processo de enchimento e drenagem de tanques, as demandas ou cargas ao longo do tempo (mediante padrões predefinidos), bem como a gestão da abertura e fechamento de válvulas e pressões e vazões que se alteram em todo o sistema em reação a diversas condições de carga e estratégias de controle automatizado. Embora uma simulação em estado estacionário possa determinar se o sistema é capaz de acomodar cargas calculadas, uma simulação em período estendido avalia se o sistema pode manter níveis de serviço aceitáveis ao longo de minutos, horas ou dias (Bentley, 2021).

As necessidades de dados para simulações de período prolongado são mais abrangentes em comparação com simulações em estado estacionário. Além das informações requeridas por um modelo de estado estacionário, também deve-se especificar e atribuir padrões nas demandas ou cargas, além de estabelecer diretrizes operacionais para bombas e válvulas (Bentley, 2021). Desta forma, foram aplicadas as regras de operação para os níveis do reservatório, conforme explicado no item 4.1, abrindo quando o nível está abaixo de 4,5 metros e fechando quando atinge o nível de 6,5 metros.

Para garantir que os volumes lançados no modelo adquiram a mesma formatação da curva de abastecimento que ocorre nos diferentes horários de abastecimento, foi necessário fazer uma correlação da vazão macromedida com as vazões de consumo e perdas, visto que para a calibração é essencial que o perfil de vazão do modelo seja igual ao perfil macromedido. A obtenção do coeficiente de correlação é dada pela Equação 7:

$$C = \frac{\text{Vazão horária-perda real}}{(\text{Consumo micronmedido médio} + \text{perda aparente})} \quad (7)$$

Considerando que o consumo e as perdas aparentes variam ao longo do dia, foi aplicado um coeficiente de correlação para cada horário. No caso das perdas reais, foi considerado que estas permanecem fixas ao longo do dia, desconsiderando a variação da perda real com as alterações de pressões horárias.

Para o cálculo de rugosidade, foi escolhido o método de *Hazen-Williams*, o qual o software possui entrada para a inserção do coeficiente *C*. Para fins de calibração, inicialmente seguindo a rotina que é praticada no SAMAE, foram analisados os dados da data de ligação de água e se houve substituição da rede de abastecimento.

Para a calibração da modelagem das VRPs foi necessário calibrar a pressão de saída das válvulas que não são pilotadas, fator que mantém a pressão de saída da VRP constante, sendo elas válvulas de ação direta onde a pressão varia conforme a pressão de entrada, não possuindo uma precisão de ajuste como as válvulas pilotadas. Porém o software não possui função específica para determinação da perda de carga singular, sendo assim necessário realizar o ajuste dos diâmetros da tubulação logo após a válvula.

Para calibrar o modelo é necessário saber o nível preciso de água do reservatório, uma vez que ele afeta as pressões na rede de abastecimento de água. O reservatório de água que abastece o setor não está equipado com um medidor de vazão na sua entrada, contendo apenas um medidor de nível e um medidor de vazão na saída. Desta forma, para a calibração do modelo, foi necessário estabelecer a vazão de entrada por meio do balanço de vazões, utilizando a Equação 9:

$$Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{acumulada}} + Q_{\text{saída}} \quad (9)$$

Os dados de vazão horária foram incorporados no modelo hidráulico utilizando a ferramenta *Patterms*, e o perfil de variação de vazão foi correlacionado com a válvula de entrada do reservatório, possibilitando a identificação da variação da vazão de entrada em litros por segundo do reservatório ao longo das 24 horas.

Como o reservatório fornece água para regiões além da área de análise, as vazões que atendem a essas outras áreas também foram incorporadas ao modelo hidráulico. Isso foi realizado para poder calibrar tanto a vazão de saída do reservatório quanto o seu nível.

Para a calibração do modelo hidráulico foi utilizado o método de tentativa e erro para realizar os ajustes.

Por fim, a avaliação do encaixe do modelo foi realizada por meio do Coeficiente de Determinação (CD) foi realizada a análise das curvas, frequentemente representado por  $R^2$ , o CD fornece uma medida da adequação do modelo aos dados.

O valor de  $R^2$  varia entre 0 e 1, ou também pode ser expresso em termos percentuais de 0% a 100%. A interpretação geral de acordo com Quinino, Reis e Bessegato (2011):

-  $R^2 = 0$ : O modelo não explica nenhuma variabilidade na variável dependente.

-  $R^2 = 1$ : O modelo explica toda a variabilidade na variável dependente.

-  $0 < R^2 < 1$ : O modelo explica uma porcentagem da variabilidade na variável dependente.

Ou seja, quanto mais próximo de 1 para o coeficiente de determinação, melhor o modelo de regressão se ajustar aos dados.

A equação do coeficiente de determinação de acordo com Baesso e Sousa (2010) está expressa na Equação 8.

$$CD = 1 - \frac{\sum (Y_{i_{obs}} - Y_{i_{est}})^2}{\sum (Y_{i_{obs}} - Y_{i_{méd}})^2} \quad (8)$$

#### 5.4 AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Para a análise da rede de distribuição foi criado um cenário que leva em consideração a demanda média multiplicada pelo coeficiente de máxima vazão horária (K1) e máxima vazão diária (K2), descritos no capítulo 3.2.1.1, cenário onde poderão ser avaliadas as pressões máxima e mínima do setor. Após a calibração do modelo serão previstas três avaliações:

- Se valores de pressão estão condizentes com os limites estabelecidos na norma NBR 12218 (ABNT, 2017) de 40 mca, podendo chegar a 50 mca em regiões com topografia acidentada e a pressão dinâmica mínima de 10 mca;

- Se é possível diminuir o número de VRPs existentes, se é necessário realocá-las ou reconfigurá-las;

- Se a perda de carga hidráulica nos tubos a fim de identificar aqueles com perdas significativas, indicando a necessidade de substituição ou redimensionamento da rede nesses trechos.

## 6 RESULTADOS

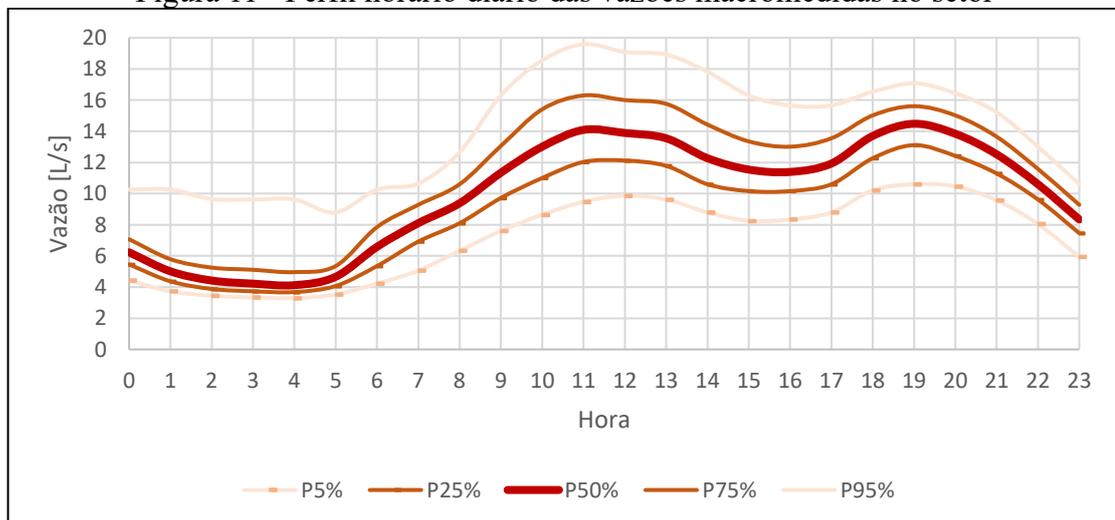
Nos próximos itens, serão descritos os resultados obtidos na construção do modelo envolvendo os dados de macromedição, micromedição e perdas de água, bem como da calibração do modelo das vazões e pressões, além da avaliação da rede existente e as melhorias propostas para o setor.

### 6.1 CONSUMO MACROMEDIDO

De acordo com os dados do sistema comercial do SAMAE (2023), o consumo micromedido para o setor avaliado no mês de março de 2023 foi de 22.101 m<sup>3</sup>/mês.

As curvas obtidas utilizando o *software* Excel que podem ser observadas na Figura 11 do perfil horário diário, a vazão máxima do setor ocorre em torno das 11 horas, ocorrendo também um segundo pico de vazão às 19 horas, e a vazão mínima ocorre entre as 03 e 04 horas, conforme a Tabela 4. Os valores obtidos correspondem ao que foi citado por Santos (2013), onde o autor aponta que o pico de consumo geralmente se dá entre às 11 e 14 horas e o mínimo consumo entre às 03 e 04 horas.

Figura 11 - Perfil horário diário das vazões macromedidas no setor



Fonte: autora (2023).

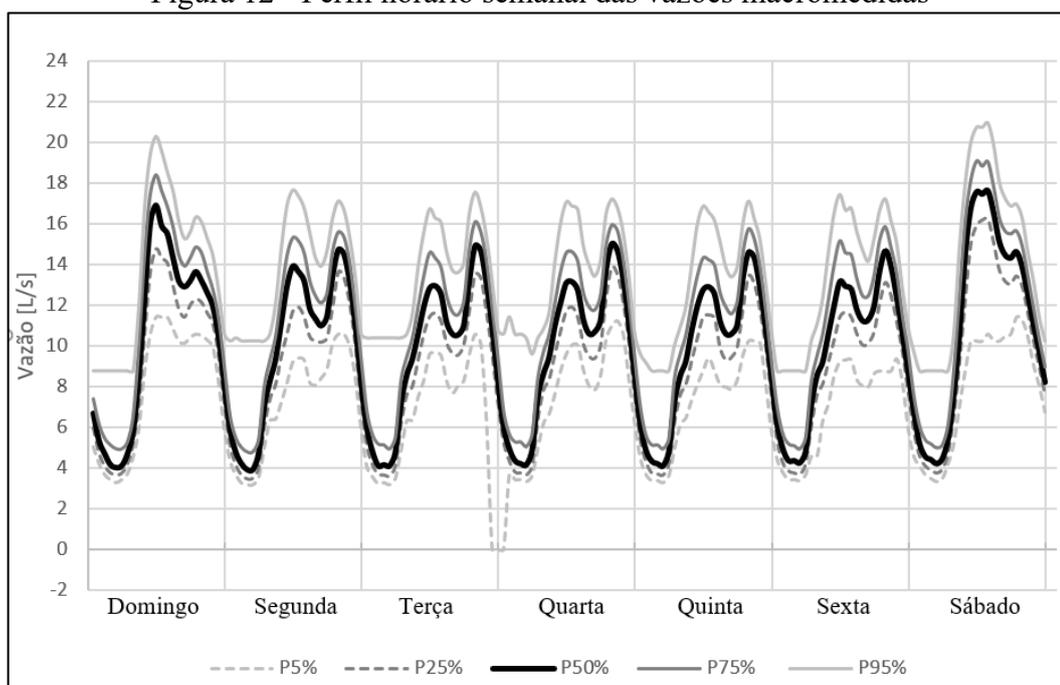
Tabela 4 – Vazão do perfil horário diário do setor, em L/s

<b>Horário</b>	<b>Percentil 95%</b>	<b>Percentil 75%</b>	<b>Percentil 50%</b>	<b>Percentil 25%</b>	<b>Percentil 5%</b>
03:00	8,5	5	4	3,5	3,5
05:00	9,5	5	4,5	4	3,5
11:00	19,5	16,5	14	12	9,5
19:00	17	15,5	14,5	13	10,5

Fonte: autora (2023).

Na Figura 12 está apresentada a curva do perfil horário semanal, iniciando no domingo e terminando no sábado. Verificou-se que o sábado e domingo são os dias de maior consumo, variando em até 4 L/s dos demais dias, enquanto durante o resto da semana o perfil das curvas se mantém similar, com pouca variação entre os dias, cerca de 1 L/s, como pode ser observado na Tabela 5.

Figura 12 - Perfil horário semanal das vazões macromedidas



Fonte: autora (2023).

Tabela 5 – Máximas vazões semanais, em L/s

<b>Percentil</b>	<b>Domingo</b>	<b>Segunda</b>	<b>Terça</b>	<b>Quarta</b>	<b>Quinta</b>	<b>Sexta</b>	<b>Sábado</b>
95%	20,5	17,5	17,5	17,5	17	17,5	21
75%	18,5	15,5	16	16	16	16	19
50%	17	15	15	15	14,5	14,5	17,5
25%	15	13,5	13,5	14	13,5	13	16,5
5%	11,5	10,5	10,5	11	10,5	9,5	11,5

Fonte: autora (2023).

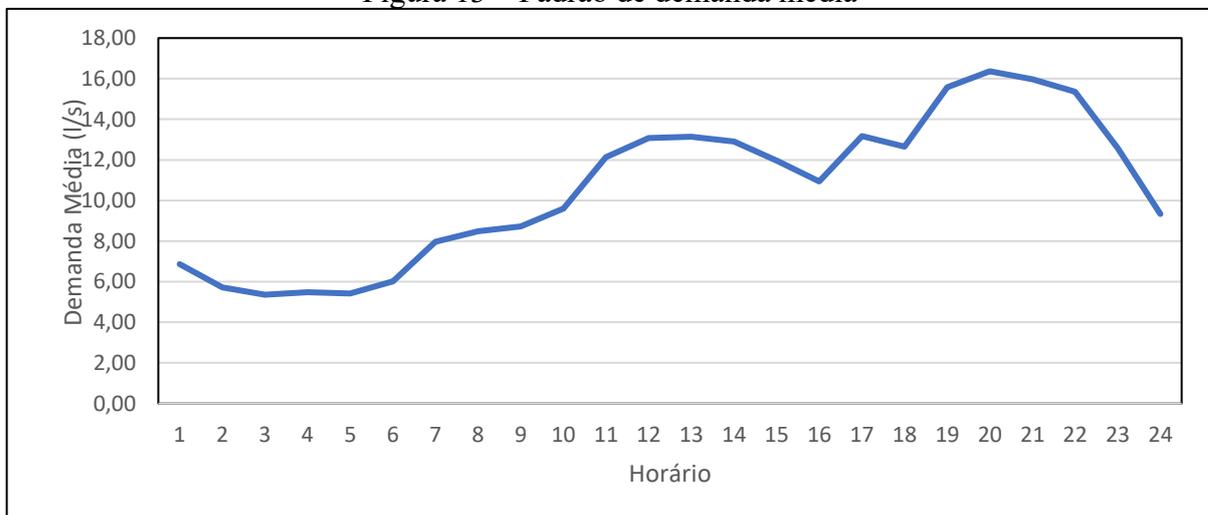
Por meio dos valores macromedidos apresentados na Figura 12 e na Tabela 4, calculou-se o coeficiente de dia de maior consumo K1, onde se obteve o valor de 1,19 e o coeficiente da hora de maior consumo K2, resultando no valor de 1,43. Ressalta-se que os valores encontrados ficaram próximos aos recomendados pela NBR 12218 (ABNT, 2017), de 1,20 para K1 e 1,5 para K2.

## 6.2 CONSUMO MICROMEDIDO E PERDAS DE ÁGUA

Para levantamento do volume micromedido foi considerada a soma da média de 12 meses de consumo dos consumidores da área de estudo, foram considerados a média dos 12 meses para equalizar as variações de consumo dos períodos mais quentes e mais frios do ano.

Considerando a demanda média de 10,11 L/s, o total de consumo micromedido na área de estudo foi de 6,5 L/s, distribuídos nos 2035 consumidores, resultando em uma vazão de perdas totais do sistema de 3,52 L/s. A curva do padrão de demanda média ao longo do dia está apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Padrão de demanda média



Fonte: autora (2023).

No SAMAE as perdas reais representam 63% do total de perdas, sendo assim, para este setor adotou-se para as perdas totais uma vazão de 2,21 L/s, ficando a outra parcela representativa das perdas aparentes com vazão de 1,30 L/s.

O coeficiente de correlação horário obtido e aplicado à vazão de perda aparente garante o mesmo comportamento da curva de abastecimento que ocorre nos diferentes horários, que é expressa pela Equação 7 no capítulo 5.3, estando os valores adotados na Tabela 6.

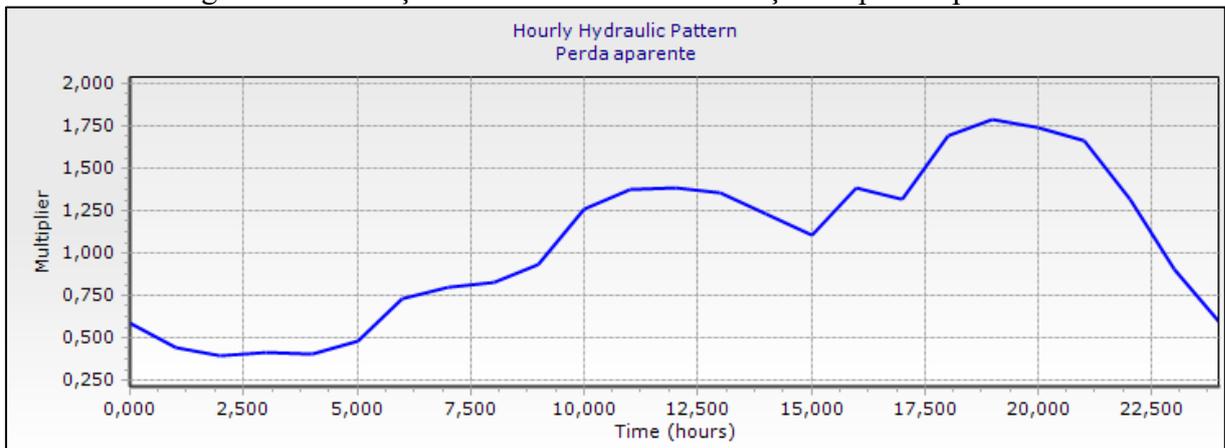
Tabela 6 – Coeficientes de correlação

Hora	Média de Vazão macromedida (L/s)	Coefficiente de Correlação	Hora	Média de Vazão macromedida (L/s)	Coefficiente de Correlação
0	6,87	0,589	12	13,14	1,384
1	5,72	0,444	13	12,9	1,353
2	5,36	0,398	14	11,97	1,235
3	5,47	0,413	15	10,95	1,106
4	5,41	0,405	16	13,18	1,389
5	6,02	0,482	17	12,64	1,321
6	7,97	0,729	18	15,58	1,693
7	8,49	0,795	19	16,37	1,792
8	8,73	0,825	20	15,97	1,742
9	9,6	0,935	21	15,36	1,666
10	12,13	1,256	22	12,58	1,313
11	13,08	1,376	23	9,33	0,901

Fonte: autora (2023).

No caso das perdas reais foi considerado que estas permanecem fixas ao longo do dia, desconsiderando a variação da perda real com as alterações de pressões horárias. A curva das perdas aparentes segue o padrão de demanda do setor, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Variação do coeficiente de correlação da perda aparente

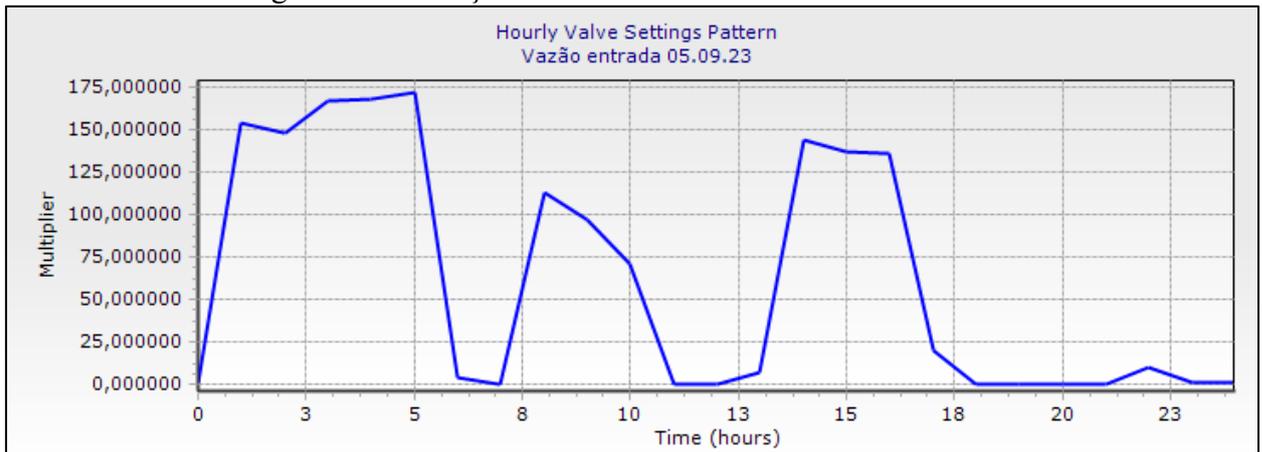


Fonte: WaterGEMS (2023).

### 6.3 CALIBRAÇÃO DA VAZÃO

Os resultados da variação da vazão de entrada do reservatório que foram obtidos utilizando o balanço de vazão apontado no item 5.3.1, estão representados na Figura 15.

Figura 15 – Variação da vazão de entrada do reservatório

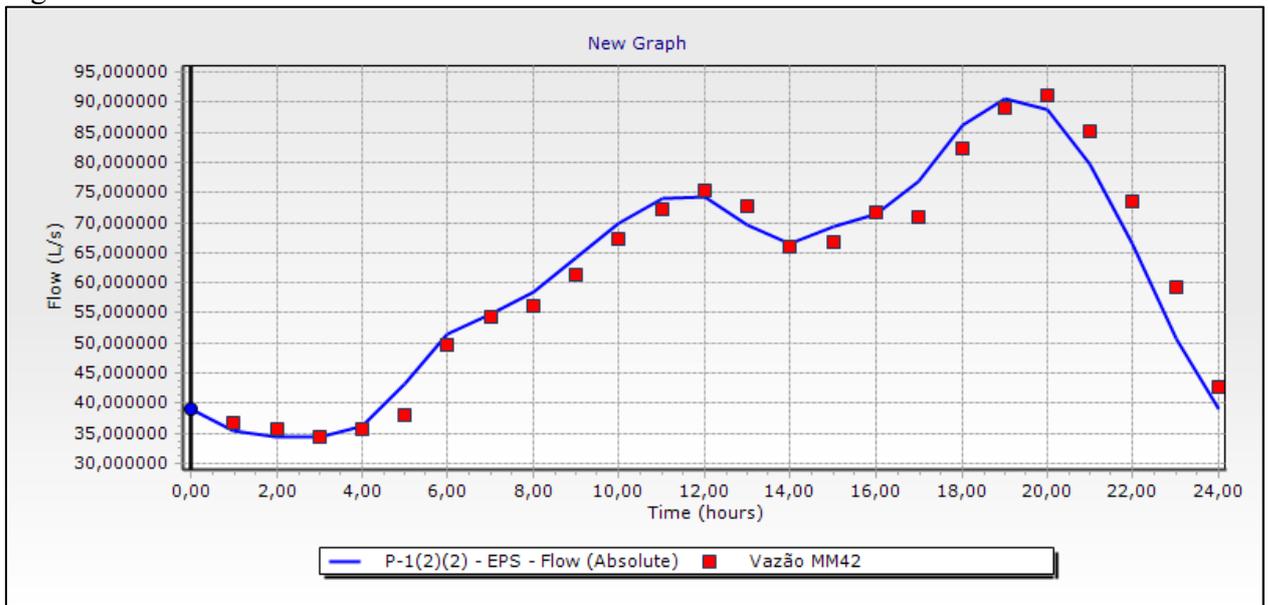


Fonte: WaterGEMS (2023).

Para executar a calibração da vazão de saída do reservatório medida pelo macromedidor MM 42 foi necessário considerar que ele abastece a área medida do setor de estudo MM73 e também a área denominada “Desvio Rizzo”. A vazão de demanda do setor “Desvio Rizzo” foi obtida por meio da subtração das vazões do MM42 com o MM73.

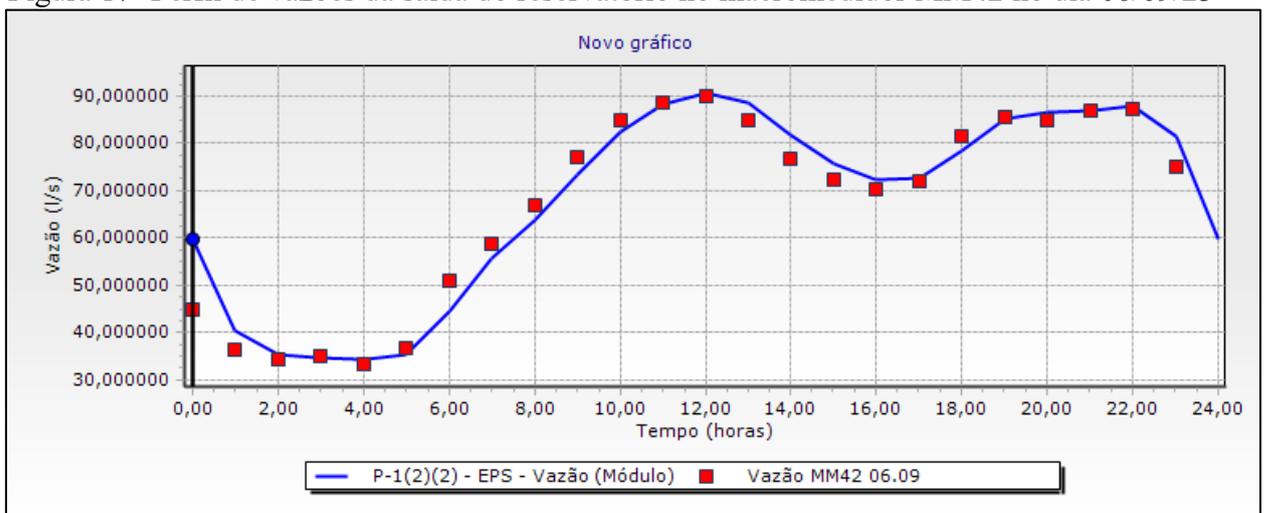
Foi executada a análise de calibração do modelo onde a curva de vazão da saída do reservatório dos dias 05/09 e 06/09 correspondem à curva de vazões medidas pelo macromedidor MM42 existente na saída do reservatório, conforme ilustrado na Figura 16 e Figura 17.

Figura 16- Perfil de vazões da saída do reservatório no macromedidor MM 42 no dia 05/09/23



Fonte: *WaterGEMS* (2023).

Figura 17- Perfil de vazões da saída do reservatório no macromedidor MM42 no dia 06/09/23



Fonte: *WaterGEMS* (2023).

Os valores de vazão obtidos tanto no dia 05 quanto no dia 06/09 estimados pelo *software* e os valores macromedidos estão apresentados na Tabela 07.

Observa-se que a curva de vazão do modelo ajustou-se de acordo com a curva dos dados de campo, isso se reflete no coeficiente de determinação, onde foram utilizados os dados da Tabela 7, cujo o valor obtido no coeficiente de determinação no dia 05/09 foi de 0,96 e no dia 06/09 foi de 0,95.

Tabela 7 - Valores de vazão estimados pelo software e macromedidos da saída do reservatório no macromedidor MM42

Hora	05/09/2023			06/09/2023		
	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$
0	39,1	36,63	2,47	59,86	44,87	14,99
1	35,43	35,58	-0,15	40,65	36,49	4,16
2	34,25	34,38	-0,13	35,46	34,43	1,03
3	34,32	35,74	-1,42	34,71	34,93	-0,22
4	36,16	38,05	-1,89	34,24	33,35	0,89
5	43,2	49,71	-6,51	35,45	36,62	-1,17
6	51,43	54,26	-2,83	44,57	51	-6,43
7	54,72	56,09	-1,37	55,68	58,65	-2,97
8	58,3	61,33	-3,03	63,83	66,73	-2,9
9	64	67,33	-3,33	73,25	77,18	-3,93
10	69,65	72,3	-2,65	82,36	84,74	-2,38
11	73,79	75,33	-1,54	88,16	88,67	-0,51
12	74,08	72,81	1,27	90,67	89,88	0,79
13	69,4	66,02	3,38	88,58	84,92	3,66
14	66,32	66,78	-0,46	81,75	76,61	5,14
15	69,12	71,73	-2,61	75,55	72,37	3,18
16	71,22	70,83	0,39	72,48	70,22	2,26
17	76,63	82,38	-5,75	72,59	71,88	0,71
18	85,91	89,12	-3,21	78,42	81,57	-3,15
19	90,39	91,06	-0,67	85,06	85,43	-0,37
20	88,42	85,18	3,24	86,46	84,72	1,74
21	79,52	73,42	6,1	87,02	86,95	0,07
22	66,32	59,18	7,14	87,92	87,07	0,85
23	50,63	42,63	8	81,33	74,92	6,41

Fonte: autora (2023)

Tendo sido efetuada a calibração da vazão do setor de estudo no macromedidor MM73, foi possível observar que as curvas do dia 05/09 e 06/09 também correspondem à curva de vazões medidas pelo macromedidor MM73 existente na entrada do setor, conforme ilustrado nas Figura 18 e Figura 19.

Figura 18- Perfil de vazões do setor de estudo no macromedidor MM73 no dia 05/09/23

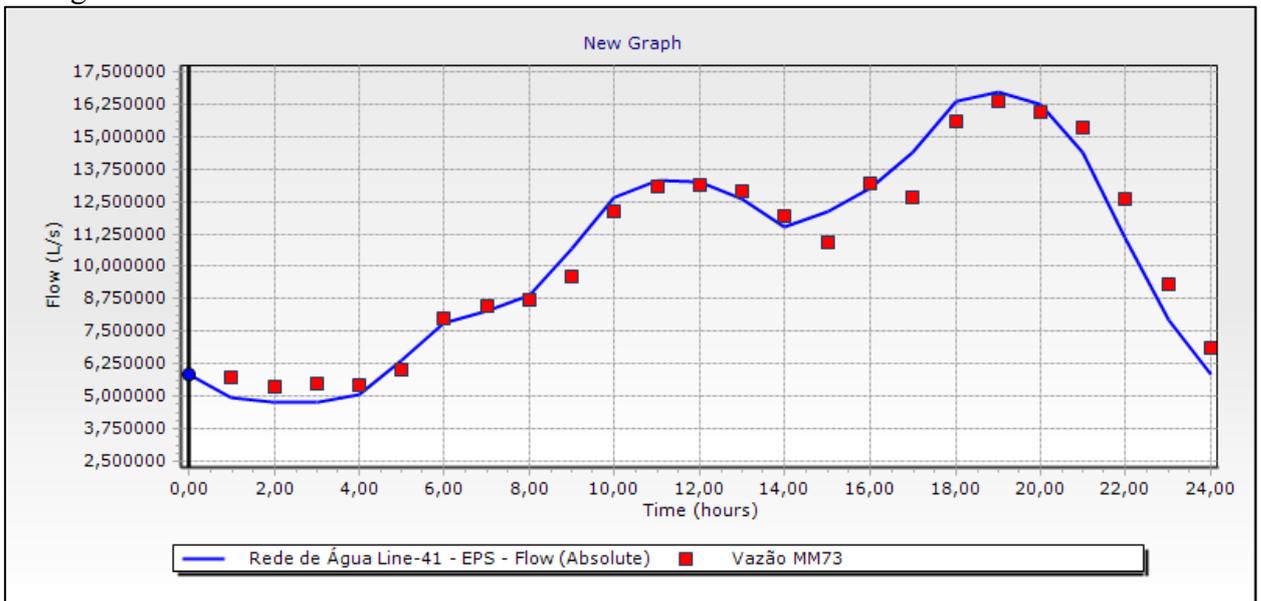
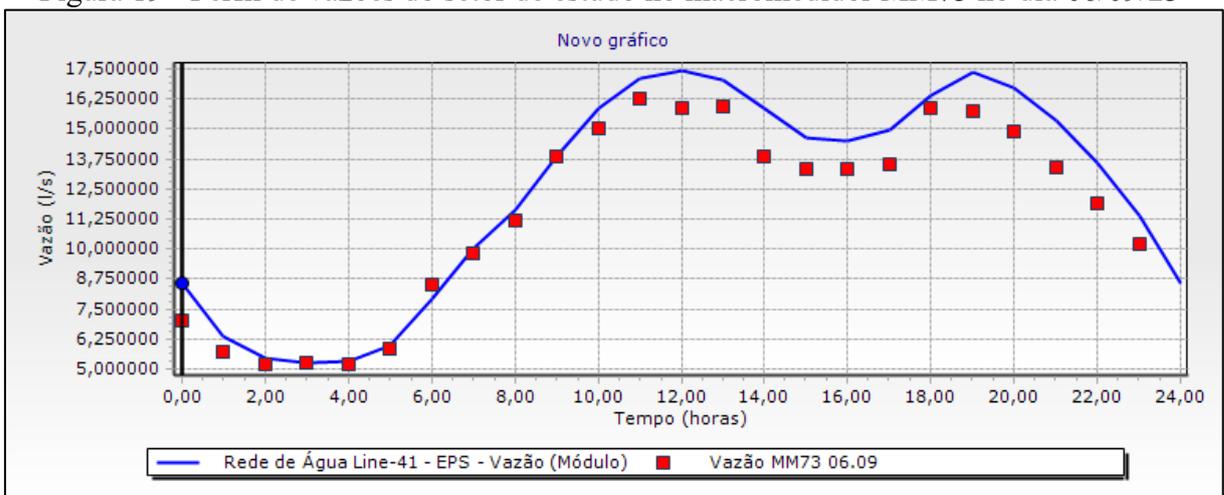


Figura 19 - Perfil de vazões do setor de estudo no macromedidor MM73 no dia 06/09/23



Na Tabela 8 estão apresentados os dados estimados pelo *software* e os valores macromedidos na área de estudo. Com estes dados foi calculado o coeficiente de determinação, sendo obtido os valores de 0,93 para o dia 05/09 e de 0,91 para o dia 06/09. Com isso, tem-se que a curva de vazão do modelo se ajustou adequadamente com a curva dos dados de campo.

Tabela 8 - Valores de vazão estimados pelo software e macromedidos do setor de estudo no macromedidor MM 73

Hora	05/09/2023			06/09/2023		
	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$
0	5,77	5,72	0,05	8,57	7,01	1,56
1	4,86	5,36	-0,5	6,34	5,73	0,61
2	4,69	5,47	-0,78	5,47	5,21	0,26
3	4,7	5,41	-0,71	5,25	5,23	0,02
4	4,98	6,02	-1,04	5,33	5,22	0,11
5	6,32	7,97	-1,65	5,99	5,84	0,15
6	7,68	8,49	-0,81	7,95	8,53	-0,58
7	8,15	8,73	-0,58	10,02	9,8	0,22
8	8,75	9,6	-0,85	11,65	11,21	0,44
9	10,54	12,13	-1,59	13,83	13,86	-0,03
10	12,44	13,08	-0,64	15,84	15,01	0,83
11	13,08	13,14	-0,06	17,08	16,24	0,84
12	13,03	12,9	0,13	17,43	15,84	1,59
13	12,42	11,97	0,45	17,06	15,91	1,15
14	11,38	10,95	0,43	15,88	13,86	2,02
15	11,93	13,18	-1,25	14,65	13,32	1,33
16	12,85	12,64	0,21	14,5	13,31	1,19
17	14,14	15,58	-1,44	14,95	13,5	1,45
18	16,14	16,37	-0,23	16,38	15,86	0,52
19	16,47	15,97	0,5	17,35	15,72	1,63
20	15,97	15,36	0,61	16,69	14,89	1,8
21	14,19	12,58	1,61	15,33	13,38	1,95
22	10,97	9,33	1,64	13,56	11,92	1,64
23	7,82	6,87	0,95	11,39	10,2	1,19

Fonte: autora (2023)

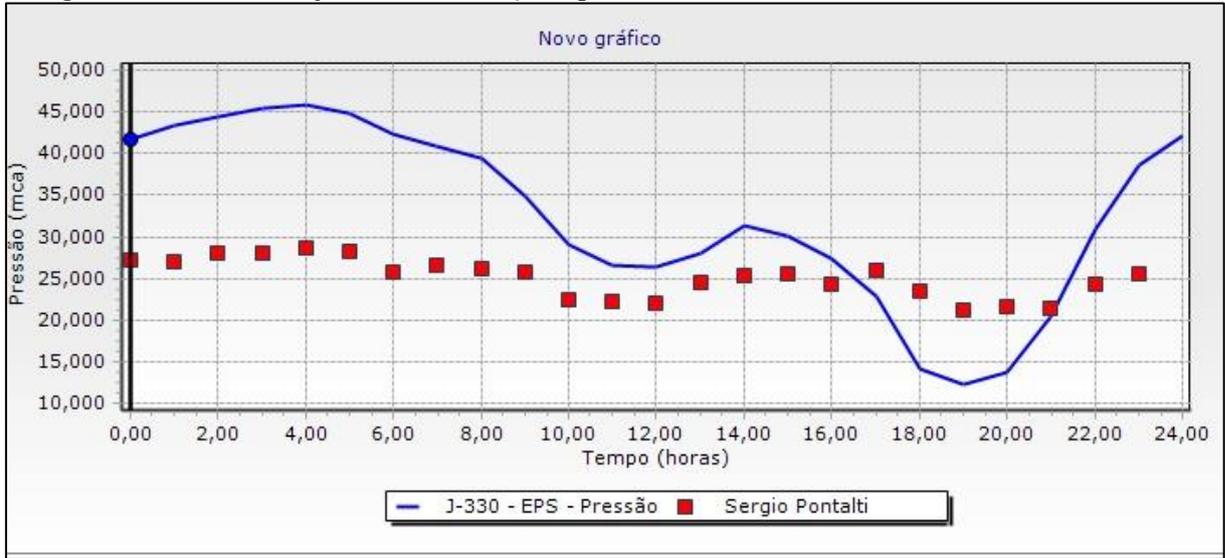
#### 6.4 CALIBRAÇÃO DAS PRESSÕES

Nos próximos subcapítulos estão descritos os resultados obtidos na calibração dos pontos onde foram instalados os *dataloggers* de pressão apontados na Figura 99. Diversos testes foram realizados em busca de obter a curva que melhor se ajustasse com os valores medidos em campo em cada ponto, sendo eles: variação na rugosidade (C), ajuste de diâmetro e possíveis perdas de água.

Foi testada a calibração realizando ajustes somente no diâmetro nas saídas das válvulas não pilotadas, porém a calibração não teve bons resultado. Porém, realizando a combinação da VRP como sendo pilotada mais a redução do diâmetro de um pequeno trecho de tubo após a válvula se obteve resultados mais próximos dos medidos em campo, desta forma foi utilizada

essa técnica combinada para todos os pontos onde se têm VRP de ação dereta, pois ajustando somente uma das opções não se obteve bons resultados na calibração, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Teste de ajuste de calibração apenas reduzindo o diâmetro na saída da válvula

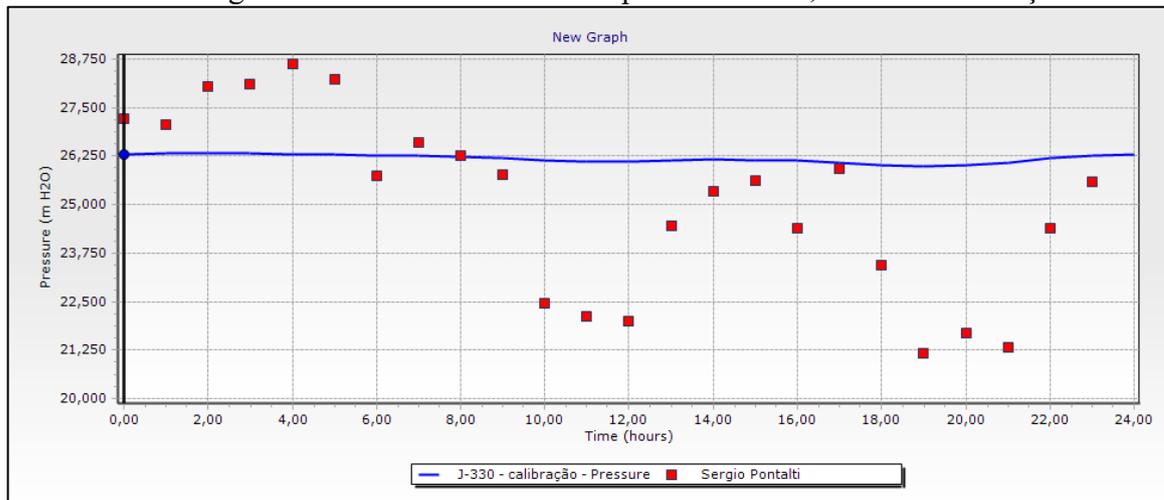


Fonte: *WaterGEMS* (2023).

#### 6.4.1 Calibração de pressão no Ponto 1

O ponto 1 está localizado na rua Sergio Pontalti e possui uma VRP à montante do ponto onde foi instalado o *datalogger*, a VRP possui diâmetro de 20 mm e é uma válvula de ação direta. A primeira resposta do *software* referente às pressões antes da calibração está apresentada na Figura 21, onde os pontos vermelhos representam a medição do *datalogger* e a curva azul o resultado do modelo hidráulico.

Figura 21 – Pressões modeladas para o Ponto 1, antes da calibração



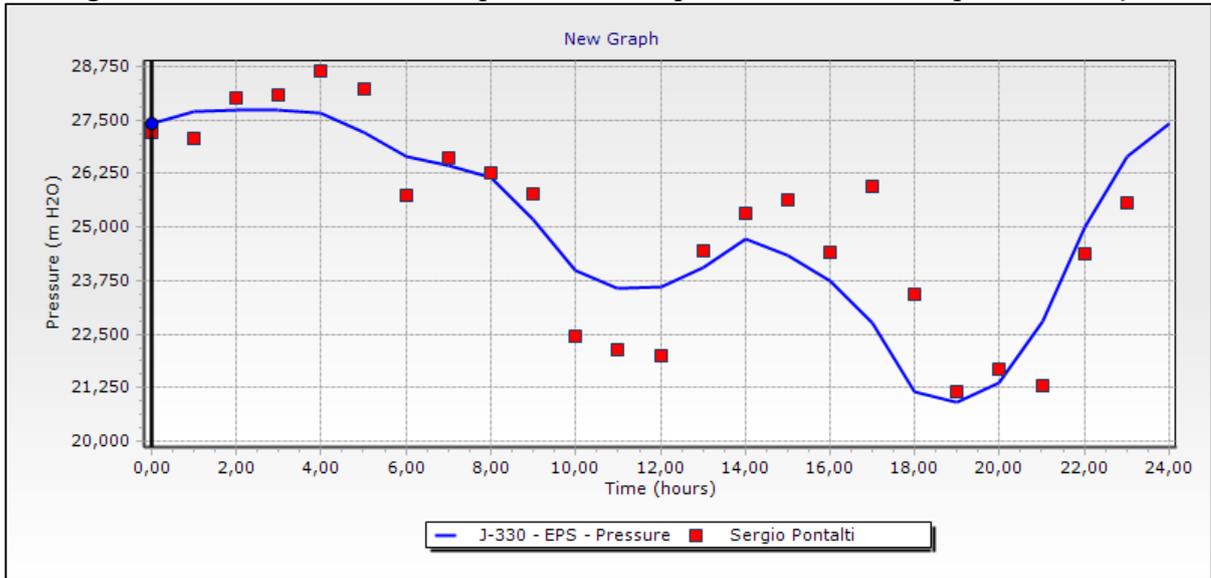
Fonte: *WaterGEMS* (2023).

Para ajustar a curva do modelo com a curva dos dados de campo foram realizados diversos testes alterando a rugosidade, pressão e diâmetro do orifício na saída da VRP.

- Rugosidade: foi testado a alteração da rugosidade, entre 105 e 130, porém houve pouca alteração nas pressões, sendo então mantido o valor 105.
- Pressão: foi alterada a pressão de saída da VRP de 30 mca para 28 mca, o primeiro valor corresponde ao valor cadastrado no banco de dados do SAMAE e o segundo valor foi obtido por meio da medição em campo.
- Diâmetro: reduziu-se o diâmetro de um trecho de 1 metro de tubo de saída da válvula para 20 mm, visto que é uma válvula de ação direta.

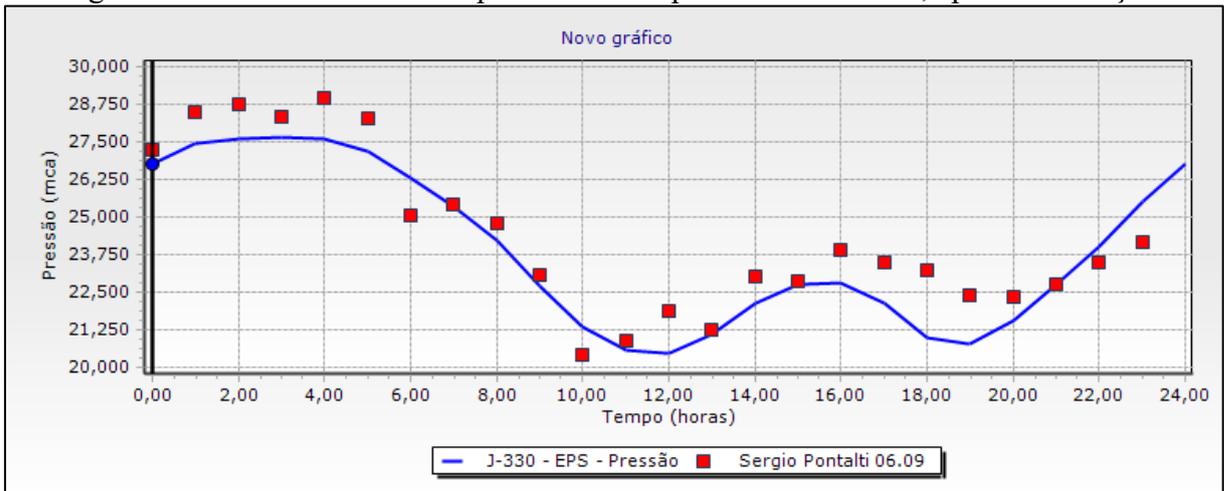
Os ajustes descritos acima foram os que melhor se enquadraram as curvas de pressões para este ponto. O resultado obtido para o dia 05/09 está representado na Figura 22, e o resultado do dia 06/09 na Figura 23.

Figura 22 – Pressões modeladas para o Ponto 1 para o dia 05/09/23, após a calibração



Fonte: WaterGEMS (2023).

Figura 23 - Pressões modeladas para o Ponto 1 para o dia 06/09/23, após a calibração



Fonte: WaterGEMS (2023).

Os valores de pressão estimados pelo *software* e os valores observados em campo com o *datalogger* estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de pressão estimados pelo software e observados em campo no ponto 1

Hora	05/09/2023			06/09/2023		
	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$
0	27,43	27,22	0,21	26,8	27,23	-0,43
1	27,7	27,06	0,64	27,42	28,52	-1,1
2	27,74	28,03	-0,29	27,61	28,74	-1,13
3	27,74	28,09	-0,35	27,65	28,34	-0,69
4	27,65	28,64	-0,99	27,59	28,94	-1,35
5	27,21	28,23	-1,02	27,19	28,3	-1,11
6	26,66	25,74	0,92	26,32	25,03	1,29
7	26,46	26,61	-0,15	25,38	25,42	-0,04
8	26,17	26,26	-0,09	24,21	24,79	-0,58
9	25,19	25,78	-0,59	22,7	23,06	-0,36
10	23,99	22,46	1,53	21,35	20,42	0,93
11	23,57	22,13	1,44	20,58	20,87	-0,29
12	23,62	22	1,62	20,48	21,88	-1,4
13	24,05	24,46	-0,41	21,09	21,27	-0,18
14	24,73	25,34	-0,61	22,16	23,02	-0,86
15	24,35	25,62	-1,27	22,78	22,88	-0,1
16	23,73	24,4	-0,67	22,81	23,89	-1,08
17	22,78	25,93	-3,15	22,11	23,5	-1,39
18	21,16	23,43	-2,27	21,01	23,21	-2,2
19	20,92	21,16	-0,24	20,76	22,39	-1,63
20	21,36	21,69	-0,33	21,56	22,35	-0,79
21	22,8	21,31	1,49	22,74	22,74	0
22	25,01	24,38	0,63	24	23,51	0,49
23	26,64	25,58	1,06	25,5	24,18	1,32

Fonte: autora (2023)

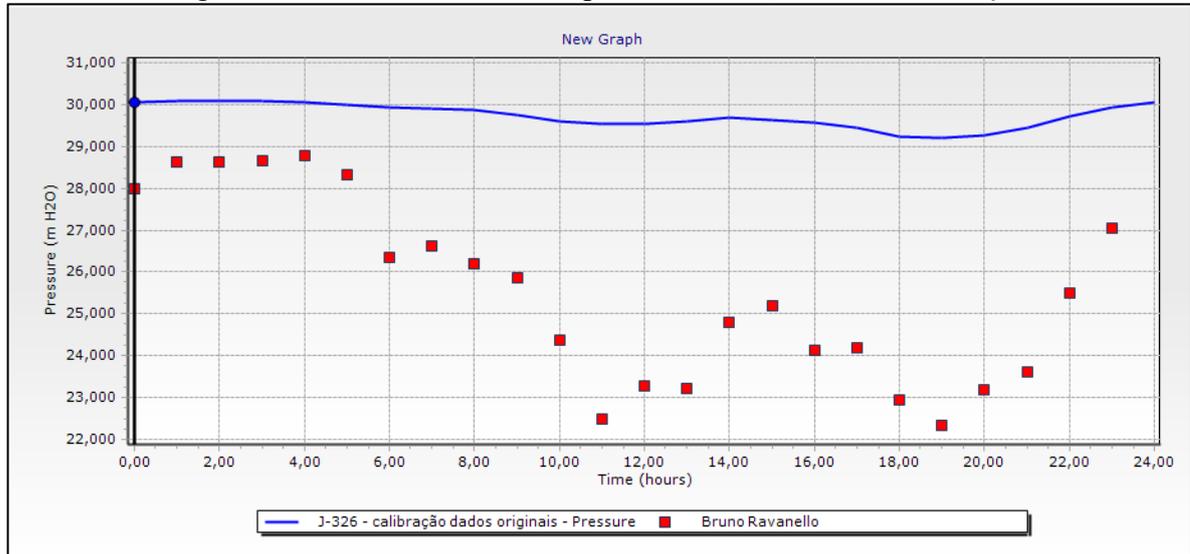
Por meio dos valores obtidos da Tabela 9 foi possível calcular o coeficiente de determinação para ambos os dias, onde se obteve um  $R^2$  de 0,74 para o dia 05/09 e de 0,85 para o dia 06/09. No dia 06/09 a curva teve melhor ajuste visto que o aumento da vazão resultou na queda de pressão do modelo, aproximando os pontos de pressão horária medidas em campo com os dados calculados pelo modelo.

#### 6.4.2 Calibração de pressão no Ponto 2

O Ponto 2 está situado na rua Bruno Ravello e possui uma VRP com diâmetro de 50 mm do tipo ação direta instalada antes do ponto onde foram coletados os dados de pressão com

o *datalogger*, a primeira resposta do *software* referente às pressões estão apresentadas na Figura 24.

Figura 24 - Pressões modeladas para o Ponto 2, antes da calibração



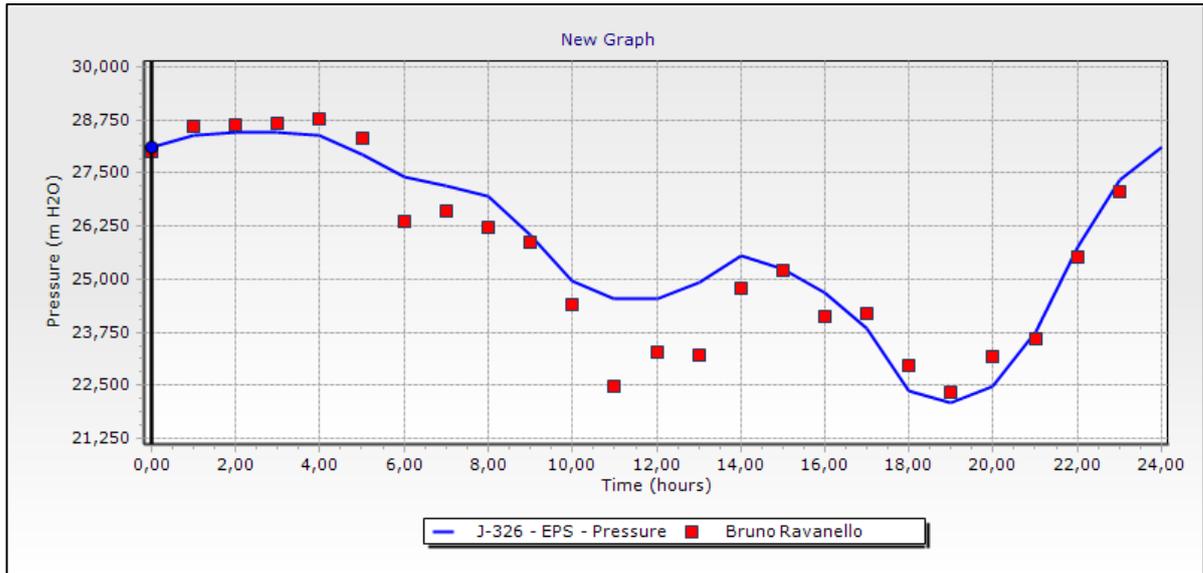
Fonte: WaterGEMS (2023).

Para ajustar a curva do modelo com a curva dos dados de campo foram realizados diversos testes alterando a rugosidade, pressão e diâmetros.

- Rugosidade: foi testado a alteração da rugosidade, entre 105 e 130, porém houve pouca alteração nas pressões, sendo então mantido o valor 105.
- Pressão: foi alterada a pressão de saída da VRP de 16 mca para 15 mca, o primeiro valor corresponde ao valor cadastrado no banco de dados do SAMAE e o segundo valor foi obtido por meio da medição em campo.
- Diâmetro: reduziu-se o diâmetro de um trecho de 1 metro do tudo de saída da válvula para 32 mm, visto que é uma válvula de ação direta.

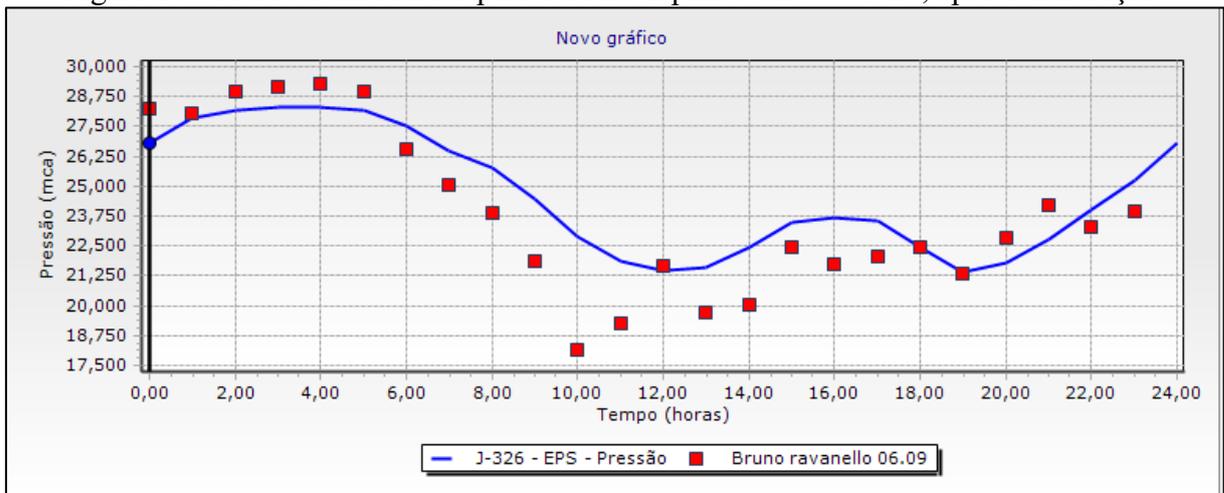
Os resultados que foram obtidos para o dia 05/09 estão representados na Figura 25, e os resultados do dia 06/09 na Figura 26.

Figura 25 - Pressões modeladas para o Ponto 2 para o dia 05/09/23, após a calibração



Fonte: WaterGEMS (2023).

Figura 26 - Pressões modeladas para o Ponto 2 para o dia 06/09/23, após a calibração



Fonte: WaterGEMS (2023).

Por meio dos valores obtidos da Tabela 10 foi possível calcular o coeficiente de determinação para ambos os dias, onde se obteve um  $R^2$  de 0,87 para o dia 05/09 e de 0,79 para o dia 06/09. Analisando as curvas obtidas, observou-se que no segundo dia houve redução da pressão, indicando um maior consumo de água do que previsto no modelo.

Tabela 10 - Valores de pressão estimados pelo software e observados em campo no ponto 2

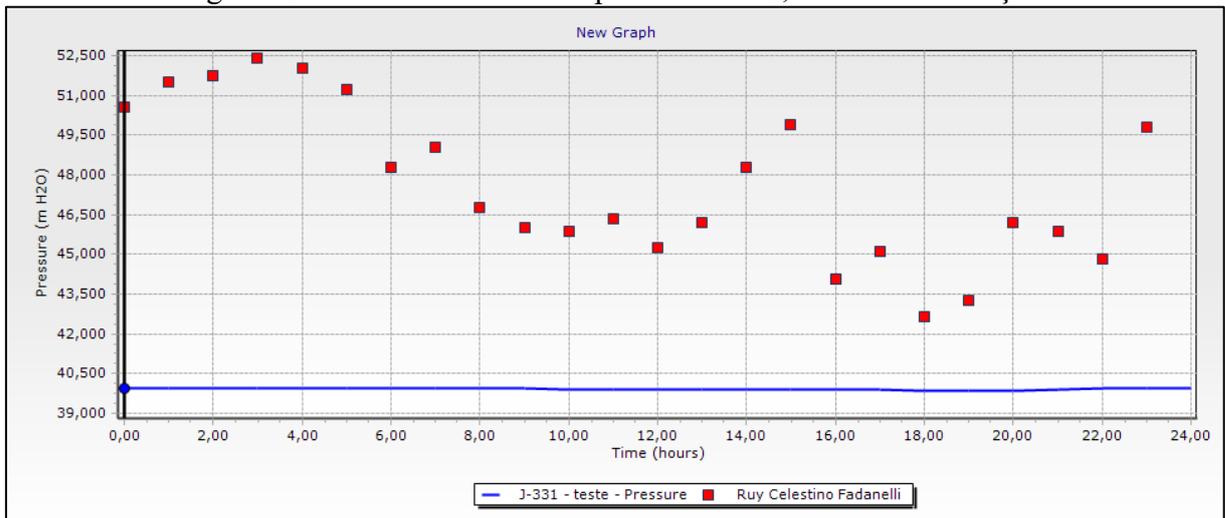
Hora	05/09/2023			06/09/2023		
	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$
0	28,12	27,99	0,13	26,81	28,25	-1,44
1	28,41	28,62	-0,21	27,86	28,04	-0,18
2	28,46	28,62	-0,16	28,21	28,96	-0,75
3	28,45	28,67	-0,22	28,29	29,13	-0,84
4	28,38	28,77	-0,39	28,29	29,31	-1,02
5	27,95	28,32	-0,37	28,18	28,98	-0,8
6	27,42	26,36	1,06	27,51	26,56	0,95
7	27,22	26,61	0,61	26,51	25,07	1,44
8	26,95	26,21	0,74	25,75	23,87	1,88
9	26,06	25,86	0,2	24,43	21,87	2,56
10	24,95	24,39	0,56	22,93	18,15	4,78
11	24,53	22,48	2,05	21,84	19,27	2,57
12	24,56	23,29	1,27	21,45	21,65	-0,2
13	24,94	23,23	1,71	21,59	19,73	1,86
14	25,56	24,79	0,77	22,45	20,05	2,4
15	25,25	25,21	0,04	23,52	22,48	1,04
16	24,68	24,12	0,56	23,67	21,71	1,96
17	23,82	24,2	-0,38	23,54	22,07	1,47
18	22,37	22,95	-0,58	22,47	22,43	0,04
19	22,09	22,34	-0,25	21,39	21,35	0,04
20	22,47	23,19	-0,72	21,78	22,81	-1,03
21	23,76	23,6	0,16	22,77	24,18	-1,41
22	25,77	25,51	0,26	24	23,31	0,69
23	27,34	27,05	0,29	25,27	23,92	1,35

Fonte: autora (2023)

### 6.4.3 Calibração de pressão no Ponto 3

O Ponto 3 está localizado na Rua Ruy Celestino Fadanelli, onde há uma VRP de diâmetro com 20mm do tipo ação direta à montante de onde foi instalado o *datalogger* para coletar os dados de pressão, a primeira curva de pressão apresentada pelo *software* está representada na Figura 27.

Figura 27 - Pressões modeladas para o Ponto 3, antes da calibração



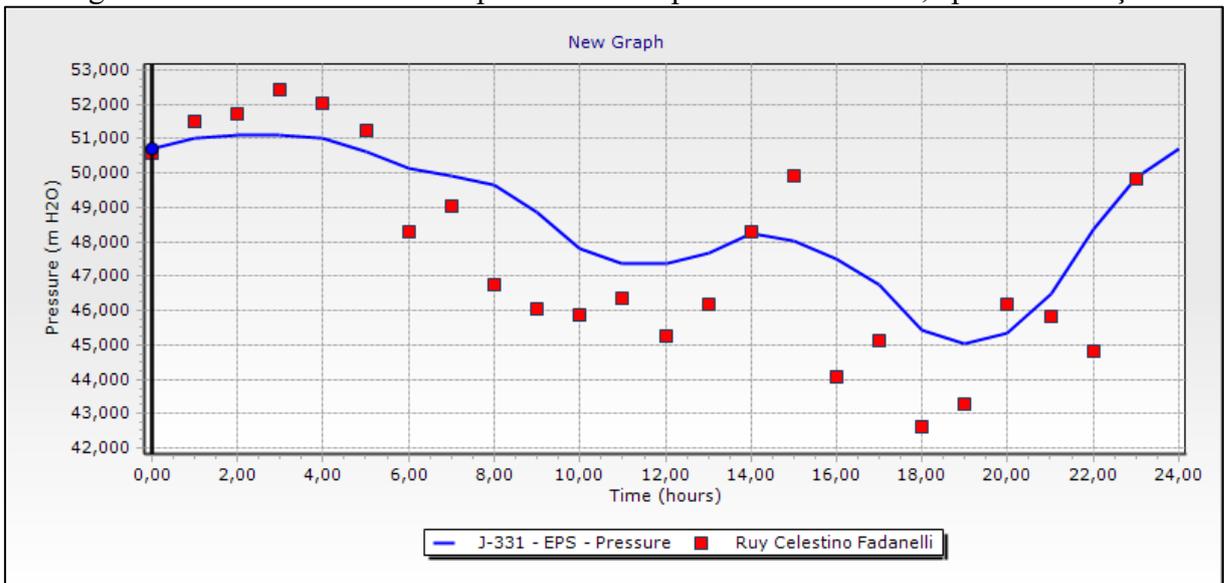
Fonte: WaterGEMS (2023).

Para ajustar a curva do modelo com a curva dos dados de campo foram realizados diversos testes alterando a rugosidade, pressão e diâmetros.

- Rugosidade: foi testado a alteração da rugosidade, entre 105 e 130, porém houve pouca alteração nas pressões, sendo então mantido o valor 105.
- Pressão: se aumentou a pressão de saída da VRP de 10 mca para 22 mca, o primeiro valor corresponde ao valor cadastrado no banco de dados do SAMAE e o segundo valor foi obtido por meio da medição em campo.
- Diâmetro: reduziu-se o diâmetro de um trecho de 1 metro do tudo de saída da válvula para 15 mm, visto que é uma válvula de ação direta.

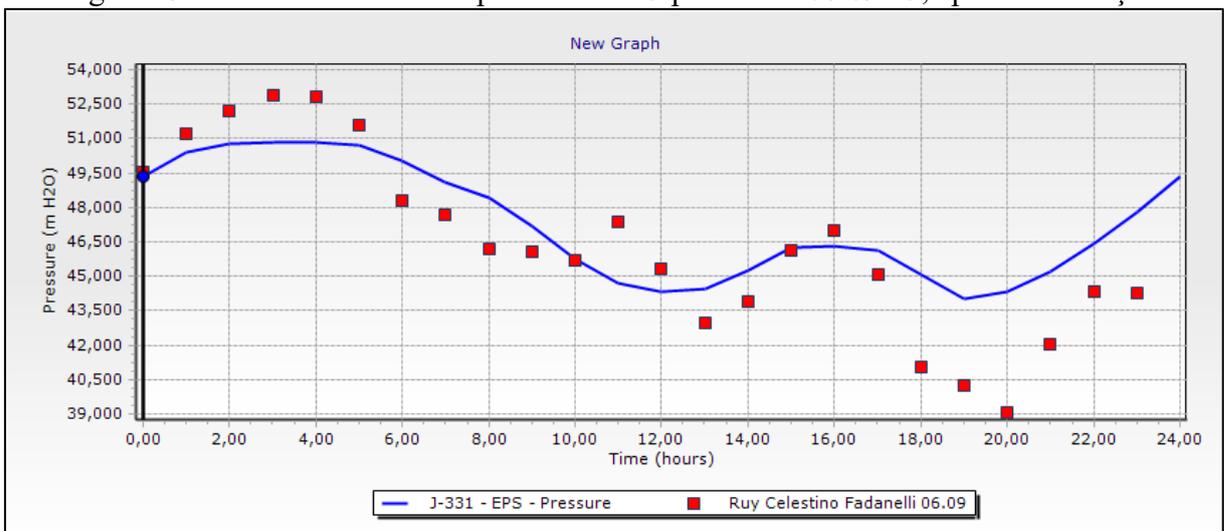
Com estes ajustes foi possível obter as curvas representadas na Figura 28 para o dia 05/09 e a Figura 29 para o dia 06/09.

Figura 28 - Pressões modeladas para o Ponto 3 para o dia 05/09/23, após a calibração



Fonte: WaterGEMS (2023).

Figura 29 - Pressões modeladas para o Ponto 3 para o dia 06/09/23, após a calibração



Fonte: WaterGEMS (2023).

Segundo dados do SNIS (2021) a média de consumo de água mensal para o município de Caxias do Sul é de 9,25m<sup>3</sup> por economia, sendo que para este setor verificou-se que de 57 consumidores deste setor observou-se que apenas 13 ficaram acima da média de consumo do município.

Tal aspecto pode indicar submedição dos hidrômetros o que dificulta a calibração do modelo, pois a baixa vazão reflete em uma perda de carga insignificante de 0,01m/km.

Por meio dos valores obtidos na Tabela 11 foi possível calcular o coeficiente de determinação para ambos os dias, onde se obteve um  $R^2$  de 0,61 para o dia 05/09 e de 0,69 para o dia 06/09

Tabela 11 - Valores de pressão estimados pelo software e observados em campo no ponto 3

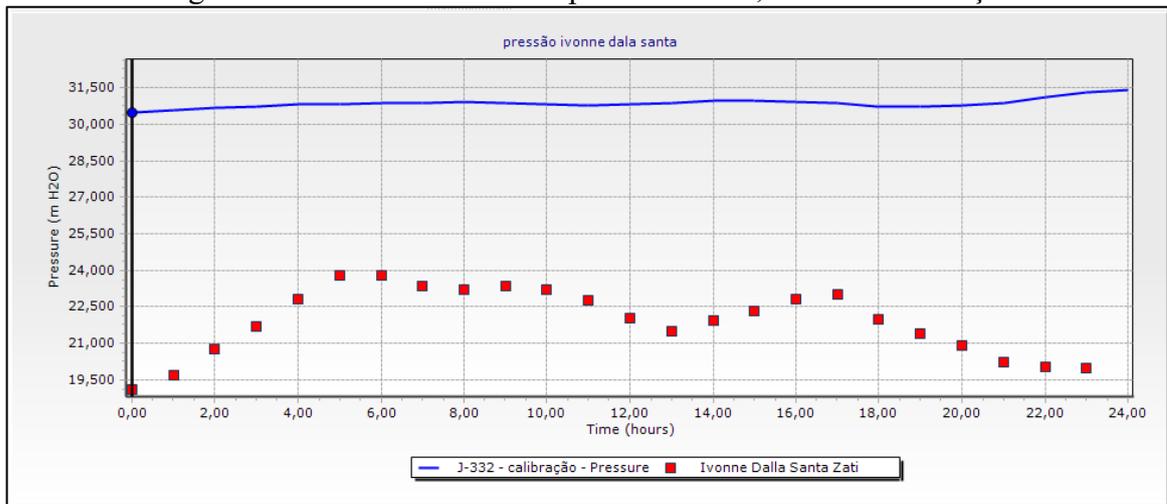
Hora	05/09/2023			06/09/2023		
	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$
0	50,72	50,57	0,15	49,36	49,56	-0,2
1	51,04	51,52	-0,48	50,41	51,23	-0,82
2	51,11	51,72	-0,61	50,77	52,19	-1,42
3	51,11	52,43	-1,32	50,86	52,91	-2,05
4	51,03	52,03	-1	50,85	52,8	-1,95
5	50,64	51,22	-0,58	50,74	51,6	-0,86
6	50,13	48,3	1,83	50,06	48,3	1,76
7	49,9	49,02	0,88	49,09	47,67	1,42
8	49,65	46,76	2,89	48,4	46,2	2,2
9	48,85	46,03	2,82	47,21	46,07	1,14
10	47,81	45,86	1,95	45,78	45,68	0,1
11	47,35	46,34	1,01	44,69	47,38	-2,69
12	47,35	45,27	2,08	44,31	45,34	-1,03
13	47,68	46,18	1,5	44,44	42,95	1,49
14	48,26	48,27	-0,01	45,23	43,92	1,31
15	48,04	49,91	-1,87	46,24	46,1	0,14
16	47,52	44,07	3,45	46,32	46,98	-0,66
17	46,73	45,12	1,61	46,14	45,07	1,07
18	45,42	42,64	2,78	45,1	41,07	4,03
19	45,05	43,28	1,77	44	40,22	3,78
20	45,37	46,2	-0,83	44,32	39,05	5,27
21	46,51	45,85	0,66	45,23	42,01	3,22
22	48,36	44,82	3,54	46,46	44,33	2,13
23	49,9	49,82	0,08	47,81	44,27	3,54

Fonte: autora (2023)

#### 6.4.4 Calibração de pressão no Ponto 4

O Ponto 4 está localizado na Na Rua Ivonne Dalla Santa Zati, sendo que a água que chega até este ponto vem direto do reservatório, não passando por nenhuma válvula. Na Figura 30 está apresentada a discordância entre a pressão do campo e a pressão calculada pelo modelo.

Figura 30- Pressões modeladas para o Ponto 4, antes da calibração



Fonte: WaterGEMS (2023).

Para ajustar a curva do modelo com a curva dos dados de campo foram realizados diversos testes alterando a rugosidade e verificação de ligações de água

- Rugosidade: foi testado a alteração da rugosidade, entre 105 e 130, porém houve pouca alteração nas pressões, sendo então mantido o valor 105.
- Ligações: foi realizada uma avaliação da área de influência do ponto, representada em azul na Figura 31, e apurou-se que existem no local cerca de 200 residências não georefenciadas no cadastro técnico. Baseado em dados internos do SAMAE, nestes casos de áreas irregulares, considera-se consumo médio de 20 m<sup>3</sup>/mês, desta forma, foi acrescida a vazão de 1,52 L/s nesta área de influência.

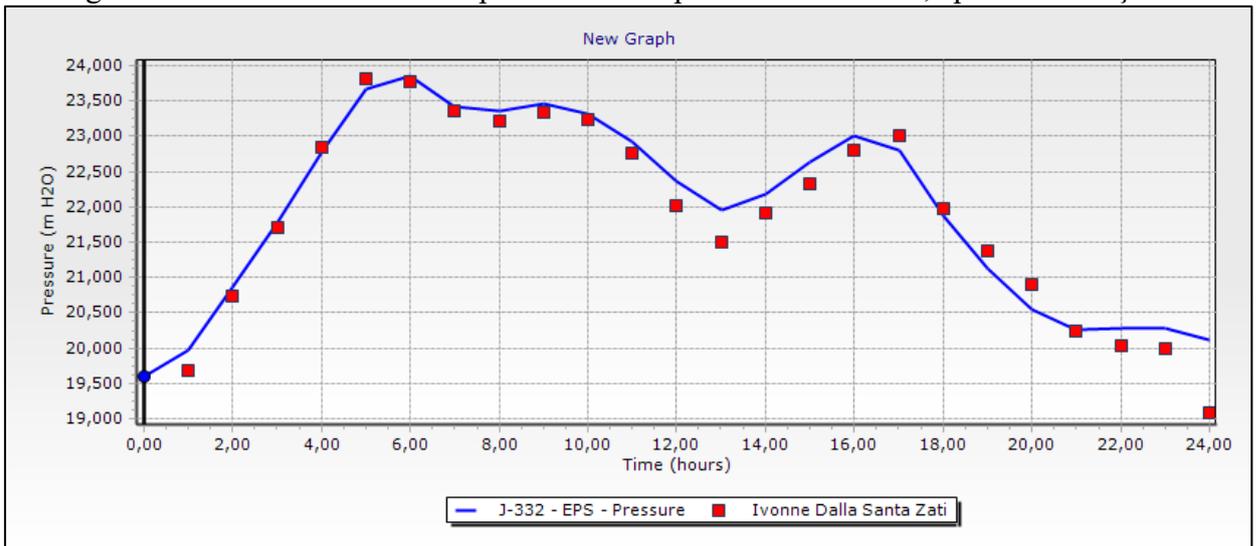
Figura 31- Área de influência do ponto 4



Fonte: autora (2023).

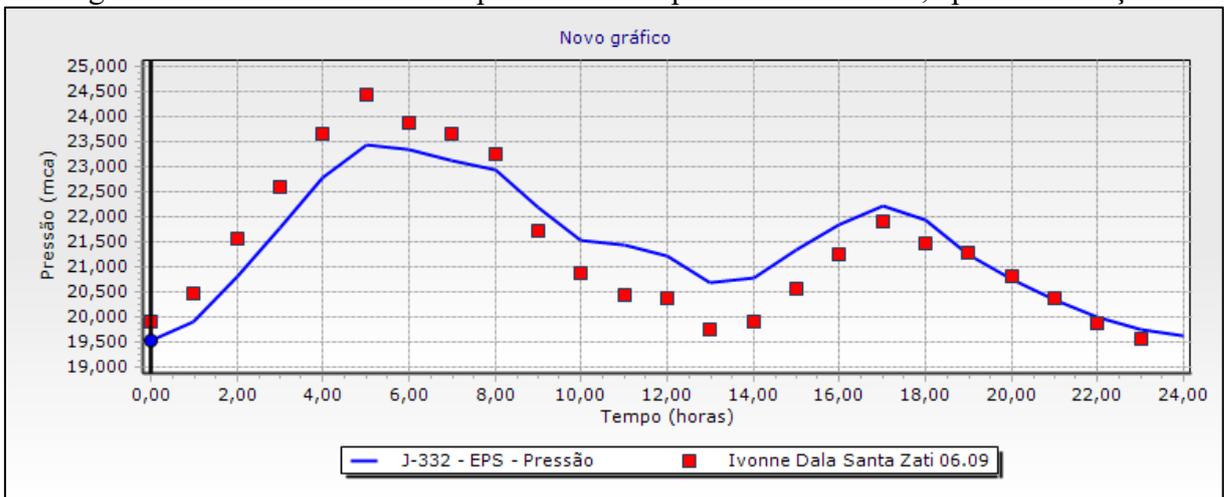
Também se observou que neste ponto, por ser abastecido direto pelo reservatório, não existindo interferência de VRPs e por essa região possuir pouca perda de carga, a curva de pressão está relacionada em sua maioria pela variação de nível do reservatório. Desta forma, obteve-se a curva de pressões da Figura 32 para o dia 05/09 e Figura 33 para o dia 06/09.

Figura 32 – Pressões modeladas para o Ponto 4 para o dia 05/09/23, após a calibração



Fonte: *WaterGEMS* (2023).

Figura 33 - Pressões modeladas para o Ponto 4 para o dia 06/09/23, após a calibração



Fonte: *WaterGEMS* (2023).

Por meio dos valores obtidos da Tabela 12 foi possível calcular o coeficiente de determinação para ambos os dias, onde se obteve o valor de 0,97 para o dia 05/09 e de 0,83 para o dia 06/09.

Tabela 12 - Valores de pressão estimados pelo software e observados em campo no ponto 4

Hora	05/09/2023			06/09/2023		
	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$
0	19,6	19,09	0,51	19,547	19,9	-0,353
1	19,97	19,67	0,3	19,906	20,47	-0,564
2	20,86	20,74	0,12	20,826	21,56	-0,734
3	21,8	21,71	0,09	21,795	22,59	-0,795
4	22,79	22,84	-0,05	22,79	23,65	-0,86
5	23,68	23,81	-0,13	23,452	24,43	-0,978
6	23,86	23,78	0,08	23,332	23,88	-0,548
7	23,43	23,37	0,06	23,118	23,67	-0,552
8	23,36	23,21	0,15	22,927	23,24	-0,313
9	23,46	23,34	0,12	22,188	21,71	0,478
10	23,31	23,23	0,08	21,538	20,87	0,668
11	22,93	22,75	0,18	21,453	20,45	1,003
12	22,38	22,02	0,36	21,22	20,38	0,84
13	21,96	21,49	0,47	20,679	19,74	0,939
14	22,18	21,92	0,26	20,779	19,89	0,889
15	22,64	22,34	0,3	21,349	20,57	0,779
16	23,01	22,79	0,22	21,851	21,26	0,591
17	22,81	23,01	-0,2	22,218	21,91	0,308
18	21,87	21,98	-0,11	21,931	21,46	0,471
19	21,13	21,38	-0,25	21,237	21,27	-0,033
20	20,55	20,91	-0,36	20,755	20,83	-0,075
21	20,27	20,24	0,03	20,357	20,39	-0,033
22	20,28	20,04	0,24	19,991	19,89	0,101
23	20,27	19,99	0,28	19,757	19,57	0,187

Fonte: autora (2023)

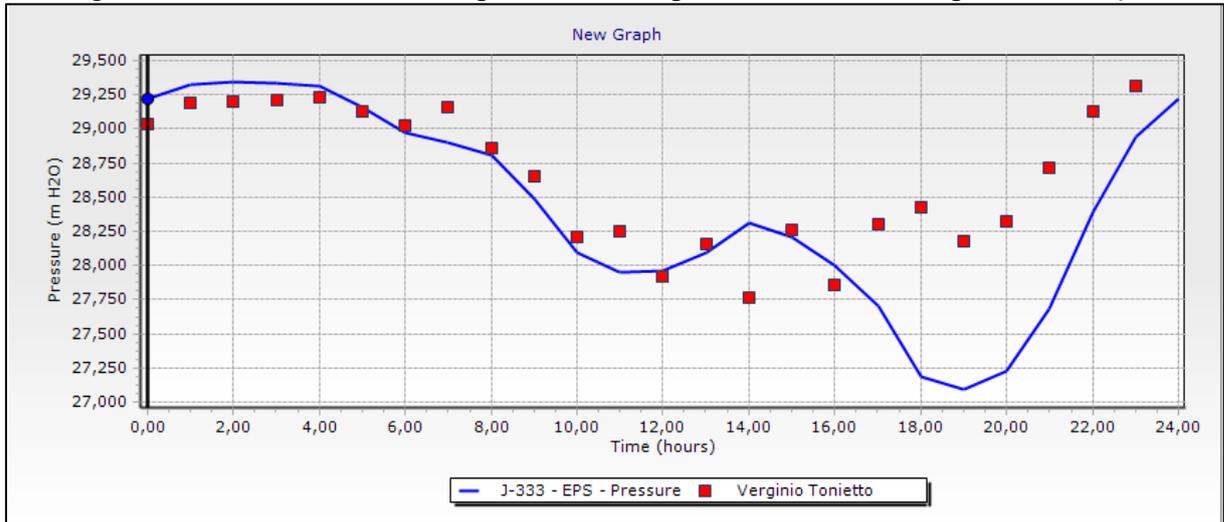
#### 6.4.5 Calibração de pressão no Ponto 5

O Ponto 5 está situado na Rua Verginio Tonietto e possui a influência de uma VRP de diâmetro de 100mm, operada por válvula piloto e acionada com diafragma, que está instalada antes do ponto onde foram coletados os dados de pressão. A primeira curva de pressão apresentada pelo *software* está ilustrada na Figura 34.



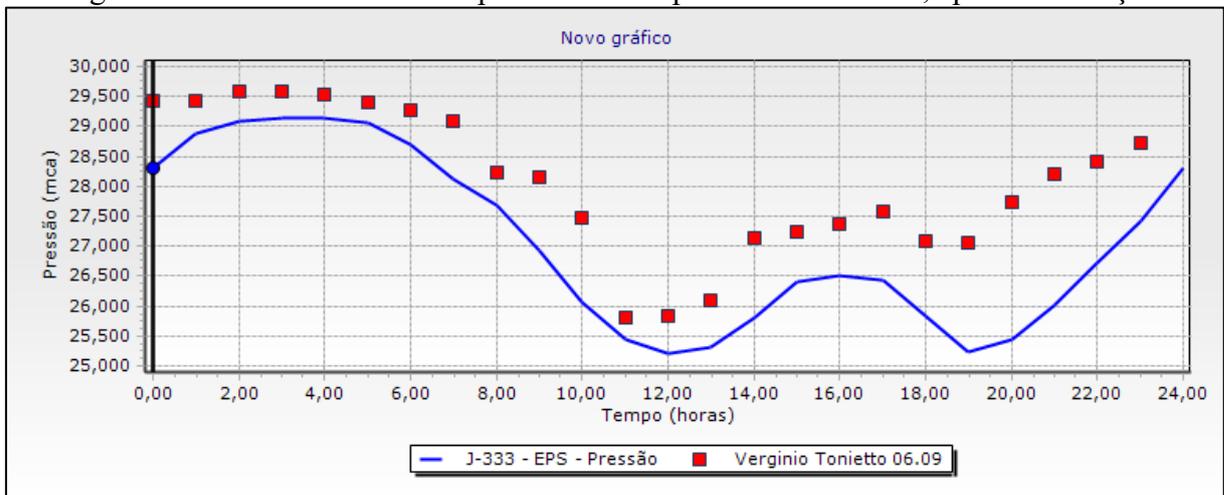
Com esse ajuste foi possível obter as curvas representadas na Figura 36 para o dia 05/09 e Figura 37 para o dia 06/09.

Figura 36 - Pressões modeladas para o Ponto 5 para o dia 05/09/23, após a calibração



Fonte: *WaterGEMS* (2023).

Figura 37 - Pressões modeladas para o Ponto 5 para o dia 06/09/23, após a calibração



Fonte: *WaterGEMS* (2023).

Observa-se que o padrão de consumo desta região não acompanha o padrão da curva de vazão, pois nesses dias o consumo de água pode ter sido menor do que o valor médio utilizado no modelo, sendo que o menor consumo faz com que a pressão no ponto fique maior.

Por meio dos valores obtidos da Tabela 13 foi possível calcular o coeficiente de determinação para ambos os dias, onde se obteve um  $R^2$  de 0,48 para o dia 05/09 e de 0,78 para o dia 06/09.

Tabela 13 - Valores de pressão estimados pelo software e observados em campo no ponto 5

Hora	05/09/2023			06/09/2023		
	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$	Estimado	Observado	$\Delta=Est - Obs$
0	29,22	29,44	-0,22	29,29	29,44	-0,15
1	29,32	29,44	-0,12	29,89	29,44	0,45
2	29,34	29,57	-0,23	30,08	29,57	0,51
3	29,34	29,59	-0,25	30,13	29,59	0,54
4	29,31	29,52	-0,21	30,13	29,52	0,61
5	29,16	29,4	-0,24	30,07	29,4	0,67
6	28,98	29,27	-0,29	29,69	29,27	0,42
7	28,9	29,09	-0,19	29,13	29,09	0,04
8	28,81	28,24	0,57	28,69	28,24	0,45
9	28,49	28,16	0,33	27,93	28,16	-0,23
10	28,1	27,47	0,63	27,07	27,47	-0,4
11	27,95	25,81	2,14	26,44	25,81	0,63
12	27,96	25,84	2,12	26,22	25,84	0,38
13	28,1	26,1	2	26,3	26,1	0,2
14	28,32	27,13	1,19	26,8	27,13	-0,33
15	28,21	27,23	0,98	27,41	27,23	0,18
16	28,01	27,36	0,65	27,51	27,36	0,15
17	27,7	27,58	0,12	27,44	27,58	-0,14
18	27,19	27,1	0,09	26,83	27,1	-0,27
19	27,09	27,05	0,04	26,22	27,05	-0,83
20	27,22	27,74	-0,52	26,45	27,74	-1,29
21	27,68	28,22	-0,54	27,02	28,22	-1,2
22	28,39	28,41	-0,02	27,72	28,41	-0,69
23	28,94	28,72	0,22	28,43	28,72	-0,29

Fonte: autora (2023)

## 6.5 AVALIAÇÃO E PROPOSTAS DE MELHORIA NA REDE DE ABASTECIMENTO DO SETOR

Após a calibração do modelo hidráulico, procedeu-se à avaliação do setor com o objetivo de propor melhorias na rede de abastecimento de água. Verificou-se a existência de 96 pontos na rede onde a pressão ultrapassava os limites estabelecidos pela norma NBR 12.218 (ABNT,2017). Para as intervenções propostas foi realizada a avaliação do modelo em EPS, no qual podem ser observados os pontos de máxima e mínima vazão e pressão horárias.

Foi realizada a subdivisão da zona de abastecimento por gravidade em duas zonas de pressão. Na Zona de Pressão 1, a pressão é mantida em conformidade com o nível do





Formolo Tapia (2), e realizar a interligação das redes no beco da Rua Maria Blangina Rigoni (3), conforme ilustrado na Figura 42.

Figura 41 - Reforço de rede projetado (em azul)



Fonte: autora (2023).

Figura 42 – Instalação de separadores (1 e 2) e interligação de rede (3)



Fonte: autora (2023).



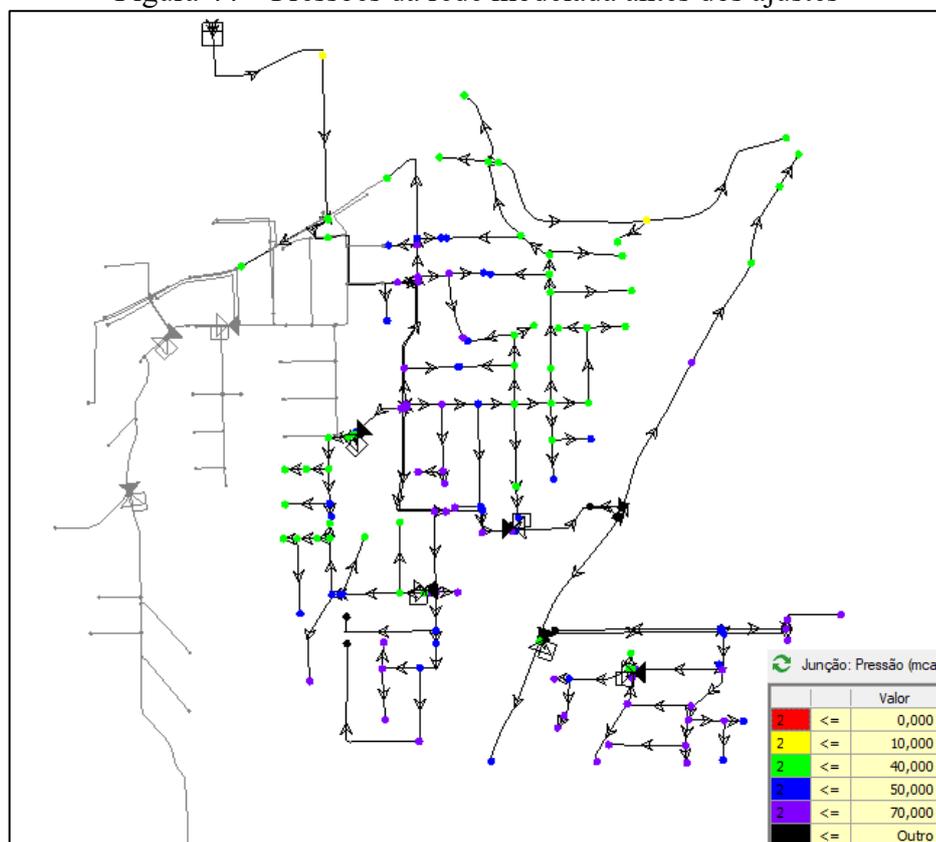
Tabela 14 – Alterações nas pressões das VRPs

VRP	Antes (mca)	Depois (mca)
Rua Paolo Benjamin Peruari	22	10
Estrada da Uva	18	10
Rua Egon Carlos Peters	42	10
Rua Albérico Guelfi	15	13
Rua Miriam Formolo Tapia	30	DESATIVADA
Rua Reinaldo Soardi	INEXISTENTE	20

Fonte: autora (2023).

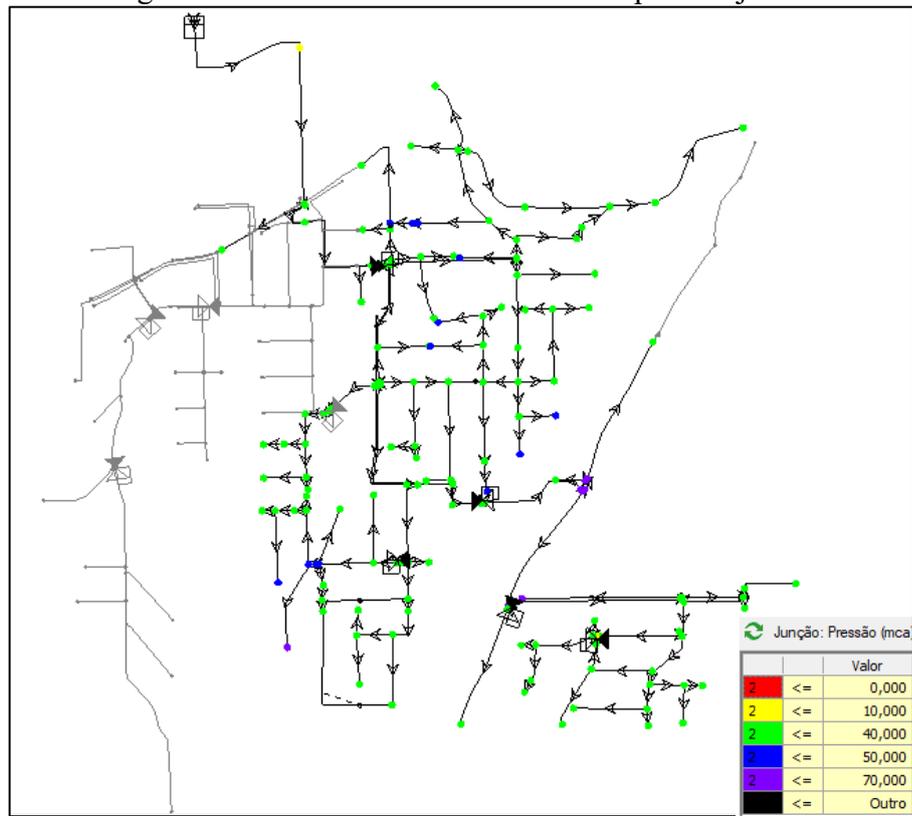
Os aprimoramentos planejados na infraestrutura de abastecimento de água possibilitaram a redução de pontos com pressão acima de 40 mca de 96 para 22. Além disso, a quantidade de pontos com pressão superior a 50 mca foi reduzida de 61 para 9. O antes e depois dos pontos de pressão podem ser observados na Figura 44 e na Figura 45. Importante ressaltar que nesta região há variações significativas na topografia, sendo que a norma NBR 12218 (ABNT, 2017) permite pressões de até 50 mca em áreas com topografia acidentada, porém se tornaria inviável a instalação de novas VRPs em pequenos trechos de rede que variam de 150 à 200 metros pois aumentaria os custos de manutenção.

Figura 44 – Pressões da rede modelada antes dos ajustes



Fonte: WaterGEMS (2023).

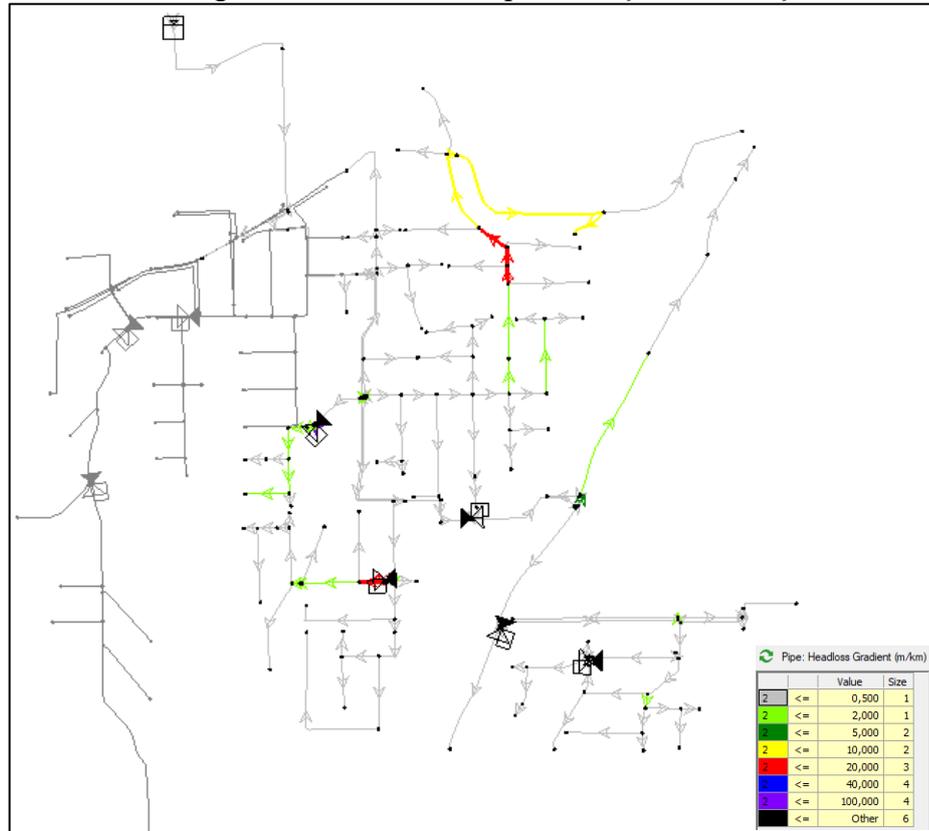
Figura 45 – Pressões da rede modelada após os ajustes



Fonte: *WaterGEMS* (2023).

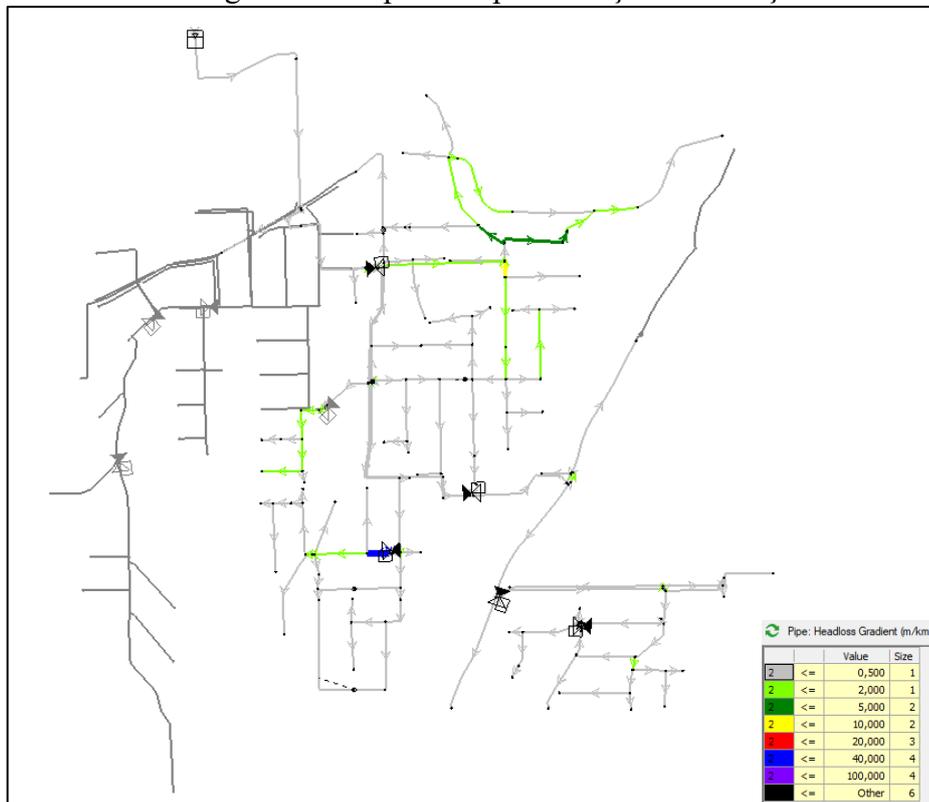
Na Figura 46, é possível observar as perdas de carga unitárias antes da implementação do projeto para instalar um reforço na rede, enquanto na Figura 47 estão apresentadas as perdas de carga após a instalação do reforço estão representadas. Evidenciando uma redução das perdas de carga nessa região abastecida pela ação da gravidade após a implementação do reforço.

Figura 46 – Perda de carga unitária antes da implementação do reforço de rede na Zona 1



Fonte: *WaterGEMS* (2023).

Figura 47 – Perda de carga unitária após a implementação do reforço de rede na Zona 1



Fonte: *WaterGEMS* (2023)

## 7 CONCLUSÕES E LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O trabalho apresentado consistiu na calibração do modelo hidráulico de uma rede de abastecimento real localizada em Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, bem como a posterior proposição de melhorias na rede. Para tanto, foi utilizado o software *WaterGEMS* para a realização das simulações hidráulicas.

Os principais ajustes necessários para a calibração do modelo hidráulico ocorreram nas vazões, tanto da entrada e saída do reservatório quanto a distribuição dos consumos e das perdas de água no setor. Outro ponto importante para a calibração foi o ajuste das pressões nas VRPs.

Observou-se que a variação do coeficiente de rugosidade no setor não foi significativa para a calibração. No caso das VRPs de ação direta, não foi identificado no *software* um campo onde pudesse ser inserido o modelo da válvula. Desta forma, para sistemas onde se têm válvulas redutoras de pressão de ação direta foi possível atingir comportamentos das curvas similares fazendo uma combinação entre uma válvula piloto e um pequeno trecho de rede reduzido gerando perda de carga.

Quanto aos coeficientes de determinação, para análise das vazões o valor dos coeficientes ficou acima de 0,9 para os dois dias analisados nos dois macromedidores, para as pressões foram analisados 5 pontos em dois dias, onde os resultados obtidos foram: 0,97 para um ponto de análise, entre 0,8 e 0,9 para três pontos de análise, entre 0,6 e 0,8 para cinco pontos de análise e um ponto ficou com o coeficiente de 0,48. Sendo que as análises dos resultados obtidos estão descritas no capítulo 6.4.

Com a modelagem hidráulica foi possível realizar um estudo sobre o sistema antes e após a execução das obras sugeridas, por meio dos resultados apresentados pelo *WaterGEMS*. O modelo hidráulico apresentou redução significativa dos pontos com alta pressão no setor após a proposta das oito alterações, conforme descrito no capítulo 6,5.

Verificou-se a importância do sistema de monitoramento remoto de vazões que permitiu o levantamento de dados em tempo real, agilizando a etapa de calibração do modelo hidráulico. Ressalta-se a importância de ter os dados de consumo georreferenciados, permitindo uma correta distribuição dos mesmos, facilitando a calibração da curva de vazão.

Mesmo que o modelo hidráulico tenha sido eficaz para determinar os ajustes necessários, alguns pontos de medição de pressão com *dataloggers* apresentaram diferenças em relação às curvas do modelo hidráulico. Observou-se que quanto mais distante do ponto de medição de vazão maior a dificuldade para calibrar o modelo hidráulico, aliado ao fato que as ligações irregulares não possuem medição, o consumo micromedido foi realizada uma média

de 12 meses, e se tem medição de vazão apenas na entrada do setor, sendo fatores que aumentam a imprecisão do modelo.

Quanto à análise de otimização do sistema, não foi possível adequar todos os pontos a pressão máxima visto que aumentaria o número de VRP instaladas, gerando maiores custos de manutenção, além de que estas atenderiam trechos de rede pequenos.

As limitações encontradas na realização deste trabalho quanto à calibração em função do consumo micromedido, ressalta-se que os valores utilizados representam a média mensal do ano, sendo que esses valores podem variar dependendo da época do ano. Outro fator que pode influenciar na calibração é a avaliação de dados de um período maior, assim podendo aumentar a precisão da calibração. Por fim, as baixas médias de consumo em alguns trechos afetam diretamente a calibração do modelo, podendo ser indicativo de submedição dos hidrômetros em alguns pontos.

Desta forma, recomenda-se que sejam realizados mais estudos de campo para um melhor entendimento dessas diferenças. Sugere-se instalar macromedidor com coleta de leitura mensal, instalado no início da rede que abastece a área irregular.

Ainda, recomenda-se à autarquia de água a instalação de pontos de medição de pressão e vazão por telemetria em diversos pontos da rede para que seja possível realizar a calibração do modelo hidráulico contendo dados históricos, permitindo a calibração para um número maior de dias.

A modelagem hidráulica se mostrou uma importante aliada para identificar problemas nas redes de abastecimento, garantindo que a água flua de forma eficiente e que a pressão da água seja adequada com a norma NBR 12.218 (ABNT,2017) em todos os pontos da rede.

## REFERÊNCIAS

- ABDULSAMAD, Abdulrahman A.; ABDULRAZZAQ, Khalid Adel. **Calibration and Analysis of the Potable Water Network in the Al-Yarmouk Region Employing WaterGEMS and GIS**. Journal of Mechanical Behaviour of Materials 31.1 (2022): 298-305. Disponível em: <https://doi-org.ez314.periodicos.capes.gov.br/10.1515/jmbm-2022-0038>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- ABES. **Controle e Redução de Perdas nos Sistemas Públicos de Abastecimento de Água: posicionamento e contribuições técnicas da Abes**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - Abes, 2015. 99 p. Disponível em: [https://abes-dn.org.br/pdf/28Cbesa/Perdas\\_Abes.pdf](https://abes-dn.org.br/pdf/28Cbesa/Perdas_Abes.pdf). Acesso em: 11 abr. 2023.
- ABNT. Norma Técnica nº 12218, de 03 de maio de 2017. **Projeto de Rede de Distribuição de Água Para Abastecimento Público**. 2. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2017. 27 p.
- ALTUS SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO (São Leopoldo). **O que é um datalogger e por que você deveria utilizá-lo em sua aplicação?** 2023. Disponível em: <https://www.altus.com.br/post/397/o-que-e-um-datalogger-e-por-que-voce-deveria-utiliza-lo-em-sua-aplicacao>. Acesso em: 08 ago. 2023.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Água na Indústria: uso e coeficientes técnicos**. Brasília: ANA, 2017. 37 p. Disponível em: [http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/aceso-tematico/usos-da-agua/aguaindustria\\_usoecoefficientestecnicos.pdf](http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/aceso-tematico/usos-da-agua/aguaindustria_usoecoefficientestecnicos.pdf). Acesso em: 27 abr. 2023.
- ANDRADE SOBRINHO, Renavan; BORJA, Patrícia Campos. **Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: Um estudo dos fatores intervenientes na RMS**. Engenharia Sanitária e Ambiental, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 783-795, dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016116037>. Acesso em: 10 abr. 2023.
- ASSEMAE, 46., 2016, Jaraguá do Sul. **Calibração do Modelo Hidráulico da Barra da Lagoa – Florianópolis/SC**. Jaraguá do Sul: Assemae, 2016. 8 p. Disponível em: <https://sistema.trabalhosassemae.com.br/repositorio/2016/10/trabalhos/380/482/t482t25e10a2016.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- AZEVEDO NETTO, José Martiniano de A.; FERNÁNDEZ, Miguel Fernández Y. **Manual de hidráulica**. São Paulo: Editora Blucher, 2015. *E-book*. ISBN 9788521208891. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208891/>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- BAESSO, Robson de Souza; SOUZA, Antônio Artur de. **O Coeficiente De Determinação É Uma Medida Confiável Do Poder Explicativo De Modelos De Estimação Do Valor Intrínseco Das Ações Negociadas Na Bovespa?**. 2010. Congresso USP. Disponível em: <https://congress USP.fipecafi.org/anais/artigos102010/261.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- BENTLEY, **Guia Rápido do Usuário. Brasil**, 2017. 43 p.

BENTLEY. **Run an Extended Period Simulation (EPS)**. 2021. Disponível em: [https://communities.bentley.com/products/hydraulics\\_\\_\\_hydrology/w/hydraulics\\_and\\_hydrology\\_\\_wiki/21016/run-an-extended-period-simulation-eps](https://communities.bentley.com/products/hydraulics___hydrology/w/hydraulics_and_hydrology__wiki/21016/run-an-extended-period-simulation-eps). Acesso em: 03 out. 2023.

BEZERRA, Saulo de Tarso Marques; CHEUNG, Peter Batista. **Perdas de água: tecnologias de controle**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013.

BRASIL. Ministério das Cidades - SNSA. **Guias práticos - Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água: controle de pressões e operação de válvulas reguladoras de pressão**. Brasília: Programa Nacional Combate Ao Desperdício Água, 2007. 65 p.

BRASIL. Ministério das Cidades - SNSA. **Guias práticos - Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água: controle e redução de perdas aparentes processo comercial**. Brasília: Programa Nacional Combate Ao Desperdício Água, 2007. 139 p.

BRASIL. Ministério das Cidades - SNSA. **Guias práticos - Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água: pesquisa e combate a vazamentos não visíveis**. Brasília: Programa Nacional Combate Ao Desperdício Água, 2007. 89 p.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. **Balanco Hídrico**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/pmss/projeto-com-agua/balanco-hidrico>. Acesso em: 27 abr. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. FUNASA Fundação Nacional da Saúde. **Redução de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água**. Brasília, 2014. 176 p.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. 2019. Disponível em: [https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab/Versao\\_Conselhos\\_Resoluo\\_Alta\\_\\_Capa\\_Atualizada.pdf](https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab/Versao_Conselhos_Resoluo_Alta__Capa_Atualizada.pdf). Acesso em: 15 jun. 2023.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto: gestão técnica de água**. Gestão Técnica de Água. 2022. Disponível em: [http://antigo.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO\\_TEMATICO\\_GESTAO\\_TECNICA\\_DE\\_AGUA\\_AE\\_SNIS\\_2022.pdf](http://antigo.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_GESTAO_TECNICA_DE_AGUA_AE_SNIS_2022.pdf). Acesso em: 16 jun. 2023.

BRASIL. SNIS. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. **Painel de Regionalização dos Serviços de Saneamento Básico no Brasil**. 2023. Disponível em: <http://appsniis.mdr.gov.br/regionalizacao-hmg/web/mapa/index?id=26>. Acesso em: 10 abr. 2023.

CAXIAS DO SUL. **Lei Complementar nº 638, de 29 de dezembro de 2020**. Altera e acresce dispositivos na Lei Complementar nº 589, de 19 de Dezembro de 2019, que institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado do Município de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS, 06 jan. 2021. p. 1-8. Disponível em: <https://caxias.rs.gov.br/servicos/planejamento/plano-diretor/lc589>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CAXIAS DO SUL. Prefeitura Municipal de Caxias do Sul. Secretaria Municipal do Planejamento. **GeoCaxias**: Biblioteca de dados. 2023. Disponível em: <https://gis.caxias.rs.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=bbbac99e913d447ba0955e5f1e0fcfdf>. Acesso em: 18 mai. 2023.

CAXIAS DO SUL. Prefeitura Municipal de Caxias do Sul. Secretaria Municipal do Planejamento. **Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado - PDDI**. 2023. Disponível em: <https://gcpstorage.caxias.rs.gov.br/documents/2023/06/3ab0f672-47b6-4152-a453-935e21873d4f.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

COELHO, S.T., LOUREIRO, D., ALEGRE, H. **Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Instituto Regulador de Águas e Resíduos, 2006.

CONTERATO, Eliane; ESPARTEL, Lélis; SIMIONATO, Vinícius. **Instalações hidráulicas**. Porto Alegre: Grupo A, 2017. *E-book*. ISBN 9788595020979. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595020979/>. Acesso em: 20 abr. 2023

COSTA, Daniela Moraes da; SILVA, Jhully Laiane Souza da; BARRETO, Gilberto Caldeira; BARRETO, Monique Sandra Oliveira Dias. **Efeito da setorização no controle das pressões na rede de distribuição de água pela inserção de válvulas redutoras de pressão**. *Revista Dae*, São Paulo, v. 68, n. 226, p. 39-59, 18 set. 2020. *Revista DAE*. <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2020.066>.

CUNHA, Agne Pereira da et al. **Calibração de modelo hidráulico via algoritmos genéticos para rede de abastecimento de água**. 2014. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

DALRI, Lucas da Silveira. **Diagnóstico e Execução de Estratégias de Controle e Redução de Perdas de Água Com Uso da Modelagem Hidráulica**: estudo de caso em um DMC no município de Brusque/SC. 2020. 178 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

DIUANA, F. A.; OGAWA, S. C. C. P. **Análise Comparativa dos Modelos Hidráulicos Epanet, Water CAD e Sistema UFC para Sistemas de Abastecimento de Água**. Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Ambiental) UFRJ/ Escola Politécnica, 2015. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://www.lahc.ufc.br/md/Rede-agua-UFRJ.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2023.

FONTANA, Marcele Elisa; MORAIS, Danielle Costa. **Modelo Para Setorizar Redes De Distribuição De água Baseado Nas Características Das Unidades Consumidoras**. Associação Brasileira De Engenharia De Produção 25.1 (2015): 143-56. Disponível em: <file:///U:/TCC/Modelo%20para%20setorizar%20redes%20de%20distribui%C3%A7%C3%A3o%20de%20%C3%A1gua.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2023.

GOMES, Heber Pimentel (org.). **Sistemas de Saneamento**: Eficiência Energética. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2010. 366 p. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/irrigacao/livros/SISTEMA%20DE%20SANEAMENTO.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2023.

GONÇALVES, Elton. **Metodologias para Controle de Perdas em Sistemas de Distribuição de Água**: estudo de casos da CAESB. 1998. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1998.

HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de. **Abastecimento de Água para Consumo Humano**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora Ufmg, 2016. 870 p.

HESPANHOL, Ivanildo; MIERZWA, José Carlos; BRAGA JUNIOR, Benedito Pinto Ferreira. **Introdução à Engenharia Ambiental**: o desafio do desenvolvimento sustentável. 2. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2005. 320 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/caxias-do-sul.html>. Acesso em: 14 ago. 2023.

JESUS, Viviany Cristiny Souza de. **Implementação do método de Hardy Cross no software LibreOffice para uso pedagógico**. 2019. 65 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

JUSTINO, José Damião; NOGUEIRA, Élcio. **Estudo e análise de um sistema de distribuição de água**: aplicação do método de hardy cross utilizando a equação universal de darcy-weisbach e o método de hazen-williams. Cadernos Unifoa, Volta Redonda, v. 8, n. 22, p. 25-35, 10 ago. 2013. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/147/52>. Acesso em: 29 abr. 2023.

KUSTERKO, Sheila Karoline. **Avaliação de desempenho para apoiar a gestão de perdas em sistemas de abastecimento de água fundamentada na metodologia multicritério de apoio à decisão construtivista**. 2015. 356 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

LAMON. **DMP-01-DP – Datalogger De Pressão Com Display**. 2021. Disponível em: <https://lamon.com.br/produto/dmp-01-dp-datalogger-de-pressao-com-display/>. Acesso em: 17 mai. 2023

LOUSADA, Sérgio; SILVA, Pedro Soares D; CASTANHO, Rui Alexandre; NARANJO-GÓMEZ, José Manuel. **Modelação De Sistemas De Abastecimento De água**: O Caso De Ilha Da Madeira. Bitácora Urbano-territorial 29.2 (2019): 89-98. Disponível em: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/view/69381/pdf>. Acesso em: 17 mai. 2023.

MANZI, Daniel. **A hidráulica de todo dia no saneamento**. 1.ed. Curitiba: Appris, 2020. 193 p.

MEHTA, Darshan; WAIKHOM Sahita; YADAV, Vipin; LAKHAN, Krunal. **Simulation of Hydraulic Parameters in Water Distribution Network using EPANET**: A Case Study of Surat City. 2015. 20th International Conference on Hydraulics, Water Resources and River Engineering (HYDRO - 2015) pp. 17–19. Disponível em:

<https://www.grdjournals.com/uploads/conference/GRDCF/001/038/GRDCF001038.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2023.

MELATO, D. S. **Discussão de uma metodologia para o diagnóstico e ações para redução de perdas de água**: aplicação no sistema de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 133. 2010.

MORENO, José; QBAR, Nizar; ONOFRE, Regina Mei; SOUZA, Roseane M Garcia Lopes de. **Manual de Controle da Qualidade e Operação do Sistema de Abastecimento de Água**. São Paulo: Editora ABES, 2012. 332 p.

MOTTA, Renato Gonçalves da. **Importância da setorização adequada para combate às perdas reais de água de abastecimento público**. 2010. 176 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Cap. 2. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2010.tde-18082010-171334>. Acesso em: 06 abr. 2023.

PHILIPPI JUNIOR, Arlindo; GALVÃO JUNIOR, Alceu de Castro. **Gestão do saneamento básico**: gestão do saneamento básico. Barueri: Editora Manole, 2012. 1153 p. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788520444122>. Acesso em: 11 abr. 2023.

QUININO, C. Roberto; REIS, A. Edna; BESSEGATO, F. Lupércio. **O Coeficiente de Determinação R<sup>2</sup> como Instrumento Didático para Avaliar a Utilidade de um Modelo de Regressão Linear Múltipla**. 2011. UFMG. Disponível em: [https://www.est.ufmg.br/portal/wp-content/uploads/2023/01/RTP\\_01\\_2011.pdf](https://www.est.ufmg.br/portal/wp-content/uploads/2023/01/RTP_01_2011.pdf). Acesso em 22 nov. 2023.

RAMANA, G. Venkata; SUDHEERB Ch. V. S. S.; RAJASEKHARC B. **Network analysis of water distribution system in rural areas using EPANET**. 2015. Procedia Engineering. Elsevier Ltd, pp. 496–505. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581502545X>. Acesso em: 18 abr. 2023.

RAMINELLI, Liliane Klemann. **Hidráulica e planejamento aplicados ao saneamento**. Curitiba: Editora Intersaberes, 2021. 248 p. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/187975>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Economia de água**. São Paulo. 2022. Disponível em: <https://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=247>. Acesso em: 29 abr. 2023.

SABESP - Companhia De Saneamento Básico Do Estado De São Paulo. **NTS 0181: Dimensionamento Do Ramal Predial De Água, Cavalete E Hidrômetro – Primeira Ligação**. 5 ed. São Paulo: Sabesp, 2023. 30 p. Disponível em: <https://normastecnicas.sabesp.com.br/NormasTecnicas/Detalhe/747>. Acesso em: 19 abr. 2023.

SAMAE. **Água**. 2023. Disponível em: <https://samaecaxias.com.br/Pagina/Index/10042>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SAMAE. **Cadastro Técnico Interno**. 2023

SAMAE. **Recursos Hídricos**. 2023. Disponível em: <https://samaecaxias.com.br/Pagina/Index/10044>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SANESUL (Mato Grosso do Sul). Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul. **Setorização, modelo para controle de perdas e manter o pleno abastecimento de água**. 2020. Disponível em: <https://www.sanesul.ms.gov.br/noticias/setorizacao-modelo-para-controle-de-perdas-e-manter-o-pleno-abastecimento-de-agua>. Acesso em: 20 abr. 2023.

SALVINO, Moisés Menezes. **Modelagem Computacional Visando A Reabilitação De Redes Hidráulicas**. 2012. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. Cap. 22. Disponível em: [http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/documentos/pesquisa-lenhs/2012-tese\\_moises.pdf](http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/documentos/pesquisa-lenhs/2012-tese_moises.pdf). Acesso em: 28 abr. 2023.

SANTOS, Danielle Dionisia. **Avaliação Da Metodologia Para Controle De Perdas De Água Em Sistema De Distribuição No Recife-Pe**. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <https://docplayer.com.br/109948346-Avaliacao-da-metodologia-para-controle-de-perdas-de-agua-em-sistema-de-distribuicao-no-recife-pe.html>. Acesso em: 29 abr. 2023.

SANTOS, Danielle Dionisia; MONTENEGRO, Suzana Maria Gico Lima. Avaliação da Metodologia para redução de perdas de água no Recife-PE. **Revista Dae**, Recife, v. 62, n. 197, p. 56-70, 2014. Revista DAE. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.128>.

SIMÕES, André Luiz Andrade; SCHULZ, Harry Edmar; PORTO, Rodrigo de Melo. **Métodos Computacionais em Hidráulica**. Salvador: Edufba, 2017. 236 p. Disponível em: [https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/23994/1/M%C3%A9todosComputacionaisEmHidraulica\\_%20Sim%C3%B5es.Schulz.Porto..pdf](https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/23994/1/M%C3%A9todosComputacionaisEmHidraulica_%20Sim%C3%B5es.Schulz.Porto..pdf). Acesso em: 29 abr. 2023

SNIS. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. **Painel de Saneamento**: mapa de indicadores de água. Mapa de Indicadores de Água. 2021. Disponível em: [http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua\\_esgoto/mapa-agua](http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua_esgoto/mapa-agua). Acesso em: 20 jun. 2023

SOARES, Alexandre Kepler; CHEUNG, Peter Batista; REIS, Luisa Fernanda Ribeiro; SANDIM, Marilúcia Pereira. **Avaliação Das Perdas Físicas De Um Setor Da Rede De Abastecimento De Água De Campo Grande-MS via Modelo Inverso**. Engenharia Sanitaria E Ambiental 9.4 (2004): 312-21. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/8M7hGfD6JRGLbVGp6TbFrrP/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 18 abr. 2023

SOUZA, Bruna Duarte Alves de. **EFICIÊNCIA COMPUTACIONAL DO MÉTODO DE HARDY CROSS MODIFICADO**. 2016. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/46535/1/BRUNA%20DUARTE%20ALVES%20DE%20SOUZA%20%20EFICI%20c3%8aNCIA%20COMPUTACIONAL%20DO%20M%20c3%89TODO%20DE%20HARDY%20CROSS%20MODIFICADO.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2023

ŚWITNICKA, Karolina; SUCHORAB, Pawel; KOWALSKA, Beata. **The Optimisation of a Water Distribution System Using Bentley WaterGEMS Software**. ITM Web of Conferences 15 (2017): 3009. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171503009>. Acesso em: 17 abr. 2023.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de Água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 643p.

VENTURINI, Maria Alice Amado Gouveia. **Metodologia de análise e decisão multicriterial para a reabilitação de sistemas de abastecimento de água**. 2003. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

WALSKI, Thomas M.; CHASE, Donald V.; SAVIC, Dragan A.; GRAYMAN, Walter; BECKWITH, Stephen; KOELLE, Edmundo, **Advanced Water Distribution Modeling and Management**. 2003. *Civil and Environmental Engineering and Engineering Mechanics Faculty Publications*. 18. Disponível em: [https://ecommons.udayton.edu/cee\\_fac\\_pub/18](https://ecommons.udayton.edu/cee_fac_pub/18). Acesso em: 17 abr. 2023.