Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Urbana
Curso de Graduação em Engenharia Urbana

**Guilherme Reis Souza Lima**

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDRÁULICO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DAS MORADIAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO POR MEIO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL

Ouro Preto

2026

**Guilherme Reis Souza Lima**

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDRÁULICO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DAS MORADIAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO POR MEIO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Urbanista

Áreas de concentração: Saneamento e Planejamento Urbano

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Castro Vieira

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L732a Lima, Guilherme Reis Souza.
Avaliação do desempenho hidráulico da rede de distribuição de água das moradias da Universidade Federal de Ouro Preto por meio de modelagem computacional. [manuscrito] / Guilherme Reis Souza Lima. - 2026.
55 f.: il.: color., tab., mapa. + Desenho Técnico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Castro Vieira Vieira.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Abastecimento de água. 2. Redes de Distribuição de Água. 3. Simulação (Computadores). I. Vieira, Paulo de Castro Vieira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA

# FOLHA DE APROVAÇÃO

**Guilherme Reis Souza Lima**

**Avaliação do desempenho hidráulico da rede de distribuição de água das moradias da universidade federal de ouro preto por meio de modelagem computacional**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Urbanista

Aprovada em 29 de julho de 2026

Membros da banca

[Doutor] - Paulo de Castro Vieira - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutora] - Marina Neves Merlo - Universidade Federal de Ouro Preto
[Engenheiro] - Júlio César Barros - Universidade Federal de Ouro Preto

[Paulo de Castro Vieira], orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/10/2026

Documento assinado eletronicamente por **Paulo de Castro Vieira**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/11/2026, às 19:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **1228048** e o código CRC **8C445692**.



R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: - www.ufop.br

# AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à minha família, por não medir esforços, ao Dr. Paulo Vieira de Castro, pela orientação e suporte, à República dos Deuses, pelo incentivo, à UFOP pelo ensino gratuito de qualidade e aos meus queridos amigos da Engenharia Urbana pela parceria e motivação.

# RESUMO

A avaliação de sistemas de abastecimento de água é fundamental para a gestão eficiente e a redução de perdas operacionais. O presente trabalho teve como objetivo diagnosticar o comportamento hidráulico da rede de distribuição de água das moradias estudantis da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), propondo melhorias técnicas baseadas em modelagem computacional. A metodologia abrangeu o levantamento cadastral da infraestrutura, o georreferenciamento e a simulação de cenários (estático e dinâmico de 24 horas) utilizando o software EPANET, com verificação dos parâmetros operacionais frente às diretrizes da ABNT NBR 12218, 2017. Os resultados do cenário base indicaram conformidade para a pressão dinâmica mínima de 10 m.c.a. em toda a rede. Contudo, revelaram uma sobrepressão estática de 52,36 m.c.a. na República Alforria, ultrapassando o limite normativo de 50 m.c.a., ocasionada pelo forte desnível topográfico de 40 metros no *campus*. Adicionalmente, verificaram-se velocidades de escoamento inferiores a 0,40 m/s em ramais secundários, gerando risco de estagnação e degradação da qualidade da água. Como solução, propôs-se a instalação de duas Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) ajustadas para 35 m.c.a., que reduziram a pressão máxima do sistema para 39,00 m.c.a. e enquadraram a rede em conformidade normativa. Complementarmente, foram propostos um plano automatizado de descargas periódicas (*flushing*) para mitigar a estagnação nos ramais de extremidade e a automação do controle de nível do reservatório principal para conferir maior estabilidade piezométrica. Conclui-se que as intervenções propostas garantem a adequação normativa, a segurança sanitária e a proteção da infraestrutura, demonstrando a eficácia da modelagem hidráulica no planejamento e na Engenharia Urbana.

Palavras-chaves: Abastecimento de Água. Modelagem Hidráulica. EPANET
Engenharia Urbana. UFOP.

# ABSTRACT

The evaluation of water supply systems is fundamental for efficient management and the reduction of operational losses. This study aimed to diagnose the hydraulic behavior of the water distribution network serving the student housing at the Federal University of Ouro Preto (UFOP), proposing technical improvements based on computational modeling. The methodology included a cadastral survey of the infrastructure, georeferencing, and scenario simulation (steady-state and 24-hour dynamic) using EPANET software, verifying operational parameters against the ABNT NBR 12218 standard. The base scenario results indicated compliance for the minimum dynamic pressure of 10 m.w.c. across the entire network. However, they revealed a static overpressure of 52.36 m.w.c. at República Alforria, exceeding the 50 m.w.c. regulatory limit due to a steep 40-meter topographic head loss within the campus. Additionally, flow velocities below 0.40 m/s were observed in secondary branches, creating a risk of water stagnation and water quality degradation. As a solution, the installation of two Pressure Reducing Valves (PRVs) set at 35 m.w.c. was proposed, which successfully reduced the system's maximum pressure to 39.00 m.w.c. and brought the network into regulatory compliance. Furthermore, an automated periodic flushing plan was proposed to mitigate stagnation in dead-end branches, alongside the automation of the main reservoir's water level to provide greater piezometric stability. It is concluded that the proposed interventions ensure regulatory compliance, sanitary safety, and infrastructure protection, demonstrating the effectiveness of hydraulic modeling in planning and Urban Engineering.



Keywords: Water Supply. Hydraulic Modeling. EPANET. Urban Engineering. UFOP.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma .....32
Figura 2 - Localização da Universidade Federal de Ouro Preto.....33
Figura 3 - Adutora que abastece o reservatório principal (R9).....35
Figura 4 - tubulações de entrada e saída.....36
Figura 5 - Mapa de abastecimento de água da UFOP - Reservatório.....44
Figura 6 - Mapa de abastecimento de água da UFOP - Moradias .....44
Figura 7 - Rede de distribuição abastecida pelo Reservatório Principal (R9) localizado ao lado do prédio da Escola de Minas.....45
Figura 8 - Trechos do Sistema .....48
Figura 9 - Comportamento espacial das pressões nodais no Cenário 1 (Setorização com Dupla VRP) sob nível máximo do Reservatório R9. .....54

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese consumo-base.....47

Tabela 2 - Síntese trechos .....50

Tabela 3 - Cargas piezométricas e pressões nodais nos cenários de regime permanente e período estendido R9 .....51

Tabela 4 - Variação diária dos parâmetros hidráulicos dos trechos (Valores Máximos no Pico) .....52

Tabela 5 - Comparativo de pressões nodais no Nível Máximo do Reservatório R9 antes e depois da implantação da Dupla VRP .....54

Tabela 6 - Comparativo sintético de desempenho hidráulico da rede entre o Cenário Base e as alternativas propostas .....58

# SUMÁRIO

1 Introdução ..... 13

1.1 Justificativa ..... 14

1.2 Objetivos ..... 16

1.3 Objetivos Específicos ..... 16

2 Revisão Bibliográfica ..... 17

2.1 Introdução à gestão e avaliação de sistemas de abastecimento de água ..17

2.2 Modelagem hidráulica ..... 19

2.2.1 Modelos Dirigidos pela Demanda *versus* Pressão ..... 20

2.2.2 Calibração do Modelo ..... 20

2.3 Análise de sensibilidade e a calibração do modelo ..... 21

2.3.1 Equações dos Modelos Hidráulicos: ..... 22

2.3.2 Carga Hidráulica Disponível e Consumo de Água ..... 23

2.4 Parâmetros Hidráulicos e Normatização ..... 25

2.5 Perdas de Água e Desafios de Gestão ..... 27

2.6 Estudos de Caso e Relevância Para o Diagnóstico da Rede de Distribuição Que Atende as Moradias da UFOP ..... 28

2.7 Propostas de Intervenção e a Interface com a Engenharia Urbana ..... 30

3 MATERIAIS E MÉTODOS ..... 32

3.1 Caracterização da área de estudos ..... 33

3.1.1 Caracterização do Sistema de Abastecimento (Campus Morro do Cruzeiro)34

3.2 Levantamento e Análise Cadastral ..... 36

3.3 Coleta de Dados Hidráulicos em Campo e Curva de Demanda ..... 37

3.3.1 Análise do desempenho hidráulico ..... 38

3.4 Proposição de Melhorias e Conclusões ..... 39

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 42

4.1 LEVANTAMENTO DA REDE DE ÁGUA E DADOS CADASTRAIS ..... 42

4.2 Avaliação do desempenho da rede ..... 50

4.3 Avaliação de alternativas de operação ..... 52

4.4 Análise comparativa e considerações sobre o desempenho hidráulico ..... 58

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS ..... 60

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 62

APÊNDICE A – CADASTRO TÉCNICO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO ..... 64

apêndice b – curva de modulação horária ..... 65

apêndice c – mapas da rede ..... 66

apendice c.1 – mapa do cenário base ..... 66

apêndice c.2 – mapa do cenário pós vpr ..... 66

anexo a- mapeamento da rede ..... 67

# 1 INTRODUÇÃO

A avaliação do comportamento hidráulico em sistemas de abastecimento de água é uma etapa essencial tanto para o projeto quanto para a operação eficiente desses sistemas (SOUZA et al., 2019). Essa análise busca prever o funcionamento do sistema, examinando parâmetros como vazões nos trechos, pressões nos nós, perdas de carga e os níveis nos reservatórios, especialmente diante de modificações como incrustações, mudanças na rugosidade dos tubos, vazamentos ou rompimentos (FORMIGA E CHAUDHRY, 2008).

Devido ao crescimento populacional e à degradação ambiental, torna-se crucial que as operadoras de sistemas de abastecimento de água utilizem ferramentas que auxiliem na gestão operacional, minimizando perdas e promovendo melhorias (CORREIA, 2024). Nesse sentido, a avaliação do comportamento hidráulico pode ser desenvolvida por meio de modelagem computacional, com destaque para o programa EPANET. Este é um software de domínio público, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (GOMES, 2009), que permite a simulação estática ou dinâmica do comportamento hidráulico e da qualidade da água em redes pressurizadas de distribuição.

No contexto de áreas urbanizadas com infraestrutura, como um *campus* universitário, os sistemas próprios de abastecimento de água possuem particularidades. Em um campus, as edificações podem ter sido construídas em períodos distintos, resultando em ampliações e adaptações contínuas da rede sem um planejamento inicial unificado. Essa falta planejamento pode levar a problemas de falta ou excesso de pressão em trechos da rede. Mesmo sendo de menor porte e complexidade que os sistemas públicos, que enfrentam desafios como o crescimento populacional desordenado e a deterioração de infraestruturas antigas (BARROSO, 2005, *apud* SILVA et al., 2019), os sistemas próprios ainda demandam rigorosos estudos hidráulicos para uma gestão eficaz do recurso hídrico (VALENTE, 2018). A ausência de documentação completa e atualizada da rede dificulta a manutenção, o diagnóstico de problemas e a otimização operacional.

A modelagem hidráulica computacional tem se consolidado como uma ferramenta indispensável para o diagnóstico e a gestão de redes de distribuição. Softwares como

o EPANET, que permitem simular o comportamento hidráulico da rede sob diferentes condições operacionais, auxiliam na identificação de deficiências, como zonas de baixa pressão e perdas de carga elevadas (CARVALHO, 2022; SOUZA et al., 2019). Ao integrar a modelagem com dados de campo e informações georreferenciadas (GIS), é possível criar uma representação fiel do sistema, que serve como base para um diagnóstico preciso e para a proposição de melhorias (SOUZA et al., 2019; CARVALHO, 2022). Nesse sentido, o presente trabalho utiliza a modelagem computacional como metodologia central para avaliar e diagnosticar o comportamento hidráulico da rede de distribuição que atende as moradias estudantis da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). A partir da simulação de cenários reais de consumo e pressões, busca-se identificar as vulnerabilidades do sistema atual, fornecendo subsídios técnicos precisos para a otimização da infraestrutura hídrica do campus.

## 1.1 Justificativa

A gestão eficiente dos sistemas de abastecimento de água impõe-se como um desafio central na Engenharia Urbana contemporânea, agravado pelo cenário de escassez hídrica e pela crescente demanda nos centros urbanos. A ineficiência desses sistemas é frequentemente evidenciada pelos elevados índices de perdas na distribuição, que não apenas representam um desperdício de recursos naturais e financeiros, mas também comprometem a universalização do saneamento (TSUTIYA, 2006; SNIS, 2022). No contexto brasileiro, este cenário é preocupante, sendo fundamental que as operadoras busquem a redução de perdas reais e aparentes para garantir a sustentabilidade dos serviços (ABES, 2015). Indicadores recentes apontam que as perdas de água na distribuição alcançaram a média de 40,1% em 2020 (SNIS, 2020 apud CORREIA, 2024), evidenciando a urgência de intervenções técnicas para a recuperação e otimização das redes existentes.

Além das perdas físicas, a operação de sistemas de abastecimento enfrenta problemas recorrentes como a intermitência no fornecimento e a inadequação das pressões na rede. Conforme Tsutiya (2006), o controle das pressões é essencial, pois pressões excessivas podem causar rompimentos nas tubulações e aumentar o volume de água perdido através de vazamentos, enquanto pressões insuficientes resultam em desabastecimento e insatisfação dos usuários. A ausência de um

cadastro técnico atualizado e preciso agrava essa situação, dificultando a identificação de anomalias e a tomada de decisões assertivas por parte dos gestores.

Nesse contexto, a aplicação de modelos de simulação hidráulica computacional, como o software EPANET, apresenta-se como uma ferramenta indispensável para o diagnóstico e o gerenciamento de redes de distribuição. A modelagem permite simular o comportamento hidráulico do sistema sob diversas condições operacionais, possibilitando a identificação de gargalos e a previsão de cenários de demanda (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008). A utilização de modelos dirigidos pela pressão (MHDPres), em detrimento dos modelos tradicionais dirigidos pela demanda, oferece uma representação mais realista do sistema, especialmente em condições de déficit de pressão, permitindo avaliar a efetiva disponibilidade de água aos usuários (SOUZA et al., 2019).

A escolha do campus da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) como objeto de estudo justifica-se não apenas pela necessidade de aprimoramento do seu sistema de abastecimento, mas também pelas características singulares da área, marcada por uma topografia acidentada que impõe desafios adicionais ao controle das pressões, exigindo conformidade rigorosa com as normas técnicas, como a NBR 12.218 (ABNT, 2017). A realização deste diagnóstico técnico-científico, fundamentado em dados cadastrais atualizados e em monitoramento de campo, acredita-se que fornecerá subsídios essenciais para a administração da universidade. Os resultados permitirão direcionar investimentos de forma mais eficiente, seja na reabilitação de infraestruturas, na instalação de dispositivos de controle ou na implementação de programas de uso racional da água, contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental da instituição além da melhora na qualidade de vida dos estudantes que dependem do SAA do campus.

Sob a ótica do desenvolvimento acadêmico e profissional, este trabalho justifica-se por sua estreita convergência com as atribuições nucleares da Engenharia Urbana. O diagnóstico e a modelagem de sistemas de abastecimento em um campus universitário materializam a aplicação prática de conceitos multidisciplinares essenciais ao Engenheiro Urbanista, tais como o planejamento de infraestruturas resilientes, a gestão integrada de serviços de saneamento básico e a otimização de sistemas públicos existentes. Assim, a condução desta pesquisa proporciona o

amadurecimento técnico necessário para enfrentar os desafios de eficiência hidroenergética e gestão de perdas que caracterizam as redes de distribuição nos cenários urbanos contemporâneos.

## 1.2 Objetivos

### Objetivo geral

Realizar o diagnóstico do desempenho hidráulico da rede de distribuição de água que abastece as moradias da Universidade Federal de Ouro Preto, por meio de modelagem hidráulica computacional, utilizando o EPANET para simulações em regime permanente e em período estendido, visando avaliar sua conformidade com os critérios técnicos e normativos.

## 1.3 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

**i.** Realizar o levantamento cadastral e georreferenciado da rede de distribuição de água das moradias da UFOP, identificando sua topologia, características físicas das tubulações, dispositivos hidráulicos, cotas altimétricas, reservatórios e pontos de consumo, de forma a subsidiar a modelagem hidráulica.

**ii.** Analisar o desempenho hidráulico da rede por meio de modelagem computacional no software EPANET, utilizando simulações em regime permanente e em período estendido, analisando os parâmetros de pressão, vazão, velocidade do escoamento, perdas de carga, níveis dos reservatórios e atendimento as demandas de consumo, em conformidade com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 12218.

**iii.** Propor e avaliar alternativas de melhorias para sistema de abastecimento de água, por meio da simulação de cenários operacionais e estruturais, visando à adequação dos parâmetros hidráulicos, à melhoria do desempenho operacional, à redução de perdas e ao aumento da confiabilidade do abastecimento das moradias da UFOP.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 Introdução à gestão e avaliação de sistemas de abastecimento de água

A garantia do acesso à água potável em quantidade e qualidade adequadas é um pilar fundamental para a saúde pública e para o desenvolvimento sustentável em qualquer localidade. Em ambientes urbanos, a eficiência dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) é frequentemente desafiada pelo crescimento populacional, que sobrecarrega as infraestruturas existentes e demanda investimentos estratégicos para sua ampliação e melhoria. No Brasil, a gestão desses sistemas é complexa, marcada por desigualdades na distribuição de recursos hídricos e por uma infraestrutura que muitas vezes enfrenta deficiências operacionais e falta de documentação (TSUTIYA, 2006).

De acordo com Souza (2019), a ineficiência na gestão dos SAA se manifesta em problemas como a intermitência no abastecimento, a falta de pressão adequada na rede e, principalmente, as elevadas perdas de água. No contexto brasileiro, as perdas de água, que atingiram uma média de 40,1% em 2020, representam um dos maiores entraves para a universalização do saneamento e geram perdas econômicas significativas (CARVALHO, 2022). A deficiência de um cadastro técnico preciso e a falta de mapeamento atualizado da rede agravam o problema, dificultando a identificação de vazamentos, a manutenção preventiva e a tomada de decisões estratégicas.

A disponibilidade de água em quantidade suficiente e com qualidade adequada é um pilar fundamental para a proteção da saúde pública e para o desenvolvimento econômico de qualquer localidade. O Sistema de Abastecimento de Água (SAA) pode ser definido como o conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados ao abastecimento de água potável de uma comunidade para fins de consumo doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros usos (TSUTIYA, 2006).

Estes sistemas são compostos por diversas unidades funcionais que operam de forma integrada: manancial, captação, adução, tratamento, reservação, redes de distribuição e ramais prediais. O objetivo primordial é fornecer água de forma contínua, com pressão adequada e qualidade compatível com os padrões de potabilidade

vigentes (AZEVEDO NETTO et al., 1998). No Brasil, as diretrizes nacionais para o saneamento básico, estabelecidas pela Lei nº 11.445/2007, reforçam a necessidade de universalização e eficiência na prestação desses serviços.

Apesar da abundância de recursos hídricos em diversas regiões do país, a gestão dos sistemas de abastecimento enfrenta desafios significativos. A ineficiência operacional é frequentemente evidenciada por elevados índices de perdas de água, que englobam tanto as perdas reais (vazamentos físicos na rede) quanto as aparentes (erros de medição e fraudes). Segundo a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2015), o controle dessas perdas é essencial para a sustentabilidade das operadoras, pois o desperdício de água tratada implica diretamente no aumento dos custos de produção, energia elétrica e produtos químicos, além de reduzir a oferta disponível para a população.

Conforme destaca a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2015), a ausência de um cadastro atualizado é um dos principais entraves para a gestão eficiente de perdas e para a operação otimizada de sistemas de abastecimento, pois sem o conhecimento preciso da localização das tubulações, diâmetros e materiais, qualquer tentativa de modelagem hidráulica torna-se imprecisa. A deterioração da infraestrutura existente, muitas vezes instalada há décadas sem a devida manutenção preventiva, agrava esse cenário. Em muitas cidades e instituições, como *campus* universitários, os sistemas de distribuição operam com cadastros técnicos desatualizados ou inexistentes, o que dificulta a localização de tubulações e componentes para manutenção. A engenharia de operação sem dados precisos e confiáveis compromete a tomada de decisão, tornando o diagnóstico do sistema uma etapa indispensável para qualquer plano de melhoria (ABES, 2015).

Nesse contexto, a avaliação de desempenho hidráulico por meio de ferramentas de modelagem computacional surge como uma solução técnica robusta. A utilização de simuladores permite não apenas diagnosticar as condições atuais de pressão e vazão na rede, mas também prever o impacto de futuras intervenções, como a setorização da rede e o controle de pressões, visando a otimização do abastecimento e a redução de perdas (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008).

## 2.2 Modelagem hidráulica

A avaliação da eficiência hidráulica dos sistemas de abastecimento de água é amplamente aprimorada pela utilização de técnicas de modelagem computacional. As ferramentas de análise hidráulica são essenciais tanto na fase de projeto quanto na operação dos sistemas, pois permitem prever o comportamento da rede sob diversas condições operacionais, auxiliando na tomada de decisão, no dimensionamento de componentes e na identificação de anomalias operacionais (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008).

O problema hidráulico fundamental consiste na determinação das vazões nos trechos e das pressões (ou cargas hidráulicas) nos nós, a partir da resolução simultânea das equações de conservação de massa e de conservação de energia (Bernoulli) (TSUTIYA, 2006; FORMIGA; CHAUDHRY, 2008). Para a resolução destes sistemas de equações não lineares, softwares de simulação utilizam métodos numéricos iterativos, sendo o Método do Gradiente (Todini e Pilati, 1987) um dos mais eficientes e robustos, amplamente empregado em simuladores comerciais e acadêmicos (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008).

Nesse cenário, o EPANET destaca-se como uma ferramenta de simulação de domínio público, desenvolvida pela *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA). Sua alta confiabilidade e capacidade de realizar simulações de período estendido (dinâmicas) do comportamento hidráulico e da qualidade da água tornaram-no um padrão mundial para a modelagem de redes pressurizadas (CORREIA, 2024). O programa permite visualizar o comportamento das pressões, vazões, níveis de reservatórios e concentração de substâncias químicas ao longo do tempo, facilitando o diagnóstico de problemas como zonas de estagnação ou velocidades excessivas.

A integração da modelagem hidráulica com Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como o software QGIS, potencializa a precisão do diagnóstico. O uso de tecnologia GIS permite a inserção de dados topológicos e cadastrais georreferenciados, criando um modelo digital fiel à realidade física do sistema, fundamental para a análise espacial das pressões e das demandas (CORREIA, 2024).

### 2.2.1 Modelos Dirigidos pela Demanda *versus* Pressão

Os modelos de simulação hidráulica tradicionais, conhecidos como Modelos Hidráulicos Dirigidos pela Demanda (MHDDem), operam sob a premissa de que as demandas nos nós são valores fixos e devem ser integralmente atendidas, independentemente da pressão disponível na rede. No entanto, essa suposição constitui uma limitação significativa em cenários de operação com déficit de pressão ou vazamentos, onde a vazão fornecida é fisicamente dependente da carga hidráulica disponível (SOUZA et al., 2019).

Para superar essa limitação e obter diagnósticos mais realistas, a literatura aponta para a utilização de Modelos Hidráulicos Dirigidos pela Pressão (MHDPres). Estes modelos incorporam equações que relacionam a vazão consumida (e a vazão perdida por vazamentos) à pressão no nó, permitindo simular com maior precisão o comportamento da rede em condições de intermitência, falhas de bombeamento ou rompimentos (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008). Souza et al. (2019) demonstraram que, em redes com deficiência de pressão, os modelos tradicionais podem superestimar o atendimento da demanda, ocultando déficits de abastecimento que os modelos dirigidos pela pressão conseguem revelar.

### 2.2.2 Calibração do Modelo

Para que as simulações representem fielmente o sistema real, a calibração do modelo é uma etapa imprescindível. Este processo consiste no ajuste dos parâmetros de entrada do modelo — principalmente os coeficientes de rugosidade das tubulações e os padrões de consumo — de modo que os resultados simulados (pressão e vazão) apresentem uma concordância aceitável com os dados medidos em campo (CORREIA, 2024).

Em estudos de sistemas de abastecimento de *campus* universitários, a calibração é particularmente desafiadora devido à variabilidade das demandas. Silva et al. (2019) ressaltam a importância do monitoramento de vazão e nível de reservatórios para caracterizar corretamente o perfil de consumo das edificações e validar o modelo hidráulico, permitindo que este seja utilizado como ferramenta efetiva de gestão e suporte a planos de uso racional da água.

## 2.3 Análise de sensibilidade e a calibração do modelo

A calibração de modelos hidráulicos é uma etapa imprescindível que visa ajustar os parâmetros de entrada do software para que os resultados da simulação correspondam, com um nível aceitável de precisão, aos dados observados em campo. Sem esse processo, o modelo torna-se apenas uma representação teórica que pode divergir significativamente da realidade operacional do sistema (CORREIA, 2024).

O processo de calibração é frequentemente complexo devido às incertezas associadas aos dados cadastrais e operacionais, como o diâmetro real interno das tubulações (que pode ser reduzido por incrustações), a rugosidade das paredes dos tubos e as variações no padrão de consumo ao longo do dia. A calibração pode ser entendida como um problema inverso: conhecendo-se as variáveis de estado do sistema (pressões e vazões medidas em campo), busca-se determinar os parâmetros físicos desconhecidos, como os coeficientes de rugosidade e as demandas nodais reais (SOARES, 2003).

A validação do modelo exige a comparação entre os valores simulados e os valores medidos. Em redes antigas ou com cadastro deficiente, é comum encontrar discrepâncias causadas por vazamentos não visíveis ou registros fechados inadvertidamente. Autores como Formiga e Chaudhry (2008) destacam que a incorporação de modelos de vazamento e demanda dirigida pela pressão (DDP) na formulação matemática é essencial para simular de modo mais realista as condições do sistema, permitindo identificar onde a rede física difere do projeto original.

Nesse contexto, a Análise de Sensibilidade atua como uma ferramenta metodológica auxiliar. Ela consiste em variar sistematicamente os parâmetros de entrada do modelo (como o coeficiente de rugosidade ou a demanda base) para observar o impacto dessas alterações nos resultados de pressão e vazão. Essa análise permite identificar quais parâmetros exercem maior influência sobre o comportamento hidráulico da rede, direcionando os esforços de coleta de dados em campo para os elementos mais críticos e reduzindo as incertezas do diagnóstico final (SOARES, 2003; CORREIA, 2024).

Embora a análise de sensibilidade seja recomendada na literatura para avaliação das incertezas dos modelos hidráulicos, ela não constitui o objeto dessa pesquisa.

### 2.3.1 Equações dos Modelos Hidráulicos:

Os modelos de simulação hidráulica são ferramentas essenciais nos estudos modernos de projeto e operação dos sistemas de abastecimento, permitindo avaliar diferentes cenários de funcionamento e auxiliar no processo de tomada de decisão (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008). A análise hidráulica de redes de distribuição de água busca prever o comportamento do sistema, como vazões e perdas de carga nos trechos, e pressões e cargas hidráulicas nos nós (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008; SOUZA et al., 2019). Para isso, são utilizadas equações fundamentais da hidráulica:
Equação da Continuidade (Conservação da Massa): Os modelos de simulação hidráulica avaliam as equações de conservação de massa e de energia (SOUZA et al., 2019). Esta equação garante que a soma algébrica das vazões em cada nó da rede deve ser nula, em condição de equilíbrio (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008).

$$Q = A.v = constante \quad (1)$$

Onde:
Q é a vazão volumétrica (m³/s).
A é a área da seção transversal do escoamento (m²).
v é a velocidade média do fluido na seção (m/s).
Equação da Conservação da Energia (Equação de Bernoulli): Igualmente fundamental, esta equação relaciona a carga de posição, carga de pressão e carga cinética em duas seções transversais do escoamento, considerando a perda de carga entre elas (SOUZA et al., 2019). A perda de carga entre dois nós,

$$\frac{P_1}{y} + \frac{v_1^2}{2g} + z = \frac{P_2}{y} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_{f1=2} \quad (2)$$

Onde:
P¹ e P² são as pressões em dois pontos distintos da tubulação (em N/m² ou Pa).
V¹ e v² são as velocidades médias do escoamento nos pontos 1 e 2 (em m/s).
Z¹ e z² são as cotas de energia potencial nos pontos 1 e 2, medidas a partir de um plano horizontal de referência (em metros).
γ é o peso específico do fluido (em N/m³).
g é a aceleração da gravidade (em m/s²).

$H_{f1=2}$ é a perda de carga total entre os pontos 1 e 2 (em metros). A perda de carga é dividida em perda de carga contínua (ou distribuída) e perda de carga localizada.
Relação Perda de Carga vs. Vazão: Descreve a energia dissipada no escoamento devido a atritos. O cálculo da perda de carga distribuída deve ser feito preferencialmente pela fórmula universal, considerando o efeito do envelhecimento do material das tubulações da rede (ABNT, 2017).

$$hf = f.\frac{L}{D}.\frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Onde:

hf é a perda de carga distribuída.
f é o fator de atrito, um coeficiente adimensional que depende do tipo de regime de escoamento (laminar ou turbulento) e da rugosidade da tubulação.
L é o comprimento da tubulação.
D é o diâmetro da tubulação.
V é a velocidade média do escoamento.
g é a aceleração da gravidade.
Essas equações são resolvidas de forma simultânea por métodos numéricos, como o Método Gradiente (MG), que se mostra o mais robusto por trabalhar diretamente com carga hidráulica e vazão, estando presente na maior parte dos softwares disponíveis no mercado (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008). O dimensionamento de circuitos fechados e a análise do funcionamento global da rede devem ser realizados por métodos de cálculo iterativos, que garantam resíduos máximos de vazão e de carga piezométrica de 0,1 L/s e 0,5 kPa, respectivamente (ABNT, 2017).

### 2.3.2 Carga Hidráulica Disponível e Consumo de Água

A análise hidráulica de um sistema de abastecimento depende fundamentalmente da compreensão da energia disponível e da demanda de água ao longo do tempo. A carga hidráulica (ou carga piezométrica) é um parâmetro crucial que representa a energia disponível no sistema em um determinado ponto, influenciando diretamente a vazão e a pressão da água (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008).

Os reservatórios desempenham um papel central na manutenção dessa carga, sendo destinados a regularizar as variações entre as vazões de adução e distribuição, garantir a segurança do abastecimento, reservar água para combate a incêndios e regularizar as pressões na rede (TSUTIYA, 2006). Eles podem ser de nível fixo ou variável, sendo que os de nível variável exigem informações detalhadas para a simulação, como cota de fundo, diâmetro e alturas de água mínima, máxima e inicial. A NBR 12.218:2017 estabelece os limites normativos para as pressões na rede, definindo a pressão estática máxima de 500 kPa (50 mca) e a pressão dinâmica mínima de 100 kPa (10 mca) (ABNT, 2017). Pressões elevadas, causadas, por exemplo, por grandes diferenças de cota entre o reservatório e os pontos de consumo, exigem intervenções técnicas para evitar danos à infraestrutura.

As estações elevatórias (bombeamento) são responsáveis por adicionar energia ao sistema, elevando a carga hidráulica da rede quando a gravidade não é suficiente. O aumento da capacidade de adução pode ser realizado pela substituição dos conjuntos elevatórios, troca de rotores das bombas ou instalação de *boosters* (TSUTIYA, 2006). A utilização de inversores de frequência permite controlar a pressão na rede em tempo real, ajustando a velocidade de rotação da bomba com base em medições nos pontos mais desfavoráveis, mantendo a pressão dentro de valores pré-estabelecidos e otimizando o consumo energético.

A análise do funcionamento da rede deve considerar tanto as condições estáticas quanto as dinâmicas. O regime dinâmico refere-se ao estudo do comportamento das pressões e vazões ao longo do tempo, geralmente em um período de 24 horas, capturando as variações de consumo. Fatores como incrustações, envelhecimento dos tubos e vazamentos afetam significativamente o comportamento dinâmico, sendo a modelagem hidráulica uma ferramenta essencial para simular essas condições e identificar pontos críticos (SOUZA et al., 2019).

O planejamento e o gerenciamento do sistema dependem também da previsão correta do consumo de água, que influencia o dimensionamento de todas as unidades. A Curva de Consumo Diário representa a variação da demanda ao longo de 24 horas, sendo essencial para entender os picos e vales de consumo que impactam as pressões na rede. A parametrização do consumo é feita através de coeficientes (K1 para o dia de maior consumo e K2 para a hora de maior consumo) que ajustam a

vazão média. A NBR 12.211 recomenda que os valores de consumo médio sejam baseados em dados confiáveis de um período mínimo de um ano (ABNT, 2017). Na ausência de dados locais específicos, é comum utilizar coeficientes de redes semelhantes ou dados históricos (TSUTIYA, 2006; LINHARES; ROCHA, 2024).

O consumo diário ($Q_{diário}$) e o consum-base contínuo lançado no EPANET ($Q_{nó}$, em L/s) foram obtidos através das Equações 4 e 5:

$$Q_{diário} = P.q \tag{4}$$

$$Q_{nó} = \frac{P.q}{86.400} \tag{5}$$

Onde:

P = População fixa ou flutuante equivalente (hab ou usuários/dia);

q = Consumo *per capita* específico (200L/hab.dia para moradias e 50L/ usuário.dia para demais edificações;

86.400 = Fator de conversão de segundos em um período de 24 horas.

A obtenção de dados reais de consumo e vazamento é um desafio recorrente, muitas vezes exigindo o recurso a estimativas. O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNISA) aponta lacunas importantes nas informações, como a idade dos hidrômetros e a ocorrência de intermitências. Nesse contexto, a Análise de Sensibilidade surge como uma ferramenta metodológica fundamental, permitindo avaliar como as incertezas nos parâmetros de entrada (como rugosidade e consumo) afetam os resultados da simulação (pressão e vazão). Ao identificar os parâmetros mais influentes, a análise direciona a pesquisa de campo para a coleta de dados onde é necessária maior precisão, sendo especialmente relevante para a calibração de modelos em redes complexas (SOARES, 2003; FORMIGA; CHAUDHRY, 2008).

## 2.4 Parâmetros Hidráulicos e Normatização

A análise do comportamento hidráulico de uma rede de distribuição de água fundamenta-se na avaliação criteriosa de parâmetros físicos como pressão, vazão, velocidade e perda de carga, os quais devem obedecer a limites preestabelecidos por normas técnicas para garantir a eficiência e a segurança do abastecimento (SCHERER et al., 2021; CORREIA, 2024). Essa avaliação é potencializada pela

modelagem computacional, que permite simular o funcionamento da rede resolvendo as equações fundamentais da hidráulica: a conservação de massa (continuidade) nos nós e a conservação de energia (Bernoulli) nos trechos (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008; TSUTIYA, 2006).

No Brasil, a ABNT NBR 12.218:2017 é a norma que fixa os requisitos para o projeto de redes de distribuição de água para abastecimento público. Um dos parâmetros mais críticos estabelecidos por esta norma é a pressão. A norma recomenda que a pressão estática máxima nas tubulações não ultrapasse 500 kPa (equivalente a 50 mca) e que a pressão dinâmica mínima disponível em qualquer ponto da rede não seja inferior a 100 kPa (10 mca) (ABNT, 2017).

O controle desses limites é vital: pressões inferiores ao mínimo normativo podem resultar em desabastecimento, intermitência e entrada de contaminantes na rede por sucção, enquanto pressões excessivas (superiores a 500 kPa) aumentam exponencialmente o risco de rompimentos, vazamentos e o consumo energético desnecessário (TSUTIYA, 2006; SOUZA et al., 2019). Em áreas com topografia acidentada, onde a pressão estática tende a ser elevada nas cotas mais baixas, recomenda-se o uso de Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) para a setorização e controle (CORREIA, 2024).

Outro parâmetro essencial é a velocidade do escoamento. A NBR 12.218 recomenda que velocidades excessivamente baixas (inferiores a 0,40 m/s) sejam evitadas para impedir a deposição de sedimentos nas tubulações e garantir a renovação da água. Por outro lado, velocidades muito altas devem ser limitadas (geralmente até 3,0 m/s) para evitar perdas de carga excessivas e prevenir danos causados por golpes de aríete (transientes hidráulicos) (TSUTIYA, 2006; ABNT, 2017).

A perda de carga, que representa a dissipação de energia do fluido devido ao atrito com as paredes da tubulação e à turbulência nos acessórios, também deve ser monitorada. A NBR 12.218 sugere que o cálculo da perda de carga distribuída seja realizado preferencialmente pela fórmula Universal (Darcy-Weisbach), que considera o efeito do envelhecimento dos materiais e a viscosidade do fluido, embora a fórmula de Hazen-Williams ainda seja amplamente utilizada para água em temperatura ambiente (ABNT, 2017; AZEVEDO NETTO et al., 1998). O controle da perda de carga unitária (recomendando-se valores abaixo de 10 m/km) é fundamental para garantir a

eficiência energética do sistema de bombeamento e a manutenção das pressões dinâmicas (CORREIA, 2024).

Além da NBR 12.218, o projeto e a avaliação de sistemas de abastecimento devem observar outras normas complementares da ABNT, tais como a NBR 12.211, 1992 (Estudos de concepção), NBR 12.214, 2025 (Sistemas de bombeamento), NBR 12.215, 1 (Adutoras) e NBR 12.217, 2017 (Reservatórios de distribuição), compondo um arcabouço técnico que visa assegurar a qualidade e a confiabilidade do abastecimento público (TSUTIYA, 2006).

## 2.5 Perdas de Água e Desafios de Gestão

O controle e a redução de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água são temas de suma importância para a gestão operacional e a sustentabilidade econômico-financeira das prestadoras de serviço. As perdas de água constituem um problema global que impacta diretamente a eficiência energética e a conservação dos recursos hídricos (ABES, 2015). No cenário brasileiro, este desafio é amplificado por índices elevados: segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o índice de perdas na distribuição atingiu a média de 40,1% em 2020, o que representa um entrave significativo para a universalização do saneamento (LINHARES; ROCHA, 2024).

As perdas são tradicionalmente classificadas em duas categorias principais: perdas reais (ou físicas) e perdas aparentes (ou comerciais). As perdas reais correspondem aos volumes de água que não chegam ao consumidor final, perdidos através de vazamentos nas adutoras, redes de distribuição, ramais prediais e extravasamentos em reservatórios. Já as perdas aparentes referem-se aos volumes que são consumidos, mas não contabilizados financeiramente pela operadora, decorrentes de submedição dos hidrômetros, fraudes, ligações clandestinas e falhas no cadastro comercial (TSUTIYA, 2006; ABES, 2015).

A deterioração da infraestrutura física, associada à falta de manutenção preventiva, é uma das principais causas das perdas reais. Em redes antigas, o envelhecimento dos materiais e as juntas danificadas aumentam a vulnerabilidade a vazamentos. Além disso, a operação do sistema com pressões elevadas é um fator crítico: existe uma

correlação física direta onde pressões mais altas resultam em maiores taxas de vazamento em orifícios e fissuras nas tubulações (TSUTIYA, 2006).

Um dos maiores desafios para a gestão eficiente e o combate às perdas é a ausência de um cadastro técnico preciso e atualizado (CORREIA, 2024). A Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES) destaca que a engenharia de operação sem dados e informações confiáveis é imprecisa, sendo o diagnóstico baseado no cadastro técnico a primeira fase indispensável para qualquer programa de redução de perdas (ABES, 2015). Em muitos municípios e *campi* universitários, as redes foram expandidas sem o devido registro, resultando em "redes invisíveis" de difícil manutenção.

Nesse contexto, a modelagem hidráulica emerge como uma ferramenta de gestão essencial. Ao simular o comportamento da rede, é possível identificar áreas com pressões excessivas que poderiam se beneficiar da instalação de Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) ou da setorização, estratégias consagradas para a redução de perdas reais (LINHARES; ROCHA, 2024). A gestão da pressão, subsidiada pela modelagem, permite reduzir a frequência de novos vazamentos e o volume perdido nos vazamentos existentes, otimizando a operação do sistema.

## 2.6 Estudos de Caso e Relevância Para o Diagnóstico da Rede de Distribuição Que Atende as Moradias da UFOP

A revisão da literatura técnica recente demonstra que a aplicação da modelagem hidráulica para o diagnóstico de sistemas de abastecimento é uma prática consolidada e eficaz, tanto em redes municipais quanto em sistemas privados, como *campus* universitários. A análise de estudos de caso análogos fornece subsídios metodológicos essenciais para a compreensão dos desafios esperados na rede das moradias da UFOP.

No contexto de instituições de ensino, Silva, Silva e Rodrigues (2019) realizaram a simulação hidráulica do setor da Pró-Reitoria da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). O estudo evidenciou que a ausência de macromedição e de cadastro atualizado dificultava a gestão do consumo. Através da modelagem, foi possível identificar grandes consumidores específicos — como a Faculdade de Odontologia, responsável por 26% da demanda do setor — e propor ações de uso racional. Essa

experiência reforça a necessidade de um levantamento cadastral minucioso na UFOP, onde o perfil de consumo das moradias estudantis pode apresentar variações atípicas em relação a bairros residenciais convencionais.

A experiência da Universidade de Caxias do Sul (UCS), documentada por Carvalho (2022), é particularmente relevante para o presente trabalho. O estudo demonstrou como um sistema universitário, expandido em diversas etapas sem um planejamento unificado, tende a apresentar desequilíbrios hidráulicos. Naquele caso, o alto desnível topográfico entre o reservatório e os pontos de consumo resultava em pressões excessivas, exigindo a reconfiguração de Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs). Dada a topografia acidentada de Ouro Preto, antecipa-se que o diagnóstico da UFOP poderá revelar desafios semelhantes de controle de pressão.

Em escala municipal, o trabalho de Scherer et al. (2021) no sistema de Alter do Chão (PA) utilizou o EPANET para simulações em regime estático e dinâmico. Os autores constataram que os pontos críticos de baixa pressão estavam diretamente correlacionados com as cotas mais elevadas do terreno e com o subdimensionamento de trechos específicos. Similarmente, Correia (2024), ao estudar o sistema de Piaçabuçu (AL), demonstrou que a integração entre ferramentas de geoprocessamento (GIS) e modelagem hidráulica é fundamental para espacializar essas não conformidades e planejar a setorização da rede.

A importância da escolha correta do método de simulação é destacada por Souza et al. (2019). Ao aplicarem um modelo de simulação hidráulica dirigido pela pressão (MHDPres) em um sistema de distribuição, os autores identificaram uma discrepância de 26,53% na vazão total simulada em comparação com o modelo tradicional dirigido pela demanda (MHDDem). Isso comprova que, em sistemas sujeitos à intermitência ou déficit de pressão, o uso de modelos convencionais pode mascarar a realidade, superestimando o atendimento da demanda.

Por fim, Linhares e Rocha (2024), na modelagem do sistema de Santa Quitéria (CE), evidenciaram como a simulação permite testar soluções de engenharia sem a necessidade de intervenções físicas imediatas. O estudo permitiu verificar que a simples alteração de diâmetros em trechos estratégicos seria suficiente para adequar as pressões aos limites da NBR 12.218, sem a necessidade de grandes obras de ampliação.

## 2.7 Propostas de Intervenção e a Interface com a Engenharia Urbana

Os resultados obtidos através do diagnóstico hidráulico e da modelagem computacional constituem a base fundamental para a formulação de propostas de intervenção técnica e operacional. Na Engenharia Urbana, a tomada de decisão deve ser subsidiada por dados precisos que justifiquem os investimentos públicos e garantam a eficiência dos serviços prestados (CORREIA, 2024). A simulação de cenários no software EPANET permite antecipar o impacto das alterações propostas — como a setorização da rede ou a substituição de tubulações — antes de sua execução física, minimizando riscos e custos (CARVALHO, 2022).

As intervenções em sistemas de abastecimento visam, primordialmente, a adequação dos parâmetros hidráulicos às normas técnicas e a redução de perdas. Entre as soluções mais comuns para o controle de pressões excessivas — frequentes em áreas de topografia acidentada como Ouro Preto — destaca-se a instalação de Válvulas Redutoras de Pressão (VRP). Estes dispositivos atuam dissipando a energia excedente do fluxo, mantendo a pressão a jusante em níveis seguros para a infraestrutura e para os ramais prediais, prevenindo rompimentos e reduzindo o volume perdido em vazamentos (TSUTIYA, 2006).

No que tange à eficiência energética, a otimização das estações elevatórias é uma intervenção crítica. O uso de inversores de frequência e a automação do acionamento das bombas, baseada em níveis de reservatórios ou pressões em pontos críticos, permitem ajustar a operação à demanda real do sistema, evitando o desperdício de energia (TSUTIYA, 2006). Além disso, a substituição de trechos de tubulação com diâmetros subdimensionados ou com alto grau de incrustação é necessária para reduzir as perdas de carga e garantir as pressões dinâmicas mínimas exigidas por norma (CORREIA, 2024).

A interface com a Engenharia Urbana e o Planejamento Urbano é evidente na necessidade de alinhar as intervenções no sistema de abastecimento com as diretrizes de desenvolvimento da cidade ou do campus. A gestão da infraestrutura de saneamento não pode ser dissociada do ordenamento territorial. Santos Junior e Montandon (2011) destacam que o planejamento urbano deve integrar as políticas setoriais, como saneamento e habitação, para garantir o acesso universal aos

serviços e a sustentabilidade ambiental. Dessa forma, as propostas de intervenção na rede da UFOP não devem ser vistas apenas como obras hidráulicas isoladas, mas como parte de um plano diretor de infraestrutura que visa a gestão eficiente dos ativos e a qualidade de vida da comunidade acadêmica.

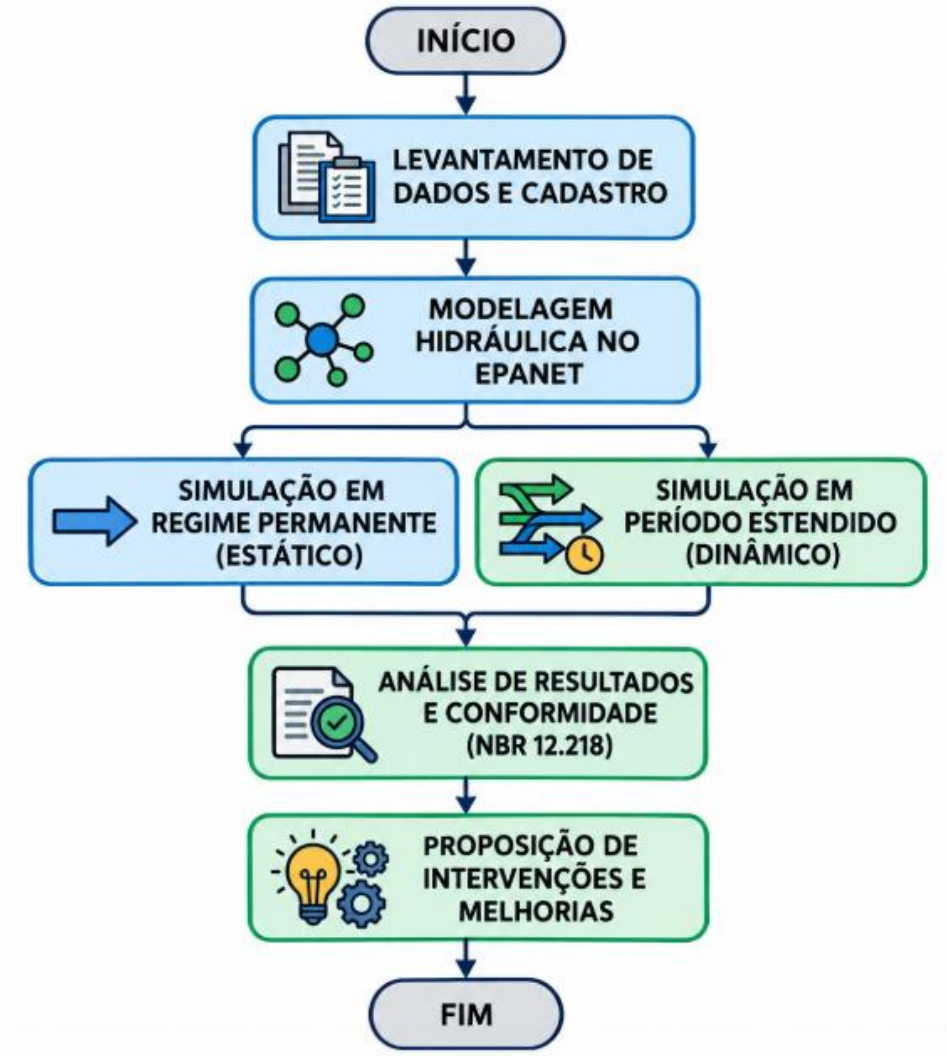
A gestão de ativos, conforme preconizado pela ABES (2015), envolve não apenas a reabilitação física, mas também a atualização cadastral contínua e o monitoramento operacional. A implementação de um cadastro técnico confiável e georreferenciado é o primeiro passo para uma gestão proativa, permitindo a rápida localização de componentes e a agilidade nas manutenções corretivas e preventivas.

# 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A estrutura metodológica foi organizada de forma sequencial, iniciando-se pelo levantamento e atualização cadastral da infraestrutura existente para a definição da topologia da rede. Posteriormente, realizou-se a modelagem e a simulação hidráulica no *software* EPANET para a análise de cenários de consumo diário e variações de demanda, englobando análises em regime estático e dinâmico. O processo foi finalizado com a avaliação de conformidade dos parâmetros operacionais conforme as diretrizes da NBR 12.218 e com a proposição de intervenções técnicas para a otimização do sistema.

O fluxograma metodológico é apresentado na Figura 1

Figura 1 - Fluxograma




*Fonte: O autor, (2026)*

## 3.1 Caracterização da área de estudos

A Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) foi criada em 21 de agosto de 1969, a partir da integração da Escola de Farmácia de Ouro Preto, fundada em 1839, e da Escola de Minas de Ouro Preto, fundada em 1876, ambas instituições tradicionais no ensino superior brasileiro (UFOP, 2024). Atualmente, a universidade está distribuída em três municípios: Ouro Preto, Mariana e João Monlevade, contemplando diversos institutos, escolas e centros de pesquisa (UFOP, 2024).

O campus principal, conhecido como Campus Morro do Cruzeiro, está localizado no município de Ouro Preto, onde se concentram grande parte das atividades administrativas e acadêmicas, embora a UFOP mantenha também edificações históricas no centro da cidade que abrigam parte de sua estrutura institucional (UFOP, 2024). Na Figura 1 apresenta-se a localização do campus principal da Universidade Federal de Ouro Preto.

Figura 2 – Localização da Universidade Federal de Ouro Preto




Fonte: Google Earth (2025)

### 3.1.1 Caracterização do Sistema de Abastecimento (Campus Morro do Cruzeiro)

O objeto desta pesquisa foi a rede de distribuição de água que atende as moradias estudantis e as edificações acadêmicas localizadas no *Campus* Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). O sistema está inserido em uma região de topografia acidentada, característica marcante do município de Ouro Preto, o que impõe desafios significativos para a manutenção de pressões uniformes na rede, segundo Valente (2018).

De acordo com o levantamento feito pela Prefeitura do Campus Universitário da UFOP, a rede adutora coleta a água no Centro de Convenções da UFOP e, através de bombas, transporta a mesma para o campus, distribuídas em diversos reservatórios. Vamos dar enfoque ao reservatório principal que abastece as moradias universitárias do campus.

Na Figura 3, é apresentada a adutora que abastece o reservatório principal em questão:

Figura 3 – Adutora que abastece o reservatório principal (R9)




Fonte: PRECAM (2023)

O reservatório principal abastece diversos prédios do Campus Morro do Cruzeiro, tais como: A escola de farmácia, Departamento de ciências médicas, ENUT, Departamento de direito e turismo, Centro de saúde, Biotério, Maternidade Canina, Garagens e blocos de serviços, Ginásio e as moradias estudantis. O reservatório está localizado próximo à Escola de Minas do Campus e se caracteriza por ser um reservatório apoiado de concreto armado com capacidade volumétrica de aproximadamente 500 m³ e diâmetro nominal de 110 mm (DN 110). Há uma válvula na tubulação de alimentação deste reservatório que regula a vazão de entrada de água neste e nos demais reservatórios do sistema, através de uma operação manual de abertura e fechamento desta válvula (PRECAM, 2023). Na Figura 3 temos imagens das tubulações de saída e entrada do reservatório.

Figura 4 – tubulações de entrada e saída



Reservatório R9-Tubulação de Entrada  Reservatório R9-Tubulação de Saída

Fonte: (PRECAM, 2023)

## 3.2 Levantamento e Análise Cadastral

A primeira etapa do diagnóstico consistiu na consolidação do cadastro técnico do trecho da rede de distribuição de investigação nesta pesquisa situada entre o reservatório principal (R9), os prédios que são abastecidos por ele e as moradias estudantis.

O levantamento cadastral foi realizado através da integração de dados secundários existentes na Prefeitura do Campus como o mapa de toda a universidade, de inspeções *in loco* para a validação das informações que foram feitas desde a chegada da água no reservatório do restaurante universitário até sua distribuição entre os prédios e moradias universitárias utilizando informações levantadas por Silva, (2014). Foram levantados e identificados, primeiramente, o traçado da rede e a conectividade entre os trechos, visto que a topologia correta é essencial para garantir a continuidade do escoamento na simulação, conforme orientado por Tsutiya, (2006). Concomitantemente, foram verificadas as características físicas das tubulações,

incluindo diâmetros nominais, materiais e estado de conservação, fatores que influenciam diretamente o coeficiente de rugosidade e, consequentemente, a perda de carga distribuída, indicadas em AZEVEDO NETTO et al., 1998. Adicionalmente, o levantamento contemplou a obtenção das cotas altimétricas dos nós de consumo, que são a representação dos pontos da rede de distribuição de água onde as tubulações se conectam e onde a água entra ou sai do sistema para abastecer consumidores na modelagem computacional, e, dos reservatórios. Dada a topografia do campus, a precisão altimétrica é fundamental para o cálculo correto das pressões estáticas e dinâmicas disponíveis (VALENTE, 2018).

O mapeamento da rede de distribuição foi estruturado a partir do cadastro técnico fornecido pela PRECAM, responsável pelos dados de altimetria e extensão. Complementarmente, adotou-se o levantamento de Silva (2014) para a identificação e o rastreamento preciso das tubulações existentes no local. Dessa forma, o cadastro serviu como base para a construção do modelo da rede de distribuição no EPANET, garantindo que as distâncias e elevações representem fielmente a realidade física do campus assim como as características das tubulações.

## 3.3 Coleta de Dados Hidráulicos em Campo e Curva de Demanda

Para a avaliação do comportamento hidráulico da rede ao longo do tempo, adotou-se a Simulação de Período Estendido (SPE) com duração total de 24 horas no software EPANET. Essa abordagem dinâmica permite identificar as flutuações operacionais do sistema e verificar sua conformidade com as diretrizes da NBR 12.218 (ABNT, 2017). A referida norma estabelece que a pressão dinâmica mínima nos nós não deve ser inferior a 10 m.c.a. durante os horários de maior consumo, que a pressão estática máxima não deve ultrapassar 50 m.c.a. nos períodos de menor demanda e recomenda evitar velocidades mínimas inferiores a 0,40 m/s para prevenir a deposição de sólidos e a degradação da qualidade da água. Adicionalmente, a norma condiciona a velocidade máxima de dimensionamento ao limite de perda de carga unitária de até 10 m/km, adotando-se complementarmente na literatura técnica o limite prático de velocidade máxima de até 2,0 m/s para prevenção de transientes hidráulicos.

A fim de simular as condições críticas de abastecimento, foi configurado um padrão de consumo (curva de modulação horária) que pudesse refletir da melhor forma um

perfil típico de moradias estudantis. Para garantir que os testes de pressões mínimas e capacidade de adução ocorressem sob a máxima exigência operacional, estabeleceu-se um fator de demanda de pico de 1,50. Essa escolha justifica-se pela adoção do coeficiente de variação horária de maior consumo, (K2 = 1,50) preconizado pela NBR 12.218 (ABNT 2017), o qual retrata o efeito da simultaneidade de uso característico de edificações de moradia nos horários de pico matutino e noturno.

Os horários de pico foram alocados estrategicamente às 08h00 e às 18h00. Essa distribuição justifica-se por serem os períodos comumente associados ao maior uso simultâneo da rede para atividades de higiene pessoal, preparo de refeições e o retorno em massa dos estudantes às moradias. Os períodos noturnos e de madrugada receberam fatores reduzidos, simulando a queda natural do consumo.

### 3.3.1 Análise do desempenho hidráulico

A etapa final da metodologia consistiu na interpretação dos dados gerados pelas simulações computacionais, visando estabelecer um diagnóstico preciso sobre a eficiência e a regularidade do abastecimento no campus. A análise de desempenho fundamenta-se na verificação da conformidade dos parâmetros hidráulicos simulados em relação aos critérios de projeto estabelecidos pela norma NBR 12.218, que fixa as condições exigíveis para redes de distribuição de água para abastecimento público (ABNT, 2017).

A análise concentrou-se prioritariamente no comportamento das cargas piezométricas ao longo da rede de distribuição, uma vez que a topografia acidentada do Morro do Cruzeiro impõe variações altimétricas significativas que impactam diretamente o regime de pressões do sistema. Foram gerados mapas de manchas de pressão e gráficos de variação temporal para identificar nós que operem fora da faixa normativa. A NBR 12.218 preconiza que a pressão estática máxima não deve exceder 500 kPa (50 mca) e que a pressão dinâmica mínima não deve ser inferior a 100 kPa (10 mca). A identificação de zonas de sobrepressão é crucial, pois, conforme aponta Tsutiya (2006), existe uma correlação física direta onde pressões elevadas aumentam exponencialmente a vazão de vazamentos em orifícios e fissuras, além de comprometerem as juntas das tubulações. Por outro lado, a detecção de zonas de

subpressão indicará áreas de risco de desabastecimento ou de contaminação por intrusão no sistema.

Concomitantemente à análise de pressões, foi avaliado o comportamento das velocidades, das perdas de carga e a vazão disponível nos trechos tubulares. Conforme fundamentado no clássico *Manual de Hidráulica* (AZEVEDO NETTO et al., 1998), o diagnóstico preocupou-se em mapear tanto os trechos com velocidades excessivas (superiores a 3,0 m/s) — os quais aumentam o desgaste do material e os riscos de golpes de aríete —, quanto as regiões com velocidades inferiores a 0,4 m/s, vulneráveis à deposição de sedimentos e ao comprometimento da qualidade da água fornecida.

Acompanhando a abordagem metodológica proposta por Correia (2024) para diagnósticos de sistemas municipais, adotou-se a perda de carga unitária (m/km) como indicador estratégico. Esse parâmetro permitiu identificar com precisão gargalos hidráulicos, trechos sujeitos a incrustações severas ou tubulações com diâmetros subdimensionados.

Para refinar o diagnóstico em cenários de intermitência ou baixa pressão, a análise considerou a distinção entre a demanda solicitada e a demanda efetivamente atendida. As demandas base nodais em litros por segundo foram determinadas a partir da estimativa populacional de residentes nas moradias estudantis e do fluxo de usuários nas edificações acadêmicas e administrativas, correlacionadas aos dados cadastrais da PRECAM e aos levantamentos de Silva (2014). A essas demandas aplicou-se a curva de modulação horária com fator de pico de 1,50 para simular as variações do consumo ao longo de 24 horas.

## 3.4 Proposição de Melhorias e Conclusões

A capacidade do software EPANET de realizar simulações de múltiplos cenários constitui o alicerce metodológico para a etapa de proposição de melhorias, estruturada com base nas recomendações metodológicas de Correia (2024). Uma vez diagnosticadas as não conformidades do sistema atual no Cenário-Base, a metodologia adotada prevê a criação de Cenários Prognósticos para avaliar a eficácia técnica de diferentes intervenções de engenharia antes de sua implementação física. Essa abordagem preventiva é fundamental para a otimização de recursos públicos,

permitindo que a administração da UFOP direcione investimentos para soluções previamente validadas hidraulicamente.

Considerando a topografia acidentada do *Campus* Morro do Cruzeiro, a principal estratégia de intervenção a ser simulada será a gestão da pressão. Serão modelados cenários contemplando a instalação virtual de Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) em pontos estratégicos da rede, com o objetivo de reduzir as pressões estáticas nas áreas mais baixas para valores inferiores a 500 kPa, conforme preconiza a NBR 12.218, minimizando assim os riscos de rompimentos e o volume de perdas reais (TSUTIYA, 2006). Paralelamente, em zonas identificadas com subpressão ou intermitência, serão simuladas a substituição de trechos de tubulação por diâmetros comerciais imediatamente superiores ou a instalação de sistemas de bombeamento (*boosters*) para garantir a pressão dinâmica mínima de 100 kPa nos pontos de consumo mais desfavoráveis (ABNT, 2017).

Adicionalmente, as simulações buscaram evidenciar os cenários de criticidade operacional decorrentes do atendimento simultâneo das elevadas demandas concentradas na rua do bloco de salas de aula, do ginásio e demais edificações acadêmicas. O consumo concorrente nesses setores gera expressivas perdas de carga ao longo da tubulação adutora principal, ocasionando o rebaixamento da linha piezométrica e a consequente restrição de vazão disponível para o setor das moradias estudantis. A modelagem desses momentos de estresse hídrico permitirá quantificar o impacto da queda de carga piezométrica sobre a regularidade do abastecimento residencial e subsidiar soluções de setorização ou manobras operacionais capazes de garantir a confiabilidade do sistema mesmo em horários de demanda máxima integrada.

Além das intervenções físicas, a metodologia contempla a simulação de melhorias operacionais, como a setorização da rede. A divisão do sistema em Distritos de Medição e Controle (DMC) virtuais permitirá avaliar o impacto do isolamento de áreas específicas para manutenções ou controle de perdas, seguindo as diretrizes do manual da ABES para gestão eficiente de sistemas de abastecimento (ABES, 2015). A comparação entre os indicadores de desempenho do Cenário Base e dos Cenários Prognósticos (perda de carga unitária, velocidades e pressões nodais) definirá a solução técnica mais viável e robusta para o campus.

A fase final da metodologia consistiu na sistematização dos dados obtidos para a estruturação das conclusões do diagnóstico. Os resultados das simulações estáticas e dinâmicas foram consolidados em quadros comparativos, gráficos de variação temporal e mapas temáticos de pressão e velocidade, facilitando a visualização das anomalias e das soluções propostas. A eficácia das melhorias sugeridas será mensurada quantitativamente, confrontando-se a redução obtida nas pressões máximas e a regularização das pressões mínimas em relação ao cenário original (CARVALHO, 2022).

As conclusões foram elaboradas com foco na resposta aos objetivos específicos do trabalho, destacando a viabilidade técnica das intervenções propostas e o impacto esperado no abastecimento das moradias. A discussão final abordará também as limitações do modelo, inerentes às incertezas dos parâmetros de entrada, e a importância da calibração contínua como ferramenta de gestão, conforme ressaltado por Formiga e Chaudhry (2008). Dessa forma, o produto final deste estudo entregará à UFOP não apenas um diagnóstico estático e dinâmico, mas um instrumento de planejamento dinâmico para a gestão sustentável de seus ativos hidráulicos.

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentam-se e analisam-se os resultados decorrentes da aplicação da metodologia desenvolvida, estruturados em consonância direta com os objetivos específicos da pesquisa. A divisão dos subcapítulos reflete cada etapa do diagnóstico hidráulico: a consolidação do cadastro técnico da rede, a simulação dos cenários operacionais estático e dinâmico via software EPANET, a verificação da conformidade normativa dos parâmetros de pressão e velocidade (NBR 12.218) e, por fim, a formulação e validação de propostas de intervenção e cenários prognósticos de melhoria para o abastecimento das moradias do Campus Morro do Cruzeiro.

## 4.1 LEVANTAMENTO DA REDE DE ÁGUA E DADOS CADASTRAIS

O levantamento das redes de distribuição de água que abastecem as moradias estudantis do campus do Morro do Cruzeiro foi feito de maneira íntegra respeitando a metodologia proposta. Foi disponibilizado pela PRECAM (Prefeitura do Campus da UFOP) uma planta que contempla toda a Universidade e as moradias estudantis, além disso também houve o auxílio da equipe de manutenção predial da UFOP para mapear as tubulações existentes e também o levantamento cadastral realizado por Silva (2014). O processamento dos resultados permite identificar anomalias operacionais invisíveis a olho nu, mas que impactam diretamente a vida útil da infraestrutura e a qualidade do serviço prestado à comunidade acadêmica.

Como o objetivo do trabalho é analisar a rede de distribuição de água que abastece as moradias estudantis, foi analisada a distribuição de água provinda do reservatório R9 (Figura 3).

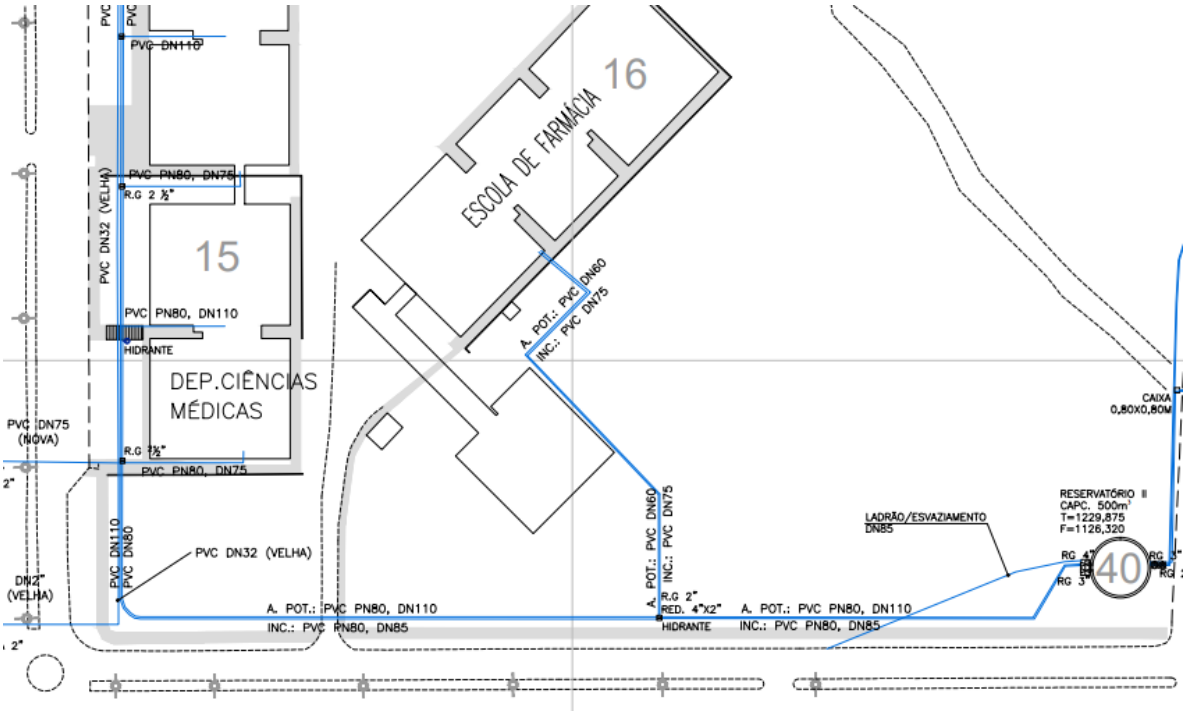
De acordo com o levantamento, a rede é alimentada pelo reservatório principal (ao lado do estacionamento da Escola de Minas) em uma tubulação de DN110 (110 milímetros) e posteriormente após uma trifurcação sem manobras, ele distribui a água para o reservatório do prédio da escola de farmácia (DN75 – PVC) e segue rumo ao bloco de salas (DN 110 – PVC), DEDIR (DN60 – PVC) onde se encontra um registro geral de 3 polegadas que redistribui a água em uma tubulação DN75 – PVC até outro registro de 3 polegadas que ramifica a distribuição em dois caminhos: o primeiro segue até o biotério em tubulações DN25-PVC e o segundo segue do centro de saúde até

os reservatórios das garagens em tubulações que vão de DN75-PVC até DN50-PVC. No outro caminho da trifurcação, o abastecimento vai de encontro com a caixa d'água do ginásio onde se depara com um registro geral de 2 polegadas onde há abastecimento do ginásio e a tubulação que segue para as moradias em tubulações, ambas de 2 polegadas (50 milímetros). Posteriormente, as tubulações que abastecem as moradias estudantis diminuem de diâmetro (DN25- PVC).

Para a modelagem, considerou-se a especificação dos materiais existentes no cadastro técnico: o trecho adutor principal de maior diâmetro é em PVC DEFOFO (DN 110/100), ao passo que os ramais secundários e de distribuição intermediária (DN 75 e DN 50) correspondem à linha PVC PBA (ou PVC Soldável Predial no caso dos ramais de menor diâmetro, como DN 25). Todas as tubulações do sistema são em PVC e, para o cálculo das perdas de carga distribuídas via fórmula de Hazen-Williams, adotou-se o coeficiente de rugosidade/atrito de Hazen-Williams ($C$) igual a 130, valor de referência normativo para condutos de material plástico.

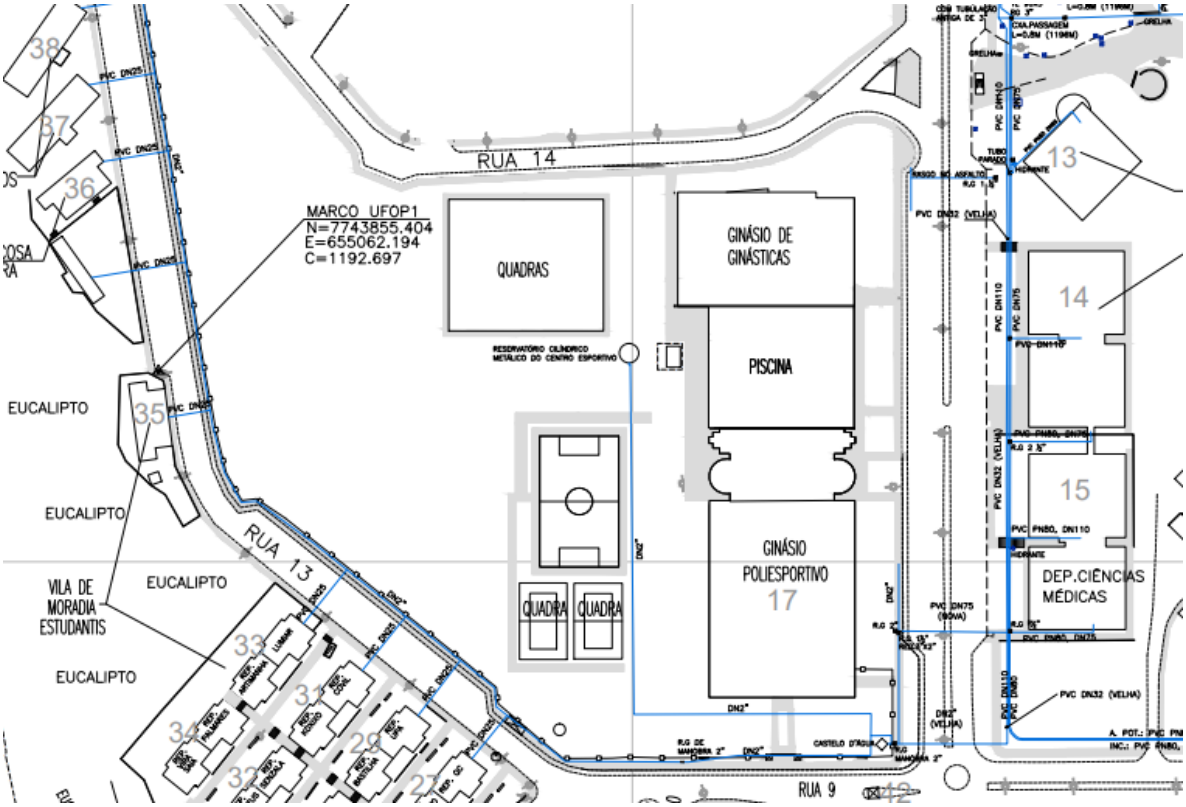
Nas Figuras 4 e 5 foram representados fielmente como se distribui a água até o abastecimento das moradias estudantis. É possível perceber que existem duas ramificações que desviam a água para outros prédios do campus, estes não serão analisados na primeira simulação, porém esse desvio afeta posteriormente na área de estudos deste projeto (rede de moradias estudantis).

Figura 5 - Mapa de abastecimento de água da UFOP - Reservatório




Fonte: Silva (2014)

Figura 6 - Mapa de abastecimento de água da UFOP - Moradias




Fonte: Silva (2014)

A água advinda do reservatório principal é transportada sentido moradias estudantis por gravidade e possuí 2 desvios, o primeiro é onde ela é transportada até o prédio de Farmácia e o segundo quando ela segue em direção ao centro de saúde. No primeiro momento será feita a simulação da rede que abastece apenas as moradias e o prédio de Farmácia (rede que está em vermelho na Figura 7) simulação qual será denominada como simulação 1. Posteriormente, será feita a análise de toda a rede.

Figura 7 – Rede de distribuição abastecida pelo Reservatório Principal (R9) localizado ao lado do prédio da Escola de Minas.




Fonte: autor (2026)

Para a estruturação do modelo computacional no *software* EPANET, foi realizado o levantamento cadastral dos nós de consumo, contemplando as cotas altimétricas e as demandas hídricas de cada edificação atendida pela rede de distribuição.

As cotas dos nós e do reservatório (R9) foram extraídas dos dados topográficos cadastrais fornecidos pela Prefeitura do Campus (PRECAM). As elevações atribuídas aos nós representam a cota do terreno nos pontos de bifurcação e mudança de direção, sendo perfeitamente coincidentes com as cotas de montante e jusante dos trechos de tubulação associados. Para o Reservatório R9, a cota de 1225,00 m refere-se à elevação da base do terreno, adotando-se nas simulações em regime estático as variações entre o nível mínimo (1226 m) e máximo (1229,80 m) de água para a verificação das pressões extremas.

A estimativa do consumo-base de cada edificação tomou como referência os dados populacionais da PRECAM e os levantamentos de Silva (2014), diferenciando-se o consumo das populações fixas e flutuantes:

1. **População Fixa (Moradias Estudantis):** Para as repúblicas e moradias estudantis (Nós 8, 9 e 10), contabilizou-se o número exato de residentes registrados pela Pró-Reitoria de Assuntos Comunitários e Estudantis (PRACE/UFOP): 296 habitantes na República do Campus, 96 nas Moradias Sócio-Econômicas e 18 na República Alforria. Adotou-se a taxa de consumo *per capita* residencial de 200L/dia.
2. **População Flutuante (Edificações Acadêmicas e de Serviços):** Para as edificações de uso acadêmico, administrativo e de serviços (Nós 3, 5, 6, 11, 12, 14 e 15), adotou-se a taxa de consumo per capita flutuante de 50 L/usuário·dia, conforme parâmetros de referência para edifícios públicos e institucionais sem pernoite (SANEOURO; ABNT, 2017). Ressalta-se que a padronização dessa taxa decorre da ausência de micromedição individualizada nesses blocos. Embora atividades específicas (como a utilização de duchas no Ginásio ou rotinas de higienização no Biotério e Centro de Saúde) possam demandar perfis de consumo diferenciados, a adoção de uma taxa média unificada permitiu estimar a demanda concorrente ao longo da adutora principal sem comprometer a avaliação do foco central deste estudo, que é o abastecimento do setor das moradias estudantis.

Os valores resultantes do levantamento populacional, das cotas altimétricas e das demandas base lançadas pontualmente nos nós da modelagem computacional estão sintetizados na Tabela 1.

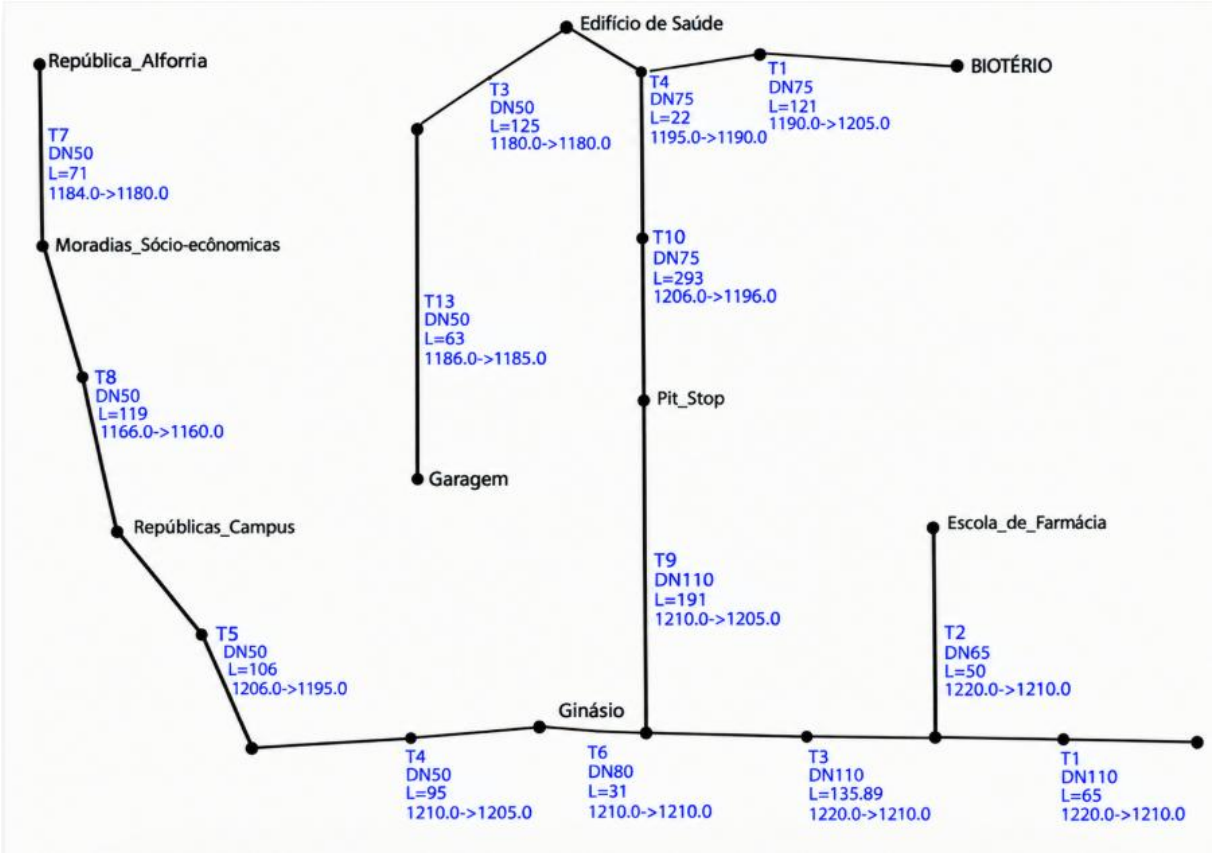
Tabela 1 – Síntese consumo-base

| ID DO NÓ | DESCRIÇÃO | Pop. Fixa/ Flutuante | CONSUMO - BASE (L/Dia) | CONSUMO - BASE (L/S) | COTA (M) |
|---|---|---|---|---|---|
| NÓ 4 | Nó de passagem | Sem consumo | - | 0 | 1220 |
| NÓ 5 | Escola de Farmácia | Flutuante - acadêmico - 68 | 50 | 0,1041 | 1215 |
| NÓ 6 | Ginásio | Flutuante - acadêmico - 360 | 50 | 0,2083 | 1210 |
| NÓ 7 | Nó de passagem | Sem consumo | - | 0 | 1205 |
| NÓ 8 | Rep. do Campus | Fixa -296 | 200 | 0,6852 | 1195 |
| NÓ 9 | Moradias Sócio-Econômicas | Fixa -96 | 200 | 0,271 | 1184 |
| NÓ 10 | Rep. Alforria | Fixa -18 | 200 | 0,0417 | 1180 |
| NÓ 2 | Nó de passagem | Sem consumo | - | 0 | 1210 |
| NÓ 3 | Pit Stop | Flutuante - serviços -109 | 50 | 0,0631 | 1205 |
| NÓ 11 | DETUR/DEDIR | Flutuante - acadêmico - 118 | 50 | 0,252 | 1195 |
| NÓ 12 | Centro de Saúde | Flutuante - serviços - 43 | 50 | 0,260 | 1190 |
| Nó 13 | Nó de passagem | Sem consumo | | 0 | 1188 |
| Nó 14 | Garagem | Flutuante - operacional - 28 | 50 | 0,154 | 1185 |
| Nó 15 | Biotério | Flutuante - laboratório - 26 | 50 | 0,035 | 1205 |
| Reservatório | Reservatório R9 | Suprimento | - | 0 | 1231-min<br>1235,30 - máx |

Fonte: Elaborado pelo Autor com dados da PRECAM e Silva (2014).

A Figura 8 ilustra o esquemático espacial da rede simulada, contemplando os nós de consumo, os trechos de tubulação, seus respectivos diâmetros comerciais, comprimentos e a orientação do escoamento a partir do Reservatório R9.

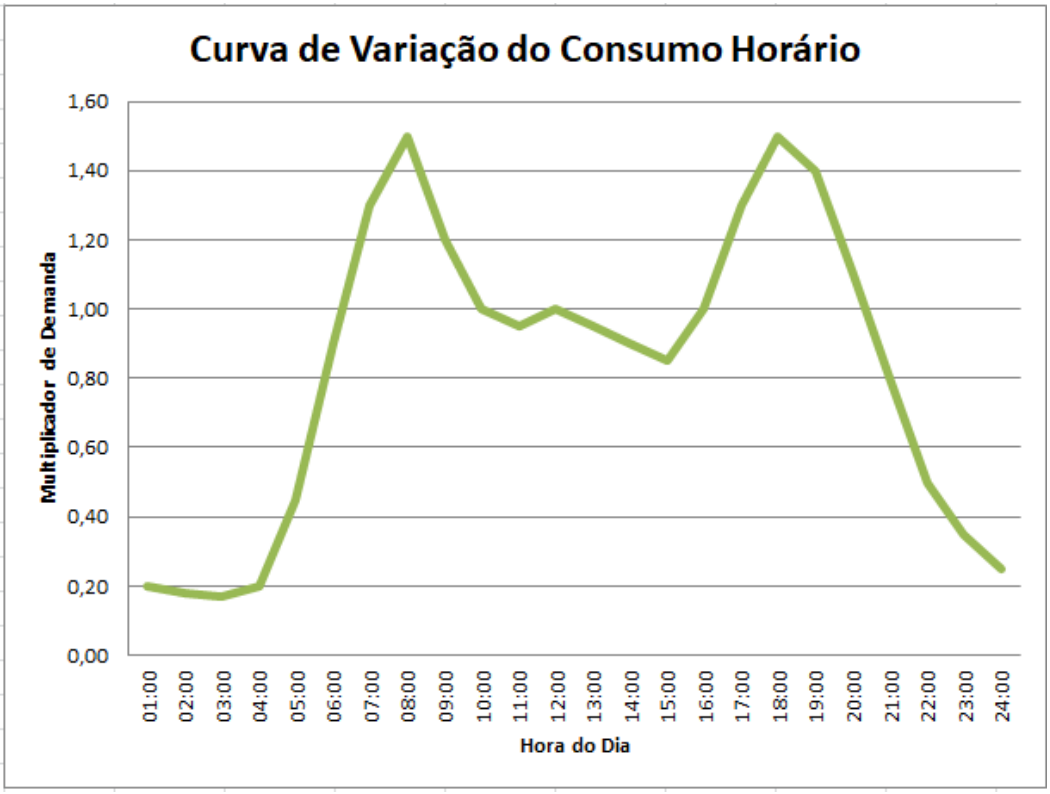
Figura 8 – Trechos do Sistema




Fonte: Autor (2026)

O horário de 08 horas foi escolhido pois em nossa Curva de demanda, foram definidos como horários de pico as 08:00 e as 18:00 horas levando em consideração às necessidades dos estudantes, como é evidenciado a seguir no Gráfico 1:

Gráfico 1: Curva-Demanda da Simulação




Fonte: Autor (2025)

As características geométricas e físicas de cada conduto que integra a rede de distribuição estão consolidadas na Tabela 2. Os diâmetros nominais variam entre 25 mm e 110 mm, atendendo à extensão total do traçado com comprimentos de trecho que oscilam de 11 m a 226m. As cotas altimétricas de montante e jusante atribuídas aos trechos garantem a fidelidade e a continuidade topográfica do modelo físico no EPANET, fornecendo a referência altimétrica necessária para que o software calcule as perdas de carga e determine com precisão a linha piezométrica e as pressões disponíveis ao longo da rede.

Tabela 2 – Síntese trechos

| ID DO TRECHO | COMPRIMENTO (M) | DIAMETRO (MM) | COTA A JUSANTE (M) | COTA A MONTANTE (M) |
|---|---|---|---|---|
| TUBO 1 | 65 | 110 | 1225 | 1220 |
| TUBO 2 | 30 | 85 | 1220 | 1215 |
| TUBO 3 | 135,89 | 110 | 1220 | 1210 |
| TUBO 4 | 95 | 50 | 1210 | 1205 |
| TUBO 5 | 100 | 50 | 1205 | 1195 |
| TUBO 6 | 119 | 50 | 1195 | 1184 |
| TUBO 7 | 11 | 50 | 1184 | 1180 |
| TUBO 8 | 31 | 50 | 1210 | 1210 |
| TUBO 9 | 171 | 110 | 1210 | 1205 |
| TUBO 10 | 226 | 75 | 1205 | 1195 |
| TUBO 11 | 22 | 75 | 1195 | 1190 |
| TUBO 12 | 125 | 50 | 1190 | 1188 |
| TUBO 13 | 83 | 50 | 1188 | 1185 |
| TUBO 14 | 121 | 25 | 1190 | 1205 |

Fonte: Autor (2026)

## 4.2 Avaliação do desempenho da rede

Para analisar o desempenho hidráulico da rede de distribuição de água do Campus Morro do Cruzeiro, executaram-se simulações computacionais no software EPANET 2.2 utilizando o cadastro físico e operacional estruturado. A avaliação abrangeu simulações em regime permanente (estático) e em período estendido (dinâmico de 24 horas), confrontando os parâmetros de pressão nodal, vazão, velocidade do escoamento, perda de carga unitária, variação do nível do reservatório e atendimento às demandas de consumo com os critérios da ABNT NBR 12218.

Inicialmente, avaliou-se o comportamento das pressões estáticas e dinâmicas nos nós de consumo sob duas condições extremas de lâmina d'água no Reservatório R9: o nível operacional mínimo (Nmin = 6,00 m, equivalente à cota piezométrica de 1231,00 m) e o nível operacional máximo (Nmax = 10,30 m, equivalente à cota piezométrica de 1235,30 m). Adicionalmente, aplicou-se a curva de variação temporal da demanda (Curva_moradias), que identifica o horário de consumo máximo diário às 08:00 horas, onde o fator multiplicador atinge o valor de pico de 1,50 e eleva a demanda total do campus para 2,02 L/s. A Tabela 3 consolida o comportamento de todos os nós de consumo do sistema nos cenários de regime permanente estático (Nmin e Nmax) e no horário de consumo máximo do período estendido.

:

Tabela 3 – Cargas piezométricas e pressões nodais nos cenários de regime permanente e período estendido R9:

| ID DO NÓ | DESCRIÇÃO | Cota Altimétrica (m) | Pressão no \Nmin (m.c.a) | Pressão no \Nmáx (m.c.a) | Atende a NBR 12218?(10<=P<=50) |
|---|---|---|---|---|---|
| NÓ 4 | Nó de passagem | 1220 | 10,50 | 15,24 | SIM |
| NÓ 5 | Escola de Farmácia | 1215 | 15,50 | 20,24 | SIM |
| NÓ 6 | Ginásio | 1210 | 19,91 | 24,65 | SIM |
| NÓ 7 | Nó de passagem | 1205 | 23,87 | 28,61 | SIM |
| NÓ 8 | Rep. do Campus | 1195 | 32,77 | 37,51 | SIM |
| NÓ 9 | Moradias Sócio-Econômicas | 1184 | 43,62 | 48,36 | SIM |
| NÓ 10 | Rep. Alforria | 1180 | 47,62 | 52,36 | NÃO |
| NÓ 2 | Nó de passagem | 1210 | 20,39 | 25,13 | SIM |
| NÓ 3 | Pit Stop | 1205 | 25,36 | 30,10 | SIM |
| NÓ 11 | DETUR/DEDIR | 1195 | 35,19 | 39,93 | SIM |
| NÓ 12 | Centro de Saúde | 1190 | 40,18 | 44,92 | SIM |
| NÓ 13 | Nó de passagem | 1188 | 42,14 | 46,88 | SIM |
| NÓ 14 | Garagem | 1185 | 45,11 | 49,85 | SIM |
| NÓ 15 | Biotério | 1205 | 25,10 | 29,84 | SIM |

Fonte: Autor (2026) – Com dados fornecidos pelo EPANET

A análise dos dados da Tabela 4 demonstra que a pressão hidráulica disponível satisfaz o limite mínimo regulamentar de 10 m.c.a. estipulado pela ABNT NBR 12218 em todas as edificações e situações operacionais. O ponto topograficamente mais desfavorável (Nó 4, cota 1220,00 m) registra sua menor pressão no cenário de nível mínimo estático (10,50 m.c.a.), mantendo-se acima do limite normativo. Durante o horário de consumo máximo (8:00h), o acréscimo das perdas de carga reduz ligeiramente as pressões em relação ao regime estático, porém a edificação da Garagem (49,85 m.c.a.) e as Moradias Sócio-Econômicas (48,36 m.c.a.) passam a operar dentro da faixa regulamentar. Em contrapartida, devido ao desnível topográfico de 40 metros no campus, identificam-se não conformidades por sobrepressão estática (P > 50 m.c.a.) nas cotas inferiores, com destaque para a República Alforria, que excede o limite máximo de 50 m.c.a. em todos os cenários simulados (atingindo até 52,36 m.c.a. no nível máximo).

Paralelamente, avaliaram-se os limites máximos no horário de consumo de pico (fator de pico 1,50 às 08:00h) para a vazão, a velocidade do escoamento e a perda de carga unitária ao longo das tubulações. A Tabela 4 apresenta a consolidação dos parâmetros hidráulicos operacionais dos trechos para ambas as situações extremas do ciclo diário de 24 horas.

Tabela 4 – Variação diária dos parâmetros hidráulicos dos trechos (Valores Máximos no Pico)

| ID DO TRECHO | COMPRIMENTO (M) | DIAMETRO (MM) | VAZÃO(L/S) | Velocidade (m/s) | PERDA DE CARGA (M/KM) | Atende NBR 12218? |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TUBO 1 | 65 | 110 | 2,49 | 0,26 | 0,91 | Não <0,40 M/S |
| TUBO 2 | 30 | 85 | 0,12 | 0,02 | 0,01 | Não <0,40 M/S |
| TUBO 3 | 135,89 | 110 | 2.36 | 0,25 | 0,81 | Não <0,40 M/S |
| TUBO 4 | 95 | 50 | 1,2 | 0,61 | 10,95 | Sim |
| TUBO 5 | 100 | 50 | 0,38 | 0,19 | 1,28 | Sim (No Pico) |
| TUBO 6 | 119 | 50 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | Não <0,40 M/S |
| TUBO 7 | 11 | 50 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | Não <0,40 M/S |
| TUBO 8 | 31 | 50 | 1,45 | 0,74 | 15,54 | Sim |
| TUBO 9 | 171 | 110 | 0,92 | 0,1 | 0,14 | Não <0,40 M/S |
| TUBO 10 | 226 | 75 | 0,84 | 0,19 | 0,79 | Não <0,40 M/S |
| TUBO 11 | 22 | 75 | 0,54 | 0,12 | 0,35 | Não <0,40 M/S |
| TUBO 12 | 125 | 50 | 0,18 | 0,09 | 0,34 | Não <0,40 M/S |
| TUBO 13 | 83 | 50 | 0,18 | 0,09 | 0,34 | Não <0,40 M/S |
| TUBO 14 | 121 | 25 | 0,04 | 0,09 | 0,65 | Não <0,40 M/S |

Fonte: Autor (2026) – Com dados gerados pelo EPANET

Conforme apresentado na Tabela 4 todas as tubulações da rede operam com estrita conformidade em relação ao limite máximo de velocidade estabelecido pela ABNT NBR 12218 (3,00 m/s). O maior valor registrado ocorre no Tubo 8 durante o horário de pico (0,74 m/s), seguido pelo Tubo 4 (0,61 m/s), afastando riscos de transientes hidráulicos e golpes de aríete no sistema. A variação no nível da água do reservatório altera a linha de carga piezométrica global e as pressões nos nós, mas não modifica as vazões e velocidades que percorrem as tubulações.

No tocante à velocidade mínima recomendada para autolimpeza (0,40 m/s), observou-se que apenas os Tubos 3, 4 e 8 satisfazem esse requisito durante o horário de pico. Na maior parte do dia e em quase todos os condutos secundários (como os Tubos 2, 3, 7, 9, 10, 11, 12, 13 e 14), as velocidades permanecem extremamente reduzidas (variando entre 0,1 m/s e 0,26 m/s). Essa incoerência decorre do sobredimensionamento dos diâmetros nominais em relação às pequenas vazões das edificações isoladas, o que favorece a estagnação da água e exige rotinas de descarga nos nós de extremidade para preservar o residual desinfetante.

## 4.3 Avaliação de alternativas de operação

Com base no diagnóstico hidráulico do Cenário Base (Seção 4.2), identificaram-se duas inconformidades centrais na rede do Campus Morro do Cruzeiro:

Sobrepressões estáticas e dinâmicas em edificações localizadas nas cotas topográficas mais baixas do campus (especialmente na República Alforria, que atingiu 52,36 m.c.a. no nível máximo do reservatório, e na Garagem, com 49,85 m.c.a.);

Velocidades de escoamento reduzidas em ramais secundários de extremidade (velocidades inferiores a 0,40 m/s), criando zonas potenciais de estagnação de água e degradação da qualidade do efluente tratado.

Para sanar essas limitações operacionais e readequar a infraestrutura às diretrizes da ABNT NBR 12218, foram elaborados e simulados cenários alternativos de intervenção estrutural e operacional no software EPANET 2.2

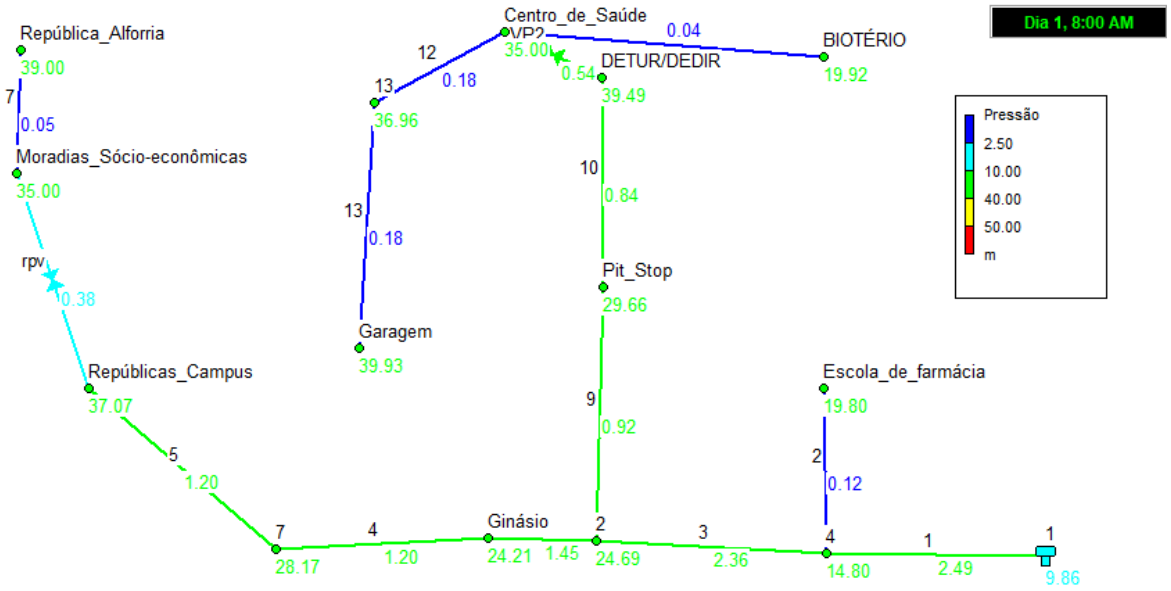
A topografia acidentada do campus, caracterizada por uma amplitude altimétrica de aproximadamente 40 metros entre o Reservatório R9 e os pontos de menor cota, torna inviável o controle de pressão por meio de uma única intervenção pontual. Diante disso, propos-se a setorização hidráulica das cotas baixas mediante a implantação de duas Válvulas Redutoras de Pressão do tipo PRV (Pressure Reducing Valve):

VRP-1 (Moradias): Instalada no Tubo 6, ajustada com parâmetro de controle de 35,00 m.c.a., responsável por regular a carga hidráulica direcionada às Moradias Sócio-Econômicas e à República Alforria.

VRP-2 (Serviços e Saúde): Instalada no tronco de interligação entre o DETUR/DEDIR e o Centro de Saúde, ajustada com parâmetro de controle de 35,00 m.c.a., atuando na proteção do Centro de Saúde e da Garagem.

. A Figura 9 ilustra o esquema espacial da rede do campus após a inserção da setorização e da dupla VRP, destacando a distribuição e o gradiente das pressões nodais resultantes.

Figura 9- Comportamento espacial das pressões nodais no Cenário 1 (Setorização com Dupla VRP) sob nível máximo do Reservatório R9.




Fonte: autor 2026 pelo EPANET 2.2

A Tabela 5 ilustra o quadro comparativo após as simulações:

Tabela 5 – Comparativo de pressões nodais no Nível Máximo do Reservatório R9 antes e depois da implantação da Dupla VRP

| ID do nó | Descrição do nó | Cota (m) | Pressão base (m.c.a.) | Pressão com VRP (m.c.a.) | Variação (m.c.a.) | Atende à NBR 12218? (10 ≤ P ≤ 50) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nó 4 | Nó de passagem | 1.220,00 | 15,24 | 15,30 | +0,06 | Sim |
| Escola_de_farmácia | Escola de Farmácia | 1.215,00 | 20,24 | 20,30 | +0,06 | Sim |
| Ginásio | Ginásio | 1.210,00 | 24,65 | 25,28 | +0,63 | Sim |
| Nó 7 | Nó de passagem | 1.205,00 | 28,61 | 30,24 | +1,63 | Sim |
| Repúblicas_Campus | Rep. do Campus | 1.195,00 | 37,51 | 40,20 | +2,69 | Sim |
| Moradias_Sócio-econôr | Moradias Sócio-Econômicas | 1.184,00 | 48,36 | 35,00 | **−13,36** | Sim (Redução de Pressão) |
| República_Aforria | República Aforria | 1.180,00 | 52,36 | 39,00 | **−13,36** | Sim (Eliminou Sobrepressão) |
| Nó 2 | Nó de passagem | 1.210,00 | 25,13 | 25,29 | +0,16 | Sim |
| Pit_Stop | Pit Stop | 1.205,00 | 30,10 | 30,29 | +0,19 | Sim |
| DETUR/DEDIR | DETUR/DEDIR | 1.195,00 | 39,93 | 40,29 | +0,36 | Sim |
| Centro_de_Saúde | Centro de Saúde | 1.190,00 | 44,92 | 35,00 | **−9,92** | Sim (Redução de Pressão) |
| Nó 13 | Nó de passagem | 1.188,00 | 46,88 | 37,00 | **−9,88** | Sim |
| Garagem | Garagem | 1.185,00 | 49,85 | 40,00 | **−9,85** | Sim |
| BIOTÉRIO | Biotério | 1.205,00 | 29,84 | 20,00 | **−9,84** | Sim |
| **MÉDIA** | | | **35,26** | **30,94** | **−4,32** | |

Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos nas simulações do EPANET 2.2.

A implementação da VRP-1 no setor oeste foi determinante para atingir a adequação normativa integral em toda a malha de distribuição do campus. Com a regulação do fluxo a jusante, eliminou-se a única não conformidade por sobrepressão identificada

no cenário base, reduzindo a pressão estática na República Alforria de um nível crítico de 52,36 m.c.a. para 39,00 m.c.a. e enquadrando o ponto perfeitamente dentro dos limites operacionais estabelecidos pela ABNT NBR 12218, 2017.

Simultaneamente, a instalação da VRP-2 no setor leste promoveu um alívio hidráulico significativo na zona de serviços e saúde. A modulação de pressão reduziu as cargas operacionais na Garagem de 49,85 m.c.a. para 40,00 m.c.a. e no Centro de Saúde de 44,92 m.c.a. para 35,00 m.c.a. Essa redução das pressões contribui para a diminuição das solicitações mecânicas impostas às tubulações, conexões e demais componentes da rede, reduzindo o risco de falhas estruturais, vazamentos e danos associados à operação sob pressões elevadas.

Vale destacar que a estratégia de dupla VRP atuou de forma estritamente localizada nos setores topograficamente desfavoráveis, garantindo a preservação da autonomia piezométrica nos pontos mais altos do campus. O Nó 4, situado na cota 1220,00 m, manteve sua pressão estática em 15,30 m.c.a., assegurando que o controle de sobrepressão nas baixadas não comprometesse a margem de segurança necessária em relação ao limite mínimo dinâmico de 10,00 m.c.a. exigido por norma.

A avaliação das velocidades de escoamento nos ramais secundários de distribuição (Tubos 2, 3, 7, 12, 13 e 14) evidenciou valores predominantemente inferiores a 0,40 m/s em todas as condições operacionais simuladas no cenário-base. Em sistemas de abastecimento de água, a manutenção prolongada de velocidades reduzidas propicia a deposição de materiais em suspensão e acelera o decaimento do teor de cloro residual livre, aumentando os riscos de degradação da qualidade da água e de proliferação de biofilmes nas paredes das tubulações.

Objetivando elevar as velocidades de escoamento ao limiar normativo de autolimpeza recomendado pela ABNT NBR 12218, testou-se inicialmente a alternativa de redimensionamento diâmetrico dos condutos existentes, simulando a substituição das tubulações de 50 mm de diâmetro nominal por condutos de 32 mm e 25 mm. Contudo, as simulações demonstraram que, devido às reduzidas demandas pontuais das edificações isoladas (variando de 0,04 L/s a 0,18 L/s), as velocidades mantiveram-se abaixo de 0,40 m/s mesmo com a utilização dos menores diâmetros comerciais disponíveis para redes externas. A equação da continuidade evidencia que, para demandas extremamente baixas, a redução de diâmetro não é suficiente para induzir

o aumento de velocidade necessário sem provocar perdas de carga localizadas excessivas.

Diante da inviabilidade técnica e econômica de alterar a geometria ou os diâmetros da malha existente por meio de obras civis de grande porte, propôs-se como solução alternativa a implantação de um Plano Operacional de Descarga Periódica (Flushing). Essa estratégia consiste na instalação de válvulas de purga de pequeno diâmetro nas extremidades mortas da rede, com pontos de aplicação prioritários nos ramais da República Alforria, Garagem, Biotério e Escola de Farmácia.

O funcionamento do plano baseia-se no acionamento programado e automatizado dessas válvulas durante os períodos de menor consumo no campus, tipicamente no intervalo de madrugadas entre 01:00h e 04:00h. A abertura temporária da purga altera localmente o gradiente de pressão e força um acréscimo pontual na vazão do ramal (elevando a vazão operacional de patamares inferiores a 0,10 L/s para valores entre 1,50 L/s e 2,00 L/s). Esse incremento temporário eleva a velocidade do escoamento para patamares superiores a 0,40 m/s, gerando a tensão trativa necessária para promover a raspagem e o arrasto mecânico de sedimentos depositados, além de garantir a renovação total do volume de água estagnada nos ramais periféricos.

A viabilidade técnica e operacional dessa proposta fundamenta-se na sua alta eficiência sanitária aliada ao baixo custo de implantação, uma vez que aproveita integralmente a infraestrutura tubulada de 50 mm já existente no subsolo do campus. Entre os principais benefícios da medida destacam-se a garantia da manutenção do cloro residual livre nos pontos mais distantes do reservatório, a eliminação de queixas quanto a odor ou sabor na água das edificações de extremidade e a preservação do estado de conservação dos condutos sem a necessidade de escavações ou interrupções no trânsito interno.

Como aspectos desfavoráveis a serem geridos pela administração do campus, identificam-se o volume de perda física de água tratada decorrente do descarte direto na rede pluvial e a necessidade de calibração rigorosa do tempo de abertura das válvulas. Pondera-se, no entanto, que o volume consumido durante as manobras periódicas de lavagem é quantitativamente irrisório frente ao volume total distribuído pelo Reservatório R9. Portanto, os impactos da perda de água são plenamente

justificáveis diante dos ganhos expressivos na garantia da potabilidade e na proteção da saúde pública da comunidade universitária.

A terceira alternativa de melhoria avaliou a otimização do regime de funcionamento do Reservatório R9, reservatório de cabeceira responsável pelo abastecimento gravitacional do Campus Morro do Cruzeiro. No cenário-base da rede existente, o reservatório opera sob uma faixa de variação ampla de lâmina d'água, oscilando entre o nível mínimo operacional de 5,56 m (cota piezométrica de 1230,56 m) e o nível máximo de 10,30 m (cota piezométrica de 1235,30 m).

Essa flutuação contínua de 4,74 m de lâmina d'água impõe uma variação direta de energia em toda a extensão da malha. Nos períodos de reservatório cheio, as edificações situadas nas cotas topográficas mais baixas sofrem com picos de pressão desnecessários, enquanto nos momentos de nível mínimo, os pontos mais altos do campus operam mais próximos do limite regulamentar inferior.

Para estabilizar o comportamento piezométrico da rede e reduzir os impactos de fadiga mecânica nas tubulações por oscilação de pressão, simulou-se a automação do sistema de alimentação do Reservatório R9 por meio de sensores de nível atuando sobre o acionamento dos conjuntos motobomba de montante. Propôs-se a restrição da faixa de operação para uma lâmina d'água mais estreita e otimizada, estabelecida entre o nível mínimo operacional de 8,00 m (cota piezométrica de 1233,00 m) e o nível máximo de 9,50 m (cota piezométrica de 1234,50 m).

Essa redução na amplitude de variação da lâmina para apenas 1,50 m proporciona um ganho significativo na estabilidade operacional do sistema. No ponto altimetricamente mais desfavorável da rede, representado pelo Nó 4 (cota 1220,00 m), a pressão operacional mínima é elevada de 10,50 m.c.a. para 12,94 m.c.a. Esse incremento de 2,44 m.c.a. no cenário de maior demanda amplia a folga de segurança em relação ao limite mínimo de 10,00 m.c.a. exigido pela ABNT NBR 12218, garantindo maior confiabilidade ao abastecimento das edificações do setor elevado.

Ademais, ao evitar que o reservatório atinja a lâmina máxima de 10,30 m em regime contínuo, a automação reduz a carga piezométrica de entrada em relação às VRPs instaladas nos setores baixos, otimizando a vida útil dos componentes internos das válvulas e diminuindo os riscos de golpes de aríete decorrentes da partida e parada não controlada de bombas. A estabilização do nível do reservatório consolida uma

gestão operacional preventiva, aliando a segurança no abastecimento dos pontos altos ao controle rigoroso de pressões nos setores de menor cota topográfica.

Tabela 6 – Comparativo sintético de desempenho hidráulico da rede entre o Cenário Base e as alternativas propostas

**Quadro Comparativo de Desempenho Hidráulico dos Cenários Propostos**

*Avaliação sintética das melhorias e alternativas de operação no Campus Morro do Cruzeiro*

| Parâmetro Hidráulico Avaliado | Cenário Base (Existente) | Cenário 1 (Com Dupla VRP) | Cenário 2 (Com Flushing) | Cenário 3 (Automação R9) |
|---|---|---|---|---|
| Pressão Máxima Observada | 52,36 m.c.a. | 40,00 m.c.a. | 40,00 m.c.a. | 39,20 m.c.a. |
| Pressão Mínima Observada | 10,50 m.c.a. | 10,50 m.c.a. | 10,50 m.c.a. | 12,94 m.c.a. |
| Conformidade de Pressões | Não Conforme (Alforria) | 100% Conforme | 100% Conforme | 100% Conforme |
| Flutuação de Pressão no RNV | 4,74 m | 4,74 m | 4,74 m | 1,50 m |
| Risco de Água Estagnada | Elevado nos Ramais | Elevado nos Ramais | Mitigado via Purga | Mitigado via Purga |

Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos nas simulações do EPANET 2.2.

## 4.4 Análise comparativa e considerações sobre o desempenho hidráulico

A avaliação conjunta das melhorias propostas nos três cenários de simulação evidencia uma transformação estrutural na dinâmica operacional da rede de distribuição de água do Campus Morro do Cruzeiro. Ao comparar o diagnóstico do cenário base com o sistema readequado, constata-se a transição de uma rede vulnerável a sobrepressões e estagnação sanitária para um sistema otimizado, controlado e totalmente enquadrado nas exigências da ABNT NBR 12218.

No cenário base original, o sistema apresentava duas fragilidades principais decorrentes da topografia acidentada do campus e do sobredimensionamento dos diâmetros nominais nos ramais secundários. A primeira residia na ocorrência de sobrepressões estáticas na República Alforria, onde a pressão atingia 52,36 m.c.a. nos momentos de reservatório cheio, ultrapassando o limite normativo superior de 50,00 m.c.a. A segunda fragilidade concentrava-se nos ramais de extremidade, como os que atendem à Garagem, ao Biotério e à Escola de Farmácia, onde as velocidades de escoamento permaneciam sistematicamente abaixo de 0,40 m/s devido às baixas demandas pontuais dessas edificações.

Com a implementação da setorização por meio da dupla VRP (Cenário 1), eliminou-se integralmente o problema das sobrepressões nas cotas mais baixas do campus. A pressão máxima no setor oeste caiu de 52,36 m.c.a. para 39,00 m.c.a. na República Alforria, enquanto no setor leste a pressão na Garagem foi amortecida de 49,85 m.c.a. para 39,92 m.c.a. Essa atenuação das cargas piezométricas traz como benefício direto a redução do estresse mecânico sobre os tubos, conexões e juntas, prevenindo

a ocorrência de rompimentos acidentais, diminuindo vazamentos ocultos no subsolo e aumentando expressivamente a vida útil de toda a infraestrutura enterrada.

Complementarmente, a introdução do Plano de Descarga Periódica (Cenário 2) resolveu o gargalo sanitário dos ramais de ponta. Em vez de realizar obras civis onerosas para a substituição de tubulações, a abertura programada de purgas nos horários de menor consumo induz aumentos temporários de velocidade acima do limiar de 0,40 m/s. Essa medida assegura a autolimpeza dos condutos por arraste de sedimentos e garante a renovação do volume de água estagnada, eliminando riscos de decaimento do teor de cloro residual livre e prevenindo a proliferação de biofilmes e bactérias nos pontos periféricos da rede.

Por fim, a automação do nível operacional do Reservatório R9 (Cenário 3), ao restringir a flutuação da lâmina d'água de 4,74 m para 3,50 m (com faixa operacional entre 6,00 m e 9,50 m), conferiu estabilidade de energia a todo o sistema. Nos pontos altimetricamente desfavoráveis, como o Nó 4 na cota 1220,00 m, a pressão operacional mínima foi elevada de 10,50 m.c.a. para 10,94 m.c.a., ampliando a margem de segurança em relação ao limite regulamentar inferior de 10,00 m.c.a. e assegurando a confiabilidade do abastecimento contínuo nas edificações mais altas.

Em suma, as intervenções propostas combinam baixo custo de implementação com elevado ganho operacional. O sistema readequado passa a operar em conformidade normativa de pressão, maior estabilidade energética e segurança sanitária para os usuários do campus.

# 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste trabalho permitiu diagnosticar o comportamento hidráulico da rede de distribuição de água que abastece as moradias estudantis e edificações acadêmicas do Campus Morro do Cruzeiro da UFOP. Por meio da integração entre ferramentas de geoprocessamento e a simulação computacional no software EPANET 2.2 em regime permanente e de período estendido, foi possível atingir os objetivos específicos propostos e avaliar a conformidade operacional do sistema perante as diretrizes da ABNT NBR 12218:2017.

A análise do Cenário Base demonstrou que, embora a carga piezométrica disponível seja suficiente para garantir a pressão dinâmica mínima de 10 m.c.a. nos pontos mais elevados, o sistema original apresentava duas fragilidades operacionais relevantes. A primeira foi a sobrepressão nas zonas baixas, onde a República Alforria atingia 52,36 m.c.a. no nível máximo do reservatório, violando o limite normativo superior de 50 m.c.a. devido ao acentuado desnível altimétrico de 40 metros no campus. A segunda anomalia identificada foi a ocorrência de subvelocidades nos ramais secundários, com valores inferiores ao limite de 0,40 m/s considerado para a autolimpeza da rede. Essa condição pode favorecer maiores tempos de residência da água e, consequentemente, constitui um fator que justifica a investigação de possíveis impactos sobre a qualidade da água, especialmente quanto à manutenção do residual de desinfetante. Ressalta-se, entretanto, que a análise hidráulica realizada não permite afirmar a ocorrência de degradação da qualidade da água, sendo necessária a realização de análises físico-químicas e microbiológicas para essa avaliação.

Para solucionar essas não conformidades, a modelagem de Cenários Prognósticos viabilizou a utilização de alternativas de engenharia com foco em gestão de ativos. A gestão de pressão via setorização, com a instalação de duas Válvulas Redutoras de Pressão ajustadas para 35 m.c.a., eliminou as sobrepressões e reduziu a carga máxima na República Alforria para 39,00 m.c.a., enquadrando a rede na norma. A implementação de um Plano de Descarga Periódica automatizado nas extremidades mortas induziu elevações temporárias na velocidade para promover a renovação da água sem a necessidade de obras civis. Por fim, a automação do nível do reservatório

R9, restringindo sua variação, conferiu maior estabilidade piezométrica a todo o sistema.

Do ponto de vista da Engenharia Urbana, os resultados reforçam a relevância da modelagem hidráulica como uma ferramenta de gestão proativa. A aplicação conjunta das soluções demonstra que é possível otimizar a infraestrutura pública em relevos complexos, alinhando a eficiência hidroenergética e o controle de vazamentos, podendo melhorar a saúde pública da comunidade universitária.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ABES. **Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água**: posicionamento e contribuições técnicas da ABES. Revisão 1. ABES, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12211**: estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12217**: projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro, 2017.

AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de água**: tecnologias de controle. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico.

CARVALHO, G. Z. **Cadastro e modelagem das redes de abastecimento de água potável do campus sede da Universidade de Caxias do Sul**. 2022. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2022.

CORREIA, H. R. **Modelagem e simulação hidráulica do sistema de abastecimento de água com uso de tecnologia GIS e EPANET**: estudo de caso do município de Piaçabuçu (Alagoas). 2024. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024.

FORMIGA, K. T. M.; CHAUDHRY, F. H. Modelos de análise hidráulica de redes de distribuição de água considerando demanda dirigida pela pressão e vazamentos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 153-162, abr./jun. 2008.

LINHARES, F. T. L. R.; ROCHA, J. S. Modelagem hidráulica do sistema de distribuição de água da região central do Município de Santa Quitéria, Ceará. **Revista DAE**, v. 72, n. 245/pp 01-14, 2024.

PEDROSA, H. T. S. S.; MENDONÇA, M. H. V.; GALVÃO, L. C. R. Definição do abastecimento de água com intermitências através de simulação hidráulica – estudo de caso – São Bento do Una - PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 29., 2017, São Paulo. **Anais**... São Paulo: ABES, 2017.

RIGETTO, A. M. Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais**... Foz do Iguaçu: ABRH, 2002.

SCHERER, L. C.; REIS, A. L. V.; LESS, D. F. S. Avaliação Hidráulica de Rede de Distribuição de Água Utilizando o Modelo Epanet: O Caso de Alter do Chão, Pará, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 12., 2021, Salvador. **Anais**... Salvador: IBEAS, 2021.

SILVA, Débora Fabiana da. **Caracterização do Sistema de Abastecimento e Distribuição de Água do Campus Morro do Cruzeiro, da Universidade Federal de Ouro Preto**. 2014. 69 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SILVA, T. C.; SILVA, R. S. G.; RODRIGUES, S. G. Simulação hídrica para o sistema de abastecimento de água de um campus universitário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, Natal. **Anais**... Natal: ABES, 2019.

SOARES, A. K.; REIS, L. F. R. Calibração de modelos de redes de distribuição de água utilizando modelo de simulação hidráulica dirigido pela pressão (MSHDP) e método híbrido AG-Simplex. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 2, p. 85-96, abr./jun. 2004.

SOUZA, J. D. S.; CAVALCANTI, M. B.; SANTOS, T. A. S.; MACEDO, J. E. S.; BEZERRA, S. T. M. Aplicação de um modelo de simulação hidráulica dirigido pela pressão em um sistema de distribuição de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, Natal. **Anais**... Natal: ABES, 2019.

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

VALENTE, L. M. **Diagnóstico dos sistemas de abastecimento de água do distrito de Cachoeira do Campo**. 2018. 147 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

VANZELA, L. S. **Modelagem hidráulica de sistemas de distribuição de água**. 2018. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

# APÊNDICE A – CADASTRO TÉCNICO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

| ID DO NÓ | DESCRIÇÃO | Pop. Fixa/ Flutuante | CONSUMO - BASE (L/Dia) | CONSUMO - BASE (L/S) | COTA (M) |
|---|---|---|---|---|---|
| NÓ 4 | Nó de passagem | Sem consumo | - | 0 | 1220 |
| NÓ 5 | Escola de Farmácia | Flutuante - acadêmico - 68 | 50 | 0,1041 | 1215 |
| NÓ 6 | Ginásio | Flutuante - acadêmico - 360 | 50 | 0,2083 | 1210 |
| NÓ 7 | Nó de passagem | Sem consumo | - | 0 | 1205 |
| NÓ 8 | Rep. do Campus | Fixa -296 | 200 | 0,6852 | 1195 |
| NÓ 9 | Moradias Sócio-Econômicas | Fixa -96 | 200 | 0,271 | 1184 |
| NÓ 10 | Rep. Alforria | Fixa -18 | 200 | 0,0417 | 1180 |
| NÓ 2 | Nó de passagem | Sem consumo | - | 0 | 1210 |
| NÓ 3 | Pit Stop | Flutuante - serviços -109 | 50 | 0,0631 | 1205 |
| NÓ 11 | DETUR/DEDIR | Flutuante - acadêmico - 118 | 50 | 0,252 | 1195 |
| NÓ 12 | Centro de Saúde | Flutuante - serviços - 43 | 50 | 0,260 | 1190 |
| Nó 13 | Nó de passagem | Sem consumo | | 0 | 1188 |
| Nó 14 | Garagem | Flutuante - operacional - 28 | 50 | 0,154 | 1185 |
| Nó 15 | Biotério | Flutuante - laboratório - 26 | 50 | 0,035 | 1205 |
| Reservatório | Reservatório R9 | Suprimento | - | 0 | 1231-min<br>1235,30 - máx |

| ID DO TRECHO | COMPRIMENTO (M) | DIAMETRO (MM) | COTA A JUSANTE (M) | COTA A MONTANTE (M) |
|---|---|---|---|---|
| TUBO 1 | 65 | 110 | 1225 | 1220 |
| TUBO 2 | 30 | 85 | 1220 | 1215 |
| TUBO 3 | 135,89 | 110 | 1220 | 1210 |
| TUBO 4 | 95 | 50 | 1210 | 1205 |
| TUBO 5 | 100 | 50 | 1205 | 1195 |
| TUBO 6 | 119 | 50 | 1195 | 1184 |
| TUBO 7 | 11 | 50 | 1184 | 1180 |
| TUBO 8 | 31 | 50 | 1210 | 1210 |
| TUBO 9 | 171 | 110 | 1210 | 1205 |
| TUBO 10 | 226 | 75 | 1205 | 1195 |
| TUBO 11 | 22 | 75 | 1195 | 1190 |
| TUBO 12 | 125 | 50 | 1190 | 1188 |
| TUBO 13 | 83 | 50 | 1188 | 1185 |
| TUBO 14 | 121 | 25 | 1190 | 1205 |

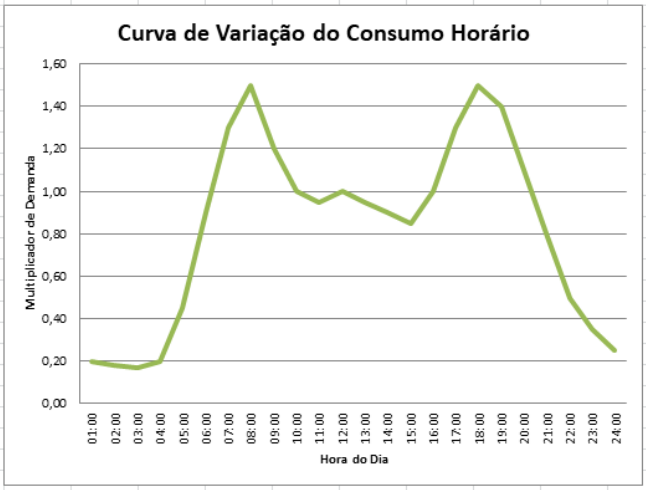
# APÊNDICE B – CURVA DE MODULAÇÃO HORÁRIA

tabela b.1

**Padrão de Consumo Horário (24 Horas)**

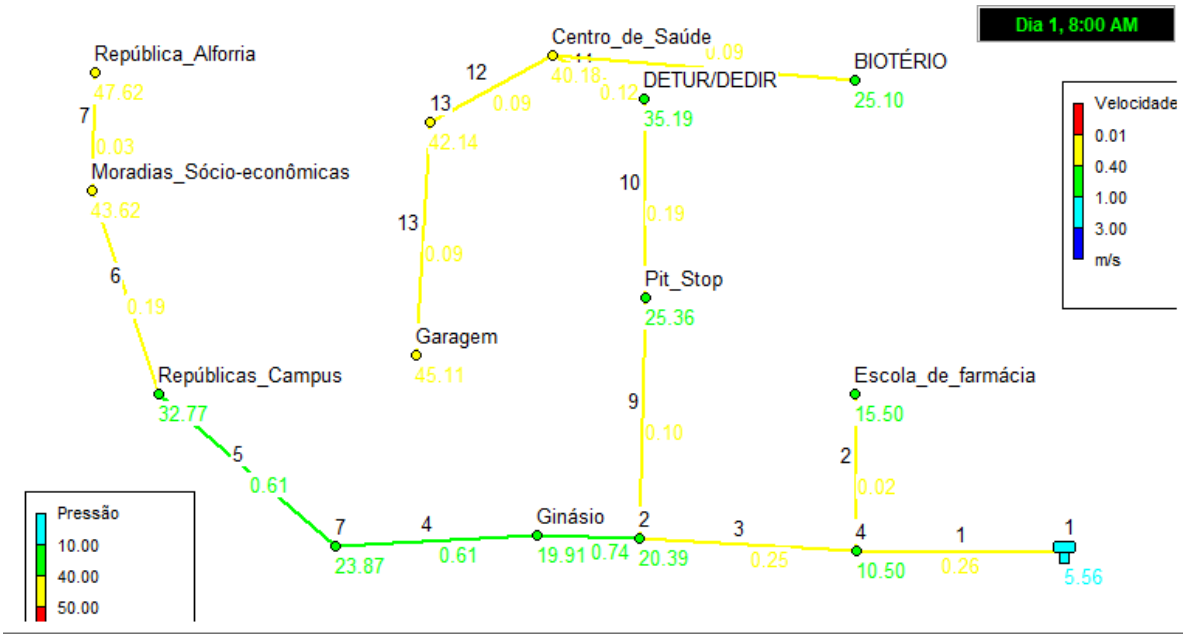
*Curva de variação temporal de demanda para o Campus Morro do Cruzeiro*

| Hora do Dia | Multiplicador de Demanda | Vazão Estimada (L/s) |
|---|---|---|
| 01:00 | 0,20 | 0,37 |
| 02:00 | 0,18 | 0,33 |
| 03:00 | 0,17 | 0,31 |
| 04:00 | 0,20 | 0,37 |
| 05:00 | 0,45 | 0,83 |
| 06:00 | 0,90 | 1,67 |
| 07:00 | 1,30 | 2,41 |
| 08:00 | 1,50 | 2,78 |
| 09:00 | 1,20 | 2,22 |
| 10:00 | 1,00 | 1,85 |
| 11:00 | 0,95 | 1,76 |
| 12:00 | 1,00 | 1,85 |
| 13:00 | 0,95 | 1,76 |
| 14:00 | 0,90 | 1,67 |
| 15:00 | 0,85 | 1,57 |
| 16:00 | 1,00 | 1,85 |
| 17:00 | 1,30 | 2,41 |
| 18:00 | 1,50 | 2,78 |
| 19:00 | 1,40 | 2,59 |
| 20:00 | 1,10 | 2,04 |
| 21:00 | 0,80 | 1,48 |
| 22:00 | 0,50 | 0,93 |
| 23:00 | 0,35 | 0,65 |
| 24:00 | 0,25 | 0,46 |

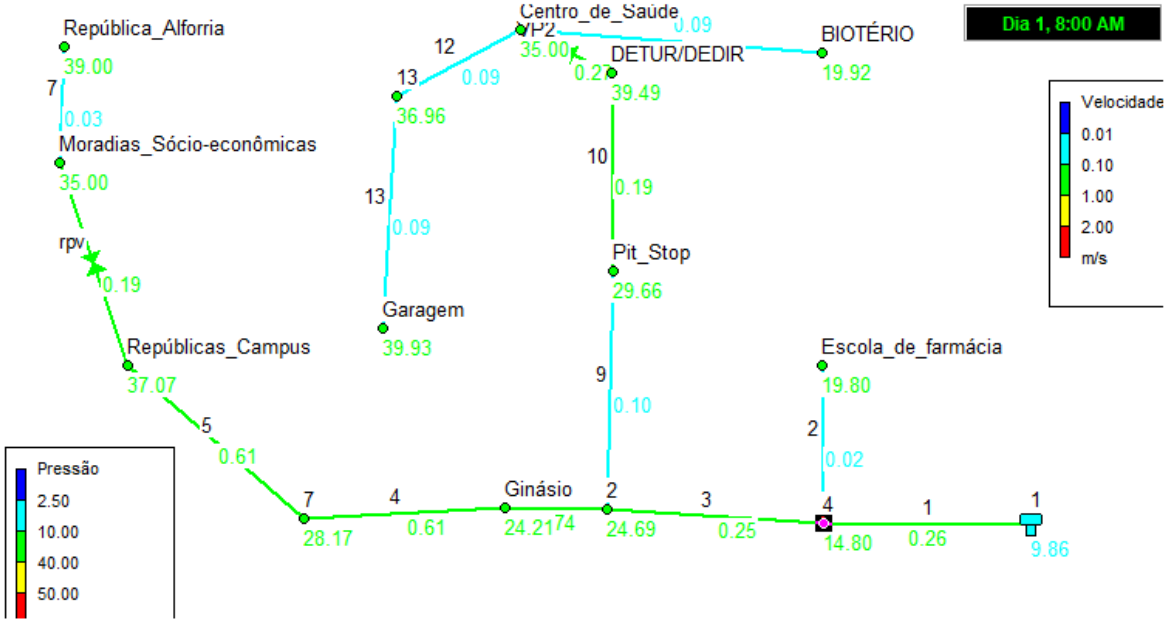


# APÊNDICE C – MAPAS DA REDE

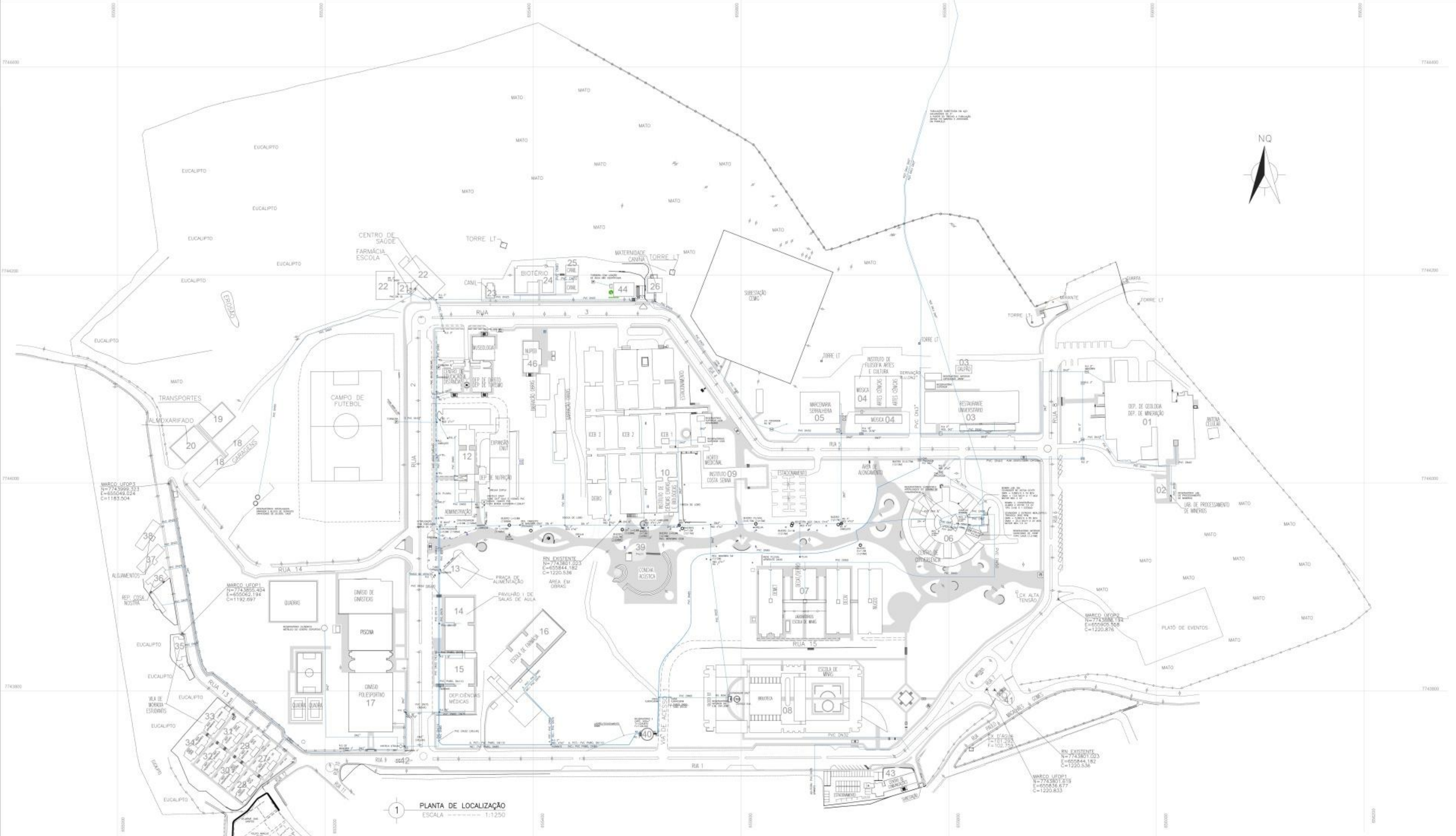
## APENDICE C.1 – MAPA DO CENÁRIO BASE




## APÊNDICE C.2 – MAPA DO CENÁRIO PÓS VPR



# ANEXO A- MAPEAMENTO DA REDE



1 PLANTA DE LOCALIZAÇÃO
ESCALA 1:1250

## QUADRO DE EDIFICAÇÕES

| | EDIFICAÇÃO | ÁREA DE PROJEÇÃO | Nº DE PAVIMENTOS | ÁREA CONSTRUÍDA |
|---|---|---|---|---|
| 01 | DEGEO / DEMIN | 5804,75 m² | 02 | 5744,95 m² |
| 02 | LABORATÓRIO DEGEO – DEMIN | 210,11 m² | 02 | 234,91m² |
| 03 | RU – RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO | 2777,70 m² | 02 | 3440,01 m² |
| 04 | IFAC –DEART/ DEMUS | 1721,07 m² | 01 | 1721,07m² |
| 05 | MARCENARIA E SERRALHERIA | 1139,67 m² | 01 | 1139,67 m² |
| 06 | CENTRO DE CONVERGÊNCIA | 3104,77 m² | 04 | 7669,95 m² |
| 07 | LABORATÓRIO DA ESCOLA DE MINAS | 4973,29 m² | 02 | 7600,82 m² |
| 08 | ESCOLA DE MINAS | 5150,44 m² | 02 | 10441,16 m² |
| 09 | INSTITUTO COSTA SENNA | 1552,62 m² | 01 | 1552,62 m² |
| 10 | ICEB | 8996,59 m² | 03 | 20377,69 m² |
| 11 | DEDIR / DETUR / CEAD / MUSEOLOGIA | 1542,34 m² | 03 | 4451,36 m² |
| 12 | ENUT | 3243,75 m² | 01 | 3243,75 m² |
| 13 | CENTRO DE VIVÊNCIA | 576,84 m² | 02 | 938,79 m² |
| 14 | BLOCO DE SALAS DE AULA | 1322,28 m² | 02 | 2569,50 m² |
| 15 | DECME | 1322,45 m² | 02 | 2576,18 m² |
| 16 | ESCOLA DE FARMÁCIA | 1843,60 m² | 02 | 3641,31 m² |
| 17 | CEDUFOP | 3080,00 m² | 02 | 4360,00 m² |
| 18 | BLOCO DE SERVIÇOS | 879,04 m² | 02 | 1216,13 m² |
| 19 | TRANSPORTES | 972,93 m² | 02 | 1039,12 m² |
| 20 | ALMOXARIFADO | 600,00 m² | 02 | 600,00 m² |
| 21 | FARMÁCIA ESCOLA | 104,81 m² | 02 | 158,99 m² |
| 22 | CENTRO DE SAÚDE | 1065,70 m² | 03 | 1732,72 m² |
| 23 | CANIL 01 | 70,88 m² | 01 | 70,88 m² |
| 24 | BIOTÉRIO | 707,75 m² | 01 | 707,75 m² |
| 25 | CANIL 02 | 85,50 m² | 01 | 85,50 m² |
| 26 | MATERNIDADE CANINA | 189,75 m² | 01 | 189,75 m² |
| 27 | REPÚBLICA CONVENTO – QC | 321,17 m² | 03 | 453,38 m² |
| 28 | REPÚBLICA TIGRADA – TOCA | 321,17 m² | 03 | 453,38 m² |
| 29 | REPÚBLICA DOCE MISTURA – UPA | 321,17 m² | 03 | 453,38 m² |
| 30 | REPÚBLICA PASARGADA – BASTILHA | 321,17 m² | 03 | 453,38 m² |
| 31 | REPÚBLICA COXIXO – COVIL | 321,17 m² | 03 | 453,38 m² |
| 32 | REPÚBLICA PERIPATUS – SENZALA | 321,17 m² | 03 | 453,38 m² |
| 33 | REPÚBLICA ARTE&MANHA – LUMIAR | 321,17 m² | 03 | 453,38 m² |
| 34 | REPÚBLICA VIRASAIA – PALMARES | 321,17 m² | 03 | 453,38 m² |
| 35 | REPÚBLICA OVELHA NEGRA | 188,82 m² | 01 | 188,82 m² |
| 36 | REPÚBLICA COSA NOSTRA | 188,82 m² | 01 | 188,82 m² |
| 37 | MORADIAS ESTUDANTIS 01 | 277,67 m² | 04 | 1098,81 m² |
| 38 | MORADIAS ESTUDANTIS 02 | 277,67 m² | 03 | 825,10 m² |
| 39 | CONCHA ACÚSTICA | 50,32 m² | 01 | 95,28 m² |
| 40 | RESERVATÓRIO | 94,98 m² | 01 | 94,98 m² |
| 41 | PORTARIA 01 | 12,56 m² | 01 | 12,56 m² |
| 42 | PORTARIA 02 | 5,76 m² | 01 | 5,76m² |
| 43 | CENTRO DE COMUNICAÇÃO | 462,90 m² | 03 | 1388,70m² |
| 44 | LABORATÓRIO DE PRÁTICAS CIRÚRGICAS | 268,00 m² | 01 | 268,00m² |
| 45 | GUARITA | 22,23 m² | 01 | 22,23 m² |
| 46 | NUPEB | 2846,27 m² | 07 | 8854,27m² |

## INFORMAÇÕES ADICIONAIS

LEGENDA:

- PRÉDIOS EXISTENTES
- PASSEIO
- RAMPA
- CERCA TELA
- CERCA ARAME
- PONTO DE ÔNIBUS
- POSTE CIMENTO
- TELEFONE PÚBLICO
- MEIO-FIO
- MURO
- PORTÃO
- ESCADA
- BUEIRO
- CAIXA
- CAIXA COM REGISTRO
- REDE DE ÁGUA

NOTAS:

1 – AS COORDENADAS ESTÃO GEORREFERENCIADAS AO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO, DATUM SAD-69, MERIDIANO CENTRAL 45°W.
2 – ALTITUDE ORTOMÉTRICA CALCULADA ATRAVÉS DO SOFTWARE MAPGEO2004 (IBGE).
3 – AZIMUTES E DISTÂNCIAS CALCULADOS NO PLANO DE PROJEÇÃO UTM.
4 – DIMENSÕES EM CENTÍMETRO, DIÂMETROS EM MILÍMETRO E ELEVAÇÕES EM METRO, EXCETO ONDE INDICADO.

PARA USO DA PREFEITURA MUNICIPAL DE OURO PRETO

PARA USO DO PROJETISTA

**EDIFICAÇÕES**

| PROJETO EM APROVAÇÃO | | | | EDIFICAÇÕES EXISTENTES | |
|---|---|---|---|---|---|
| ÁREA A DEMOLIR | - | COEFICIENTE DE APROVEITAMENTO | — | ÁREA CONSTRUÍDA | — |
| ÁREA A CONSTRUIR | — | TAXA DE OCUPAÇÃO | — | ÁREA DE PROJEÇÃO | — |
| ÁREA DE PROJEÇÃO | — | Nº DE UNIDADES RESIDENCIAIS | — | COEFICIENTE DE APROVEITAMENTO | — |
| ÁREA TOTAL PERMEÁVEL | — | Nº DE UNIDADES NÃO RESIDENCIAIS | — | TAXA DE OCUPAÇÃO | — |
| TAXA DE PERMEABILIDADE | — | Nº DE PISOS ACIMA DO NÍVEL DA RUA | — | Nº DE UNIDADES | — |

**TERRENO**

| Nº DO LOTE | Nº DA QUADRA | BAIRRO | ÁREA |
|---|---|---|---|
| - | - | BAUXITA | 648.740,00 m² |

LOGRADOURO(S) NOME(S): CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESTE PROJETO FOI FEITO EM PARCERIA COM A PREFEITURA DO CAMPUS UNIVERSITÁRIO MORRO DO CRUZEIRO, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO.
O LEVANTAMENTO CADASTRAL DA REDE SE REFERE AO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DA ALUNA DÉBORA FABIANA DA SILVA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA CIVIL. ESTE TRABALHO FOI CONCLUÍDO SOB ORIENTAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO DO PROFESSOR GILBERTO QUEIROZ DA SILVA.

PROPRIETÁRIO: FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ID-CPF/CGC/CNPJ: 23070659/0001-10

**PROJETO**

TÍTULO: —
USO: INSTITUCIONAL
DETALHE: LEVANTAMENTO CADASTRAL DE REDE DE ABASTECIMENTO
DATA: FEV/2014
FOLHA: 01/01

**PREFEITURA**

Nº DO DESENHO | ARQUIVO | Nº DO PROCESSO | OURO PRETO / /
NUMERAÇÃO FORNECIDA (LOGRADOURO)
DATA DA AP. ANTERIOR / /