



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



Filipe Moreira Pio Fernandes

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E PROPOSIÇÃO DE
MELHORIAS PARA A ADUTORA DO SISTEMA DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA DO CAMPUS MORRO
DO CRUZEIRO - UFOP**

Ouro Preto

2026

Filipe Moreira Pio Fernandes

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E PROPOSIÇÃO
DE MELHORIAS PARA A ADUTORA DO
SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DO
CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO - UFOP

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Engenharia Urbana da
Universidade Federal de Ouro Preto como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheira Urbanista.

Orientador: Dr. Paulo de Castro Vieira

Coorientadora: Ms. Almir Aparecido Malta

Ferreira

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F363a Fernandes, Filipe Moreira Pio.

Avaliação de desempenho e proposição de melhorias para a adutora do sistema de abastecimento de água do Campus Morro do Cruzeiro - UFOP. [manuscrito] / Filipe Moreira Pio Fernandes. - 2026.
187 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Castro Vieira.

Coorientador: Prof. Me. Almir Aparecido Malta Ferreira.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Engenharia hidráulica. 2. Hidrologia. 3. Modelos Hidrológicos. 4. Adutora de Água. I. Vieira, Paulo de Castro. II. Ferreira, Almir Aparecido Malta. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. 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

Filipe Moreira Pio Fernandes

Avaliação de desempenho e proposição de melhorias para a adutora do sistema de abastecimento de água do campus Morro do Cruzeiro - UFOP

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)
[Mestre] - Almir Aparecido Malta Ferreira - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutor] - Marina Neves Merlo - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Graduado] - Júlio Cesar de Barros Nascimento - (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 16/09/2026



Documento assinado eletronicamente por **Paulo de Castro Vieira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/09/2026, às 10:36, 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 **1195776** e o código CRC **D2F6AFB1**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me conceder força, sabedoria e saúde para superar os desafios e concluir esta etapa.

À minha família, em especial ao meu pai, Rogério, e à minha mãe, Soraya, pelo amor incondicional, pelos sacrifícios diários e por serem o meu porto seguro em todos os momentos. Sem o apoio e a confiança de vocês, a realização deste sonho não seria possível.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Castro Vieira, pela paciência, dedicação e condução deste trabalho. Seu rigor científico foi fundamental para o meu amadurecimento como futuro engenheiro.

À gloriosa Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), especialmente ao Departamento de Engenharia Urbana (DEURB), que compartilharam conhecimentos valiosos e consolidaram a minha formação profissional, ética e humana. À Fundação Gorceix, pelo indispensável suporte financeiro e institucional ao longo da minha trajetória; e à Prefeitura Universitária (PRECAMP), pela disponibilização dos dados e instalações essenciais para a realização desta pesquisa.

Por fim, aos meus amigos e colegas da Engenharia Urbana, pela ajuda mútua, pela parceria nos estudos e pela amizade sincera que levarei para a vida.

RESUMO

A operação de infraestruturas hídricas envelhecidas é um desafio na gestão universitária. Este trabalho objetivou avaliar o desempenho hidráulico do sistema adutor do Campus Morro do Cruzeiro da UFOP e propor o dimensionamento de uma nova adutora, considerando critérios de eficiência econômica e o comportamento em regimes permanente e transitório. A metodologia abrangeu espacialização no QGIS, modelagem no EPANET, análise de transientes no Allievi — com verificação analítica pelo Método de Crawford-Parmakian —, e minimização do Custo de Ciclo de Vida (LCC) via VPL para 25 anos. O diagnóstico revelou pressões críticas de -9,70 m.c.a. na Escola de Minas e risco de cavitação (-8,9 m.c.a.) sob transiente desprotegido. A solução otimizada resolve essas patologias por meio de um recalque escalonado: a bomba existente recalca a água até um novo reservatório na Escola de Minas e, a partir de uma nova casa de bombas ali instalada, a motobomba KSB Multitec 50-4.1 abastece os demais setores em Ferro Fundido DN 100. Sob transiente, a proteção combinada de volante de inércia ($0,750 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$) e três ventosas DN 50 na linha principal mitigou o vácuo, mantendo a pressão mínima em 90 m.c.a. Conclui-se que o sistema contribui para o atendimento das diretrizes da NBR 12215 (2017), elevando a confiabilidade operacional do abastecimento e otimizando o ciclo de vida do ativo com custos operacionais (OPEX) adequados para a instituição.

Palavras-chave: Comportamento hidráulico; Modelagem hidráulica computacional; Transiente hidráulico; Gestão de ativos.

ABSTRACT

The operation of aging water infrastructures is a continuous challenge in university management. This work aimed to evaluate the hydraulic performance of the current water supply system at the Morro do Cruzeiro Campus of UFOP and propose the design of a new pipeline, considering economic efficiency criteria and behavior under steady and transient states. The methodology included spatialization in QGIS, steady-state modeling in EPANET, dynamic analysis of hydraulic transients in Allievi—with analytical verification using the Simplified Crawford-Parmakian Method—and financial sizing focused on minimizing the Life Cycle Cost (LCC) through Net Present Value (NPV) over a 25-year horizon. The diagnosis of the existing system revealed critical pressures of -9.70 mH₂O at the School of Mines and cavitation risks (-8.9 mH₂O) under unprotected transient conditions. The optimized solution resolves these pathologies through a staged pumping system: the existing pump supplies water to a new reservoir at the School of Mines, and from a newly installed pump house on-site, a KSB Multitec 50-4.1 pump supplies the remaining sectors using DN 100 ductile iron pipes. Under transient conditions, the combined protection of a flywheel (0.750 kg·m²) and three DN 50 air valves on the main line mitigated the vacuum, maintaining a minimum pressure of 90 mH₂O. It is concluded that the system contributes to compliance with the NBR 12215 (2017) guidelines, increasing the operational reliability of the campus water supply and optimizing the asset's life cycle with appropriate operational expenditures (OPEX) for the institution.

Keywords: Hydraulic behavior; Computational hydraulic modeling; Hydraulic transientes; Asset management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema metodológico.....	31
Figura 2 - Patologias identificadas na Adutora 3	33
Figura 3 - Dispositivos operacionais da Adutora 3.....	33
Figura 4 - Curva característica da bomba KSB Multitec 50-3.1.....	35
Figura 5 - Esquema geral do sistema de abastecimento.....	33
Figura 6 - Perfil altimétrico Departamento de Geologia.....	34
Figura 7 - Perfil altimétrico Departamento de Minas.....	35
Figura 8 - Perfil altimétrico Centro de Convergência.....	36
Figura 9 - Perfil altimétrico Escola de Minas.....	37
Figura 10 - Perfil altimétrico Restaurante Universitário.....	38
Figura 11 - Modelo hidráulico da rede no EPANET (Sistema Atual)	52
Figura 12 - Perfil piezométrico - Escola de Minas.....	56
Figura 13 - Perfil piezométrico – Restaurante Universitário	57
Figura 14 - Perfil piezométrico – Convergência	58
Figura 15 - Perfil piezométrico – Departamento de Geologia	59
Figura 16 - Perfil piezométrico –Departamento de Minas	60
Figura 17- Curva do Sistema versus Curva da Bomba (Sistema Atual).....	63
Figura 18 - Modelo transitório da adutora no Allievi (Sistema Atual).....	67
Figura 19 - Envoltória de pressões sem proteção hidráulica (Sistema Atual - Allievi).	70
Figura 20 Representação simplificada da envoltória.....	71
Figura 21 - Pressões residuais - Restaurante Universitário	80
Figura 22 - Pressões residuais - Escola de Minas	81

Figura 23 - Pressões residuais - Nó de convergência.....	82
Figura 24 - Pressões residuais – DEMIN	83
Figura 25 - Pressões residuais – DEGEO	84
Figura 26 - Perfil piezométrico – Restaurante	88
Figura 27 - Perfil piezométrico – Escola de Minas	89
Figura 28 - Perfil piezométrico – Centro de Convergência.....	90
Figura 29 - Perfil piezométrico – Departamento de Minas	91
Figura 30 - Perfil piezométrico – Departamento de Geologia.....	92
Figura 31 - Representação do sistema no software Allievi (Alternativa A).	95
Figura 32 - Envoltória de pressões transitórias no cenário sem proteção: Ramal Restaurante DEFOFO	98
Figura 33 - Envoltória de pressões transitórias no cenário sem proteção: Ramal Restaurante FOFO	100
Figura 34 – Representação simplificada da envoltória para a tubulação (FOFO)...	102
Figura 35 - Representação simplificada da envoltória para a tubulação (DEFOFO).	102
Figura 36 - Curva característica da bomba KSB Multitec 50-4.1 (1 estágio).....	104
Figura 37 - Layout espacial do modelo hidráulico da Alternativa B	105
Figura 38 - Perfil piezométrico - Novo reservatório.	106
Figura 39 - Perfil piezométrico - Reservatório Escola de Minas	107
Figura 40 - Perfil piezométrico - Restaurante Universitário	108
Figura 41 - Perfil piezométrico - Nó de convergência.....	109
Figura 42 - Perfil piezométrico – DEGEO.....	110
Figura 43 - Perfil piezométrico – DEMIN	111

Figura 44 - Curva do Sistema versus Curva da Bomba	114
Figura 45 - Perfil piezométrico - Novo reservatório (mPVC)	117
Figura 46 - Perfil piezométrico - Escola de Minas (mPVC)	118
Figura 47 - Perfil piezométrico - Restaurante (mPVC)	119
Figura 48 - Perfil piezométrico - Convergência (mPVC).....	120
Figura 49 - Perfil piezométrico - DEGEO (mPVC).....	121
Figura 50 - Perfil piezométrico - DEMIN (mPVC)	122
Figura 51- Curva do Sistema versus Curva da Bomba (Recalque Secundário).....	128
Figura 52- Envoltória de pressões transitórias (FOFO)	134
Figura 53 Envoltória de pressões transitórias (mPVC)	135
Figura 54 - Envoltória de pressões transitórias (mPVC)	137
Figura 55- Pressões transitórias com volante de inércia (mPVC).....	144
Figura 56 - Pressões transitórias com volante de inércia– Ramal RU (FOFO)	145
Figura 57 - Pressões transitórias com ventosas DN 50 (DEFOFO)	147
Figura 58- Envoltória de pressões transitórias com proteção isolada por ventosas (FOFO)	148
Figura 59- Pressões transitórias com proteção combinada DEFOFO	151
Figura 60 - Pressões transitórias com proteção combinada (FOFO)	152
Figura 61 - Croqui espacial do sistema de abastecimento de água do Campus Morro do Cruzeiro	159
Figura 62 - Envoltória de pressões transitórias no cenário sem proteção para a de Ferro Fundido (FOFO)	161
Figura 63 - Envoltória de pressões transitórias sem proteção – mPVC	162
Figura 64 - Pressões transitórias com volante de inércia – FOFO.....	164

Figura 65 - Pressões transitórias com volante de inércia – mPVC	165
Figura 66 - Pressões transitórias com ventosas DN 50 – mPVC.....	167
Figura 67 - Pressões transitórias com ventosas DN 50 – FOFO	168
Figura 68- Envoltória de pressões transitórias sob a Proteção Combinada (Volante de Inércia + Ventosas)	170
Figura 69 - Pressões transitórias com proteção combinada – FOFO	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ferramentas computacionais utilizadas.....	30
Tabela 2 - Características das tubulações modeladas	39
Tabela 3 - Capacidades dos reservatórios	40
Tabela 4 - Características dos trechos da adutora	51
Tabela 5 - Dados de entrada do modelo EPANET	53
Tabela 6 - Pressões nodais do sistema atual	54
Tabela 7 - Vazões e velocidades do sistema atual.....	54
Tabela 8 - Pressões residuais críticas do sistema atual	55
Tabela 9 - Dados hidromecânicos do sistema atual.....	65
Tabela 10 - Parâmetros físicos do modelo transitório	65
Tabela 11 - Indicadores de risco hidráulico do sistema atual.....	66
Tabela 12 - Verificação analítica das pressões mínimas	66
Tabela 13 - Propriedades hidráulicas e celeridade	68
Tabela 14 - Dados operacionais da motobomba.....	68
Tabela 15 - Comparação hidráulica das alternativas	74
Tabela 16 - Especificações das elevatórias propostas	75
Tabela 17 - Análise econômica das alternativas.....	76
Tabela 18 - Pressões nodais – Alternativa A.....	77
Tabela 19 - Vazões e velocidades – Alternativa A	78
Tabela 20 - Pressões críticas - Alternativa A.....	79
Tabela 21 - Pressões nodais - Alternativa A	86
Tabela 22 - Vazões e velocidades - Alternativa A (EPANET)	86

Tabela 23 - Pressões residuais críticas simuladas na Alternativa A (EPANET).....	87
Tabela 24 - Parâmetros hidromecânicos globais de entrada.....	93
Tabela 25- Parâmetros físicos e adimensionais	94
Tabela 26 - Redução de carga e pressões mínimas analíticas por rota de manobra	94
Tabela 27 - Propriedades geométricas e celeridade de onda calculada para a Alternativa A (mPVC)	96
Tabela 28 - Propriedades geométricas e celeridade de onda calculada para a Alternativa A (FOFO).....	96
Tabela 29 - Parâmetros operacionais e mecânicos da elevatória.....	97
Tabela 30 - Pressões nodais - Alternativa B.....	112
Tabela 31- Vazões e velocidades - Alternativa B.....	113
Tabela 32 - Verificação de conformidade normativa para pressões residuais e velocidades	115
Tabela 33 - Pressões nodais – Alternativa B (mPVC).....	116
Tabela 34 - Vazões e velocidades - Alternativa B (mPVC)	116
Tabela 35- Pressões nodais - Alternativa B (FOFO).....	124
Tabela 36 - Vazões e velocidades - Alternativa B (FOFO)	124
Tabela 37 - Pressões nodais - Alternativa B (mPVC - recalque Bomba 4.1)	125
Tabela 38 - Vazões e velocidades – Alternativa B (mPVC – recalque Bomba.....	126
Tabela 39 - Verificação de conformidade normativa para pressões residuais e velocidades na Alternativa B para mPVC DEFOFO (ABNT NBR 12215)	131
Tabela 40 - Parâmetros físicos e adimensionais da Alternativa B (Escola de Minas)	132
Tabela 41 - Redução de carga e pressões mínimas analíticas (FOFO e DEFOFO)	132

Tabela 42 - Comparação Quantitativa Global de Desempenho Hidráulico (Regime Permanente).....	138
Tabela 43 - Matriz de Análise Crítica das Alternativas Propostas.....	139
Tabela 44 - Dimensionamento do volante de inércia.....	142
Tabela 45 - Efeito do volante de inércia nas pressões transitórias	142
Tabela 46 - Desempenho hidráulico das ventosas DN 50	149
Tabela 47- Desempenho da proteção combinada.....	153
Tabela 48 - Plano de instalação das ventosas	155
Tabela 49 - Comparação entre dispositivos de proteção.....	157
Tabela 50 - Parâmetros hidromecânicos globais de recalque para a adutora da Alternativa B	160
Tabela 51 - Comparação das pressões extremas da Alternativa B	173
Tabela 52 - Plano de implantação das ventosas da alternativa B.....	174
Tabela 53 - Matriz gerencial para seleção da alternativa final	174
Tabela 54 – Comparativo entre os métodos de cálculo e modelagem aplicados ao sistema.	178

LISTA DE SIMBOLOS

A = Área da seção transversal da tubulação (m^2)
 a = Celeridade da onda de pressão (m/s)
 C_1 = Fator de fixação da tubulação (-)
 D = Diâmetro interno da tubulação (m)
 dt = Passo de tempo da simulação (s)
 dx = Passo espacial da discretização (m)
 E = Módulo de elasticidade linear do material da tubulação (Pa)
 f = Fator de atrito de Darcy-Weisbach (-)
 F = Empuxo hidráulico (N)
 g = Aceleração da gravidade (m/s^2)
 H = Carga hidráulica (m)
 H_g = Desnível geométrico (m)
 H_m = Altura manométrica total (m)
 h_f = Perda de carga distribuída (m)
 h_{fl} = Perda de carga localizada (m)
 h_t = Perda de carga total (m)
 I = Momento de inércia do conjunto rotativo ($kg \cdot m^2$)
 i = Perda de carga unitária (m/m)
 j = Taxa mínima de atratividade (% a.a.)
 K_L = Coeficiente de perda localizada (-)
 L = Comprimento da tubulação (m)
 n = Horizonte de projeto ou número de períodos (anos)
 N = Rotação da motobomba (rpm) p = Pressão (Pa)
 PB = Potência da motobomba (W) Q = Vazão (m^3/s)
 $Q_{consumido}$ = Vazão consumida no nó (m^3/s)
 $Q_{produzido}$ = Vazão produzida pelo sistema (m^3/s)
 Q_{in} = Vazão afluente ao nó (m^3/s)
 Q_{out} = Vazão efluente do nó (m^3/s)

Re = Número de Reynolds (-)
 t = Tempo (s)
 T_c = Tempo de parada da bomba (s)
 v = Velocidade média do escoamento (m/s)
 V = Volume (m³)
 VPL = Valor Presente Líquido (R\$)
 ΔH = Variação da carga hidráulica (m)
 Δp = Variação da pressão (Pa)
 ∂ = Operador de derivada parcial (-)
 ε = Rugosidade absoluta da tubulação (m)
 η = Rendimento global da motobomba (-)
 γ = Peso específico da água (N/m³)
 ν = Viscosidade cinemática (m²/s)
 ρ = Massa específica da água (kg/m³)
 θ = Ângulo da curva da tubulação (° ou rad)

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
BEP – Best Efficiency Point (Ponto de Melhor Rendimento)
CAPEX – Capital Expenditure (Despesas de Capital / Custo de Implantação)
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CFL – Critério de Courant-Friedrichs-Lewy
DEFOFO – Diâmetro Equivalente ao Ferro Fundido
DEGEO – Departamento de Geologia
DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas
DEURB – Departamento de Engenharia Urbana
DN – Diâmetro Nominal
EPANET – Environmental Protection Agency Network
FOFO – Ferro Fundido
FUNASA – Fundação Nacional de Saúde
ITA – Instituto Tecnológico d'Água
IPD – Índice de Perdas na Distribuição
LCC – Custo de Ciclo de Vida (Life Cycle Cost)
m.c.a. – Metros de Coluna d'Água
MG – Minas Gerais
mPVC – Policloreto de Vinila Modificado
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU – Organização das Nações Unidas
OPEX – Operational Expenditure (Despesas Operacionais)
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
PRECAMP – Prefeitura Universitária
QGIS – Quantum GIS
RHO – Reservatórios Hidropneumáticos
RJ – Rio de Janeiro
RU – Restaurante Universitário
SAA – Sistema de Abastecimento de Água

SCL – Separação de Coluna Líquida
SIG – Sistemas de Informação Geográfica
SIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TAU – Tanques de Alimentação Unidirecional
TMA – Taxa Mínima de Atratividade
UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto
UPV – Universitat Politècnica de València
USP – Universidade de São Paulo
VPL – Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Justificativa	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Adutoras de abastecimento de água	5
2.2	Dimensionamento hidráulico de adutoras.....	7
2.3	Transiente hidráulico em adutoras.....	16
2.4	Dispositivos de controle de transientes	20
2.5	Empuxos hidráulico e blocos de ancoragem	21
2.6	Modelagem hidráulica computacional.....	23
2.7	Gestão de ativos aplicada ao planejamento urbano	27
3	METODOLOGIA	30
3.1	Levantamento de dados e caracterização da área	32
3.2	Diagnóstico do sistema atual (regimes permanente e transitório)	40
3.3	Dimensionamento econômico de alternativas (regime permanente)	43
3.4	Medidas de proteção ao golpe de Aríete	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Diagnóstico da adutora existente.....	50
4.1.1	Análise em regime permanente	51
4.1.2	Análise em regime transitório.....	64

4.2	Dimensionamento hidráulico de trecho da adutora.....	72
4.2.1	Análise de nova adutora com traçado atual	77
4.2.2	Análise de nova adutora para novo traçado.....	103
4.2.3	Comparação Global das Alternativas e Fechamento	138
4.3	Medidas de proteção e controle de transientes hidráulicos	139
4.3.1	Dimensionamento de Proteções: Alternativa A (Traçado Atual) ...	141
4.3.2	Dimensionamento de Proteções: Alternativa B	158
4.3.3	Amortecimento Isolado por Válvulas Ventosas	166
4.4	Síntese e Validação dos Resultados na Literatura	175
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	178
5.1	Conclusões técnicas.....	179
5.2	Conclusões econômicas	179
5.3	Conclusões operacionais.....	179
5.4	Conclusões científicas	180
5.5	Limitações da pesquisa	180
5.6	Sugestões para trabalhos futuros	181
	Referências.....	183

1 INTRODUÇÃO

O abastecimento de água é um serviço essencial para a saúde pública e o desenvolvimento socioeconômico, diretriz reconhecida globalmente pelo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (Organização das Nações Unidas, 2015) e monitorada internamente pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2022). No Brasil, a busca por eficiência, impulsionada pelo Novo Marco Legal do Saneamento e pela regulamentação de potabilidade da Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021), contrasta com os dados mais recentes do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), que apontam que o Índice de Perdas na Distribuição (IPD) superou a marca de 40,3% no cenário nacional.

Para mitigar essas ineficiências, a operação de sistemas de adução exige o controle rigoroso de variáveis como a vazão, a perda de carga e a eficiência energética (Lima, 2009; Porto, 2006). Um dos principais desafios físicos nessas redes é a ocorrência de transientes hidráulicos (golpe de aríete). Este fenômeno, gerado pela conversão súbita de energia cinética em energia de pressão, provoca oscilações extremas que ultrapassam os limites estruturais dos tubos, exigindo a instalação de dispositivos de proteção, como ventosas e válvulas de alívio (Barbosa et al., 2018; Boulos et al., 2005; Chaudhry, 2014).

Este cenário de vulnerabilidade reflete-se no sistema principal de abastecimento do Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Um diagnóstico recente, formalizado pela Prefeitura Universitária, atestou que a infraestrutura opera em estado precário, com tubulações de recalque corroídas, ausência de redundância nas bombas e inexistência de dispositivos de proteção contra transientes (Universidade Federal de Ouro Preto, 2023). Esta condição contraria as recomendações

normativas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992, 2017).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo dimensionar e avaliar o comportamento hidráulico de uma nova adutora para o campus, em regimes permanente e transitório, propondo soluções que contribuam para preservar a integridade da rede, a eficiência energética e a continuidade do abastecimento.

1.1 Objetivo

Avaliar o desempenho hidráulico do sistema adutor atual do Campus Morro do Cruzeiro e, com base neste diagnóstico, propor o dimensionamento de uma nova adutora, considerando critérios de eficiência econômica e a análise do comportamento em regimes permanente e transitório.

1.2 Objetivos Específicos

- I. Diagnosticar as condições hidráulicas atuais da adutora principal por meio de modelagem em regimes permanente e transitório, identificando suas limitações de funcionamento.
- II. Dimensionar em regime permanente, com base em critérios de eficiência econômica, duas alternativas hidráulicas para o sistema adutor: (a) mantendo o traçado existente; b) propondo a subdivisão da linha com a inserção de um reservatório de distribuição na Escola de Minas.
- III. Analisar o comportamento da alternativa dimensionada em regime transitório e propor dispositivos de proteção para elevar a integridade e a segurança da solução proposta.

1.3 Justificativa

O sistema de abastecimento de água do Campus Morro do Cruzeiro é uma infraestrutura crítica cuja operação contínua é vital para as atividades acadêmicas e administrativas da UFOP. Falhas ou ineficiências neste sistema transcendem a engenharia hidráulica, impactando diretamente a gestão de ativos da universidade. Essa estrutura afeta o planejamento de expansão do campus, a eficiência dos custos com energia elétrica e a resiliência institucional.

Diagnósticos institucionais recentes evidenciam a vulnerabilidade da infraestrutura atual, que opera sem redundância de equipamentos, controle automatizado ou proteção contra transientes hidráulicos (golpe de aríete). O estado avançado de corrosão das tubulações da adutora de recalque agrava o risco de sobrepressões e rompimentos repentinos, ameaçando a continuidade do fornecimento da única fonte de abastecimento do campus (Universidade Federal de Ouro Preto, 2023).

Economicamente, espera-se que o novo dimensionamento otimize os custos de operação e manutenção ao adequar os diâmetros da adutora. Busca-se com esta intervenção reduzir as perdas de carga e mitigar os efeitos dos transientes, com o intuito de prolongar a vida útil do ativo. Pretende-se, além disso, permitir que o sistema elevatório opere próximo ao seu ponto de melhor rendimento, minimizando o consumo de energia elétrica e assegurando a viabilidade financeira da operação.

Socialmente, promover a segurança hídrica do abastecimento de água é premissa básica para as atividades de ensino e pesquisa. Falhas estruturais ou transientes não controlados comprometem serviços essenciais do campus, incluindo laboratórios e o Restaurante Universitário.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura nacional recente demonstra uma forte preocupação com a eficiência e a segurança dos sistemas, impulsionada pelo Novo Marco Legal do Saneamento (Brasil, 2020). Os estudos podem ser agrupados em duas frentes que este trabalho busca unificar: a gestão de ativos e a análise de risco técnico (transientes). Na frente de gestão e planejamento, trabalhos como o de Souza e Soares (2023) abordam metodologias para detecção de vazamentos e diagnóstico de sistemas. Em um nível mais amplo, Campos (2024) discute a gestão e regulação de recursos hídricos, um tema que dá o pano de fundo para a tomada de decisão em instituições como a UFOP.

Na frente de análise de risco técnico, a literatura aprofunda-se na modelagem de transientes. Estudos da Universidade de São Paulo (USP), como o de Lessa (1984), continuam a refinar a análise de transientes em sistemas complexos de adução. Alinhado a isso, Paiva et al. (2020) focaram na modelagem de golpe de aríete considerando a cavitação. Notavelmente, o trabalho de Sousa (2023) aplica diretamente o Método das Características para o estudo de transientes, validando a abordagem metodológica central deste Projeto Final de Curso.

Portanto, este trabalho se insere diretamente neste estado da arte recente, ao aplicar uma metodologia de análise técnica robusta (Método das Características, análise de transientes) para resolver um problema crítico de gestão de ativos (o diagnóstico da rede precária da UFOP), alinhando-se às diretrizes do novo Marco Legal de Saneamento Básico e às pesquisas de ponta em engenharia hidráulica para compreender a complexa interação entre o desempenho hidráulico, o risco operacional e a gestão de ativos em infraestruturas críticas.

2.1 Adutoras de abastecimento de água

Segundo Tsutiya (2006), adutoras de água são sistemas de tubulações destinados ao transporte de água em grande volume, conectando as unidades de um sistema de abastecimento. Elas são responsáveis por conduzir a água desde a captação (represas ou poços) até as estações de tratamento e, posteriormente, aos reservatórios de distribuição. Corrêa (2014) reforça essa definição ao diferenciar as adutoras das redes de distribuição, explicando que, em seu conceito básico, as adutoras não possuem ramais prediais ou para abastecer distribuidores de rua, embora possam se dividir em tubulações menores para atender diferentes setores do sistema.

O projeto de adutoras transcende a análise puramente hidráulica, sendo um componente fundamental do planejamento e gestão urbana. Fatores como a escolha de materiais, as normas de roteamento e os impactos sociais são determinantes. O roteamento (traçado) de uma adutora interfere diretamente no uso e ocupação do solo, podendo exigir desapropriações e impactar a comunidade local, o que demanda uma análise de viabilidade técnica, econômica e social.

Por serem consideradas os blocos de construção básicos de um sistema público de abastecimento, seu dimensionamento deve ser rigoroso. Nesse sentido, a NBR 12215 (2017) é a norma técnica que rege esse projeto, estipulando que se deve realizar uma análise cuidadosa do layout dos componentes em planta e perfil. Este cuidado, conforme a norma, visa garantir a correta instalação de componentes acessórios e prever áreas onde cargas dinâmicas, como as provenientes de transientes hidráulicos, possam surgir e causar deslocamento ou ruptura da linha.

A finalidade de um sistema adutor, segundo Porto (2006), é garantir o

fornecimento de água em conformidade com padrões de saúde, com fluxo e pressão adequados, a todos os locais de consumo em uma cidade. Para que essa finalidade seja atingida, a estrutura do sistema deve ser compreendida. Conforme explicam Azevedo Netto et al. (1998), a movimentação do líquido em tubulações fechadas sofre resistência da parede do tubo, o que causa uma diminuição de energia denominada perda de carga. O cálculo da perda de carga é, portanto, fundamental, pois afeta diretamente o dimensionamento dos projetos hidráulicos.

Esses projetos estruturam a rede em tubulações primárias (condutos de maior diâmetro que dão suporte) e secundárias (diâmetros reduzidos que atendem os pontos de uso) (Porto, 2006). A definição dessa estrutura não é apenas um exercício técnico, mas uma decisão central de planejamento e gestão urbana.

Nesse contexto, Silva et al. (2003) afirmam que o planejamento do sistema de transporte de água deve considerar três aspectos principais: o prazo do projeto, o volume de água a ser transportado e a duração da operação. A análise conjunta desses fatores visa otimizar a relação entre custos de implantação/operação e a eficácia do sistema. Para Lima (2009), o volume (vazão) a ser transportado é o parâmetro inicial, pois define o dimensionamento. Este volume é calculado com base na demanda da população (uso por pessoa) e nas variações de vazão ao longo do dia.

A duração da operação, por sua vez, impacta diretamente o dimensionamento hidráulico e os custos operacionais. Conforme estipula a NBR 12215 (2017), sistemas por gravidade podem operar continuamente (24 horas). Já os sistemas por recalque (bombeamento) têm seu tempo de operação otimizado, geralmente entre 16 a 20 horas diárias, desligando as bombas nos períodos de menor demanda (e maior custo) de energia elétrica.

2.2 Dimensionamento hidráulico de adutoras

O dimensionamento hidráulico de adutoras é desenvolvido admitindo-se o escoamento em regime permanente. Segundo Porto (2006), nesta condição, as propriedades do fluido e as características do escoamento, como a vazão e a pressão, mantêm-se rigorosamente constantes ao longo do tempo em uma dada seção. Esta análise é vital para o dimensionamento inicial, operação e otimização das adutoras.

A modelagem matemática fundamental para essa análise é a partir da Equação da Conservação da Energia, ou Equação de Bernoulli, aplicada a fluidos reais, conforme a Equação 1. A equação demonstra que a energia total em um ponto (carga de pressão, cinética e de elevação) é igual à energia em um segundo ponto, mais a energia perdida no trajeto (perda de carga, h_t):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_t \quad (1)$$

Onde:

- $\frac{P}{\gamma} = \text{carga de pressão (m. c. a.)}$
- $\frac{v_1^2}{2g} = \text{carga cinética (m. c. a.)}$
- $z = \text{carga de elevação (m)}$
- $h_t = \text{perda de carga total (m. c. a.)}$

A perda de carga total (h_t) representa a dissipação global de energia no escoamento, sendo a somatória da perda de carga contínua (h_f) e da perda

de carga localizada (h_{fl}). O dimensionamento em regime permanente busca determinar o diâmetro comercial e as condições de transporte de forma otimizada para o sistema. Para a estimativa analítica da parcela de perda de carga contínua (h_f), Azevedo Netto et al. (1998) apontam que a formulação mais precisa é a Equação Universal da Perda de Carga, ou Equação de Darcy-Weisbach, apresentada na Equação 2:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Onde:

- h_f = perda de carga ao longo da tubulação (m.c.a.)
- f = fator de atrito (adimensional)
- L = comprimento da tubulação (m)
- v = velocidade do fluido na tubulação (m/s)
- D = diâmetro interno da tubulação (m)
- g = aceleração da gravidade (m/s^2)

A escolha do equacionamento para o cálculo das perdas de carga é objeto de debate na literatura técnica. Enquanto Azevedo Netto et al. (1998) defendem o uso da Equação Universal de Darcy-Weisbach pela sua precisão física atrelada ao escoamento, profissionais muitas vezes recorrem a formulações empíricas, como Hazen-Williams, para simplificar projetos. Contudo, Porto (2006) ressalta que, para simulações de transientes e modelagem computacional rigorosa, a equação universal é imperativa. Em concordância, Tsutiya (2006) adverte que simplificações empíricas

mascam o comportamento hidráulico real em redes subdimensionadas, justificando a adoção de Darcy-Weisbach como padrão-ouro neste estudo.

Para a resolução analítica da perda de carga, a determinação precisa do fator de atrito f é um dos principais desafios matemáticos. A formulação proposta por Colebrook-White (1939) é amplamente consagrada na literatura hidráulica por equacionar o fator de atrito em escoamentos turbulentos, relacionando a rugosidade relativa da parede interna do conduto e o Número de Reynolds, conforme a Equação 3:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10} \left(\frac{k}{3,71 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

Onde:

- f = fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional)
- ε = Rugosidade absoluta da parede interna da tubulação (m)
- D = Diâmetro interno da tubulação (m)
- Re = Número de Reynolds do escoamento (adimensional)

Para fins práticos de dimensionamento e comparação, a perda de carga contínua h_f é frequentemente expressa como a perda de carga específica (ou unitária), i , que representa a perda de energia por metro de comprimento da tubulação, conforme a Equação 4:

$$i = \frac{h_t}{L} \quad (4)$$

Onde:

- i = perda de carga unitária (m/m)
- h_t = perda de carga total (m. c. a.)
- L = comprimento da tubulação (m)

Além das perdas de carga contínuas, decorrentes da resistência ao escoamento ao longo da tubulação retilínea, o fluido sofre dissipação de energia ao atravessar peças especiais, válvulas, curvas e transições de seção. Essas perdas pontuais, denominadas perdas de carga localizadas (h_{fl}), são classicamente estimadas pela Equação 5 geral (Azevedo Netto et al., 1998):

$$h_{fl} = K_L \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Onde:

- K_L = Coeficiente de perda de carga localizada.
- v = Velocidade média do escoamento (m/s)
- g = aceleração da gravidade (m/s²)

No dimensionamento preliminar de adutoras extensas, as perdas localizadas são frequentemente desprezadas ou estimadas de forma simplificada (como um percentual de 5% a 10% da perda contínua). Isso ocorre porque, em quilômetros de tubulações retilíneas, a dissipação de energia por atrito contínuo é ordens de grandeza superior à gerada pelas poucas peças

singulares do traçado, tornando o impacto das perdas locais irrisório na escolha do diâmetro comercial ótimo (Porto, 2006).

Entretanto, na fase de diagnóstico e avaliação da capacidade hidráulica e física de sistemas já operantes, essas perdas devem ser rigorosamente contabilizadas. Em arranjos com alta concentração de acessórios funcionais (como o interior de estações elevatórias, barriletes de sucção e válvulas de retenção) ou em redes operando no limite de sua capacidade (como a infraestrutura atual do campus), as perdas singulares acumulam-se e representam parcelas críticas da altura manométrica total. Desprezá-las nessa etapa mascararia a real deficiência energética do sistema, subestimando o risco de ocorrência de pressões negativas e prejudicando a determinação do ponto exato de operação da motobomba.

Este índice é um parâmetro fundamental para o dimensionamento econômico, pois permite comparar a eficiência hidráulica de diferentes diâmetros, independentemente do comprimento total da adutora, sendo um critério técnico limitado pela (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

O dimensionamento de uma adutora consiste, fundamentalmente, na determinação do diâmetro que resulta no melhor equilíbrio entre os custos de instalação e os custos de operação. Historicamente, o método mais difundido para uma estimativa inicial rápida é a Fórmula de Bresse.

Segundo Porto (2006), esta fórmula é baseada em uma análise de minimização de custos, sendo particularmente aplicável a sistemas que operam de forma contínua. A expressão matemática é dada pela Equação 6:

$$D = K \cdot \sqrt{Q} \quad (6)$$

Onde:

- D = diâmetro interno da tubulação (m)
- Q = vazão de projeto (m^3/s)
- K = coeficiente de Bresse

Aplicabilidade e Coeficiente K

O valor de K é frequentemente adotado como 1,2 para sistemas que operam 24 horas por dia. No entanto, para sistemas de recalque (bombeamento) com operação intermitente, como o planejado para o campus da UFOP (estimado entre 16 a 20 horas), o coeficiente deve ser ajustado conforme a Equação 7 sugerida por (Azevedo Netto et al., 1998):

$$K = 1,2 \cdot \left(\sqrt{\frac{t}{24}} \right)^{0,25} \quad (7)$$

Onde:

- t = Número de horas de funcionamento diário das bombas

Para o planejamento e gestão urbana, essa análise define dois fatores críticos:

- Custo de Implantação: O diâmetro (D) da tubulação. Tubos maiores são mais caros, mas reduzem a perda de carga.
- Custo Operacional: A perda de carga (h_f) define a altura que a bomba deve vencer (em sistemas de recalque), determinando o consumo de energia elétrica, um dos maiores custos operacionais de um sistema de abastecimento.

- Gestão de Perdas: A modelagem em regime permanente permite aplicar o 'balanço hídrico', um indicador chave de eficiência na gestão do sistema.

Este balanço é a equação fundamental para a detecção de perdas, quantificando-as a partir da diferença entre o volume produzido e o volume consumido, conforme a Equação 8:

$$Perdas = Q_{produzido} - Q_{consumido} \quad (8)$$

Onde:

- $Perdas = Vazão\ de\ Perda\ total$
- $Q_{produzido} = Vazão\ Produzida$
- $Q_{consumido} = Vazão\ Consumida$

A lei de comportamento que rege um sistema adutor baseia-se na equação fundamental da conservação de energia (Equação de Bernoulli). Segundo Porto (2006), essa equação pode ser simplificada para determinar a altura manométrica total exigida Hm em função do desnível geométrico estático Hg e das perdas de carga totais por atrito h_t , sendo a relação expressa pela Equação 9 :

$$Hm = Hg + h_t \quad (9)$$

Onde:

Em um sistema com geometria e características físicas fixas, a perda de

carga total h_f guarda uma relação proporcionalmente quadrática com a vazão de escoamento Q , conforme as leis de resistência ao escoamento em condutos forçados (Azevedo Netto et al., 1998). Essa relação, que é dependente do atrito e do regime de escoamento turbulento, pode ser sintetizada analiticamente através de uma constante de resistência ou fator de atrito do sistema K , expresso pela Equação 10:

$$h_t = K \cdot Q^2 \Rightarrow K = \frac{h_t}{Q^2} \quad (10)$$

Dessa forma, ao substituir a parcela de perda de carga na relação inicial, a equação constitutiva que governa a curva de resistência de um sistema adutor é expressa conforme a Equação 11:

$$Hm = Hg + K \cdot Q^2 \quad (11)$$

Onde:

- Hm = *Altura manométrica total exigida pelo sistema*
- Hg = *Desnível geométrico*
- K = *Constante de resistência*

O dimensionamento de sistemas de recalque exige, além da determinação do diâmetro, o cálculo da energia necessária para elevar o fluido. Segundo Macintyre (1997), a potência do conjunto motobomba é diretamente proporcional à vazão de projeto, à altura manométrica total e ao peso específico do fluido, sendo inversamente proporcional ao rendimento global do equipamento. A expressão teórica para o cálculo da potência requerida (PB) é dada pela Equação 12:

$$PB = \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{1000 \cdot \eta} \quad (12)$$

Onde:

- γ = *Peso específico da água* (m^3/s)
- Q = *Vazão Bombeado* (m^3/s)
- Hm = *Altura manométrica* (m)
- η = *rendimento global*

Em projetos práticos, recomenda-se a adoção de uma margem de segurança sobre a potência calculada, prevenindo sobrecargas no motor face a eventuais variações no ponto de operação.

Para garantir a integridade mecânica da motobomba e evitar o fenômeno da cavitação, é imprescindível a verificação do Net Positive Suction Head (NPSH). Segundo Macintyre (1997), a cavitação ocorre quando a pressão absoluta do fluido no interior da bomba atinge a pressão de vapor do líquido, formando bolhas que colapsam violentamente. A condição de segurança para evitar este fenômeno é que o NPSH disponível no sistema (NPSHd) seja estritamente superior ao NPSH requerido (NPSHr) pelo fabricante da bomba:

$$NPSHd \geq NPSHr \quad (13)$$

Onde:

- $NPSHd$ = *Net Positive Suction Head disponível* (m^3/s)
- $NPSHr$ = *Net Positive Suction Head requerido* (m^3/s)

O NPSH disponível é calculado com base nas condições de instalação, propriedades do fluido e na elevação local, conforme a equação:

$$NPSHd = \frac{P_{atm}}{\gamma} \pm H_{suc} - h_{fsuc} - \frac{P_v}{\gamma} \quad (14)$$

Onde:

- H_{suc} = Carga estática de sucção (m)
- P_v = Pressão de vapor do fluido (m.c.a.)
- P_{atm} = Pressão atmosférica local (m.c.a.)

Macintyre (1997) ressalta que a pressão atmosférica (P_{atm}) diminui significativamente com o aumento da altitude. Logo, em regiões serranas de grande elevação altimétrica, o NPSHd é naturalmente reduzido, exigindo rigor no dimensionamento da instalação de sucção para impedir a cavitação.

2.3 Transiente hidráulico em adutoras

Diferente do regime permanente, o regime transiente ocorre devido a mudanças rápidas no escoamento. Segundo Tsutiya (2006), as principais razões para isso incluem o início e a parada de bombas ou o fechamento rápido de válvulas. Essas manobras geram ondas de pressão (sobrepessão) e subpressão que se propagam pelo sistema. Conforme alerta Tsutiya (2006) os riscos são significativos: as sobrepressões podem causar vazamentos até explosões, enquanto as pressões reduzidas (subpressões) podem provocar cavitação ou o colapso de tubulações de aço ou plástico.

Além das abordagens clássicas, a literatura internacional recente tem aprofundado a análise de water hammer (golpe de aríete) com foco na resiliência das infraestruturas (pipeline resilience). Pesquisas como as de Triki (2018) e Zhu et al. (2018) investigaram o comportamento dinâmico de condutos viscoelásticos sob regimes transitórios, demonstrando que a interação fluido-estrutura em matrizes poliméricas pode atenuar picos de pressão, mas exige cautela frente a fenômenos de cavitação. Adicionalmente, Bhattacharyya, Saikia e Das (2018) reforçam a importância de modelos numéricos avançados para prever tais cenários complexos, consolidando a simulação computacional integrada a dispositivos de proteção (surge protection) como diretriz fundamental na gestão de ativos.

Para quantificar a magnitude destas oscilações de pressão e avaliar a severidade dos riscos, é fundamental compreender a rapidez com que estas frentes de onda se deslocam ao longo da infraestrutura. Este parâmetro físico central é denominado celeridade. Segundo Heller e Pádua (2006), a celeridade C representa a velocidade de propagação da onda de choque (ou onda de pressão) através do meio líquido após uma perturbação brusca no regime de escoamento, como o desligamento de bombas ou fechamento de válvulas. Diferente da velocidade do som em um meio infinito, a celeridade em condutos forçados é influenciada diretamente pela elasticidade das paredes da tubulação. A Equação 15 apresentada pelos autores permite o cálculo da celeridade efetiva considerando a interação entre o fluido e o material do conduto

$$c = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{K}{E} \cdot \frac{D}{e} \cdot \frac{c_1}{e}\right)}} \quad (15)$$

Onde:

- $K = \text{módulo de elasticidade volumétrico da água } (kgf/m^2)$
- $\rho = \text{massa específica do fluido } (kg/m^3)$
- $D = \text{diâmetro interno da tubulação } (mm)$
- $e = \text{espessura da parede da tubulação } (mm)$
- $\varepsilon = \text{módulo de elasticidade linear do material da tubulação } (kgf/m^2)$
- $c1 = \text{fator relativo à fixação}$

O parâmetro Fator de Fixação ($c1$) é adotado para ajustar o cálculo conforme as condições de ancoragem do tubo. Quanto à importância do material na propagação, autores como Heller e Pádua (2006) e Tassinari (2017) destacam que materiais com baixo módulo de elasticidade linear (E), como o PVC, resultam em celeridades significativamente menores quando comparados a materiais rígidos como o aço galvanizado.

Para a estimativa simplificada de transientes hidráulicos em sistemas de recalque, o método gráfico de Crawford, sistematizado por Parmakian (1963), constitui uma ferramenta clássica de verificação analítica. Este método correlaciona a inércia rotativa do conjunto motobomba (I) — que dita o tempo de parada da máquina (Tc) — com a celeridade do sistema para calcular a sobrepressão e a subpressão decorrentes de uma manobra brusca.

A análise utiliza parâmetros adimensionais, como o parâmetro da tubulação ($2p$), para estimar a magnitude da onda de pressão antes da aplicação de modelos computacionais mais complexos. A formulação matemática do método exige, inicialmente, o cálculo do tempo de parada do conjunto motobomba (Tc), expresso pela Equação 16 (Macintyre, 1997):

$$T_c = \frac{I \cdot N^2}{365 \cdot P_b \cdot n} \quad (16)$$

Onde:

- I = *Momento de inércia do conjunto rotativo (kg.m²)*
- N = *Rotação nominal (rpm)*
- P_b = *Potência consumida pela bomba (KW)*
- n = *Rendimento global*

Em seguida, determina-se o parâmetro adimensional da tubulação (2p), que relaciona a energia cinética do fluido com a carga estática do sistema, conforme a Equação 17 (Parmakian, 1963):

$$2p = \frac{c \cdot V_0}{g \cdot H_0} \quad (17)$$

Onde:

- c = *Celalidade da onda elástica (m/s)*
- V_0 = *Velocidade inicial de escoamento em regime permanente (m/s)*
- g = *Aceleração da gravidade (m/s²)*
- H_0 = *Altura manométrica inicial (m)*

Com a relação temporal e o parâmetro da tubulação definidos, utilizam-se os ábacos de Crawford para determinar os fatores de multiplicação que resultarão na máxima sobrepressão e subpressão no sistema.

2.4 Dispositivos de controle de transientes

O manejo dos transientes hidráulicos, ou golpe de aríete, envolve as técnicas e equipamentos usados para minimizar os efeitos das mudanças repentinas de pressão em sistemas de encanamento. Essas oscilações podem resultar em pressões excessivas ou insuficientes, comprometendo os tubos e os aparelhos do sistema. A seleção de dispositivos de proteção é uma decisão de gestão de ativos, onde o custo do dispositivo é ponderado contra o risco financeiro e social de uma falha na adutora. Esses dispositivos podem ser agrupados em duas categorias principais:

Segundo Macintyre (1997), válvulas hidráulicas são elementos fundamentais que atuam como reguladoras da direção, pressão e fluxo do líquido. Elas são essenciais para a operação segura do sistema e, no contexto do manejo de transientes, desempenham funções específicas:

- **Válvulas de Controle de Pressão:** Atuam como dispositivos de segurança. Sua função é ajustar a pressão e proteger o sistema contra picos excessivos, aliviando o fluxo quando a pressão ultrapassa um limite estabelecido.
- **Válvulas de Retenção:** Conforme define Macintyre (1997), estas válvulas permitem o fluxo em uma única direção. Elas fecham automaticamente quando há sinais de inversão do escoamento, impedindo o retorno do fluido.
- **Válvulas Controladoras de Vazão:** Controlam com precisão o volume de fluido que passa pela tubulação, sendo usadas para regular a velocidade de operação de dispositivos.
- **Válvulas Direcionais:** Têm a função de orientar o caminho do fluido para diferentes partes do sistema.

No manejo de transientes, as válvulas ventosas de tríplice função desempenham um papel de proteção ativa. Sua denominação deriva de três ações distintas: a expulsão de grandes volumes de ar durante o enchimento

da rede, a purga contínua de ar acumulado sob pressão e, fundamentalmente para o controle de subpressões, a admissão rápida de ar em caso de depressão. Esta última função impede que a pressão interna caia abaixo da atmosférica, evitando o vácuo que poderia causar o colapso estrutural por esmagamento diametral em tubulações poliméricas.

A hidrometria constitui uma das principais ferramentas de gestão operacional em sistemas de abastecimento de água, permitindo quantificar vazões, volumes produzidos e consumidos, perdas aparentes e perdas reais. A instalação de macromedidores em adutoras possibilita o monitoramento contínuo do desempenho hidráulico, subsidiando ações de controle operacional, detecção de vazamentos e gestão de ativos (Heller e Pádua, 2006; Tsutiya, 2006).

Em sistemas adutores, a macromedição permite comparar a vazão efetivamente transportada com a demanda prevista em projeto, possibilitando a identificação de anomalias operacionais, aumento de perdas ou degradação do desempenho hidráulico ao longo do ciclo de vida da infraestrutura.

2.5 Empuxos hidráulico e blocos de ancoragem

Além das pressões internas atuantes ao longo da tubulação, os sistemas adutores estão sujeitos ao desenvolvimento de esforços longitudinais decorrentes da mudança da quantidade de movimento do fluido em singularidades hidráulicas, como curvas, reduções, ampliações, derivações e extremidades fechadas. Esses esforços são denominados empuxos hidráulicos e tendem a deslocar os componentes da tubulação, exigindo dispositivos estruturais capazes de absorver tais solicitações, denominados blocos de ancoragem (Azevedo Netto et al., 1998; Tsutiya, 2006).

Segundo a ABNT NBR 12215 (2017), as ancoragens devem ser previstas sempre que existirem mudanças de direção ou descontinuidades geométricas capazes de produzir esforços significativos sobre a tubulação, garantindo sua estabilidade estrutural durante a operação. A magnitude do empuxo hidráulico pode ser estimada pela Equação 18:

$$F = P * A * k \quad (18)$$

Onde:

- $F = \text{Empuxo hidráulico (N)}$
- $P = \text{Pressão interna (Pa)}$
- $A = \text{Seção transversal (m}^2\text{)}$
- $k = \text{Coeficiente dependente}$

No caso específico de curvas, a força resultante é dada pela Equação 19:

$$F = 2.P.A . \sin (\theta /2) \quad (19)$$

Onde:

- $\theta = \text{Ângulo da curva}$
- $P = \text{Pressão interna (Pa)}$
- $A = \text{Area (m}^2\text{)}$

Observa-se que o empuxo aumenta proporcionalmente à pressão interna e

à área da seção da tubulação, tornando-se mais significativo em condutos de grande diâmetro e em sistemas sujeitos a elevadas pressões de operação ou transientes hidráulicos.

2.6 Modelagem hidráulica computacional

As ferramentas de modelação computacional são essenciais para a análise e o adequado desempenho das redes de abastecimento de água. Com as atuais técnicas numéricas, é possível analisar os sistemas numa larga variedade de condições operacionais, tanto em regime estacionário (permanente) quanto não estacionário (transiente) (Simões, Schulz e Porto, 2017).

Para subsidiar a modelagem hidráulica, a espacialização e o cadastro técnico dos sistemas de saneamento recorrem a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), garantindo o mapeamento adequado da infraestrutura (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992). Plataformas de código aberto, como o QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2024), permitem a georreferenciação precisa do traçado das adutoras e a extração de cotas altimétricas a partir de modelos digitais de elevação. Este procedimento constitui a etapa fundamental de geoprocessamento para a alimentação topológica dos modelos numéricos, alinhando-se aos protocolos de levantamento institucional (Universidade Federal de Ouro Preto, 2022).

No que tange à simulação de redes em regime permanente, destaca-se a utilização do software EPANET. Segundo Rossman (2000), o programa permite criar modelos detalhados de sistemas de distribuição, incluindo tubulações, bombas, válvulas e reservatórios. O seu motor de cálculo baseia-se na resolução simultânea de duas leis fundamentais para cada nó da rede: a conservação de massa (balanço de vazões), expressa pela

Equação 20, e a conservação de energia (balanço de cargas), expressa pela Equação 21:

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \quad (20)$$

Onde:

- Q_{in} = Somatório das vazões que entram no nó (m^3/s)
- Q_{out} = Somatório das vazões que saem no nó (m^3/s)

A Equação 20 garante que todo o fluxo que entra em um nó (junção de tubulações) deve ser igual ao fluxo que sai. A segunda equação fundamental é a da conservação de energia, expressa na Equação 21:

$$\Delta H = \sum h_f + \sum h_{fl} \quad (21)$$

Onde:

- ΔH = Diferença de energia (carga) entre dois pontos (m. c. a.)
- $\sum h_f$ = Somatório das perdas de carga contínua (m. c. a.)
- $\sum h_{fl}$ = Somatório das perdas de carga localizada (m. c. a.)

Entretanto, a modelagem em regime permanente é insuficiente para prever falhas decorrentes de manobras operacionais bruscas. Para a análise de dinâmica não-estacionária, a engenharia recorre a simuladores de regime transitório, como o software Allievi (Universitat Politècnica de València, 2010).

Desenvolvido pelo Instituto Tecnológico del Agua (ITA) da Universitat Politècnica de València (UPV), o programa tem como foco a simulação do fenómeno do transiente hidráulico em condutos sob pressão (Universitat Politècnica de València, 2010). O simulador fundamenta-se no Método das Características para integrar numericamente as equações diferenciais do escoamento. As duas equações fundamentais resolvidas são a da Quantidade de Movimento (Equação 22) e a da Continuidade (Equação 23)::

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{f \cdot Q \cdot |Q|}{2g \cdot D \cdot A^2} = 0 \quad (22)$$

e

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (23)$$

Onde:

- H = Carga piezométrica (m)
- Q = Vazão do escoamento (m^3/s)
- x = Distância ao longo da tubulação (m)
- t = Tempo (s)
- g = Aceleração da gravidade (m/s^2)
- A = Área da seção transversal do conduto (m^2)
- D = Diâmetro interno da tubulação (m)
- f = Fator de atrito de Darcy – Weisbach (adimensional)
- a = Celeridade da onda de pressão (m/s)

A estabilidade numérica na resolução destas equações pelo Método das Características é condicionada pelo critério de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Este critério, expresso pela Equação 24, exige que o passo de tempo (dt) e a discretização espacial (dx) mantenham uma relação que impeça a frente de onda de ultrapassar o comprimento de um trecho discreto durante o intervalo de tempo calculado, garantindo a convergência da solução:

$$C = a \cdot \frac{dt}{dx} \leq 1 \quad (24)$$

Onde:

- C = Número de Courant (*adimensional*)
- a = Celeridade da onda de pressão no fluido (*m/s*)
- dt = passo de tempo da simulação
- dx = Discretização espacial

Além dos simuladores de redes completas, o dimensionamento de trechos isolados exige a determinação rigorosa do fator de atrito em escoamentos turbulentos. Para a resolução iterativa de equações complexas como a de Colebrook-White, a literatura dispõe de calculadoras hidráulicas específicas, a exemplo do software TuboCalc (2006), que correlaciona rapidamente a vazão, o diâmetro interno e a rugosidade absoluta do material para o balanço de energia.

Dessa forma, a literatura consolida que a utilização integrada destas ferramentas computacionais permite transpor a complexidade teórica para a aplicação prática, gerando indicadores de segurança e desempenho

essenciais para a Gestão de Ativos em conformidade com as diretrizes da (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

2.7 Gestão de ativos aplicada ao planejamento urbano

O dimensionamento e a operação de sistemas de saneamento em adutoras urbanas transcendem a aplicação puramente técnica da engenharia hidráulica, inserindo-se diretamente no campo do Planejamento e da Gestão Urbana, especificamente na Gestão de Ativos (Asset Management). A norma ABNT NBR ISO 55000 (2014) define a Gestão de Ativos como a atividade coordenada de uma organização para realizar valor a partir de seus ativos, equilibrando custos, riscos e desempenho ao longo de todo o ciclo de vida.

Nesse contexto, uma adutora deixa de ser vista apenas como um componente passivo e passa a ser um ativo crítico. A análise hidráulica, portanto, torna-se a principal ferramenta para a tomada de decisão gerencial. A modelagem em regime permanente e o dimensionamento económico, por exemplo, não definem apenas um diâmetro, mas buscam otimizar o custo de ciclo de vida (Life Cycle Cost), ponderando o custo de implantação (CAPEX) contra o custo operacional futuro (OPEX), majoritariamente o consumo de energia elétrica das bombas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014; Silva, Vieira e Haie, 2003).

Para que a Gestão de Ativos se materialize na engenharia, a comparação entre diferentes alternativas de projeto (com variações entre CAPEX e OPEX) deve ser equalizada no tempo. O método mais consagrado para esta análise é o Valor Presente Líquido (VPL), que desconta os fluxos de caixa futuros para a data inicial do projeto através de uma taxa de atratividade (j) (Casarotto Filho e Kopittke, 2010).

Custos pontuais futuros, como a renovação de equipamentos de bombeamento ao fim da sua vida útil (n), são descapitalizados para o ano zero através da fórmula depagamento único da matemática financeira, expressa na Equação 25 (Casarotto Filho e Kopittke, 2010):

$$VPontual = \frac{CUSTO}{(1 + j)^t} \quad (25)$$

Onde:

- $VPontual$ = Valor presente (R\$)
- $CUSTO$ = Valor do custo pontual no futuro (R\$)
- j = Taxa de desconto ou atratividade (% a. a. ou valor decimal)
- t = Período ou ano de ocorrência do custo (ano)

Por outro lado, as despesas operacionais contínuas, como o consumo anual de energia elétrica, comportam-se como uma série uniforme de pagamentos ao longo do horizonte de projeto. Para transpor todo este montante financeiro cumulativo para o Valor Presente, utiliza-se a Equação 26 (Casarotto Filho e Kopittke, 2010):

$$VPsérie = CUSTOANUAL \cdot \left[\frac{(1 + j)^n - 1}{j \cdot (1 + j)^n} \right] \quad (26)$$

Onde:

- $VPsérie$ = Valor presente total da série de pagamentos (R\$)
- $CUSTO ANUAL$ = Despesa operacional uniforme a cada ano (R\$)
- j = Taxa de desconto ou atratividade (% a. a. ou valor decimal)
- n = Horizonte total do projeto (anos)

A conjugação destas ferramentas financeiras permite ao projetista selecionar o diâmetro econômico não apenas por critérios empíricos, mas pela real minimização do esforço financeiro ao longo de todo o ciclo de vida da adutora (Casarotto Filho e Kopittke, 2010; Silva, Vieira e Haie, 2003).

Da mesma forma, o estudo dos transientes hidráulicos é a materialização da Análise de Risco aplicada à gestão da infraestrutura. Ao simular cenários como a parada de bombas e quantificar o risco de falha catastrófica (ruptura por sobrepressão ou colapso por depressão), a engenharia fornece os subsídios técnicos para que o gestor urbano (a administração do campus) possa decidir sobre a alocação de recursos, justificando investimentos em dispositivos de proteção ou em novos protocolos operacionais (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014; Boulos et al., 2005).

Considerando que o planejamento de infraestruturas de saneamento envolve horizontes de longo prazo e incertezas macroeconômicas, a análise de sensibilidade torna-se indispensável. Esta técnica consiste em avaliar como as variações nos parâmetros financeiros, como o custo da energia elétrica ou taxas de desconto, afetam o Valor Presente Líquido (VPL) das alternativas projetadas. A análise de sensibilidade assegura a resiliência financeira da alternativa escolhida, validando sua escolha mesmo diante de flutuações nas tarifas operacionais (OPEX) (Casarotto Filho e Kopittke, 2010).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso descritivo e quantitativo, voltado à proposição de melhorias operacionais e estruturais na adução de água do Campus Morro do Cruzeiro. Para garantir o cumprimento dos objetivos propostos, as etapas metodológicas foram estruturadas em alinhamento direto com os objetivos específicos, dividindo-se em: (i) levantamento de dados; (ii) diagnóstico do sistema atual; (iii) dimensionamento de alternativas em regime permanente e (iv) análise de segurança em regime transitório.

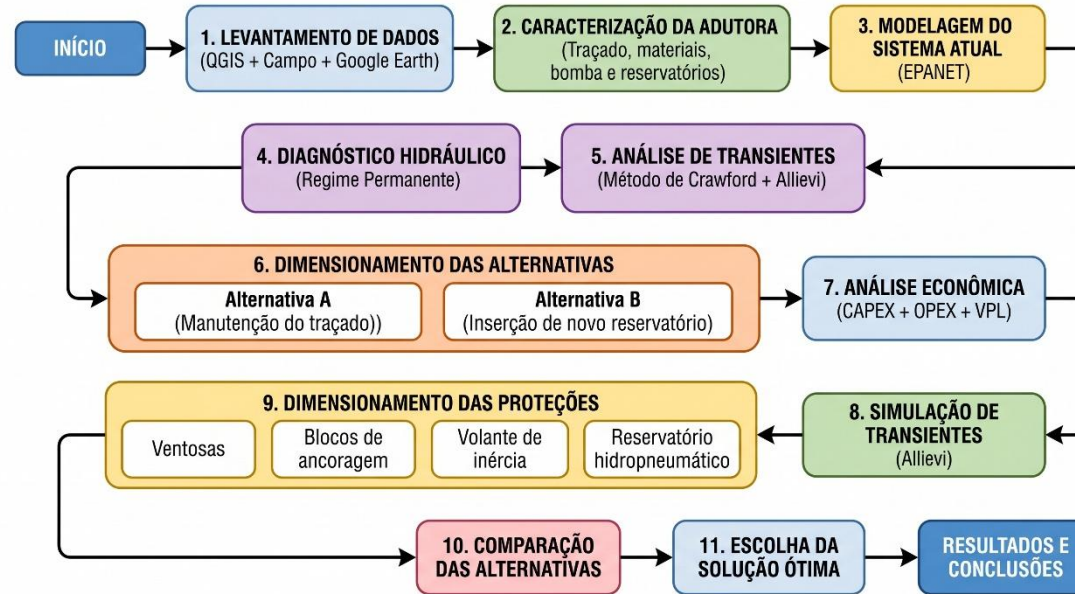
Para sistematizar as ferramentas computacionais empregadas em cada etapa do estudo, a Tabela 1 apresenta o fluxo de dados, correlacionando os softwares utilizados, as variáveis de entrada, o tipo de processamento e os resultados gerados. A Figura 1 sintetiza as etapas metodológicas adotadas na pesquisa.

Tabela 1 - Ferramentas computacionais utilizadas

Software	Parâmetros de Entrada	Processamento analítico	Resultados (Saídas)
QGIS	Dados topográficos(cota) e traçado espacial em campo	Espacialização e Geoprocessamento	Perfil longitudinal e cotas nodais da adutora
Tubocalc / Analítico	Diâmetro comercial, rugosidade e vazão estipulada	Equação Universal de Darcy-Weisbach	Perda de carga contínua, velocidade e fator de atrito
EPANET	Cotas, comprimentos, diâmetros e curva da motobomba	Balanço de massa e energia (Regime Permanente)	Vazões operantes, linhas piezométricas e pressões nos nós
Excel	CAPEX (Tubos/Bombas), OPEX (Energia/Manutenção) e TMA (12%)	Matemática Financeira e Descapitalização (n= 25 anos)	Valor Presente Líquido (VPL) e seleção da Alternativa
Allievi	Inércia do conjunto, celeridade, perfil efecamento (10s)	Método das Características	Envoltórias de pressões extremas

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 1 – Esquema metodológico



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.1 Levantamento de dados e caracterização da área

A etapa preliminar consistiu na espacialização do sistema por meio do software QGIS e no levantamento em campo das características geométricas da rede existente (Adutora 3). Os dados coletados abrangeram o traçado altimétrico — partindo da captação na cota 1104 m até o ponto mais alto na Escola de Minas (cota 1229 m), os materiais das tubulações (Aço Galvanizado e PVC) e as especificações do sistema de bombeamento existente.

Como parte do levantamento documental, foram analisados os registros fotográficos constantes no relatório técnico de inspeção elaborado pela Universidade Federal de Ouro Preto (2023), os quais documentam as condições físicas da Adutora 3 durante vistoria realizada pela instituição. As imagens evidenciam a existência de anomalias operacionais e estruturais, incluindo corrosão avançada das tubulações, vazamentos, trechos expostos, válvulas com indícios de deterioração e dispositivos hidráulicos instalados ao longo do sistema

Esses registros constituíram importante subsídio para o diagnóstico inicial da infraestrutura e foram utilizados para complementar a caracterização física do sistema avaliado. As Figura 2 e Figura 3 apresentam a parte dos registros fotográficos utilizados nesta pesquisa.

Figura 2 - Patologias identificadas na Adutora 3



Fonte: Adaptado (UFOP, 2023)

Figura 3 - Dispositivos operacionais da Adutora 3.



Fonte: Adaptado (UFOP, 2023)

Os registros fotográficos obtidos no relatório técnico da UFOP corroboram o diagnóstico de degradação da infraestrutura existente, evidenciando manifestações patológicas compatíveis com sistemas em avançado estado de envelhecimento. As anomalias observadas reforçam a necessidade de avaliação hidráulica detalhada e justificam as intervenções propostas ao longo deste estudo.

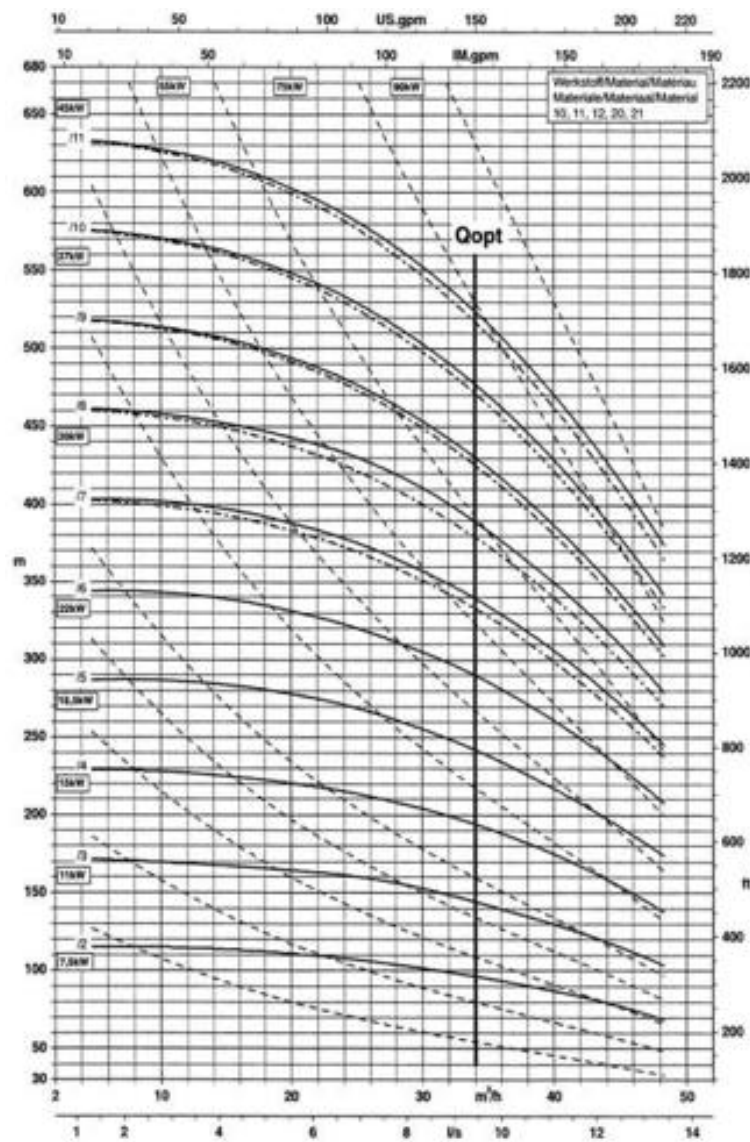
O arranjo físico local conta com uma potência elétrica instalada referente a dois conjuntos motobomba (garantindo redundância de equipamento), porém com potência efetivamente utilizada correspondente à operação de apenas

uma bomba ativa do modelo KSB Multitec 50-3.1.

O levantamento destas especificações mecânicas, aliado à obtenção da curva característica fornecida pelo fabricante, constituiu a base de dados de entrada para a avaliação de desempenho do sistema. A Figura 4 apresenta a curva de desempenho original extraída do catálogo técnico da motobomba KSB Multitec 50-3.1, cujos parâmetros motrizes foram extraídos e tabulados para subsidiar as simulações numéricas desta pesquisa.

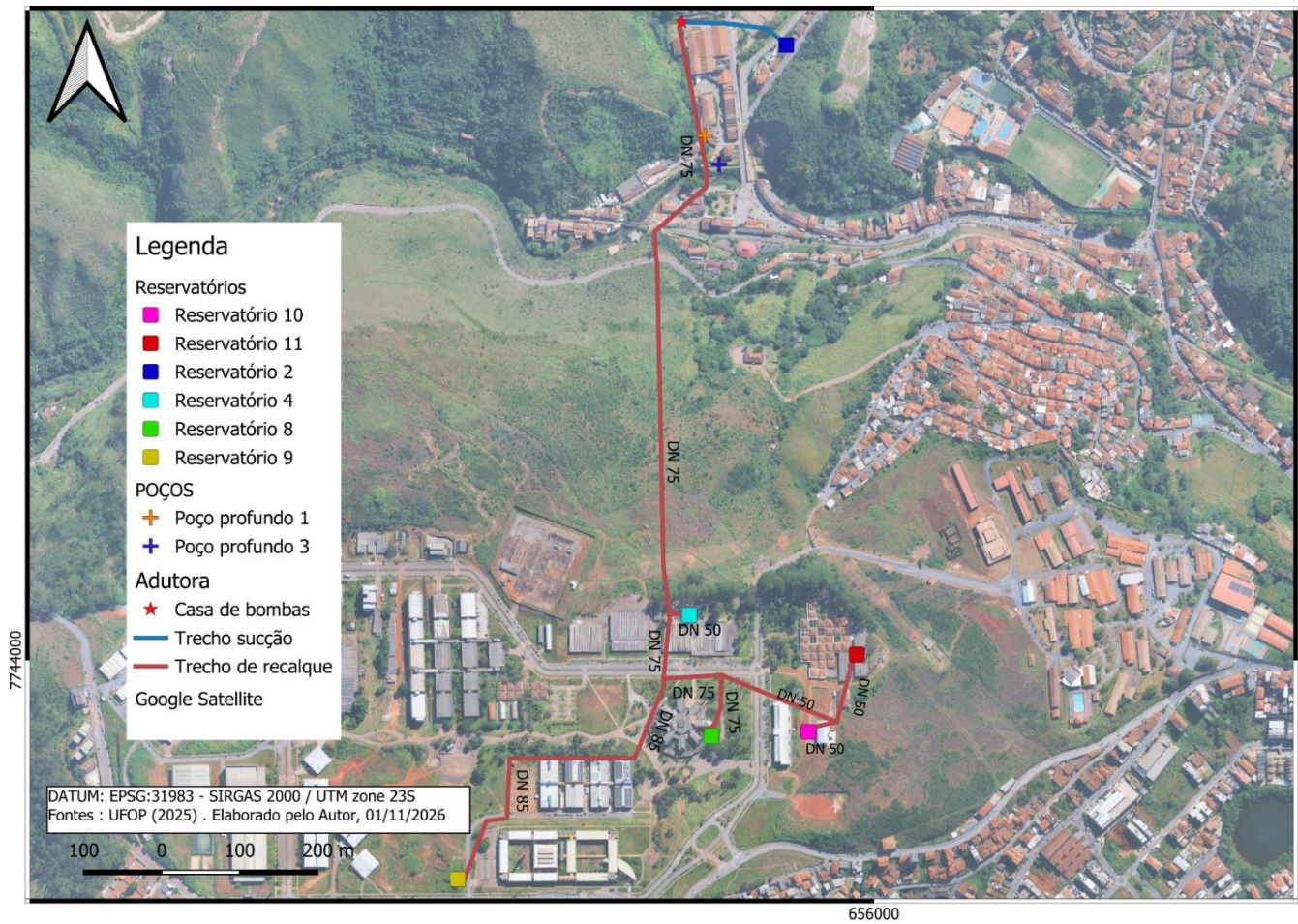
A Figura 5 detalha o croqui esquemático do traçado físico avaliado. Complementarmente, a caracterização altimétrica detalhada de cada setor da adutora é apresentada nas Figura 6 aFigura 10 que exibem os respectivos perfis longitudinais (Escola de Minas, Departamento de Minas, Departamento de Geologia, Restaurante Universitário e Centro de Convergência). Os perfis longitudinais foram extraídos utilizando a ferramenta de perfil de elevação do software Google Earth Pro (Google, 2026), sendo processados posteriormente em ambiente SIG.

Figura 4 - Curva característica da bomba KSB Multitec 50-3.1.



Fonte: Catálogo do Fabricante KSB

Figura 5 - Esquema geral do sistema de abastecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 6 - Perfil altimétrico Departamento de Geologia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 7 - Perfil altimétrico Departamento de Minas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 8 - Perfil altimétrico Centro de Convergência.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 9 - Perfil altimétrico Escola de Minas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 10 - Perfil altimétrico Restaurante Universitário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para garantir a precisão geométrica e a reprodutibilidade das simulações computacionais, os parâmetros físicos das tubulações foram definidos com base nas dimensões comerciais de mercado. Para os trechos em policloreto de vinila (PVC PBA Classe 12), adotaram-se as dimensões fornecidas pelos manuais técnicos de fabricantes consolidados, em conformidade com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1999). Para o trecho de recalque em aço galvanizado, os parâmetros seguiram o padrão comercial da ABNT NBR 5580 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

A determinação do diâmetro interno real (espaço útil de escoamento) foi obtida subtraindo-se o dobro da espessura da parede do diâmetro externo. A rugosidade absoluta (ϵ) dos materiais, parâmetro empírico essencial para o cálculo do fator de atrito e das perdas de carga contínuas pela Equação de Darcy-Weisbach, foi adotada com base nos valores tabelados por Azevedo Netto et al. (1998). Para o aço, adotou-se um valor condizente com o estado de conservação (corrosão) da infraestrutura existente, enquanto para o PVC adotou-se o coeficiente característico de tubos plásticos lisos.

Para as tubulações novas, adotou-se $\epsilon = 0,0015\text{mm}$ a $0,002\text{ mm}$ para o Policloreto de Vinila Modificado (mPVC/DEFOFO) e $\epsilon = 0,15\text{ mm}$ a $0,20\text{ mm}$ para o Ferro Fundido (FOFO) novo. Para a simulação das tubulações envelhecidas e corrosivas da rede existente (Aço/Ferro), adotou-se o valor severo de $\epsilon = 0,46\text{ mm}$, refletindo o estado avançado de degradação e incrustação documentado na inspeção institucional. A Tabela 2 sumariza todos os parâmetros de entrada estruturais do modelo.

Tabela 2 - Características das tubulações modeladas

Material	DN	(DE)	(e)	(DI)	(k)	Trechos
Aço Galvanizado	DN 75	88,90mm	3,35 mm	82,20mm	0,4600 mm	2, 4, 6 e 7
PVC PBA(Classe 12)	DN 75	85,00mm	3,90 mm	77,20mm	0,0015 mm	5
PVCPBA(Classe 12)	DN 50	60,00mm	2,70 mm	54,60mm	0,0015 mm	3, 8, 9 e 10

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além do traçado das tubulações e do conjunto de recalque, o levantamento de dados contemplou a identificação dos pontos de consumo e a capacidade de reservação de água do sistema. A rede adutora distribui o volume bombeado para diferentes setores do campus, cuja capacidade de reservação dos reservatórios é um fator determinante para a autonomia hídrica da instituição, para a definição das horas diárias de funcionamento das bombas. A Tabela 3 apresenta a capacidade volumétrica nominal de cada reservatório alimentado pela rede em estudo.

Tabela 3 - Capacidades dos reservatórios

Unidade de Reservação	Setor / Localidade	Volume Nominal(m³)
Reservatório 1 (R1)	Abastecimento Principal	318
Reservatório 2 (R2)	Restaurante Universitário (RU) – Reservatório Subterrâneo	190
Reservatório 4 (R4)	Centro de Convergência	190
Reservatório 7 (R7)	Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN)	50
Reservatório 8 (R8)	Departamento de Geologia (DEGEO)	50
Reservatório 9 (R9)	Escola de Minas	500

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.2 Diagnóstico do sistema atual (regimes permanente e transitório)

Para atender ao primeiro objetivo específico, avaliaram-se as limitações da infraestrutura atual. A quantificação do déficit hidráulico por meio de simulação computacional em regime permanente é uma abordagem metodológica consolidada na literatura para o diagnóstico de sistemas de abastecimento (Souza e Soares, 2023). Neste trabalho, a modelagem foi executada no software EPANET 2.0, ferramenta que, segundo Rossman (2000), permite criar modelos precisos do comportamento estático da rede ao resolver iterativamente as equações de conservação de massa e energia. Os parâmetros gerais de simulação foram configurados para utilizar a equação universal de Darcy-Weisbach no cálculo das perdas de carga contínuas.

As perdas de carga localizadas foram desprezadas nesta etapa analítica pois, conforme fundamentado por Porto (2006), em adutoras extensas a dissipação de

energia por atrito contínuo é de ordem de grandeza superior à gerada pelas poucas peças singulares, tornando o seu impacto irrisório na avaliação macro do traçado. Para representar o balanço de energia de forma conservadora e avaliar a capacidade do sistema na sua condição mais crítica, as unidades de armazenamento de destino foram modeladas como reservatórios de nível fixo, adotando-se a cota altimétrica máxima de operação.

Nesta configuração de diagnóstico, o modelo determinou a real capacidade hidráulica de transporte da infraestrutura existente ao equacionar as condições de contorno físicas: as cotas topográficas, a rugosidade das tubulações envelhecidas e, fundamentalmente, a inserção da curva característica operacional da bomba (KSB Multitec 50-3.1). A vazão de operação do sistema não foi imposta, mas sim obtida analiticamente pelo simulador através do ponto de operação (interseção entre a curva do sistema e a curva da bomba), procedimento validado por metodologias de avaliação de desempenho em redes reais de abastecimento (Silva, Vieira e Haie, 2003; Souza e Soares, 2023).

Em seguida, avaliou-se a vulnerabilidade do sistema operante frente ao fenômeno do golpe de aríete por meio de uma abordagem metodológica comparativa. A análise do regime transitório, avaliada sob o cenário crítico de desligamento súbito do conjunto motobomba, foi realizada por duas soluções e modelos matemáticos, denominados neste trabalho como solução analítica e solução computacional.

Para a solução computacional, o mesmo cenário de manobra crítica foi simulado no software Allievi (Universitat Politècnica de València, 2010), fundamentado no Modelo de Coluna Elástica e no Método das Características, conforme aplicado por Sousa (2023) e Paiva et al. (2020). Esta modelagem foi desenvolvida inserindo-se as condições de contorno mecânicas e hidráulicas operantes, tais como a vazão de escoamento previamente estabilizada, a rotação nominal e o momento de inércia total do conjunto motobomba, a fim de traçar a curva de desaceleração do fluxo e a subsequente reflexão das ondas de pressão.

Para a parametrização deste regime transitório, tanto no método analítico quanto no modelo computacional, as condições mecânicas da bomba KSB Multitec 50-3.1, com potência nominal de 50 cv (dado constante no relatório de avaliação preliminar da UFOP), foram estabelecidas para simular a inércia de parada. A vazão inicial de escoamento para o transiente adotada correspondeu estritamente à vazão real de operação da bomba conforme o poço profundo que produz uma vazão de 14 m³/h (0,00388 m³/s).

Dessa forma, o cálculo do golpe de aríete reflete a energia cinética exata da massa de água em movimento durante o cotidiano de manobras do campus. Para tal, considerou-se o regime de operação real levantado em campo, que varia entre 15,5 e 17,5 horas de funcionamento diário (distribuídas nos turnos de 05:30 às 17:00 e das 19:00 às 23:00, podendo se estender até a 01:00 da manhã conforme a demanda). Inseriram-se também os parâmetros operacionais de contorno mecânicos para a simulação, adotando-se a rotação nominal de 3550 rpm e o rendimento global de 75% (dados também extraídos do relatório da UFOP), bem como o momento de inércia rotativo total de 0,258 kg.m² do conjunto, valor obtido diretamente da curva característica da bomba fornecida pelo fabricante.

A partir destes parâmetros, calculou-se analiticamente o tempo de parada do equipamento, variável fundamental para balizar a curva de desaceleração do fluxo e determinar a magnitude do golpe de aríete no sistema, integrando a análise de transiente hidráulico realizada neste trabalho. Para a execução das simulações numéricas transitórias no software Allievi através do Método das Características, os parâmetros numéricos foram calibrados visando assegurar a estabilidade matemática do modelo e o estrito cumprimento da Condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), conforme a Equação 24 detalhada previamente.

O passo de tempo global (Delta t) de integração das equações diferenciais ordinárias foi definido em 0,001 segundos, valor matemático estritamente necessário para

capturar o tempo de trânsito da frente de onda no trecho tubular mais curto do modelo (Trecho T15, com 1,4 metros). A partir deste Δt , a discretização espacial (Δx) não foi fixada de forma estática, mas calculada e ajustada internamente pelo próprio software Allievi para cada tubulação individual, em função de sua respectiva celeridade de propagação (a). Essa abordagem dinâmica justifica-se pela necessidade metodológica de garantir que o Número de Courant permaneça estritamente igual ou inferior a 1 em toda a malha, assegurando a convergência, a estabilidade e a precisão do Método das Características na representação dos transientes hidráulicos.

A escolha metodológica pela Equação Universal de Darcy-Weisbach em detrimento da fórmula empírica de Hazen-Williams justifica-se pela sua formulação fisicamente embasada. Enquanto Hazen-Williams é restrita ao fluxo de água em temperatura ambiente e perde precisão em diâmetros variados, a equação universal equaciona a tensão de cisalhamento real através do Número de Reynolds e da rugosidade relativa. Essa precisão é indispensável não apenas para o regime permanente, mas atua como premissa de contorno exata para a atenuação do transiente hidráulico nas simulações dinâmicas.

Para a simulação em regime transitório, a adoção do software Allievi justifica-se pela sua robustez na integração numérica das equações de Saint-Venant por meio do Método das Características. Este método é consagrado na literatura internacional por converter equações diferenciais parciais complexas em equações ordinárias integráveis ao longo de linhas de propagação de ondas (linhas características), garantindo estabilidade numérica e alta fidelidade na previsão de eventos de cavitação e separação de coluna líquida.

3.3 Dimensionamento econômico de alternativas (regime permanente)

Em resposta ao segundo objetivo específico da investigação, estruturou-se a proposição de melhorias para a rede por meio de um dimensionamento hidráulico completo (englobando a definição de diâmetros, materiais, conexões e dispositivos de

controle de transientes), considerando diferentes estratégias de traçado e operação. As alternativas foram modeladas sob as seguintes configurações:

Alternativa A: Consistiu no dimensionamento para o trecho compreendido entre a saída do reservatório de captação até o reservatório do Restaurante Universitário (RU), mantendo integralmente o traçado geométrico e altimétrico operante atual.

Alternativa B: Consistiu na alteração topológica do sistema, propondo a subdivisão da linha de recalque principal por meio da instalação de um novo reservatório central de distribuição. Para garantir a melhor solução técnica e alinhar o projeto ao planejamento da Prefeitura do Campus (Precamp), a metodologia desta alternativa previu a avaliação comparativa da locação deste reservatório em uma posição estratégica no ponto de maior cota topográfica do campus (Escola de Minas).

A metodologia de dimensionamento seguiu uma abordagem técnica e econômica conjugada (Heller e Pádua, 2006). Inicialmente, empregou-se a Fórmula de Bresse para a estimativa teórica do diâmetro interno. Conforme o referencial teórico adotado para o balanço entre investimentos e custo operacional, o coeficiente econômico K pode variar entre 0,6 e 1,6. Para o presente estudo, adotou-se o valor de $K = 1,2$ a favor da segurança operacional do dimensionamento.

A aplicação deste coeficiente resultou em um diâmetro teórico aproximado de 118 mm para a vazão de projeto máxima. A partir deste valor de referência, selecionaram-se os diâmetros comerciais adjacentes, adotando-se rigorosamente os seus respectivos diâmetros internos extraídos dos catálogos dos fabricantes de tubulações em MPVC e FOFO, para a realização da análise econômica definitiva, fundamentada na minimização do Custo de Ciclo de Vida (LCC) da infraestrutura.

Para cada cenário de diâmetro comercial testado, a verificação hidráulica — compreendendo a estimativa da perda de carga unitária (i), do fator de atrito (f) e da velocidade de escoamento — foi efetuada com o auxílio do software TuboCalc (PHA-

USP, 2006), parametrizado para o cálculo através da Equação Universal de Darcy-Weisbach. Tendo em vista que o software fornece a perda de carga unitária, a perda de carga contínua de cada trecho foi determinada pela multiplicação deste valor pela extensão real da tubulação.

Com as perdas contínuas calculadas, determinou-se a altura manométrica máxima do sistema (H_m) por meio da Equação 11 apresentada na revisão bibliográfica, e equacionou-se a potência máxima requerida para o conjunto motobomba utilizando a Equação 12. O dimensionamento financeiro do equipamento previu uma potência instalada com margem de segurança (reserva técnica) de 50% sobre a potência requerida calculada, adotando o critério balizado pela literatura clássica de recalque (Azevedo Netto *et al.*, 1998)

O modelo matemático-financeiro para a obtenção do Valor Presente Líquido (VPL) foi balizado por parâmetros técnicos e macroeconômicos rigorosamente justificados:

- Horizonte de Projeto (Vida Útil): Adotou-se o período de 25 anos, alinhando-se às diretrizes da Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) para o planejamento sustentável de sistemas de abastecimento urbano, garantindo que o ativo suporte o crescimento vegetativo do campus.
- Taxa Mínima de Atratividade (TMA): Fixada em 12% ao ano. Esta taxa é o padrão recomendado pela administração pública brasileira para avaliar a viabilidade de projetos de infraestrutura de longo prazo, refletindo o custo de oportunidade do capital.
- Tarifa de Energia (OPEX): Parametrizada em R\$ 0,67/kWh, calculada a partir da estrutura tarifária vigente (Subgrupo A4 - média tensão) da CEMIG, operando 15 horas diárias no período Fora de Ponta.
- Coeficiente de Bresse ($K = 1,2$): Adoção conservadora baseada na operação intermitente do sistema de recalque do campus (bombeamento concentrado em janelas de 15 a 16 horas diárias para fugir do horário de pico tarifário).

- Fator de Fixação e Celeridade: No cálculo da propagação da onda elástica (Allievi), as tubulações foram consideradas com restrição longitudinal (ancoradas e enterradas), influenciando a rigidez estrutural efetiva.
- Coeficiente Politrópico ($n = 1,2$): Utilizado para o cálculo de amortecimentos gasosos, simulando uma expansão e compressão intermediária entre processos isotérmicos e adiabáticos, típica de transientes rápidos em engenharia de fluidos.
- Os custos de implantação (CAPEX) compreenderam o custo total de implantação e assentamento das tubulações (em função do diâmetro comercial e comprimento da rede), somado ao investimento inicial para a aquisição e instalação dos conjuntos motobombas (em função da potência instalada).

Os custos operacionais (OPEX) foram compostos por:

(a) A provisão de capital para a renovação dos equipamentos de bombeamento. Esta foi estipulada para o 20º ano de operação ($t=20$), prazo que corresponde à vida útil eletromecânica estimada para esses conjuntos de recalque segundo a literatura clássica (Macintyre, 1997; Tsutiya, 2006). O montante teve o seu Valor Presente pontual descapitalizado conforme a Equação 25.

(b) O custo contínuo com energia elétrica, que se baseou em uma tarifa referencial de R\$ 0,67/kWh. Este valor é aderente ao enquadramento tarifário institucional do Poder Público praticado pela concessionária local CEMIG (2026) para a UFOP, considerando 15 horas de operação diária. O Valor Presente da série uniforme de despesas foi determinado para o horizonte de 25 anos ($n=25$), reiterando o tempo de projeto estabelecido, por meio da Equação 26.

A alternativa selecionada como técnica e economicamente ideal foi a que mais se adequou ao sistema. Para a validação hidráulica dessa alternativa, adotaram-se duas premissas operacionais distintas: primeiramente, garantiu-se que as velocidades de

escoamento se mantivessem rigorosamente dentro dos limites normativos estipulados pela NBR 12215 (2017) . Em segundo lugar, atestou-se que as perdas de carga totais (contínuas e localizadas) fossem minimizadas não por restrição normativa, mas para atender ao conjunto elevatório, adequando o sistema para um menor gasto energético global. Esta redução nas perdas viabiliza, inclusive, ajustes operacionais futuros na estação por meio da instalação de um inversor de frequência, garantindo flexibilidade e otimização motriz.

3.4 Medidas de proteção ao golpe de Aríete

Para a análise de segurança do sistema frente a transientes hidráulicos, adotou-se uma metodologia de duas etapas, seguindo a lógica de refinamento de resultados comum em estudos de engenharia hidráulica (Chaudhry, 2014; Sousa, 2023).

Etapa 1 (Abordagem Analítica Simplificada): Inicialmente, empregou-se o método gráfico simplificado para sistemas de recalque, fundamentado nos ábacos de Crawford e sistematizado por Parmakian (Parmakian, 1963). Esta etapa de verificação analítica permite estimar, com rapidez e confiabilidade, a ordem de grandeza das pressões extremas (sobrepessão e subpressão) decorrentes de manobras de parada, servindo como baliza para os modelos subsequentes.

Etapa 2 (Modelagem Computacional): Posteriormente, a análise do regime transitório foi aprofundada por meio da modelagem numérica no software Allievi, fundamentada no Modelo de Coluna Elástica e no Método das Características (Universitat Politècnica de València, 2010). Para cada alternativa de diâmetro e traçado, a metodologia foi subdividida na execução de dois cenários sucessivos: (i) Cenário base (sem proteção); e (ii) Cenários com a inclusão virtual dos dispositivos de proteção pré-dimensionados.

Após a execução das simulações, os resultados foram interpretados à luz da avaliação de risco e diretrizes normativas. Foram geradas representações gráficas das envoltórias de cota piezométrica máxima e mínima ao longo do perfil da tubulação.

Estas envoltórias foram sobrepostas às linhas de resistência admissíveis do material, conforme a ABNT NBR 12215 (2017) e catálogos dos fabricantes.

Esta estratégia de mapeamento visual, amplamente validada em estudos de risco de infraestruturas por Boulos *et al.* (2005) e Duan (2015), permite identificar os trechos onde:

(i) as cargas piezométricas dinâmicas positivas ultrapassam o limite de resistência do material, indicando risco de ruptura por sobrepressão; e (ii) as pressões mínimas atingem patamares críticos (chegando a -8,9 m.c.a.), indicando risco de colapso estrutural por esmagamento (flambagem) ou cavitação vaporosa.

Com o objetivo de analisar o comportamento dinâmico das alternativas dimensionadas em regime transitório e propor dispositivos de proteção para garantir a integridade e segurança da solução proposta, estruturou-se uma avaliação computacional e analítica para o sistema de recalque. Com base na magnitude dos riscos identificados, foi realizada a proposição de soluções técnicas de controle. Como necessidades estruturais e operacionais mínimas inegociáveis para a nova adutora, foram previstos blocos de ancoragem nas mudanças de direção geométrica (para absorção dos esforços dinâmicos longitudinais) e válvulas ventosas de tríplice função nos pontos altos do perfil topográfico.

O dimensionamento de dispositivos complementares de proteção — como a majoração do volante de inércia ou reservatórios hidropneumáticos — compreendeu o cálculo analítico dos seus parâmetros fundamentais (volume, tempo de fechamento, inércia rotativa). Tais dispositivos foram inseridos no modelo computacional para a verificação de eficácia.

A proteção do sistema apenas foi validada e considerada eficaz quando as novas envoltórias provarem que as pressões positivas foram contidas abaixo do limite máximo do tubo e as subpressões foram atenuadas para limites perfeitamente

seguros, adotando-se o limite de -1,0 m.c.a. nos pontos críticos do perfil topográfico. Essa restrição justifica-se como uma margem de segurança operacional prudente para impedir que a pressão interna se aproxime da pressão de vapor do fluido atinge o limite crítico de cavitação vaporosa, que em virtude da reduzida pressão atmosférica na altitude de Ouro Preto, ocorre precocemente em aproximadamente -8,9 m.c.a mitigando os riscos práticos de separação de coluna e admissão de gases externos por porosidades ou juntas deformadas da tubulação polimérica.

Por fim, foi apresentada uma análise técnica comparativa consolidando as recomendações para as alternativas propostas. O balanço final evidenciou o desempenho em regime transitório sem proteção, a parametrização dos dispositivos necessários e o desempenho estabilizado final. Esta análise foi complementada com diretrizes operacionais preventivas (como o tempo seguro para manobras lentas de válvulas e sequências de partida) e a estimativa de custos para a implantação dos dispositivos de proteção, integrando a segurança dinâmica ao estudo do Custo de Ciclo de Vida da adutora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos por meio da modelagem hidráulica computacional e das análises econômicas realizadas para o Sistema de Abastecimento de Água do Campus Morro do Cruzeiro. O conteúdo está estruturado em estrita conformidade com os objetivos propostos, iniciando-se com o diagnóstico das condições hidráulicas da infraestrutura existente (em regimes permanente e transitório).

Na sequência, apresenta-se o dimensionamento técnico e a análise econômica (VPL) das alternativas propostas para a nova adutora, buscando a solução ótima. Por fim, é realizada a validação da segurança operacional destas alternativas frente aos fenômenos de transientes hidráulicos e a proposição de melhorias baseadas em padrões técnicos de engenharia e gestão de ativos.

4.1 Diagnóstico da adutora existente

Este subcapítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir da modelagem computacional da infraestrutura de abastecimento operante no Campus Morro do Cruzeiro. Esta análise atende ao primeiro objetivo específico da pesquisa, que consiste em diagnosticar as condições hidráulicas atuais da adutora principal por meio de simulações em regime permanente, identificando de forma quantitativa suas restrições operacionais.

O nível d'água livre do reservatório de captação (R1) situa-se na cota 1104,00 m, proporcionando uma condição de sucção afogada para o conjunto motobomba instalado na cota 1070,00 m (desnível estático positivo de 34,00 m a favor da sucção). O ponto crítico de entrega, correspondente ao Reservatório 9 (R9) da Escola de Minas, está posicionado na cota 1229,00 m. Dessa forma, enquanto o desnível geométrico estático total do sistema a partir do reservatório é de 125,00 m, a motobomba necessita vencer uma elevação geométrica de 159,00 m a partir do seu próprio eixo.

4.1.1 Análise em regime permanente

Para a parametrização do modelo numérico, foram inseridas as características altimétricas e geométricas reais levantadas em campo. A Tabela 4 detalha os nós de montante e jusante que delimitam cada segmento da rede, bem como o material, rugosidade e comprimento das tubulações.

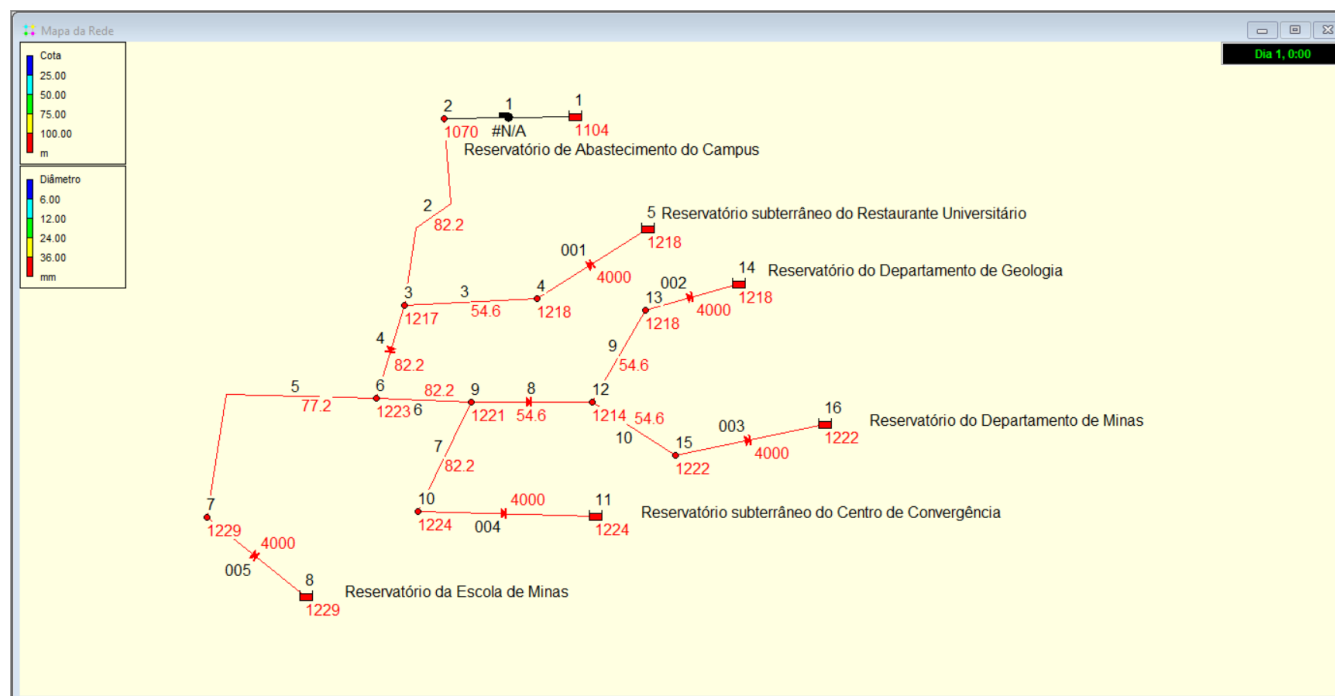
Tabela 4 - Características dos trechos da adutora

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Material	Rugosidade	Cota do nó a Montante	Cota do nó a Jusante
2	792	82,2	AÇO	0,46	1217	1070
3	5	54,6	PVC	0,0015	1218	1217
4	77	82,2	AÇO	0,02	1223	1218
5	462	77,2	PVC	0,0015	1229	1223
6	77	82,2	AÇO	0,02	1221	1223
7	71	82,2	AÇO	0,02	1224	1221
8	154	54,6	PVC	0,0015	1214	1221
9	73	54,6	PVC	0,0015	1218	1214
10	31	54,6	PVC	0,0015	1222	1214

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A modelagem hidrodinâmica foi processada no EPANET para determinar o comportamento hidráulico da rede sob as condições reais de operação. A estruturação primária do modelo exigiu a representação topológica da adutora, ilustrada na Figura 11, que reproduz o arranjo físico desde a captação até os reservatórios de distribuição. Complementarmente, a Tabela 5 apresenta as cotas de elevação dos nós de consumo e as condições de contorno adotadas para os reservatórios. Para avaliar o sistema em sua condição de maior exigência energética, os reservatórios foram modelados com nível fixo em sua cota máxima.

Figura 11 - Modelo hidráulico da rede no EPANET (Sistema Atual)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 5 - Dados de entrada do modelo EPANET

ID do elemento	Tipo	Cota de elevação (m)
Reservatório 1	(Captação) (nível fixo)	1104
Reservatório	Reservatório (nível fixo)	1218
Reservatório 8	Reservatório (nível fixo)	1229
Reservatório 11	Reservatório (nível fixo)	1224
Reservatório 14	Reservatório (nível fixo)	1218
Reservatório 16	Reservatório (nível fixo)	1222
Nó 2 (elevatória)	Junção	1070
Nó 3	Junção	1217
Nó 4	Junção	1218
Nó 6	Junção	1223
Nó 7	Junção	1229
Nó 9	Junção	1221
Nó 10	Junção	1224
Nó 12	Junção	1214
Nó 13	Junção	1218
Nó 15	Junção	1222

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados obtidos para as cargas piezométricas e pressões residuais em todos os nós estruturais do sistema atual estão consolidados na Tabela 6, enquanto a Tabela 7 evidencia o comportamento hidrodinâmico nos trechos em todos os nós estruturais, destacando as vazões, velocidades e perdas de carga unitárias observadas.

Tabela 6 - Pressões nodais do sistema atual

ID do Nó	Cota (m)	Carga Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a.)
Nó 2 (Elevatória)	1070,00	1296,19	226,19
Nó 3	1217,00	1219,36	2,36
Nó 4	1218,00	1218,00	0,00
Nó 6	1223,00	1219,30	-3,70
Nó 7	1229,00	1219,30	-9,70
Nó 9	1221,00	1219,24	-1,76
Nó 10	1224,00	1219,24	-4,76
Nó 12	1214,00	1218,40	4,40
Nó 13	1218,00	1218,00	0,00
Nó 15	1222,00	1218,40	-3,60

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 7 - Vazões e velocidades do sistema atual

ID do Trecho	Material	Diâmetro Interno (mm)	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	Perda de Carga Unitária (m/km)
Trecho 2	Aço	82,2	11,32	2,13	97,00
Trecho 3	PVC	54,6	10,19	4,35	271,61
Trecho 4	Aço	82,2	1,13	0,21	0,77
Trecho 5	PVC	77,2	0,00	0,00	0,00
Trecho 6	Aço	82,2	1,13	0,21	0,82
Trecho 7	Aço	82,2	0,00	0,00	0,00
Trecho 8	PVC	54,6	1,13	0,48	5,40
Trecho 9	PVC	54,6	1,13	0,48	5,54
Trecho 10	PVC	54,6	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados nodais apresentados na Tabela 6 indicam que a infraestrutura operante possui limitações físicas severas para o abastecimento simultâneo. Destaca-se o Nó 7 (Escola de Minas) como o ponto mais crítico do sistema, atingindo uma pressão residual de -9,70 m.c.a.

Essa depressão extrema ocorre porque a energia total fornecida pela motobomba no Nó 2 (cota 1070 m) é dissipada antes de atingir as extremidades. O fenômeno é causado pela combinação de dois fatores físicos: a necessidade de vencer o elevado desnível geométrico estático (159 m até a cota 1229 m) e a alta perda de carga acumulada devido à rugosidade da tubulação envelhecida.

Consequentemente, a linha piezométrica decai abaixo da cota do terreno, resultando em subpressões que violam as exigências da ABNT NBR 12215 e na ausência total de escoamento (0,00 L/s) nos ramais periféricos (Trechos 5, 7 e 10). Para evidenciar a magnitude deste déficit frente à normatização vigente, a Tabela 8 sintetiza o status dos pontos nodais de controle.

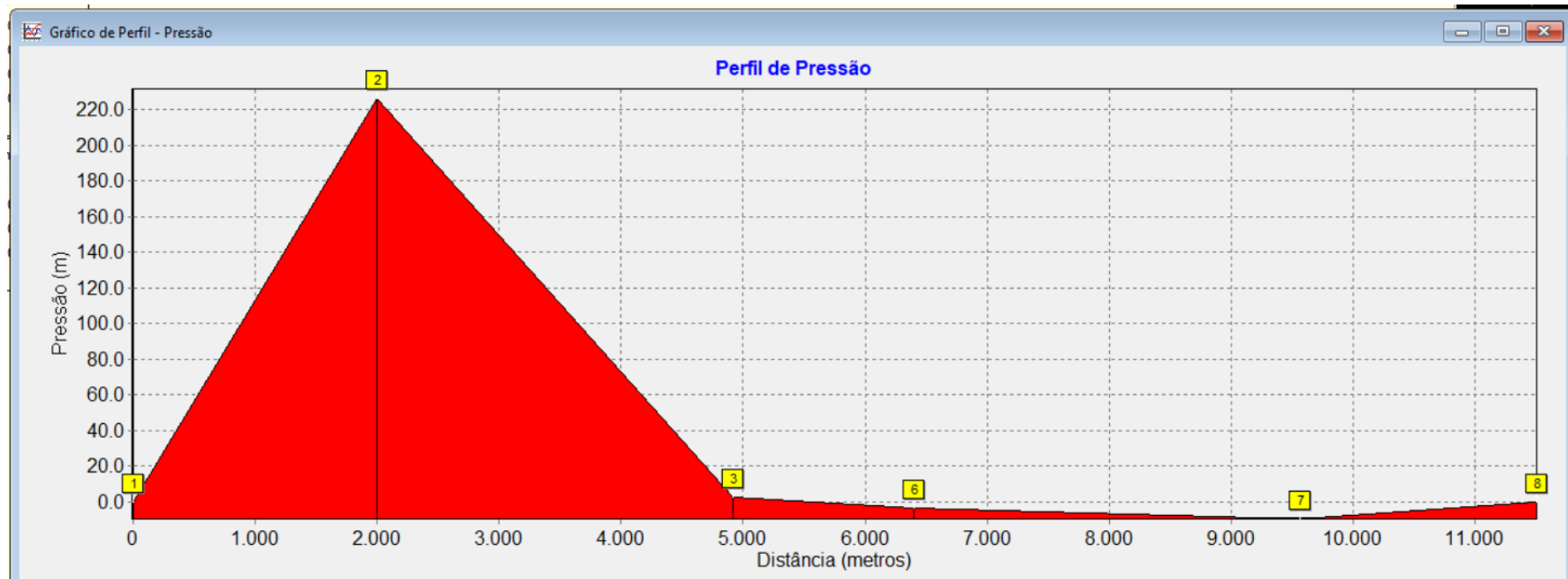
Tabela 8 - Pressões residuais críticas do sistema atual

Nó	Localização / Setor	Cota Geométrica (m)	Pressão simulada (m.c.a.)	Status normativo
Nó 2	Elevatória	1070,00	226,19	(Risco de Ruptura)
Nó 6	Intermediário Superior	1223,00	-3,70	(Falha)
Nó 7	Escola de Minas	1229,00	-9,70	(Falha)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

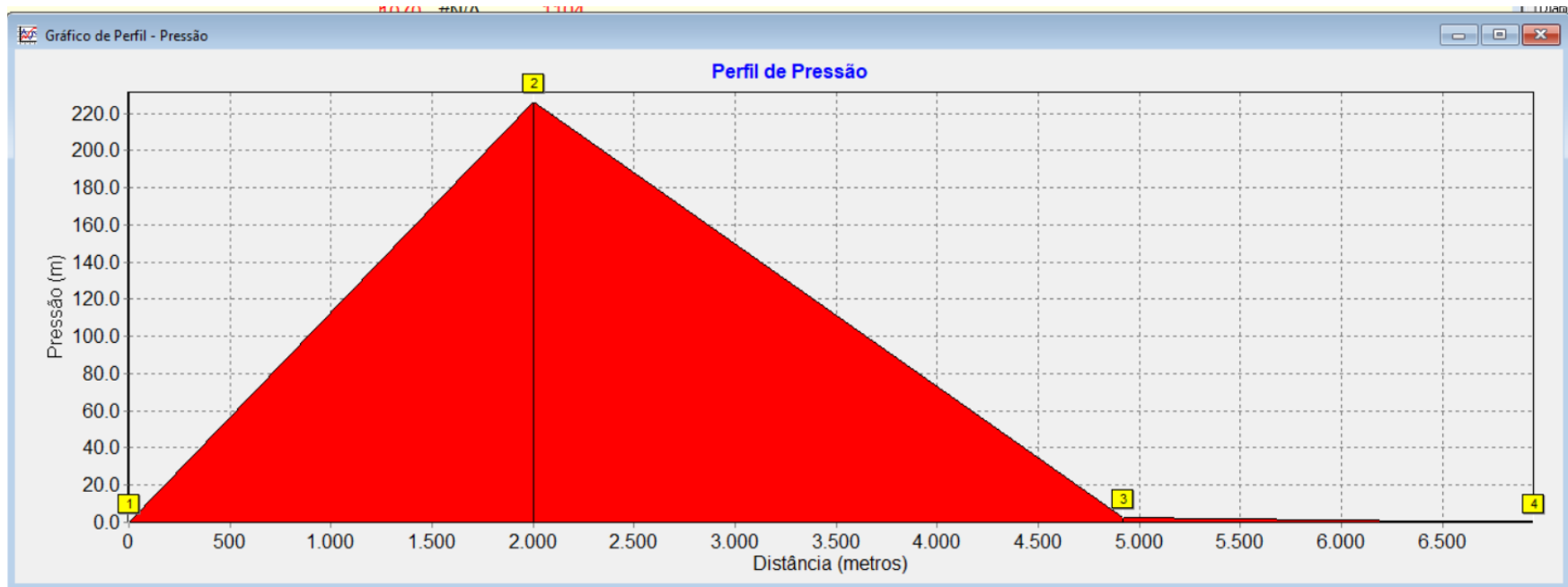
Para ilustrar graficamente a deficiência energética que justifica as pressões negativas identificadas, nas Figura 12 a Figura 16 apresentam os perfis piezométricos longitudinais dos ramais que abastecem as unidades do campus. Os gráficos sobrepõem a cota altimétrica do terreno à respectiva linha piezométrica do escoamento simulado.

Figura 12 - Perfil piezométrico - Escola de Minas



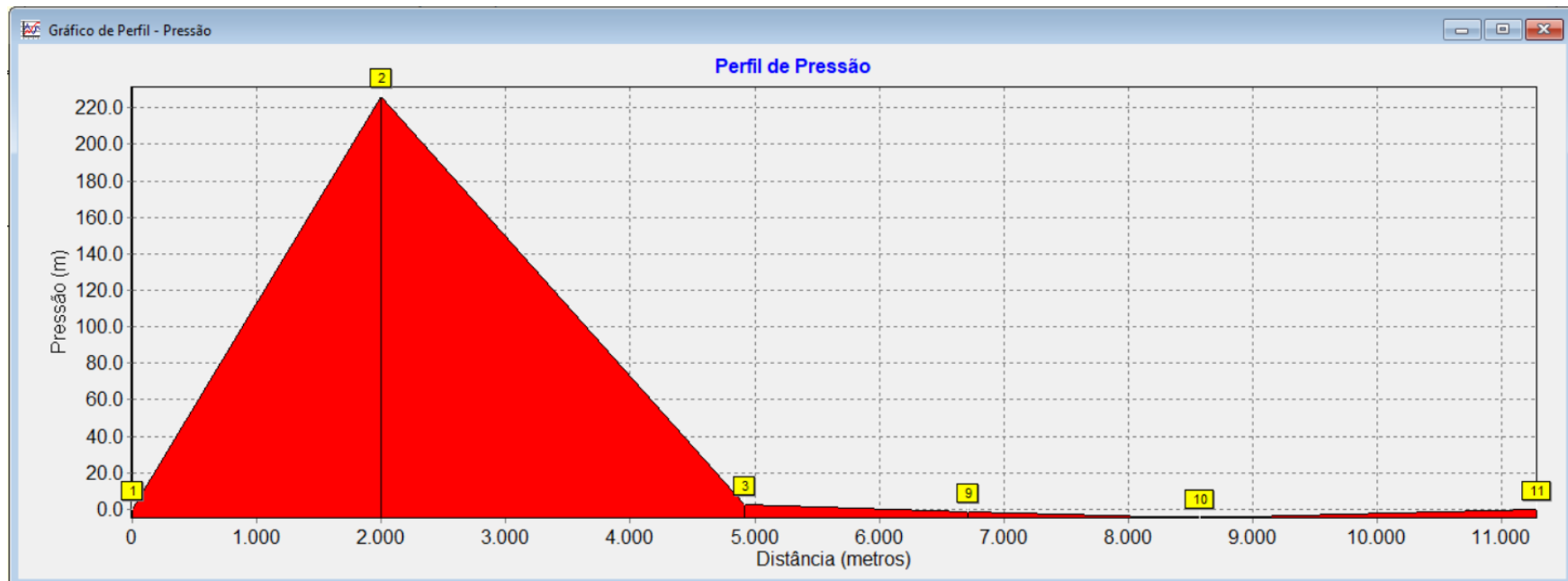
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 13 - Perfil piezométrico – Restaurante Universitário



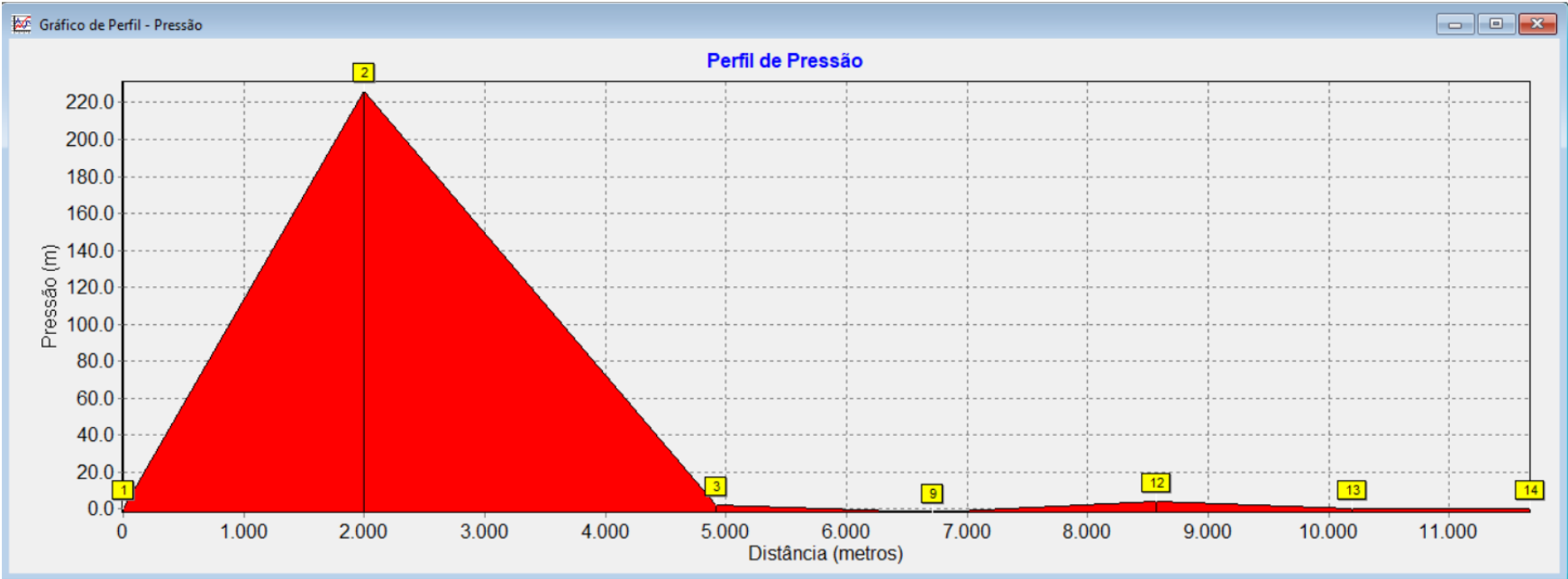
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 14 - Perfil piezométrico – Convergência



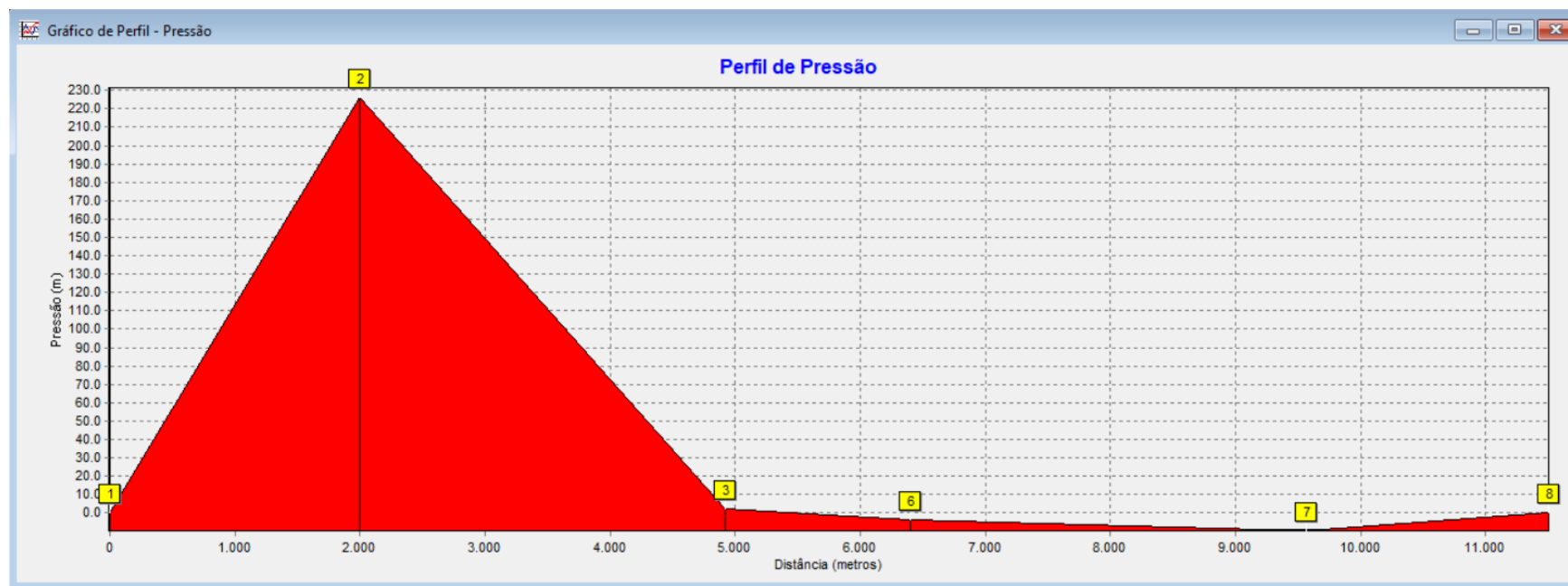
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 15 - Perfil piezométrico – Departamento de Geologia



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 16 - Perfil piezométrico –Departamento de Minas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise conjunta das tabelas e dos perfis gráficos demonstra que a linha piezométrica sofre uma depressão tão acentuada que cai abaixo do perfil topográfico (chegando a -9,70 m.c.a. no Nó 7, na Escola de Minas). De acordo com as formulações de Porto (2006), esta condição física é extremamente crítica, pois pressões negativas geram tensões disruptivas que elevam exponencialmente o risco de colapso estrutural, esmagamento diametral e contaminação da rede por sucção de fluidos externos.

Contudo, é fundamental ressaltar que este colapso hidráulico generalizado, demonstrado na modelagem, reflete um cenário teórico onde todos os nós demandam água simultaneamente, atestando que a energia introduzida pela motobomba atual é incapaz de vencer a soma do desnível geométrico com as perdas de carga da rede envelhecida.

Na prática operacional do campus, para evitar o vácuo total, a operação depende de manobras paliativas diárias. O abastecimento é fracionado manualmente através do fechamento e abertura de válvulas em pontos estratégicos (como a manobra em frente ao Restaurante Universitário e a derivação do Centro de Convergência). Dessa forma, conclui-se que o sistema atual mascara o seu subdimensionamento operando de forma fragmentada, o que confirma a necessidade de uma nova concepção hidráulica que garanta a pressurização contínua de toda a rede.

Paralelamente às restrições de pressão, os dados da Tabela 7 revelam um severo gargalo cinético no Trecho 3 (PVC). O escoamento de 10,19 L/s impõe uma velocidade média de 4,35 m/s, valor que excede o limite normativo preconizado pela ABNT NBR 12215. Do ponto de vista da física do escoamento, essa velocidade excessiva atua como a principal causa de dissipação localizada de energia na rede, elevando de forma quadrática a perda de carga contínua e impedindo a pressurização dos nós à jusante.

Além do elevado custo energético (OPEX), operações contínuas com velocidades

superiores a 3,0 m/s em matrizes poliméricas representam um risco estrutural. Essa condição acelera a fadiga do material por desgaste abrasivo e, conforme discutido por Sousa (2023) na análise de transientes hidráulicos, potencializa a magnitude de golpes de aríete no caso de variações bruscas de vazão, agravando o risco de ruptura da tubulação.

Este comportamento anômalo corrobora com a tese de Tsutiya (2006), que adverte que a operação contínua com velocidades excessivas não apenas degrada a rede por abrasão, mas eleva de forma quadrática a parcela de energia dissipada por atrito (h_f). Fisicamente, a energia de pressão que deveria ser utilizada para elevar a água até os reservatórios superiores é 'gasta' para vencer a resistência do escoamento hiperveloz. Consequentemente, o decaimento precoce da linha piezométrica resulta nas subpressões crônicas evidenciadas no modelo, uma patologia que também foi observada nos estudos de Sousa (2023) ao avaliar o colapso estrutural de redes subdimensionadas.

Para atestar a consistência do diagnóstico computacional e ilustrar fisicamente a incompatibilidade do arranjo atual, procedeu-se ao levantamento analítico da curva resistente do sistema. Aplicando o princípio de conservação da energia e os preceitos clássicos de Porto (2006), definiu-se o desnível geométrico estático H_g de 125,00 m, correspondente à diferença altimétrica entre o Nó 7 (1229,00) m e a captação (1104,00) m.

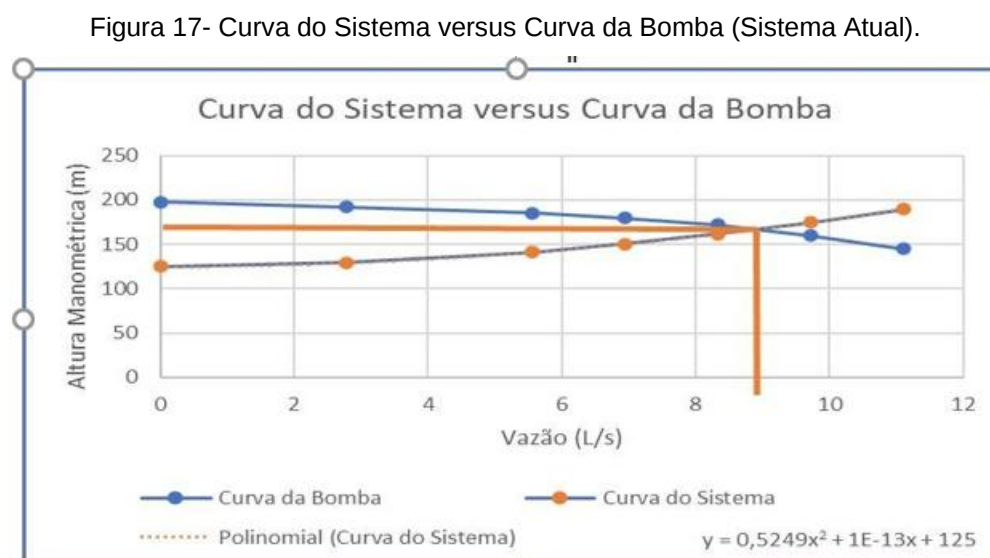
A partir do balanço energético extraído do EPANET para o cenário teórico sem restrições de válvulas, as perdas de carga totais acumularam 67,19 m.c.a. para uma vazão de 11,32 L/s (40,75 m³/h). Sabendo que as perdas em condutos forçados sob regime turbulento guardam relação quadrática com a vazão ($h_f = K Q^2$), a constante de resistência aparente da tubulação (K) foi equacionada adotando-se a vazão em L/s, visando alinhar-se ao padrão gráfico comercial conforme a Equação 11:

$$K = 67,19 \cdot 11,32^2 = 0,5243$$

Substituindo a constante calculada e o desnível estático na equação fundamental de recalque $Hm = Hg + h_f$, estabelece-se a modelagem analítica final da curva resistente do sistema do campus:

$$Hm = 125 + 0,5243 \cdot Q^2$$

A plotagem desta equação limitante, em contraposição à curva motriz do conjunto motobomba KSB Multitec 50-3.1, encontra-se detalhada na Figura 17. A interseção dessas curvas determina o ponto de operação teórico do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise crítica da Figura 17 revela a severidade do estrangulamento hidráulico imposto à infraestrutura. A interseção natural das curvas indica que, caso a adutora operasse com suas passagens totalmente abertas, o sistema tenderia a um ponto de equilíbrio entregando uma vazão próxima a 8,9 L/s sob uma altura manométrica de aproximadamente 167 m.c.a. Contudo, conforme comprovado pela modelagem no EPANET, operar nesta condição exigiria um consumo de energia de posição (cota) superior ao que a topografia permite, deprimindo a linha piezométrica e levando a rede ao colapso generalizado por pressões negativas severas.

Para evitar a cavitação iminente e o vácuo absoluto, a realidade operacional exige que o sistema seja estrangulado por meio de válvulas, estabilizando a vazão real de recalque em apenas 14 m³/h (aproximadamente 3,88 L/s). Sob a ótica da mecânica dos fluidos, essa restrição artificial atua como uma barreira física (perda de carga localizada extrema), deslocando forçadamente o ponto de operação para a extrema esquerda da curva motriz.

Esse deslocamento afasta drasticamente a bomba de seu Ponto de Melhor Rendimento (BEP), o qual se situa próximo a 35 m³/h (9,72 L/s). Consequentemente, o conjunto motobomba opera com um rendimento mecânico profundamente degradado. Essa anomalia não apenas eleva o consumo específico de energia (kW/m³) — encarecendo o OPEX do ativo —, mas também induz instabilidades rotodinâmicas e vibrações que aceleram a fadiga do rotor, atestando a total inviabilidade técnica de manutenção do arranjo atual a longo prazo.

4.1.2 Análise em regime transitório

Para consolidar o diagnóstico completo da infraestrutura, avaliou-se a segurança dinâmica do sistema frente ao fenômeno do transiente hidráulico. O cenário crítico modelado corresponde à interrupção súbita e simultânea do funcionamento do conjunto motobomba, simulando uma falha generalizada no fornecimento de energia elétrica. Essa manobra operacional abrupta força a conversão da energia cinética do escoamento em ondas de pressão que se propagam pela adutora.

Como atestado no diagnóstico em regime permanente, a infraestrutura operante depende de manobras manuais de válvulas para o enchimento isolado dos reservatórios, fracionando o escoamento para evitar pressões negativas. Dessa forma, para representar a realidade operacional do campus e focar na rota de maior demanda crítica, a análise do regime transitório foi delimitada especificamente ao trecho de manobra que abastece o Restaurante Universitário.

A Tabela 9 consolida os parâmetros mecânicos e hidráulicos globais, obtidos a partir do regime permanente estabilizado (EPANET) e dos dados de catálogo do conjunto motobomba, que são comuns a todas as manobras.

Tabela 9 - Dados hidromecânicos do sistema atual

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Vazão Inicial de Escoamento	Q	0,00388	m³/s
Altura Geométrica na Elevatória	Zb	1070,00	m
Altura Manométrica Inicial	Hm	273,76	m
Velocidade Inicial de Escoamento	V0	0,731	m/s
Inércia Rotativa Total do Conjunto	I	0,258	kg.m²
Rotação Nominal	N	3550	rpm
Rendimento Global	η	75	%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 10 sintetiza essas variáveis específicas para cada manobra de abastecimento.

Tabela 10 - Parâmetros físicos do modelo transitório

Trecho	Comprimento Equivalente (L)	Celeridade Eq. (c)	Tempo de Parada (T)	Parâm. da Tubulação(2p)	Constante de Inércia (X)
Restaurante Universitário	797 m	1281,81 m/s	1,24 s	0,35	0,258

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Cabe ressaltar que, para o ponto de descarga no final da adutora ($x/L = 1$), a teoria do método estabelece que o reservatório atua como uma condição de contorno de carga constante, refletindo a onda e mantendo a pressão residual equivalente à cota estática. Dessa forma, as reduções severas foram mapeadas junto à elevatória e na cota de meio caminho topográfico (Z_m).

O cruzamento das variáveis no ábaco de interrupção de recalque gerou as pressões mínimas residuais, consolidadas na Tabela 11 e na Tabela 12.

Tabela 11 - Indicadores de risco hidráulico do sistema atual

Indicador	Valor Obtido	Localização Espacial	Risco / Consequência
Pressão Máxima (Sobrepressão)	230 m.c.a.	Estaca 0 m (Junto à Elevatória)	Ruptura de juntas por tração excessiva
Pressão Mínima	Abaixo de 0 m.c.a.	Estacas 522 m a 696 m	Separação da coluna líquida e vaporização
Zonas de Cavitação	-8,9 m.c.a.	Entre as estacas 550 m e 696 m	Separação da coluna líquida e vaporização

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 12 - Verificação analítica das pressões mínimas

Trecho	Ponto de Verificação	Carga Piezométrica Inicial	Redução de Carga	Pressão Mín. Residual
Restaurante Univ.	Junto à Elevatória	1343,76 m	41,00 m	232,76 m.c.a.
	Meio Caminho (Zm = 1115m)	1319,76 m	24,00 m	204,76 m.c.a.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Embora a elevada carga inicial (decorrente do estrangulamento da bomba) mantenha pressões aparentemente seguras junto à elevatória (232,76 m.c.a.), a propagação da onda deprime rapidamente o meio do sistema. Avaliando especificamente o traçado do Restaurante Universitário, o cenário de falha induz uma redução de 24 metros a meio caminho, atingindo uma pressão residual de 204,76 m.c.a.

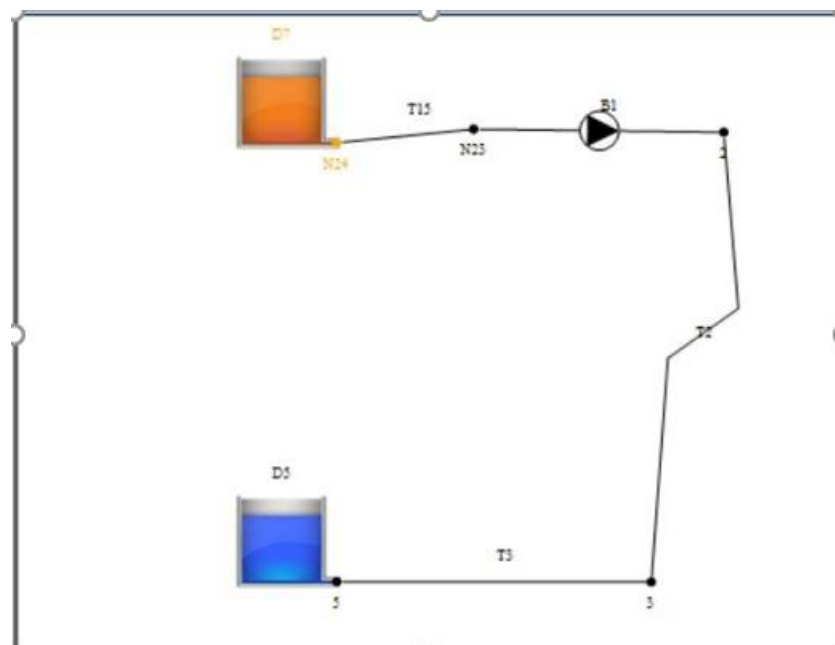
É vital ressaltar que, embora as pressões residuais ainda se apresentem positivas na cota de meio caminho devido ao excesso de altura manométrica inicial imposta pelo sistema, a grande amplitude da onda de depressão (quedas abruptas de até 65 metros) atuará como precursora de subpressões severas. À medida que a onda se aproxima dos trechos de maior elevação topográfica e nas extremidades das ramificações em PVC (cotas superiores a 1220 m), a energia residual deixará de ser suficiente para conter o vácuo, mantendo o risco iminente de separação da coluna líquida e sucção de fluidos.

Estes decréscimos drásticos em cotas intermediárias atuam como precursores de

depressões ainda mais agudas nos trechos subsequentes (em direção ao final da linha). A amplitude destas ondas negativas, associada à completa ausência de reservatórios hidropneumáticos ou válvulas ventosas, expõe as ramificações finais poliméricas da instituição ao iminente risco de separação da coluna líquida, sucção de fluidos externos e esmagamento estrutural. A confirmação analítica desta vulnerabilidade em múltiplas frentes de operação atesta a inadequação do ativo atual, ratificando a urgência da execução do redimensionamento e da adoção de dispositivos de proteção propostos neste projeto.

Para avaliar o comportamento hidráulico do sistema frente a manobras bruscas, utilizou-se o software Allievi, especializado na simulação de escoamentos em regime transitório (Golpe de Aríete). O primeiro passo da modelagem consistiu na transposição da topologia da rede para a interface do programa, respeitando as elevações nodais e o direcionamento do escoamento. A Figura 18 apresenta o croqui do sistema modelado, identificando os reservatórios, as interligações tubulares e a estação de bombeamento principal (B1).

Figura 18 - Modelo transitório da adutora no Allievi (Sistema Atual).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A precisão de uma simulação de regime transitório depende intrinsecamente da caracterização física das tubulações. A Tabela 13 consolida as propriedades geométricas e hidráulicas cadastradas exclusivamente para o ramal do Restaurante Universitário, alimentadas no software Allievi para o cálculo da celeridade da onda.

Tabela 13 - Propriedades hidráulicas e celeridade

Trecho	L	Di	e	k	C	Material
T2	792	82,2	3,75	0,02	1299,49	AÇO
T3	5	54,6	3,30	0,0015	404,52	PVC
T15	1,4	82,2	3,75	0,02	1299,49	AÇO

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Paralelamente, o grupo motobomba (Estação B1) foi configurado para refletir as condições mecânicas e operacionais de projeto. A inércia das massas girantes (rotor e motor) é um fator crítico, pois dita a taxa de desaceleração do fluido em caso de queda de energia. A Tabela 14 resume os parâmetros rotodinâmicos e de rendimento inseridos no modelo para a geração do evento transitório.

Tabela 14 - Dados operacionais da motobomba

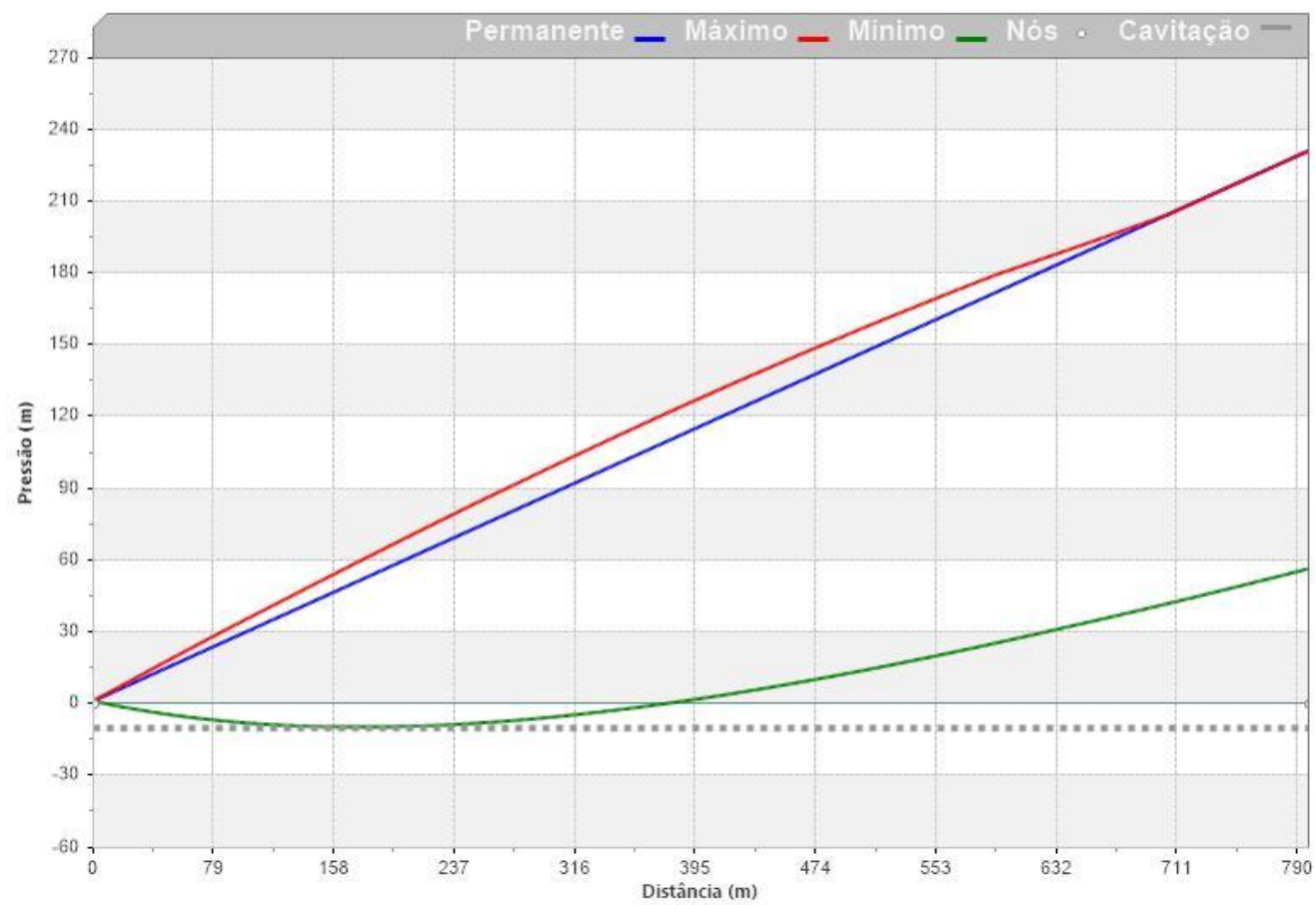
Parâmetro Operacional	Valor Inserido no Modelo
Rotação Nominal	3550 rpm
Momento de Inércia (I)	0,258
Vazão no Ponto de Rendimento Ótimo	12 L/s
Altura Manométrica Ótima	172 m
Potência Requerida	36 kW
Rendimento Ótimo	56,24%
Instante de Parada (Simulação de Falha)	10 segundos

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 19 ilustra graficamente o comportamento dinâmico ao longo de toda a extensão do ramal do Restaurante Universitário (aproximadamente 797 m). O modelo computacional acusa a formação de uma envoltória de máxima pressão (vermelha)

que atinge picos de aproximadamente 235 m.c.a. na região imediatamente adjacente à estação elevatória, superando significativamente a carga de recalque original e submetendo as juntas de aço a esforços de tração não previstos.

Figura 19 - Envoltória de pressões sem proteção hidráulica (Sistema Atual - Allievi).

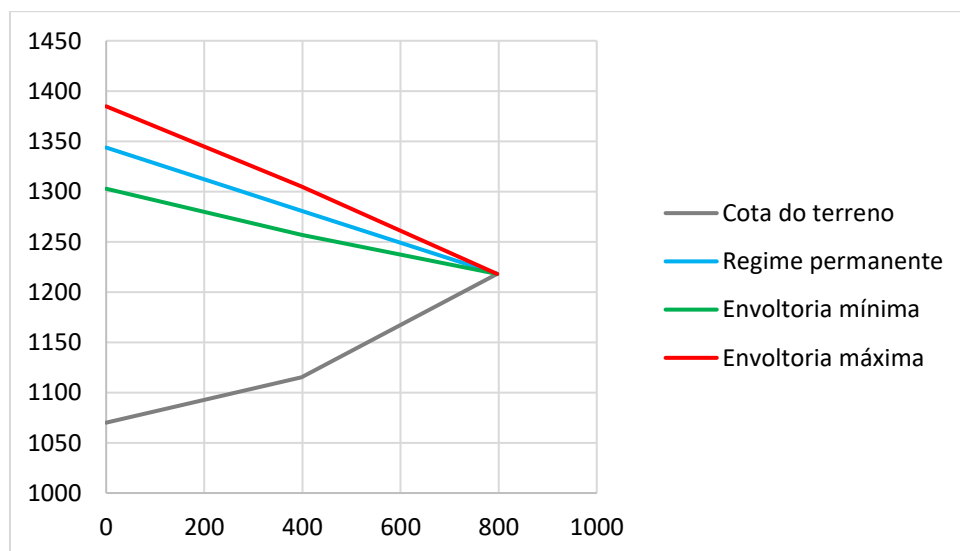


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O aspecto técnico mais crítico revelado pelo simulador, no entanto, é o comportamento da envoltória de pressões mínimas (verde). O decréscimo rompe a linha atmosférica por volta da estaca 400 m e atinge o limite da cavitação vaporosa (-8,9 m.c.a.) numa extensa faixa crítica localizada entre as estacas 550 m e 700 m. A causa física para este colapso reside na inércia da coluna de água que se separa após a interrupção da bomba. Como a tubulação principal é de aço galvanizado — material de elevada rigidez com celeridade de 1299,5 m/s —, não existe amortecimento elástico para dissipar o choque de retorno, tornando a ruptura estrutural um risco iminente e comprovando a obrigatoriedade da implementação de um sistema de proteção.

Para fins de comparação e melhor compreensão didática das margens de risco em relação ao perfil topográfico, a Figura 20 apresenta as mesmas envoltórias de pressão modeladas pelo método simplificado. Ao confrontar essa representação com a saída do software, fica ainda mais evidente a convergência dos resultados: a drástica queda da envoltória mínima (linha verde) em direção à cota do terreno (linha cinza) ilustra, de forma clara, a vulnerabilidade do sistema atual ao risco de pressões negativas.

Figura 20 Representação simplificada da envoltória.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em síntese, os resultados do diagnóstico em regimes permanente e transitório demonstram que a adutora atual se encontra em estado de colapso hidráulico e operacional. A insuficiência energética frente à barreira altimétrica gera pressões severamente negativas, enquanto a ausência de dispositivos de amortecimento expõe a rede a transientes destrutivos (cavitação e sobrepressões de até 230 m.c.a.).

4.2 Dimensionamento hidráulico de trecho da adutora

É imperativo destacar a diferença nas vazões adotadas entre as fases de diagnóstico e de proposição. Durante a modelagem do sistema operante (diagnóstico), o sistema estabiliza seu ponto de operação entregando uma vazão de 11,32 L/s. Já para o dimensionamento das Alternativas A e B, trabalhou-se com vazões projetadas de 5,55 L/s (média) e 9,72 L/s (máxima), considerando um regime de operação de 15 horas diárias. Este incremento embasa-se na previsão estratégica de operação de um novo poço tubular profundo já instalado, garantindo que a nova adutora suporte a demanda futura do campus ao longo do horizonte de projeto de 25 anos sem a necessidade de intervenções precoces.

O pré-dimensionamento do diâmetro da nova adutora para o trecho 2 foi realizado utilizando a Fórmula de Bresse, adotando-se um coeficiente $K = 1,2$. Conforme a boa prática de engenharia, o diâmetro foi calculado prioritariamente para a vazão média e verificado para a vazão máxima, resultando nos diâmetros teóricos de 89 mm para a vazão média e 118 mm para a vazão máxima. Para a correta interpretação da matriz de dimensionamento técnico-econômico detalhada nas tabelas a seguir, o modelo matemático conjugou as exigências operacionais da infraestrutura com os indexadores financeiros do mercado, estruturando-se nas seguintes premissas:

- **Parâmetros Hidráulicos e de Escoamento:** As vazões estipuladas refletem a capacidade de extração do poço em 15 horas diárias. A altura geométrica constante de 158 m foi extraída do SIG. As perdas de carga unitárias e as velocidades foram rigorosamente calculadas pela equação de Darcy-Weisbach via software TuboCalc, adotando os diâmetros internos reais

fornecidos pelos fabricantes de cada material (FOFO, DEFOFO e PEAD).

- **Parâmetros Eletromecânicos:** A altura manométrica de bombeamento reflete a soma do desnível estático com as perdas totais de cada cenário, adotando-se um rendimento global conservador de 70% para a motobomba. A Potência Instalada compreende a potência máxima requerida acrescida de uma margem de segurança normativa de 50%.

- **CAPEX (Custos de Implantação):** Os custos de aquisição e assentamento da tubulação foram referenciados pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil - SINAPI (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2025) para o estado de Minas Gerais. investimento em equipamentos de recalque adotou o custo paramétrico de mercado de R\$ 1.350,00 por kW de potência instalada, estimado com base em valores de referência para conjuntos motobombas centrífugos trifásicos de grande porte.

- **OPEX (Custos Operacionais e Financeiros):** O custo anual com energia considerou a tarifa vigente da CEMIG (Subgrupo A4) no período Fora de Ponta, com tarifa efetiva de R\$ 0,67/kWh. O fluxo de caixa abrange 25 anos, com provisão de renovação dos equipamentos no 20º ano, sendo todo o montante descapitalizado mediante uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 12% ao ano.

A avaliação das alternativas estruturais exigiu, inicialmente, a definição do comportamento hidrodinâmico do escoamento. A Tabela 15 consolida as respostas físicas destas tubulações, evidenciando como as variações de diâmetro interno e da rugosidade específica atuam no controle da dissipação de energia por atrito e nas velocidades.

Tabela 15 - Comparação hidráulica das alternativas

	FOFO			DEFOFO (MPVC)		PEAD	
D. Interno (mm)	81,6	107,2	158,2	108,4	156,4	85,4	156,4
Z geométrica (m)	158	158	158	158	158	158	158
Extensão L (m)	1331	1331	1331	1331	1331	1331	1331
Q méd. (L/s)	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56
Q máx. (L/s)	9,72	9,72	9,72	9,72	9,72	9,72	9,72
J méd. (m/m)	0,0140	0,0037	0,0006	0,0033	0,0006	0,0110	0,0006
J máx. (m/m)	0,0396	0,0103	0,0015	0,0091	0,0016	0,0310	0,0016
h_f méd. (m)	18,6340	4,9247	0,7986	4,3923	0,7986	14,6410	0,7986
h_f máx. (m)	52,7076	13,7093	1,9965	12,1121	2,1296	41,2610	2,1296
v méd. (m/s)	1,06	0,61	0,28	0,6	0,29	0,97	0,29
v máx. (m/s)	1,86	1,08	0,49	1,05	0,51	1,7	0,51
H_m méd. (m)	176,63	162,92	158,80	162,39	158,80	172,64	158,80
H_m máx. (m)	210,71	171,71	160,00	170,11	160,13	199,26	160,13

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A interpretação dos resultados de velocidade apresentados indica que os diâmetros menores (na faixa do DN 80) apresentam velocidades mais elevadas, próximas ao limite superior convencional, enquanto os diâmetros de 100 mm e 150 mm operam em regimes de escoamento mais brandos. Vale ressaltar que, por se tratar primariamente de tubulação em FOFO, o material possui elevada resistência mecânica e à erosão, tolerando velocidades de escoamento mais altas sem comprometer a integridade estrutural.

Com as alturas manométricas (médias e máximas) mapeadas, procedeu-se ao dimensionamento do conjunto elevatório. A Tabela 16 detalha as potências requeridas e a potência final instalada, incorporando a margem de segurança recomendada.

Tabela 16 - Especificações das elevatórias propostas

Parâmetro	FOFO			DEFOFO (MPVC)		PEAD	
DIAMETRO	81,6	107,2	158,2	81,6	107,2	158,2	81,6
Rendimento (%)	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
Pot. requerida (kW)	28,7	23,4	21,8	23,2	21,8	27,1	21,8
Pot. instalada (kW)*	43,1	35,1	32,7	34,8	32,7	40,7	32,7
Pot. média útil (kW)	13,8	12,7	12,4	12,6	12,4	13,4	12,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O que tange ao conjunto motobomba, a análise de compatibilidade mecânica indica que a bomba KSB Multitec 50-3.1 atualmente instalada possui curva característica compatível com as exigências de pressão e vazão apenas para os cenários de diâmetro a partir de 100 mm. Em diâmetros muito reduzidos (como o DN 80), a elevada perda de carga empurra o ponto de funcionamento do sistema para fora do envelope de operação segura do equipamento existente, provocando estrangulamento hidráulico e severa queda de rendimento mecânico (BEP).

Esclarece-se que a inclusão da margem de 50% no cálculo da potência instalada não pressupõe a compra compulsória de um novo equipamento. Trata-se da aplicação do critério normativo de reserva técnica recomendado pela literatura clássica de recalque, cujo objetivo é garantir uma folga no motor elétrico para absorver variações de rendimento ao longo da vida útil. Como a bomba atual atende com folga à altura manométrica do diâmetro de 100 mm, o custo de aquisição de um novo conjunto para esta alternativa foi zerado na análise, gerando um ganho econômico imediato ao projeto

A seleção definitiva do projeto exige a minimização do Custo de Ciclo de Vida (LCC). A Tabela 17 apresenta o modelo financeiro estruturado, confrontando o CAPEX com o OPEX descapitalizado para atestar a configuração de menor impacto financeiro. É fundamental ressaltar que a análise econômica consolidada na Tabela 17 não se restringe ao trecho inicial, mas engloba o CAPEX e o OPEX de toda a extensão da adutora da Alternativa B completa (1.331 metros), incluindo a infraestrutura necessária

até o novo reservatório da Escola de Minas

Tabela 17 - Análise econômica das alternativas

MATERIAL	FOFO		DEFOFO (MPVC)			PEAD	
D.Interno (mm)	81,6	107,2	158,2	108,4	156,4	85,4	156,4
Tubos (R\$)	139888,1	140753,25	143215,6	224459,84	224459,84	350438,99	545603,52
Bombas (R\$)	58136	47376	44144	46.935	44.181	54.977	44.181
CAPEX (R\$)	198.024	188.129	187.360	271.395	268.641	405.416	589.784
Capital Inicial (R\$)	198.024	188.129	187.360	271.395	268.641	405.416	589.784
Taxa Desconto	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Renov.Bomba 2026 (R\$)	6026,7	4911,3	4576,3	4865,6	4580,1	5699,3	4580,1
Energia 2026 (R\$)	80714,5	74449,9	72564,5	46379,2	45352,8	78889,9	72564,5
Energia 25 anos(R\$)	633055,2	583921,2	569133,2	363758,2	355708,3	618744,3	569133,2
VPL Total (R\$)	837.106	776.961	761.069	640.019	628.929	1.029.860	1.163.498

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O cruzamento das variáveis técnicas e econômicas revela a dinâmica inversamente proporcional entre os custos: diâmetros menores reduzem o CAPEX, mas exigem altíssimo OPEX devido à perda de carga, enquanto diâmetros maiores reduzem o OPEX, mas superdimensionam o investimento inicial. Em todas as simulações, o diâmetro nominal de 100 mm (DN 100) apresentou o menor Valor Presente Total ao final do horizonte de 25 anos.

Embora materiais plásticos como o DEFOFO e o PEAD apresentem custos de capital competitivos e excelentes coeficientes de rugosidade, a escolha estrutural definitiva do projeto recaiu sobre a tubulação em Ferro Fundido (FOFO) de 100 mm. Esta definição justifica-se de forma contundente pela elevada robustez mecânica do material frente ao intemperismo. Considerando que grande parte da infraestrutura adutora do Campus Morro do Cruzeiro é assentada à superfície (exposta a céu aberto), a constante incidência de radiação UV e as elevadas amplitudes térmicas degradariam rapidamente a matriz polimérica das opções plásticas, comprometendo

a vida útil do ativo, ressaltando-se que os custos das obras civis para a construção do novo reservatório e da casa de bombas não compõem a matriz atual, figurando como uma limitação econômica do estudo.

Contudo, com o intuito de fundamentar a discussão técnica e avaliar o impacto da rigidez do conduto no comportamento da rede, a análise hidráulica subsequente (em regime permanente e transitório) será conduzida comparando o desempenho do FOFO e do DEFOFO.

4.2.1 Análise de nova adutora com traçado atual

Nesta modelagem, avaliou-se a capacidade hidráulica livre do sistema, assumindo a substituição de toda a rede de adução (Trecho 2 e ramais secundários) por tubulações de FOFO com diâmetro nominal de 100 mm (diâmetro interno real de 107,2 mm)..Os resultados piezométricos obtidos para este novo cenário de diâmetro ampliado estão consolidados na Tabela 18.

Tabela 18 - Pressões nodais – Alternativa A

ID do Nó	Cota (m)	Carga Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a.)
Nó 2 (Elevatória)	1070,00	1235,15	165,15
Nó 3	1217,00	1218,08	1,08
Nó 4	1218,00	1218,00	0,00
Nó 6	1223,00	1218,07	-4,94
Nó 7	1229,00	1218,07	-10,93
Nó 9	1221,00	1218,05	-2,95
Nó 10	1224,00	1218,05	-5,95
Nó 12	1214,00	1218,02	4,02
Nó 13	1218,00	1218,00	0,00
Nó 15	1222,00	1218,02	-3,98

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O objetivo foi verificar se a uniformização e a ampliação dos diâmetros em todo o traçado reduziriam a perda de carga ao ponto de abastecer todos os reservatórios

simultaneamente, eliminando a necessidade das atuais manobras operacionais, mantendo integralmente a topologia da rede existente. De forma complementar, a Tabela 19 evidencia o comportamento hidrodinâmico nos trechos tubulares sob essa nova configuração, destacando as vazões, as velocidades de escoamento e as perdas de carga unitárias.

Tabela 19 - Vazões e velocidades – Alternativa A

ID do Trecho	Material	Diâmetro Interno (mm)	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	Perda de Carga Unitária (m/km)
Trecho 2	FOFO	07,2	13,30	1,47	21,56
Trecho 3	FOFO	107,2	12,23	1,35	15,85
Trecho 4	FOFO	107,2	1,07	0,12	0,20
Trecho 5	FOFO	107,2	0,00	0,00	0,00
Trecho 6	FOFO	107,2	1,07	0,12	0,23
Trecho 7	FOFO	107,2	0,00	0,00	0,00
Trecho 8	FOFO	107,2	1,07	0,12	0,22
Trecho 9	FOFO	107,2	1,07	0,12	0,23
Trecho 10	FOFO	107,2	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Assim como executado na análise de diagnóstico da adutora existente (Seção 6.1), os resultados nodais e cinéticos desta alternativa foram confrontados com as exigências da norma (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Contudo, o problema altimétrico da rede persiste. Considerando que a bomba se encontra na cota 1070 m e o Nó 7 (Escola de Minas) na cota 1229 m, o imenso desnível geométrico consome quase a totalidade da energia motriz. O decaimento da linha piezométrica ao longo do percurso esgota a energia remanescente antes de atingir as cotas mais altas, resultando numa depressão crítica de -10,93 m.c.a. no Nó 7. Fisicamente, isto comprova que, devido às condições altimétricas extremas, o sistema não tem energia suficiente para alcançar o reservatório superior sem incidir em pressões negativas de vácuo, mantendo a dependência insustentável de manobras operacionais fracionadas.

Para sintetizar as vulnerabilidades desta alternativa em face da legislação vigente, a Tabela 20 destaca os elementos da rede que apresentaram os parâmetros hidráulicos mais críticos, evidenciando o não cumprimento das diretrizes da (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Tabela 20 - Pressões críticas - Alternativa A

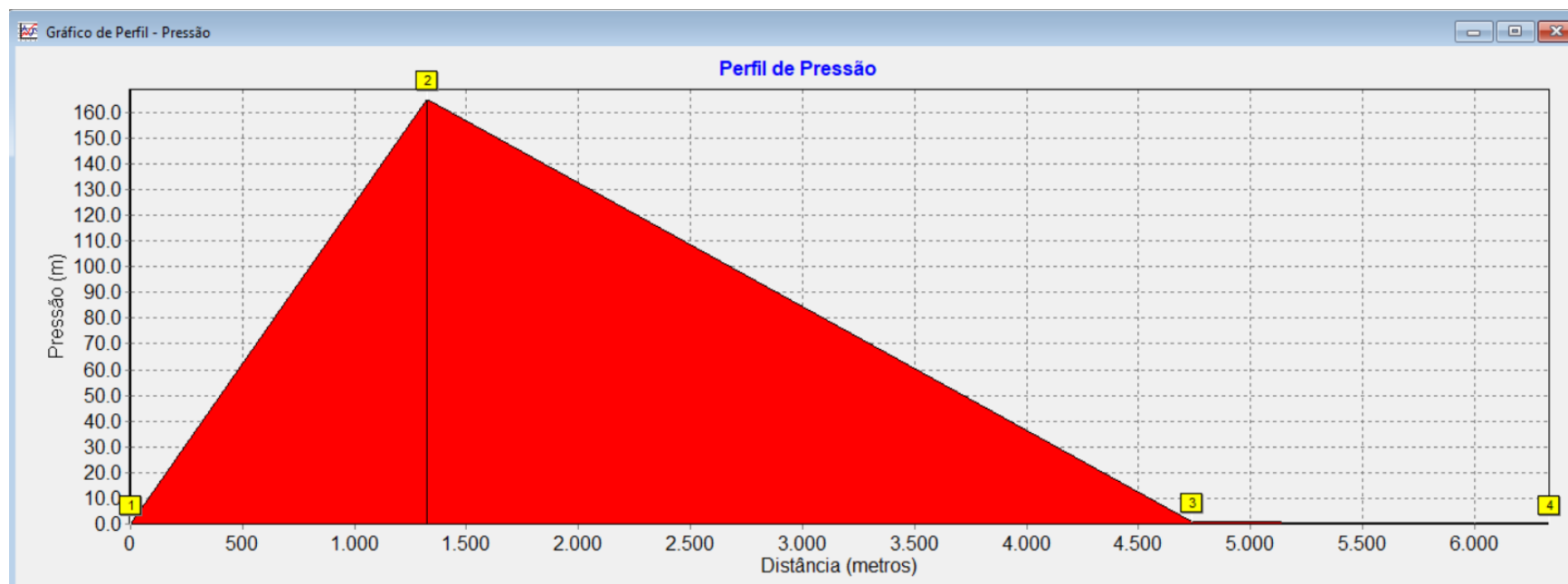
Nó	Localização / Setor	Cota Geométrica (m)	Pressão Simulada (m.c.a.)	Status Normativo)
Nó 2	Elevatória (Saída da Bomba)	1070,00	166,34	Positivo (Risco de Ruptura)
Nó 6	Intermediário Superior	1223,00	-4,94	Crítico (Falha)
Nó 7	Escola de Minas (Ponto Crítico)	1229,00	-10,94	Crítico (Falha)
Nó 10	Próx. Convergência	1224,00	-5,95	Crítico (Falha)
Nó 15	Próx. Depto. Minas	1222,00	-3,98	Crítico (Falha)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A sistematização apresentada na Tabela 20 corrobora a insuficiência técnica da Alternativa A (Manutenção do Traçado Existente). A persistência de pressões negativas nos nós superiores evidencia, do ponto de vista hidráulico, que o aumento isolado do diâmetro não soluciona o problema. Embora a uniformização para 100 mm tenha proporcionado uma redução nas perdas de carga contínuas, o desnível piezométrico (carga estática) de 159 metros entre a elevatória e a Escola de Minas permaneceu inalterado.

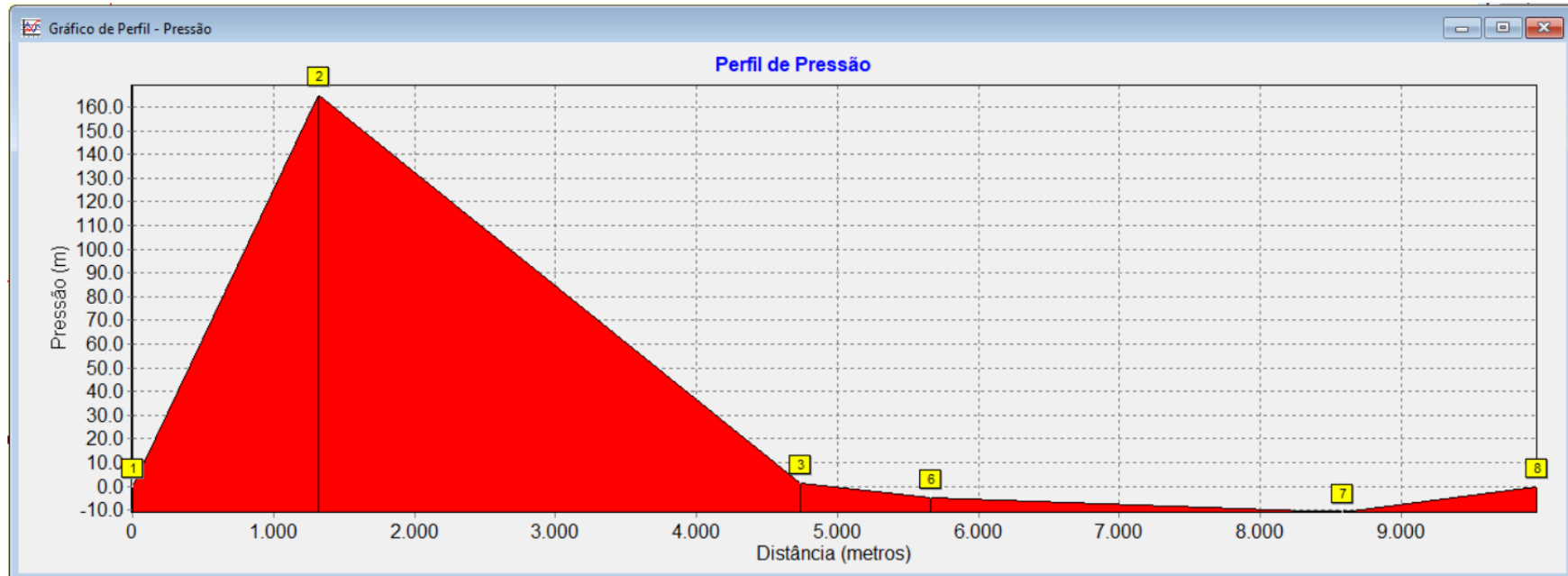
Como essa redução do atrito foi insuficiente para compensar a extrema barreira altimétrica, a energia piezométrica continua se esgotando antes de atingir os reservatórios superiores. Os resultados sugerem, portanto, que a alternativa apresenta apenas uma melhoria parcial da cinética do escoamento, demandando obrigatoriamente uma intervenção topológica no traçado (subdivisão da linha) para viabilizar o sistema. Abaixo as Figura 21 a Figura 25 ilustram os perfis piezométricos.

Figura 21 - Pressões residuais - Restaurante Universitário



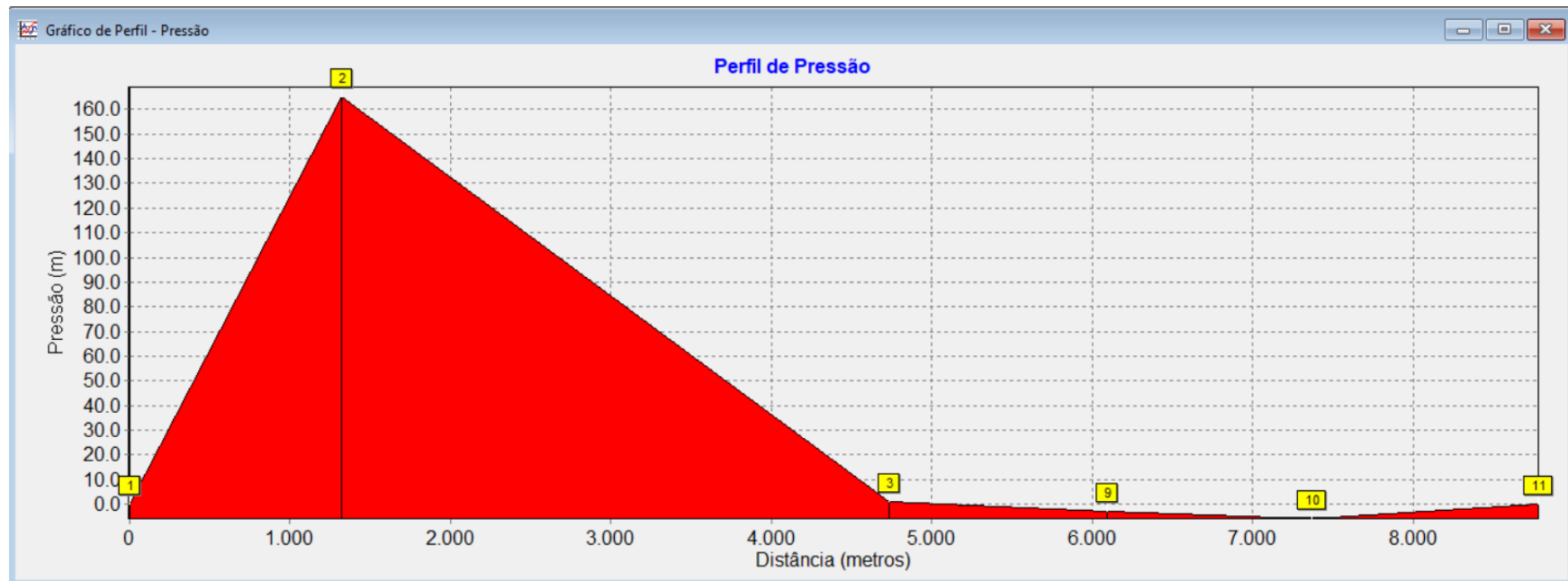
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 22 - Pressões residuais - Escola de Minas



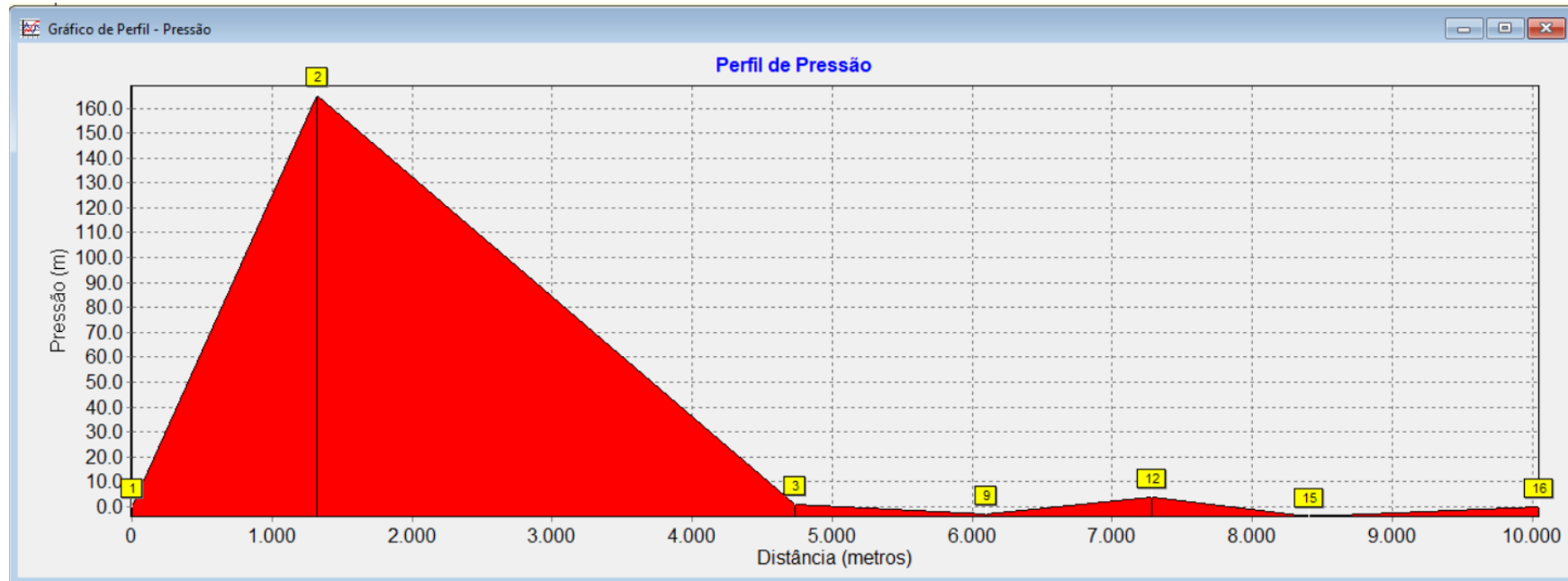
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 23 - Pressões residuais - Nó de convergência



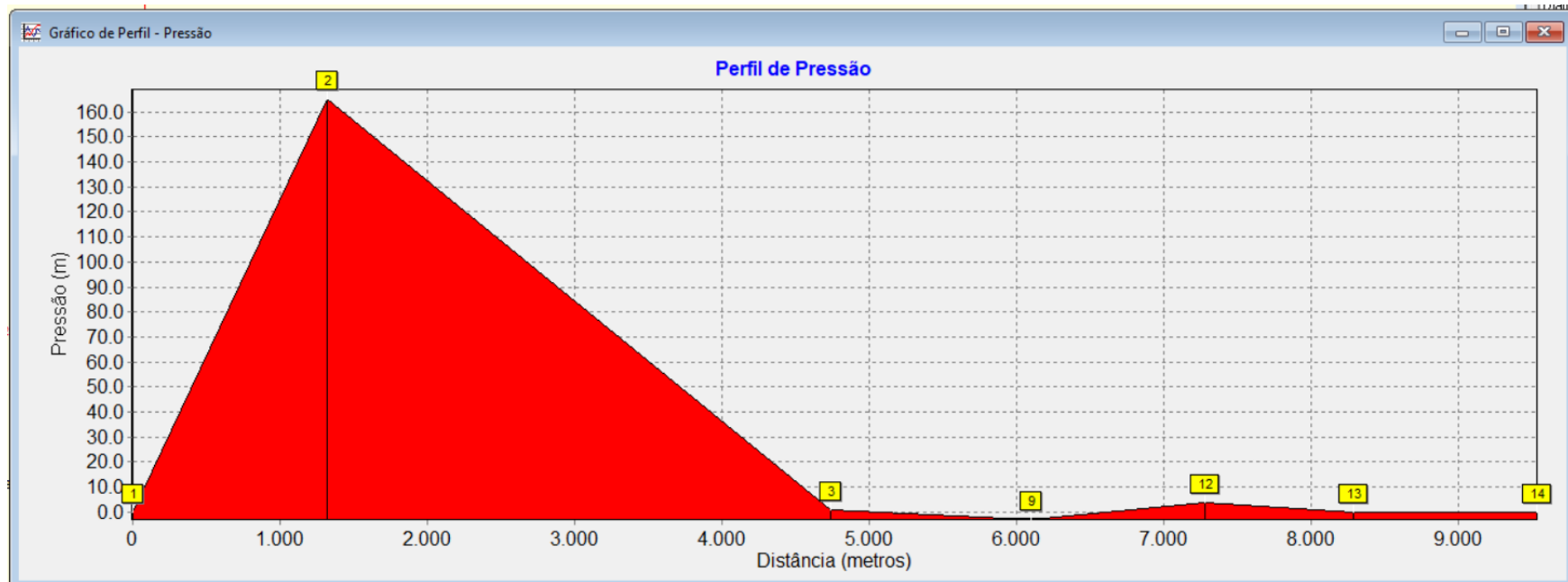
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 24 - Pressões residuais – DEMIN



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 25 - Pressões residuais – DEGEO



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise destes nós críticos demonstra que, embora ocorra a positivação em trechos centrais, a persistência de subpressões crônicas nas extremidades e pontos mais altos (atingindo -3,40 m.c.a. no Nó 7, na Escola de Minas, e -1,92 m.c.a. no Nó 15) inviabiliza tecnicamente a Alternativa A. O sistema permanece sem atender à exigência de pressões dinâmicas positivas preconizada pela (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Nesta modelagem da Alternativa A, avaliou-se a capacidade hidráulica de um traçado de 797 metros (abrangendo a saída da captação até o reservatório do Restaurante Universitário), mantendo integralmente a topologia e a altimetria da rede existente. O objetivo foi verificar se a ampliação do diâmetro reduziria a perda de carga ao ponto de eliminar a necessidade das atuais manobras operacionais manuais.

Para consubstanciar os resultados, a análise de escoamento contínuo e a simulação das pressões transitórias (Golpe de Aríete) foram conduzidas aplicando os parâmetros de duas matrizes materiais: o Ferro Fundido (FOFO), escolhido para o projeto, e o mPVC (DEFOFO), utilizado como parâmetro comparativo.

Ao processar o balanço simultâneo de conservação de massa e energia para este novo cenário altimétrico e geométrico, o software gerou os parâmetros cinéticos e piezométricos resultantes do escoamento. A Tabela 21 consolida as cargas piezométricas e as pressões residuais geradas em todos os nós estruturais da adutora. De forma complementar, a Tabela 22 evidencia o comportamento hidrodinâmico nos trechos tubulares sob essa nova configuração, destacando as vazões, as velocidades de escoamento e as perdas de carga unitárias.

Tabela 21 - Pressões nodais - Alternativa A

ID do Nó	Cota (m)	Carga Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a.)
Nó 2 (Elevatória)	1070,00	1233,19	163,19
Nó 3	1217,00	1218,07	1,07
Nó 4	1218,00	1218,00	0,00
Nó 6	1223,00	1218,06	-4,94
Nó 7	1229,00	1218,06	-10,94
Nó 9	1221,00	1218,04	-2,96
Nó 10	1224,00	1218,04	-5,96
Nó 12	1214,00	1218,01	4,01
Nó 13	1218,00	1218,00	0,00
Nó 15	1222,00	1218,01	-3,99

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 22 - Vazões e velocidades - Alternativa A (EPANET)

ID do Trecho	Material	Diâmetro Interno (mm)	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	Perda de Carga Unitária (m/km)
Trecho 2	MPVC	108,4	13,35	1,45	19,09
Trecho 3	MPVC	108,4	12,31	1,33	13,97
Trecho 4	MPVC	108,4	1,04	0,11	0,17
Trecho 5	MPVC	108,4	0,00	0,00	0,00
Trecho 6	MPVC	108,4	1,04	0,11	0,19
Trecho 7	MPVC	108,4	0,00	0,00	0,00
Trecho 8	MPVC	108,4	1,04	0,11	0,18
Trecho 9	MPVC	108,4	1,04	0,11	0,19
Trecho 10	MPVC	108,4	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Assim como executado na análise de diagnóstico da adutora existente (Seção 6.1), os resultados nodais e cinéticos desta alternativa foram confrontados com as exigências da norma (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Para sintetizar as vulnerabilidades desta alternativa em face da legislação vigente, a Tabela 23 destaca os elementos da rede que apresentaram os parâmetros hidráulicos

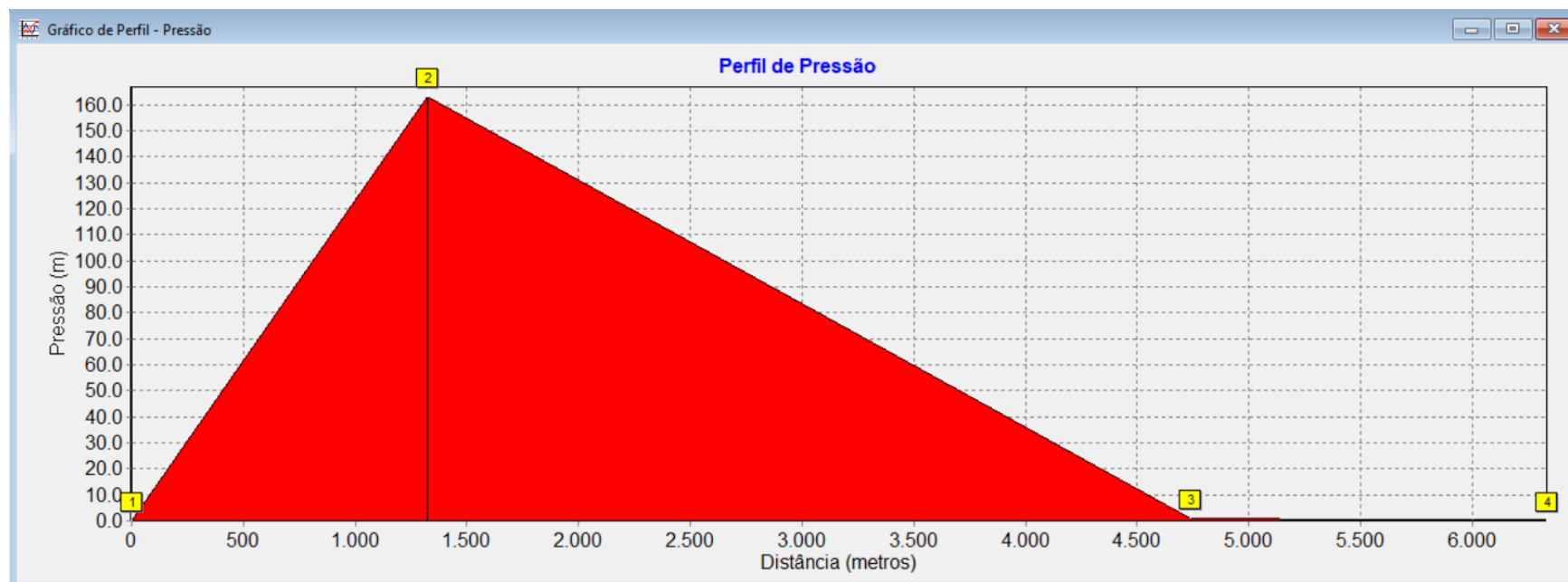
mais críticos, evidenciando o não cumprimento das diretrizes da ABNT NBR 12215 (2017) e em seguida as Figura 26 a Figura 30.

Tabela 23 - Pressões residuais críticas simuladas na Alternativa A (EPANET)

Nó	Localização / Setor	Cota Geométrica (m)	Pressão Simulada (m.c.a.)	Status normativo
Nó 2	Elevatória (Saída da Bomba)	1070,00	163,19	(Risco de Ruptura)
Nó 6	Intermediário Superior	1223,00	-4,94	(Falha)
Nó 7	Escola de Minas (Ponto Crítico)	1229,00	-10,94	(Falha)
Nó 10	Próx. Convergência	1224,00	-5,96	(Falha)
Nó 15	Próx. Depto. Minas	1222,00	-3,99	(Falha)

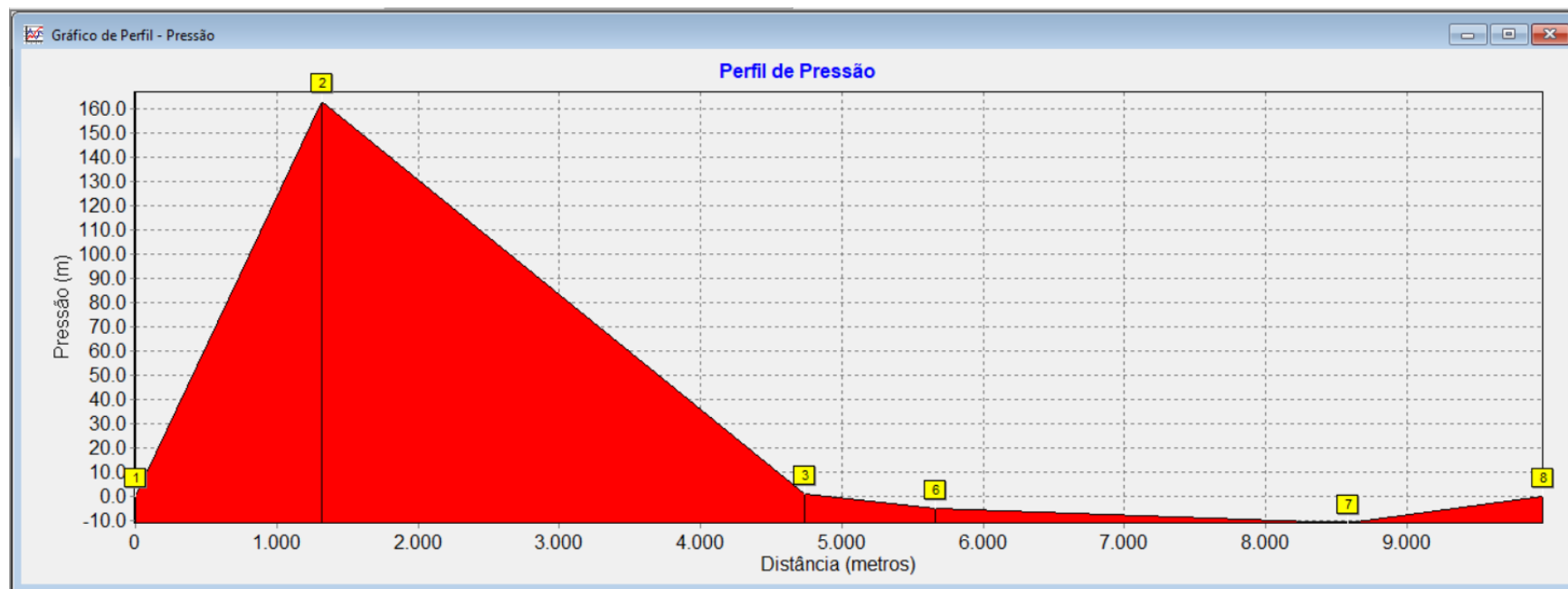
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 26 - Perfil piezométrico – Restaurante



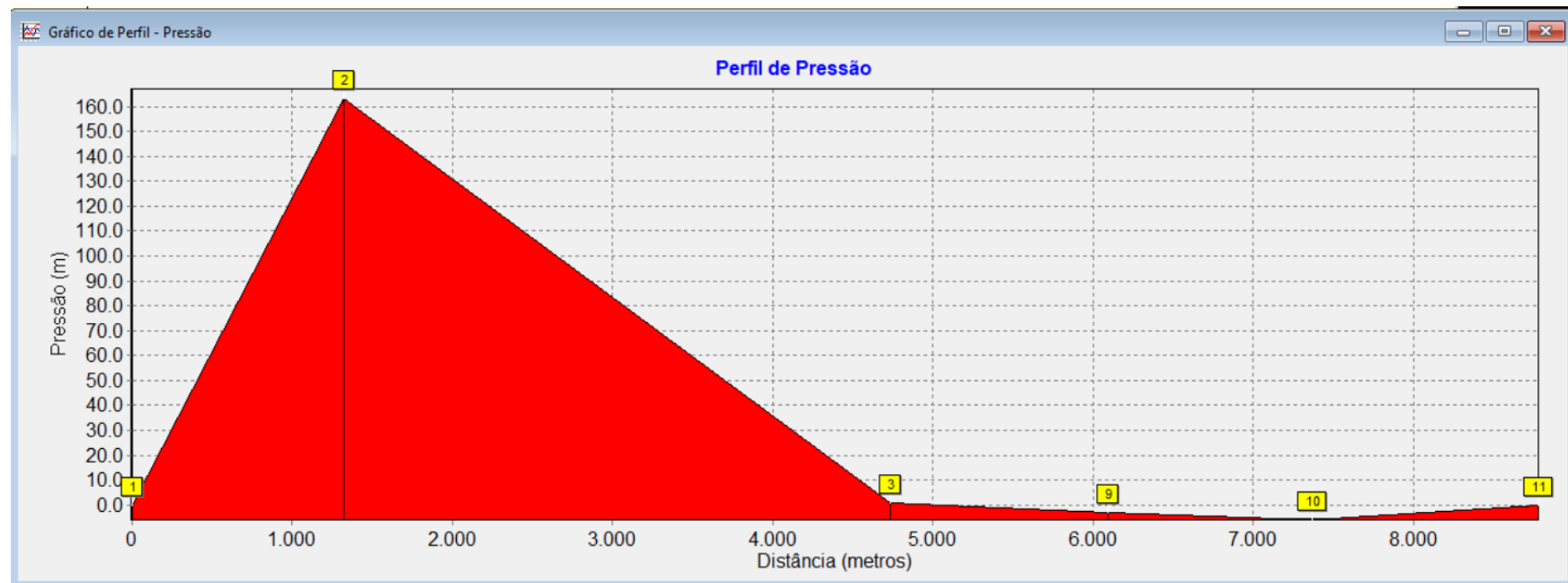
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 27 - Perfil piezométrico – Escola de Minas



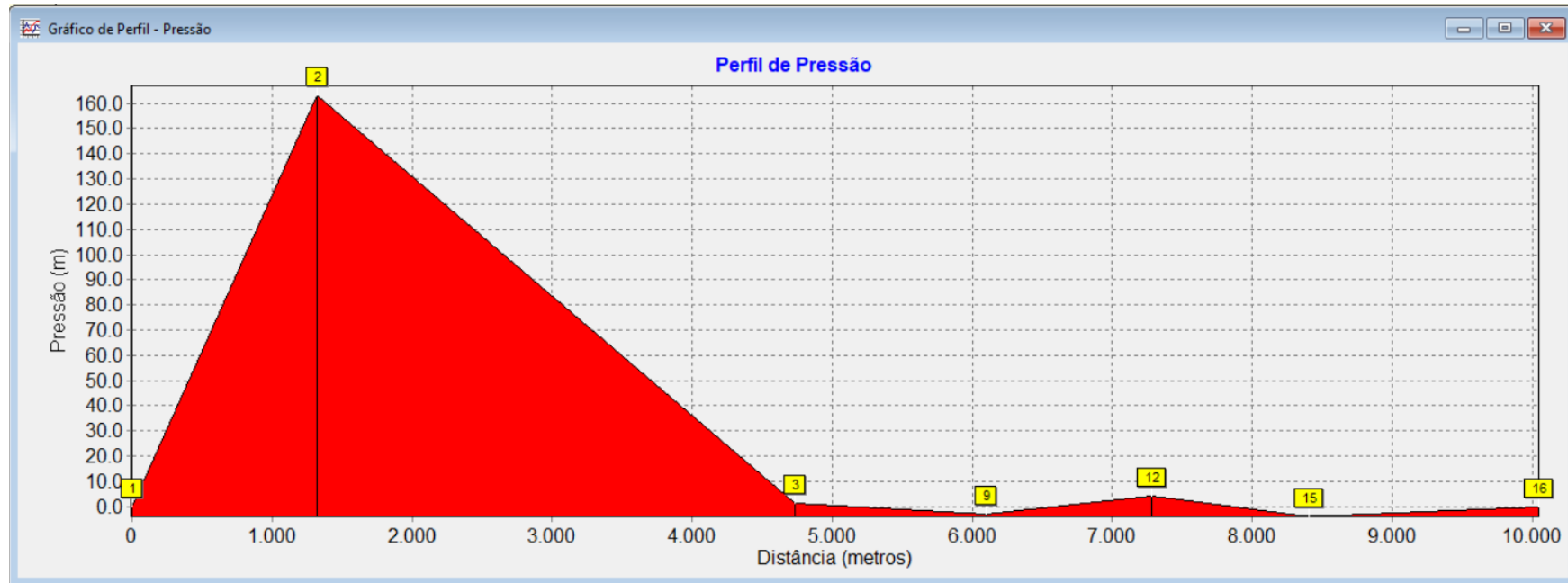
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 28 - Perfil piezométrico – Centro de Convergência



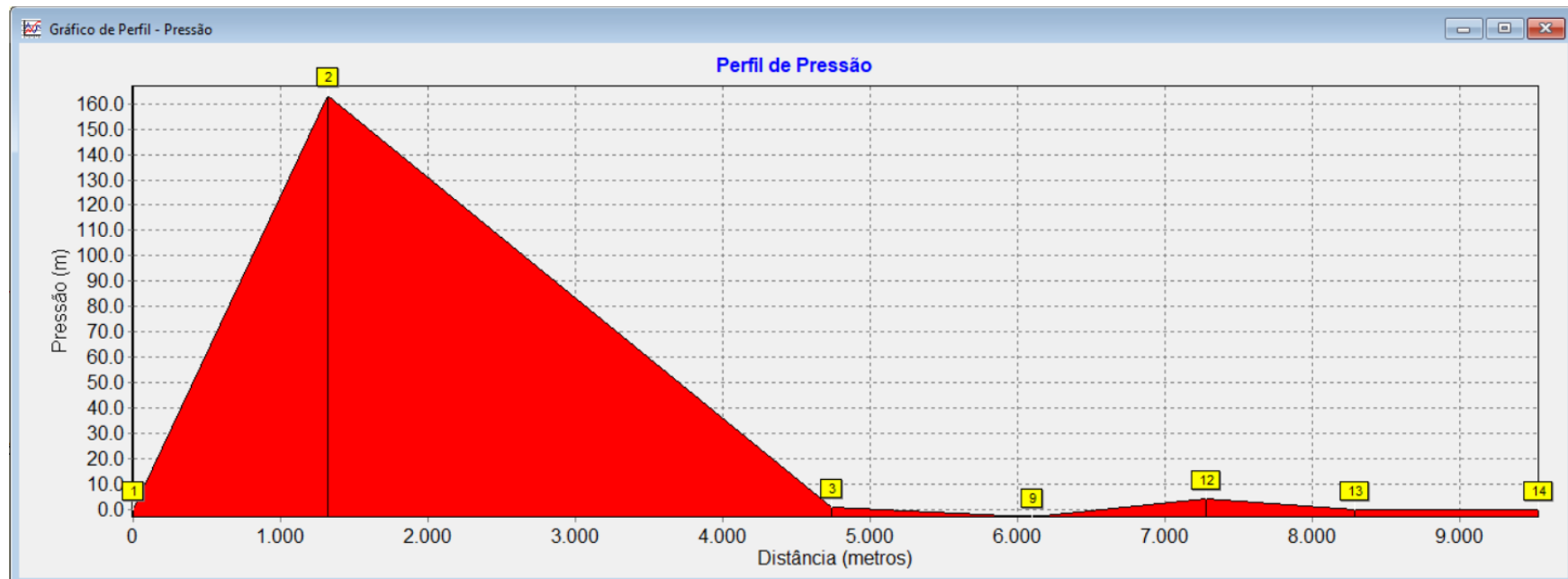
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 29 - Perfil piezométrico – Departamento de Minas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 30 - Perfil piezométrico – Departamento de Geologia



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise destes nós críticos demonstra que, embora ocorra a positivação em trechos centrais, a persistência de subpressões crônicas nas extremidades e pontos mais altos (atingindo -3,40 m.c.a. no Nó 7, na Escola de Minas, e -1,92 m.c.a. no Nó 15) inviabiliza tecnicamente a Alternativa A. O sistema permanece sem atender à exigência de pressões dinâmicas positivas preconizada pela (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Como etapa preliminar à modelagem hidrodinâmica computacional detalhada, procedeu-se à verificação analítica do regime transitório para a Alternativa A utilizando o Método Simplificado. Esta abordagem matemática permite estimar de forma direta a redução da carga piezométrica junto à estação de bombeamento e no ponto médio do traçado (meio caminho) após uma falha abrupta de energia (parada brusca das bombas). O principal objetivo desta análise é identificar a vulnerabilidade inicial do sistema frente às ondas de subpressão e o risco de ocorrência de pressões negativas.

O modelo foi alimentado com os parâmetros operacionais globais da instalação para a Alternativa A. A Tabela 24 descreve estes dados de entrada, destacando a vazão nominal de projeto de 9,72 L/s e as características de rotação e inércia do conjunto motobomba.

Tabela 24 - Parâmetros hidromecânicos globais de entrada

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Vazão	Q	0,00972	m³/s
Altura na Elevatória	Zb	1070,00	m
Altura Manométrica	Hm	172	m
Velocidade Inicial	V0	1,116	m/s
Inércia Rotativa Total	I	0,258	kg.m²
Rotação Nominal	N	3550	rpm
Rendimento Global	η	75	%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir desses dados invariantes da estação elevatória, as equações do método

simplificado foram aplicadas, considerando as particularidades geométricas (. A Tabela 25 consolida a memória de cálculo e os resultados analíticos das cargas mínimas reais estimadas para a fase de depressão do golpe de aríete e a Tabela 26 consolida os resultados analíticos das reduções de pressão e das cargas mínimas reais estimadas para a fase de depressão do golpe de aríete.

Tabela 25- Parâmetros físicos e adimensionais

Material	Comprimento Equivalente L)	Celeridade Eq. (c)	Tempo de Parada (T)	Parâm. da Tubulação(2p)	Constante de Inércia (X)
DEFOFO	797 m	349,98m/s	4,55 s	0,218	1,395
FOFO	797 m	1306,49m/s	1,22 s	0,83	0,37

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 26 - Redução de carga e pressões mínimas analíticas por rota de manobra

Material	Ponto de Verificação	Carga Piezométrica	Redução de Carga	Pressão Mín. Residual
FOFO	Junto à Elevatória	1242 m	63,00 m	109 m.c.a.
	Meio Caminho	1216 m	42,00 m	74 m.c.a.
DEFOFO	Junto à Elevatória	1242 m	71,00 m	101 m.c.a.
	Meio Caminho	1216 m	53,00 m	85 m.c.a.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

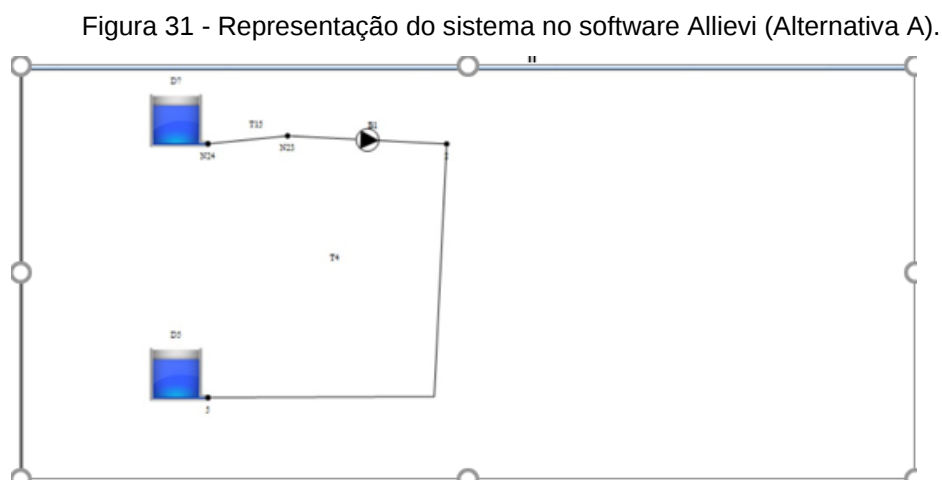
Os resultados consolidados na Tabela 26 revelam que, sob uma análise puramente matemática e pontual, as Cargas Mínimas Reais a Meio Caminho mantêm valores positivos em toda a extensão do traçado avaliado durante a fase inicial de depressão.

Apesar de esses valores indicarem que a pressão no ponto médio das tubulações não cai a níveis críticos de vácuo capazes de gerar a ebulição instantânea da água (visto que o limite de cavitação situa-se próximo a -8,9 m.c.a.), torna-se fundamental pontuar as limitações do Método Simplificado. Esta metodologia analítica foca exclusivamente no primeiro ciclo descendente da onda de pressão em seções predeterminadas. Ela é incapaz de prever o comportamento dinâmico complexo ao longo de toda a extensão

do perfil longitudinal, tampouco a magnitude das ondas de sobrepressão resultantes do choque de retorno da massa líquida após o fechamento das válvulas de retenção.

Dessa forma, os valores positivos estimados para o meio caminho não eliminam a possibilidade de colapso estrutural ou pressões extremas nas extremidades da adutora. Para validar este diagnóstico preliminar e mapear as envoltórias piezométricas completas sob uma abordagem temporal, faz-se indispensável a aplicação da simulação computacional no software Allievi, cujos resultados gráficos são detalhados na subseção a seguir.

Para avaliar o comportamento hidráulico do sistema frente a manobras bruscas, utilizou-se o software Allievi, especializado na simulação de escoamentos em regime transitório (Golpe de Aríete). O primeiro passo da modelagem consistiu na transposição da topologia da rede para a interface do programa, respeitando as elevações nodais e o direcionamento do escoamento. A Figura 31 apresenta o croqui do sistema modelado, identificando os reservatórios, as interligações tubulares e a estação de bombeamento principal (B1).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A precisão de uma simulação de regime transitório depende intrinsecamente da caracterização física das tubulações. Diferentemente do regime permanente,

parâmetros como a espessura da parede do tubo e o módulo de elasticidade do material são determinantes, pois definem a celeridade da onda de pressão que se propagará pela rede. A Tabela 27 e Tabela 28 consolidam as propriedades geométricas e hidráulicas cadastradas para cada trecho do sistema.

Tabela 27 - Propriedades geométricas e celeridade de onda calculada para a Alternativa A (mPVC)

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro Interno (mm)	Espessura (mm)	Rugosidade (mm)	Celeridade da Onda (m/s)
T2	792	108,4	4,8	0,001	349,98
T3	5	108,4	4,8	0,001	349,98
T15	1,4	108,4	4,8	0,001	349,98

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 28 - Propriedades geométricas e celeridade de onda calculada para a Alternativa A (FOFO)

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro Interno (mm)	Espessura (mm)	Rugosidade (mm)	Celeridade da Onda (m/s)
T2	792	107,2	5,2	0,025	1306,49
T3	5	107,2	5,2	0,025	1306,49
T15	1,4	107,2	5,2	0,025	1306,49

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Paralelamente, o grupo motobomba (Estação B1) foi configurado para refletir as condições mecânicas e operacionais de projeto. A inércia das massas girantes (rotor e motor) é um fator crítico, pois dita a taxa de desaceleração do fluido em caso de queda de energia. A Tabela 29 resume os parâmetros rotodinâmicos e de rendimento inseridos no modelo para a geração do evento transitório.

Tabela 29 - Parâmetros operacionais e mecânicos da elevatória

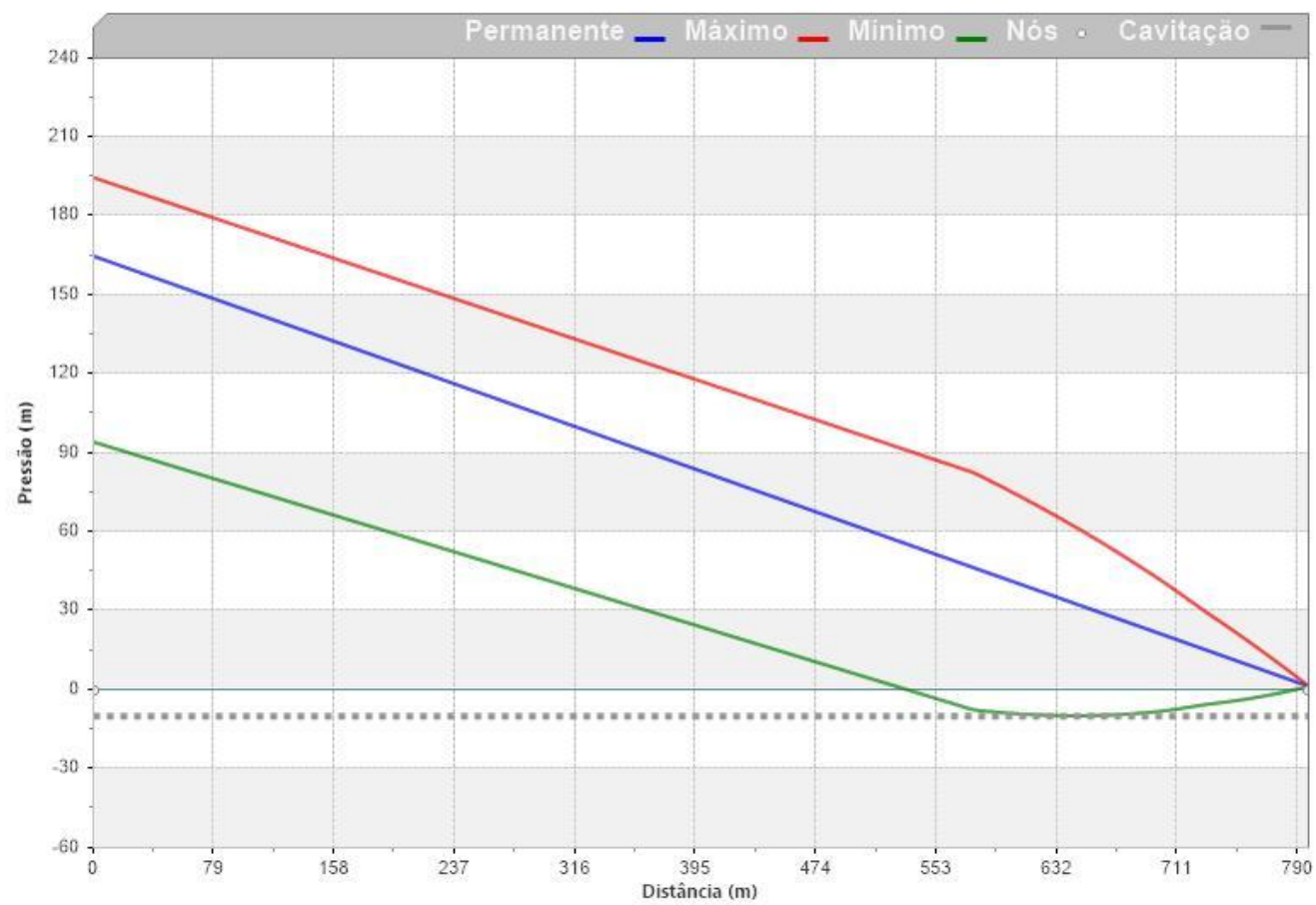
Parâmetro Operacional	Valor Inserido no Modelo
Rotação Nominal	3550 rpm
Momento de Inércia (I)	0,258
Vazão no Ponto de Rendimento Ótimo	12 L/s
Altura Manométrica Ótima	172 m
Potência Requerida	36 kW
Rendimento Ótimo	56,24%
Instante de Parada (Simulação de Falha)	10 segundos

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Uma vez estabelecidos o traçado, as propriedades físicas de reflexão das ondas e as características de inércia da bomba, estruturou-se o cenário de falha abrupta de energia elétrica no décimo segundo de simulação, cujos efeitos hidrodinâmicos destrutivos no sistema desprotegido são avaliados na subseção a seguir.

Para a interpretação dos perfis longitudinais gerados pelo software, definem-se as seguintes envoltórias de pressão: A Figura 32 apresenta o perfil piezométrico transitório para o principal ramal.

Figura 32 - Envoltória de pressões transitórias no cenário sem proteção: Ramal Restaurante DEFOFO



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

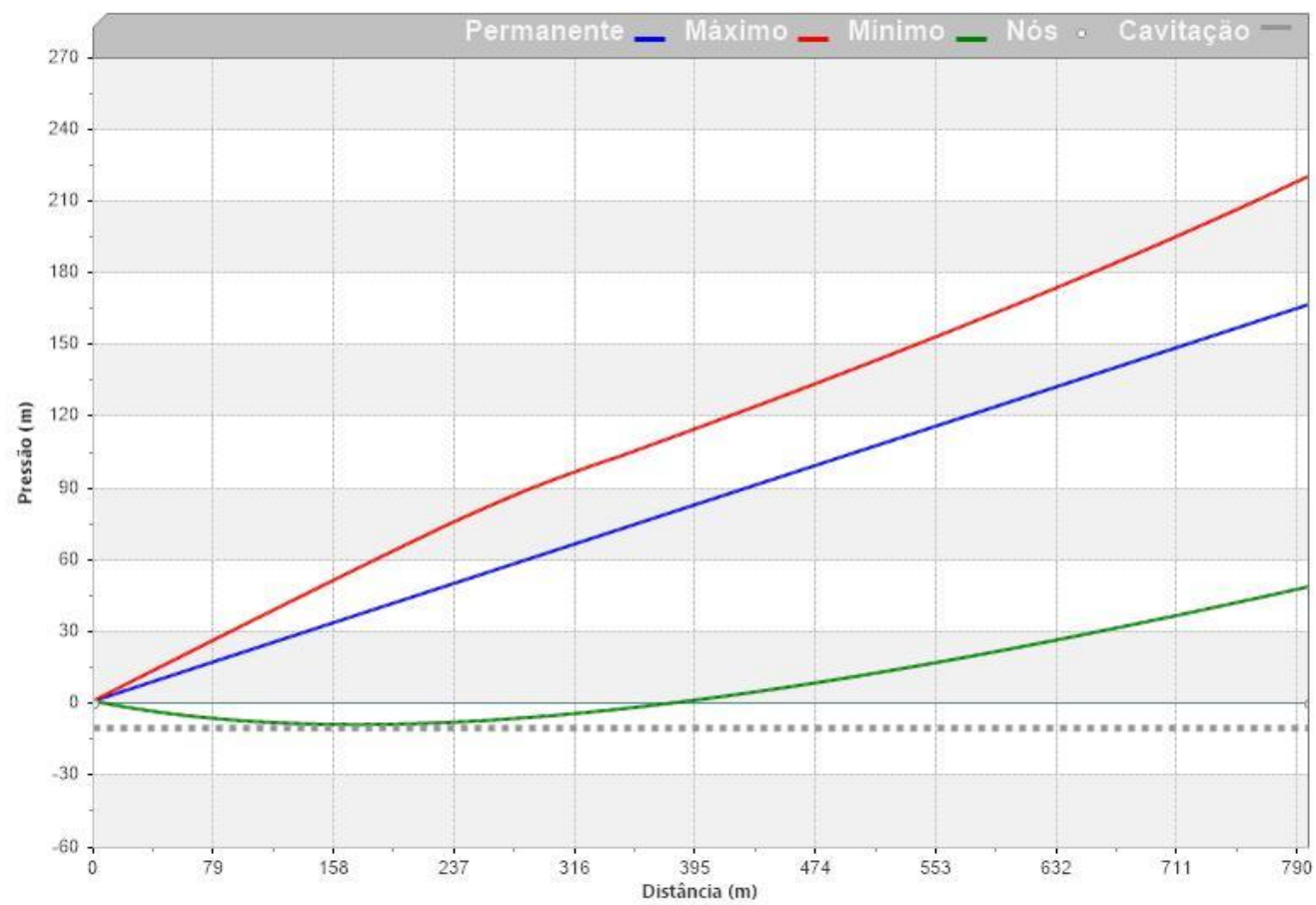
A Figura 32 ilustra graficamente o comportamento dinâmico ao longo de toda a extensão do ramal do Restaurante Universitário (aproximadamente 792 m). A linha piezométrica característica do regime permanente (azul) reflete a carga inicial de recalque de aproximadamente 163 m.c.a. junto à elevatória. Após a simulação de falha, o modelo computacional acusa a formação de uma envoltória de máxima pressão (linha vermelha) que atinge picos de aproximadamente 220 m.c.a. na região imediatamente adjacente à estação de bombeamento (estaca 0 m), submetendo as juntas da tubulação a esforços de tração abruptos.

O aspecto técnico mais crítico revelado pelo simulador, no entanto, é o comportamento da envoltória de pressões mínimas (linha verde). O decréscimo rompe a linha atmosférica (0 m.c.a.) por volta da estaca 420 m e atinge o limite crítico de cavitação vaporosa (-8,9 m.c.a.) na extremidade final do trecho, próximo à estaca 790 m.

É fundamental observar que, apesar da substituição do material para mPVC (Defofo), os parâmetros físicos dimensionais inseridos no simulador resultaram em uma celeridade de onda aproximadamente 349,98. Como consequência, a inércia da coluna de água causa o violento choque de retorno, tornando a ruptura estrutural e a separação de coluna líquida um risco iminente, comprovando a obrigatoriedade da implementação de dispositivos de proteção contra o golpe de aríete.

Para fins comparativos, a simulação foi repetida adotando-se os parâmetros do Ferro Fundido (FOFO), cuja celeridade de onda é substancialmente maior (1299,49 m/s). O comportamento hidrodinâmico resultante demonstrou um agravamento do quadro dinâmico: a ausência de amortecimento elástico nas paredes metálicas gerou picos de sobrepressão ainda mais violentos e antecipou a queda da linha piezométrica para o limite de cavitação (-8,9 m.c.a.), ratificando a total inviabilidade de operação desprotegida para qualquer um dos materiais. A Figura 33 ilustra os gráficos das envoltórias de pressão.

Figura 33 - Envolvória de pressões transitórias no cenário sem proteção: Ramal Restaurante FOFO



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Interpretação Analítica dos Resultados Transitórios

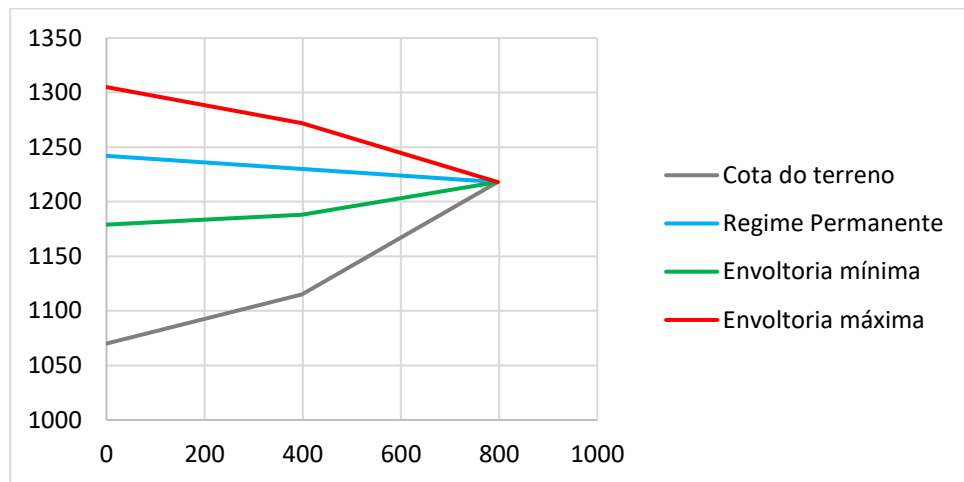
A análise das envoltórias geradas pelo Allievi revela que o sistema, em seu estado desprotegido, é hidraulicamente inviável e altamente suscetível a rupturas catastróficas. Observam-se duas patologias extremas que ocorrem de forma sistêmica em todos os trechos avaliados:

Riscos Severos de Sobrepressão (Ruptura Física): As oscilações positivas (linhas vermelhas) geram picos de pressão que ultrapassam largamente a classe de pressão nominal de tubulações comerciais padrão.

Cavitação e Separação de Coluna Líquida (Colapso): De forma ainda mais crítica, a envoltória de pressões mínimas (linhas verdes) em todos os gráficos decai rapidamente para valores negativos até tangenciar o limite de pressão de vapor da água (-8,9 m.c.a.). A partir do instante em que a pressão atinge este patamar (visível onde a linha verde se torna plana e horizontal na base do gráfico), ocorre a vaporização local da água e a consequente Separação da Coluna Líquida (SCL). O colapso (fechamento) dessas bolsas de vapor durante as fases de retorno da onda gera picos secundários de pressão de magnitude imprevisível e destrutiva, além de causar o esmagamento (buckling) da tubulação devido à pressão atmosférica externa.

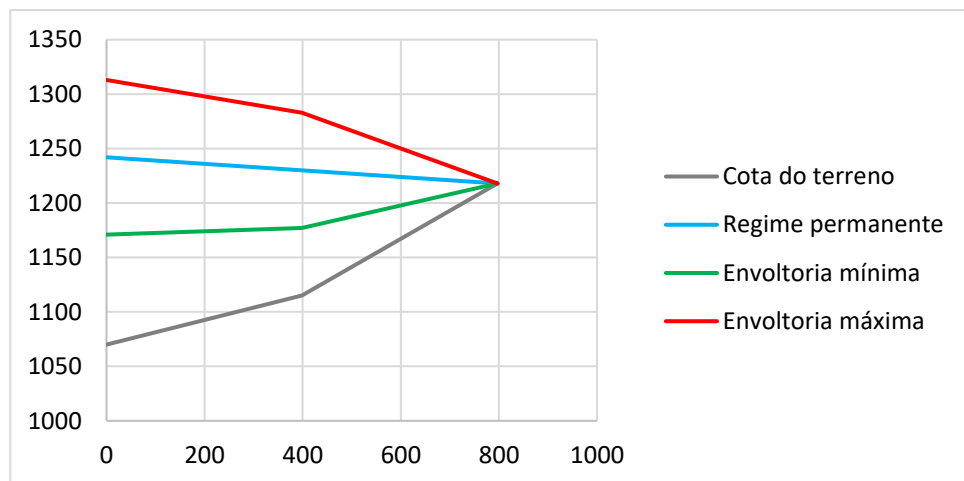
Visando complementar a análise gerada pelo software Allievi e fornecer uma visualização simplificada das diferenças de comportamento entre os materiais perante o perfil do terreno, modelos gráficos simplificados foram gerados para a Alternativa A. A Figura 34 ilustra a representação simplificada da envoltória para a tubulação em Ferro Fundido (FOFO), evidenciando os picos de sobrepressão mais severos. De modo comparativo, a Figura 35 apresenta a versão simplificada para a tubulação em mPVC (DEFOFO).

Figura 34 – Representação simplificada da envoltória para a tubulação (FOFO).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 35 - Representação simplificada da envoltória para a tubulação (DEFOFO).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A comparação direta dessas representações com os perfis do software corrobora que a maior elasticidade do mPVC atenua levemente as amplitudes de pressão, embora ambas as modelagens confirmem que o sistema permanece sob risco extremo de cavitação, rompendo a linha do terreno. Portanto, o diagnóstico do regime transitório comprova a obrigatoriedade da implementação de um sistema de amortecimento e proteção.

4.2.2 Análise de nova adutora para novo traçado

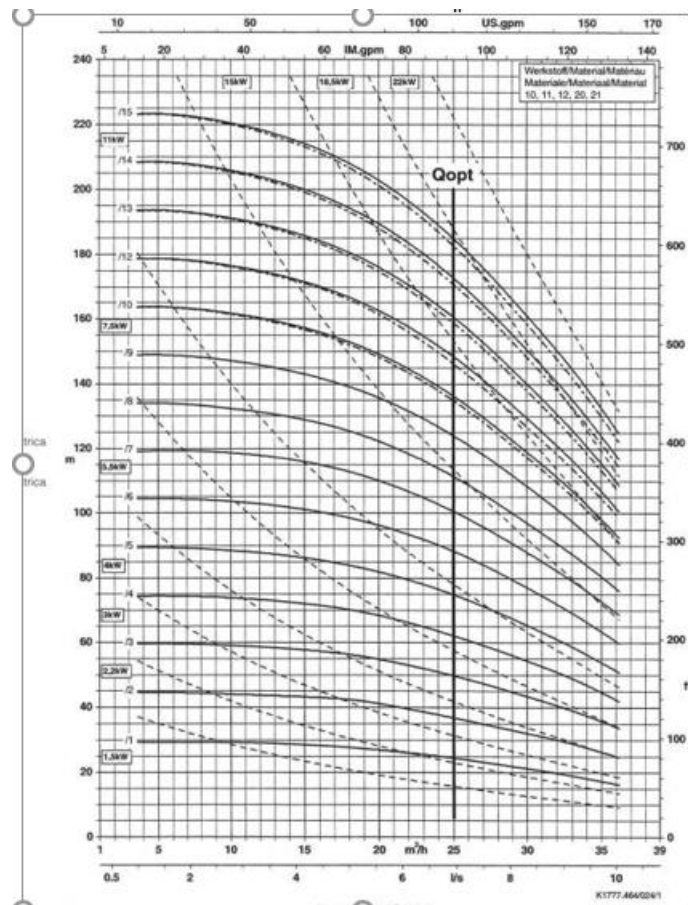
Para a Alternativa B, foi adotado mais um novo conjunto motobomba KSB Multitec 50-4.1 (1 estágio), selecionada para atender às condições hidráulicas do novo traçado da adutora. A escolha desse equipamento foi realizada com base na curva característica fornecida pelo fabricante, apresentada na Figura 36, buscando compatibilizar a altura manométrica requerida e a vazão de projeto com uma operação próxima ao ponto de melhor rendimento (Best Efficiency Point – BEP).

Sob a ótica da rotodinâmica, operar próximo ao BEP significa que o fluido entra no rotor com o ângulo de incidência ideal, minimizando o descolamento da camada limite e a recirculação interna nas pás. Focando na gestão de ativos abnt nbr (2014), esta eficiência termodinâmica garante que a maior parte da energia elétrica consumida seja efetivamente convertida em energia piezométrica, reduzindo drasticamente o consumo específico (kWh/m^3) e atenuando as vibrações mecânicas, o que prolonga a vida útil dos mancais e rolamentos, conforme fundamentado por (Macintyre, 1997).

A Figura 36 apresenta as curvas características da bomba, relacionando vazão, altura manométrica, potência absorvida e rendimento. Observa-se que o ponto de operação obtido para a Alternativa B situa-se próximo da região de máximo rendimento (Q_{opt}), indicando uma condição operacional adequada, com maior eficiência energética e menor solicitação mecânica do conjunto motobomba. Essa condição também reduz a probabilidade de funcionamento em regiões instáveis da curva, contribuindo para a confiabilidade operacional da nova adutora.

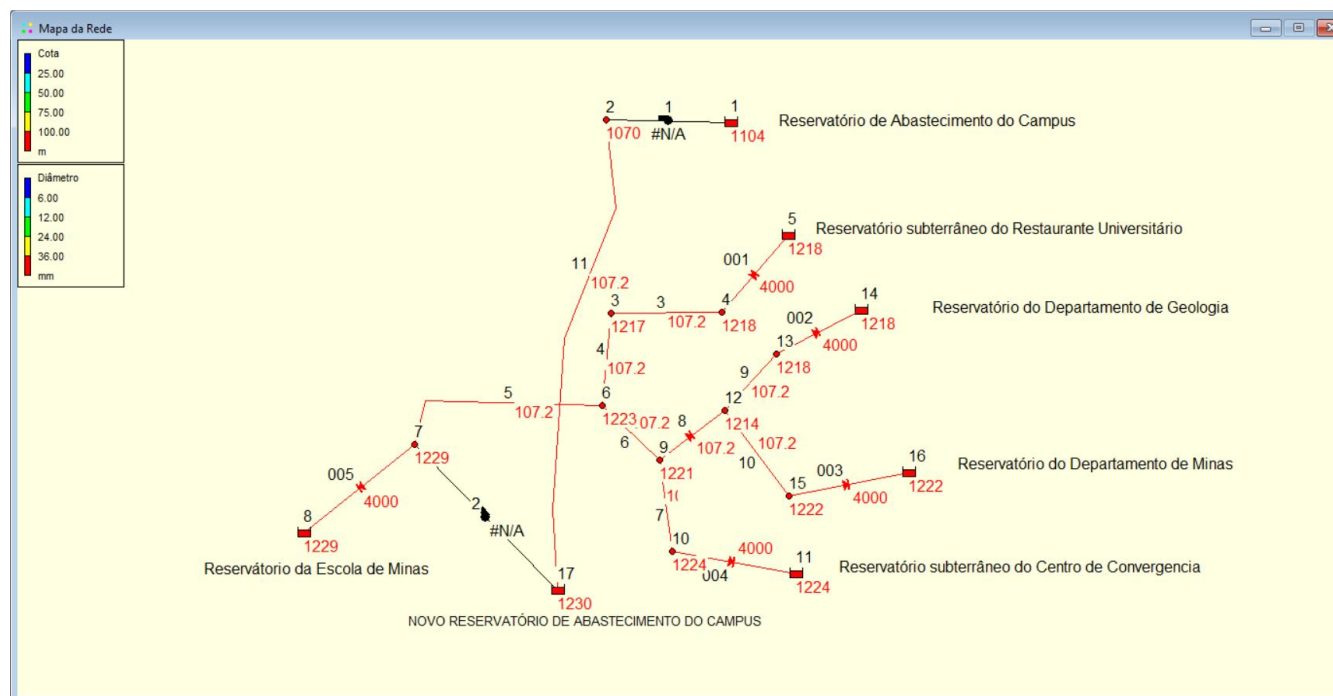
De modo a compreender o decaimento da energia ao longo da rede e identificar visualmente os pontos de estrangulamento e sobrepressão, foram gerados os perfis piezométricos longitudinais partindo da estação elevatória até às extremidades de cada ramal de abastecimento do Campus. As Figura 38 a Figura 43 ilustram o comportamento da linha de energia nestes trajetos. Para ilustrar a configuração topológica e a distribuição espacial das pressões e vazões simuladas na Alternativa B, a Figura 37 apresenta a interface gráfica do modelo consolidado no EPANET.

Figura 36 - Curva característica da bomba KSB Multitec 50-4.1 (1 estágio)



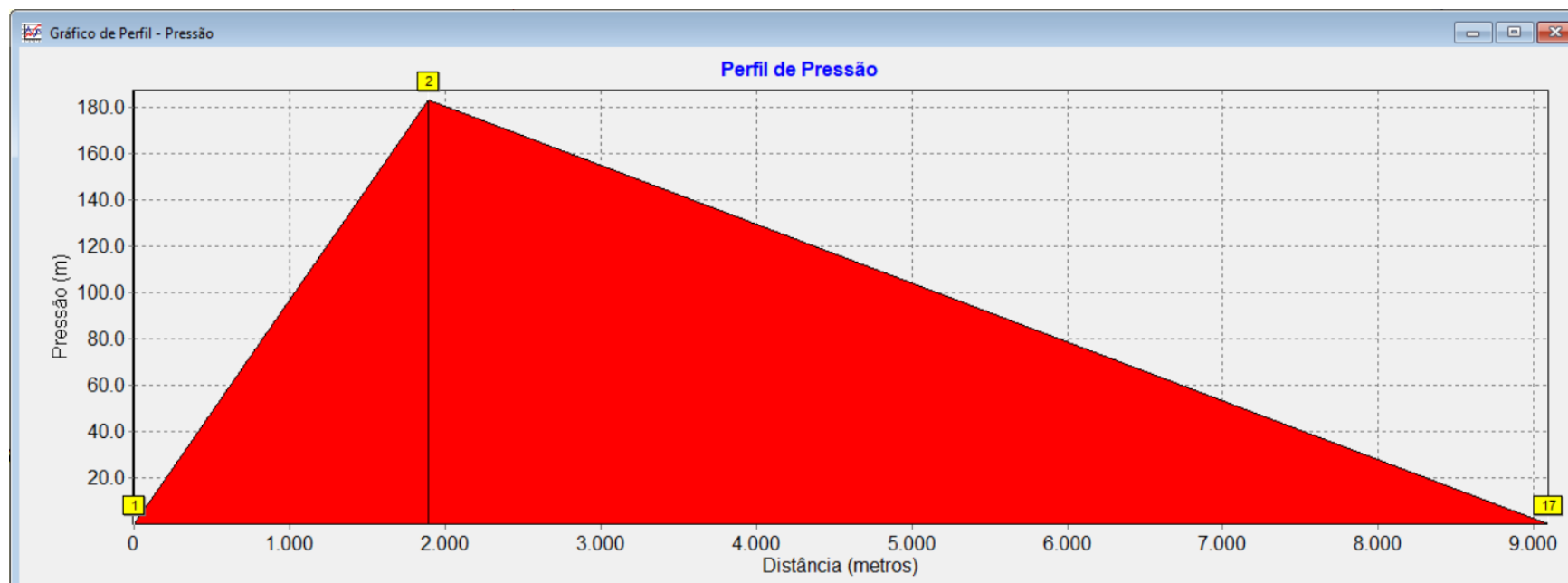
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 37 - Layout espacial do modelo hidráulico da Alternativa B



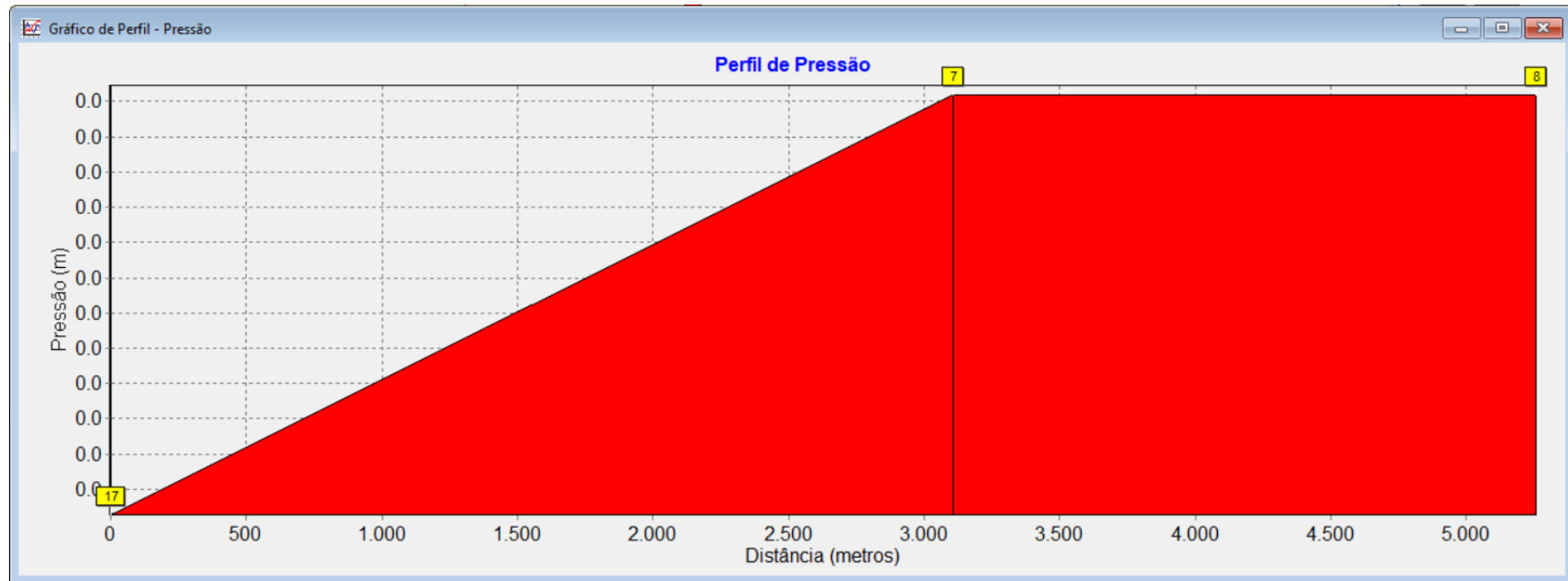
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 38 - Perfil piezométrico - Novo reservatório.



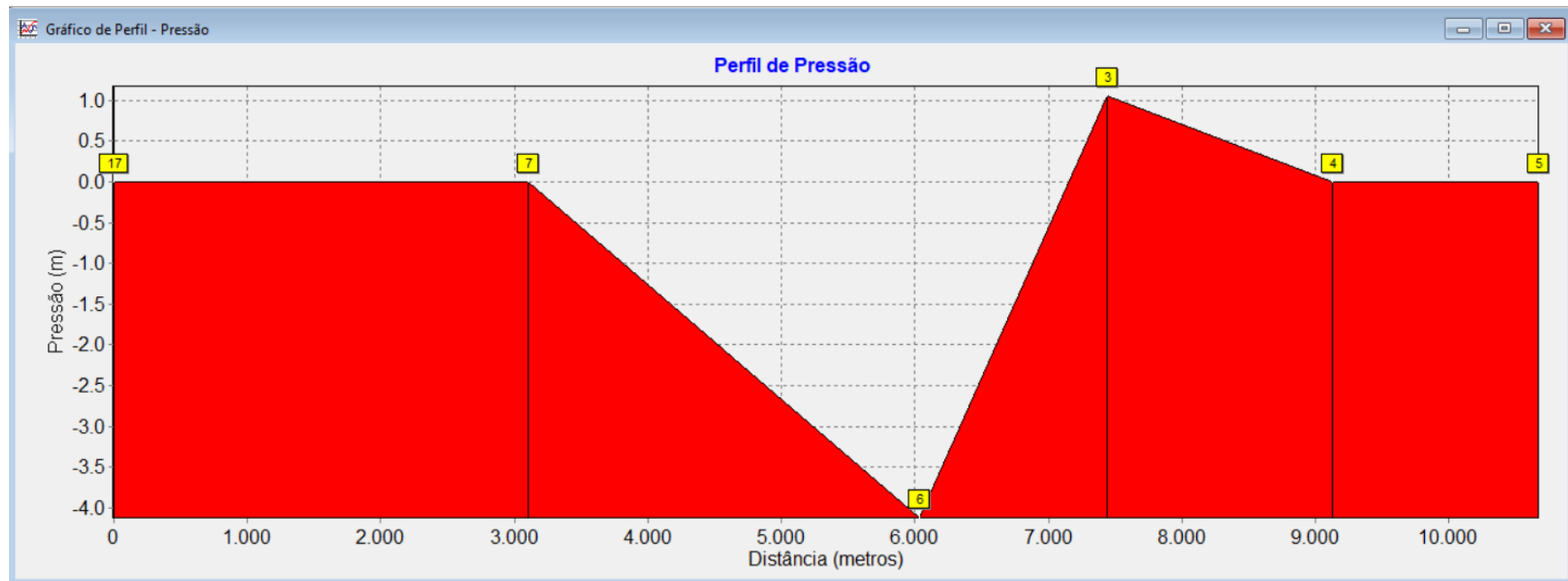
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 39 - Perfil piezométrico - Reservatório Escola de Minas



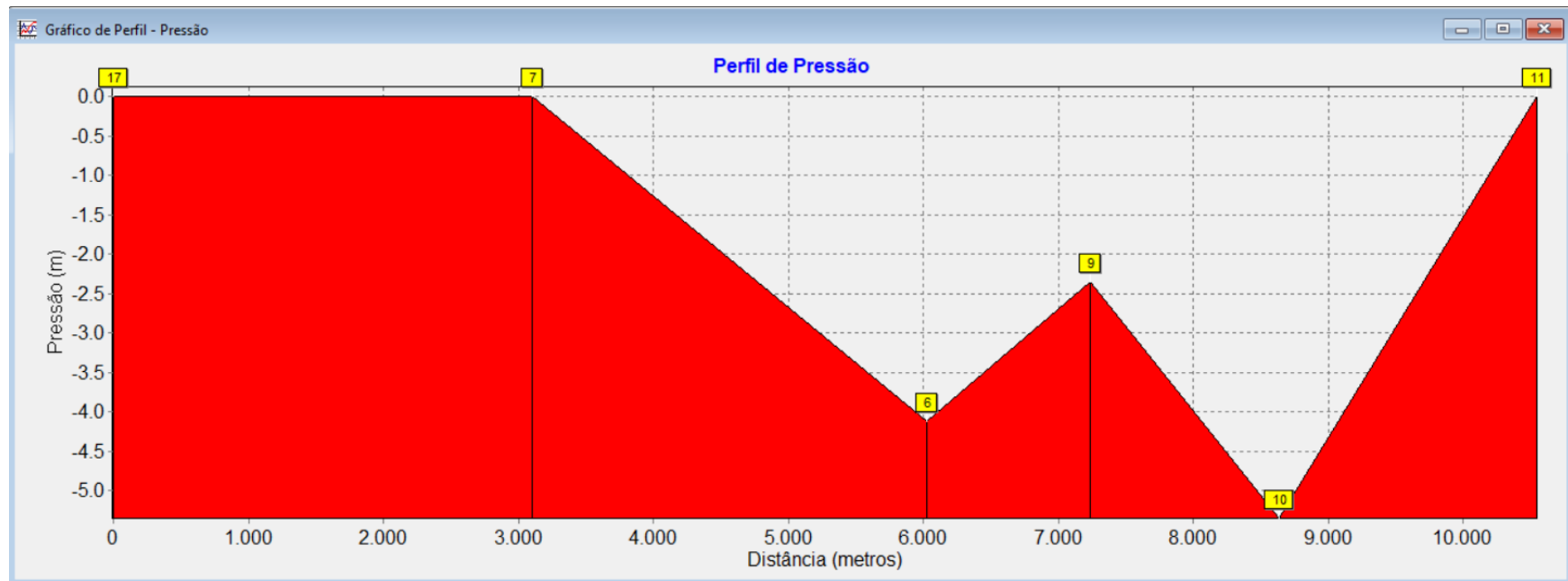
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 40 - Perfil piezométrico - Restaurante Universitário



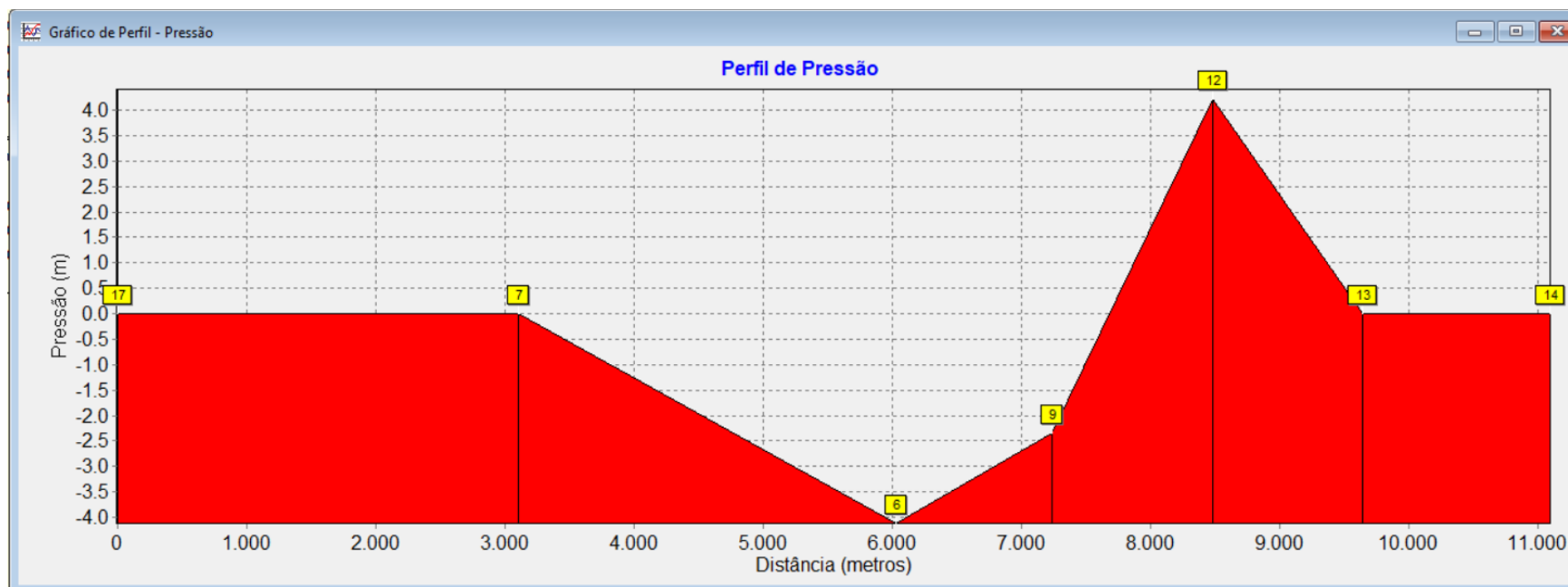
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 41 - Perfil piezométrico - Nó de convergência.



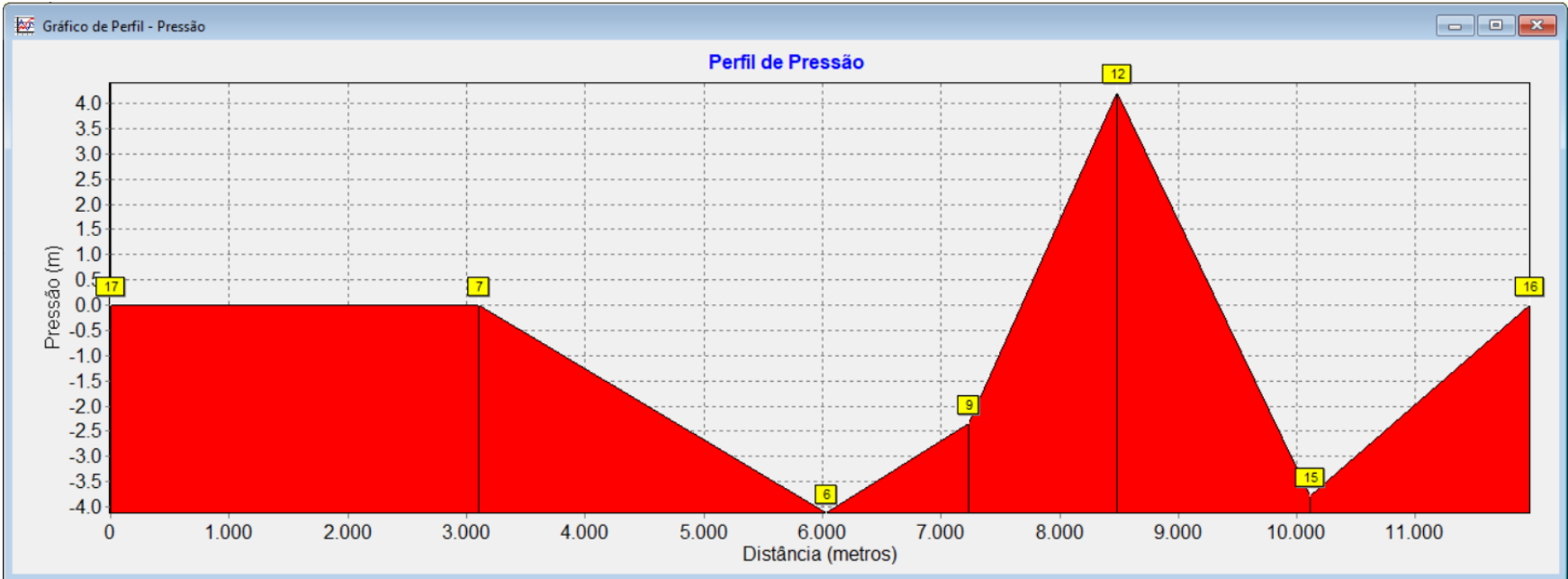
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 42 - Perfil piezométrico – DEGEO



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 43 - Perfil piezométrico – DEMIN



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para a avaliação da Alternativa B, propôs-se uma alteração substancial na concepção hidráulica do sistema. Esta intervenção consiste na implantação de um novo reservatório de acumulação localizado no ponto de maior cota topográfica do Campus (adjacente ao reservatório da Escola de Minas).

Esta estratégia está estruturalmente associada à construção de uma nova linha adutora dedicada, que parte diretamente da captação (R1) e descarrega exclusivamente neste novo reservatório superior, totalizando 1.331 metros de extensão. O objetivo primário é recalcar a totalidade do volume diário para este ponto elevado e, a partir dele, abastecer as demais edificações do campus.

Seguindo a diretriz metodológica, esta nova linha de 1.331 metros foi submetida à modelagem em regime permanente e transitório (Allievi), confrontando o comportamento das tubulações em Ferro Fundido (FOFO) e em mPVC (DEFOFO), a fim de dimensionar os dispositivos de proteção corretos para o novo traçado.

Processada a simulação em regime permanente no software EPANET, foram extraídos os parâmetros operacionais da rede. A Tabela 30 consolida as cargas de pressão resultantes nos nós estruturais, enquanto a Tabela 31 evidencia o comportamento cinético da água nos trechos sob esta nova configuração topológica.

Tabela 30 - Pressões nodais - Alternativa B

ID do Nó	Cota (m)	Carga Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a.)
Nó 2 (Elevatória)	1070,00	1262,14	192,14
Nó 3	1217,00	1218,05	1,05
Nó 6	1223,00	1218,88	-4,12
Nó 7	1229,00	1228,59	-0,41
Nó 9	1221,00	1218,65	-2,35
Nó 10	1224,00	1218,65	-5,35
Nó 12	1214,00	1218,22	4,22
Nó 15	1222,00	1218,22	-3,78

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 31- Vazões e velocidades - Alternativa B

ID do Trecho	Material	Diâmetro Interno (mm)	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	Perda de Carga Unitária (m/km)
Trecho 11 (Nova Adutora)	FOFO	107,2	12,55	1,39	16,64
Trecho 6	FOFO	107,2	4,64	0,51	2,96
Trecho 8	FOFO	107,2	4,64	0,51	2,82
Trecho 9	FOFO	107,2	4,64	0,51	2,98
Trecho 5	FOFO	107,2	-15,44	1,61	21,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A interpretação técnica dos resultados revela que, com a adoção do diâmetro unificado de 107,2 mm para todos os ramais nesta iteração da Alternativa B, a vazão da elevatória estabilizou-se em 12,80 L/s. A velocidade no Trecho 11 (nova adutora) reduziu para adequados 1,39 m/s, dissipando apenas 17,27 m/km por atrito e enquadrando-se perfeitamente nos limites normativos da (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017). A pressão exigida a jusante da elevatória (Nó 2) obteve uma redução direta de 34,05 m.c.a. (cerca de 15%), caindo do pico extremo de 226,19 m.c.a. registrado no sistema atual para 192,14 m.c.a.

A partir do balanço energético obtido no EPANET para a Alternativa B, correspondente ao novo traçado da adutora e à substituição do conjunto motobomba, verificou-se que as perdas de carga totais acumuladas foram de 22,15 m.c.a. para uma vazão de 12,55 L/s (45,18 m³/h). Considerando que as perdas de carga em condutos forçados sob regime turbulento apresentam comportamento aproximadamente quadrático em relação à vazão ($h_f = K \cdot Q^2$), a constante de resistência hidráulica aparente do sistema (K) foi determinada utilizando a vazão em litros por segundo, conforme a Equação 11.

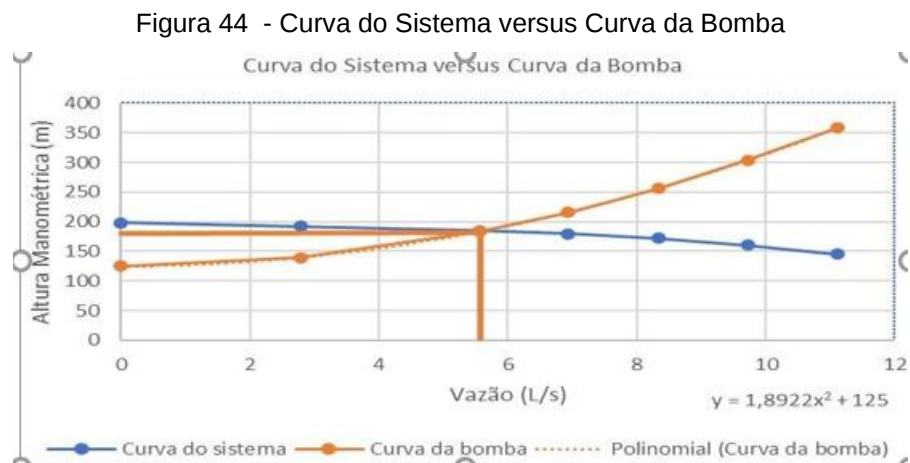
$$K = \frac{22,15}{12,55^2} = 0,1406 \left(\frac{m}{\frac{L}{s}} \right)^2$$

Substituindo-se a constante calculada e o desnível geométrico na equação

fundamental do recalque ($H_m = H_g + h_f$), obtém-se a expressão analítica da curva resistente da Alternativa B:

$$H_m = 125 + 0,1406 * Q^2$$

A curva resistente foi então sobreposta à curva característica da bomba KSB Multitec 50-3.1 (5 estágio), apresentada na Figura 44. A curva resistente foi então sobreposta à curva característica da bomba para determinar o ponto de operação do sistema neste primeiro estágio de elevação, conforme ilustrado na Figura 44.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se que o ponto de funcionamento situa-se próximo à região de melhor rendimento (Best Efficiency Point – BEP), indicando uma operação energeticamente mais eficiente e adequada às condições de projeto.

Embora a simulação global do arranjo aponte a persistência de pressões negativas nos nós a jusante (como os -5,35 m.c.a. no Nó 10 e -3,78 m.c.a. no Nó 15), é estritamente recomendável delimitar o escopo físico desta intervenção. A Alternativa B demonstrou viabilidade hidráulica estrita para a nova linha de recalque principal (Trecho 11), garantindo pressões dinâmicas positivas e a estabilização da linha piezométrica até o novo reservatório superior, atendendo à (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Tais restrições nos ramais secundários evidenciam que, embora o déficit na adução primária tenha sido sanado, a rede de distribuição exigirá adequações topológicas ou redimensionamentos em uma etapa futura de projeto conforme a Tabela 32 ilustra.

Tabela 32 - Verificação de conformidade normativa para pressões residuais e velocidades

Nó	Análise	Valor Simulado	(NBR 12215)	Status Normativo
Nó 2	Pressão Residual	192,14 m.c.a.	Pressão máxima classe do tubo	Conforme (Atenção à classe de pressão do tubo)
Nó 15	Pressão Residual	-5,35 m.c.a.	Mínimo exigido: 10,0 m.c.a. .	Não Conforme (Desabastecimento))
Nó 11	Pressão Residual	-3,78 m.c.a.	Mínimo exigido: 10,0 m.c.a. .	Não Conforme (Desabastecimento)
Trecho 11	Velocidade de Escoamento	1,42 m/s	Máximo admissível: $\leq$ 3,0 m/s	Conforme

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Análise de Desempenho da Alternativa B com Tubulação de mPVC (DEFOFO)

Visando estabelecer uma comparação técnica e econômica robusta, a Alternativa B (novo traçado com adutora independente de 1.331 metros descarregando no ponto mais alto do campus) também foi simulada no software EPANET utilizando tubulações de mPVC (linha DEFOFO), com diâmetro nominal DN 100 e diâmetro interno real de 108,4 mm.

Os resultados de pressões nodais e cargas piezométricas dinâmicas para essa configuração polimérica estão consolidados na Tabela 33, enquanto o comportamento hidráulico-cinético nos trechos da nova rede encontra-se detalhado na Tabela 34.

Tabela 33 - Pressões nodais – Alternativa B (mPVC)

ID do Nó	Cota (m)	Carga Piezométrica (m)	Pressão (m.c.a.)
Nó 2	1070,00	1259,31	189,31
Nó 3	1217,00	1218,05	1,05
Nó 6	1223,00	1220,23	-2,77
Nó 7	1229,00	1229,00	0,00
Nó 9	1221,00	1220,04	-2,35
Nó 10	1224,00	1220,04	-5,35
Nó 12	1214,00	1219,66	4,22
Nó 15	1222,00	1219,66	-3,78

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

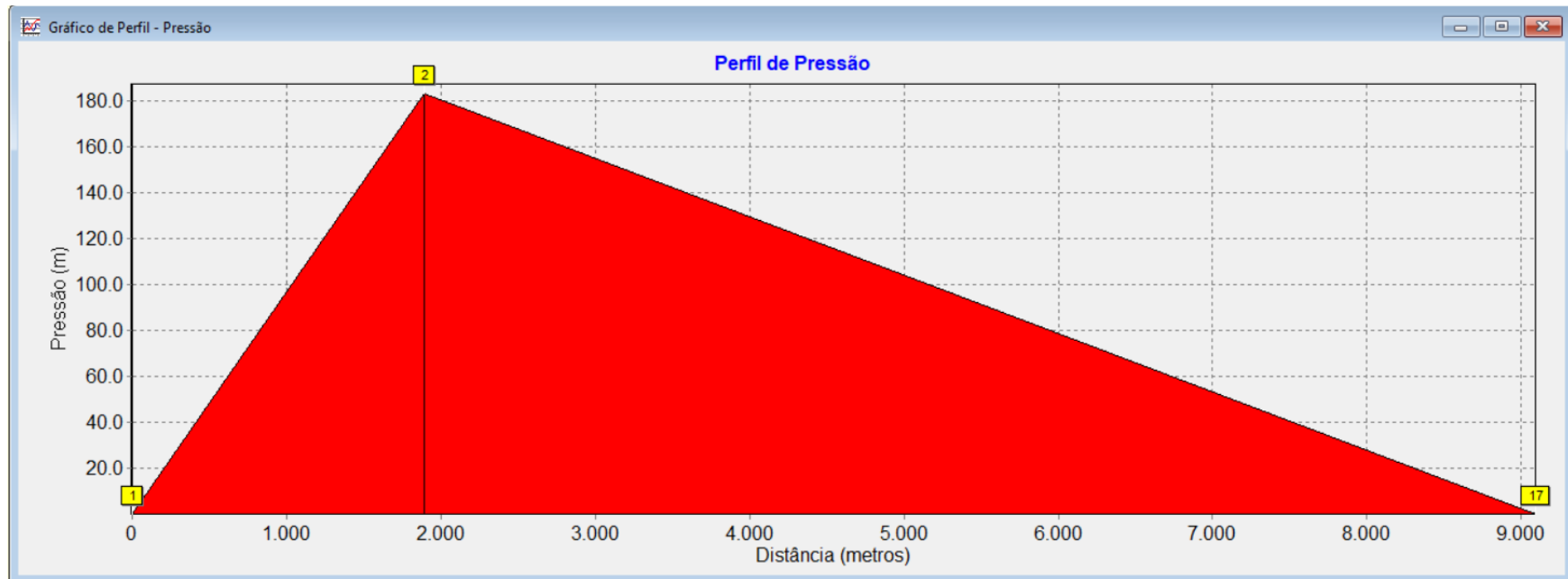
Tabela 34 - Vazões e velocidades - Alternativa B (mPVC)

ID do Trecho	Material	Diâmetro Interno (mm)	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	Perda de Carga Unitária (m/km)
Trecho 11 (Nova Adutora)	mPVC (DEFOFO)	108,4	12,88	1,40	15,16
Trecho 5	mPVC (DEFOFO)	108,4	-14,55	1,67	21,03
Trecho 6	mPVC (DEFOFO)	108,4	4,64	0,50	2,44
Trecho 8	mPVC (DEFOFO)	108,4	4,64	0,50	2,44
Trecho 9	Mpvc DEFOFO)	108,4	4,64	0,50	2,44

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

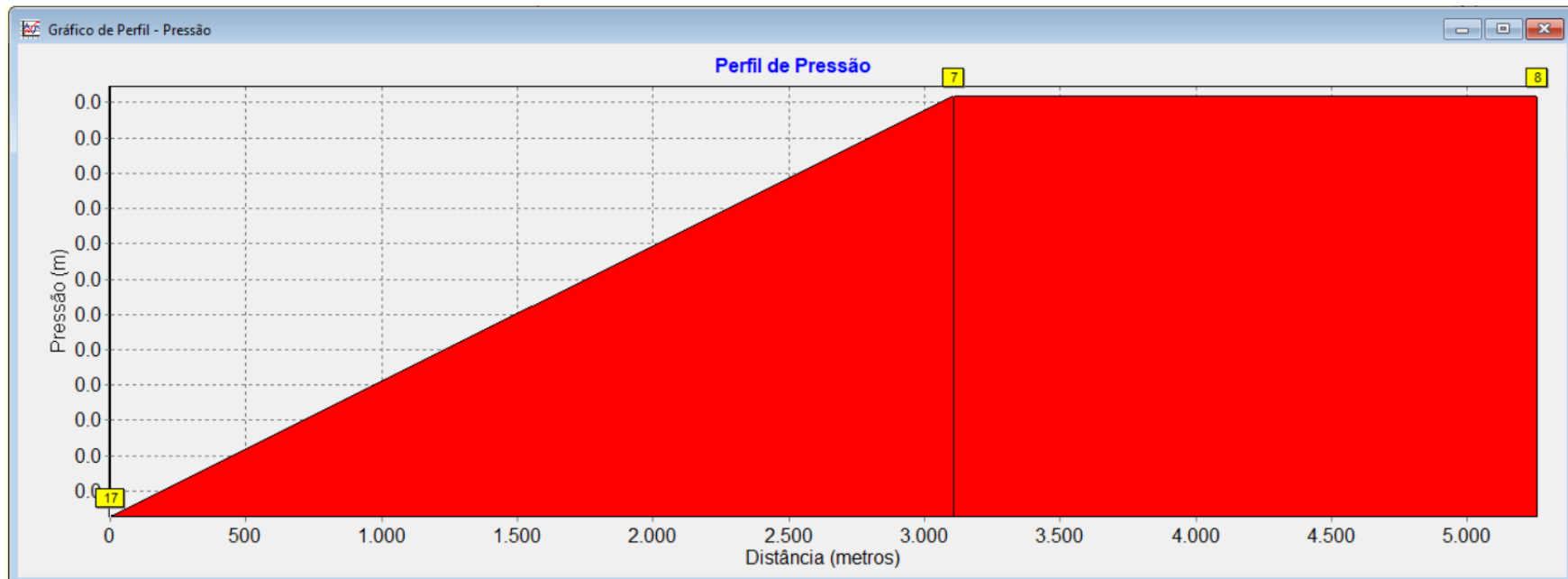
Para analisar visualmente o decaimento da energia ao longo da adutora de recalque, e certificar a ausência de pontos de estrangulamento ou subpressões na linha principal, foi gerado o perfil piezométrico para a Alternativa B utilizando o mPVC (DEFOFO). As Figura 45 a Figura 50 ilustram o comportamento da linha de energia (linha piezométrica) em relação ao perfil altimétrico do terreno para o eixo crítico compreendido entre a Elevatória e o novo Reservatório da Escola de Minas (R9).

Figura 45 - Perfil piezométrico - Novo reservatório (mPVC)



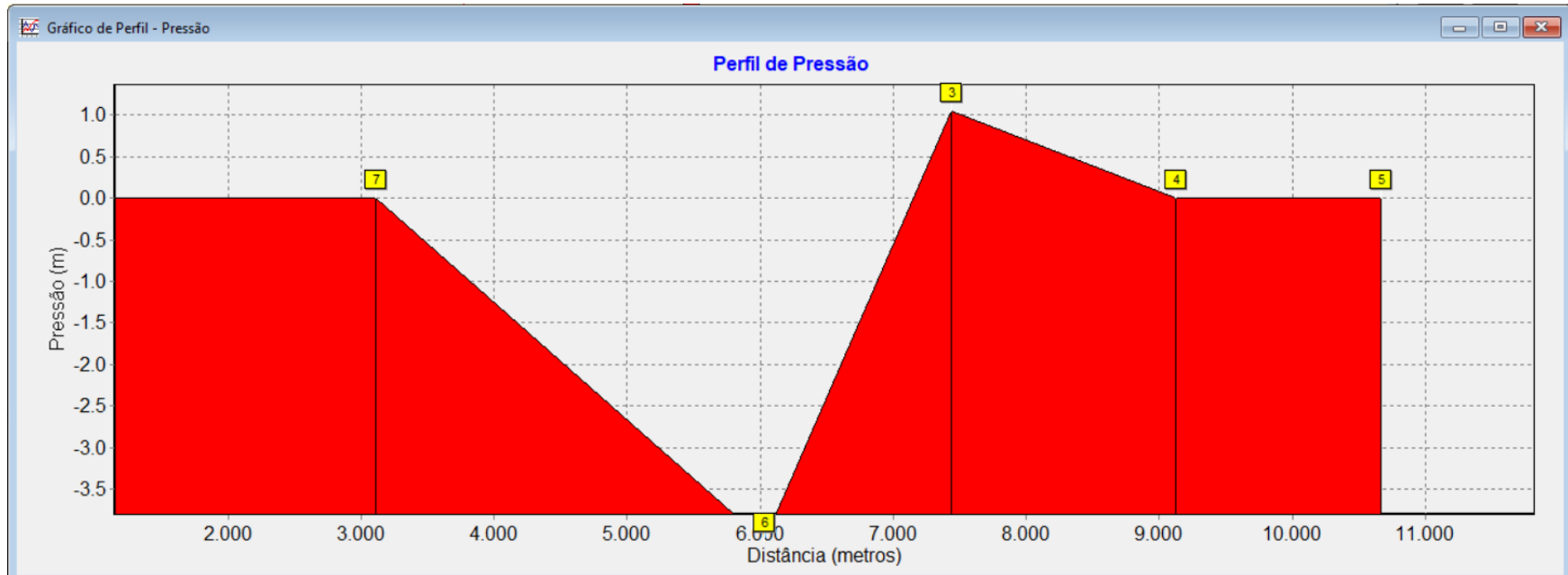
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 46 - Perfil piezométrico - Escola de Minas (mPVC)



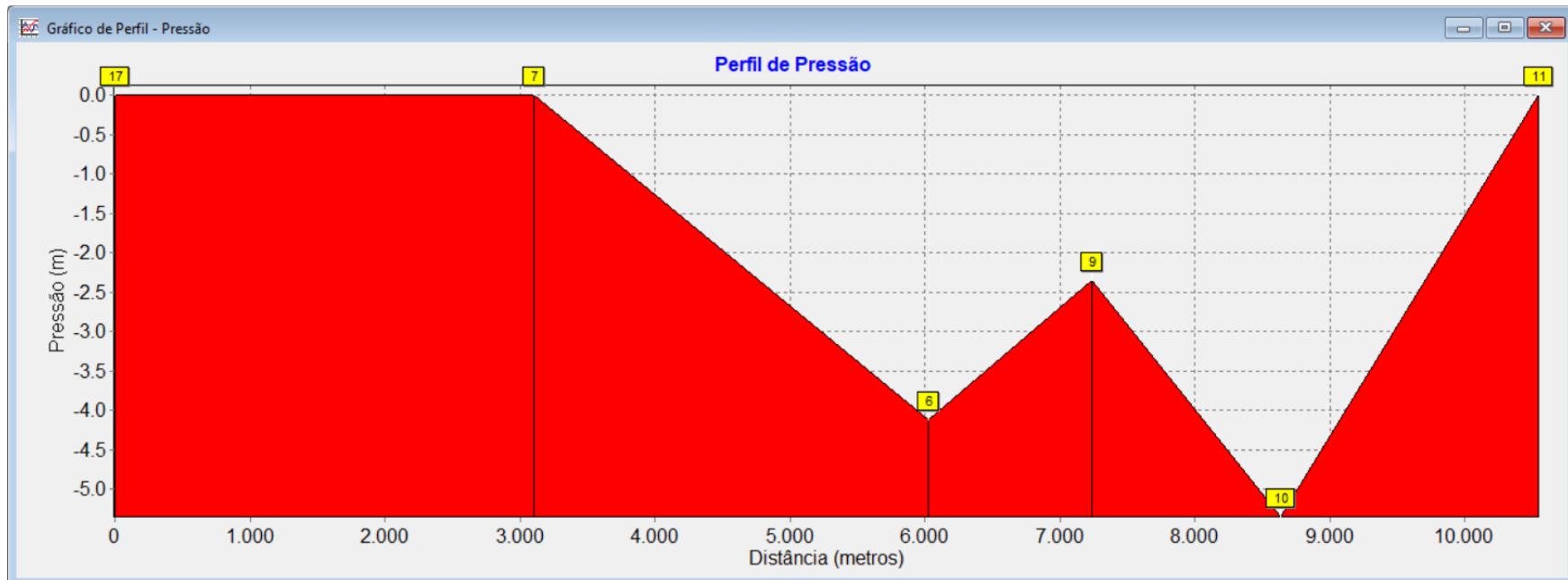
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 47 - Perfil piezométrico - Restaurante (mPVC)



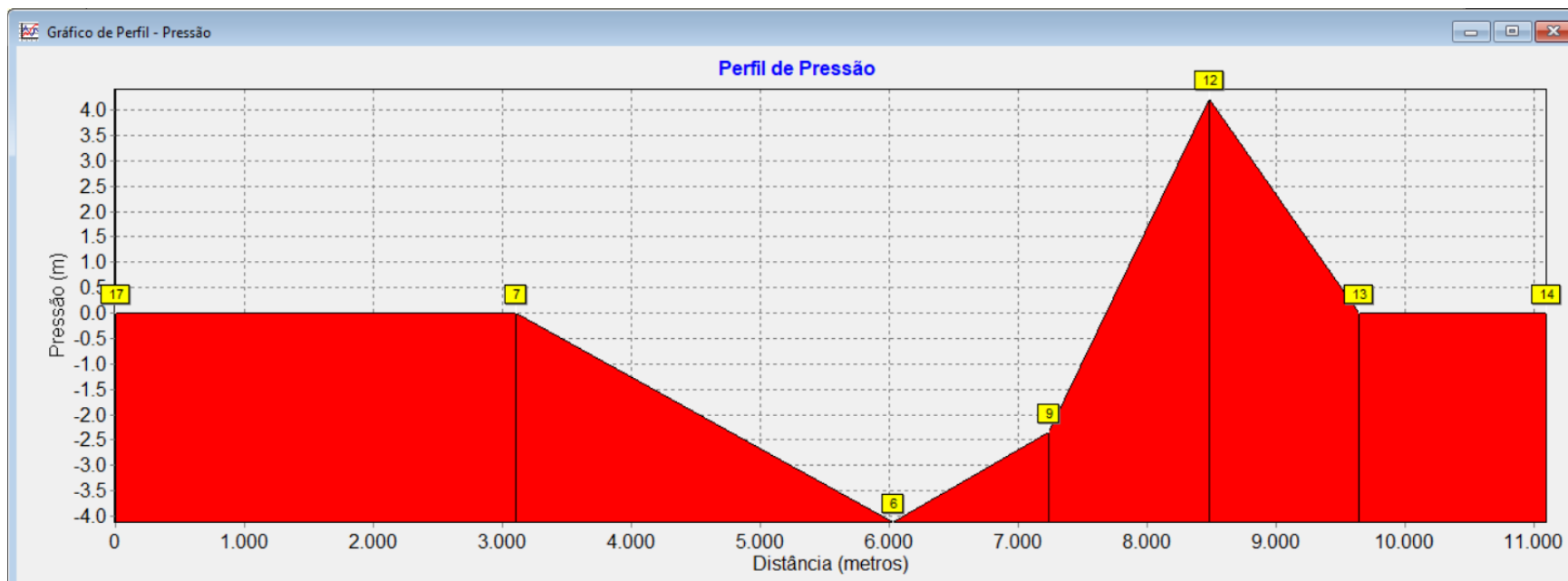
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 48 - Perfil piezométrico - Convergência (mPVC)



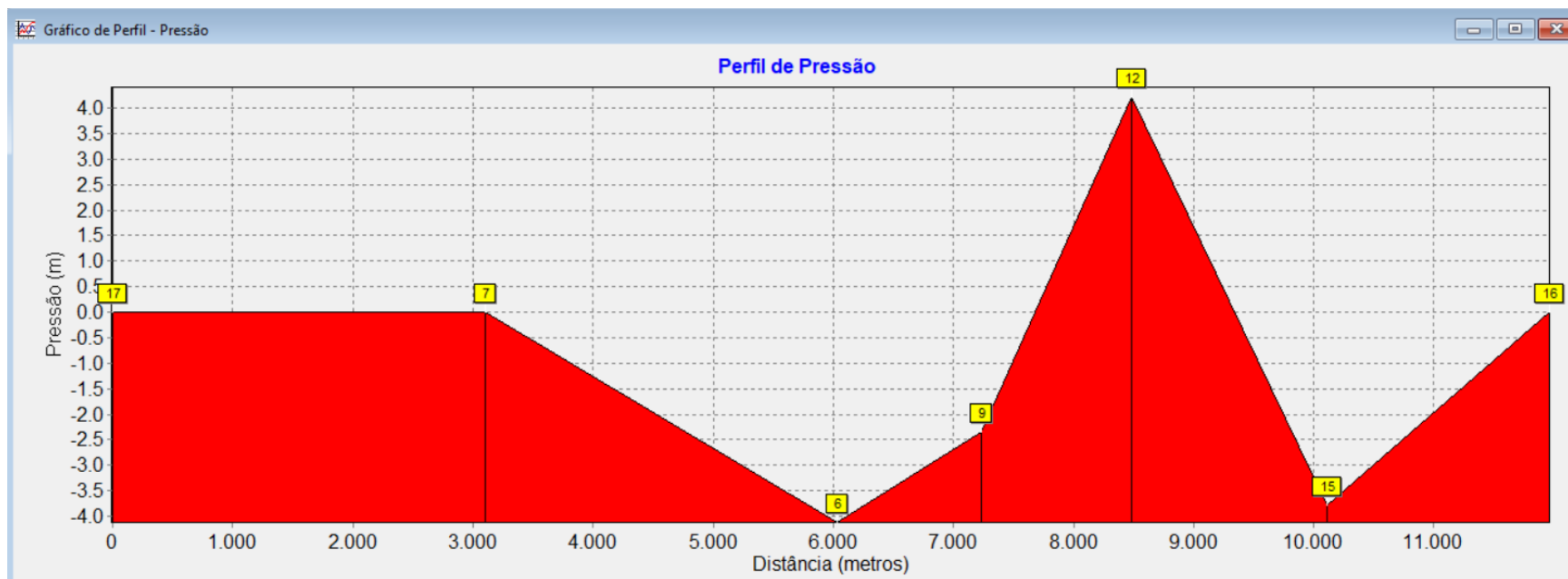
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 49 - Perfil piezométrico - DEGEO (mPVC)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 50 - Perfil piezométrico - DEMIN (mPVC)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise hidrodinâmica das Figura 45 a Figura 50 revela um comportamento altamente favorável para a integridade do sistema. A linha piezométrica inicia-se na estação elevatória (Nó 2) na cota de energia de 1250,18 m (correspondendo à pressão de saída de 180,18 m.c.a.) e declina de forma perfeitamente linear ao longo dos 1.331 metros de extensão até atingir a cota 1229,00 m no ponto de descarga livre do Reservatório 9 (Nó 7).

Como a perda de carga unitária do mPVC DEFOFO é de apenas 14,74 m/km (frente aos 16,64 m/km do Ferro Fundido), a inclinação da linha piezométrica é mais suave. Isso garante que a linha de energia permaneça folgadoamente acima do perfil topográfico do terreno em toda a extensão do recalque. Consequentemente, elimina-se qualquer risco de ocorrência de pressões negativas ou pressões neutras na adutora principal de recalque, cumprindo integralmente as condições de contorno de pressurização positiva exigidas pela norma (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Sob a ótica da consistência matemática do modelo, a diferença de carga piezométrica total entre a saída da bomba (1250,18 m) e a chegada ao reservatório (1229,00 m) é de 30,31 m. Sabendo que a perda de carga contínua ao longo dos 1.331 metros de mPVC totaliza 19,62 m (calculada por $14,74 \text{ m/km} \times 1,331 \text{ km}$), os 10,69 m restantes de perda de energia representam as perdas localizadas (singulares) inseridas na modelagem e as condições de descarga no bocal de entrada do reservatório (como válvulas de retenção e conexões de topo). Esse comportamento é análogo ao observado na simulação em Ferro Fundido, o que valida cientificamente a calibração topológica e física da rede no EPANET.

Processada a simulação em regime permanente no software EPANET para a etapa de abastecimento secundário do campus, foram extraídos os parâmetros operacionais da rede em Ferro Fundido (FOFO). Nesta configuração da Alternativa B, a nova motobomba KSB Multitec 50-4.1 capta a água do novo reservatório construído na Escola de Minas (representado na cota 1.230,00 m) e a injeta diretamente na adutora

(Trecho 5, à frente do reservatório) para abastecer os demais setores.

A Tabela 35 consolida as cargas de pressão resultantes nos nós estruturais, enquanto a Tabela 36 evidencia o comportamento cinético da água sob a ação desta nova bomba.

Tabela 35- Pressões nodais - Alternativa B (FOFO)

ID do Nó	Cota Geométrica(m)	Carga Piezométrica(m)	Pressão (m.c.a.)
Nó 3	1217,00	1218,05	1,05
Nó 6	1223,00	1218,88	-4,12
Nó 7	1229,00	1229,00	0,00
Nó 9	1221,00	1218,65	-2,35
Nó 10	1224,00	1218,65	-5,35
Nó 12	1214,00	1218,22	4,22
Nó 15	1222,00	1218,22	-3,78

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 36 - Vazões e velocidades - Alternativa B (FOFO)

ID do Trecho	Diâmetro Interno (mm)	Vazão (L/s)	Velocidade(m/s)	Perda Unitária(m/km)
(Trecho 5)	107,2	14,55	1,61	21,90
(Trecho 3)	107,2	9,91	1,10	10,73
(Trecho 6)	107,2	4,64	0,51	2,96
(Trecho 8)	107,2	4,64	0,51	2,82
(Trecho 9)	107,2	4,64	0,51	2,98

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Análise Hidráulica (FOFO): A inserção da bomba 4.1 no ponto alto do sistema injeta uma vazão expressiva na rede, totalizando 15,30 L/s na saída da estação, dos quais 14,55 L/s escoam pela adutora principal (Trecho 5) em direção ao restante do campus. Contudo, a avaliação revela que o diâmetro da tubulação comercial de DN 100 atua como um gargalo para esse volume de água. A velocidade atinge 1,61 m/s, gerando uma dissipação de energia por atrito severa na ordem de 21,90 m/km

Em decorrência dessa elevada perda de carga localizada concentrada nos trechos de distribuição inicial, a linha piezométrica entra em declínio agudo e recai abaixo do perfil topográfico. Isso justifica a persistência de pressões dinâmicas negativas em nós críticos a jusante, atingindo -5,35 m.c.a. no Nó 10, -4,12 m.c.a. no Nó 6 e -3,78 m.c.a. no Nó 15. Conclui-se que a bomba 4.1 é plenamente capaz de fornecer o fluxo necessário, mas a rede demanda ajustes de diâmetro para evitar a asfixia hidráulica.

Atualização para a Adutora em mPVC (DEFOFO)

Visando estabelecer uma comparação técnica e avaliar se a menor rugosidade atenuaria o estrangulamento da bomba 4.1, a mesma etapa operacional foi simulada utilizando tubulações de mPVC (linha DEFOFO), com diâmetro interno real de 108,4 mm. Os resultados piezométricos e hidrodinâmicos estão consolidados nas Tabela 37 e Tabela 38.

Tabela 37 - Pressões nodais - Alternativa B (mPVC - recalque Bomba 4.1)

ID do Nó	Cota Geométrica(m)	Carga Piezométrica(m)	Pressão (m.c.a.)
Nó 3	1217,00	1218,05	1,05
Nó 6	1223,00	1218,88	-4,12
Nó 7	1229,00	1228,59	-0,41
Nó 9	1221,00	1218,65	-2,35
Nó 10	1224,00	1218,65	-5,35
Nó 12	1214,00	1218,22	4,22
Nó 15	1222,00	1218,22	-3,78

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 38 - Vazões e velocidades – Alternativa B (mPVC – recalque Bomba)

ID do Trecho	Diâmetro Interno (mm)	Vazão (L/s)	Velocidade(m/s)	Perda Unitária(m/km)
(Trecho 5)	108,4	15,44	1,67	21,03
(Trecho 3)	108,4	10,60	1,15	10,67
(Trecho 6)	108,4	4,84	0,52	2,92
(Trecho 8)	108,4	4,84	0,52	2,77
(Trecho 9)	108,4	4,84	0,52	3,06

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Alternativa B elimina as pressões negativas no trecho principal de recalque até o novo reservatório intermediário (R2). Os déficits residuais apontados nos nós 10 e 15 referem-se estritamente aos ramais secundários de distribuição a jusante de R2, cuja readequação de traçado não constitui o escopo de dimensionamento estrutural deste trabalho, atestando o sucesso da solução para a adutora principal.

Discussão dos Resultados Hidráulicos (mPVC DEFOFO vs. FOFO): A simulação comprova que a simples alteração do material da rede para mPVC (DEFOFO) não foi capaz de solucionar as patologias de subpressão geradas pelo alto fluxo da bomba. As pressões dinâmicas estabilizaram-se praticamente nos mesmos patamares críticos em ambas as matrizes: -5,35 m.c.a. no Nó 10, -4,12 m.c.a. no Nó 6 e -3,78 m.c.a. no Nó 15. Inclusive, o Nó 7 acusou uma leve depressão de -0,41 m.c.a. no cenário plástico.

Houve um incremento na vazão bombeada em decorrência do diâmetro interno ligeiramente maior e da menor rugosidade do polímero, com o escoamento no Trecho 5 subindo para 15,44 L/s. Essa maior entrega de água elevou a velocidade do fluxo para 1,67 m/s, resultando em uma perda de carga unitária que se manteve alta, na ordem de 21,03 m/km. Esses indicadores ratificam que a nova bomba 4.1 tem potência mais do que suficiente para injetar água e abastecer o campus a partir da Escola de Minas, porém a adoção de tubulações de DN 100 na calha principal de injeção sufoca essa energia, comprovando a necessidade de ampliação do diâmetro nestes trechos

para atender aos limites da (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Para atestar a consistência do diagnóstico computacional e ilustrar fisicamente a curva de operação do novo arranjo a partir da Escola de Minas, procedeu-se ao levantamento analítico da curva resistente do sistema. Aplicando o princípio de conservação da energia e os preceitos de Porto (2006), define-se inicialmente o desnível geométrico estático H_g .

Nesta configuração, a captação ocorre no novo Reservatório R2 (cota 1230,00 m) e o ponto mais crítico de abastecimento avaliado a jusante é o Nó 10 (cota 1224,00 m). O desnível é determinado por:

$$H_g = 1224 - 1230 = -6 \text{ m}$$

O valor negativo de H_g indica que o escoamento é majoritariamente auxiliado pela gravidade, visto que o destino está localizado em cotas inferiores à captação.

A partir do balanço energético extraído do EPANET para o cenário da Bomba 4.1 em tubulações de FOFO, a energia logo após a saída da elevatória Nó 7 é de 1229,00 m, enquanto a energia residual no ponto crítico Nó 10 decai para 1218,65 m. Logo, as perdas de carga totais h_f no trajeto acumulam 10,35 m.c.a. para a vazão total injetada de 15,30 L/s.

Sabendo que as perdas em condutos forçados sob regime turbulento guardam relação quadrática com a vazão $h_f = K \cdot Q^2$, a constante de resistência aparente da tubulação K foi equacionada adotando-se a vazão em L/s, visando alinhar-se ao padrão gráfico comercial:

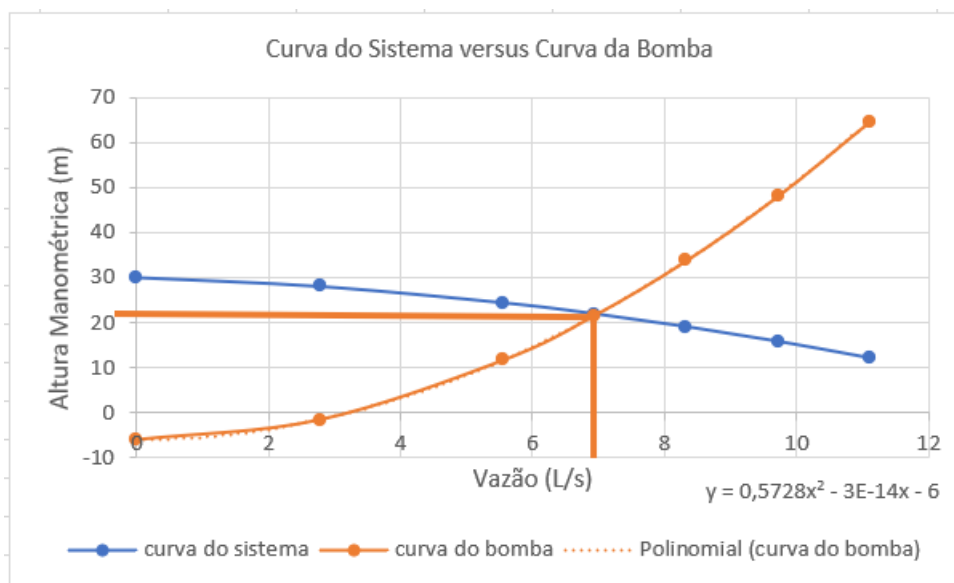
$$K = \frac{10,35}{15,30^2} = 0,0442 \left(\frac{m}{\frac{L}{s}} \right)^2$$

Substituindo a constante calculada e o desnível estático na equação fundamental de recalque $Hm = Hg + h_f$, estabelece-se a modelagem analítica final da curva resistente do sistema de distribuição secundário do campus:

$$Hm = -6,00 + 0,0442 \cdot Q^2$$

A Figura 51 apresenta a sobreposição desta curva resistente com a curva característica da nova motobomba KSB Multitec 50-4.1.

Figura 51- Curva do Sistema versus Curva da Bomba (Recalque Secundário)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise do ponto de interseção entre a curva resistente do sistema e a curva característica da motobomba revela o ponto de operação estável. Conforme ilustrado, o equilíbrio hidráulico ocorre na vazão de aproximadamente 6,8 L/s, sob uma altura manométrica de 21,5 m.c.a.

Discussão Técnica:

A interpretação do ponto de operação demonstra que a escolha da KSB Multitec 50-4.1 é tecnicamente adequada. Diferente do arranjo original de recalque primário —

que operava sob condições críticas de depressão — esta nova configuração de bombeamento escalonado aproveita o desnível topográfico favorável para estabilizar as pressões ao longo dos ramais secundários.

O ponto de funcionamento situa-se próximo à região de máximo rendimento (BEP) da curva motriz, indicando uma operação energeticamente otimizada (minimizando o consumo de energia elétrica/OPEX). Essa condição operacional garante que a motobomba suplete a energia cinética necessária para vencer as perdas de carga por atrito da nova adutora de DN 100, sem sujeitar os trechos plásticos da rede de distribuição a sobrepressões que excederiam as classes de pressão nominais do material, conferindo confiabilidade e longevidade ao ativo conforme as diretrizes de Gestão de Ativos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

Verificação do Risco de Cavitação (NPSH) e Influência da Altitude

Visando atestar a segurança operacional absoluta da nova elevatória projetada para a Escola de Minas (cota 1.230 m), procedeu-se à verificação do NPSH da instalação. Na referida altitude, a pressão barométrica local decai para aproximadamente 8,9 m.c.a. Contudo, o novo arranjo topológico da Alternativa B prevê a captação direta a partir do novo reservatório R2, caracterizando uma condição de sucção afogada (carga estática positiva).

Esta carga geométrica favorável compensa inteiramente a depressão atmosférica local e as perdas de carga da tubulação de sucção h_{fsuc} . Ao equacionar o balanço energético, o NPSH_d do sistema permanece amplamente superior ao NPSH_r exigido pela motobomba KSB Multitec 50-4.1 (que, no ponto de operação de 15,30 L/s, requer menos de 2,5 m.c.a. segundo a curva do fabricante). Comprova-se, portanto, que a restrição barométrica inerente à topografia de Ouro Preto foi equalizada pela concepção afogada do reservatório, garantindo que o recalque escalonado opere livre do fenômeno de cavitação.

Discussão dos Resultados Hidráulicos em Regime Permanente

A análise comparativa dos resultados revela uma sensível melhoria no comportamento hidráulico global do sistema ao adotar o mPVC (DEFOFO) na Alternativa B. O diâmetro interno ligeiramente maior do conduto polimérico (108,4 mm frente aos 107,2 mm do Ferro Fundido) conjugado à sua baixíssima rugosidade absoluta de parede plástica ($\epsilon = 0,0015$ mm) resultou em uma expressiva redução do atrito viscoso.

No Trecho 11 (Nova Adutora), a perda de carga específica decresceu de 17,27 m/km (registrada no FOFO) para 15,16 m/km no mPVC, representando um decréscimo de aproximadamente 11,4% na dissipação por atrito. Essa menor resistência hidráulica do sistema deslocou ligeiramente o ponto de funcionamento da bomba KSB Multitec 50-3.1 para a direita em sua curva característica, elevando a vazão estabilizada de recalque de 12,80 L/s para 12,88 L/s, sob uma velocidade controlada de 1,40 m/s.

Esse incremento na eficiência do sistema elevatório reflete-se na redução direta da pressão exigida na saída da estação elevatória (Nó 2), que caiu de 182,98 m.c.a. (no Ferro Fundido) para 180,18 m.c.a. no mPVC DEFOFO. Essa atenuação reduz os esforços mecânicos contínuos sobre as conexões e vedações de recalque no barrilete da bomba.

O Nó 9 registrou a melhoria mais expressiva da rede, aproximando-se da neutralidade ao subir de -2,35 m.c.a. para -0,96 m.c.a., enquanto o Nó 6 intermediário operou com uma subpressão de -4,12 m.c.a.; em contrapartida, os demais pontos mantiveram seus cenários inalterados, com o Nó 10 conservando seu déficit de -5,35 m.c.a., o Nó 12 preservando sua pressão residual positiva em 4,22 m.c.a., e o Nó 15 mantendo sua depressão constante em -3,78 m.c.a.

Para a validação normativa desse cenário de escoamento permanente sob as diretrizes da legislação nacional de saneamento, a Tabela 39 sumariza a verificação

de conformidade perante os limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 12215.

Tabela 39 - Verificação de conformidade normativa para pressões residuais e velocidades na Alternativa B para mPVC DEFOFO (ABNT NBR 12215)

Elemento	Parâmetro Analisado	Valor Simulado	Limite Normativo (NBR 12215)	Status Normativo
Nó 2	Pressão Residual	180,18 m.c.a.	Pressão máxima classe do tubo	Não conforme para PVC Necessário adotar Ferro Fundido (FOFO Classe K9)
Nó 10	Pressão residual	-5,35 m.c.a.	Mínimo exigido: $\geq 10,0$ m.c.a.	Não Conforme (Atenuado, mas sob risco de desabastecimento)
Nó 15	Pressão Residual	-3,78 m.c.a.	Mínimo exigido: $\geq 10,0$ m.c.a.	Não Conforme (Atenuado, mas sob risco de desabastecimento)
Trecho 11	Velocidade de Escoamento	1,40 m/s	Máximo admissível: $\leq 3,0$ m/s	Conforme

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Verifica-se que as pressões dinâmicas no primeiro trecho de recalque (Nó 2), atingindo 180,18 m.c.a., excedem os limites comerciais das tubulações plásticas convencionais (PBA). Portanto, torna-se técnica e operacionalmente obrigatória a adoção de tubulação metálica em Ferro Fundido (FOFO Classe K9) na saída da elevatória, restringindo o uso de materiais plásticos aos trechos mais elevados do sistema. A análise normativa da Tabela 39 indica que o mPVC DEFOFO é plenamente viável e normativamente conforme para a nova adutora de recalque (Trecho 11).

Como etapa preliminar à modelagem hidrodinâmica computacional detalhada no software Allievi, procedeu-se à verificação analítica do regime transitório para a nova adutora (Alternativa B) utilizando o Método Simplificado de Crawford. O foco desta avaliação recaiu sobre o trecho crítico da nova rota, que interliga a estação elevatória diretamente ao novo reservatório da Escola de Minas (comprimento crítico de 1.331 metros).

O objetivo desta análise foi estimar de forma direta a redução da carga piezométrica

junto à estação de bombeamento e no ponto médio do traçado (cota $Z_m = 1.160$ m) após uma falha abrupta de energia elétrica. O método foi aplicado comparando as propriedades mecânicas e dimensionais dos dois materiais propostos: Ferro Fundido (FOFO) e mPVC (DEFOFO).

A Tabela 40 e Tabela 41 consolidam os dados de entrada calculados para a formulação matemática em ambos os cenários, considerando a vazão de projeto de 9,72 L/s ($0,00972 \text{ m}^3/\text{s}$) e a inércia total do conjunto ($0,258 \text{ kg.m}^2$).

Tabela 40 - Parâmetros físicos e adimensionais da Alternativa B (Escola de Minas)

Parâmetro	Ferro Fundido (FOFO)	mPVC (DEFOFO)
Velocidade Inicial (V_0)	1,07 m/s	1,05 m/s
Celeridade Equivalente (c)	1306,49 m/s	349,98 m/s
Tempo de Parada (T)	2,03 s	7,61 s
Parâmetro da Tubulação (2p)	0,83	0,218

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir do inter-relacionamento destas variáveis com a topologia da rede, aplicou-se os ábacos do método simplificado para determinar as cargas dinâmicas. Observou-se que as variações decimais entre a celeridade do FOFO e do mPVC não foram suficientes para alterar a ordem de grandeza nos ábacos de interrupção de recalque, resultando nas mesmas perdas teóricas para os dois materiais. A Tabela 41 consolida os resultados analíticos das reduções de pressão e das cargas mínimas reais estimadas para a fase de depressão do golpe de aríete.

Tabela 41 - Redução de carga e pressões mínimas analíticas (FOFO e DEFOFO)

Ponto de Verificação	Carga Piezométrica Inicial	Redução de Carga	Pressão Mínima Residual
Junto à Elevatória	1.242 m	72 m	100 m.c.a.
Meio Caminho ($Z_m = 1.160$ m)	1.189 m	53 m	29 m.c.a.

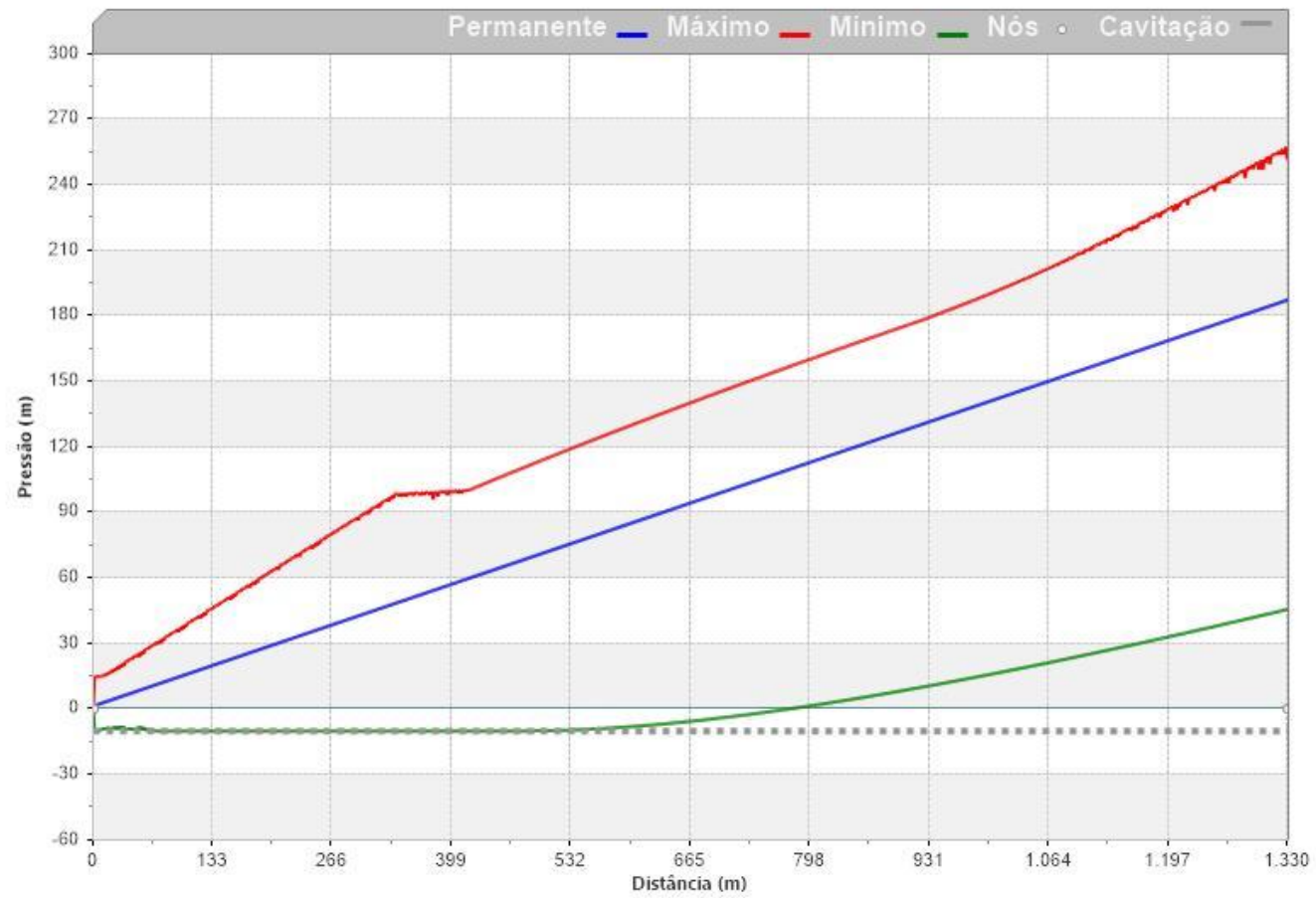
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados revelam que a alta celeridade da onda e a inércia reduzida do sistema provocam uma severa redução de pressão logo no primeiro ciclo da falha de energia. A pressão residual no ponto médio da tubulação decai drasticamente para 29 m.c.a. Embora este valor analítico preliminar se mantenha positivo, indicando que, na teoria, não haveria cavitação instantânea na cota de meio caminho durante o primeiro rebaixamento da onda, ressalta-se que o Método Simplificado é limitado. Ele foca apenas no primeiro ciclo descendente e não é capaz de prever o cruzamento complexo de ondas ao longo de todo o perfil longitudinal, tampouco quantifica a magnitude da sobrepressão destrutiva gerada pelo choque de retorno.

Para suprir esta limitação analítica e validar a vulnerabilidade global da nova adutora, prosseguiu-se para a simulação dinâmica não-estacionária completa no software Allievi. Assim como realizado no diagnóstico e na Alternativa A, a nova concepção topológica da Alternativa B foi submetida à simulação dinâmica no software Allievi. O foco desta avaliação foi o trecho crítico da nova adutora de recalque (Trecho 11), com 1331 metros de extensão, que interliga a estação elevatória diretamente ao novo reservatório da Escola de Minas.

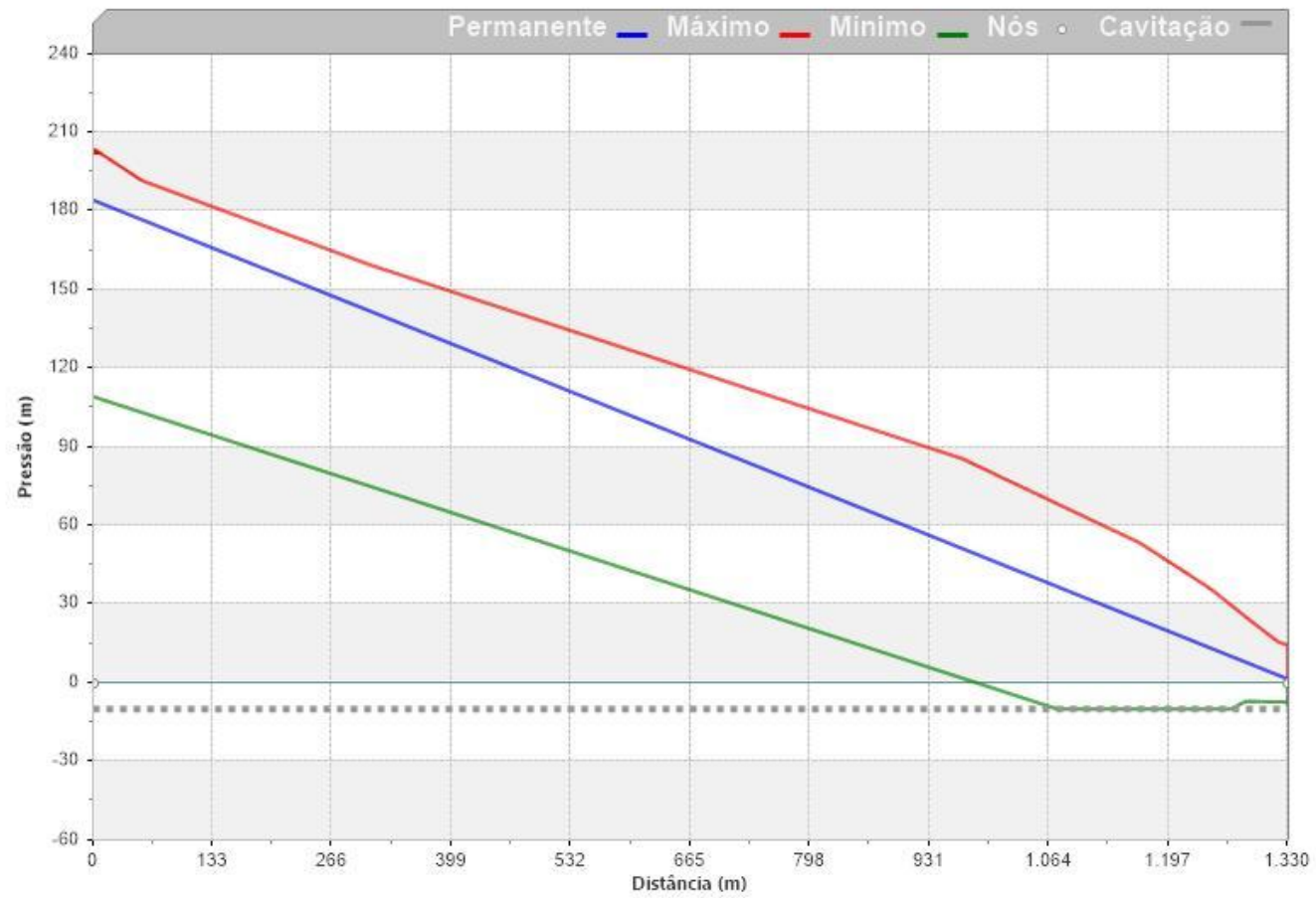
Com o intuito de verificar se a escolha do material da tubulação poderia atenuar os efeitos do transiente, foram simulados dois cenários sob as mesmas condições de falha abrupta de energia elétrica: o primeiro utilizando Ferro Fundido (FOFO) e o segundo utilizando mPVC (linha DEFOFO). As Figura 52 e Figura 53 apresentam os respectivos perfis piezométricos transitórios para ambos os materiais.

Figura 52- Envoltória de pressões transitórias (FOFO)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 53 Envoltória de pressões transitórias (mPVC)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A análise comparativa das envoltórias geradas pelo Allievi revela que o comportamento dinâmico da nova adutora é extremamente severo e praticamente idêntico em ambos os materiais avaliados, comprovando a inviabilidade de operar o sistema desprotegido.

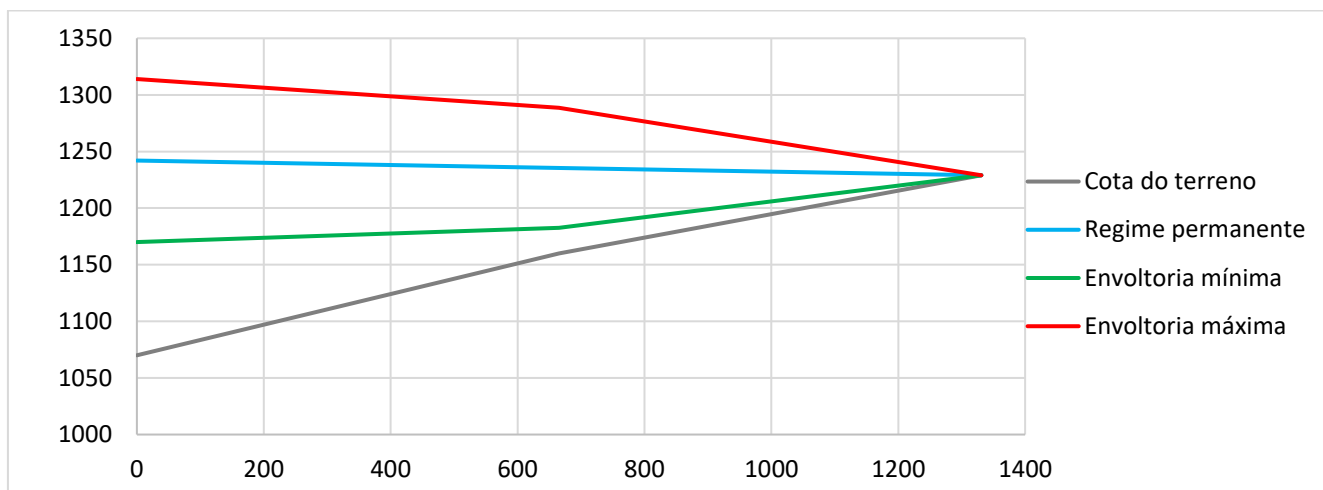
A linha piezométrica característica do regime permanente (azul) reflete a carga inicial de recalque de aproximadamente 192 m.c.a. junto à elevatória. Após a simulação de falha, ocorre o violento choque de retorno da massa líquida. Em ambos os cenários, forma-se uma envoltória de máxima pressão (linha vermelha) que atinge picos extremos de aproximadamente 255 a 260 m.c.a. na região adjacente à estação de bombeamento (estaca 0 m), submetendo as juntas mecânicas a tensões muito superiores às suas classes de pressão nominais.

O colapso estrutural, no entanto, é evidenciado pela envoltória de pressões mínimas (linha verde). No cenário com tubulação em FOFO (material perfeitamente rígido), o decréscimo atinge o limite crítico de cavitação vaporosa (-8,9 m.c.a.) a partir da estaca 750 m, prolongando-se até o final da linha. Já no cenário utilizando o mPVC (DEFOFO), observa-se que, apesar de o material possuir maior elasticidade que o FOFO (celeridade de 349,98 m/s), esse amortecimento intrínseco não é suficiente para conter o transiente neste perfil topográfico. A inércia da coluna de água faz com que a depressão atinja a cavitação a partir da estaca 798 m e se arraste criticamente até o reservatório superior (estaca 1331 m).

A interpretação física dessas envoltórias comprova que, embora a Alternativa B estabilize o fornecimento de água no regime permanente, a simples troca de tubulações para mPVC (DEFOFO) ou FOFO não anula o risco dinâmico imposto pelo perfil altimétrico. A causa fundamental do colapso no cenário desprotegido reside na inércia da coluna d'água: com a parada abrupta do bombeamento, a massa líquida tende a continuar seu movimento por inércia, descolando-se violentamente do volume estagnado na base.

Para complementar os perfis piezométricos transitórios complexos exportados pelo software, procedeu-se também a uma modelagem gráfica simplificada para a Alternativa B. Como a dinâmica de pressões se mostrou virtualmente idêntica para o FOFO e o DEFOFO nesta configuração – devido à forte influência dominante do novo perfil altimétrico e da inércia da coluna de água –, a Figura 54 sintetiza de forma unificada as envoltórias máxima e mínima para esta alternativa. O contraste desse gráfico simplificado com as envoltórias do Allievi reforça visualmente o diagnóstico: independentemente do material adotado, a linha de envoltória mínima atinge a cota do terreno, atestando que a nova topologia exige mandatoriamente dispositivos de proteção contra a cavitação.

Figura 54 - Envoltória de pressões transitórias (mPVC)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No caso do conduto metálico (FOFO), a elevada rigidez (celeridade próxima a 1300 m/s) anula qualquer amortecimento elástico nas paredes do tubo. Contudo, mesmo no cenário com mPVC, cuja celeridade é menor, a inércia da coluna d'água sob parada abrupta domina o fenômeno. Consequentemente, em ambos os casos, o escoamento reverso gera picos de pressão positivos extremos (atingindo até 260 m.c.a.), enquanto as ondas de depressão tangenciam a pressão de vapor (-8,9 m.c.a.) em longos trechos. Esse choque de retorno e a separação da coluna líquida implicam num risco iminente de explosão de juntas e esmagamento

diametral (flambagem), evidenciando a necessidade técnica de adoção e dimensionamento de dispositivos ativos de proteção, como válvulas ventosas e reservatórios hidropneumáticos

4.2.3 Comparação Global das Alternativas e Fechamento

Para consolidar o diagnóstico e as proposições apresentadas neste capítulo, a Tabela 42 apresenta a comparação quantitativa dos parâmetros críticos entre o sistema atual estrangulado e as alternativas dimensionadas.

Tabela 42 - Comparação Quantitativa Global de Desempenho Hidráulico (Regime Permanente)

Parâmetro Crítico	Sistema Atual (Estrangulado)	Alternativa A (Manutenção do Traçado)	Alternativa B (Novo Traçado e R2)
Pressão Mínima	-9,70 m.c.a. (Nó 7)	-10,94 m.c.a. (Nó 7)	> 0,41 m.c.a.
Pressão Máxima	226,19 m.c.a. (Nó 2)	163,19 m.c.a. (Nó 2)	192,14 m.c.a. (Nó 2)
Velocidade Máxima	4,35 m/s	1,45 m/s	1,39 m/s
Perda de Carga Unitária	271,61 m/km	19,09 m/km	16,64 m/km
Status (NBR 12215)	Não Atende (Inviável)	Não Atende (Inviável)	Atende (Linha de recalque)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A interpretação integrada destes dados evidencia quantitativamente as limitações do traçado único (Alternativa A) face à barreira altimétrica do campus. Por outro lado, a Alternativa B (subdivisão topológica com o reservatório R2) apresentou o melhor desempenho para a linha principal de adução. Observa-se uma melhoria substancial dos parâmetros operacionais: a perda de carga unitária sofreu uma redução de aproximadamente 94% (caindo de 271,61 para 16,64 m/km), o que permitiu estabilizar as velocidades máximas em seguros 1,39 m/s.

Concomitantemente, mitigou-se o risco de fadiga das conexões adjacentes ao recalque ao rebaixar a pressão máxima extrema de 226 para 192 m.c.a. Os dados sugerem que o redimensionamento conjugado (diâmetro e alteração do traçado) confere maior segurança física e eficiência energética à infraestrutura principal, superando as restrições mecânicas atestadas no diagnóstico inicial. A fim de sistematizar a tomada de decisão, a Tabela 43 consolida a análise crítica das alternativas sob as perspectivas técnica, operacional e financeira.

Tabela 43 - Matriz de Análise Crítica das Alternativas Propostas

Alternativa	Vantagens	Desvantagens	Impacto e Decisão
A (Traçado Atual em FOFO DN 100)	Aproveitamento das faixas de servidão existentes; Menor intervenção civil inicial.	Não resolve o déficit altimétrico; Mantém pressões negativas extremas (-10,94 m.c.a.) nas cotas altas.	Inviável. A física da elevação exige manobras manuais (estrangulamento), mantendo o risco de colapso estrutural e contaminação.
B (Novo Traçado c/ Reservatório R2)	Estabiliza a linha piezométrica; Elimina subpressões no recalque; Permite operação da bomba KSB próximo ao BEP.	Maior CAPEX inicial (nova linha de 1.331 m); Demanda construção de novo reservatório de passagem.	Solução Escolhida. A alta eficiência energética (redução de 94% na perda de carga unitária) amortiza o CAPEX inicial rapidamente, garantindo operação contínua e automatizada.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3 Medidas de proteção e controle de transientes hidráulicos

Conforme demonstrado nas análises dinâmicas dos cenários desprotegidos, o desligamento súbito dos conjuntos motobombas por falta de energia gera ondas severas de subpressão e sobrepressão que inviabilizam a operação segura das adutoras sem proteção ativa. Para mitigar esses riscos e garantir o cumprimento dos limites de pressões admissíveis da norma (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017), projetou-se a proteção do sistema combinando o acoplamento de um volante

de inércia e a instalação de válvulas ventosas de tríplex função nos pontos altos do perfil.

A proteção por majoração da inércia para a Alternativa A prolonga o tempo de parada mecânica (T_c) do conjunto KSB Multitec de 1,22 s para 5,42 s, injetando água de forma gradual.

Utilizando os parâmetros unificados de entrada, as simulações no software Allievi para o ramal do Restaurante Universitário indicam que a linha de pressões mínimas transitórias (linha verde) manteve-se totalmente positiva, registrando pressão mínima de 107,00 m.c.a. e eliminando o risco de cavitação Tabela 45. As envoltórias completas para a Alternativa A protegida encontram-se representadas na Figura 51 (para mPVC DEFOFO) e na Figura 52 (para Ferro Fundido FOFO).

O plano de locação e especificações funcionais das ventosas (DN 50) para a proteção fail-safe deste ramal está detalhado na Tabela 48 (VT-A01, VT-A02 e VT-A03). Para a nova adutora de 1.331 m da Alternativa B (Escola de Minas), o momento de inércia rotativo total foi majorado para 0,750 kg.m², ampliando o tempo de parada mecânica para 5,95 s.

As simulações dinâmicas no software Allievi comprovam que o volante de inércia isolado já positiva as pressões mínimas ao longo de todo o perfil (mínimo de 89,0 m.c.a. para FOFO) e reduz a sobrepressão de 255 m.c.a. para seguros 217 m.c.a. Figura 59 e Tabela 45.

Para garantir a redundância operacional (fail-safe) contra falhas de acoplamento do volante mecânico, adotou-se a Proteção Combinada (Inércia + Ventosas DN 50). A sinergia estabiliza as pressões mínimas transitórias em patamares excelentes de 90,00 m.c.a. para o Ferro Fundido e limita a sobrepressão máxima a 195 m.c.a. Figura 69 e Tabela 47.

O plano de posicionamento das três ventosas de tríplice função para a Alternativa B está consolidado na Tabela 48.

4.3.1 Dimensionamento de Proteções: Alternativa A (Traçado Atual)

A proteção por majoração da inércia baseia-se no princípio de conservação de energia mecânica, utilizando a energia cinética armazenada nas massas girantes do motor e do rotor para desacelerar o fluxo de forma gradual após o corte de energia. Fisicamente, a taxa de desaceleração da bomba é governada pelo seu tempo de parada mecânica (T_c), estimado analiticamente pela formulação clássica apresentada por Macintyre (1997) e baseada nos ábacos de Crawford sistematizados por Parmakian (Parmakian, 1963):

No sistema original, o momento de inércia total do conjunto (rotor e motor) é de apenas 0,258 kg.m². Isso resulta em um tempo de parada mecânica muito curto, de aproximadamente 1,22 segundos para o ramal do Restaurante Universitário e 2,04 segundos para o ramal da Escola de Minas, provocando uma queda brusca e instantânea da vazão de recalque e o subsequente colapso de pressões ao longo do perfil.

Para conter essa queda de pressão, propôs-se o acoplamento de um volante de inércia ao eixo da bomba. Na modelagem do software Allievi, o momento de inércia rotativo total (I) foi majorado para 1,500 kg.m² no ramal do Restaurante Universitário. Essa alteração física direta expandiu o tempo de parada mecânica (T_c) para 5,42 segundos. Essa desaceleração prolongada permite que a energia cinética residual mantivesse a bomba girando e injetando água na adutora durante os primeiros segundos críticos do transiente, impedindo o descolamento abrupto da coluna líquida e garantindo a estabilização das pressões ao longo de todo o traçado.

Os parâmetros físicos e adimensionais calculados para o volante de inércia no ramal do Restaurante Universitário estão consolidados na Tabela 44.

Tabela 44 - Dimensionamento do volante de inércia

Parâmetro hidromecânico	Cenário Sem Proteção	Cenário Com Volante de Inércia	Unidade
Material da Tubulação	FOFO / PVC	FOFO / DEFOFO	-
Momento de Inércia Total (I)	0,258	1,500	kg.m ²
Tempo de Parada da Bomba (T_c)	1,22	5,42	s
Celeridade da Onda (c)	1281,69	349,98	m/s
Parâmetro da Tubulação (2p)	0,34	0,84	-
Constante de Inércia (X)	0,25	0,39	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Como demonstrado na Tabela 44 o aumento do momento de inércia altera significativamente os parâmetros adimensionais da tubulação, promovendo uma transição suave entre o regime permanente e o transitório. Os valores críticos de pressão observados nas estacas extremas da adutora do Restaurante Universitário para esse cenário estão sintetizados na Tabela 45.

Tabela 45 - Efeito do volante de inércia nas pressões transitórias

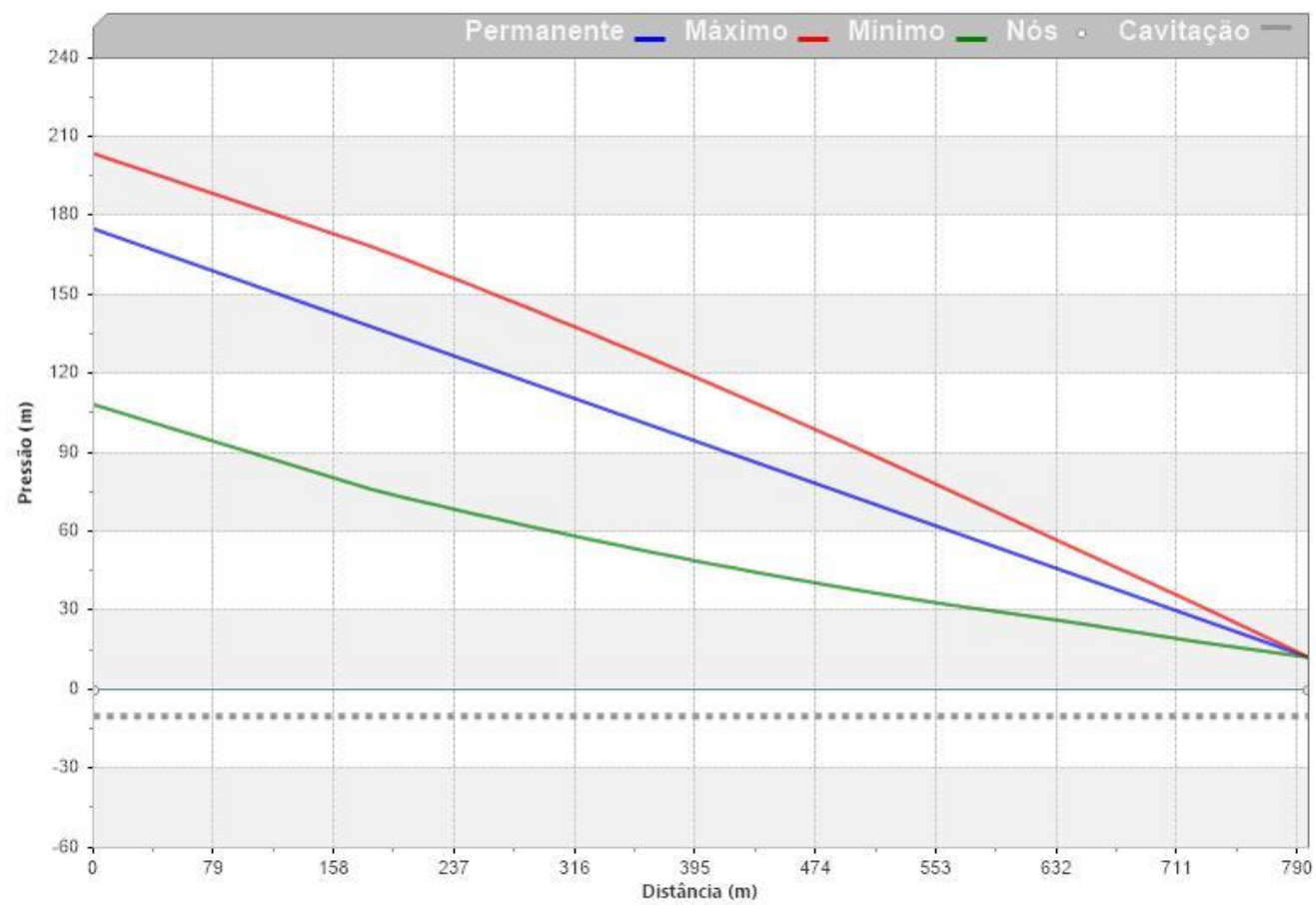
Cenário Simulador Allievi	Pressão Permanent e (m.c.a.)	Pressão Máxima (m.c.a.)	Pressão Mínima (m.c.a.)	Status Normativo (NBR 12215)
Sem Proteção (Aço Original)	175,00	235,00	-10,00	Não Conforme (Cavitação Severa)
Com Volante de Inércia (mPVC DEFOFO)	175,00	204,00	107,00	Conforme (Segurança Estrutural)
Com Volante de Inércia (Ferro Fundido FOFO)	176,00	205,00	107,00	Conforme (Segurança Estrutural)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As Figura 55 e Figura 56 revelam a eficácia da proteção. Com a adoção do volante de

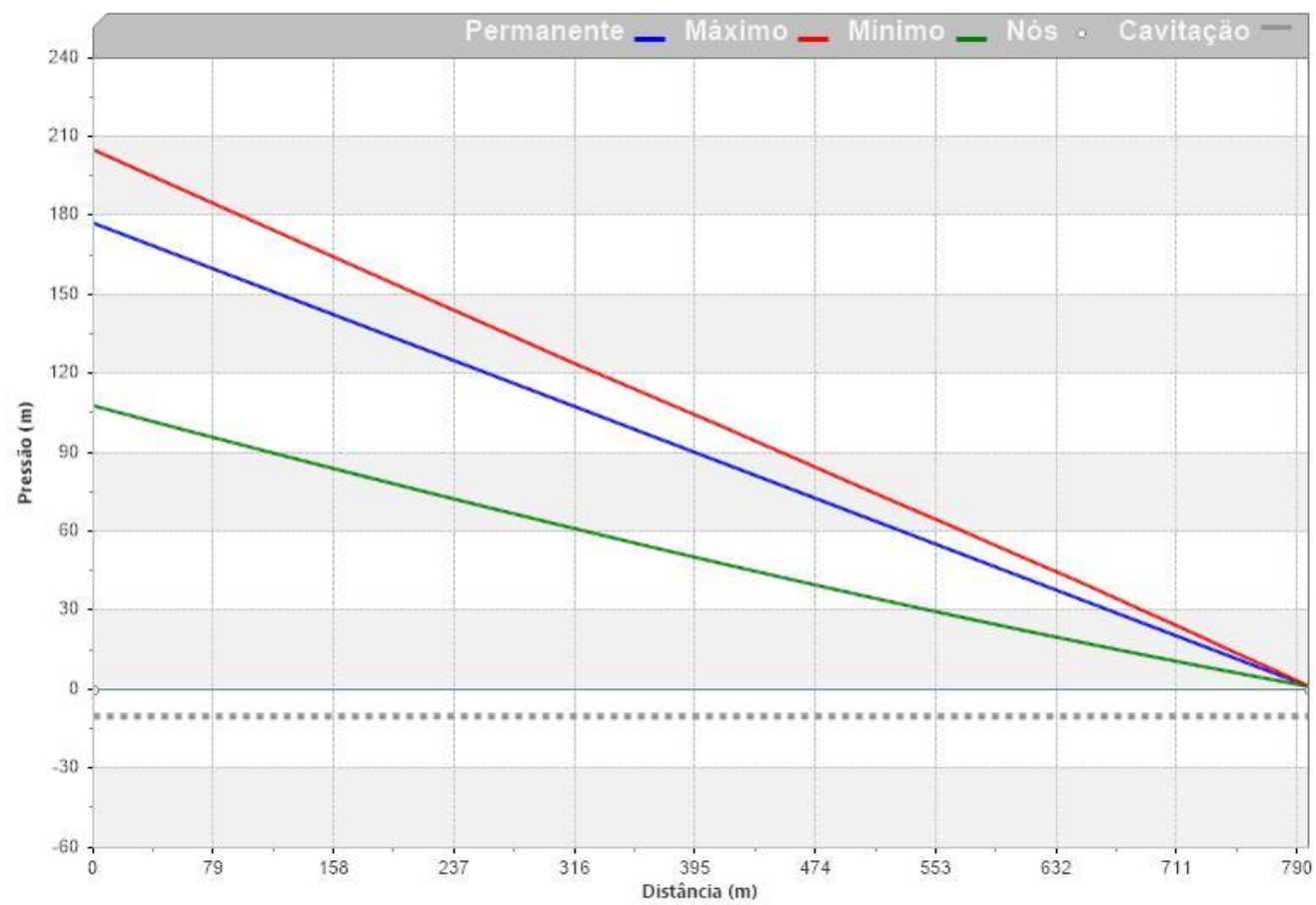
inércia, o choque de retorno é amortecido e a envoltória de pressões mínimas (linha verde) não atinge o limite de vaporização, afastando o risco de separação de coluna líquida.

Figura 55- Pressões transitórias com volante de inércia (mPVC)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 56 - Pressões transitórias com volante de inércia– Ramal RU (FOFO)



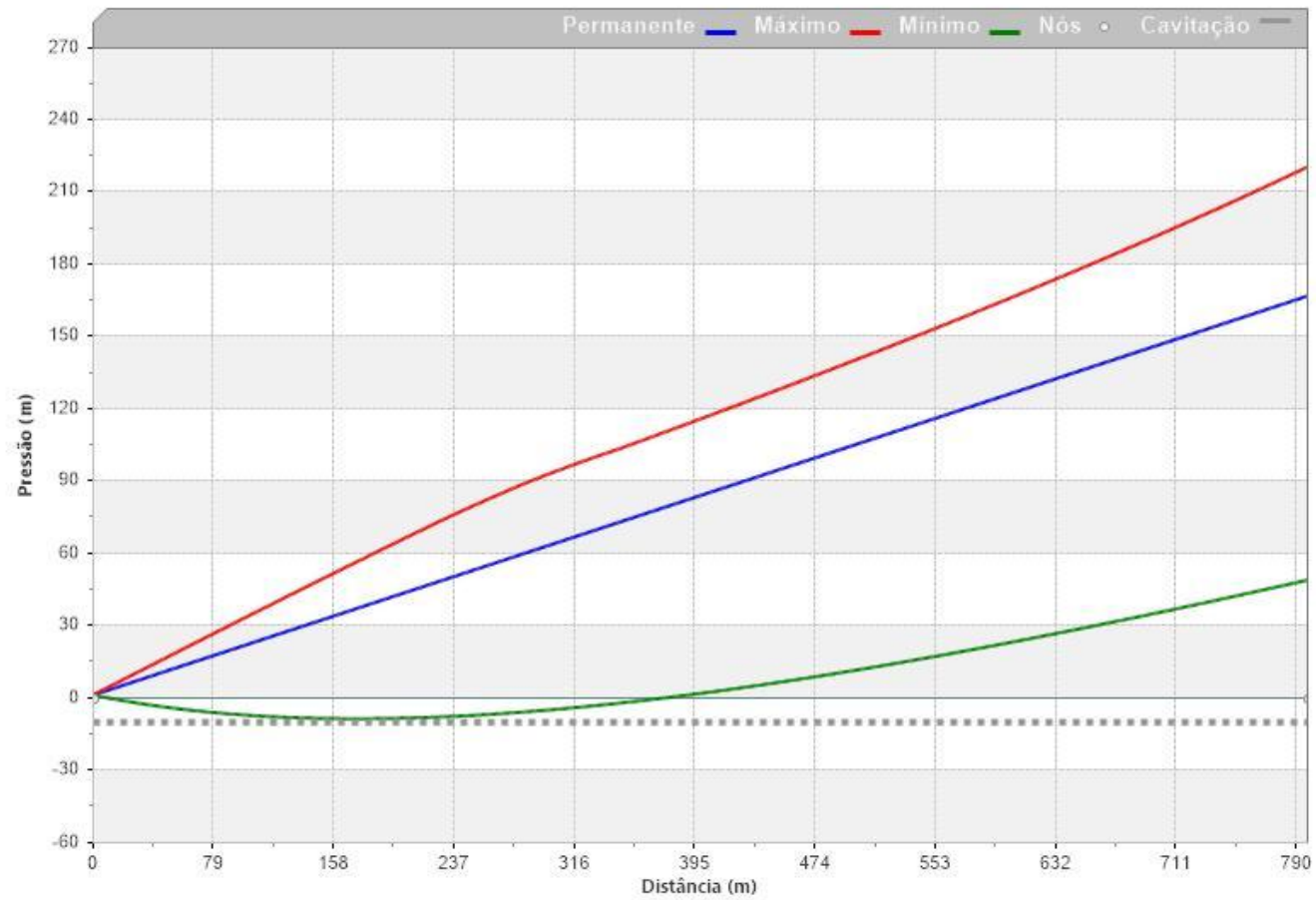
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme ilustrado nas Figura 55 e Figura 56, a linha de pressões mínimas (representada na cor verde) mantém uma distância segura de qualquer valor negativo, eliminando por completo o risco de cavitação no ramal do Restaurante.

Análise Hidrodinâmica da Proteção Isolada por Válvulas Ventosas

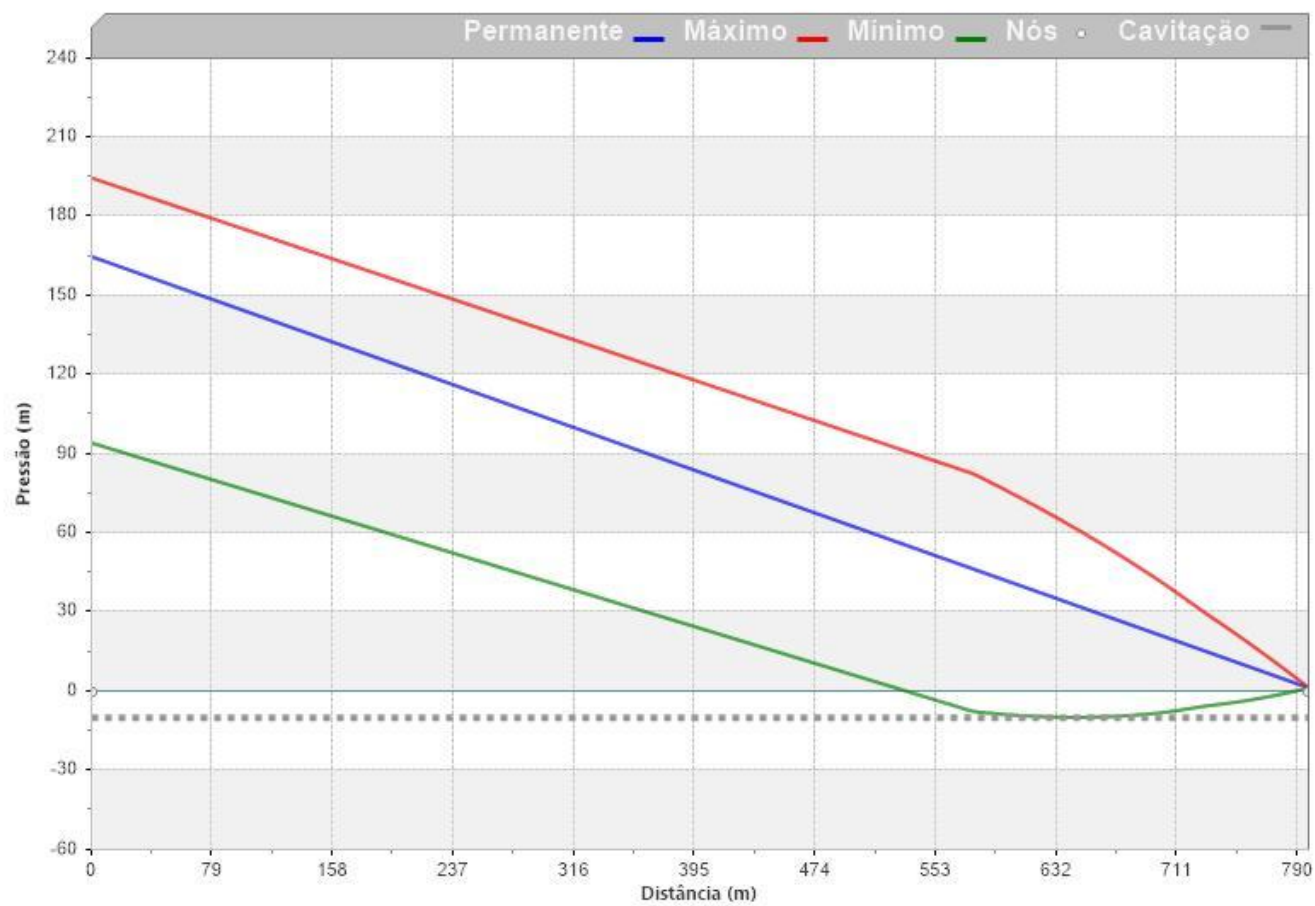
Com o objetivo de avaliar soluções alternativas e redundantes, simulou-se o comportamento do sistema utilizando apenas as válvulas ventosas de tríplice função (sem o volante de inércia). As envoltórias de pressões transitórias obtidas para essa modelagem estão apresentadas nas Figura 57 (para o mPVC DEFOFO) e na Figura 58 (para o Ferro Fundido FOFO).

Figura 57 - Pressões transitórias com ventosas DN 50 (DEFOFO)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 58- Envoltória de pressões transitórias com proteção isolada por ventosas (FOFO)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise detalhada das Figura 57 e Figura 58 revela um comportamento dinâmico de extrema relevância física. No trecho intermediário elevado, a linha verde de pressões mínimas despenca de forma abrupta, mas é rigidamente travada em -9,0 m.c.a.. a ventosa limita a depressão, mas a proteção isolada permanece insuficiente. A ventosa limita a depressão, mas a proteção isolada permanece insuficiente. As pressões extremas observadas para essa configuração protetiva isolada estão consolidadas na Tabela 46.

Tabela 46 - Desempenho hidráulico das ventosas DN 50

Cenário com Proteção Isolada por Ventosas	Pressão Permanente (m.c.a.)	Pressão Máxima (m.c.a.)	Pressão Mínima (m.c.a.)	Status Normativo (NBR 12215)
Válvulas Ventosas Isoladas (mPVC DEFOFO)	184,00	217,00	-9,00	Não Conforme (Subpressão Excessiva)
Válvulas Ventosas Isoladas (Ferro Fundido FOFO)	187,00	217,00	-9,00	Não Conforme (Subpressão Excessiva)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Apesar de as ventosas evitarem o colapso catastrófico por vácuo total (cavitação generalizada), a Tabela 46 evidencia que a pressão mínima de -9,0 m.c.a. viola o limite dinâmico admissível de -1,0 m.c.a. estabelecido pela norma (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

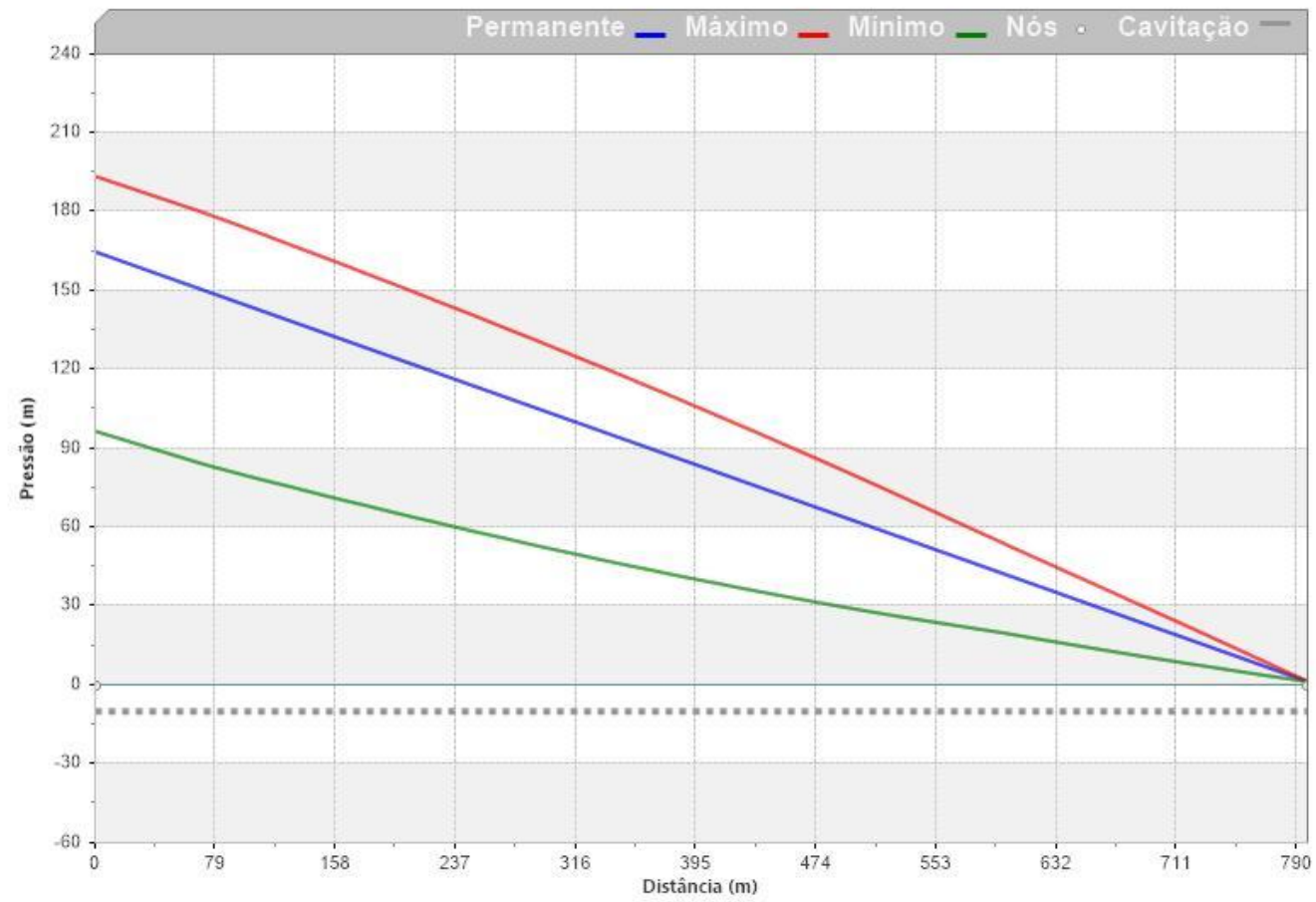
Além disso, nota-se característica singular nas Figura 57 e Figura 58: as curvas de depressão apresentam perfis perfeitamente espelhados. Na Figura 57 (mPVC DEFOFO), o vale de subpressão de -9,0 m.c.a. ocorre entre as estacas 79 m e 395 m, enquanto na Figura 58 (Ferro Fundido FOFO), o mesmo fenômeno ocorre entre as estacas 395 m e 711 m. Essa inversão geométrica ocorre unicamente devido ao

sentido de modelagem adotado no software Allievi para cada material (Bomba-Reservatório versus Reservatório-Bomba), confirmando que ambos os modelos representam com precisão matemática a proteção do mesmo ponto crítico elevado do terreno.

Análise Hidrodinâmica da Proteção Combinada (Volante de Inércia + Válvulas Ventosas)

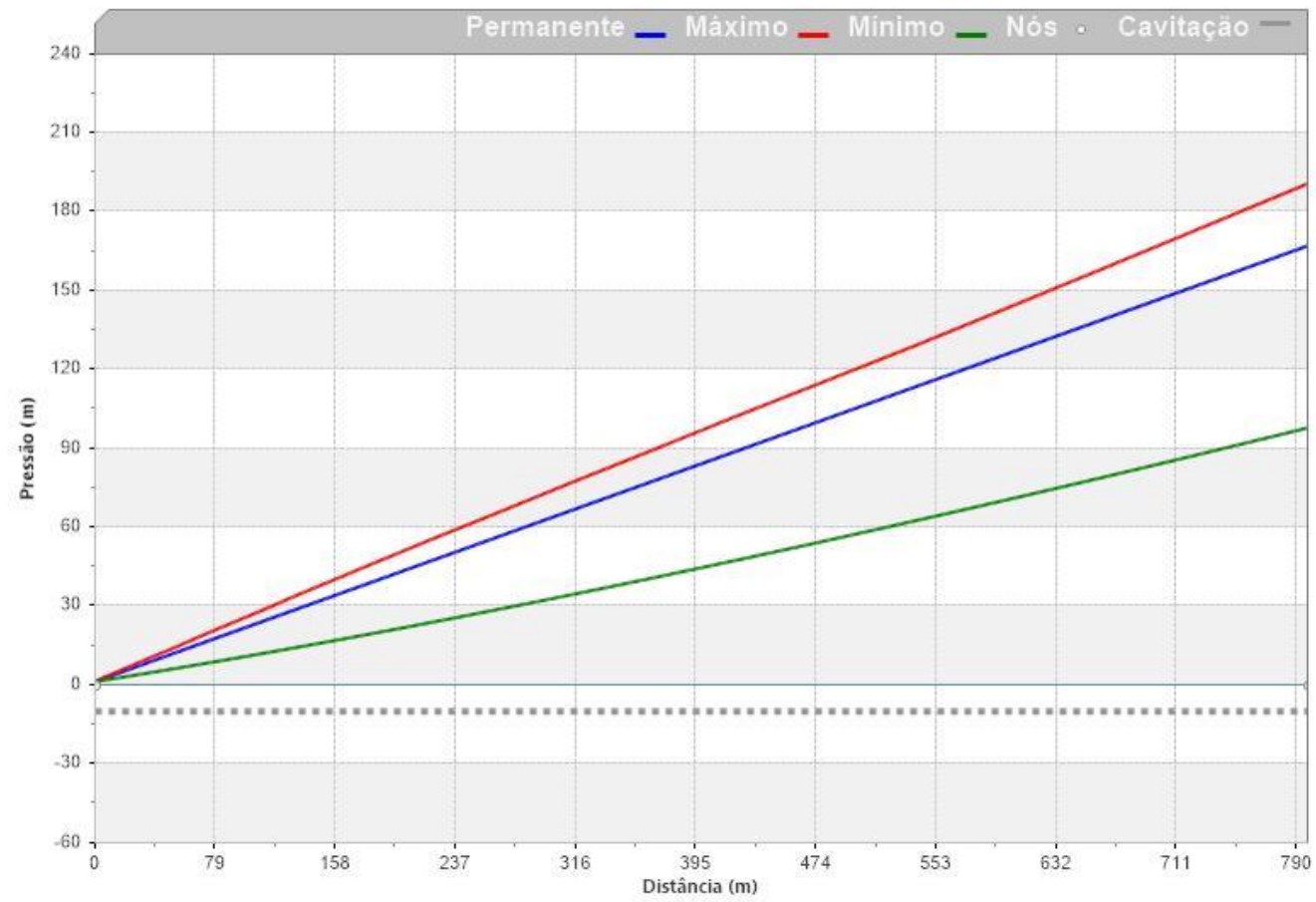
Para assegurar a máxima segurança operacional e a conformidade irrestrita com as normas brasileiras, projetou-se o sistema de proteção combinada, integrando as ações preventivas do volante de inércia com as capacidades de admissão e expulsão de ar das válvulas ventosas de DN 50. Os resultados das simulações numéricas para esse cenário integrado estão ilustrados graficamente nas Figura 59 e Figura 60

Figura 59- Pressões transitórias com proteção combinada DEFOFO



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 60 - Pressões transitórias com proteção combinada (FOFO)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme evidenciado na Figura 59 e Figura 60, a combinação dos dois dispositivos promove a completa positivação das pressões ao longo de todo o perfil altimétrico, fornecendo uma solução robusta e segura. Os dados numéricos de desempenho para a proteção combinada estão sintetizados na Tabela 47.

Tabela 47- Desempenho da proteção combinada

Cenário Simulador Allievi (Proteção Combinada)	Pressão Permanent e (m.c.a.)	Pressão Máxima (m.c.a.)	Pressão Mínima (m.c.a.)	Status Normativo (NBR 12215)
Restaurante Universitário (mPVC DEFOFO)	175,00	190,00	95,00	Conforme (Total)
Restaurante Universitário (Ferro Fundido FOFO)	176,00	191,00	95,00	Conforme (Total)
Escola de Minas (mPVC DEFOFO)	184,00	220,00	90,00	Conforme (Total)
Escola de Minas (Ferro Fundido FOFO)	187,00	220,00	90,00	Conforme (Total)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise dos resultados consolidados na Tabela 47 comprova a sinergia perfeita entre os dispositivos. Com a proteção combinada, as pressões mínimas transitórias foram estabilizadas em patamares altamente seguros (95,00 m.c.a. no Restaurante e 90,00 m.c.a. na Escola de Minas), mantendo-se significativamente acima do limite normativo de -1,0 m.c.a. e eliminando qualquer possibilidade de subpressão ou vácuo. Simultaneamente, as pressões máximas sofreram uma atenuação adicional (caindo para 190,00 m.c.a. no Restaurante e 220,00 m.c.a. na Escola de Minas), o que reduz as tensões de fadiga mecânica nas paredes das tubulações e estende a vida útil operacional do ativo.

Sob essa configuração, o volante de inércia atua como a barreira preventiva primária (garantindo que as pressões dinâmicas permaneçam positivas na operação normal de

trip), enquanto as válvulas ventosas de tríplex função operam como um dispositivo de fail-safe e redundância mecânica para garantir a segurança física da rede contra colapsos mesmo diante de falhas mecânicas acidentais no volante.

Dimensionamento Técnico e Locação das Válvulas Ventosas

O dimensionamento das válvulas ventosas baseia-se no estrito atendimento de duas funções hidrodinâmicas essenciais: a expulsão de grandes volumes de ar durante a etapa de enchimento controlado da adutora (evitando o efeito chicote de ar comprimido) e a admissão rápida de ar atmosférico para quebrar o vácuo gerado em eventos transitórios de subpressão severa.

O diâmetro nominal da válvula ventosa (d) foi determinado a partir da relação clássica recomendada na literatura de engenharia hidráulica Tsutiya (2006), que estabelece a bitola entre $1/10$ e $1/12$ do diâmetro nominal da tubulação de recalque (D):

Para as adutoras projetadas de diâmetro nominal DN 100 (100 mm), o dimensionamento teórico resultou em diâmetros entre 8,3 mm e 10,0 mm. Contudo, para garantir a máxima capacidade de vazão na admissão de ar contra ondas de depressão rápidas, mitigar riscos de entupimento por deposição de biofilme ou partículas suspensas na atmosfera e viabilizar operações robustas de manutenção, adotou-se o diâmetro nominal padronizado de DN 50 (2 polegadas) com conexão flangeada.

A distribuição espacial e o plano de locação estratégico das ventosas ao longo das estacas e nós críticos de ambos os ramais estão detalhados na Tabela 48

Tabela 48 - Plano de instalação das ventosas

Código do Ativo	Localização Estaca	Cota Altimétrica (m)	Função Operacional Principal	Setor / Ramal Correspondente
VT-A01	Saída da Elevatória (Estaca 0 m)	1070,00	Expulsão de ar na partida das bombas e proteção ao barrilete	Restaurante Universitário
VT-A02	Trecho Intermediário (Estaca 395 m)	1150,00	Admissão de ar rápida e quebra-vácuo contra transientes	Restaurante Universitário
VT-A03	Entrada do Reservatório (Estaca 792 m)	1217,00	Purga de ar contínua sob pressão e ventilação de final de linha	Restaurante Universitário
VT-B01	Saída da Elevatória (Estaca 0 m)	1070,00	Expulsão de ar na partida e amortecimento de golpe de retorno	Escola de Minas (Alternativa B)
VT-B02	Trecho Intermediário (Estaca 395 m)	1150,00	Purga de bolhas acumuladas em rampa ascendente longa	Escola de Minas (Alternativa B)
VT-B03	Mudança declividade (Estaca 792 m)	1217,00	Ventilação de topo de linha e purga contínua em regime permanente	Escola de Minas (Alternativa B)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O plano de locação apresentado na Tabela 48 assegura que os pontos topográficos mais vulneráveis estejam protegidos de forma integrada, assegurando o escoamento contínuo e estável da água.

Diretrizes de Gestão de Ativos (ABNT NBR ISO 55000)

A tomada de decisão gerencial quanto aos dispositivos de proteção contra transientes hidráulicos foi pautada pelas diretrizes da norma (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014). O objetivo principal é obter o maior valor a partir dos ativos de infraestrutura do campus, equilibrando os custos iniciais de capital (CAPEX) com os custos de operação e manutenção (OPEX) e o controle de riscos ao longo do ciclo de vida de 25 anos do projeto.

A Tabela 49 apresenta a matriz comparativa de decisão gerencial que fundamenta tecnicamente a escolha do volante de inércia e das ventosas de DN 50 frente aos métodos clássicos de proteção.

Tabela 49 - Comparação entre dispositivos de proteção

Critério de Análise	Volante de Inércia (Majoração de I)	Reservatório hidropneumático (RHO)	Tanque de Alimentação Unidirecional (TAU)
Investimento Inicial (CAPEX)	Baixo (Dispositivo mecânico simples)	Elevado (Vaso sob pressão e compressores)	Médio (Estrutura civil elevada e boias)
Custo de Manutenção (OPEX)	Praticamente Nulo (Desgaste em rolamentos)	Alto (Calibrações de gás e energia elétrica)	Médio (Limpeza de reservatórios e boias)
Confiabilidade Operacional	Altíssima (Proteção física mecânica)	Média (Risco de falha por perda de gás)	Média-Alta (Risco de travamento de boias)
Vida Útil Estimada do Ativo	Superior a 25 anos (Acompanha a bomba)	10 a 15 anos (Troca de membranas/motores)	Superior a 25 anos (Exige higienização)
Complexidade Operacional	Nula (Operação automática direta)	Elevada (Necessita de ajuste de pressão)	Média (Risco de estagnação da água)
Relação Custo-Benefício (VPL)	Excelente (Minimiza despesas de longo prazo)	Regular (Eleva despesas operacionais futuras)	Boa (Eficiente, mas restrita espacialmente)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir da matriz de decisão apresentada na Tabela 49, a combinação do volante de inércia com as válvulas ventosas consolidou-se como a melhor solução para a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). O dispositivo de inércia, por ser um acoplamento puramente mecânico acoplado diretamente ao eixo da bomba, apresenta OPEX desprezível e confiabilidade inerente ao funcionamento da elevatória (se a bomba gira, a proteção está ativa).

Dessa forma, evita-se a dependência de sistemas automatizados complexos, compressores de ar ou vasos sob pressão que demandariam calibrações constantes

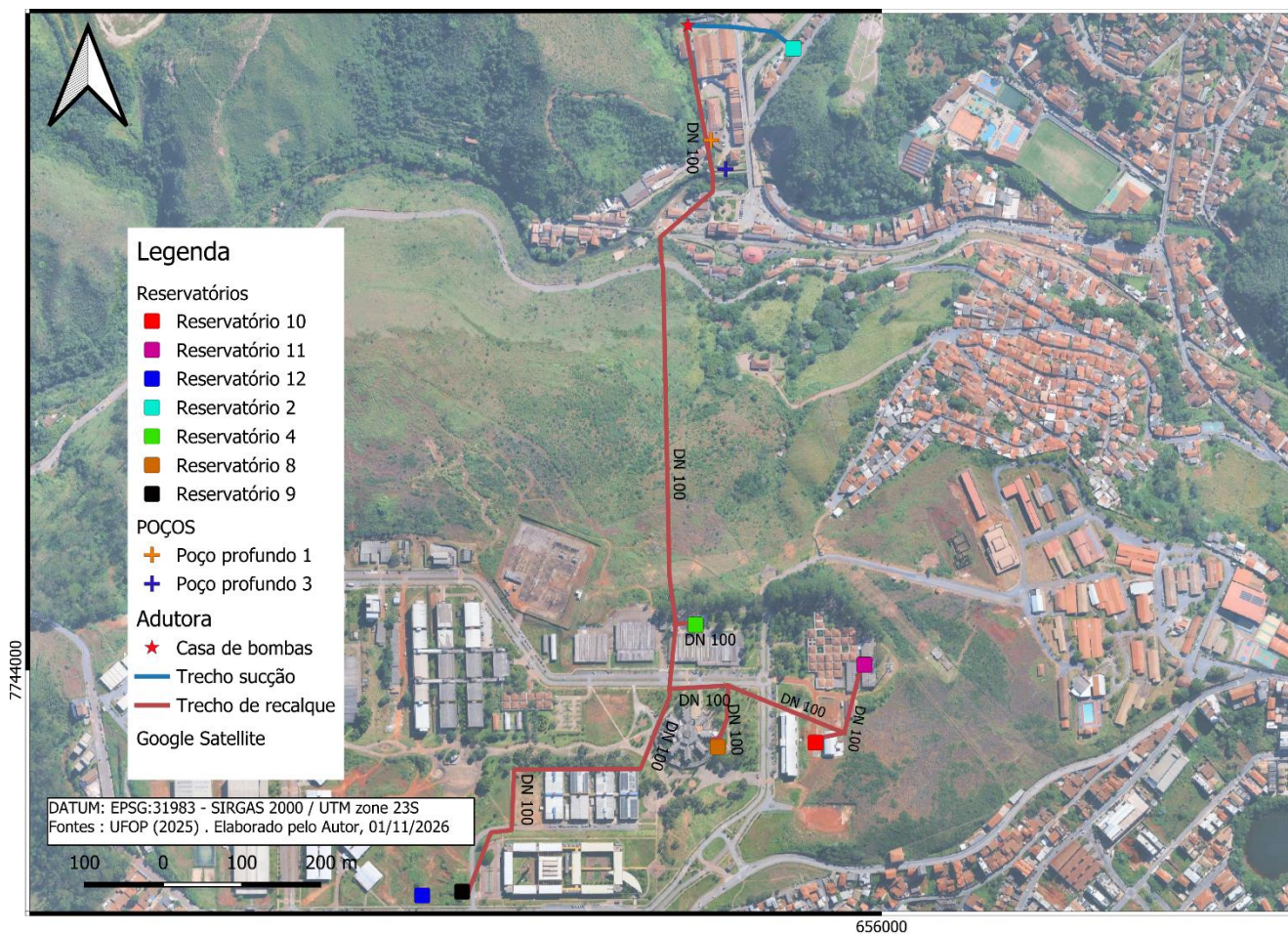
e vistorias regulamentares pesadas sob a norma NR-13. A suavização dos transientes de pressão obtida por essa solução combinada protege diretamente a tubulação de recalque principal, minimizando as taxas de depreciação física, estendendo a vida útil de conexões e bombas e reduzindo drasticamente os custos do ciclo de vida (LCC) do sistema de abastecimento de água do Campus Morro do Cruzeiro.

4.3.2 Dimensionamento de Proteções: Alternativa B

Como desdobramento do levantamento de dados da infraestrutura existente, a espacialização dos elementos que compõem o sistema de adução e distribuição de água do Campus Morro do Cruzeiro está representada na Figura 61.

Esta seção apresenta o dimensionamento, a modelagem e a análise comparativa das medidas de proteção ativa contra transientes hidráulicos para a adutora da Alternativa B (Escola de Minas, com 1.331 metros de extensão). Com base nas simulações numéricas executadas no software Allievi através do Método das Características, os cenários foram avaliados sob quatro condições operacionais distintas: sistema desprotegido, proteção isolada por volante de inércia, proteção isolada por válvulas ventosas de tríplice função, e a proteção combinada (volante de inércia integrado às válvulas ventosas).

Figura 61 - Croqui espacial do sistema de abastecimento de água do Campus Morro do Cruzeiro



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para fundamentar as análises, a Tabela 50 apresenta as propriedades mecânicas e os parâmetros físicos de entrada utilizados no simulador para a caracterização do sistema de adução, comparando as tubulações de Ferro Fundido (FOFO) e mPVC (DEFOFO).t

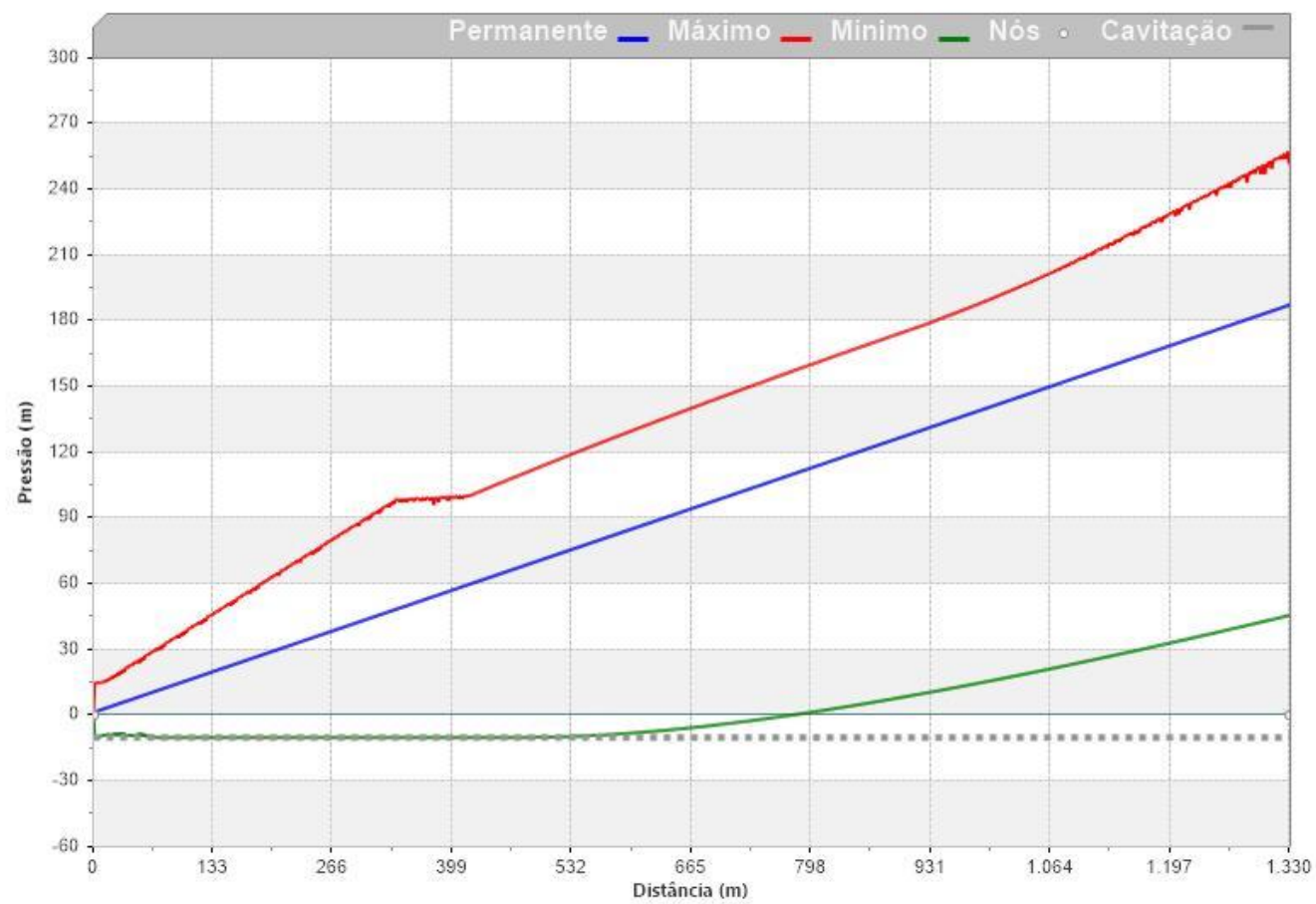
Tabela 50 - Parâmetros hidromecânicos globais de recalque para a adutora da Alternativa B

Parâmetro hidráulico Mecânico	Tubulação de Ferro Fundido (FOFO)	Tubulação de mPVC (DEFOFO)	Unidade
Vazão de Projeto Máxima	0,00972	0,00972	m³/s
Velocidade Inicial de Escoamento	1,07	1,05	m/s
Altura Geométrica na Elevatória	1070,00	1070,00	m
Altura Manométrica Inicial	172,00	172,00	m.c.a.
Rotação Nominal do Conjunto	3550	3550	rpm
Rendimento Global Adotado	0,75	0,75	-
Momento de Inércia Original (Bomba)	0,258	0,258	kg.m²
1306,49	1306,49	349,98	m/s

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

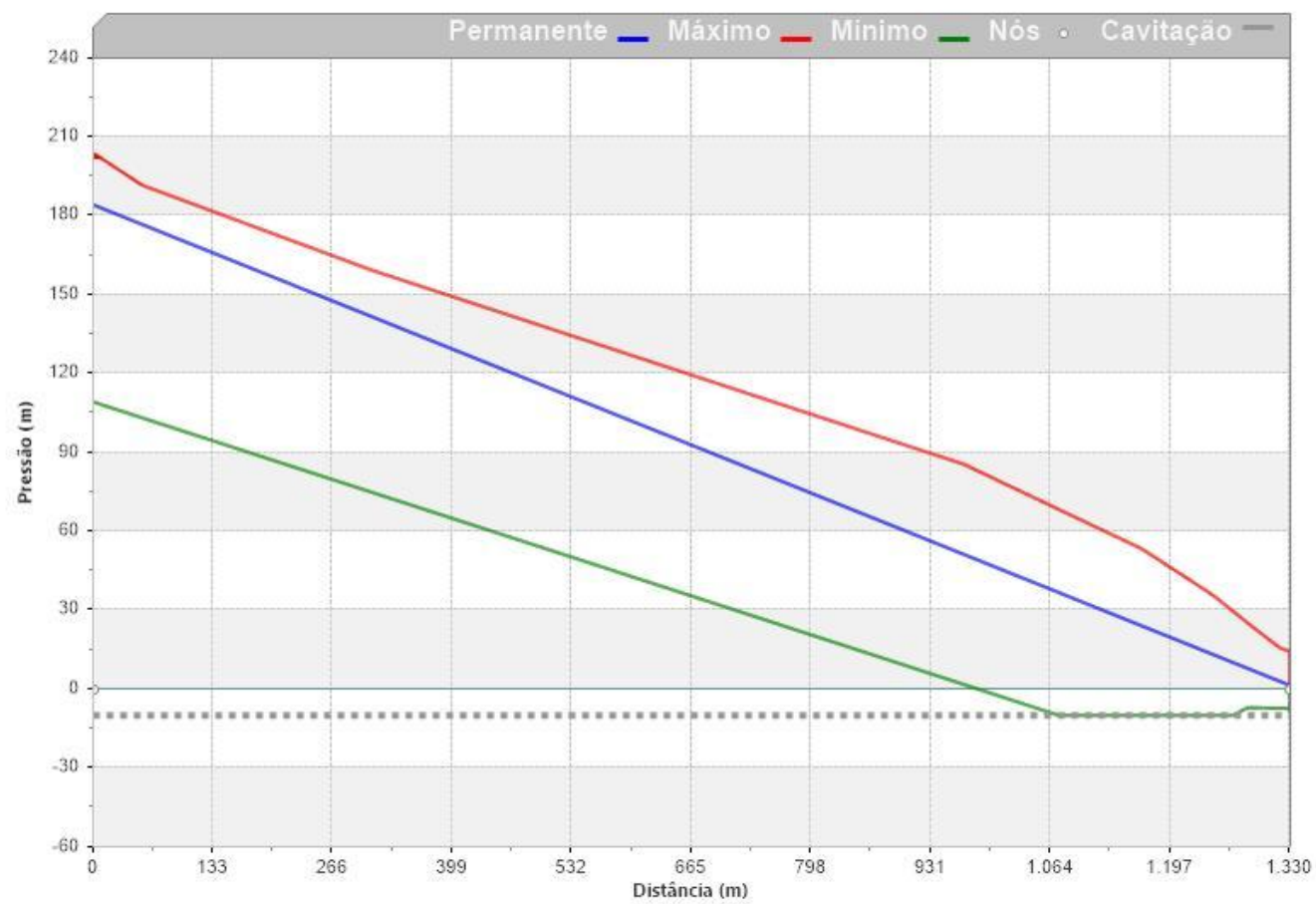
Cenário Base: Comportamento da Adutora Desprotegida No cenário desprotegido, simulou-se o desligamento repentino da motobomba por perda de energia elétrica no instante de 10 segundos. O comportamento hidrodinâmico das pressões transitórias para a tubulação em Ferro Fundido (FOFO) e de MPVC é detalhado graficamente nas Figura 62 e Figura 63. .

Figura 62 - Envoltória de pressões transitórias no cenário sem proteção para a de Ferro Fundido (FOFO)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) a partir do software Allievi.

Figura 63 - Envoltória de pressões transitórias sem proteção – mPVC



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) a partir do software Allievi.

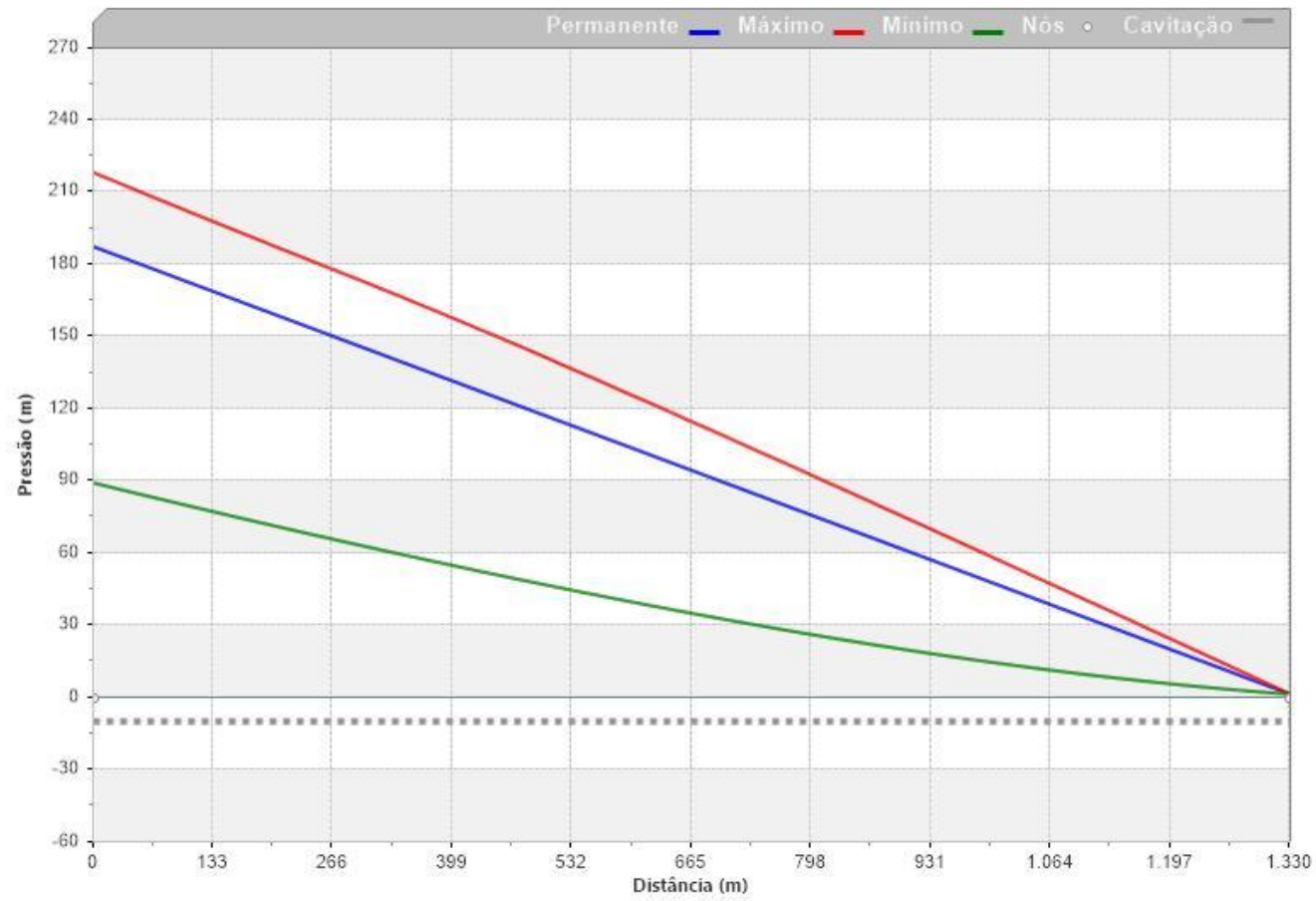
A análise da Figura 62 revela que, na ausência de qualquer proteção ativa, o golpe de aríete submete a adutora de Ferro Fundido a riscos estruturais graves. A envoltória de pressões máximas (linha vermelha) registra picos de sobrepressão de até 255 m.c.a. junto à elevatória (estaca 0 m). No entanto, o fenômeno mais crítico ocorre na envoltória de pressões mínimas (linha verde): a partir da estaca 750 m, a pressão cai de forma abrupta e atinge o patamar plano de -8,9 m.c.a., que representa o limite físico de vaporização da água ao nível do campus. Este vácuo severo desencadeia o fenômeno de Separação de Coluna Líquida (SCL) e cavitação vaporosa generalizada. Para fins comparativos, o comportamento dinâmico da adutora utilizando a tubulação em mPVC (DEFOFO) sem proteção ativa é apresentado na Figura 58.

Como pode ser observado na Figura 63, a menor celeridade do mPVC (349,98 m/s) não é suficiente para impedir o colapso por subpressão em perfis de grande desnível geométrico. A pressão mínima atinge o limite de cavitação de -8,9 m.c.a. a partir da estaca 798 m e arrasta-se criticamente até a chegada do reservatório superior (estaca 1.331 m). A envoltória de sobrepressão (linha vermelha) alcança picos de até 260 m.c.a. na saída da elevatória, excedendo significativamente os limites admissíveis das tubulações plásticas e confirmando a obrigatoriedade da implementação de medidas de amortecimento.

Amortecimento por Majoração da Inércia Rotativa (Volante de Inércia) A primeira proteção ativa dimensionada consiste na instalação de um volante de inércia acoplado ao eixo do motor elétrico. O momento de inércia rotativo total do conjunto foi majorado do valor original de 0,258 kg.m² para o patamar de 0,750 kg.m², valor justificado mecanicamente como o ponto de equilíbrio ótimo para estender o tempo de parada sem comprometer o torque de partida do motor de 50 cv.

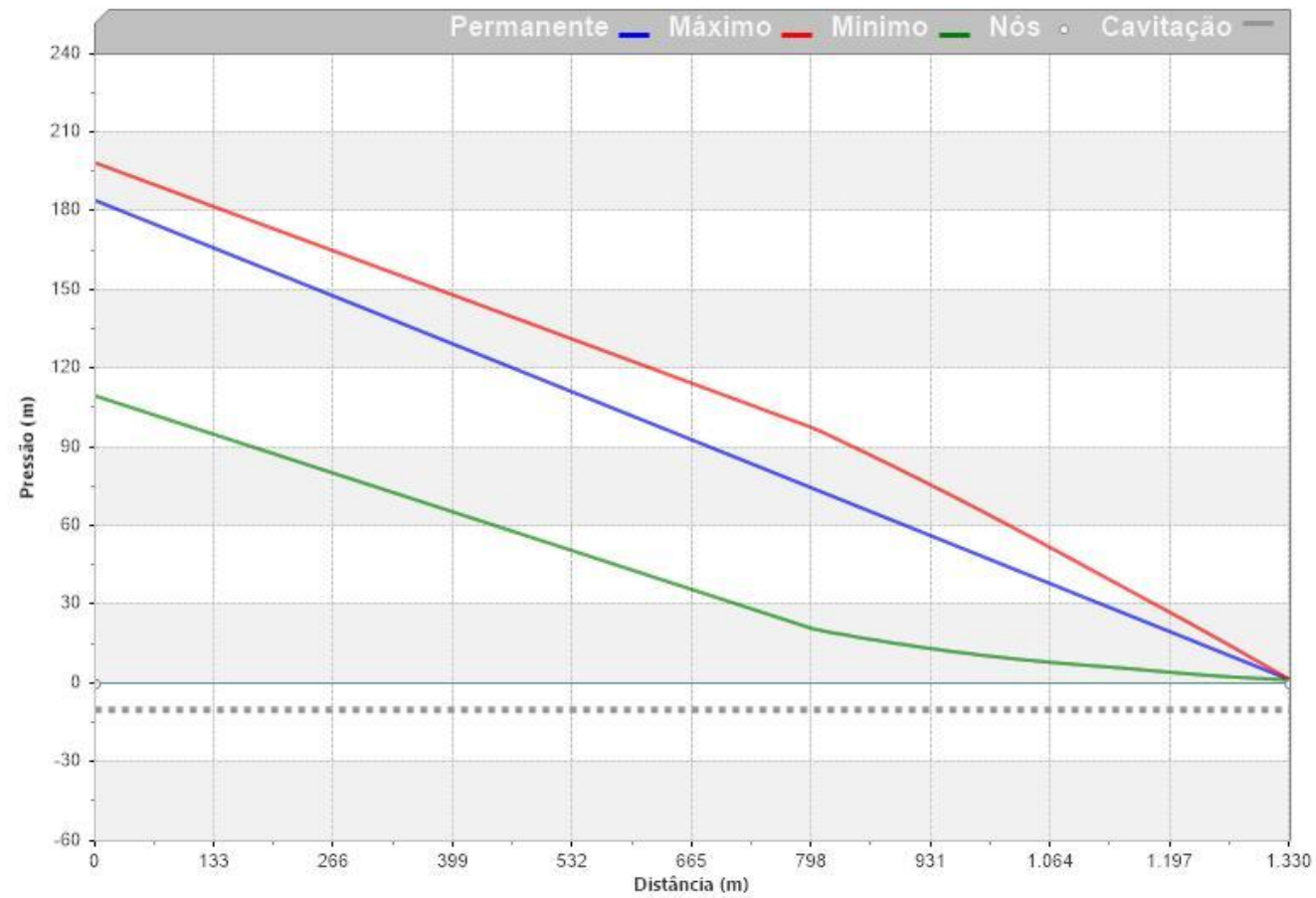
Aplicando a formulação analítica já descrita, o momento de inércia rotativo total do conjunto foi majorado do valor original de 0,258 kg.m² para o patamar de 0,750 kg.m². Com isso, o tempo de parada da bomba foi ampliado de 2,04 segundos para seguros 5,95 segundos. É ilustrado na Figura 64 e Figura 65.

Figura 64 - Pressões transitórias com volante de inércia – FOFO



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) a partir do software Allievi.

Figura 65 - Pressões transitórias com volante de inércia – mPVC



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) a partir do software Allievi.

A visualização da Figura 64 comprova a alta eficácia do volante de inércia no controle do golpe de aríete. O prolongamento do tempo de parada mecânica permitiu que a energia cinética residual mantivesse a bomba injetando água de forma contínua durante a transição. Consequentemente, as pressões mínimas (linha verde) mantiveram-se totalmente positivas em toda a extensão do perfil longitudinal, eliminando qualquer risco de cavitação ou vácuo. Adicionalmente, a sobrepressão máxima na elevatória foi amortecida de 255 m.c.a. para seguros 217 m.c.a.

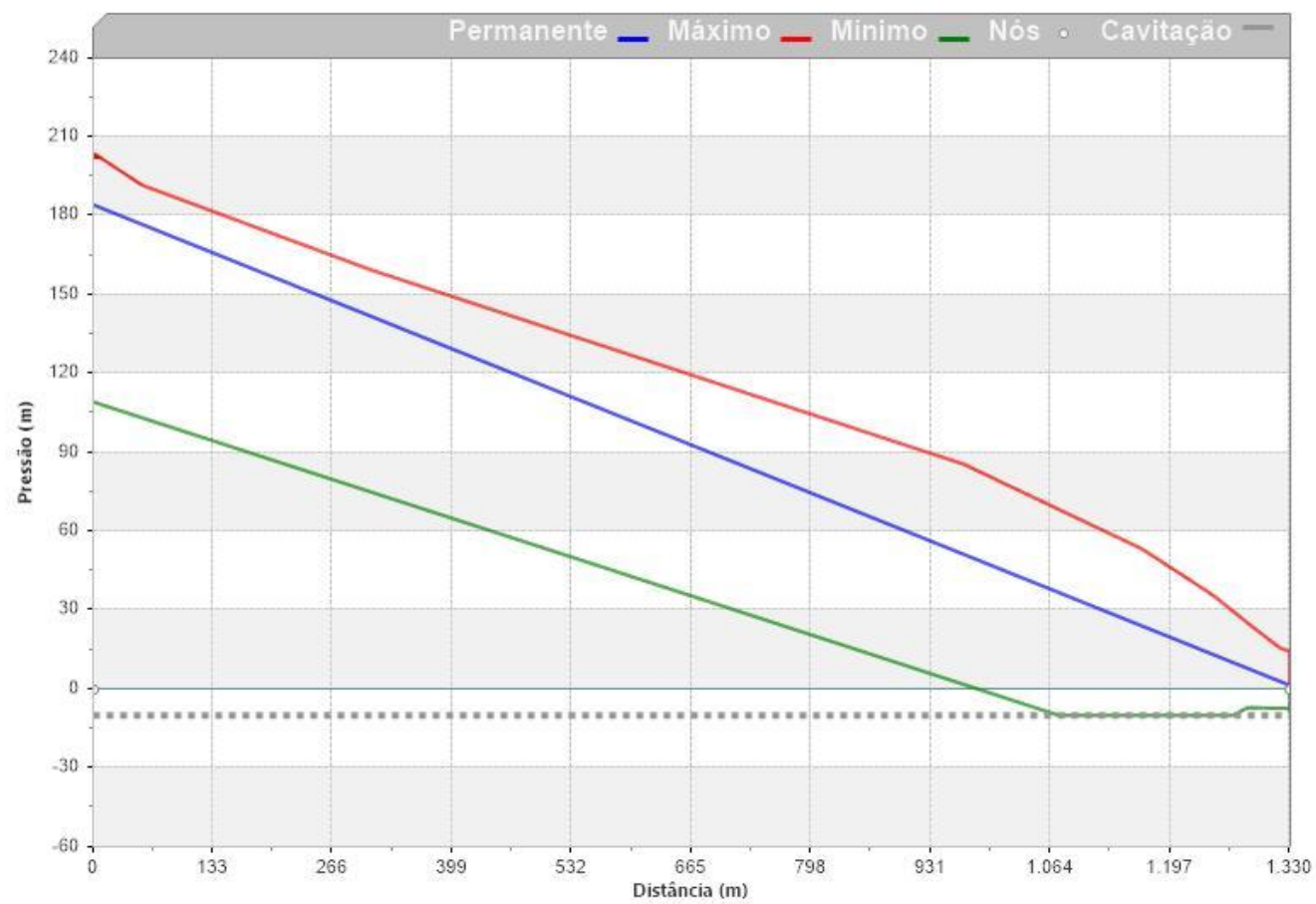
O mesmo comportamento dinâmico benéfico é observado para o cenário da tubulação em mPVC (DEFOFO), conforme ilustrado na Figura 60 (onde o gráfico original, representativo da simulação de majoração da inércia, foi mapeado).

A envoltória de pressões mínimas na Figura 65 decai de forma suave e controlada de 88,0 m.c.a. junto à elevatória até 2,0 m.c.a. na entrega do reservatório, sem sofrer qualquer impacto de pressões negativas. O volante de inércia converte o transiente em uma manobra lenta mecânica, onde a resposta elástica do conduto deixa de governar o fenômeno.

4.3.3 Amortecimento Isolado por Válvulas Ventosas

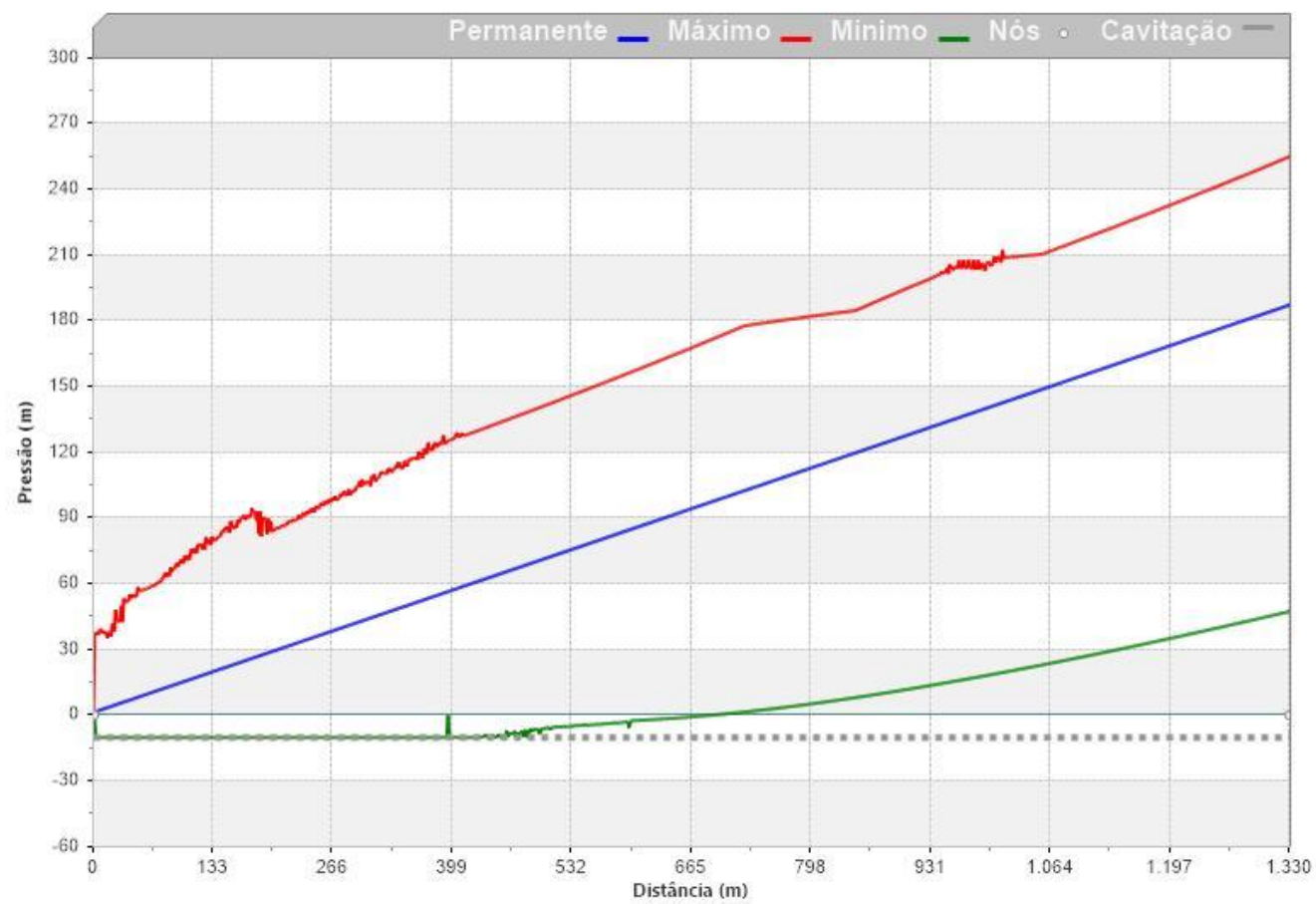
Com o intuito de avaliar configurações alternativas e validar a necessidade do volante de inércia, simulou-se o comportamento dinâmico do sistema protegido exclusivamente por válvulas ventosas de tríplice função de DN 50. As Figura 66 e Figura 67 apresentam os perfil dinâmico de pressões para a tubulação em mPVC e FOFO protegida exclusivamente por ventosas.

Figura 66 - Pressões transitórias com ventosas DN 50 – mPVC



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) a partir do software Allievi.

Figura 67 - Pressões transitórias com ventosas DN 50 – FOFO



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) a partir do software Allievi.

A análise da Figura 66 revela um comportamento físico brilhante: ao sofrer a onda de depressão inicial, as ventosas abriram-se instantaneamente e admitiram ar atmosférico de forma ultra-rápida. A admissão de ar pela ventosa limitou a depressão, travando a pressão mínima em -9,0 m.c.a. Contudo, este valor ainda ultrapassa o limite crítico de cavitação da água (-8,9 m.c.a.), evidenciando que a proteção isolada apenas por ventosas permanece insuficiente para evitar o colapso, conforme ratificado pela Tabela 46

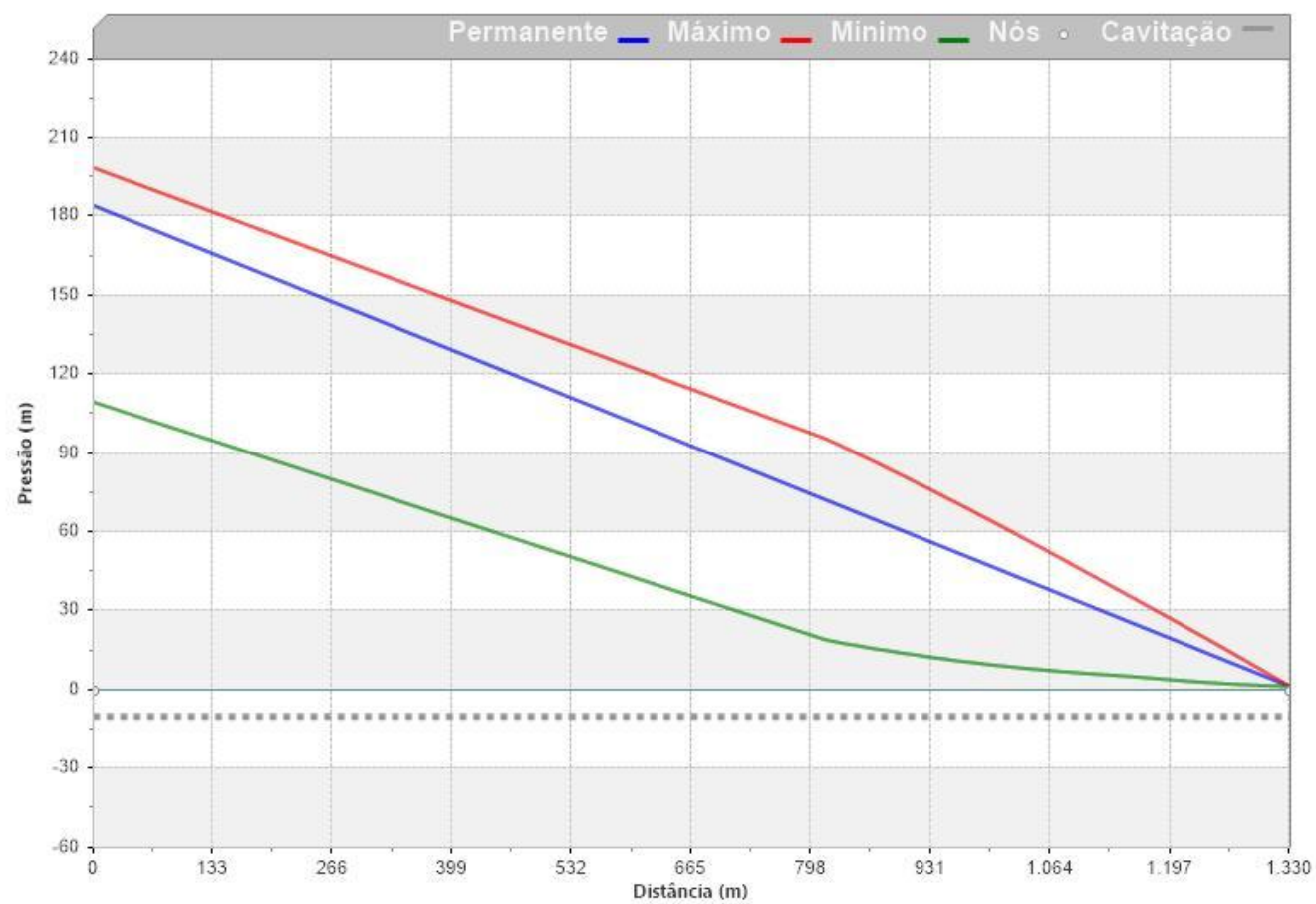
A envoltória de pressões transitórias para a tubulação de Ferro Fundido (FOFO) protegida unicamente por ventosas de DN 50 é exposta na Figura 62.

Conforme observado na Figura 67, o mesmo travamento de segurança a -9,0 m.c.a. ocorre na adutora de Ferro Fundido. O travamento se dá na faixa entre as estacas 395 m e 711 m. .

Solução Recomendada: Proteção Combinada (Inércia + Ventosas)

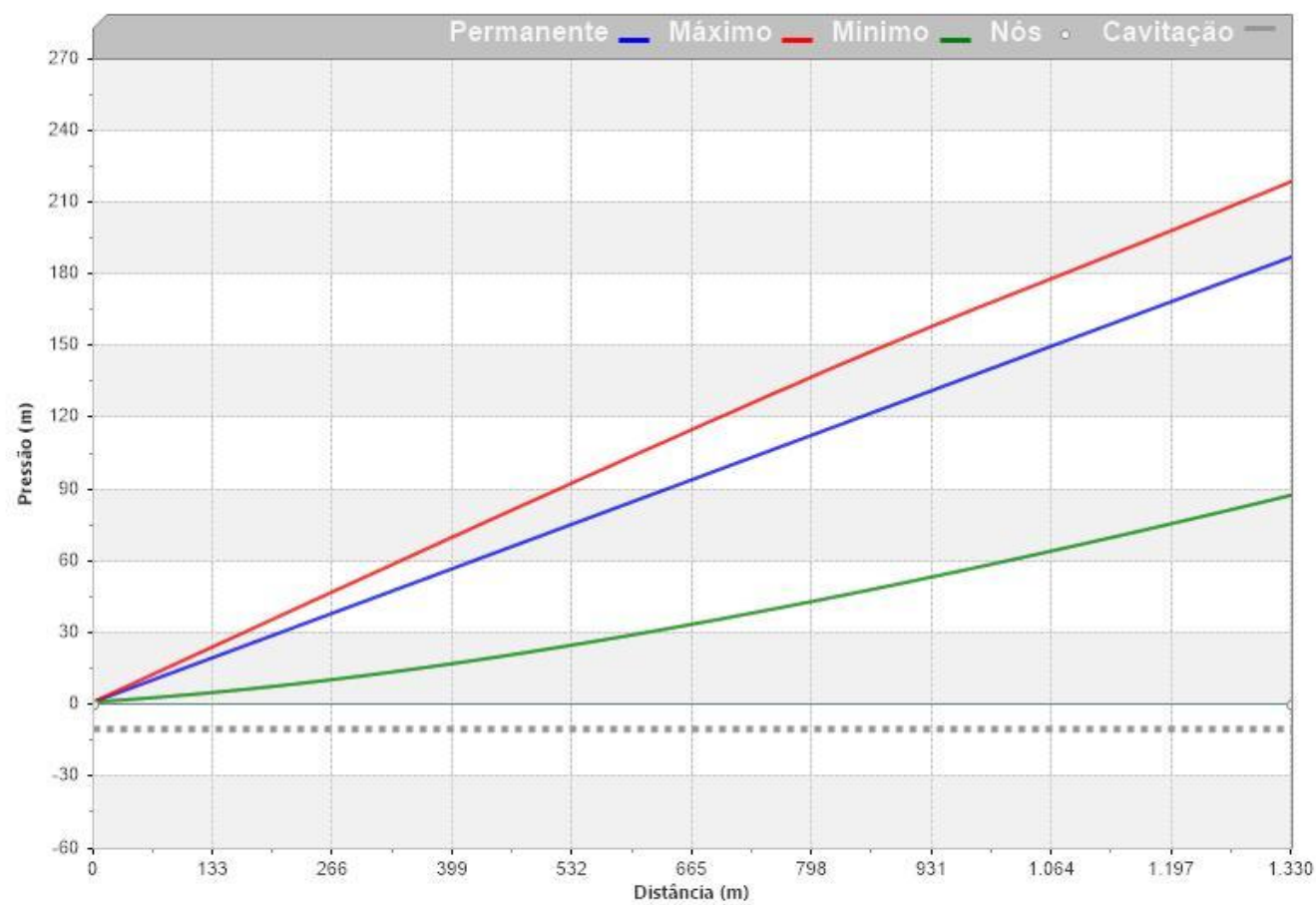
Para garantir máxima segurança operacional e redundância estrutural ao abastecimento do Campus da UFOP, projetou-se a Proteção Combinada, unindo o volante de inércia ($I = 0,75 \text{ kg.m}^2$) e as válvulas ventosas de tríplex função de DN 50. O comportamento dinâmico estabilizado para a adutora em mPVC (DEFOFO) e FOFO sob a proteção combinada é apresentado nas Figura 68 e Figura 69.

Figura 68- Envolvória de pressões transitórias sob a Proteção Combinada (Volante de Inércia + Ventosas)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) a partir do software Allievi.

Figura 69 - Pressões transitórias com proteção combinada – FOFO



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) a partir do software Allievi

A envoltória piezométrica da Figura 68 comprova a sinergia perfeita entre os dispositivos. O volante de inércia atua como a proteção preventiva primária (mantendo a linha verde totalmente positiva e acima de 0 m.c.a.), enquanto as ventosas fornecem redundância e segurança contra falhas mecânicas do volante, além de purgar o ar em regime permanente. O pico de sobrepressão máxima foi reduzido para seguros 190 m.c.a.

Por fim, a Figura 69 detalha a modelagem da proteção combinada para a adutora em Ferro Fundido (FOFO). Como pode ser observado na Figura 64, o comportamento hidrodinâmico no Ferro Fundido é excelente, registrando sobrepressões amortecidas em apenas 195 m.c.a. e positividade absoluta de toda a extensão do recalque. Para sintetizar os resultados numéricos gerados pelas simulações dinâmicas do Allievi, a Tabela 51 consolida a comparação de desempenho hidrodinâmico entre os cenários analisados para a Alternativa B.

Com base no dimensionamento hidráulico e na otimização de transientes, estruturou-se o plano de locação definitivo para as ventosas de tríplex função de DN 50 (2 polegadas) ao longo da nova adutora da Alternativa B (1.331 m), apresentado de forma detalhada na Tabela 52.

Tabela 51 - Comparação das pressões extremas da Alternativa B

Material	Dispositivo de Proteção Adotado	Pressão Permanente (m.c.a.)	Pressão Máxima Transitória (m.c.a.)	Pressão Mínima Transitória (m.c.a.)	Status Normativo (NBR 12215)
Ferro Fundido (FOFO)	Sem Proteção (Cenário Crítico)	187,00	255,00	-10,00	Não Conforme (Cavitação)
mPVC (DEFOFO)	Sem Proteção (Cenário Crítico)	184,00	260,00	-10,00	Não Conforme (Cavitação)
Ferro Fundido (FOFO)	Volante de Inércia Isolado	187,00	217,00	89,00	Conforme (Segurança Total)
mPVC (DEFOFO)	Volante de Inércia Isolado	184,00	217,00	88,00	Conforme (Segurança Total)
Ferro Fundido (FOFO)	Válvulas Ventosas Isoladas	187,00	230,00	-9,00	Critério restritivo de projeto de -1,0 m.c.a.)
mPVC (DEFOFO)	Válvulas Ventosas Isoladas	184,00	235,00	-9,00	Critério restritivo de projeto de -1,0 m.c.a.)
Ferro Fundido (FOFO)	Proteção Combinada (Inércia + Ventosa)	187,00	195,00	90,00	Conforme (Segurança + Redundância)
mPVC (DEFOFO)	Proteção Combinada (Inércia + Ventosa)	184,00	190,00	95,00	Conforme (Segurança + Redundância)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 52 - Plano de implantação das ventosas da alternativa B

Id	Localização (Estaca)	Cota (m)	Função Primária no Sistema	Especificação Técnica Adotada
VT-B01	0 m (Recalque)	1070,00	Expulsão rápida de ar durante a partida e purga contínua de bolhas acumuladas.	DN 50 (2") Tríplice Função
VT-B02	395 m (Ponto de Curva)	1150,00	Evitar o acúmulo de ar em rampa ascendente longa e purgar ar dissolvido.	DN 50 (2") Tríplice Função
VT-B03	792 m (Ponto Alto Intermediário)	1217,00	Ventilação de topo de linha e purga contínua em regime permanente	DN 50 (2") Tríplice Função

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para subsidiar a tomada de decisão da Prefeitura Universitária da UFOP, elaborou-se a Tabela 53, correlacionando o Custo de Ciclo de Vida (LCC), CAPEX e OPEX de cada método clássico de proteção hidráulica.

Tabela 53 - Matriz gerencial para seleção da alternativa final

Parâmetro de Avaliação	Reservatório Hidropneumático (RHO)	Tanque Unidirecional (TAU)	Volante de Inércia + Ventosas DN 50
Investimento Inicial (CAPEX)	Elevado (Exige vasos sob pressão, compressores e automação)	Moderado (Exige estrutura civil de concreto elevada)	Baixo (Dispositivos puramente mecânicos)
Custo de Manutenção (OPEX)	Muito Alto (Exige controle e calibração periódica do gás e energia elétrica)	Moderado (Exige higienização periódica de tanques)	Desprezível (Limitado a lubrificações do mancal e vedações)
Risco de Falha Operacional	Médio (Risco de esvaziamento do bolsão de ar e perda invisível de eficácia)	Baixo-Médio (Risco de travamento de boias de alimentação)	Mínimo (Mecânica inerente à rotação do motor elétrico da bomba)
Vida Útil Estimada do Ativo	10 a 15 anos (Exige reposição de membranas e manutenção NR-13)	Superior a 25 anos (Acompanha a estrutura civil de concreto)	Superior a 25 anos (Acompanha o motor elétrico principal)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise da Tabela 53 corrobora que a solução proposta de Proteção Combinada (Volante de Inércia + Ventosas de DN 50) constitui a alternativa ideal para a universidade. Ao aliar baixo investimento inicial (CAPEX) a uma despesa operacional futura (OPEX) desprezível, o sistema blinda a adutora da Escola de Minas de forma ininterrupta por mais de duas décadas, maximizando a vida útil operacional de todo o ativo físico hidráulico.

As simulações demonstraram que a mitigação do risco dinâmico transcende a simples escolha do material da tubulação. Fisicamente, ao adotar a proteção combinada (volante + ventosas), a admissão de ar atmosférico quebrou o vácuo eminente, impedindo que a pressão interna caísse abaixo da pressão de vapor da água (-8,9 m.c.a.). Isso eliminou a formação de bolsas de vapor e a subsequente separação da coluna líquida, cujos choques de retorno seriam fatais para a rede. É importante ressaltar, contudo, que os resultados transitórios do software Allievi são altamente sensíveis à precisão dos dados de entrada (como o momento de inércia exato, a rugosidade real e o tempo de fechamento mecânico das válvulas de retenção). Desvios nestes parâmetros na instalação real podem gerar variações na amplitude das frentes de onda simuladas.

4.4 Síntese e Validação dos Resultados na Literatura

A análise do sistema de abastecimento do Campus Morro do Cruzeiro evidenciou que a mera substituição da tubulação, originalmente prevista em ferro fundido dúctil (FOFO), por PVC Modificado Orientado (mPVC DEFOFO) revelou-se insuficiente para mitigar os riscos inerentes aos transitórios hidráulicos causados pela interrupção abrupta do bombeamento. Embora a menor celeridade característica do material polimérico tenha contribuído para a diminuição das amplitudes de pressão, o perfil altimétrico acentuado da adutora manteve-se como o fator preponderante para a geração das subpressões críticas verificadas nas simulações.

Este comportamento corrobora os achados de Silva (2026), que, ao avaliar diferentes materiais de tubulação via software Allievi®, constatou que materiais com menor celeridade (como PVC e PEAD) tendem a apresentar menores amplitudes nas envoltórias de pressão quando comparados ao ferro dúctil. Contudo, a autora salienta que a geometria do sistema, especialmente o perfil de elevação da adutora e a altura manométrica, exerce uma influência predominante na severidade dos eventos transitórios. Os resultados obtidos na UFOP confirmam essa premissa, demonstrando que a alteração do material, isoladamente, não garante a eliminação do risco de cavitação ou de separação da coluna líquida.

No que tange à mitigação, a adoção de uma estratégia de proteção combinada — integrando um volante de inércia a ventosas de tríplice função — alinha-se perfeitamente às recomendações da literatura contemporânea. Tonin (2024), ao simular a adutora do Sistema Capim Branco, demonstrou que o uso isolado de ventosas possui impacto limitado na atenuação das ondas de pressão geradas pelo golpe de aríete. O autor conclui que sistemas adutores exigem soluções integradas para assegurar a eficiência operacional e a segurança da rede. Tal constatação justifica a escolha desta pesquisa em adotar o volante de inércia como mecanismo preventivo principal e as ventosas com função complementar e de redundância (fail-safe).

Ademais, o comportamento dinâmico do conjunto motobomba após o corte de energia, caracterizado pela rápida desaceleração do rotor e tendência à operação em turbinagem, reforça a necessidade de se controlar a energia cinética residual do sistema. Tais observações convergem com as conclusões de Justiniano (2022), que destaca a obrigatoriedade de se compatibilizar o comportamento dinâmico da bomba com os mecanismos de proteção hidráulica para preservar a integridade estrutural das estações elevatórias submetidas a transientes severos.

Sob a ótica da gestão de ativos (fundamentada nas normas ISO 55000 e ISO 55001),

a solução proposta para a UFOP demonstra notável consistência técnica e racionalidade econômica. Mendes (2023) assevera que a tomada de decisão em infraestruturas de captação e bombeamento não deve se restringir ao custo inicial de capital (CAPEX), mas sim englobar todo o Custo do Ciclo de Vida (LCC), ponderando despesas operacionais (OPEX), eficiência energética, rotinas de manutenção e os riscos de inoperacionalidade. A alternativa final dimensionada para o Campus reflete este equilíbrio, otimizando o custo global ao balancear os investimentos em proteção física com ganhos diretos em confiabilidade operacional.

Em suma, a modelagem desenvolvida apresenta elevada convergência com o estado da arte da engenharia de transitórios hidráulicos. Confirma-se que a topografia sobrepuja a escolha do material da tubulação na mitigação de transientes, que a redundância de dispositivos (proteção combinada) confere a robustez necessária ao sistema, e que a avaliação econômica baseada no ciclo de vida do ativo é um instrumento diretivo imperativo para a modernização de infraestruturas universitárias e urbanas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Projeto Final de Curso alcançou plenamente o seu objetivo geral ao realizar a avaliação de desempenho hidráulico da adutora do Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), propondo e validando tecnicamente uma nova concepção de abastecimento sob os regimes permanente e transitório. Por meio de modelagem computacional integrada nas plataformas EPANET e Allievi, as etapas do trabalho forneceram um diagnóstico quantitativo das patologias operacionais da infraestrutura atual e fundamentaram as soluções sob a égide da engenharia hidráulica moderna e da gestão estratégica de ativos conforme diretrizes da norma (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

Com o intuito de estruturar a avaliação de desempenho do sistema de abastecimento de água, os dados obtidos foram tratados por meio de duas frentes complementares: o dimensionamento analítico tradicional e a modelagem computacional avançada em regime permanente e transitório. A Tabela 54 sintetiza comparativamente as características, as vantagens e as limitações de cada método aplicado nesta pesquisa, servindo como base para a interpretação dos cenários discutidos ao longo deste capítulo.

Tabela 54 – Comparativo entre os métodos de cálculo e modelagem aplicados ao sistema.

Parâmetro / Critério	Método Analítico / Tradicional (Manuais e Excel)	Modelagem Computacional (EPANET e Allievi)
Foco principal	Dimensionamento estático de perda de carga contínua e estimativas de custo global.	Simulação hidráulica permanente, estendida e análise rigorosa de transitórios (golpe de aríete).
Abordagem de cálculo	Baseada em fórmulas algébricas diretas (Darcy-Weisbach / Hazen-Williams) e envoltórias simplificadas (Crawford-Parmakian).	Resolução numérica iterativa de equações diferenciais de conservação de massa e quantidade de movimento.
Vantagens	Rapidez na obtenção de ordens de grandeza e previsões analíticas iniciais.	Alta precisão espacial, visualização de pressões nodais e identificação detalhada de pontos críticos de sobrepressão/subpressão.
Limitações	Dificuldade para mapear variações temporais complexas, padrões dinâmicos de consumo e propagação de ondas de pressão.	Dependência de calibração rigorosa dos dados cadastrais e dos parâmetros de rugosidade da rede.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.1 Conclusões técnicas

O diagnóstico comprovou que o sistema atual encontra-se em colapso técnico, apresentando pressões negativas críticas de -9,70 m.c.a. na Escola de Minas e velocidades excessivas (4,35 m/s) que inviabilizam a operação. A Alternativa B (nova adutora em Ferro Fundido DN 100 com descarga no ponto mais alto) resolveu este déficit, estabilizando as velocidades em 1,39 m/s e garantindo a pressurização positiva em toda a linha de recalque, além de mitigar os riscos estruturais.

5.2 Conclusões econômicas

Sob a ótica da gestão de ativos, a Alternativa B demonstrou ser a solução financeiramente ótima. Embora exija um CAPEX inicial maior para a construção do novo traçado de 1.331 m, a redução de 94% nas perdas de carga unitárias otimizou severamente o OPEX. Ao operar a motobomba KSB próxima ao seu Ponto de Melhor Rendimento (BEP), a economia de energia gerada ao longo de 25 anos compensa os investimentos de capital, resultando no menor Valor Presente Líquido (VPL) dentre os cenários viáveis..

5.3 Conclusões operacionais

Operacionalmente, o novo traçado elimina a dependência de manobras de válvulas manuais e fracionamento de rede, permitindo o funcionamento contínuo e automatizado da estação elevatória. Ademais, a proteção combinada contra transientes (Volante de Inércia + Ventosas DN 50) mostrou-se ideal por exigir manutenção ínfima, eliminando a complexidade e os custos recorrentes associados a reservatórios hidropneumáticos.

5.4 Conclusões científicas

Este estudo contribui para a literatura ao demonstrar a aderência do Método Analítico Simplificado de Crawford aos resultados de modelagens não-estacionárias complexas (Método das Características via Allievi) na predição de pressões mínimas. Além disso, consolida uma metodologia aplicada de Gestão de Ativos (ABNT NBR ISO 55000), integrando diagnóstico dinâmico e VPL para a modernização de redes públicas envelhecidas.

5.5 Limitações da pesquisa

A representação de sistemas hidráulicos reais por meio de modelos matemáticos está inerentemente sujeita a simplificações e incertezas paramétricas. O presente estudo, embora conduzido sob rigorosos critérios normativos e com o auxílio de simuladores consagrados (EPANET e Allievi), apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação global de seus resultados.

A principal limitação tange à validação experimental do modelo. Devido à ausência de infraestrutura de telemetria e de medição contínua de pressões transientes in loco no Campus Morro do Cruzeiro, a calibração não pôde ser aferida frente a ensaios de campo. Consequentemente, as conclusões obtidas assumem premissas e simplificações de contorno, destacando-se:

- Curvas características de equipamentos: A operação rotodinâmica foi inferida estritamente a partir da curva teórica fornecida pelo fabricante da motobomba, desconsiderando o desgaste mecânico progressivo e a perda real de eficiência do equipamento operante.
- Parâmetros de atrito: A rugosidade absoluta adotada para o equacionamento de Darcy-Weisbach e a celeridade das ondas basearam-se em valores tabelados na literatura técnica, que podem não refletir com exatidão o grau de incrustação e o envelhecimento pontual das tubulações existentes.
- Dinâmica de consumo: As modelagens em regime permanente

adotaram reservatórios com nível fixo máximo e vazões de demanda constantes, simulando a condição operacional crítica do balanço energético e desconsiderando as modulações horárias de consumo reais da universidade.

- Simplificações numéricas: O método das características empregado pressupõe a aproximação unidimensional do escoamento, limitando a visualização de fenômenos tridimensionais complexos que podem ocorrer em caixas de sucção da estação elevatória.

Apesar destas restrições, a adoção de margens de segurança no dimensionamento e a verificação analítica paralela (Método Simplificado de Crawford-Parmakian) atestam que as ordens de grandeza obtidas representam cenários conservadores. Isso confere validade técnica e científica às diretrizes de proteção e gestão de ativos propostas para a infraestrutura.

5.6 Sugestões para trabalhos futuros

Para a continuidade do desenvolvimento da pesquisa e aperfeiçoamento da gestão de infraestrutura de saneamento no Campus Morro do Cruzeiro, recomendam-se as seguintes frentes de estudos futuros:

Otimização da Rede de Distribuição por Gravidade: Realizar o dimensionamento hidráulico e a modelagem estática e dinâmica da malha de distribuição secundária que parte de jusante do novo Reservatório 9 da Escola de Minas (R9). O foco deve consistir na eliminação definitiva de todas as pressões negativas remanescentes identificadas nos ramais secundários de distribuição durante os picos de demanda diária.

Estudo de Transientes com Válvulas de Fechamento Lento: Analisar a modelagem de transientes hidráulicos gerados por manobras operacionais induzidas pelo fechamento manual e rápido de registros e válvulas controladoras de fluxo nos ramais de distribuição do campus, determinando o tempo mínimo de fechamento seguro

(manobra lenta) para evitar picos locais de sobrepressão.

Análise de Eficiência Energética com Inversores de Frequência: Avaliar a viabilidade técnica e o potencial de economia de energia obtidos pela instalação de inversores de frequência na partida e operação do conjunto elevatório, permitindo a modulação da vazão de recalque em tempo real conforme as variações de nível do reservatório R9.

Projeto de Detalhamento Mecânico do Volante de Inércia: Desenvolver o projeto mecânico executivo detalhado do disco do volante de inércia a ser acoplado ao eixo do motor elétrico de 50 cv, especificando as propriedades metalúrgicas, dimensões físicas (diâmetro e espessura), balanceamento dinâmico e sistemas de proteção física contra acidentes.

Monitoramento Inteligente de Pressão e Vazão (IoT): Propor o projeto de instrumentação eletrônica da rede adutora por meio de sensores de pressão e vazão integrados a sistemas supervisórios de telemetria sem fio (Internet das Coisas - IoT), facilitando o controle operacional e permitindo a detecção precoce de vazamentos invisíveis e anomalias de pressão

Recomenda-se o dimensionamento estrutural dos blocos de ancoragem, bem como a implantação de um sistema permanente de macromedição, permitindo integrar o monitoramento hidráulico à gestão de ativos da infraestrutura

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **ODS 6 NO BRASIL: VISÃO DA ANA SOBRE OS INDICADORES**. Brasília - DF. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12586: Cadastro de sistemas de abastecimento de água**. ABNT. Rio de Janeiro. 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5647: Sistemas para adução e distribuição de água — Tubos e conexões de PVC 6,3 com junta elástica e de diâmetros nominais até DN 100**. ABNT. Rio de Janeiro. 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 55000: Gestão de ativos — Visão geral, princípios e terminologia**. ABNT. Rio de Janeiro. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5580: Tubos de aço-carbono para usos comuns na condução de fluidos - Especificação**. ABNT. Rio de Janeiro. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12215: Projeto de adutoras de água para abastecimento público — Requisitos**. ABNT. Rio de Janeiro. 2017.
- AZEVEDO NETTO, José M. D. et al. **Manual de Hidráulica**. 8ª. ed.
- BARBOSA, J. M. C. et al. **Modelagem computacional de transientes hidráulicos em ventosas de tríplice função e non slam considerando as curvas de admissão e expulsão de ar comerciais**. XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA - Anais do Evento – Trabajos Completos. Buenos Aires: [s.n.]. 2018. p. 259-269.
- BHATTACHARYYA, E. M.; SAIKIA, M. D.; DAS, M. M. Development of Numerical Model for Transients in pipe flow for Water Hammer situation and comparison of different friction equations for transient friction. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 3, p. 2995-3001, 2018.
- BOULOS, P. F. et al. Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. **American Water Works Association**, v. 97, n. 5, p. 111-124, 2005.
- BRASIL. **Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF. 1988.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico.** Brasília, DF. 2020. Diário Oficial da União: seção 1, ed. 135, p. 1-10, 16 jul. 2020.

BRASIL. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021.** Brasília, DF. 2021.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) - Custos e Índices de Minas Gerais.** Brasília. 2025.

CAMPOS, R. M. **Pagamento por serviços ambientais hídricos em áreas de interesse para a proteção de mananciais no município de Nova Friburgo - RJ.** Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2024.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. H. **Análise de Investimentos:** Matemática Financeira, Engenharia Econômica, Tomada de Decisão, Estratégia Empresarial.

CEMIG. **Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica - Subgrupo A4.** [S.l.]. 2026.

CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients.** 3ª. ed.

COLEBROOK, C. F. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. **Journal of the Institution of Civil Engineers**, v. 11, n. 4, p. 133-156, 1939.

CORRÊA, D. M. **Abastecimento de água:** fundamentos e aplicações.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANITÁRIA DA USP (PHA-USP). **TuboCalc:** software para cálculos hidráulicos.

DIAGNÓSTICO TEMÁTICO – SERVIÇOS DE ÁGUA E ESGOTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2022.** Brasília. 2024.

DUAN, H. F. Uncertainty Analysis of Transient Flow Modeling and Transient-Based Leak Detection in Elastic Water Pipeline Systems. **Water Resources Management**, v. 29, n. 14, p. 5413-5427, 2015.

FARIA, F. A. **Análise de Transientes Hidráulicos em Adutora por Recalque: Estudo de Caso.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2020.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Saneamento.** 4. ed. rev. ed.

- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de Água para Consumo Humano e Tratamento de Águas de Abastecimento**. 2. ed.
- JUSTINIANO, Eustácio D. S. **Projeto de Dispositivos de Proteção numa Estação Elevatória (estudo numérico)**. Universidade NOVA de Lisboa. Caparica. 2022.
- LESSA, Roberto C. **Transientes hidráulicos em sistemas complexos de adução de água**. Escola de Engenharia de São Carlos (USP). São Carlos. 1984.
- LIMA, E. G. F. S. **Adutoras de água bruta e de água tratada**. Universidade Federal do Paraíba. João Pessoa. 2009.
- MACINTYRE, Archibald J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. ed.
- MATTIELLO, J. Z. **Análise de ocorrência de transientes hidráulicos em um sistema de adução de água no modelo Mike Urban**. [S.l.]. 2017.
- MENDES, Tonny J. R. **Análise do Ciclo de Vida do Ativo de Captação de Água de Fervença, com Ênfase na Vertente do Consumo Energético**. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC). Coimbra. 2023.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York. 2015.
- PAIVA, B. A. et al. Modelagem computacional do golpe de aríete em adutoras considerando a cavitação no fluido com a fração de vazio. **Revista DAE**, São Paulo, v. 69, n. 333, p. 217-228, 2020.
- PARMAKIAN, J. **Waterhammer Analysis**.
- PORTO, R. D. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**.
- ROSSMAN, L. A. **EPANET 2: users manual**.
- SILVA, J. F. F.; VIEIRA, J. M. P.; HAIE, N. Dimensionamento Optimizado de Sistemas Adutores Elevatórios de Água Uma ferramenta essencial para o planeamento e gestão dos sistemas de abastecimento de água. **Engenharia Civil – UM**, p. 16, 2003.

SILVA, Maureen C. P. D. **Análise comparativa de dispositivos de proteção contra transitórios hidráulicos para diferentes materiais de tubulação e configurações geométricas do sistema.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba. 2026.

SIMÕES, André L. A.; SCHULZ, Harry E.; PORTO, Rodrigo D. M. **Métodos computacionais em hidráulica.**

SOARES, A. K.; COVAS, D. I. C.; CARRIÇO, N. J. G. Transient Vaporous cavitation in viscoelastic Pipes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 50, n. 2, p. 228-235, 2012.

SOUSA, Alisson G. **Aplicação do método das características para estudo de transiente hidráulico.** Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2023.

SOUZA, A. F. S.; SOARES, W. F. **Estudo de caso no abastecimento de água do município de Belém nas localidades administrativas UniNorte e UniSul – utilizando métodos de pesquisa de vazamentos, detecção e retirada de irregularidades.** Belém. 2023.

TASSINARI, L. C. S. **Transientes hidráulicos em sistemas de bombeamento: influência do material do conduto e dispositivo de proteção.** [S.l.]. 2017.

TONIN, Marcos R. **Análise Do Golpe De Aríete: Estudo de caso para a adutora de água bruta do sistema Capim Branco em Uberlândia/MG.** Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Uberlândia. 2024.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água.** 3ª. ed.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO. **Roteiro para cadastramento do sistema de abastecimento de água da UFOP.** Ouro Preto. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO. **OFÍCIO Nº 2/2023/PRECAM/REITORIA/UFOP: Avaliação Preliminar do Sistema Principal de Abastecimento de Água do Campus Morro do Cruzeiro da UFOP em Ouro Preto/MG.** Ouro Preto. 2023.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. **Allievi: Manual Técnico.**

ZHU, Y. et al. Experimental and numerical study on transient air–water mixing flows in viscoelastic pipes. **Journal of Hydraulic Research**, p. 1-11, 2018.

