



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL

Marlon Fontana Golz

**Otimização de custos de projetos hidráulicos de água fria: uma abordagem
com programação linear inteira binária**

Florianópolis
2025

Marlon Fontana Golz

**Otimização de custos de projetos hidráulicos de água fria: uma abordagem
com programação linear inteira binária**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Produção Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil com habilitação em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Mayerle

Florianópolis

2025

Golz, Marlon Fontana

Otimização de custos de projetos hidráulicos de água fria : uma abordagem com programação linear inteira binária / Marlon Fontana Golz ; orientador, Sérgio Fernando Mayerle, 2025.

119 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Produção Civil, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

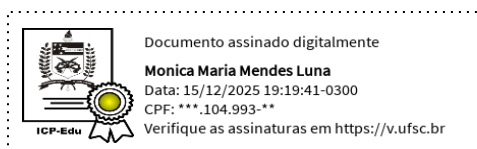
1. Engenharia de Produção Civil. 2. Otimização de custos. 3. Programação linear inteira binária. 4. Redes hidráulicas prediais. I. Mayerle, Sérgio Fernando. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Civil. III. Título.

Marlon Fontana Golz

Otimização de custos de projetos hidráulicos de água fria: uma abordagem com programação linear inteira binária

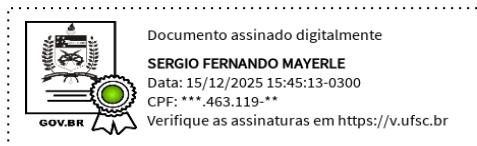
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil com habilitação em Engenharia de Produção e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Produção Civil.

Florianópolis, 15 de dezembro de 2025.



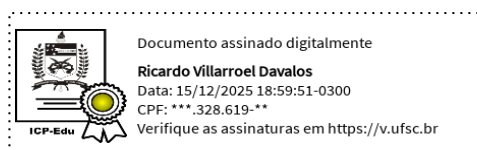
Coordenação do Curso

Banca examinadora



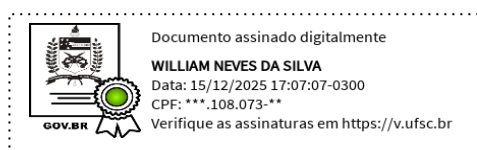
Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.

Orientador



Prof. Ricardo Villarroel Dávalos, Dr.

Instituição UFSC



William Neves da Silva, Doutorando

Instituição UFSC

Florianópolis, 2025.

Dedico este trabalho a minha família,
amigos e professores que me trouxeram
até este momento.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos são primeiramente destinados aos meus pais, Nivaldo e Nelci, que foram de extrema importância para que fosse possível concluir esse sonho, sendo a base fundamental durante toda a jornada.

Agradeço ao professor Sérgio Fernando Mayerle pela ajuda na orientação e realização deste trabalho, além das disciplinas ministradas durante o curso, onde tive o prazer de aprender conteúdos importantíssimos para a minha formação, que serviram de inspiração e foram utilizados neste trabalho.

Fica meu muito obrigado ao secretário Alexandre, que por diversas vezes aconselhou os alunos dos cursos de Engenharia de Produção nas mais diversas situações, e sempre foi extremamente solícito para resolver quaisquer questões relacionadas ao curso.

RESUMO

No contexto da construção civil brasileira, a otimização de custos desempenha um papel fundamental para a viabilidade dos empreendimentos, especialmente em habitações de interesse social. O dimensionamento de redes hidráulicas prediais de água fria é tradicionalmente realizado por métodos conservadores que podem resultar em superdimensionamento e custos desnecessários. Este trabalho tem como objetivo desenvolver e aplicar um modelo matemático de otimização focado na minimização do custo de materiais de redes de água fria, por meio de um estudo de caso em um edifício residencial. Para tanto, foi utilizada uma abordagem híbrida implementada em Python, combinando a Programação Linear Inteira Binária (PLIB) para a seleção global de diâmetros e um pós-processamento heurístico para o ajuste fino das não-linearidades causadas pelas conexões de redução de diâmetro. A pesquisa foi conduzida através da aplicação da ferramenta em um projeto real de um edifício de seis pavimentos. Os resultados indicam que a solução otimizada alcançou uma economia de material entre 24,9% e 28,0% em comparação com o dimensionamento convencional. A análise dos histogramas de velocidade evidenciou que a economia provém da eliminação de folgas excessivas, enquanto a análise de sensibilidade demonstrou que o custo global é mais impactado pela restrição de pressão mínima do que pela de velocidade máxima. Conclui-se que a metodologia proposta resolve de maneira eficaz a complexidade das redes ramificadas, garantindo a conformidade normativa com os custos otimizados. Portanto, a ferramenta desenvolvida consolida-se como um sistema de apoio à decisão, permitindo ao projetista quantificar o *trade-off* entre desempenho técnico e viabilidade econômica.

Palavras-chave: Otimização de Custos; Redes Hidráulicas Prediais; Programação Linear Inteira Binária (PLIB).

ABSTRACT

In the context of the Brazilian construction industry, cost optimization plays a fundamental role in the feasibility of projects, especially in social interest housing. The design of building cold water supply networks is traditionally performed using conservative methods that can result in oversizing and unnecessary costs. This work aims to develop and apply a mathematical optimization model focused on minimizing material costs for cold water networks through a case study in a residential building. To this purpose, a hybrid approach implemented in Python was used, combining Binary Integer Linear Programming (BILP) for global diameter selection and heuristic post-processing for the fine adjustment of non-linearities caused by diameter-reducing couplings. The research was conducted by applying the tool to a real project of a six-story building. The results indicate that the optimized solution achieved material cost savings between 24.9% and 28.0% compared to the conventional design. The analysis of velocity histograms evidenced that the savings stem from the elimination of excessive slack, while the sensitivity analysis demonstrated that the global cost is more impacted by the minimum pressure constraint than by the maximum velocity one. It is concluded that the proposed methodology effectively resolves the complexity of branched networks, ensuring regulatory compliance with optimized costs. Therefore, the developed tool consolidates itself as a decision support system, allowing the designer to quantify the trade-off between technical performance and economic feasibility.

Keywords: Cost Optimization; Building Water Supply Networks; Binary Integer Linear Programming (BILP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de rede ramificada.....	41
Figura 2 – Exemplo de modelagem da rede hidráulica em 3d	56
Figura 3 – Rede hidráulica completa do edifício analisado	57
Figura 4 – Fluxograma etapas programa	59
Figura 5 – Resposta do programa para o caminho do ponto de consumo pt12	68
Figura 6 – Representação linhas com ângulo 0°.....	72
Figura 7 – Resultado comprimentos equivalentes trecho 14 da rede Figura 2	78
Figura 8 – Resultado cálculos hidráulicos e custos trecho 14 da rede Figura 2.....	80
Figura 9 – Resultado otimização rede Figura 2.....	93
Figura 10 – Cenário 1: Resumo comparativo entre solução ótima e orçamento manual	96
Figura 11 – Cenário 1: Comprimento total de tubos por diâmetro.....	97
Figura 12 – Cenário 1: Custo total por diâmetro.....	98
Figura 13 – Cenário 1: Distribuição das velocidades nos trechos da rede	99
Figura 14 – Cenário 1: Distribuição e estatísticas das margens de segurança	100
Figura 15 – Cenário 2: Resumo comparativo entre solução ótima e orçamento manual	101
Figura 16 – Cenário 2: Comprimento total de tubos por diâmetro.....	102
Figura 17 – Cenário 2: Custo total por diâmetro.....	103
Figura 18 – Cenário 2: Distribuição das velocidades nos trechos da rede	104
Figura 19 – Cenário 2: Distribuição e estatísticas das margens de segurança	105
Figura 20 – Cenário 3: Resumo comparativo entre solução ótima e orçamento manual	106
Figura 21 – Cenário 3: Comprimento total de tubos por diâmetro.....	107
Figura 22 – Cenário 3: Custo total por diâmetro.....	108
Figura 23 – Cenário 3: Custo total por diâmetro.....	109
Figura 24 – Cenário 3: Distribuição e estatísticas das margens de segurança	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Siglas de identificação aparelhos de consumo.....	55
Quadro 2 – Bibliotecas Python utilizadas no programa	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesos relativos nos pontos de utilização identificados em função do aparelho sanitário e da peça de utilização	23
Tabela 2 – Vazões máximas para tubos de PVC soldáveis	25
Tabela 3 – Regime de escoamento e número de Reynolds para condutos forçados	26
Tabela 4 – Rugosidades internas dos tubos (ε)	27
Tabela 5 – Valores do coeficiente (K) de perda de carga localizada.....	29
Tabela 6 – Comprimentos equivalentes para tubos lisos (m).....	30
Tabela 7 – Valor de vazão máxima em hidrômetros	32
Tabela 8 – Comparação entre diâmetros candidatos	84

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Vazão método pesos relativos	24
Equação 2 – Equação da continuidade	24
Equação 3 – Número de Reynolds.....	25
Equação 4 – Equação de Swamee-Jain	26
Equação 5 – Equação de Barr	26
Equação 6 – Equação de Darcy-Weisbach	28
Equação 7 – Expressão geral das perdas localizadas	29
Equação 8 – Coeficiente K para reduções bruscas de diâmetro	29
Equação 9 – Comprimentos equivalentes	30
Equação 10 – Perda de carga total	31
Equação 11 – Perda de carga hidrômetros	31
Equação 12 – Função objetivo Ninow (1980).....	41
Equação 13 – Restrição de comprimento dos tubos Ninow (1980).....	41
Equação 14 – Restrição de perda de carga máxima admissível Ninow (1980).....	41
Equação 15 – Restrição de não negatividade Ninow (1980).....	41
Equação 16 – Gradiente de câmbio Barrêto Júnior (2006)	43
Equação 17 – Função objetivo	48
Equação 18 – Restrição de seleção de um único diâmetro por trecho	48
Equação 19 – Restrição de perda de carga máxima admissível para cada ponto de consumo.....	48
Equação 20 – Restrição de diâmetro não crescente.....	49
Equação 21 – Restrição de variável binária	49
Equação 22 – Restrição de reduções inválidas.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Computer-Aided Design
CBC	COIN-OR Branch and Cut
CPVC	Policloreto de Vinila Clorado
DXF	Drawing Exchange Format
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
PLIB	Programação Linear Inteira Binária
PVC	Policloreto de Vinila
SPAF	Sistema Predial de Água Fria
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	SISTEMA PREDIAL DE ÁGUA FRIA (SPAF)	20
2.2	DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES DE ÁGUA FRIA	22
2.2.1	Determinação das vazões	23
2.2.2	Velocidade	24
2.2.3	Número de Reynolds	25
2.2.4	Fator de atrito	26
2.2.5	Perda de carga	27
2.3	SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL (SINAPI)	32
2.4	PESQUISA OPERACIONAL E MODELAGEM MATEMÁTICA	33
2.4.1	Programação linear	34
2.4.2	Programação linear inteira binária (PLIB)	35
2.4.3	Métodos Heurísticos	36
2.5	SOLVER CBC	37
2.6	PROJETOS APLICADOS DE OTIMIZAÇÃO EM HIDRÁULICA	38
2.7	SÍNTESE DO REFERENCIAL TEÓRICO	45
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	45
3.1	MODELO PROPOSTO	48
3.2	OBTENÇÃO DOS DADOS	51
3.3	EDIFÍCIO ANALISADO E ADAPTAÇÕES DO PROJETO PARA USO NO PROGRAMA	52
3.4	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE APOIO AO MODELO PROPOSTO	57
3.4.1	Leitura dos Arquivos de Entrada e Interpretação do Desenho	63
3.4.2	Atribuição dos pesos relativos	66
3.4.3	Construção dos caminhos do ponto de consumo ao reservatório	67

3.4.4	Somatório dos pesos relativos	69
3.4.5	Identificação e Classificação dos Tês	70
3.4.6	Processamento dos Joelhos (45° e 90°).....	71
3.4.7	Pressão estática e perda de carga máxima admissível	74
3.4.8	Escolha dos diâmetros candidatos	75
3.4.9	Cálculo dos comprimentos equivalentes	76
3.4.10	Cálculos hidráulicos	78
3.4.11	Determinação dos custos por diâmetro.....	81
3.4.12	Dimensionamento e precificação das reduções	82
3.4.13	Otimização do sistema	85
3.4.14	Orçamento manual e análise comparativa	90
3.4.15	Apresentação do resultado final.....	92
3.4.16	Parametrização de dados e flexibilidade do programa	94
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	95
4.1	CENÁRIO 1 - VELOCIDADE MÁXIMA DE 3 M/S E PRESSÃO MÍNIMA DE 1 M.C.A.	96
4.1.1	Cenário 1 - Análise de Custos e Distribuição de Diâmetros	96
4.1.2	Cenário 1 - Distribuição de Velocidades nos Trechos da Rede.....	98
4.1.3	Cenário 1 - Distribuição de Margens de Segurança.....	100
4.2	CENÁRIO 2 - VELOCIDADE MÁXIMA DE 2 M/S E PRESSÃO MÍNIMA DE 1 M.C.A.	100
4.2.1	Cenário 2 - Análise de Custos e Distribuição de Diâmetros	101
4.2.2	Cenário 2 - Distribuição de Velocidades nos Trechos da Rede.....	103
4.2.3	Cenário 2 - Distribuição de Margens de Segurança.....	104
4.3	CENÁRIO 3: VELOCIDADE MÁXIMA DE 2 M/S E PRESSÃO MÍNIMA DE 2 M.C.A.	105
4.3.1	Cenário 3 - Análise de Custos e Distribuição de Diâmetros	105
4.3.2	Cenário 3 - Distribuição de Velocidades nos Trechos da Rede.....	108
4.3.3	Cenário 3 - Distribuição de Margens de Segurança.....	109
4.3.4	Análise comparativa entre os 3 cenários.....	110
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	111
	APÊNDICE A – PLANILHAS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO.....	117
	ANEXO A – PLANILHAS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO	118
	ANEXO B – DADOS SINAPI	119

1 INTRODUÇÃO

No contexto da construção civil brasileira, a busca pela otimização de custos é um fator determinante para a viabilidade de qualquer empreendimento, adquirindo uma importância ainda maior quando se trata de habitações de interesse social (Moura, 2022). Em projetos desta natureza, onde o orçamento é rigorosamente controlado e o objetivo é maximizar o acesso à moradia para a população de menor renda, cada percentual de economia obtido sem o sacrifício da qualidade e da segurança pode significar a viabilização de mais unidades habitacionais ou a implementação de melhorias no projeto. Nesse cenário, o conhecimento detalhado sobre a composição de custos da obra torna-se uma ferramenta estratégica para a elaboração de políticas públicas e para a tomada de decisão em nível de projeto (Moura, 2022).

Em análises detalhadas sobre a composição de custos de habitações de interesse social no Brasil, por exemplo, o subsistema hidrossanitário (água fria, quente, esgoto e incêndio) demonstrou representar entre 4,07% e 4,53% do custo direto da construção da unidade habitacional (Moura, 2022, p. 90-95). Embora este percentual possa parecer modesto, em projetos de grande escala, como edifícios multifamiliares, a economia gerada pela otimização do uso de materiais nesta etapa pode alcançar valores financeiros expressivos. Dentro desse universo, o sistema predial de água fria (SPAF) é um dos mais críticos, sendo responsável por garantir o abastecimento contínuo e em condições adequadas de pressão e vazão, e o seu dimensionamento, governado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da NBR 5626:2020 (ABNT, 2020), envolve um complexo balanço entre o atendimento a rigorosos critérios técnicos e a busca pela viabilidade econômica, uma vez que a escolha dos diâmetros realizados durante o processo de dimensionamento impacta diretamente o custo de materiais como tubos e conexões (Júnior; Oliveira; Silva, 2023).

Tradicionalmente, o dimensionamento de projetos do SPAF é realizado por métodos iterativos, como o descrito na ABNT NBR 5626:1998 e com base na experiência do projetista (Creder, 2006). Essa abordagem, embora funcional, tende a produzir soluções conservadoras, onde diâmetros maiores que os estritamente necessários são adotados para garantir uma margem de segurança confortável em relação às pressões mínimas exigidas nos pontos de consumo (Júnior; Oliveira; Silva,

2023). Como apontado por Júnior, Oliveira e Silva (2023), a utilização de diâmetros superdimensionados, mesmo que tecnicamente aceitável, acarreta um aumento direto e desnecessário nos custos de aquisição dos materiais. Embora softwares especializados automatizem o dimensionamento do SPAF, ainda persiste uma lacuna quanto à otimização econômica. Conforme observado por Silva (2019), a utilização de um software especializado, em comparação com o uso de uma planilha para realizar os dimensionamentos, resultou em uma redução de 5% no comprimento total de tubos. Essa “economia” é atribuída, a recursos de modelagem geométrica, como a consideração dimensional das conexões implementado dentro do software. Contudo, tais ferramentas, em geral, não exploram sistematicamente o vasto espaço de combinações de diâmetros para encontrar a solução de custo global mínimo, focando primariamente na conformidade hidráulica da solução de dimensionamento.

A otimização de sistemas de abastecimento de água é um campo consolidado na literatura internacional, com uma vasta produção acadêmica focada principalmente em redes públicas de distribuição urbana. Mala-Jetmarova, Sultanova e Savic (2018), em uma revisão sistemática abrangente sobre o tema, catalogaram dezenas de modelos de otimização desenvolvidos nas últimas décadas, que variam desde a aplicação de métodos determinísticos, como a programação dinâmica, até o uso intensivo de meta-heurísticas e algoritmos evolutivos. Grande parte desses estudos valida suas metodologias aplicando-as em “redes de teste” padronizadas (*benchmark networks*), evidenciando que o foco predominante dessas pesquisas reside em redes malhadas de grande porte, típicas de sistemas de abastecimento de água municipais. No cenário nacional, Ninow (1980) desenvolveu um modelo matemático para a otimização destas redes, formulando o problema através da minimização do custo total das tubulações sujeito a restrições hidráulicas. Embora seu trabalho tenha estabelecido as bases para a aplicação da programação linear nesse contexto, sua aplicação se ateu a redes de abastecimento público, onde as perdas de carga localizadas causadas por conexões como joelhos e tês, têm impacto relativo menor em comparação às perdas por atrito ao longo de grandes extensões de tubulação. Entretanto, quando se transporta essa lógica para as redes prediais, que são caracterizadas por uma alta densidade de conexões e uma topologia ramificada, modelos que desconsideram ou simplificam excessivamente as perdas localizadas e as restrições construtivas das reduções de diâmetro tornam-se imprecisos, gerando uma lacuna específica que este trabalho busca preencher.

Diante deste contexto, este trabalho propõe a aplicação de técnicas de pesquisa operacional, especificamente a Programação Linear Inteira Binária (PLIB), em conjunto com heurísticas, para desenvolver um modelo matemático de otimização focado na minimização do custo de aquisição dos materiais que compõem o SPAF. O objetivo é criar uma ferramenta computacional que, partindo do desenho estruturado da rede do SPAF, realizado utilizando o software AutoCAD, de parâmetros técnicos e das equações de dimensionamento hidráulico disponíveis na literatura e normas, automatize o processo de dimensionamento do SPAF, a atribuição dos custos aos componentes e, em seguida, resolva o problema de otimização, buscando qual é a combinação de diâmetros para cada trecho de tubulação da rede que resulte no menor custo encontrado, ao mesmo tempo que satisfaça integralmente as restrições normativas de pressão mínima disponível nos pontos de consumo e velocidade máxima de escoamento da água nas tubulações. A ferramenta foi aplicada a um estudo de caso real de um edifício residencial de 6 pavimentos, com 50 unidades habitacionais no padrão do programa minha casa, minha vida, permitindo a comparação direta entre a solução otimizada encontrada pelo programa desenvolvido, e a solução de dimensionamento adotada pelo projetista responsável do SPAF do edifício, quantificando os ganhos econômicos e analisando os diferentes cenários de dimensionamento.

Para delimitar o escopo da pesquisa, algumas simplificações foram adotadas no modelo. O programa desenvolvido não considera o uso de válvulas redutoras de pressão, focando na otimização através da seleção de diâmetros. Não há distinção entre conexões soldáveis e roscáveis, sendo as conexões roscáveis aquelas utilizadas na ligação entre os aparelhos sanitários e os tubos da rede, que foram tratadas no modelo como se fossem soldáveis, sem considerar a diferença de custos entre elas. O modelo não contempla o uso de curvas, apenas joelhos de 45° e 90°. Os custos de instalação não são incorporados, focando-se apenas no custo de aquisição de materiais. E a principal limitação é que as perdas de carga e custos associadas as luvas ou buchas de redução são adicionadas e ajustadas no pós-processamento da solução, não fazendo parte diretamente da solução das equações de otimização. Por fim, o escopo não abrange a tubulação de abastecimento do reservatório, tratando apenas da rede hidráulica de distribuição entre a saída deste e os pontos de consumo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral propor um modelo matemático para a otimização de custos em projetos de sistemas prediais de água fria (SPAF).

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- a) Formular um modelo de otimização híbrido baseado em Programação Linear Inteira Binária (PLIB) para a seleção de diâmetros, integrando-o a uma abordagem heurística para o tratamento da complexidade das perdas de carga localizadas;
- b) Implementar computacionalmente o modelo proposto, desenvolvendo uma ferramenta capaz de automatizar o dimensionamento hidráulico e a resolução do problema de minimização de custos;
- c) Aplicar a ferramenta desenvolvida em um estudo de caso de um edifício real, comparando quantitativamente o desempenho econômico e técnico da solução otimizada frente ao dimensionamento convencional realizado por um projetista, e desta forma demonstrar a validade do modelo proposto.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando os conceitos de hidráulica predial e pesquisa operacional. O Capítulo 3 detalha a metodologia, incluindo a formulação matemática do modelo e a descrição do programa computacional desenvolvido. O Capítulo 4 discute os resultados obtidos com a aplicação do modelo ao estudo de caso, analisando três cenários com diferentes parâmetros técnicos. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões, as contribuições do trabalho, as limitações reconhecidas e as sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SISTEMA PREDIAL DE ÁGUA FRIA (SPAF)

O SPAF é um componente essencial das edificações, projetado para assegurar o fornecimento contínuo de água potável de forma segura e eficiente (Júnior, 2013). Esse sistema abrange desde a captação da água, que pode ocorrer diretamente da rede pública ou por meio de reservatórios, até a distribuição para os diversos pontos de consumo na edificação (Júnior, 2013). No Brasil, o dimensionamento e a instalação desses sistemas são regulamentados pela ABNT, por meio da NBR 5626, oferecendo diretrizes detalhadas para atender aos requisitos de desempenho e segurança do sistema (Creder, 2006).

Os principais elementos que compõem o SPAF incluem tubulações, reservatórios, válvulas e dispositivos de controle. A escolha dos materiais e diâmetros das tubulações é determinada pelas necessidades específicas da edificação e critérios normativos, considerando fatores como durabilidade, resistência à pressão e relação custo-benefício (Botelho e Junior, 2014). Cada um desses componentes possui uma função específica, e sua seleção e disposição influenciam diretamente a funcionalidade, durabilidade e custo. Na sequência estão descritos os principais elementos que compõem esse sistema:

- a) Reservatórios: são responsáveis pelo armazenamento de água, garantindo que a edificação tenha uma reserva suficiente para atender a demanda em períodos de interrupção do abastecimento (Creder, 2006). Eles podem ser elevados, quando posicionados acima dos pontos de consumo para garantir a pressão necessária pela gravidade, ou subterrâneos, usados para armazenar grandes volumes de água que, em seguida, são bombeados para o reservatório superior e posteriormente levada aos pontos de consumo (Creder, 2006). A NBR 5626 define requisitos mínimos de dimensionamento para reservatórios, considerando tanto a capacidade de armazenamento quanto a proteção contra contaminações (Creder, 2006).
- b) Tubulações: componente do sistema utilizado para transportar a água, e no contexto do SPAF, levam a água tanto do reservatório até os pontos de consumo, como torneiras e chuveiros, quanto na ligação entre a rede

pública de distribuição de água e os reservatórios (Botelho e Junior, 2014). A escolha do material das tubulações, como PVC e CPVC, depende de fatores como a resistência à pressão, durabilidade e custo-benefício (Creder, 2006). O dimensionamento das tubulações é um aspecto crítico, pois influencia diretamente a eficiência do sistema, a perda de carga e o consumo de materiais. Tubulações superdimensionadas podem resultar em aumento desnecessário de custos, enquanto tubulações subdimensionadas podem comprometer o desempenho e a pressão nos pontos de consumo (Botelho e Júnior, 2014; Júnior; Oliveira; Silva, 2023).

- c) Válvulas de controle: são componentes que permitem o controle do fluxo de água dentro do sistema, como registros de gaveta e registros de pressão, possibilitando o fechamento de ramais para manutenção ou em situações de emergência e para o controle da vazão de água em aparelhos como chuveiros (Júnior, 2013).
- d) Dispositivos de segurança: são empregados para evitar o retorno da água e proteger o sistema contra sobrepressão, como válvulas de retenção e válvulas redutoras de pressão, conforme recomendado pela NBR 5626:2020 (ABNT, 2020). Esses dispositivos, quando necessários, garantem a integridade do sistema e previnem danos aos componentes e riscos aos usuários (Júnior, 2013).
- e) Conexões e acessórios: permitem a conexão e o direcionamento das tubulações de forma que o traçado do sistema possa atender a todos os pontos do projeto, como pontos de consumo e reservatórios, são peças como joelhos de 45 e 90 graus, têes, buchas e luvas de redução (Júnior, 2013). A escolha adequada de conexões é essencial para minimizar perdas de carga e garantir que o fluxo de água seja eficiente. O uso de acessórios também influencia o custo e a complexidade de instalação, especialmente em projetos com alto número de pontos de consumo (Júnior, 2013).
- f) Aparelhos sanitários: são os pontos finais do sistema de água fria, como torneiras, chuveiros e bacias sanitárias, também conhecidos como pontos de consumo, sendo o ponto do sistema onde a água é utilizada pelo usuário (Creder, 2006). O dimensionamento do SPAF considera a quantidade, posição e a vazão desses aparelhos, assegurando que a

pressão e o volume de água atendam aos requisitos mínimos para o uso adequado, conforme previsto nas normas técnicas (Creder, 2006).

2.2 DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES DE ÁGUA FRIA

O dimensionamento das tubulações do SPAF é uma etapa fundamental para garantir o desempenho adequado da instalação, assegurando o fornecimento contínuo de água com vazões e pressões compatíveis com o funcionamento dos aparelhos sanitários e peças de utilização (Júnior, 2013).

A NBR 5626:2020, em seu item 6.14.1, estabelece que "o dimensionamento das tubulações do sistema de distribuição deve ser efetuado para promover o abastecimento de água com vazões e pressões conforme parâmetros de projeto" e que "o método adotado para a determinação das vazões de projeto deve ser convenientemente justificado nos elementos descritivos integrantes do projeto". Adicionalmente, o item 6.14.2 da mesma norma, indica que "a vazão de cálculo em cada trecho deve ser estabelecida mediante adoção de um método reconhecido ou devidamente fundamentado, seja ele empírico ou probabilístico" (ABNT, 2020, p.28).

Portanto embora a versão atual da norma conceda ao projetista a prerrogativa de escolher um método de cálculo, ela não detalha um procedimento específico. Por outro lado, a versão anterior da mesma norma, a NBR 5626:1998, apresenta em seu Anexo A um procedimento de dimensionamento detalhado e amplamente consolidado na prática da engenharia nacional, conhecido como o método dos pesos relativos (ABNT, 1998).

Considerando que a NBR 5626:2020 preconiza o uso de um "método reconhecido", e que o procedimento descrito na NBR 5626:1998 é um dos mais difundidos e aplicados no Brasil, este trabalho adotará a metodologia de dimensionamento presente no Anexo A da referida norma de 1998. Tal escolha se justifica não apenas por sua robustez e amplo reconhecimento no meio técnico, mas também pela consistência dos critérios de desempenho entre as duas versões da norma. Conforme aponta Melo (2022), os parâmetros hidráulicos fundamentais, como a pressão estática máxima de 400 kPa (40 mca), a pressão dinâmica mínima de 10 kPa (1 mca) nos pontos de consumo e a velocidade máxima de 3 m/s, permaneceram inalterados. Essa continuidade de critérios reforça a validade do método dos pesos

relativos como uma abordagem consagrada e em conformidade com as diretrizes da norma técnica vigente.

2.2.1 Determinação das vazões

A determinação das vazões do SPAF é um passo essencial no processo de dimensionamento hidráulico, pois influencia diretamente o cálculo de diâmetros de tubulação, pressões e perdas de carga (Júnior, 2013).

Segundo a NBR 5626:1998 (ABNT, 1998), o método dos pesos relativos é um método empírico que considera a experiência acumulada para determinação da vazão de utilização simultânea dos aparelhos sanitários, proporcionando uma estimativa mais realista das vazões para projetos convencionais. Para determinar a vazão de projeto pelo método dos pesos relativos, inicialmente devem ser verificadas as localizações dos pontos de consumo dentro do projeto, e para cada um destes aparelhos deve ser atribuído o seu respectivo peso relativo, a Tabela 1 apresenta os valores adotados para cada aparelho.

Tabela 1 – Pesos relativos nos pontos de utilização identificados em função do aparelho sanitário e da peça de utilização

Aparelho sanitário	Peça de utilização	Vazão de projeto (L/s)	Peso relativo
Bacia sanitária	Caixa de descarga	0,15	0,3
	Válvula de descarga	1,7	32
Banheira	Misturador (água fria)	0,3	1
Chuveiro ou ducha	Misturador (água fria)	0,2	0,4
Chuveiro elétrico	Registro de pressão	0,1	0,1
Lavadora de pratos ou de roupas	Registro de pressão	0,3	0,1
Lavatório	Torneira ou misturador (água fria)	0,15	0,3
Pia	Torneira ou misturador (água fria)	0,25	0,7
	Torneira elétrica	0,1	0,1
Tanque	Torneira	0,25	0,7
Torneira de jardim ou lavagem em geral	Torneira	0,2	0,4

Fonte: Adaptado da ABNT, 1998.

Posteriormente, para cada um dos trechos de tubulação, deve ser realizado o somatório dos pesos relativos de cada aparelho que aquele trecho deve atender, e então deve ser aplicada a equação 1 para determinar a vazão total do mesmo.

$$Q = 0,3 * \sqrt{\sum P} \quad (1)$$

Onde:

Q = Vazão estimada no trecho (L/s)

$\sum P$ = Somatório dos pesos relativos de todos os aparelhos alimentados pelo trecho considerado.

2.2.2 Velocidade

Segundo Batista e Coelho (2010), a equação de continuidade formulada através da lei de conservação de massa é a fórmula que relaciona a vazão com a velocidade do fluido e a área interna da seção transversal da tubulação, conforme apresentado na equação 2.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Onde:

V = Velocidade do fluido (m/s)

Q = Vazão (m³/s)

A = Área da seção transversal do tubo (m²)

A Tabela 2 apresenta os valores de vazão máxima para cada diâmetro de tubulação, para que a velocidade da água não seja superior a 3 m/s, conforme exigido pela NBR 5626:1998 (ABNT, 1998).

Tabela 2 – Vazões máximas para tubos de PVC soldáveis

Diâmetro externo (mm)	Espessura da parede (mm)	Diâmetro interno (mm)	Vazão máxima (m³/s)
20	1,5	17	0,0007
25	1,7	21,6	0,0011
32	2,1	27,8	0,0018
40	2,4	35,2	0,0029
50	3	44	0,0046
60	3,3	53,4	0,0067
75	4,2	66,6	0,0105
85	4,7	75,6	0,0135
110	6,1	97,8	0,0225

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.3 Número de Reynolds

O número de Reynolds (Re) é uma grandeza adimensional amplamente utilizada na hidráulica para caracterizar o regime de escoamento de um fluido em tubulações, que pode ser laminar, turbulento e de transição, os quais apresentam comportamentos distintos em termos de dissipação de energia e perda de carga (Baptista; Coelho, 2010). O número de Reynolds é obtido através da aplicação da equação 3.

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (3)$$

Onde:

Re = Número de Reynolds

V = Velocidade do fluido (m/s)

D = Diâmetro interno tubulação (m)

ν = Viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

A Tabela 3 apresenta os regimes de escoamento conforme o intervalo do número de Reynolds obtido.

Tabela 3 – Regime de escoamento e número de Reynolds para condutos forçados

Regime	Número de Reynolds
Laminar	$Re < 2000$
Transição	$2000 < Re < 4000$
Turbulento	$Re > 4000$

Fonte: Adaptado de Baptista; Coelho, 2010.

- a) Regime laminar: caracteriza-se por um movimento ordenado e paralelo das partículas do fluido. Nesse regime, a perda de carga é dominada pela viscosidade do fluido (Baptista; Coelho, 2010).
- b) Regime de transição: faixa intermediária em que o comportamento do escoamento do fluido varia entre laminar e turbulento (Baptista; Coelho, 2010).
- c) Regime turbulento: ocorre a mistura caótica das partículas do fluido, com maior dissipação de energia devido ao atrito interno, sendo este o regime predominante em sistemas hidráulicos prediais (Baptista; Coelho, 2010).

2.2.4 Fator de atrito

Segundo Baptista e Coelho (2010), o fator de atrito é um coeficiente adimensional utilizado no cálculo da perda de carga, as equações de Swamee-Jain (Eq. 4) e a equação de Barr (Eq. 5) são fórmulas explícitas para determinação do fator de atrito que apresentam boa precisão, desde que sejam respeitados os intervalos de valores em que as equações são válidas.

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

Válida para $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 1 \cdot 10^8$ e $1 \cdot 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 1 \cdot 10^{-2}$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,13}{Re^{0,89}} \right) \quad (5)$$

Válida para $Re > 1 \cdot 10^5$

Onde:

f = Fator de atrito

ε = Rugosidade interna do tubo (mm)

D = Diâmetro interno tubulação (mm)

Re = Número de Reynolds

A Tabela 4 apresenta os valores usuais de rugosidade interna das tubulações, que variam conforme o material utilizado.

Tabela 4 – Rugosidades internas dos tubos (ε)			
Características da tubulação	Rugosidade ε (mm)		
	Mínima	Usual	Máxima
Ferro galvanizado, fundido revestido	0,06	0,15	0,3
Ferro fundido, não revestido, novo	0,25	0,5	1
Ferro fundido com corrosão	1	1,5	3
Ferro fundido com depósito	1	2	4
Tubos de plástico - PVC	0,0015	0,06	-

Fonte: Adaptado de Lencastre (1996 apud Baptista; Coelho, 2010).

2.2.5 Perda de carga

A perda de carga é um fenômeno intrínseco ao escoamento de fluidos em tubulações, sendo representada pela energia dissipada devido ao atrito entre o fluido e as paredes da tubulação, bem como às interações moleculares dentro do próprio fluido (Júnior, 2013). A análise da perda de carga é fundamental para o dimensionamento de sistemas hidráulicos, uma vez que influencia diretamente na pressão disponível, na eficiência e no desempenho do mesmo (Baptista; Coelho, 2010).

A) Perda de carga distribuída

A perda de carga distribuída refere-se às perdas de energia que ocorrem devido ao escoamento do fluido ao longo do comprimento da tubulação, que são dependentes de variáveis como a rugosidade do material, vazão, o diâmetro da tubulação e a viscosidade (Júnior, 2013).

Conforme a NBR 5626:1998 (ABNT, 1998) a equação mais adequada para determinar o valor da perda de carga unitária, que multiplicada pelo comprimento da tubulação resulta na perda de carga distribuída, é a equação de Darcy-Weisbach, conhecida como equação universal da perda de carga (Eq. 6), pois esta é válida para determinar a perda de carga unitária em tubulações circulares de diferentes diâmetros e materiais.

$$J = f * \frac{1}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

Onde:

J = Perda de carga unitária

f = Fator de atrito

D = Diâmetro interno da tubulação (m)

V = Velocidade do fluido (m/s)

g = Aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

A equação universal (Eq. 6) depende da determinação do fator de atrito, que pode ser obtido através da equação de Swamee-Jain (Eq. 4) ou da equação de Barr (Eq. 5) apresentadas anteriormente, a depender dos valores relacionadas ao número de Reynolds e do fator ε/D obtidos para o trecho de tubulação em análise.

B) Perda de carga localizada

A perda de carga localizada é causada pelas conexões e acessórios presentes nos sistemas hidráulicos, como curvas, válvulas, reduções e registros, que geram turbulência no escoamento e dissipação de energia (Júnior, 2013). Para o SPAF, devido à alta densidade de conexões em relação ao comprimento das tubulações, a perda de carga localizada frequentemente se torna significativa, superando até mesmo a perda de carga distribuída em certos casos (Baptista; Coelho, 2010).

Baptista e Coelho (2010) apresentam dois métodos empregados na determinação das perdas de carga localizadas nas tubulações, sendo estas a

expressão geral das perdas de carga localizadas (Eq. 7) e o método dos comprimentos equivalentes (Eq. 9), como segue:

$$\Delta H = \frac{k \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad (7)$$

Onde:

ΔH = Perda de carga localizada (m)

k = Coeficiente de perda de carga

V = Velocidade do fluido (m/s)

g = Aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

Segundo Baptista e Coelho (2010), o coeficiente k depende do elemento que gera a perda de carga localizada e normalmente são obtidos experimentalmente, a Tabela 5 contém os valores do coeficiente k dos acessórios e conexões usualmente utilizados no SPAF.

Tabela 5 – Valores do coeficiente (K) de perda de carga localizada

Peça	k	Peça	k
Redução gradual	0,15 *	Tê de passagem direta	0,6
Cotovelo ou joelho de 45°	0,4	Tê de saída bilateral	1,8
Cotovelo ou joelho de 90°	0,9	Tê de saída de um lado	1,3
Curva 45°	0,2	Válvula de gaveta aberta	0,2
Curva 90°	0,4	Válvula globo aberta	10
Entrada de borda	1	Válvula de ângulo aberta	5
Entrada normal	0,5	* Relativo a maior velocidade	

Fonte: Adaptado de Baptista; Coelho, 2010 apud Netto; Alvarez, 1988

Segundo Azevedo Netto (2018), para reduções bruscas de diâmetro entre trechos consecutivos, a determinação do coeficiente K é realizada através da equação 8.

$$k = \frac{4}{9} * \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right) \quad (8)$$

Onde:

k = Coeficiente de perda de carga

A_2 = Área da seção transversal do tubo de maior diâmetro (montante) (m²)

A_1 = Área da seção transversal do tubo de menor diâmetro (jusante) (m²)

Conforme o método descrito na NBR 5626:1998 (ABNT, 1998), as perdas de carga localizadas geradas pelas conexões podem ser representadas por comprimentos de tubos do mesmo diâmetro e material, ou seja, existe um certo comprimento de tubulação que gera a perda de carga equivalente a perda de carga gerada pela conexão instalada. Esses comprimentos equivalentes são somados ao comprimento real da tubulação, e o valor total de comprimento (real + equivalente) obtido é multiplicado pela perda de carga unitária para determinar a perda de carga total do trecho em análise (Baptista; Coelho, 2010).

A Tabela 6 apresenta os comprimentos equivalentes adotados para tubos lisos, como plástico, para as peças e conexões usuais utilizadas SPAF.

Tabela 6 – Comprimentos equivalentes para tubos lisos (m)

Peças \ Diâmetros	20	25	32	40	50	60	75	85	110
Joelho 90°	1,1	1,2	1,5	2,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,3
Joelho 45°	0,4	0,5	0,7	1,0	1,0	1,3	1,7	1,8	1,9
Curva 90°	0,4	0,5	0,6	0,7	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Curva 45 °	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Tê passagem direta	0,7	0,8	0,9	1,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
Tê saída lateral	2,3	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3
Entrada normal	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0	1,5	1,6	2,0	2,2
Entrada de borda	0,9	1,0	1,3	1,8	2,3	2,8	3,3	3,7	4,0
Válvula de pé e crivo	8,1	9,5	13,3	15,5	18,3	23,7	25,0	26,8	28,6
Registro de gaveta	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0
Registro de globo	11,1	11,4	15,0	22,0	35,8	37,9	38,0	40,0	42,3

Fonte: Adaptado de Júnior (2013)

O comprimento equivalente total do trecho é obtido conforme a equação 9, dado pelo somatório dos comprimentos equivalentes de cada conexão, onde multiplica-se a quantidade de cada tipo de conexão pelo seu respectivo valor de comprimento equivalente (Baptista; Coelho, 2010).

$$Le = \sum(n * L_{eq}) \quad (9)$$

Onde:

L_e = Comprimento equivalente

n = Quantidade de peças do mesmo tipo

L_{eq} = comprimento equivalente respectivo (m)

A perda de carga total para cada trecho de tubulação é obtida através da equação 10, onde são somados os comprimentos real e equivalente, e multiplicados pela perda de carga unitária do trecho de tubulação em análise.

$$\Delta H = (L_r + \sum L_e) * J \quad (10)$$

Onde:

ΔH = Perda de carga total do trecho (m)

L_r = Comprimento real da tubulação (m)

$\sum L_e$ = Somatório dos comprimentos equivalentes (m)

J = Perda de carga unitária

C) Perda de carga localizada hidrômetros

Para determinação da perda de carga localizada gerada pelos hidrômetros, a NBR 5626:1998 (ABNT, 1998) em seu Anexo A, recomenda o uso da equação 11, os valores de vazão máxima são apresentados na Tabela 7.

$$\Delta H = (36 * Q)^2 * (Q_{m\acute{a}x})^{-2} \quad (11)$$

Onde:

ΔH = Perda de carga total do hidrômetro (kpa)

Q = Vazão da seção em análise (L/s)

$Q_{m\acute{a}x}$ = Vazão máxima do hidrômetro (m³/h)

Tabela 7 – Valor de vazão máxima em hidrômetros

$Q_{m\acute{a}x}$ = Vazão máxima do hidrômetro (m³/h)	Diâmetro nominal (mm)
1,5	20
3	20
5	20
7	25
10	25
20	40
30	50

Fonte: Adaptado da ABNT (1998).

2.3 SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL (SINAPI)

O Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) é uma ferramenta desenvolvida pela Caixa Econômica Federal em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (Caixa Econômica Federal, [2024]). Esse sistema tem como objetivo oferecer uma referência confiável para os custos de materiais, mão de obra e serviços na construção civil brasileira, sendo amplamente utilizado para orçamentação de obras públicas e privadas (Caixa Econômica Federal, [2024]). O relatório de preços do SINAPI é atualizado mensalmente, com os valores de custos dos insumos e serviços relacionados a construção civil para cada uma das 27 unidades federativas do Brasil, refletindo as flutuações temporais e regionais do mercado. Seus dados são considerados uma referência oficial para realização de orçamentos, especialmente para projetos financiados com recursos públicos (Caixa Econômica Federal, [2024]).

Segundo a Caixa econômica federal [2024], o sistema é utilizado como parâmetro para o planejamento e controle de custos, garantindo que os valores reflitam os preços praticados no mercado. A NBR 12721:2006, Norma de Avaliação de Custos Unitários e Índices da Construção Civil, reconhece o SINAPI como referência nacional para avaliações de custos e índices no setor, reforçando sua importância na padronização e controle de despesas na construção civil (ABNT, 2006).

Portanto, o SINAPI é uma fonte estratégica para o desenvolvimento de projetos que exigem um levantamento de custos preciso e atualizado, sendo adequado para a análise comparativa entre alternativas de dimensionamento de sistemas prediais, como é proposto neste trabalho. O uso desse sistema permitirá que

o estudo alcance resultados aplicáveis, refletindo as condições reais de mercado e viabilizando uma comparação fundamentada entre as alternativas de dimensionamento estudadas.

2.4 PESQUISA OPERACIONAL E MODELAGEM MATEMÁTICA

A pesquisa operacional pode ser definida como a abordagem científica para a tomada de decisões, buscando otimizar o projeto e a operação de sistemas complexos, especialmente em cenários de alocação de recursos escassos (Hillier; Lieberman, 2006). Sua metodologia é caracterizada por uma abordagem estruturada que começa com a definição clara do problema, coleta de dados relevantes e a formulação de um modelo matemático, que segundo Hillier e Lieberman (2006), é a representação abstrata e simplificada da realidade, construído para capturar a essência de um problema por meio de equações e inequações, que quando analisadas em conjunto, representam suficientemente bem o problema em análise. A sua estrutura é composta por três elementos fundamentais:

- a) Variáveis de decisão: são as incógnitas do problema, ou seja, as quantidades que precisam ser determinadas para se chegar à solução da otimização. Elas representam o que está sendo considerado no modelo.
- b) Função objetivo: expressão matemática linear que representa a medida de desempenho a ser otimizada (maximizada ou minimizada). Esta função é expressa em termos das variáveis de decisão e descreve o objetivo final da otimização.
- c) Restrições: correspondem a um conjunto de equações ou inequações lineares que descrevem as limitações do problema. Essas limitações podem ser decorrentes da disponibilidade de recursos, de exigências técnicas ou de outras condições que devem ser satisfeitas. Tipicamente, as variáveis de decisão também estão sujeitas a restrições de não-negatividade, indicando que não podem assumir valores negativos.

Uma vez que o modelo está formulado, o passo seguinte é encontrar uma solução que respeite as restrições impostas e otimize o resultado da função objetivo, o que geralmente envolve o uso de algoritmos computacionais (Hillier; Lieberman, 2006). Uma solução é dita ótima quando ela produz o melhor valor possível para a função objetivo dentro de todas as opções que satisfazem as restrições. Em

problemas de alta complexidade, onde encontrar a solução ótima é computacionalmente inviável, pode-se buscar uma solução subótima, que, embora não seja a melhor, é garantidamente próxima da ótima e satisfatória para o problema (Hillier; Lieberman, 2006). Este processo de modelagem e resolução forma a base para a aplicação de técnicas mais específicas, como a programação linear.

2.4.1 Programação linear

A programação linear é uma das mais importantes e difundidas ferramentas da pesquisa operacional, sendo um método matemático utilizado para otimizar a alocação de recursos limitados entre atividades concorrentes, com o objetivo de encontrar a melhor solução possível para um problema, seja maximizando um resultado desejado, como o lucro, produção, ou minimizando um esforço, como o custo ou o tempo de execução de um processo (Hillier; Lieberman, 2006).

A formulação de um problema de programação linear envolve a construção de um modelo matemático que abstrai a essência do problema real, conforme descrito no tópico anterior. A estrutura geral de um modelo de programação linear pode ser representada da seguinte forma (Hillier; Lieberman, 2006):

$$\text{Max (ou min): } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Sujeito a:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

e:

$$x_j \geq 0, \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n$$

Onde:

Z = Valor final da função objetivo.

$x_n = n$ variáveis de decisão.

$c_n = n$ coeficientes da função objetivo.

b_m = Quantidade disponível do recurso m .

a_{mn} = Quantidade do recurso m consumida por unidade da atividade n .

Conforme Hillier e Lieberman (2006), a aplicação da programação linear pressupõe a validade de quatro hipóteses fundamentais sobre o modelo, como segue:

- a) Proporcionalidade: a contribuição de cada atividade para a função objetivo e o consumo de recursos são diretamente proporcionais ao nível da atividade.
- b) Aditividade: o valor total da função objetivo e o consumo total de cada recurso são a soma das contribuições e consumos individuais de cada atividade.
- c) Divisibilidade: as variáveis de decisão podem assumir valores não inteiros (fracionários), desde que satisfaçam as restrições.
- d) Certeza: todos os parâmetros do modelo (c_n , a_{mn} , b_m) são constantes e conhecidos com total certeza.

Quando a hipótese da divisibilidade não é adequada para representar um problema, como em situações que envolvem decisões binárias “sim ou não”, ou a alocação de unidades indivisíveis, torna-se necessário recorrer a uma extensão da programação linear, como a programação linear inteira, que será abordada na próxima seção.

2.4.2 Programação linear inteira binária (PLIB)

Embora a programação linear seja uma ferramenta poderosa, a hipótese da divisibilidade, que permite que as variáveis de decisão assumam valores fracionários, nem sempre é adequada para todos os problemas. Em muitas situações práticas, as decisões não são contínuas, mas sim discretas, como selecionar um projeto, escolher uma localização ou, no contexto deste trabalho, selecionar um diâmetro específico para um trecho de tubulação, exigem que as variáveis assumam valores inteiros e, mais especificamente, binários (Hillier; Lieberman, 2006).

Um caso particular e de grande aplicabilidade da programação inteira é a PLIB. Neste tipo de modelo, que possui uma estrutura bastante semelhante com a programação linear convencional, composta por uma função objetivo e um conjunto de restrições lineares, tendo sua diferença fundamental nas variáveis de decisão, que

são restritas a assumir apenas dois valores: 0 ou 1. Essa característica torna a PLIB ideal para representar decisões do tipo "sim ou não".

Segundo Hillier e Lieberman (2006), o uso de variáveis binárias é inovador na formulação de modelos, permitindo representar uma vasta gama de problemas complexos. Por exemplo, em um problema de dimensionamento de tubulações, uma variável binária pode ser usada para decidir se um diâmetro específico deve ser selecionado para um trecho (valor 1 para "sim") ou não (valor 0 para "não"). Essa abordagem permite que o modelo escolha a opção que otimiza a função objetivo, respeitando as restrições técnicas do projeto.

Dessa forma, a PLIB supera a limitação da divisibilidade da programação linear, oferecendo um método matemático robusto para problemas que envolvem escolhas indivisíveis, sendo uma ferramenta essencial para a otimização de decisões discretas.

2.4.3 Métodos Heurísticos

Embora algoritmos exatos sejam capazes de encontrar a solução ótima garantida para diversos tipos de problemas de pesquisa operacional, nem sempre sua aplicação é viável. Segundo Hillier e Lieberman (2006), alguns problemas e seus modelos correspondentes apresentam uma complexidade computacional tão elevada, seja pelo tamanho ou pela natureza não linear, que torna proibitivo o tempo necessário para encontrar a solução ótima global.

Nessas situações, onde a busca pela otimalidade matemática se torna impraticável, a utilização de métodos heurísticos apresenta-se como uma alternativa eficaz. Um método heurístico pode ser definido como um procedimento projetado para encontrar uma solução viável de boa qualidade, que seja razoavelmente próxima da ótima, embora não ofereça a garantia matemática de otimalidade. O objetivo primordial passa a ser a obtenção de uma solução satisfatória de forma eficiente, permitindo lidar com problemas de grandes dimensões que seriam intratáveis, ou custosos de serem resolvidos por métodos exatos (Hillier; Lieberman, 2006).

Os métodos heurísticos geralmente operam como algoritmos iterativos de busca local. O processo inicia-se com uma solução viável experimental e, a cada iteração, realiza-se uma busca nas "vizinhanças" dessa solução para tentar encontrar uma alternativa que melhore o valor da função objetivo. O procedimento continua até

que não seja possível encontrar melhorias imediatas, convergindo para um ótimo local. Hillier e Lieberman (2006) destacam, contudo, que heurísticas simples podem ficar presas nesses ótimos locais, que podem estar distantes do ótimo global.

Para superar essa limitação, desenvolveram-se as meta-heurísticas, que são estratégias de nível superior que orientam e modificam os procedimentos de busca local para evitar que eles fiquem estagnados em ótimos locais. Exemplos clássicos incluem a busca tabu, o *simulated annealing* (têmpera simulada) e os algoritmos genéticos, que introduzem mecanismos para explorar de forma mais ampla o espaço de soluções viáveis (Hillier; Lieberman, 2006). No contexto deste trabalho, a abordagem heurística é empregada especificamente para lidar com as não linearidades introduzidas pelas perdas de carga localizadas nas reduções de diâmetro, onde partindo da solução otimizada pelo modelo PLIB, o algoritmo realiza ajustes iterativos incrementais, especificamente o aumento sequencial de diâmetros nos trechos críticos de menor bitola, buscando restaurar a viabilidade hidráulica dos caminhos que violam as restrições de pressão, minimizando o incremento de custo necessário para satisfazer as normas técnicas.

2.5 SOLVER CBC

Para a resolução das equações do modelo de PLIB desenvolvido neste trabalho, foi utilizado o programa COIN-OR Branch and Cut (CBC). Trata-se de um solver de código aberto de alto desempenho, projetado especificamente para solucionar problemas de programação inteira mista, categoria na qual se enquadram os problemas de PLIB (COIN-OR, 2005).

O CBC é parte do projeto COIN-OR (*Computational Infrastructure for Operations Research*), uma iniciativa que visa estimular o desenvolvimento de softwares de código aberto para a comunidade de pesquisa operacional. O solver foi escrito em C++ e é mantido por uma comunidade ativa de desenvolvedores, sendo seu principal arquiteto John J. Forrest (COIN-OR, 2005).

A principal característica do CBC é a implementação do algoritmo *branch and cut*, uma metodologia avançada para a solução de problemas de otimização inteira. Conforme explicado por Hillier e Lieberman (2006) em relação aos métodos de otimização, o algoritmo pode ser compreendido em duas etapas principais:

- a) *Branch* (ramificação): o método explora uma árvore de decisão. Ele começa resolvendo uma versão relaxada do problema, onde as variáveis binárias podem assumir valores fracionários. Se uma variável que deveria ser inteira (0 ou 1) resulta em um valor fracionário (ex: 0,7), o algoritmo cria dois novos subproblemas, denominados "ramos": um onde a variável é forçada a ser 0 e outro onde é forçada a ser 1. Esse processo de ramificação continua para todos os valores fracionários, criando uma árvore de busca por soluções.
- b) *Cut* (corte): para acelerar a busca e tornar o processo mais eficiente, o algoritmo adiciona "planos de corte". Estes são novas restrições matemáticas que "cortam" e eliminam partes do espaço de soluções que não contêm a solução ótima inteira, sem, no entanto, eliminar nenhuma solução viável. Isso ajuda a "apertar" o modelo, permitindo que a solução ótima seja encontrada mais rapidamente.

Embora tenha sido desenvolvido em C++, o CBC foi projetado para ser utilizado principalmente como uma biblioteca computacional que pode ser "chamada" por outras linguagens e ambientes de modelagem. Essa arquitetura flexível permite sua integração com diversas ferramentas, incluindo bibliotecas em Python (COIN-OR, 2005).

No contexto deste trabalho, a modelagem matemática do problema de otimização foi realizada em Python utilizando a biblioteca Pyomo, que funciona como uma interface de modelagem algébrica. Uma vez que as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições foram definidas no ambiente Pyomo, e o solver CBC é utilizado para executar o complexo processo de encontrar a solução ótima. A escolha do CBC para este projeto se justifica por ser uma ferramenta robusta, gratuita, especializada em problemas de otimização inteira e plenamente compatível com o ecossistema de programação em Python, o que o torna uma opção viável para o desenvolvimento deste trabalho.

2.6 PROJETOS APLICADOS DE OTIMIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

A otimização de sistemas hidráulicos por meio de métodos matemáticos é um campo de pesquisa consolidado, especialmente no que se refere às redes públicas de distribuição de água. Desde a década de 1980, um volume expressivo de

publicações científicas tem se dedicado a encontrar soluções que minimizem os custos de implantação, reabilitação e expansão dessas redes, que representam uma parcela significativa do custo de infraestrutura de uma cidade (Mala-jetmarova; Sultanova; Savic, 2018).

Uma extensa revisão da literatura, realizada por Mala-Jetmarova, Sultanova e Savic (2018), analisou mais de 120 publicações e demonstrou que a otimização de redes públicas de distribuição de água é um problema complexo. Inicialmente, os estudos aplicavam métodos de programação determinística, como a programação linear e a programação não linear, e com o avanço da capacidade computacional, as meta-heurísticas, como os algoritmos genéticos, tornaram-se dominantes por sua flexibilidade para lidar com a natureza não linear e de múltiplos objetivos do problema, como minimizar custos e, ao mesmo tempo, maximizar a confiabilidade do sistema ou a qualidade da água. O objetivo principal desses estudos é quase sempre a minimização do custo total do projeto, considerando variáveis de decisão como diâmetros de tubulações, localização e operação de bombas, válvulas e reservatórios (Mala-jetmarova; Sultanova; Savic, 2018).

Apesar do vasto campo de pesquisa, uma análise crítica da literatura revela uma lacuna metodológica importante. A grande maioria dos estudos de otimização de redes de distribuição de água utiliza modelos de redes de teste (benchmark networks) que são, em sua essência, “esqueletizados”, ou seja, focam nas linhas de transmissão principais e “excluem linhas de distribuição local” (Mala-jetmarova; Sultanova; Savic, 2018, p. 3). A razão para essa exclusão, conforme apontado pelos autores, é que a inclusão dessas tubulações secundárias, com sua alta densidade de ramificações e conexões, “aumenta drasticamente a dimensão do problema e, conseqüentemente, o tempo computacional” (Mala-jetmarova; Sultanova; Savic, 2018, p. 3).

Essa simplificação, embora compreensível para a escala de redes municipais, resulta em uma escassez de modelos de otimização dedicados a sistemas que são, por natureza, altamente ramificados, onde as perdas de carga localizadas são relevantes para a análise e formulação dos modelos. Essa lacuna metodológica é particularmente relevante para o escopo deste trabalho, visto que o SPAF se enquadra precisamente na categoria de redes com maior densidade de ramificações e conexões, que foram historicamente negligenciadas em favor de modelos “esqueletizados”. A carência de abordagens detalhadas para o dimensionamento de SPAF justifica, portanto, o desenvolvimento da solução proposta nesta pesquisa. que

enfrentam a complexidade inerente a essas redes para buscar um equilíbrio entre o custo e desempenho técnico.

a) Projetos de otimização aplicados ao sistema de distribuição de água

No cenário nacional, um dos trabalhos pioneiros na aplicação da pesquisa operacional em projetos hidráulicos foi a dissertação de Ninow (1980), que propôs um modelo matemático de programação linear para minimizar o custo de instalação de redes de abastecimento de água do tipo ramificada. O objetivo do modelo era determinar, para cada trecho da rede, qual combinação de comprimentos de tubos de diâmetros comerciais resultaria no menor custo total, satisfazendo as restrições de demanda e pressão, a formulação matemática do problema, conforme apresentada por Ninow (1980), é a seguinte:

Definições:

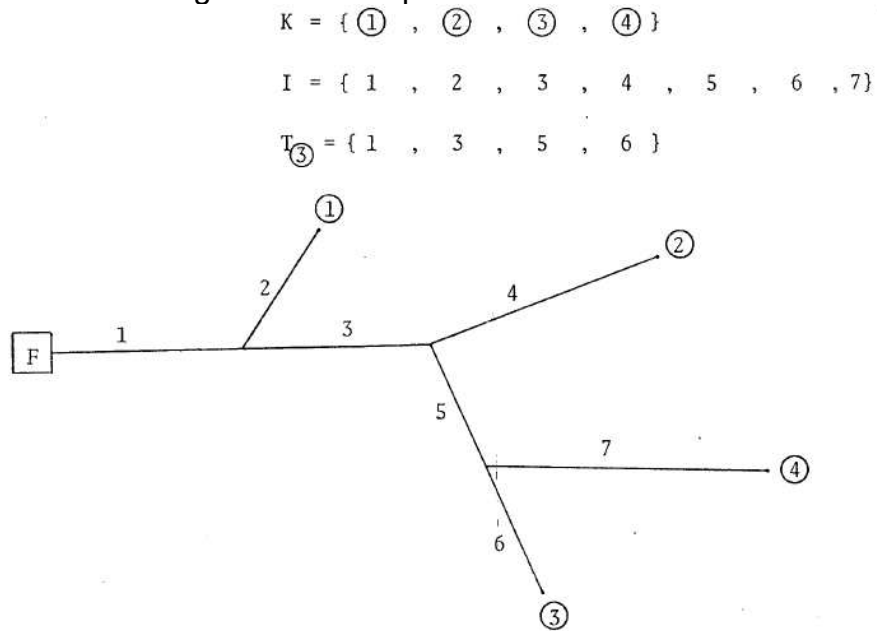
K = O conjunto de todos os pontos de demanda.

$\forall k \in K = T_k$ é o conjunto formado por todos os trechos que unem a fonte ao ponto de demanda k .

I = O conjunto de todos os trechos.

A Figura 1 apresenta o modelo de uma rede ramificada para exemplificar os parâmetros definidos acima:

Figura 1 – Exemplo de rede ramificada



Fonte: Ninow (1980, p. 30)

Função objetivo:

$$\text{Min } z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in G(i)} C_{ij} * X_{ij} \quad (12)$$

Sujeito a:

Comprimento atribuído ao trecho deve ser igual comprimento total do mesmo:

$$\sum_{j \in G(i)} X_{ij} = X_i \quad \forall i \in I \quad (13)$$

Perda de carga acumulada no caminho entre a fonte e o ponto de consumo deve ser inferior a máxima admissível:

$$\sum_{i \in T_k} \sum_{j \in G(i)} J_{ij} * X_{ij} < H_k \quad \forall k \in K \quad (14)$$

O comprimento de tubulação para todos os trechos deve ser maior que zero:

$$X_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I \quad \forall j \in G(i) \quad (15)$$

Onde:

 z = Custo total da tubulação. C_{ij} = Custo da tubulação de diâmetro j no trecho i . X_{ij} = Comprimento da tubulação de diâmetro j no trecho i .

H_k = perda de carga máxima admissível devido a fricção no caminho T_k .

$G(i)$ = conjunto de diâmetros admissíveis no trecho i .

J_{ij} = perda de carga unitária sofrida pelo tubo de diâmetro j no trecho i , para uma determinada vazão.

X_i = comprimento total do trecho i .

A principal contribuição de Ninow (1980) foi demonstrar que, mesmo desconsiderando as perdas de carga e os custos de conexões, a aplicação de um modelo de programação linear poderia gerar soluções economicamente mais vantajosas do que os métodos de dimensionamento tradicionais de redes de abastecimento de água do tipo ramificada na época. No entanto, o próprio autor reconhece como limitação do modelo a não inclusão das perdas de carga localizadas (peças como joelhos, tês e reduções) na formulação, uma simplificação que, embora válida para redes de distribuição pública com longos trechos retilíneos, torna-se um ponto crítico em redes prediais, que possuem alta densidade de conexões.

b) Projetos de otimização aplicados ao SPAF

Um dos artigos encontrados durante a realização deste trabalho que abordam as particularidades dos SPAF é a dissertação de Barrêto Júnior (2006), que aplicou o Método Granados para otimizar os custos das tubulações em um condomínio residencial multifamiliar.

Conforme descrito por Barrêto Júnior (2006), o Método Granados é um algoritmo iterativo baseado em programação dinâmica que visa a obtenção do custo mínimo em redes ramificadas sob condições hidráulicas definidas, como pressão mínima nos pontos de consumo e limites de velocidade máximas de escoamento da água. A abordagem se desenvolve em duas etapas principais:

- a) Obtenção da solução prévia: inicialmente, o método parte de uma solução onde as tubulações possuem os menores diâmetros comerciais possíveis que atendem ao critério de velocidade máxima e aos requisitos de pressão mínima disponíveis nos pontos de consumo, conforme a norma NBR 5626:1998 (ABNT, 1998). Para garantir as pressões, a cota piezométrica do reservatório é elevada de forma fictícia, até atingir a altura necessária

para que a pressão nos pontos de consumo seja maior que a mínima exigida.

- b) Redução da cota piezométrica: Em seguida, o método executa um processo iterativo para reduzir gradualmente a cota fictícia do reservatório até a cota real de projeto. A cada iteração, para compensar a perda de pressão estática, o algoritmo avalia a substituição de diâmetros em trechos da rede, selecionando para alteração do trecho que apresenta o menor gradiente de câmbio (Eq. 16). Este indicador matemático é definido pela razão entre o incremento de custo e o ganho hidráulico (redução de perda de carga) proporcionado pela troca do diâmetro, conforme a Equação 16:

$$câmbio [i] = \frac{(PRC_2[i]*L[i]-PRC[i]*L[i])}{hf [i]-hf_2 [i]} \quad (16)$$

Onde:

$L[i]$ = Comprimento do trecho de tubulação.

$PRC[i]$ = Custo unitário do diâmetro atual.

$PRC_2[i]$ = Custo unitário do diâmetro imediatamente superior.

$hf [i]$ = Perda de carga do diâmetro atual.

$hf_2 [i]$ = Perda de carga do diâmetro imediatamente superior.

Dessa forma, ao aplicar a Equação 16 de maneira iterativa, a cada passo o algoritmo escolhe matematicamente qual trecho de tubulação deve ter o aumento de diâmetro, priorizando aquele que oferece o maior benefício hidráulico pelo menor incremento no custo financeiro. A aplicação deste método no caso descrito por Barrêto Júnior (2006) resultou em uma economia de 12,39% no custo dos materiais (tubos e conexões) quando comparada ao dimensionamento convencional, evidenciando a eficácia do algoritmo para a otimização de projetos do SPAF.

- c) Comparação das abordagens apresentadas com a formulação desenvolvida neste trabalho

Ao confrontar a metodologia proposta neste trabalho com as abordagens de Ninow (1980) e Barrêto Júnior (2006), evidenciam-se avanços específicos tanto na formulação matemática quanto na precisão hidráulica do modelo.

Em relação a Ninow (1980), embora ambos utilizem técnicas de programação matemática para a otimização dos custos, o modelo original de programação linear contínua permitia que um mesmo trecho de tubulação fosse composto por frações de tubos de diferentes diâmetros, visto que esta é uma variável de decisão contínua de comprimento do modelo, o que é construtivamente indesejável em redes prediais de pequena escala. O presente trabalho avança ao adotar a PLIB, modelando a escolha do diâmetro como uma variável binária, garantindo que cada trecho seja executado com um único diâmetro comercial. Além disso, Ninow (1980) explicitamente desconsidera as perdas de carga localizadas, uma simplificação aceitável para adutoras longas das redes de distribuição de água, mas crítica para a precisão em redes do SPAF.

Já em comparação com Barrêto Júnior (2006), a distinção reside na natureza do algoritmo e no tratamento das singularidades hidráulicas. Enquanto o Método Granados opera através de uma busca iterativa que toma decisões locais de troca de diâmetro baseadas no gradiente de câmbio (Eq. 16), a abordagem aqui desenvolvida utiliza um solver de otimização exata (CBC) para explorar o espaço de soluções de forma global na etapa linearizada. Porém, a diferença fundamental encontra-se no tratamento das reduções de diâmetro. Barrêto Júnior (2006) incorpora as perdas de carga associadas as reduções utilizando o método simplificado dos comprimentos equivalentes fixos, o que ignora a variação da perda de carga em função da severidade da redução.

Em contrapartida, este trabalho adota uma abordagem híbrida que modela o fenômeno físico real. Após a seleção global dos diâmetros via PLIB, a etapa heurística adiciona a perda de carga localizada exata utilizando o valor obtido pelas Equações 7 e 8, para cada par de diâmetros subsequentes escolhidos pela otimização. Isso permite que o modelo avalie com precisão o impacto hidráulico de reduções de diâmetro que podem surgir na busca pela máxima economia, garantindo uma solução que é, ao mesmo tempo, economicamente otimizada e hidráulicamente rigorosa,

superando as limitações de precisão inerentes aos métodos simplificados e às formulações lineares puras descritas nos trabalhos aqui apresentados.

2.7 SÍNTESE DO REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo estabeleceu as bases teóricas e conceituais indispensáveis para o desenvolvimento do modelo de otimização proposto. A fundamentação hidráulica apresentada, compreendendo os componentes do SPAF e o roteiro de dimensionamento normativo, fornece as equações necessárias para a determinação da perda de carga e as restrições de pressão mínima e velocidade máxima que serão consideradas no modelo. A escolha do SINAPI como referência assegura que a função objetivo de minimização de custos reflita a realidade do mercado da construção civil brasileira.

Do ponto de vista computacional, a revisão sobre pesquisa operacional foi crucial para definir a estratégia de resolução. O uso de PLIB, solucionada pelo solver CBC, foi selecionada por sua capacidade de garantir matematicamente a solução ótima global para o problema de seleção de diâmetros, superando a natureza iterativa e potencialmente subótima das abordagens heurísticas tradicionais encontradas na literatura. Os Métodos Heurísticos, por sua vez, são empregados de forma complementar apenas para o refinamento das não linearidades das perdas localizadas. Por fim, a análise crítica dos trabalhos correlatos confirmou a lacuna existente na otimização de redes prediais, validando a necessidade de uma metodologia que combine a exatidão da PLIB com o tratamento rigoroso das reduções de diâmetro, conforme será detalhado no capítulo a seguir.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho constitui uma pesquisa aplicada, pois seu propósito central é a geração de conhecimento para a solução de um problema prático e específico da engenharia: a otimização de custos do SPAF (Miguel, 2012). Para alcançar tal objetivo, adota-se uma abordagem quantitativa, que se baseia na mensurabilidade de variáveis para analisar o problema e testar hipóteses, sendo validado através de um estudo de caso real. Essa abordagem é indispensável, uma

vez que o estudo lida com dados numéricos objetivos, como custos, diâmetros, vazões e perdas de carga, que fundamentam toda a análise.

O procedimento técnico que ancora esta pesquisa é a modelagem matemática, que se alinha às etapas clássicas de um estudo de pesquisa operacional (Miguel, 2012). Conforme Hillier e Lieberman (2006), esse processo consiste em definir o problema, formular um modelo matemático que represente a realidade e, por fim, obter uma solução ótima a partir deste modelo para apoiar a tomada de decisão.

O rigor metodológico desta pesquisa se aprofunda na especificidade do modelo matemático empregado, classificado como um modelo de PLIB. A natureza do problema, ao desconsiderar inicialmente os custos e a perda de carga associados as reduções de diâmetros, se adequa perfeitamente a esta técnica, pois tanto a função objetivo (minimizar o custo total do sistema) quanto as restrições técnicas (limites de perda de carga e regras de monotonicidade) são expressas por meio de funções lineares. O elemento central do modelo reside na sua capacidade de representar decisões discretas: para cada trecho da tubulação, a decisão de qual diâmetro comercial selecionar, dentre um conjunto de opções, é representada por variáveis binárias que podem assumir apenas os valores 0 (não selecionado) ou 1 (selecionado). Essa formulação garante que a solução encontrada pelo otimizador para o problema simplificado seja não apenas a de menor custo, mas também uma que seja fisicamente executável, onde um, e apenas um, diâmetro é selecionado para cada trecho de tubulação da rede do SPAF.

Conforme delimitado na introdução deste trabalho, uma decisão metodológica crucial foi adotada para lidar com a não linearidade intrínseca da consideração dos custos e perdas de carga das luvas ou buchas de redução dentro das equações do modelo. A atribuição desses valores depende do par de diâmetros do trecho atual e do anterior, o que introduziria termos quadráticos, dados pelo produto de duas variáveis binárias (exemplo: $X_{i,d1} * X_{i,d2}$), na função objetivo e nas restrições de perda de carga caso fossem internalizados na formulação, elevando a complexidade computacional do problema. Para contornar isso, adotou-se uma abordagem metodológica híbrida:

- a) Otimização linear (PLIB): primeiramente, o modelo de PLIB é resolvido considerando apenas os custos e perdas de carga relacionados aos tubos, conexões (joelhos, tês), registros (gaveta e pressão) e hidrômetros, pois os custos e perdas de carga relacionados a estes componentes dependem

somente do diâmetro adotado para o trecho de tubulação em análise, tratando o problema de forma linearizada.

- b) Pós-processamento heurístico: em seguida, a solução ótima linearizada passa por uma rotina de pós-processamento. Esta rotina recalcula as perdas de carga totais para todos os caminhos, desde a saída do reservatório até cada ponto de consumo, adicionando as perdas de carga localizadas e os custos associados as reduções de diâmetro entre os pares de tubulações subsequentes que foram escolhidas pela solução do PLIB. Caso algum caminho se torne hidráulicamente inviável, ou seja, com a pressão disponível no ponto de consumo abaixo da mínima, uma heurística de reparo é ativada, buscando iterativamente o primeiro trecho de menor diâmetro do caminho, ou seja, aquele onde a solução do modelo de PLIB adotou a última redução de diâmetro antes de chegar no ponto de consumo, aumentando o diâmetro deste trecho, o que reduz a perda de carga acumulada do caminho. A heurística então recalcula os custos e perdas de carga das novas reduções que podem surgir a montante e a jusante do trecho de tubulação modificado, repetindo essa rotina até que a restrição de pressão mínima seja novamente satisfeita.

Para operacionalizar este modelo, o trabalho foi estruturado em um fluxo de procedimentos bem definido, que se inicia com a extração e interpretação de dados geométricos de um arquivo de desenho assistido por computador (CAD). Em seguida, o software desenvolvido em linguagem Python executa os cálculos de dimensionamento hidráulico da rede do SPAF estruturada no desenho, e atribui os custos dos componentes associados a cada trecho de tubulação, para todas as alternativas de diâmetros que serão atribuídas ao mesmo, utilizando como referência dados extraídos do SINAPI (Anexo B). Com estes parâmetros, o modelo de PLIB é formulado computacionalmente por meio da biblioteca Pyomo e resolvido com o solver CBC, e a solução ótima do modelo é então ajustada pela heurística para a consideração dos custos e perdas de carga associadas as reduções de diâmetro entre tubos subsequentes. Por fim, os resultados do custo da solução otimizada são analisados e comparados com o dimensionamento convencional, validando a eficácia da metodologia proposta.

3.1 MODELO PROPOSTO

O objetivo desta formulação é transformar o problema de dimensionamento do SPAF, com suas regras, custos e variáveis físicas, em um sistema de equações lineares que pode ser resolvido computacionalmente. Em sua essência, o modelo busca responder à seguinte pergunta: Qual combinação de diâmetros comerciais para cada trecho da tubulação resulta no menor custo total de aquisição dos materiais, garantindo ao mesmo tempo que todas as exigências de pressão mínima nos pontos de consumo e velocidade máxima de escoamento nas tubulações sejam rigorosamente atendidas?

Para isso, o problema é estruturado como um modelo de PLIB, composto por uma função objetivo a ser minimizada (o custo total) e um conjunto de restrições que representam as limitações técnicas e normativas do sistema, como segue:

$$\text{minimizar } z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} C_{ij} * X_{ij} \quad (17)$$

Onde:

N = Número total de trechos de tubulação

M_i = Número de diâmetros disponíveis para o trecho i

C_{ij} = Custo total (tubulação + conexões) do diâmetro j no trecho i

X_{ij} = Variável binária de decisão (0 ou 1) para o diâmetro j no trecho i

Sujeito as seguintes restrições:

Restrição de seleção de um único diâmetro por trecho:

$$\sum_{j=1}^{M_i} X_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (18)$$

Restrição de perda de carga máxima admissível para cada ponto de consumo:

$$\sum_{i \in P_k} \sum_{j=1}^{M_i} H_{ij} * X_{ij} \leq H_{max,k} \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (19)$$

Onde:

P_k = Conjunto de trechos no caminho do reservatório até o ponto de consumo k

H_{ij} = Perda de carga total no trecho i com diâmetro j

$H_{max,k}$ = Perda de carga máxima admissível para o ponto de consumo k

k = Número total de pontos de consumo

Restrição de diâmetro não crescente:

$$\sum_{j=1}^{M_i} D_j * X_{ij} \leq \sum_{j=1}^{M_{i-1}} D_j * X_{(i-1)j} \quad \forall i = 2, \dots, N \quad (20)$$

Onde:

D_j = valor do diâmetro j

Restrição de variável binária:

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall j = 1, \dots, M_i \quad (21)$$

Restrição de reduções inválidas:

$$X_{(i-1),J1} + X_{i,J2} \leq 1, \quad \forall i \in T, \quad \forall (J1, J2) \in P_{inv i} \quad (22)$$

Onde:

$X_{(i-1),J1}$ = Variável de decisão binária que indica se o diâmetro de índice $J1$ é escolhido para o trecho a montante $(i - 1)$.

$X_{i,J2}$ = Variável de decisão binária que indica se o diâmetro de índice $J2$ é escolhido para o trecho a jusante (i) .

T = Conjunto de todos os trechos da rede, exceto o primeiro onde está localizada a saída do reservatório, pois este não possui um trecho a montante.

$P_{inv i}$ = Conjunto de todos os pares de índices de diâmetros $(J1, J2)$ que correspondem a uma redução comercialmente inválida entre o trecho a montante $(i - 1)$, e o trecho a jusante (i) , conforme o pré-processamento dos dados.

A formulação matemática apresentada pode ser compreendida através da lógica de seus três componentes fundamentais: as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições, como segue:

- a) Variáveis de decisão (Eq. 21): o cerne do problema é a escolha dos diâmetros. Para cada trecho de tubulação (i) , existe um conjunto de diâmetros comerciais disponíveis (j) . A variável binária X_{ij} representa essa decisão, assumindo o valor 1 se o diâmetro j for escolhido para o trecho i , e 0 caso contrário. O uso de variáveis binárias é o que classifica o modelo

como "inteiro binário", sendo o mecanismo que permite ao computador "testar" as diferentes combinações de diâmetros possíveis.

- b) Função objetivo (Eq. 17): o objetivo do modelo é minimizar o custo total, e para isso, a função objetivo soma os custos de todas as escolhas de diâmetros feitas. Como para cada trecho i apenas uma variável X_{ij} será igual a 1, a função soma exatamente o custo C_{ij} de cada diâmetro efetivamente selecionado, resultando no custo total da configuração da rede.
- c) Restrição de seleção única (Eq. 18): é a regra mais fundamental da lógica do modelo. Ela garante que, para cada trecho de tubulação, exatamente um diâmetro seja escolhido. Sem ela, o modelo poderia escolher nenhum diâmetro ou vários para o mesmo trecho, o que não faria sentido físico.
- d) Restrição de perda de carga (Eq. 19): esta é a principal restrição hidráulica. Ela assegura que a soma de todas as perdas de carga ao longo de qualquer caminho do reservatório até cada ponto de consumo não ultrapasse o valor máximo permitido, que é dado pela diferença entre a pressão estática e a pressão mínima exigida para o ponto de consumo. Na prática, isso garante que haverá pressão superior a mínima em todos os pontos de consumo para que funcionem adequadamente, conforme exigido pela norma NBR 5626:1998 (ABNT, 1998).
- e) Restrição de monotonicidade (Eq. 20): esta restrição impõe uma regra de boa prática da engenharia hidráulica: o diâmetro dos tubos deve diminuir ou se manter constante no sentido do fluxo de água. Ela impede que o modelo gere soluções que não condizem com a boa prática de projetos desta natureza, como a instalação de um tubo com diâmetro menor antes de um maior.
- f) Restrição de reduções inválidas (Eq. 22): esta é uma restrição de viabilidade construtiva, garantindo que, se a combinação do diâmetro de índice $J1$ no trecho $(i - 1)$ com o diâmetro de índice $J2$ no trecho (i) for inválida (ex: 60 para 20mm), as duas variáveis binárias correspondentes não podem ser ambas iguais a 1 na solução final. Como cada trecho deve ter exatamente um diâmetro selecionado, a única forma de a soma ser maior que 1 seria se ambas as variáveis fossem 1. Ao limitar a soma a 1,

o modelo proíbe efetivamente a escolha simultânea dessa combinação específica, forçando o otimizador a encontrar uma solução que utilize apenas transições de diâmetro construtivamente viáveis.

Em conjunto, essas equações formam um sistema robusto que descreve completamente o problema. Uma vez formulado e carregado com os dados de custos e perda de carga para cada opção de diâmetro de cada trecho de tubulação, o modelo é entregue ao solver CBC, que busca as combinações possíveis e encontra a única solução que satisfaz todas as restrições com o menor custo possível, que posteriormente é ajustada pela heurística, com os valores de custos e perdas de carga das reduções necessárias para viabilizar a execução da rede do SPAF.

3.2 OBTENÇÃO DOS DADOS

A robustez de um modelo de otimização depende diretamente da qualidade e da precisão dos dados que o alimentam. Para este trabalho, os dados de entrada foram coletados de quatro fontes distintas: dados geométricos do projeto, dados de custos de mercado, parâmetros técnicos e equações da literatura.

O ponto de partida do processo é a análise geométrica da rede hidráulica. O programa desenvolvido foi projetado para ler e interpretar diretamente um arquivo do autocad no formato .dxf, onde foi realizado um desenho com linhas em 3D conectadas sequencialmente e textos, que quando interpretados em conjunto, representam todos os tubos e componentes presentes na estrutura do SPAF do projeto, desde a saída o reservatório superior até a conexão com todos os pontos de consumo, conforme será detalhado no tópico 3.3. A partir das coordenadas (x,y,z) iniciais e finais das linhas, das coordenadas e o conteúdo dos textos presentes no desenho, o software identifica automaticamente os trechos de tubulação, seus comprimentos, tipos de conexões, registros, hidrômetros, a localização exata dos pontos de consumo e do reservatório dentro do desenho rede.

Para o levantamento dos custos, foi utilizada como referência oficial a base de dados do SINAPI. Especificamente, foram extraídos os valores do relatório de "Insumos e Composições - Não Desonerado" para o estado de Santa Catarina, referente ao mês de dezembro de 2024, e desta base foram selecionados os custos unitários dos tubos e conexões de PVC soldável para os diâmetros comerciais de 20 mm a 110 mm, além dos custos de hidrômetros, registros de pressão e de gaveta,

luvas e buchas de redução, que foram utilizados na atribuição dos custos dos componentes de cada trecho de tubulação identificado no desenho, para cada diâmetro comercial atribuído ao mesmo. A escolha do SINAPI garante que os custos utilizados na função objetivo do modelo reflitam a realidade do mercado da construção civil, conferindo alta credibilidade e aplicabilidade prática aos resultados da otimização.

Finalmente, os parâmetros técnicos necessários para os cálculos hidráulicos, como o coeficiente de rugosidade interna para tubos plásticos (ϵ), comprimentos equivalentes das conexões para o cálculo da perda de carga localizada, e todas as equações necessárias para realizar os dimensionamentos foram obtidos das referências bibliográficas na área de hidráulica citadas no capítulo 2 deste trabalho.

O programa, então, integra todas essas informações, com base nos dados da rede hidráulica obtidos do desenho, realiza o dimensionamento da rede hidráulica completa, determinando inicialmente a vazão em cada tubo pelo método dos pesos relativos, e com base no critério de velocidade máxima de escoamento da água nas tubulações, e seleciona para cada trecho de tubulação o diâmetro mínimo que atende a velocidade máxima e os dois diâmetros comerciais subsequentes como opções a serem testadas pelo programa, sendo realizados todos os cálculos de dimensionamento para determinar a perda de carga de cada diâmetro atribuído ao tubo. Além disso, o programa atribui a cada tubo da rede os custos dos componentes para cada diâmetro atribuído ao mesmo. Os valores das alternativas de diâmetro com seus respectivos custos e perdas de carga calculadas constituem os dados de entrada que alimentam o modelo de otimização descrito no tópico 3.1.

3.3 EDIFÍCIO ANALISADO E ADAPTAÇÕES DO PROJETO PARA USO NO PROGRAMA

Para a aplicação e validação do modelo proposto, foi selecionado como estudo de caso um projeto do SPAF de um edifício residencial multifamiliar em construção, localizado em São José – SC, cedido pela construtora do mesmo para realizar este trabalho. A edificação se enquadra no padrão do programa minha casa, minha vida, composta por 6 pavimentos, sendo o pavimento térreo destinado a garagens e dois salões de festas, e 5 pavimentos tipo com 10 apartamentos cada, possuindo cozinha, lavanderia e banheiro, totalizando 6 pontos de consumo por

apartamento. Em cada andar, 8 unidades são de um dormitório e 2 unidades de dois dormitórios, com uma área privativa média de 50 m² por apartamento, sendo um sistema hidráulico com uma demanda significativa e 307 pontos de consumo a serem atendidos.

Um dado geométrico do projeto de fundamental importância é a altura do edifício, o desnível entre o térreo e a base do reservatório superior é de aproximadamente 21 metros. Conforme a ABNT (2020, p. 22), no item 6.9.4 da NBR 5626, "a pressão estática nos pontos de utilização não pode superar 400 kPa (40 mca)", portanto, a altura do edifício em questão assegura o cumprimento deste requisito normativo em todos os andares, eliminando a necessidade de dispositivos redutores de pressão e permitindo uma análise direta da otimização da rede. A escolha deste edifício como objeto de estudo se justifica, portanto, por ele representar um cenário realista, cujas características permitem testar a eficácia e a robustez do modelo de otimização em um projeto real.

Para viabilizar a análise computacional do projeto hidráulico original do edifício, recebido em plantas bidimensionais (2D) em arquivo CAD, onde são apresentados os traçados da tubulação, e os diâmetros escolhidos pelo projetista da empresa no dimensionamento executado previamente por um profissional habilitado, necessitaram de uma fase de adaptação e modelagem. O objetivo deste processo foi "traduzir" a representação gráfica estática das plantas 2D do projeto em um modelo de dados tridimensional e orientado, que pudesse ser interpretado diretamente pelo software desenvolvido. Esta etapa foi crucial, pois as plantas em 2D, embora representem o traçado da rede hidráulica, não contêm a conectividade lógica e as informações necessárias para que o programa desenvolvido possa interpretar como a rede do SPAF do projeto é estruturada, sendo uma informação indispensável para realizar os cálculos de dimensionamentos hidráulicos.

O processo de adaptação consistiu na recriação da rede do SPAF do edifício em um desenho 3D dentro do software AutoCAD, onde cada trecho de tubulação apresentado nas plantas foi modelado como um objeto do tipo linha, com seu comprimento e posicionamento no espaço (coordenadas x, y, z) correspondendo exatamente ao projeto original. A principal diretriz da modelagem foi garantir a conectividade sequencial entre as linhas do desenho, ou seja, a coordenada final de uma linha sempre coincide com a coordenada inicial da linha seguinte, estabelecendo assim uma orientação clara do fluxo de água, pois a primeira linha do desenho é

inserida no ponto de saída de água do reservatório superior, sendo a única linha que não possui a coordenada inicial conectada com outra linha, e a sequência das linhas segue até atender todos os pontos de consumo, sendo as várias “linhas finais” da rede. Um cuidado fundamental durante este processo foi a utilização das ferramentas de restrição de ângulos do AutoCAD, garantindo que todas as linhas fossem desenhadas exclusivamente na vertical (eixo Z) ou em ângulos múltiplos de 45° (45, 135, 225, 315) e 90° (0, 90, 180, 270) no plano horizontal. Esta padronização da geometria foi essencial para que o software pudesse determinar com base nos dados extraídos do desenho os pontos onde estão localizados joelhos de 45° e 90°, tês de passagem direta e tês de saída lateral, conforme será detalhado nos tópicos 3.4.5 e 3.4.6, respectivamente.

Além da geometria, foi necessário atribuir informações para identificação dos elementos do desenho. Para isso, foram utilizados objetos do tipo texto, posicionados em locais estratégicos para que o programa possa interpretar a informação que estes representam. São extraídos do desenho tanto o conteúdo do texto quanto sua coordenada de inserção. A interpretação das informações dos textos seguiu as seguintes regras:

- a) Identificação dos trechos: cada linha do desenho, que representa um trecho de tubulação, recebeu um número de identificação (ID), inserido como um texto numérico no mesmo ponto da sua coordenada final. Para otimizar o processo, a numeração foi feita para um único pavimento-tipo, que foi então replicado para os demais andares, facilitando o processo de desenvolvimento do desenho e identificação dos trechos.
- b) Identificação dos pontos de consumo: foram adicionados textos com siglas padronizadas (Quadro 1), que representam o tipo de aparelho sanitário instalados naquele ponto, posicionados nas mesmas coordenadas finais das linhas (tubos) que abastecem o aparelho. Para diferenciar os aparelhos entre os apartamentos, um sufixo numérico foi adicionado à sigla, indicando o andar e o número da unidade (ex: bscd12 para a bacia sanitária com caixa de descarga do apartamento de número final 2 no 1º andar).
- c) Identificação de peças especiais: peças que geram perdas de carga localizadas e possuem custos específicos foram identificadas dentro do desenho utilizando textos com siglas próprias, posicionados nas mesmas

coordenadas iniciais da linha onde a peça está instalada. Utilizou-se “rg” para registros de gaveta, “rgl” para registros de pressão e para os hidrômetros “hidr”, sendo que para os hidrômetros foi adotada a mesma lógica de identificação dos aparelhos de consumo, com os números que indicam o número final do apartamento e o andar do edifício.

- d) Identificação do reservatório: o ponto de origem de toda a rede do SPAF, ou seja, a primeira linha do desenho, foi sinalizada com a inserção do texto “res” no mesmo ponto da sua coordenada inicial. A linha que está atribuída a este texto é reconhecida pelo programa como o ponto de saída de água do reservatório superior. Essa identificação é fundamental, pois serve como referência para o cálculo da pressão estática em todos os pontos de consumo, dada pela diferença de cota (coordenada z), entre a linha (tubo) de saída do reservatório superior e cada uma das linhas associadas as siglas (textos) que representam os pontos de consumo do projeto, e como condição de parada para o algoritmo de busca que determina os caminhos hidráulicos da rede entre os pontos de consumo e a saída do reservatório, necessários para determinar as vazões totais em cada trecho de tubulação e a perda de carga acumulada no caminho para cada ponto de consumo.

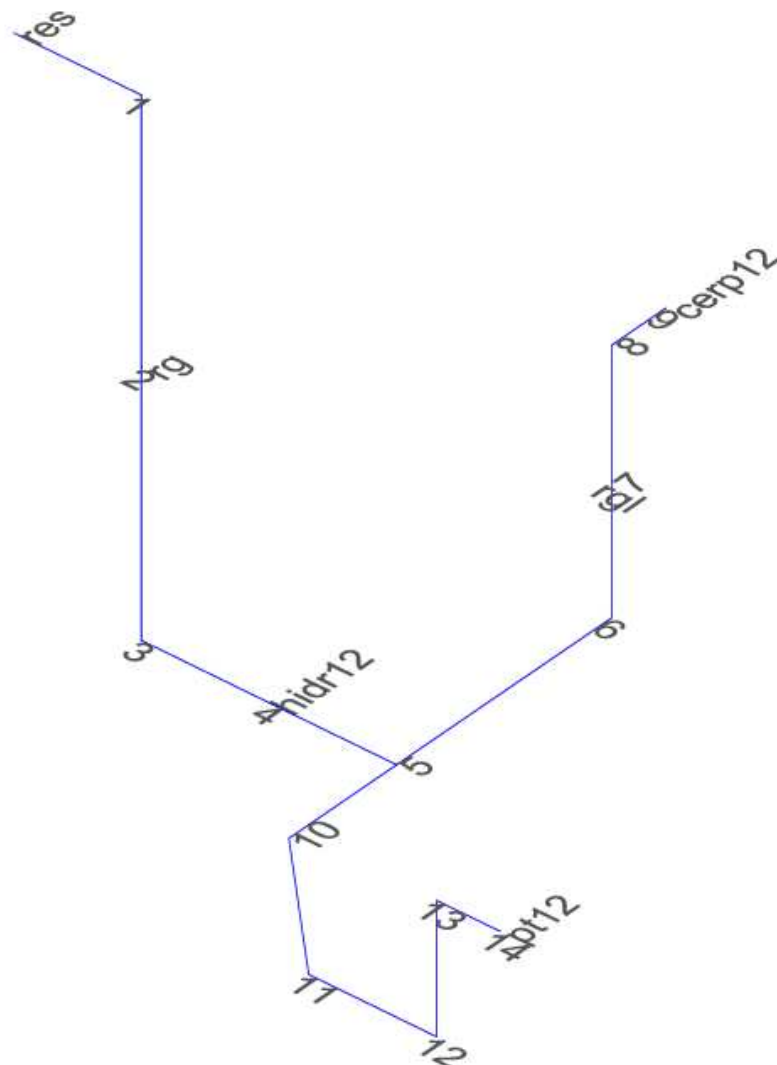
Quadro 1 – Siglas de identificação aparelhos de consumo

Aparelho de consumo	Peça de utilização	Sigla
Bacia sanitária	Caixa de descarga	bscd
Bacia sanitária	Válvula de descarga	bsvd
Banheira	Misturador (água fria)	bm
Chuveiro	Misturador (água fria)	cm
Ducha	Misturador (água fria)	dm
Chuveiro elétrico	Registro de pressão	cerp
Lavadora de pratos	Registro de pressão	lprp
Lavadora de roupas	Registro de pressão	lrrp
Lavatório	Torneira	lt
Lavatório	Misturador (água fria)	lm
Pia	Torneira	pt
Pia	Misturador (água fria)	pm
Pia	Torneira elétrica	pte
Tanque	Torneira	tt
Torneira de jardim	Torneira	tjt

Fonte: Adaptado da ABNT (1998).

Para ilustrar o método de montagem do desenho e identificação dos elementos descritos, a Figura 2 exibe um exemplo de uma rede hidráulica hipotética modelada no ambiente 3D do autocad. Nela, é possível observar como as linhas são conectadas sequencialmente, obedecendo as restrições de verticalidade (eixo Z), de ângulos de 45°, 90°, e como os textos são empregados para atribuir significado à geometria da rede do SPAF. Por exemplo, o texto com a sigla “res” indica o ponto de saída de água do reservatório superior, sendo a única linha do desenho que não tem a coordenada inicial conectada a outra linha, os números de 1 a 14 identificam cada trecho de tubulação, os textos hidr12, cerp12 e pt12 representam, respectivamente, um hidrômetro, um chuveiro elétrico com registro de pressão e a pia com torneira do apartamento de número final 2 no primeiro andar. As siglas “rg” e “rgl” indicam a posição de um registro de gaveta e um registro de pressão, respectivamente.

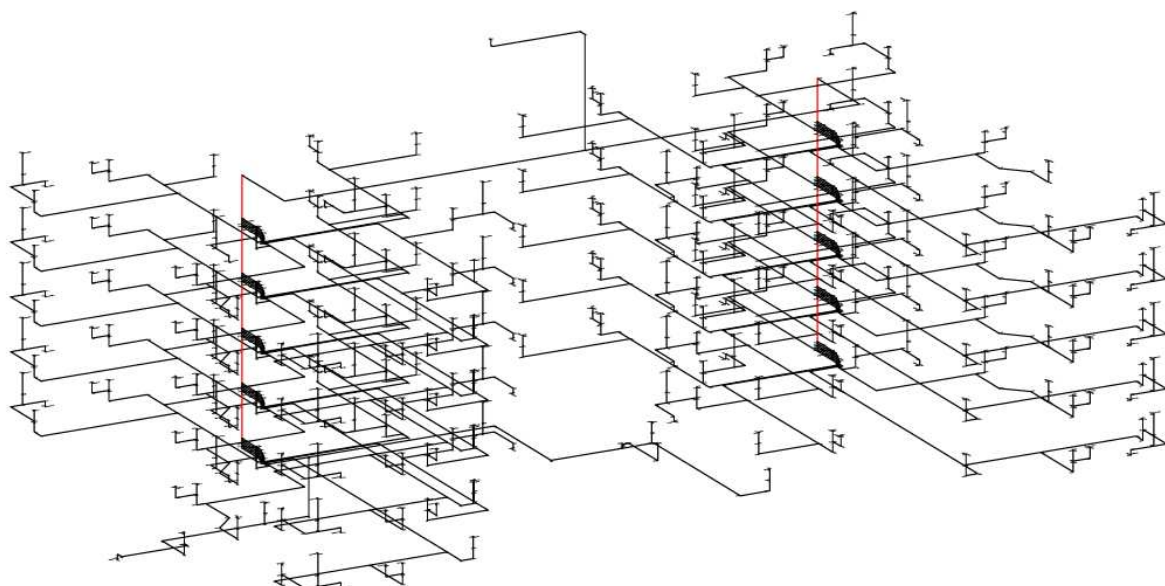
Figura 2 – Exemplo de modelagem da rede hidráulica em 3d



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final deste processo, obteve-se um desenho em CAD que, embora similar a um projeto convencional, apresenta um conjunto de dados estruturados que podem ser interpretados pelo programa desenvolvido. Este arquivo se tornou a entrada primária para o software de otimização, permitindo a extração automática de toda a topologia e das informações necessárias para a montagem e modelagem da rede hidráulica, obtendo os dados necessários para que o programa realize o dimensionamento hidráulico dos tubos e a determinação dos custos, que são utilizados como dados de entrada no modelo de PLIB descrito no tópico 3.1, a Figura 3 apresenta o desenho realizado para a representação em 3d da rede hidráulica completa do edifício utilizado neste trabalho.

Figura 3 – Rede hidráulica completa do edifício analisado



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DE APOIO AO MODELO PROPOSTO

Para aplicar o modelo de otimização proposto, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem Python. A ferramenta foi projetada para automatizar todo o processo de dimensionamento otimizado do SPAF, desde a leitura dos dados de entrada até a apresentação dos resultados finais. O programa funciona como um

fluxo de trabalho sequencial, onde cada etapa prepara os dados necessários para a subsequente, culminando na formulação e resolução do problema de otimização.

Para a implementação do software, foram utilizadas bibliotecas específicas do ecossistema Python, que oferecem funcionalidades robustas para manipulação de dados, cálculos matemáticos, modelagem de otimização e processamento de arquivos gráficos do autocad. O Quadro 2 apresenta as principais bibliotecas empregadas e suas respectivas funções dentro da estrutura do programa.

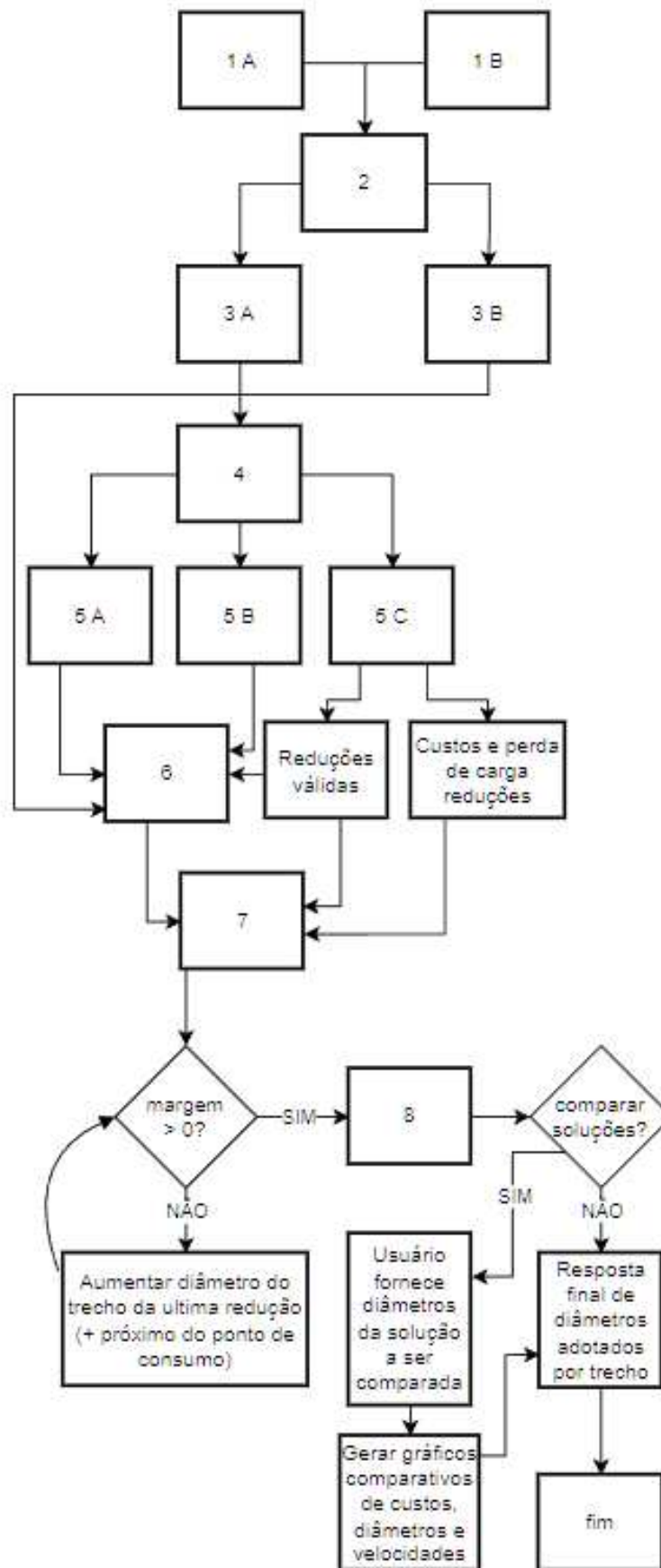
Quadro 2 – Bibliotecas Python utilizadas no programa

Biblioteca	Função no Programa
Pyomo	Framework de modelagem algébrica utilizado para formular as equações matemáticas (função objetivo e restrições) do problema de otimização e realizar a interface com o solver CBC.
Pandas	Utilizada para a manipulação e estruturação de dados tabulares, fundamental para a organização dos custos (tabelas do SINAPI), propriedades dos tubos e resultados da otimização.
Ezdxfl	Responsável pela leitura e extração de dados geométricos e textuais dos arquivos CAD (.dxf), permitindo a interpretação automática da topologia da rede desenhada.
Matplotlib	Biblioteca gráfica empregada para a geração dos histogramas de velocidade e visualização dos resultados analíticos dos cenários.
NumPy	Utilizada para operações numéricas vetoriais e cálculos matemáticos de alto desempenho necessários durante o processamento hidráulico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O fluxograma apresentado na Figura 4 ilustra a sequência de operações executadas pelo programa de maneira simplificada. Na sequência, cada uma dessas etapas é descrita de forma sucinta.

Figura 4 – Fluxograma etapas programa



Fonte: Elaborado pelo autor.

- 1) Carregamento de entradas (parâmetros e geometria): o programa inicia lendo e carregando todas as informações de base necessárias. Isso é feito em duas etapas:
 - a. Parâmetros técnicos: leitura das planilhas externas contendo dados de parâmetros de dimensionamento, que estão apresentadas no Anexo A (pesos relativos e perda de carga de localizada), no Apêndice A (vazões máximas e perda de carga redução) e no Anexo B, com os custos dos materiais (dados sinapi).
 - b. Geometria da rede: leitura do arquivo de desenho (.dxf) da rede estruturada do SPAF, de onde extrai as coordenadas das linhas e textos, comprimentos, ângulos e o conteúdo dos textos, que podem representar a localização dos aparelhos de consumo (pt12), da tubulação de saída do reservatório superior (res), de registros (rgl e rg), hidrômetros (hidr), e números de identificação (ID) dos trechos de tubulação (1, 2, ...) que são necessários para a leitura e interpretação do desenho da rede, conforme apresentado no tópico 3.3.
- 2) Mapeamento e interpretação da rede: nesta etapa, o programa "entende" o desenho. Ele associa os textos que representam os pontos de consumo (siglas) aos seus respectivos trechos de tubulação, com base na comparação das coordenadas das linhas e dos textos, em seguida, mapeia todos os caminhos hidráulicos, ou seja, o conjunto de trechos de tubulação que conectam a saída do reservatório superior (linha associada ao texto res) a cada ponto de consumo (linhas associadas as siglas do Quadro 1), para determinar estes caminhos, o programa lê a coordenada (x,y,z) final da linha associada a sigla do ponto de consumo, e procura qual a outra linha que possui a coordenada inicial no mesmo ponto, ao encontrar esta nova linha, lê a sua coordenada final e repete o processo, até encontrar a linha associada ao texto res, o que indica que o programa percorreu todos os tubos desde o ponto de consumo em análise até o reservatório superior, as linhas são armazenadas para cada caminho com base no seu (ID) e coordenadas x,y,z iniciais, sendo atribuído para cada linha adicionada ao caminho o valor do peso relativo associado ao aparelho em análise.

- 3) Cálculo dos requisitos de engenharia: Com a rede mapeada e os valores de pesos relativos adicionados a cada um dos caminhos, o programa calcula os requisitos fundamentais de dimensionamento do projeto:
- Vazão de projeto: utilizando o método dos pesos relativos, e os caminhos gerados na etapa anterior, ele soma os pesos de todas as linhas presentes nos diferentes caminhos, o que resulta no peso relativo total de cada linha, e então calcula sua vazão de projeto (Eq. 1).
 - Perda de carga admissível: para cada ponto de consumo mapeado, o programa calcula a pressão estática daquele aparelho, sendo a diferença de altura até o reservatório, e subtrai deste valor a pressão mínima de funcionamento do aparelho. O resultado é o valor de perda de carga máxima admissível que pode ser gasta naquele caminho, a diferença entre esse valor e a perda de carga acumulada do caminho, ou seja, o somatório das perdas de carga dos tubos que compõem este caminho, é chamado de “margem de segurança”, que representa o saldo de pressão disponível após o desconto das perdas de carga.
- 4) Geração de opções (diâmetros candidatos): com base na vazão de cada trecho de tubulação, o programa escolhe o diâmetro mínimo que atende ao critério de velocidade máxima, e os 2 diâmetros comerciais seguintes, tendo assim um conjunto de opções de diâmetros viáveis para cada trecho. (ex: 25, 32, 40mm). Paralelamente, ele analisa a geometria das linhas, e com base nas coordenadas e ângulos relativos entre as linhas identifica automaticamente os pontos onde são utilizadas conexões do tipo tê e joelhos, que terão os seus custos e perdas de carga associados a para trecho e para cada opção de diâmetro atribuída ao mesmo.
- 5) Pré-cálculo de custos e perdas (cardápio): Esta é uma etapa crucial de preparação, onde para cada trecho e para cada um dos seus diâmetros candidatos, o programa calcula três valores:
- Custo: o custo total do material (tubo + conexões e peças associadas) para aquele trecho naquele diâmetro.
 - Perda de carga: a perda de carga hidráulica que ocorrerá naquele trecho para cada diâmetro. O programa constrói, essencialmente,

um "cardápio" de opções para cada trecho, com seu "preço" (custo) e sua "consequência" (perda de carga).

- c. Reduções: para cada par de tubos subsequentes da rede compara os diâmetros candidatos e verifica quais são as opções de reduções de diâmetro consideradas válidas, ou seja, aquelas possíveis de serem realizadas utilizando somente uma bucha ou luva de redução, atribuindo o seu custo e calculando a perda de carga associada.

6) Otimização (seleção da solução de custo mínimo): Utilizando o modelo de PLIB descrito no tópico 3.1, o programa analisa o "cardápio" completo de custos e perdas de carga para cada trecho, desconsiderando inicialmente a atribuição da perda de carga e custos associados as reduções, porém as escolhas de diâmetros para tubos subsequentes leva em consideração as opções de reduções válidas verificadas no passo anterior, e seleciona a combinação de diâmetros para cada trecho da rede que resulta no menor custo total do projeto, respeitando as restrições descritas no tópico 3.1.

7) Pós-processamento (verificação e ajuste heurístico): após a otimização, o programa inicia uma fase de pós-processamento para validar e refinar a solução. Primeiramente, ele recalcula a perda de carga de todos os caminhos da rede, agora incorporando as perdas localizadas geradas pelas reduções de diâmetro que a solução ótima propôs. Se essa verificação final revelar que algum ponto de consumo ficou com a pressão abaixo da mínima normativa, ou seja, com margem de segurança negativa, um ajuste heurístico é ativado para corrigir a inviabilidade hidráulica, tratando de forma inteligente os cenários complexos que surgem da interação entre diâmetros e reduções. A rotina de ajuste funciona da seguinte forma:

- a. O programa identifica, para cada caminho com margem negativa, o trecho exato onde ocorreu a última redução de diâmetro antes do ponto de consumo.
- b. A perda de carga da redução antiga é removida, e o diâmetro do trecho alvo é aumentado para o próximo disponível para o trecho, desde que essa nova bitola não seja maior que o diâmetro do trecho a montante, garantindo a monotonicidade.

- c. Em seguida, o algoritmo recalcula e aplica os custos e perdas de carga das novas reduções que podem ter surgido nas fronteiras adjacentes (a montante e a jusante) ao trecho modificado.
 - d. A margem de segurança do caminho é então reavaliada. Se positiva, o ajuste para aquele caminho é concluído. Caso contrário, o processo se repete, identificando a "nova" última redução e continuando o ciclo até que a pressão mínima seja atendida.
- 8) Apresentação de resultados e análise comparativa: Finalmente, o programa apresenta a solução otimizada e ajustada em uma tabela consolidada (trecho, diâmetro, custo). Ele também oferece uma ferramenta de análise "what-if", onde o usuário pode inserir um conjunto de diâmetros proveniente de um outro dimensionamento feito para o mesmo projeto que considere o mesmo traçado e estrutura de trechos adotado no desenho da rede hidráulica, e gerar gráficos comparativos, validando o custo e o desempenho da solução otimizada contra a solução proposta.

Esta metodologia estruturada, que combina a interpretação de projetos CAD com técnicas de pesquisa operacional, forma a base para as análises e resultados apresentados nos capítulos subsequentes. Para o leitor que desejar um aprofundamento técnico sobre a implementação de cada uma dessas etapas, os tópicos de 3.4.1 a 3.4.16 detalham o funcionamento do programa e as formulações utilizadas.

3.4.1 Leitura dos Arquivos de Entrada e Interpretação do Desenho

A etapa inicial do programa consiste no carregamento de todas as informações necessárias para a análise, que são provenientes de duas fontes distintas: planilhas em formato Excel, contendo os parâmetros de dimensionamento e custos, e um arquivo de desenho em formato DXF, que descreve a geometria da rede hidráulica.

3.4.1.1 *Carregamento de Parâmetros Externos*

Antes de processar o modelo geométrico, o software realiza o carregamento de dados paramétricos a partir de planilhas externas, como o arquivo pesos relativos.xlsx (Anexo A), que contém informações normatizadas pela NBR 5626:1998 (ABNT, 1998), como a sigla de cada aparelho sanitário, seu peso relativo para o cálculo de vazão e a pressão mínima de funcionamento. De forma análoga, planilhas contendo os custos de materiais (dados sinapi.xlsx, Anexo B) e coeficientes para cálculo de perda de carga (perda de carga localizada.xlsx, Anexo A; e perda de carga redução.xlsx, Apêndice A) são carregadas e armazenadas em estruturas de dados internas, preparando o ambiente para os cálculos subsequentes.

3.4.1.2 *Leitura e Processamento do Arquivo DXF*

O ponto de partida para a interpretação da geometria da rede é a leitura do arquivo em formato DXF, que contém o modelo 3D estruturado conforme a metodologia descrita no tópico 3.3.1. Utilizando a biblioteca Ezdxf em Python, o programa carrega este arquivo e acessa diretamente seu ambiente de modelagem (modelspace), de onde todas as informações geométricas e textuais são extraídas. O processo é dividido em duas rotinas principais:

- a) Extração de textos: o programa percorre o desenho e identifica todas as entidades TEXT e MTEXT, que são os tipos de texto do autocad. Para cada uma, armazena seu conteúdo textual e sua coordenada de inserção (x, y, z). As coordenadas são padronizadas para duas casas decimais, prevenindo imprecisões de ponto flutuante que poderiam comprometer a associação correta entre textos e linhas.
- b) Extração de linhas: o programa realiza um processo similar para as entidades LINE, que são as linhas do desenho que representam os trechos de tubulação. Para cada linha, o programa armazena suas coordenadas de início e fim, também arredondadas em duas casas decimais.

Além disso, a função realiza cálculos para determinação dos comprimentos e ângulos das linhas com base nas coordenadas e prepara a estrutura de dados para etapas subsequentes:

- a) Calcula para cada linha o comprimento do trecho em 3D, utilizando as coordenadas iniciais e finais.
- b) Calcula o ângulo de projeção da linha no plano 2D (plano XY), informação que será crucial para a posterior identificação de conexões como joelhos e tês.
- c) Inicializa campos que serão preenchidos posteriormente, como id, peso relativo total, vazão m³ s, e listas para armazenar os diâmetros candidatos, perdas de carga e custos.

Com as listas de linhas e textos extraídos do desenho, o software precisa estabelecer a relação entre elas para construir a topologia da rede. Esta associação transforma um conjunto de elementos gráficos desconexos em um sistema hidráulico com nós e trechos identificados, para isto, são realizadas duas etapas:

- a) Associação de identificadores de trecho de tubulação: sua lógica baseia-se na convenção de que um texto composto exclusivamente por números, localizado na coordenada final de uma linha, será atribuído como seu identificador numérico, adicionado individualmente a cada trecho da tubulação.
- b) Associação de textos as linhas: em seguida, são associados os demais textos do desenho, como as siglas que representam pontos de consumo (ex: "pt12"), o tubo de saída do reservatório (identificado pelo texto "res") ou outros equipamentos (ex: "rg"). A regra de associação prioriza a coordenada inicial do trecho, ou seja, se a coordenada de um texto corresponde a coordenada inicial de uma linha, ele é associado a ela. Caso não haja correspondência, o programa verifica a coordenada final. Esta lógica permite identificar corretamente a posição e quais são os aparelhos de consumo e equipamentos especiais que estão presentes no projeto.

Ao final desta fase, o programa já possui uma representação estruturada da rede hidráulica. Cada segmento de tubo (linha) tem seu comprimento, ângulo, e está associado a rótulos textuais que definem sua função no sistema, preparando a base para os cálculos hidráulicos e a análise da estrutura da rede que serão realizados nas etapas seguintes.

3.4.2 Atribuição dos pesos relativos

Após a interpretação dos dados geométricos e textuais do desenho, o próximo passo consiste em atribuir a demanda dos pontos de consumo. Para isso, o programa adiciona para cada linha que possua como texto associado uma sigla correspondente a um aparelho de consumo o seu respectivo peso relativo, conforme o método da NBR 5626:1998 (ABNT, 1998). O processo funciona da seguinte maneira:

- a) Iteração pelos trechos de tubulação: o algoritmo percorre a lista de todos os trechos de tubulação que foram previamente associados a um texto (sigla) que representa um aparelho sanitário.
- b) Processamento da sigla: para cada sigla identificada (ex: bscd12), a função realiza uma limpeza temporária no texto para isolar a identificação do tipo de aparelho (ex: bscd), descartando os números que indicam a localização do mesmo dentro do projeto.
- c) Consulta à tabela de pesos: com a sigla do aparelho isolada, o programa consulta a tabela de pesos relativos (Anexo A), que foi previamente carregada na memória. Ele busca na coluna "sigla" a correspondência exata com a sigla do aparelho e extrai o valor do peso relativo associado.
- d) Armazenamento do dado: o valor do peso relativo encontrado é então armazenado como um atributo do trecho de tubulação em análise, que alimenta diretamente aquele ponto de consumo.

Analisando a rede apresentada na Figura 2, o algoritmo identifica o texto "pt12" associado ao trecho final de um dos ramais (trecho 14). A função então isola a sigla "pt" e, ao consultar a tabela pesos relativos (Anexo A), atribui a este trecho o peso relativo correspondente a uma pia com torneira, que é 0,7. De forma análoga, para o texto "cerp12", o trecho 9 recebe o peso relativo de 0,1, correspondente ao chuveiro elétrico. Sendo realizado o mesmo processo para todos os pontos de consumo da rede.

Ao final desta etapa, cada trecho terminal da rede, que corresponde a um ponto de consumo, possui um dado numérico que quantifica sua demanda, sendo um passo necessário para posteriormente determinar a vazão total em cada trecho, através do somatório dos pesos pelos tubos da rede.

3.4.3 Construção dos caminhos do ponto de consumo ao reservatório

Para que seja possível calcular a vazão acumulada em cada trecho e, posteriormente, a perda de carga total até cada ponto de consumo, é necessário que o programa compreenda a estrutura hierárquica da rede. Em outras palavras, para cada aparelho sanitário, o software precisa identificar a sequência exata de trechos de tubulação que conectam aquele aparelho à origem do sistema, ou seja, ao reservatório superior, o programa implementa um algoritmo de percurso reverso na rede que funciona da seguinte forma:

- a) Mapeamento de conexões: inicialmente, para otimizar a busca, o programa cria um dicionário de mapeamento. Esta estrutura de dados funciona como um "mapa rodoviário" da rede, onde cada coordenada final de uma linha é associada ao objeto da linha correspondente. Isso permite que, durante o percurso, o programa possa encontrar rapidamente qual linha "chega" em um determinado ponto.
- b) Percurso a partir de cada ponto de consumo: o algoritmo itera sobre todas as linhas que possuem um ponto de consumo associado, que foram identificados com um peso relativo na etapa anterior, e para cada um deles, o percurso se inicia.
- c) Travessia reversa (a montante): partindo do trecho terminal da rede que alimenta diretamente o ponto de consumo, ou seja, aquele que possui uma sigla associada, o algoritmo entra em um laço de repetição. Em cada passo, ele identifica a coordenada inicial do trecho atual. Utilizando o dicionário do passo "a", ele busca qual outro trecho da rede possui sua coordenada final coincidente com a coordenada inicial do trecho atual. Este trecho encontrado é, portanto, o segmento imediatamente anterior no fluxo da água (a montante).
- d) Armazenamento do caminho: o trecho encontrado é adicionado a uma lista que representa o caminho entre o ponto de consumo em análise e o reservatório superior, sendo armazenadas informações como o id, o ângulo, a coordenada inicial e também associa o valor do peso relativo do aparelho em análise à linha. O algoritmo então repete o passo C, partindo deste novo trecho, continuando a travessia reversa, "subindo" pela rede.

- e) Condição de parada: o laço de repetição termina quando o algoritmo encontra o trecho que foi associado ao texto “res”, que é a sigla de identificação do ponto de saída de água do reservatório superior, confirmando que a origem do sistema foi alcançada.

Para ilustrar este processo, a Figura 5 apresenta o resultado gerado pelo programa para o caminho entre o ponto de consumo “pt12” da rede da Figura 2 e o reservatório superior.

Figura 5 – Resposta do programa para o caminho do ponto de consumo pt12

```
Sigla: pt12
Linhas TE relacionadas: [(10, (0.0, -3.0, 1.0)), (5, (0.0, -2.0, 1.0))]
Pressão estática: 3.00
Perda de carga máxima admissível: 2.00
Segmentos no caminho (line_id, angle, peso_relativo, coordenadas_iniciais):
- ID: 14, Ângulo: 270.00°, Peso: 0.7, Coord Ini: (-2.0, -5.0, 2.0)
- ID: 13, Ângulo: 0.00°, Peso: 0.7, Coord Ini: (-2.0, -5.0, 1.0)
- ID: 12, Ângulo: 270.00°, Peso: 0.7, Coord Ini: (-2.0, -4.0, 1.0)
- ID: 11, Ângulo: 225.00°, Peso: 0.7, Coord Ini: (-1.0, -3.0, 1.0)
- ID: 10, Ângulo: 180.00°, Peso: 0.7, Coord Ini: (0.0, -3.0, 1.0)
- ID: 5, Ângulo: 270.00°, Peso: 0.7, Coord Ini: (0.0, -2.0, 1.0)
- ID: 4, Ângulo: 270.00°, Peso: 0.7, Coord Ini: (0.0, -1.0, 1.0)
- ID: 3, Ângulo: 0.00°, Peso: 0.7, Coord Ini: (0.0, -1.0, 3.0)
- ID: 2, Ângulo: 0.00°, Peso: 0.7, Coord Ini: (0.0, -1.0, 5.0)
- ID: 1, Ângulo: 270.00°, Peso: 0.7, Coord Ini: (0.0, 0.0, 5.0)
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como se pode observar na Figura 5, o algoritmo partiu do trecho onde a sigla “pt12” estava associada (ID 14) e percorreu de forma reversa toda a sequência de trechos (13, 12, 11, ..., 1) até o reservatório superior, representado pelo texto “res” associado ao trecho 1. A lista de “segmentos no caminho” armazena, para cada trecho, informações cruciais como o ID, o ângulo de projeção no plano horizontal e as coordenadas de início. Nota-se, por exemplo, o trecho 11 com um ângulo de 225°, um dado geométrico que será fundamental para a identificação automática de um joelho de 45° no trecho, conforme será detalhado em seções posteriores.

Ao final deste procedimento, o programa possui uma estrutura de dados completa que armazena, para cada ponto de consumo, a lista ordenada de todos os

trechos de tubulação que compõem seu caminho de abastecimento, viabilizando os cálculos subsequentes.

3.4.4 Somatório dos pesos relativos

Com os caminhos de cada ponto de consumo devidamente mapeados, a etapa subsequente consiste em calcular a demanda hidráulica acumulada em cada trecho individual da rede. O valor do somatório dos pesos ($\sum P$) de um trecho não corresponde apenas ao aparelho que ele alimenta diretamente, mas sim à soma dos pesos de todos os pontos de consumo localizados a jusante dele.

Para executar este cálculo, o programa utiliza uma função que opera de forma cumulativa. O algoritmo percorre os caminhos de cada ponto de consumo, que foram construídos na etapa anterior, e, para cada linha pertencente a um caminho, ele adiciona o peso relativo daquele ponto de consumo ao trecho no dado “Peso relativo total” associado a linha. Ao repetir este processo para todos os pontos de consumo, cada trecho da rede acumula a soma exata dos pesos de todos os aparelhos que ele abastece.

Este processo pode ser verificado ao analisar a rede da Figura 2. O ramal que alimenta o ponto de consumo “pt12” é composto pelos trechos 14, 13, 12, 11 e 10. Como este ramal alimenta apenas um aparelho, todos esses trechos recebem o peso da pia de cozinha, que é 0,7. De forma análoga, os trechos 9, 8, 7 e 6, que compõem o ramal do chuveiro elétrico “cerp12”, recebem o peso de 0,1.

O trecho 5 é o ponto de junção onde o fluxo para os dois aparelhos se encontra, portanto, a demanda que ele deve suportar é a soma das demandas de ambos. O programa atribui ao trecho 5 um peso de 0,8 ($0,7 + 0,1$), e a todos os trechos a montante (4, 3, 2 e 1), que compõem a prumada principal de alimentação.

Ao final desta etapa, cada segmento da tubulação possui um valor de peso relativo que representa a sua demanda total. Este valor é então utilizado para calcular a vazão de projeto (Q) de cada trecho, conforme a equação 1, e armazena este valor para cada linha no dado “Vazão m^3/s ”, sendo uma informação necessária para os cálculos dos dimensionamentos hidráulicos e a subsequente otimização do sistema.

3.4.5 Identificação e Classificação dos Tês

Após a determinação das vazões, a próxima etapa crítica para o dimensionamento hidráulico é a contabilização das perdas de carga localizadas, que ocorrem em conexões como joelhos e tês. A identificação correta dos tês é especialmente importante, pois o valor da perda de carga varia significativamente dependendo de como o fluxo de água passa pelo te, seguindo em linha reta (passagem direta) ou se sofre um desvio de 90° (saída lateral). Para resolver isso, o programa implementa um processo de duas etapas: a localização geométrica dos pontos onde existem tês e a sua posterior classificação com base nos ângulos das tubulações.

A primeira etapa, consiste em identificar os pontos da rede onde existem tês, para isso, o algoritmo percorre todas as coordenadas finais dos trechos de tubulação e verifica se nessa mesma coordenada, iniciam-se dois outros trechos, ou seja, temos uma linha "chegando" e duas linhas "saindo" do mesmo ponto. Quando essa condição é satisfeita, a coordenada daquele nó e os ids das linhas analisadas é armazenado como a localização de um tê.

Uma vez que todos os tês foram mapeados, a segunda etapa classifica cada tê como "passagem direta" ou "saída lateral". Sendo verificado para cada caminho entre um ponto de consumo e o reservatório, se existem trechos que fazem parte de um tê, e caso sejam identificados, o programa analisa os ângulos dos trechos da seguinte forma:

- a) Se os ângulos dos trechos de são iguais, isso indica que o fluxo continua em linha reta. Portanto, o programa adiciona ao primeiro trecho do caminho que faz parte do tê um tê de passagem direta.
- b) Se os ângulos dos trechos de são diferentes, isso caracteriza um desvio na direção do fluxo. Neste caso, o programa adiciona ao primeiro trecho do caminho que faz parte do tê um tê de saída lateral.

Para a rede da Figura 2, identificamos a presença de um tê no encontro entre as linhas 5, 6 e 10, pois temos na mesma coordenada o final da linha 5 e início das linhas 6 e 10. A Figura 5 apresenta a classificação entre o tê de saída lateral ou passagem direta, no texto "Linhas TE relacionadas" foi identificado que os trechos 10 e 5 fazem parte de um tê, e ao comparar o ângulo do trecho 10 (180°) com o trecho 5 (270°), temos que estes ângulos são diferentes, portanto, é atribuído ao trecho 10 a

presença de um tê de saída lateral, pois é neste trecho em que a perda de carga localizada vai ocorrer, já que o fluxo de água somente muda de direção ao chegar no trecho 10, e como esta análise é realizada para todos os caminhos da rede, para a sigla “cerp12” a verificação é semelhante, porém os trechos do caminho relacionados ao tê são 6 e 5, com os ângulos de 0° e 270° respectivamente, como são ângulos diferentes, é atribuído ao trecho 6 a presença de um tê de saída lateral. A classificação de “tê saída lateral” ou “tê passagem direta” é atribuída ao primeiro trecho do caminho que compõem o tê, pois é onde a perda de carga localizada ocorre.

Essa diferenciação é fundamental, pois os coeficientes de perda de carga para cada situação são distintos. Ao final deste processo, cada trecho que passa por um tê possui a informação precisa sobre qual tipo de perda localizada deve ser aplicada, garantindo a exatidão dos cálculos hidráulicos que alimentam o modelo de otimização.

3.4.6 Processamento dos Joelhos (45° e 90°)

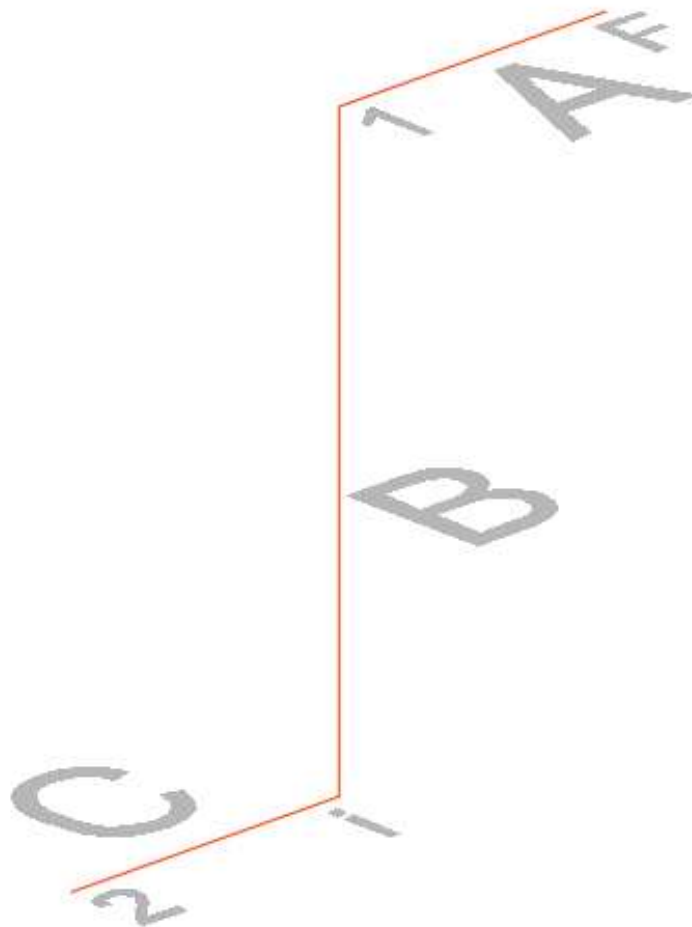
Para identificar mudanças de direção na tubulação que exigem o uso de joelhos, o programa segue uma lógica mais complexa, pois deve interpretar corretamente as transições em um espaço tridimensional a partir de ângulos projetados no plano 2D. A função opera da seguinte forma:

- a) Análise por pares: o algoritmo percorre cada caminho entre o ponto de consumo (sigla) e o reservatório, iniciando pelo trecho terminal da rede onde o ponto de consumo está instalado e seguindo até chegar no trecho de saída do reservatório, analisando os segmentos em pares consecutivos: um segmento atual e um próximo. Para cada par, ele compara seus ângulos 2D, previamente calculados.
- b) Regra de prioridade: uma regra fundamental é que cada trecho só pode ter uma conexão (TE ou joelho) associada. Se o trecho atual já foi classificado como parte de um TE, ou já foi atribuído algum joelho, a função não atribui este trecho como “atual” na comparação dos ângulos, evitando a atribuição de múltiplas peças no mesmo trecho.

Para identificar a existência de conexões do tipo joelho interpretando os dados do desenho tridimensional, a função considera dois cenários:

- 1) Ângulos iguais: se os ângulos 2D do segmento atual e próximo são idênticos, a projeção no plano XY é uma linha reta, portanto não existe um joelho neste ponto. No entanto, pode haver uma mudança de direção no eixo Z (tubulação subindo ou descendo), pois quando temos uma linha vertical no desenho, o autocad considera o ângulo como "0°", porém as linhas horizontais também podem ser definidas como ângulo "0°". Para detectar se neste ponto existe uma conexão do tipo joelho, o programa implementa uma verificação adicional especificamente para trechos com ângulo 0°. Ele compara as coordenadas x e y do ponto final do trecho atual com as do ponto inicial do próximo trecho, seguindo a sequência do caminho das siglas. Se essas coordenadas não coincidirem perfeitamente, significa que houve uma mudança de direção no plano vertical, que é então classificada como um joelho de 90°. A Figura 6 apresenta de maneira esquemática esta análise.

Figura 6 – Representação linhas com ângulo 0°



Fonte: Elaborado pelo autor.

As linhas horizontais (A e C) e a linha vertical B são identificadas pelo autocad com ângulo 0° , porém ao analisar as linhas percebe-se que no ponto “1” e “i” existem conexões do tipo joelho 90° , como a comparação entre ângulos é feita iniciando pelo trecho onde o ponto de consumo está associado e segue até encontrar o reservatório, vamos inicialmente adotar que o ponto de consumo está localizado em “F”, seguindo a lógica descrita no caso 1, tomamos o trecho “A” como atual e o “B” como o próximo, comparando as coordenadas x e y do ponto final do trecho atual (ponto “F”), com as do ponto inicial do próximo trecho (ponto “i”), percebe-se a diferença entre as coordenadas, portanto é adicionado o joelho de 90° ao trecho A, agora considerando o trecho “B” como atual e o “C” como próximo, comparando as coordenadas x, y finais do trecho atual (ponto 1) com as coordenadas iniciais do próximo trecho (ponto 2), temos diferenças nas coordenadas, logo é adicionado o joelho de 90° ao trecho B, a análise é semelhante para o caso onde o ponto de consumo está instalado em 2, pois neste cenário as coordenadas iniciais e finais dos trechos se invertem, já que os trechos são estruturados de forma que representem o fluxo da água na rede.

2) Ângulos diferentes: quando os ângulos 2D diferem, há uma mudança de direção no plano XY. A classificação depende da natureza dessa mudança:

- a) Se a transição ocorre entre dois ângulos de um mesmo grupo (ângulos retos $[0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ]$, ou ângulos de 45° $[45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ]$) a conexão é classificada como um joelho de 90° .
- b) Se a transição ocorre de um ângulo reto para um de 45° (ex: de 90° para 45°), a conexão é classificada como um joelho de 45° .
- c) Para o caso complexo de uma transição de um ângulo de 45° para um de 90° , o software realiza uma verificação adicional na coordenada Z do segmento próximo. Se houver variação em Z (o trecho seguinte é vertical), a peça necessária é um joelho de 90° . Caso contrário, se o movimento for apenas no plano XY, é um joelho de 45° .

Para verificar a aplicação prática deste algoritmo, pode-se analisar o caminho do ponto de consumo pt12 da rede da Figura 2, cujos dados de trechos estão detalhados na Figura 5, verificando os principais pontos da análise de pares do algoritmo e indicando em qual cenário descrito neste tópico a verificação se encaixa.

Como a comparação entre pares se inicia pelo primeiro trecho do caminho, ou seja, aquele onde o aparelho está instalado, tomamos o trecho 14 como atual e 13

como próximo, com ângulos de (270°) e (0°), respectivamente, esta é uma mudança entre ângulos retos, portanto o programa atribui um joelho de 90° ao trecho 14, [cenário 2 a] o mesmo ocorre entre os trechos 13 e 12, 4 e 3, 2 e 1.

Continuando a análise tomamos os trechos 12 e 11, com a mudança do ângulo 270° (trecho 12) para 225° (trecho 11), sendo uma mudança entre um ângulo reto para um ângulo de 45° , então é atribuído um joelho de 45° ao trecho 12 [cenário 2 b]. Já entre os trechos 11 e 10, temos uma mudança de 225° para 180° , ou seja, de um ângulo de 45° para um ângulo reto, então o programa realiza a verificação adicional da coordenada z, e conforme a Figura 5, não há variação na coordenada z entre os trechos, então a conexão é classificada como um joelho de 45° atribuído ao trecho 11 [cenário 2 c]. Como o trecho 10 já possuía um tê de saída lateral atribuído, a regra de prioridade do algoritmo impede que ele seja analisado novamente para a atribuição de um joelho, garantindo que cada conexão seja única.

O cenário 1 é aplicado em duas situações, entre os trechos 5 e 4, temos ângulos iguais (270°), mas como não são nulos, o programa identifica que não há mudança de direção, apenas uma continuidade que foi segmentada para associar o hidrômetro (hidr12) ao trecho 5, e nos trechos 3 e 2 ambos possuem ângulo de 0° . O algoritmo então compara a coordenada final de 3 com a inicial de 2. Como as coordenadas (x, y) coincidem, o programa conclui que não ocorre uma mudança de direção, portanto não atribui um joelho. Esta segmentação no desenho foi proposital para permitir a associação do registro de gaveta (rg), que é atribuído ao trecho 3.

Este processo de análise é repetido para todos os caminhos, mas os trechos já avaliados em um caminho anterior (como os da prumada principal, comuns aos caminhos do pt12 e do cerp12) são ignorados nas análises subsequentes, assegurando a correta e única contabilização de cada peça.

3.4.7 Pressão estática e perda de carga máxima admissível

A primeira etapa do dimensionamento hidráulico é determinar os limites de pressão do sistema. O programa executa essa tarefa estabelecendo duas métricas cruciais para cada ponto de consumo:

- a) Pressão estática: o programa primeiro localiza a coordenada Z do reservatório (identificado pelo texto “res”) e a coordenada Z de cada aparelho de consumo (sigla). A pressão estática é calculada simplesmente

como a diferença de altura entre esses dois pontos. O programa também emite um alerta se essa pressão estática exceder 40 m.c.a., conforme o limite estabelecido pela norma NBR 5626:1998 (ABNT, 1998), porém não foram implementadas neste programa formas de reduzir esta pressão, como a utilização de válvulas redutoras de pressão.

- b) Perda de carga máxima admissível: Este é um parâmetro fundamental para a otimização. Ele representa o máximo de energia que pode ser "perdida" por atrito no percurso da água entre o reservatório e o ponto de consumo sem comprometer o funcionamento. O valor é calculado subtraindo-se a pressão mínima de funcionamento do aparelho obtida da tabela de pesos relativos (Anexo A) da pressão estática total disponível. Esse valor é utilizado como dado de entrada para uma restrição essencial no modelo de otimização, garantindo que qualquer solução de diâmetros proposta atenda aos requisitos mínimos de pressão em todos os pontos.

Tanto o valor da pressão estática quanto a perda de carga máxima admissível são armazenados individualmente para cada aparelho junto aos dados dos caminhos entre o ponto e o reservatório, como pode ser verificado na Figura 5, nos dados "Pressão estática" e "Perda de carga máxima admissível".

3.4.8 Escolha dos diâmetros candidatos

Com a vazão de projeto calculada para cada trecho da rede, conforme explicado no tópico 3.4.4, são preparados os dados para o modelo de otimização. A essência de um modelo de PLIB, como o proposto neste trabalho, é escolher a melhor opção dentre um conjunto finito de alternativas, portanto, antes de formular o problema matemático, é necessário definir, para cada trecho de tubulação, quais são os diâmetros comerciais que podem ser selecionados pelo otimizador.

Uma abordagem ingênua seria permitir que o otimizador testasse todos os diâmetros comerciais existentes para cada trecho, o que geraria um espaço de busca excessivamente grande e computacionalmente inviável. Para contornar isso, o programa adota uma estratégia para pré-selecionar apenas as opções mais plausíveis, o processo funciona da seguinte forma:

- a) Carregamento dos dados de vazão máxima: o programa carrega a planilha vazões máximas.xlsx (Apêndice A), que contém, para cada diâmetro

comercial de PVC, a vazão máxima que ele suporta sem exceder a velocidade limite de 3 m/s, conforme estipulado pela NBR 5626:1998 (ABNT, 1998).

- b) Identificação do diâmetro mínimo viável: para cada trecho da rede, o programa compara a sua vazão de projeto (calculada anteriormente) com os valores de vazão máxima da planilha, identificando o primeiro diâmetro comercial cuja vazão máxima é superior à vazão do trecho. Este é o menor diâmetro que atende ao critério de velocidade.
- c) Adoção do conjunto de candidatos: em vez de adotar apenas este diâmetro mínimo, que poderia não ser suficiente para atender aos requisitos de pressão mínima nos pontos de consumo, o programa cria um conjunto de alternativas para o otimizador, selecionando o diâmetro mínimo encontrado e os dois diâmetros comerciais imediatamente superiores como os candidatos viáveis para aquele trecho. Por exemplo, se para um determinado trecho o diâmetro mínimo para atender à vazão for 25 mm, ou seja, o menor diâmetro que atende ao critério de velocidade inferior a 3 m/s, os diâmetros candidatos para aquele trecho serão 25 mm, 32 mm, 40 mm.

Essa abordagem é o cerne da preparação para a otimização, pois ao fornecer um leque restrito, mas tecnicamente coerente de diâmetros para cada trecho, o programa cria um espaço de soluções gerenciável. Isso permite que o solver de otimização, que será abordado posteriormente, explore as combinações possíveis e encontre aquela que minimiza o custo total, garantindo ao mesmo tempo que todos os critérios de velocidade e pressão sejam atendidos.

3.4.9 Cálculo dos comprimentos equivalentes

A perda de carga total em um trecho de tubulação é composta por duas parcelas: a perda distribuída, que ocorre ao longo do comprimento retilíneo do tubo, e a perda localizada, que é causada pela turbulência do fluxo ao passar por conexões e peças especiais (joelhos, tês, registros). Para simplificar o cálculo da perda de carga total na equação de Darcy-Weisbach (Eq. 6), adota-se o método dos comprimentos equivalentes. Esta técnica consiste em converter a perda de carga de cada peça

localizada em um comprimento adicional de tubulação reta que geraria uma perda de carga de mesma magnitude.

O programa implementa este método para cada um dos diâmetros candidatos de cada trecho da rede, pois o valor do comprimento equivalente de uma peça é dependente do diâmetro da tubulação, realizado da seguinte forma:

- a) Inicialização do comprimento: para cada trecho e para cada diâmetro candidato, o algoritmo inicia o cálculo do comprimento total utilizando o comprimento geométrico real daquele trecho, obtido previamente pelo programa.
- b) Contabilização das peças especiais e conexões: em seguida, o programa verifica os atributos que foram associados ao trecho nas etapas anteriores, sendo as conexões e as peças especiais atribuídas pelos textos. A lógica implementada permite que, no máximo, um tipo de conexão (joelho de 90°, joelho de 45°, tê de passagem direta ou tê de saída lateral) e pode possuir adicionalmente uma peça especial (registro de gaveta rg, registro de pressão rgl ou hidrômetro hidr) associada ao mesmo trecho.
- c) Determinação do comprimento total: para cada peça ou conexão identificada, o algoritmo consulta a tabela de perdas de carga localizadas (Anexo A) e extrai o valor de comprimento equivalente correspondente ao diâmetro em análise, armazenando no dado “Comprimentos equivalentes” associado ao trecho, este valor é então somado ao comprimento geométrico real do trecho, sendo armazenado no dado “Comprimento virtual (m)” um valor total de comprimento total para cada diâmetro candidato do trecho.

Uma exceção a este método é o hidrômetro, pois este não possui um valor de comprimento equivalente que determine a sua perda de carga localizada, sendo calculada diretamente pela equação 11, conforme será descrito posteriormente.

Para exemplificar esta análise, a Figura 7 apresenta parte do resultado gerado pelo programa para o trecho 14 da rede apresentada na Figura 2.

Figura 7 – Resultado comprimentos equivalentes trecho 14 da rede Figura 2

Linha: 14
 Início: (-2.0, -5.0, 2.0), Fim: (-2.0, -5.5, 2.0)
 Comprimento: 0.50, Ângulo: 270.00°
 Joelho 45°: 0
 Joelho 90°: 1
 TE Saída Lateral: 0
 TE Passagem Direta: 0
 Identificador numérico no desenho: 14
 Textos associados: ['pt12']
 Peso relativo total: 0.70
 Vazão m^3/s : 0.0002509980
 Diâmetros nominais adotados: [20, 25, 32]
 Comprimentos equivalentes: [1.1, 1.2, 1.5]
 Comprimento virtual (m): [1.6, 1.7, 2.0]
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a Figura 7, a linha 14 possui como conexão associada um joelho 90°, e possui os diâmetros de 20, 25 e 32 milímetros como candidatos, verificando a tabela de perdas de carga localizadas (Anexo A), temos que os comprimentos equivalentes do joelho de 90° para os diâmetros de 20, 25 e 32 são de 1.1, 1.2 e 1.5, respectivamente, sendo estes os valores armazenados no dado “comprimentos equivalentes”, e como temos o comprimento geométrico real de 0.5 para o trecho, este valor é somado a cada um dos valores de comprimentos equivalentes obtidos para a conexão, sendo os resultados apresentados no dado “Comprimento virtual (m)”.

Ao final deste processo, cada diâmetro candidato de cada trecho possui um comprimento virtual total, que representa o comprimento real do tubo acrescido dos comprimentos equivalentes de suas conexões e peças. É este valor final de comprimento que será utilizado na fórmula de perda de carga, garantindo que o cálculo reflita de forma precisa tanto as perdas distribuídas quanto as localizadas, um passo indispensável para a correta formulação das restrições do modelo de otimização.

3.4.10 Cálculos hidráulicos

Com todos os dados geométricos e de demanda definidos, a etapa final da preparação dos dados para o modelo de otimização consiste na execução dos cálculos hidráulicos. O objetivo desta fase é determinar, para cada diâmetro candidato de cada trecho, a perda de carga total que ele irá gerar, sendo está uma das

informações mais importantes para o solver, pois ele compõe a principal restrição técnica do problema.

O programa executa uma sequência de cálculos interdependentes para cada diâmetro candidato de cada trecho da rede. Os resultados de cada cálculo são armazenados em listas dentro da estrutura de dados de cada linha, onde cada posição na lista corresponde a um dos diâmetros candidatos. A sequência de funções e cálculos é a seguinte:

- a) Cálculo da velocidade: utilizando a vazão do trecho em m^3 e a área da seção transversal do tubo em m^2 de cada diâmetro candidato, é aplicada a equação de continuidade (Eq. 2) para determinar a velocidade do fluido em m/s para cada alternativa de diâmetro.
- b) Cálculo do número de Reynolds: com a velocidade e o diâmetro interno de cada diâmetro candidato determinados, é realizado o cálculo do número de Reynolds (Re) aplicando a equação 3, sendo uma grandeza adimensional que caracteriza o regime de escoamento (laminar, transição ou turbulento).
- c) Determinação do fator de atrito: o fator de atrito, que quantifica a resistência ao escoamento causada pela rugosidade da parede interna do tubo, é determinado pelas equações de Swamee-Jain (Eq. 4) ou de Barr (Eq. 5), sendo utilizada a mais adequada com base nas suas restrições de uso, que consideram o número de reynolds e rugosidade relativa de cada diâmetro candidato.
- d) Cálculo da perda de carga unitária: utilizando o fator de atrito obtido no passo anterior, o programa calcula a perda de carga unitária por metro de tubulação, aplicando a equação universal da perda de carga (Eq. 6).
- e) Cálculo da perda de carga total do trecho: por fim, é determinada a perda de carga total para cada diâmetro candidato. Para isso, ela multiplica a perda de carga unitária pelo comprimento virtual total do diâmetro do trecho em análise, que já inclui os comprimentos equivalentes das conexões, obtido na etapa anterior.

Para ilustrar como a estrutura de dados de um trecho é preenchida após a execução destes cálculos, a Figura 8 apresenta o resultado dos cálculos obtidos pelo programa para o trecho 14 da rede da Figura 2.

Figura 8 – Resultado cálculos hidráulicos e custos trecho 14 da rede Figura 2

```

Linha: 14
Início: (-2.0, -5.0, 2.0), Fim: (-2.0, -5.5, 2.0)
Comprimento: 0.50, Ângulo: 270.00°
Joelho 90°: 1
Peso relativo total: 0.70
Vazão m3/s: 0.0002509980
Diâmetros nominais adotados: [20, 25, 32]
Diâmetro interno (m): [0.017, 0.0216, 0.0278]
Área (m2): [0.00022, 0.00036, 0.0006]
Comprimentos equivalentes: [1.1, 1.2, 1.5]
Comprimento virtual (m): [1.6, 1.7, 2.0]
Velocidade fluido (m/s): [1.10581, 0.68497, 0.41351]
Reynolds: [18798.8, 14795.4, 11495.7]
Fator de atrito: [0.03300, 0.03296, 0.03349]
Perda de carga unitária: [0.12099, 0.03649, 0.010496]
Perda de carga: [0.19358, 0.06203, 0.02099]
Perda de carga hidrômetro: []
Preço por diâmetro: [(1.75, 0.0, 0.0, 0.56, 0.0, 0.0, 0.0),
                    (1.975, 0.0, 0.0, 0.69, 0.0, 0.0, 0.0),
                    (4.26, 0.0, 0.0, 2.3, 0.0, 0.0, 0.0)]
Preço total: [2.31, 2.665, 6.56]
Perda de carga redução: [(32.0, 25.0, 0.91, 0.684972, 0.004429),
                        (32.0, 20.0, 2.68, 1.105815, 0.019236),
                        (25.0, 20.0, 0.56, 1.105815, 0.011016)]

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como se pode observar na Figura 8, para cada um dos diâmetros candidatos (20, 25 e 32 mm), o programa calculou e armazenou os respectivos valores de velocidade, Reynolds, fator de atrito e, mais importante, a perda de carga total, sendo alocados na mesma ordem em que os diâmetros candidatos são armazenados, ou seja, o primeiro valor de cada informação armazenada é referente ao primeiro diâmetro candidato, assim como o segundo e o terceiro valor. Um ponto importante é que os valores apresentados na Figura 8 foram arredondados para melhor visualização dos dados, porém dentro do programa eles possuem mais de 10 casas decimais, assim como o valor da vazão apresentado. Com base nestes valores calculados de perda de carga e nos custos de cada opção que serão descritos no tópico seguinte que o modelo de matemático se baseia para realizar a otimização.

3.4.11 Determinação dos custos por diâmetro

Após a conclusão de todos os cálculos hidráulicos, a próxima etapa da preparação dos dados é a determinação do custo associado a cada diâmetro candidato para cada trecho da rede, considerando o tubo e as peças e conexões associadas ao mesmo. Este valor monetário é o dado que alimenta diretamente a função objetivo do modelo de otimização (Eq. 17), sendo, portanto, o principal critério que o solver buscará minimizar.

O programa executa esta tarefa para cada trecho, calculando o custo total para cada um de seus diâmetros candidatos, consultando a planilha de preços unitários (dados sinapi.xlsx, Anexo B) e somando os custos de todos os componentes associados àquele trecho. O custo total de um trecho para um determinado diâmetro é composto pela soma das seguintes parcelas:

- a) Custo da tubulação: é o resultado da multiplicação do comprimento geométrico real do trecho pelo preço por metro do tubo de PVC para o diâmetro em análise.
- b) Custo das conexões: o programa verifica os atributos de conexão do trecho (joelho de 90°, joelho de 45° ou tê) e soma os preços unitários de cada uma dessas peças para o diâmetro correspondente.
- c) Custo das peças especiais: se houver peças como registros (rg ou rgl) ou hidrômetros (hidr) associadas ao trecho, seus custos unitários também são somados ao total de cada diâmetro.

Ao final, o programa armazena os resultados em duas listas dentro da estrutura de dados de cada linha: Preço por diâmetro, que guarda uma tupla com os custos detalhados de cada componente, e Preço total, que armazena a soma final para cada diâmetro candidato.

Para ilustrar este processo, pode-se tomar como exemplo novamente o trecho 14 da rede da Figura 2, cujos dados de custos são apresentados na Figura 8, onde observa-se que o trecho 14 possui um joelho de 90° e um comprimento de 0.50 metros. Para o primeiro diâmetro candidato (20 mm), o programa calcula o custo total da seguinte forma:

Custo do Tubo (20 mm): $0.50 \text{ m} * \text{R\$ } 3,50/\text{m} = \text{R\$ } 1,75$

Custo do Joelho de 90° (20 mm): $1 \text{ un} * \text{R\$ } 0,56/\text{un} = \text{R\$ } 0,56$

Custo Total (20 mm): $\text{R\$ } 1,75 + \text{R\$ } 0,56 = \text{R\$ } 2,31$

A tupla (1.75, 0.0, 0.0, 0.56, 0.0, 0.0, 0.0) associada a lista “preço por diâmetro” detalha esses valores, onde cada posição representa o custo de um componente que pode estar associado ao trecho, sendo [(tubo), (tê), (joelho 45), (joelho 90), (hidrômetro “hidr”), (registro de pressão “rgl”), (registro de gaveta “rg”)], o resultado foi estruturado desta maneira para facilitar a verificação da atribuição de custos de cada componente, posteriormente, todos os valores não nulos presentes na lista são somados e armazenados na lista “preço total” na posição que representa o custo do diâmetro candidato em análise, para a Figura 8, obtemos os valores R\$ 2,31, R\$ 2,665 e R\$ 6,56, relacionados aos diâmetros de 20, 25 e 32 mm, respectivamente.

3.4.12 Dimensionamento e precificação das reduções

O último atributo relacionado a construção da rede hidráulica que precisa ser quantificado são as reduções de diâmetros, pois agregam custos de aquisição das peças e geram perda de carga localizada. Contabilizar este efeito é complexo, pois a existência de uma redução entre dois trechos consecutivos depende da combinação dos diâmetros escolhidos nos mesmos, então para o programa quantificar estes valores, executa um processo de três fases para calcular e validar todas as possíveis perdas e custos associados a reduções.

A primeira fase consiste no cálculo da perda de carga para todas as combinações de diâmetros possíveis entre trechos adjacentes. O algoritmo percorre cada caminho entre os pontos de consumo e o reservatório superior determinados anteriormente, iniciando pelo trecho de saída do reservatório, sendo o trecho localizado a montante de todos os pontos de consumo, e para cada par de trechos consecutivos, analisa todas as combinações entre os diâmetros candidatos do trecho a montante e os do trecho a jusante, considerando os seguintes casos:

- a) Redução válida: se o valor do diâmetro candidato do trecho a montante for maior que o diâmetro do trecho a jusante, o programa consulta a tabela de coeficientes de perda de carga para reduções (Apêndice A), buscando na tabela a linha que possui na coluna “diâmetro nominal entrada” o valor do

diâmetro do trecho a montante, e na coluna “diâmetro nominal saída” o diâmetro do trecho a jusante, o que indica que existe uma peça capaz de fazer a redução dos diâmetros entre os trechos, ou seja, a redução é válida. Então é extraído o valor da coluna “k” desta mesma linha, e o valor da velocidade da água para o diâmetro candidato do trecho a jusante, pois este é o menor diâmetro entre os trechos, e possui o maior valor de velocidade, estes dados são utilizados na equação 7 para determinar a perda de carga localizada gerada pela redução.

- b) Redução inválida: se o valor do diâmetro candidato do trecho a montante for maior que o diâmetro do trecho a jusante, mas não for encontrado na tabela de coeficientes de perda de carga para reduções (Apêndice A) a linha correspondente a essa redução, ou seja, é uma redução impossível de fazer com uma única peça, o programa atribui o valor de perda de carga de 1000 para essa redução.
- c) Não ocorre redução: se o valor do diâmetro candidato do trecho a montante for menor ou igual ao diâmetro do trecho a jusante, não existe redução, então é atribuído o valor zero.

O resultado desta fase é uma lista de tuplas, armazenada em cada trecho, contendo cada combinação possível de diâmetros a sua respectiva perda de carga calculada.

A segunda fase, tem como objetivo atribuir os dados de custo a bucha de redução. O algoritmo percorre a lista de reduções gerada na fase anterior e, para cada combinação válida (cuja perda de carga não é nula ou 1000), ele consulta a base de dados SINAPI (Anexo B) para encontrar o preço da luva de redução correspondente. O valor do preço é então adicionado à tupla de dados daquela combinação.

Por fim, a terceira fase realiza uma limpeza dos dados. Ela remove da lista todas as combinações que se provaram inválidas, ou seja, aquelas cuja perda de carga é nula ou 1000 (redução não válida). Para ilustrar o resultado final deste processo, será analisado o campo “Perda de carga redução” nos dados do trecho 14, apresentados na Figura 8, que apresenta a lista de reduções válidas em relação ao trecho anterior (trecho 13), sendo:

Perda de carga redução: [(32.0, 25.0, 0.91, 0.684972, 0.004429),
 (32.0, 20.0, 2.68, 1.105815, 0.019236),
 (25.0, 20.0, 0.56, 1.105815, 0.011016)]

Esta é a lista final que alimenta o modelo de otimização, contendo apenas as opções viáveis de redução de diâmetros. Cada tupla representa um cenário de redução e armazena os dados no formato: (diâmetro a montante, diâmetro a jusante, preço da luva de redução, velocidade para o diâmetro a jusante, perda de carga). Para os trechos 13 e 14, temos como diâmetros candidatos 20, 25 e 32, pois ambos possuem a mesma vazão. Tomando o trecho 13 como “montante” e o 14 como “jusante”, realizamos as comparações entre pares para todos os diâmetros candidatos entre os trechos, conforme apresentado na Tabela 8:

Tabela 8 – Comparação entre diâmetros candidatos

id	Diâmetros candidatos trecho a montante (13)	Diâmetros candidatos trecho a jusante (14)
1	32	32
2	32	25
3	32	20
4	25	32
5	25	25
6	25	20
7	20	32
8	20	25
9	20	20

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a Tabela 8, temos que nas comparações 1, 4, 5, 7, 8 e 9, não ocorre uma redução entre os diâmetros dos trechos, pois o valor do diâmetro candidato para o trecho a montante é maior ou igual ao diâmetro candidato do trecho a jusante, recebendo o valor 0 para a perda de carga, já para as comparações 2, 3, e 6, temos que o valor do diâmetro candidato para o trecho a montante é menor ao diâmetro candidato do trecho a jusante, ou seja, esta combinação de diâmetros gera uma redução, e ao consultar a tabela de coeficientes de perda de carga para reduções (Apêndice A), temos as linhas que possuem na coluna “diâmetro nominal entrada” o valor do diâmetro do trecho a montante, e na coluna “diâmetro nominal saída” o diâmetro do trecho a jusante, portanto são reduções válidas e que serão devidamente dimensionadas pela equação 7.

Analisando os resultados apresentados na Figura 8, temos que a primeira tupla, por exemplo, representa o cenário onde o trecho 13 tem 32 mm e o trecho 14 é reduzido para 25 mm. Esta opção adicionaria um custo de R\$ 0,91 (preço da luva de redução) e uma perda de carga localizada de 0,004429 m.c.a. ao trecho 14 caso seja selecionada durante o processo de otimização. Ao pré-processar e fornecer estes dados de forma estruturada, o programa capacita o solver a tomar uma decisão globalmente otimizada, balanceando o custo dos tubos e das conexões com o impacto hidráulico de cada escolha. Com a perda de carga e o custo calculados para todas as opções de todos os trechos, o programa possui agora todos os dados necessários para formular o problema de otimização e submetê-lo ao solver, conforme será descrito na seção seguinte.

3.4.13 Otimização do sistema

Com todos os parâmetros técnicos e de custos pré-calculados para cada alternativa de diâmetro de cada trecho de tubulação, o programa avança para a etapa de otimização do sistema, tendo como objetivo aplicar as equações de PLIB descritas no tópico 3.1, para encontrar a única combinação de diâmetros que minimiza o custo total de instalação da rede, ao mesmo tempo que satisfaz rigorosamente todas as restrições hidráulicas e normativas.

O processo de otimização implementado neste trabalho é um sistema híbrido, que combina a otimização matemática com uma pequena fase final de refinamento heurístico. Esta abordagem permite resolver um modelo matemático mais simples, e posteriormente ajusta a solução obtida para garantir sua robustez e viabilidade prática. Todo este trabalho é realizado pela biblioteca Pyomo, utilizada em Python para construir as equações do modelo matemático, de forma que sejam interpretáveis pelo programa e pelo o solver CBC para encontrar a solução ótima do problema linearizado. O processo pode ser dividido em duas etapas principais, a formulação e resolução do modelo, e o pós-processamento da solução.

3.4.13.1 *Formulação e Resolução do Modelo de Otimização*

Nesta etapa, o programa formula e resolve o problema de PLIB descrito no tópico 3.1, porém, os custos e perdas de carga associados às reduções de diâmetro não são incluídos diretamente na função objetivo e nas restrições, pois como o solver possui a liberdade de testar diversas combinações de diâmetros para cada trecho da rede, o esforço computacional de atualizar os valores de custos e perdas de carga a cada escolha de diâmetro realizada durante as iterações é muito elevado, sendo adotada essa estratégia para manter a linearidade e a simplicidade do modelo.

O primeiro passo é traduzir o problema de engenharia para uma linguagem matemática, para isso, são definidas dentro do programa as variáveis de decisão, função objetivo e o conjunto de restrições descritos no tópico 3.1, sendo estruturadas da seguinte forma:

- a) Variáveis de decisão: a decisão fundamental do problema é: "Para cada trecho i da tubulação, qual alternativa de diâmetro j deve ser escolhida?", para representar isso, o programa cria uma variável de decisão binária X_{ij} , que conforme a equação 21, esta variável só pode assumir o valor 1 se a alternativa de diâmetro j for escolhida para o trecho i , e 0 caso contrário.
- b) Função objetivo: o objetivo é determinar qual é o diâmetro que deve ser escolhido para cada trecho da rede que minimize o custo total, obtido pela soma dos custos de todos os componentes relacionados a cada escolha de diâmetro. A função objetivo (Eq. 17) realiza o somatório do custo pré-calculado de cada alternativa de diâmetro j para cada trecho i (C_{ij}) multiplicado por sua respectiva variável de decisão X_{ij} . Como a restrição descrita na equação 18 garante que apenas uma variável X_{ij} será igual a 1 para cada trecho i , ou seja, somente um diâmetro é escolhido entre os diâmetros candidatos de cada trecho, o somatório da função objetivo resulta no custo total da combinação de diâmetros escolhida para cada trecho.

Restrições: No caso deste problema, as restrições descritas no tópico 3.1 são as regras que garantem que a solução final seja tecnicamente viável e que atenda aos parâmetros estabelecidos pela norma, sendo implementadas da seguinte forma:

- a) Restrição de seleção única: a equação 18 garante que, para cada trecho i da tubulação, somente um diâmetro seja escolhido, para isso, ela impõe que a soma das variáveis X_{ij} para um mesmo trecho i deve ser igual a 1.
- b) Restrição de perda de carga máxima: esta é a principal restrição hidráulica do modelo. A equação 19 assegura que, para cada caminho de entre o reservatório e o ponto de consumo, a soma das perdas de carga de todos os trechos que compõem o caminho não ultrapasse a perda de carga máxima admissível para aquele ponto, garantindo que a pressão mínima de funcionamento do aparelho seja atendida.
- c) Restrição de monotonicidade: a equação 20 impõe uma regra de boa prática da engenharia hidráulica: o diâmetro dos tubos, no sentido do fluxo de água, não pode aumentar. Esta restrição impede que o modelo gere soluções ineficientes (como um tubo de 25 mm a montante de um de 32 mm) e reduz o espaço de busca do otimizador.
- d) Restrição de reduções inválidas: com base no processamento de dados das reduções discutidos no tópico 3.4.12, esta restrição (Eq. 22) proíbe o solver de escolher combinações de diâmetros entre trechos adjacentes que não sejam construtivamente viáveis, ou seja, para as quais não exista uma luva de redução comercial disponível.

Uma vez que as equações do modelo matemático estão completamente formuladas utilizando a biblioteca Pyomo, o modelo é entregue ao solver CBC. Este solver, especializado em problemas de programação inteira mista, utiliza algoritmos avançados (como Branch and Cut) para explorar o vasto espaço de combinações de diâmetros possíveis e encontrar, de forma matematicamente garantida, a solução que minimiza a função objetivo sem violar nenhuma das restrições.

3.4.13.2 *Pós processamento e ajuste da solução*

A solução obtida pelo CBC é financeiramente ótima para o problema linearizado, mas hidraulicamente incompleta, pois ainda não considera o impacto da perda de carga e custos das reduções de diâmetro entre trechos subsequentes, então a fase de pós-processamento é responsável por finalizar e validar a solução. O

programa executa quatro etapas cruciais de tratamento e apresentação dos resultados, como segue:

- 1) Atribuição de custo e perda de carga das reduções: o primeiro passo consiste em uma varredura completa da solução ótima, onde são identificados individualmente para cada caminho da rede todas as reduções de diâmetro entre trechos subsequentes. A cada redução encontrada, o programa adiciona ao trecho de menor diâmetro o custo e a perda de carga localizada da respectiva luva de redução, que foram calculadas anteriormente. Este acréscimo na perda de carga total do caminho em análise pode tornar a solução hidraulicamente inviável, com a pressão disponível no ponto de consumo abaixo do mínimo exigido, pois o processo de otimização pode encontrar soluções que atendem às restrições de pressão mínima no limite, ou seja, com margens de segurança de pressão praticamente nulas.
- 2) Verificação e ajuste de segurança: quando a atribuição das perdas de carga das reduções resulta em margens de segurança de pressão negativas, é aplicada uma rotina heurística projetada para corrigir o problema de forma iterativa, como segue:
 - a. Identificação do ponto crítico: para cada caminho hidraulicamente inviável, é localizado o ponto exato onde ocorreu a última redução de diâmetro antes de chegar ao ponto de consumo, sendo este o primeiro trecho de menor diâmetro no sentido do fluxo, e é o local mais eficiente para se realizar um ajuste, pois o aumento de diâmetro neste trecho reduz a perda de carga acumulada para o ponto de consumo em análise, evitando interferir nos demais pontos.
 - b. Aumento incremental do diâmetro: o algoritmo então remove a perda de carga e o custo associado a redução de diâmetro do trecho encontrado no passo anterior, que havia sido atribuída ao trecho no passo 1, e aumenta o seu diâmetro para a próxima bitola comercial disponível dentre os diâmetros candidatos do trecho. A escolha do novo diâmetro é restrita: ele deve ser maior que o diâmetro atual e menor ou igual ao diâmetro do trecho a montante, evitando a criação de “expansões” indesejadas de diâmetros, para preservar a

monotonicidade do traçado. E caso o aumento de diâmetro do trecho resultar em uma redução inválida, conforme descrito no tópico 3.4.12, a função testa o próximo diâmetro disponível nos diâmetros candidatos do trecho, até encontrar uma redução válida.

- c. Recálculo localizado de reduções e verificação: após a atualização do diâmetro, é verificada apenas a existência de reduções em relação aos trechos a montante e a jusante daquele que teve seu diâmetro aumentado, sem alterar as demais reduções de diâmetro atribuídas anteriormente, evitando problemas de alocação indevida de reduções, adicionando os custos e perdas de carga das reduções existentes ao trecho modificado. Isso garante que, no caso onde o aumento de diâmetro do trecho resultar em um valor inferior ao diâmetro do trecho a montante, mas superior ao do trecho a jusante, ambas as reduções sejam corretamente contabilizadas, sem interferir nas outras reduções válidas atribuídas anteriormente no mesmo caminho. A margem de segurança é então reavaliada.
- d. Iteração até a convergência: se a margem de segurança se tornar positiva, o ajuste para aquele caminho é concluído. Caso contrário, o processo retorna ao passo "a", identificando a "nova" última redução e repetindo o ciclo até que a restrição de pressão seja satisfeita ou o limite de iterações seja atingido.

- 3) Extração e apresentação dos resultados: o programa extrai os resultados finais obtidos após o ajuste, identificando qual variável X_{ij} foi selecionada (possui o valor igual a 1) para cada trecho, apresentando o conjunto de diâmetros escolhidos para todos os trechos pela solução otimizada. O programa consolida esta informação em uma tabela, como a apresentado na Figura 8.

Ao final deste processo híbrido, o resultado entregue pelo programa é uma configuração de rede completamente dimensionada, que não é apenas financeiramente otimizada pelo solver, mas também hidraulicamente robusta e segura, graças ao refinamento heurístico de pós-processamento.

3.4.14 Orçamento manual e análise comparativa

Após a determinação da solução otimizada, uma etapa fundamental para quantificar os benefícios da otimização é compará-la, em termos de custo e desempenho hidráulico, com uma solução de dimensionamento pré existente para o mesmo projeto. Para este fim, o programa oferece uma funcionalidade de orçamento e análise comparativa entre as opções de dimensionamento do projeto, permitindo que o usuário insira manualmente a configuração dos diâmetros selecionados no outro dimensionamento realizado, e receba uma análise detalhada de seu custo e distribuição das velocidades nas tubulações. O processo é executado da seguinte forma:

- 1) Entrada de dados do usuário: o programa solicita que o usuário forneça a lista de diâmetros para cada trecho de tubulação da rede, que deve estar organizada na mesma sequência apresentada na tabela “resultados da otimização – diâmetros escolhidos e custos” que o programa apresenta no terminal após finalizar o processo de otimização, o exemplo dessa tabela é apresentado na Figura 9. A interface é projetada para facilitar a inserção, permitindo, por exemplo, que os dados sejam copiados diretamente de uma planilha e colados no terminal do programa, onde são organizados os dados de entrada.
- 2) Cálculo do custo da solução manual: com os diâmetros manuais definidos, o programa realiza um novo ciclo de cálculo de custos. Para cada trecho de tubulação, o diâmetro inserido pelo usuário é comparado com os diâmetros candidatos do mesmo trecho, pois se este diâmetro foi considerado durante os cálculos de determinação dos custos que alimentaram as equações de otimização, atribuímos o mesmo valor de custo. Mas caso este diâmetro não esteja disponível entre os diâmetros candidatos, seu custo total é determinado somando o preço do tubo (comprimento real multiplicado pelo preço por metro) e o custo de todas as conexões e peças especiais associadas ao trecho, que foram definidas durante o processo de dimensionamento, utilizando a mesma lógica e base de dados do SINAPI (Anexo B), empregada no cálculo dos custos da solução otimizada.

- 3) Análise gráfica comparativa: o principal resultado desta etapa é a visualização dos dados. O programa gera um painel com múltiplos gráficos que permitem uma comparação direta e intuitiva entre a solução ótima e a do usuário:
- a. Gráficos de custo e comprimento por diâmetro: são feitos dois gráficos de barras, um para o comprimento total de tubos por diâmetro, permitindo uma análise dos materiais empregados, e outro para o custo total por diâmetro, que detalha a composição do custo. A comparação visualiza se a solução ótima favorece tubos de menor diâmetro e evidencia o impacto econômico da otimização.
 - b. Análise da distribuição das velocidades: o programa gera um histograma que compara a distribuição das velocidades do fluido para a solução otimizada e a do usuário. Para a solução otimizada, os valores de velocidade são extraídos diretamente dos cálculos realizados durante o dimensionamento, refletindo as condições operacionais da configuração otimizada. Para a solução manual, primeiro é verificado se o diâmetro informado pelo usuário para um determinado trecho corresponde a um dos diâmetros candidatos que já foram previamente calculados. Em caso afirmativo, a velocidade pré-calculada correspondente é utilizada. Contudo, se o usuário informar um diâmetro que não foi originalmente considerado, a função calcula a velocidade através da equação da continuidade (Eq. 2). Para isso, ela utiliza a vazão já atribuída àquele trecho, e obtém a área da seção transversal a partir da tabela vazões máximas (Apêndice A), assegurando que mesmo diâmetros não previstos inicialmente no processo de otimização sejam avaliados de forma hidraulicamente consistente. Este gráfico é fundamental para analisar o comportamento hidráulico de cada abordagem, permitindo identificar se as soluções tendem a operar com velocidades mais altas ou mais baixas, além de apresentar visualmente se as soluções operam abaixo do limite máximo de velocidade, representado por uma linha vertical vermelha no gráfico, que pode ser ajustada, conferindo flexibilidade para a

análise de cenários com diferentes de velocidades máximas permitidas.

- c. Análise da distribuição das margens de segurança: por fim, o programa cria um histograma que ilustra a distribuição das margens de segurança para os caminhos entre o reservatório e os pontos de consumo da rede do projeto. Este gráfico é crucial para avaliar a eficiência da solução otimizada em evitar superdimensionamentos, ou seja, com margens mais próximas de zero, além de auxiliar na verificação do critério de pressão mínima, pois se todas as margens de segurança são maiores que zero, temos que todos os pontos de consumo possuem pressão superior a mínima.

Esta funcionalidade, portanto, serve como a prova final do valor prático e econômico do método de otimização proposto, transformando o programa em uma ferramenta robusta para o auxílio no processo de tomada de decisão em projetos hidráulicos prediais ao focar na quantificação da economia.

3.4.15 Apresentação do resultado final

Após a execução do modelo de otimização de PLIB e da heurística de ajuste relacionados as reduções de diâmetros, a etapa final do processo computacional consiste em apresentar a solução encontrada de forma clara e organizada, onde são consolidados os dados dos diâmetros escolhidos para cada trecho de tubulação e os custos relacionados, que são exibidos em uma tabela de resumo, que serve como a especificação técnica do projeto otimizado.

A formatação desta saída foi projetada para ser intuitiva, permitindo que o usuário identifique facilmente qual diâmetro deve ser utilizado em cada trecho da rede e qual o custo associado. Para ilustrar o formato do relatório final, a Figura 9 apresenta o resultado da otimização para a rede de exemplo da Figura 2.

Figura 9 – Resultado otimização rede Figura 2

RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO - DIÂMETROS ESCOLHIDOS E CUSTOS					
ID	Índice	Coordenadas Iniciais	Alt.	Diâmetro	Preço (R\$)
1	6	(0.0, 0.0, 5.0)	2	25	R\$ 3.95
2	1	(0.0, -1.0, 5.0)	2	25	R\$ 8.59
3	14	(0.0, -1.0, 3.0)	2	25	R\$ 41.49
4	2	(0.0, -1.0, 1.0)	2	25	R\$ 4.64
5	7	(0.0, -2.0, 1.0)	2	25	R\$ 202.34
6	3	(0.0, -3.0, 1.0)	2	25	R\$ 9.04
7	4	(2.0, -3.0, 1.0)	1	20	R\$ 5.18
8	8	(2.0, -3.0, 2.0)	1	20	R\$ 17.37
9	5	(2.0, -3.0, 3.0)	1	20	R\$ 2.31
10	9	(0.0, -3.0, 1.0)	1	20	R\$ 4.62
11	10	(-1.0, -3.0, 1.0)	1	20	R\$ 6.03
12	11	(-2.0, -4.0, 1.0)	1	20	R\$ 4.58
13	12	(-2.0, -5.0, 1.0)	1	20	R\$ 4.06
14	13	(-2.0, -5.0, 2.0)	1	20	R\$ 2.31
CUSTO TOTAL DO SISTEMA: R\$ 316.51					

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 9, a tabela de resultados é estruturada para fornecer um panorama completo da solução, contendo as seguintes colunas:

- 1) ID: este é o número de identificação original do trecho da tubulação, conforme definido no desenho CAD. Esta coluna é a chave para o rastreamento, permitindo que o usuário localize facilmente cada segmento no projeto original.
- 2) Índice: um identificador sequencial interno do programa, utilizado para diferenciar as linhas que possuem o mesmo id no desenho, mas com coordenadas iniciais diferentes, especialmente útil quando o projeto possui pavimentos tipo, sendo necessário identificar somente os trechos de um pavimento que pode ser copiado para representar a rede hidráulica dos demais pavimentos sem a necessidade de “renomear” os trechos com outros números.
- 3) Coordenadas Iniciais: apresenta a coordenada (X, Y, Z) do ponto de início de cada trecho, auxiliando na sua localização espacial dentro da rede. Para garantir uma apresentação lógica e previsível, a tabela é ordenada numericamente pelo ID e, para trechos com o mesmo índice, pela coordenada Z em ordem decrescente.
- 4) Alt. (alternativa): indica qual das alternativas de diâmetro pré-selecionadas para aquele trecho foi a escolhida pelo otimizador. Um valor "2", por

exemplo, significa que a segunda opção de diâmetro, dentre as disponíveis, foi selecionada.

- 5) Diâmetro: o diâmetro nominal (em mm) da solução ótima para aquele trecho específico.
- 6) Preço (R\$): o custo final e consolidado para o trecho, já incluindo o valor do tubo, das conexões (como joelhos ou têes) e das luvas de redução, caso tenham sido necessárias na solução final, que foram obtidos através do processamento dos dados da planilha de dados do SINAPI (Anexo B).

Ao final da tabela, o programa exibe o custo total do sistema, sendo este valor a principal métrica do processo, pois representa o valor minimizado pela função objetivo, ou seja, o menor custo possível para a instalação da rede que satisfaz todas as premissas técnicas e normativas impostas no modelo. Este relatório, portanto, traduz a solução matemática em uma especificação de projeto prática e pronta para a execução.

3.4.16 Parametrização de dados e flexibilidade do programa

Uma das principais vantagens da ferramenta computacional desenvolvida é a sua flexibilidade para a análise de diferentes cenários de projeto. A arquitetura do programa, que centraliza grande parte dos dados de entrada em planilhas externas, permite que o usuário ajuste facilmente os principais parâmetros do modelo de otimização, viabilizando a exploração de múltiplos cenários e análises de sensibilidade. Esta parametrização foi fundamental para a construção dos diferentes cenários aplicados no estudo de caso apresentados no Capítulo 4. Os principais ajustes que o usuário pode realizar, e que foram utilizados neste trabalho, são:

- a) Ajuste das pressões mínimas: a restrição de pressão mínima em cada ponto de consumo, um dos parâmetros mais influentes no custo final, pode ser diretamente modificada na coluna "pressão mínima (m.c.a)" da planilha pesos relativos.xlsx (Anexo A). Isso permite simular cenários com diferentes níveis de exigência de desempenho.
- b) Ajuste da velocidade máxima: a velocidade máxima permitida na rede, que impacta diretamente a seleção de diâmetros, pode ser ajustada recalculando-se a coluna "vazão (m^3/s)" na planilha vazões máximas.xlsx (Apêndice A). O valor de vazão máxima que atende ao novo critério de

velocidade é obtido pela aplicação da equação da continuidade (Eq. 2), ou seja, multiplicando o valor da nova velocidade máxima desejada pela área da seção transversal do tubo, apresentada na coluna “área (m^2)”.

- c) Seleção de diâmetros candidatos: o programa permite ampliar o espaço de busca do otimizador ao incluir mais diâmetros candidatos para cada trecho. Isso é feito por meio de uma pequena alteração no código-fonte do programa, permitindo que o solver explore um leque maior de possibilidades de diâmetros para minimizar o custo.

Além desses parâmetros centrais, a ferramenta foi projetada para ser facilmente atualizável. A substituição de dados de custo, por exemplo, pode ser feita diretamente na planilha dados sinapi.xlsx (Anexo B), seja com novos valores do próprio SINAPI ou com dados de orçamentos reais. Da mesma forma, a inclusão de novos tipos de aparelhos sanitários ou pontos de consumo resume-se a adicionar novas linhas de dados na planilha pesos relativos.xlsx (anexo A).

Essa estrutura modular e parametrizável consolida o programa não apenas como uma ferramenta de otimização, mas como um laboratório virtual para a análise de sensibilidade e o estudo do trade-off entre custo e desempenho em projetos hidráulicos prediais.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos com a aplicação da ferramenta de otimização desenvolvida ao estudo de caso do edifício residencial descrito na seção 3.3. Para avaliar a robustez e a sensibilidade do modelo a diferentes critérios de projeto, foram analisados três cenários distintos, variando os parâmetros de velocidade máxima de escoamento e pressão mínima nos pontos de consumo.

Os cenários 1 e 2 mantêm a pressão mínima em 1 m.c.a, conforme estabelecido pela NBR 5626:2020 como o valor mínimo obrigatório, com velocidade máxima de 3 m/s e 2 m/s, respectivamente. Essa análise permite quantificar isoladamente o impacto da restrição de velocidade sobre o custo da instalação. O cenário 3, por sua vez, eleva a pressão mínima para 2 m.c.a. mantendo a velocidade de 2 m/s, possibilitando avaliar o custo associado a critérios de desempenho mais exigentes do que o mínimo normativo.

Em todos os cenários, a solução ótima encontrada pelo programa é comparada com uma solução elaborada manualmente pelo projetista responsável pelo projeto original, que permanece inalterada nos três casos. O objetivo é demonstrar a capacidade do modelo de adaptar-se a diferentes requisitos técnicos, quantificando o trade-off entre custo e critérios de desempenho, além de validar a ferramenta como um sistema robusto de apoio à decisão para o dimensionamento de redes hidráulicas prediais.

4.1 CENÁRIO 1 - VELOCIDADE MÁXIMA DE 3 M/S E PRESSÃO MÍNIMA DE 1 M.C.A

O primeiro cenário adota os parâmetros limites recomendados pela NBR 5626, sendo a velocidade máxima de 3 m/s e pressão mínima de 1 m.c.a. (10 kPa) em todos os pontos de consumo. Esses valores representam uma condição de projeto que busca extrair o que seria o menor custo possível para a rede hidráulica que ainda seja capaz de atender aos critérios da norma.

4.1.1 Cenário 1 - Análise de Custos e Distribuição de Diâmetros

A Figura 10 sintetiza os resultados financeiros do Cenário 1, onde o custo total para a instalação da rede dimensionada manualmente foi de R\$ 36.928,32, enquanto a solução ótima apresentou um custo de R\$ 26.589,27, resultando em uma economia de R\$ 10.339,04, representando uma redução de aproximadamente 28% no custo total de materiais, um valor expressivo que demonstra o potencial da ferramenta para otimizar projetos hidráulicos. É importante observar que ambas as soluções possuem o mesmo comprimento total de tubulação (2.052,5 m), o que confirma que a economia não decorre de simplificações ou reduções na estrutura da rede, mas sim de uma alocação mais eficiente dos diâmetros disponíveis.

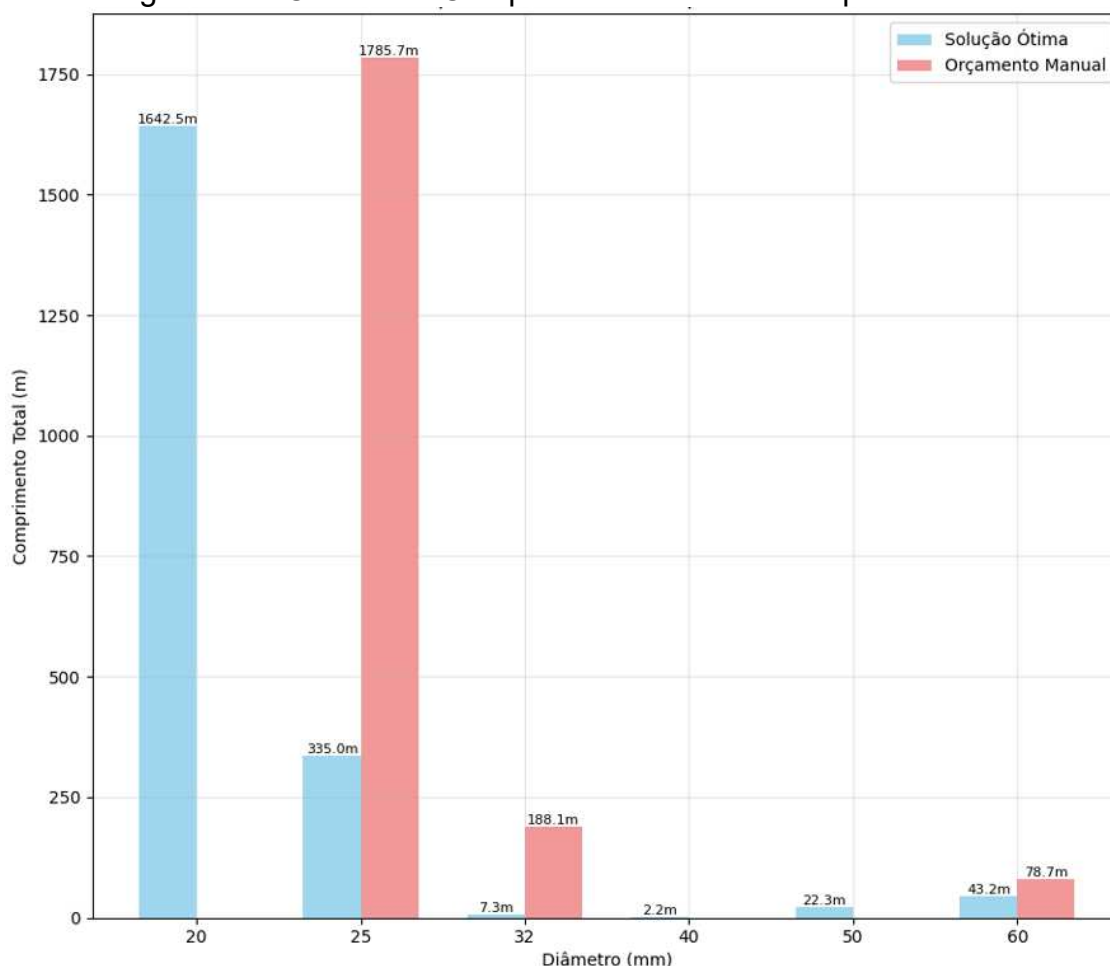
Figura 10 – Cenário 1: Resumo comparativo entre solução ótima e orçamento manual

Comparação: Solução Ótima vs Orçamento Manual
 Custo Total - Ótimo: R\$26589.27 | Manual: R\$36928.32 | Diferença: R\$10339.04
 Comprimento Total - Ótimo: 2052.5m | Manual: 2052.5m

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 11 apresenta a distribuição dos comprimentos de tubulação por diâmetro para a solução ótima e para o orçamento manual. A análise comparativa revela a estratégia fundamental da otimização, pois enquanto a solução manual concentra 1.785,7 m de tubos no diâmetro de 25 mm (representando 87% do comprimento total), a solução ótima redistribui essa composição de forma mais eficiente, utilizando 1.642,5 m de tubos de 20 mm e reduzindo drasticamente o uso de tubos de 25 mm para apenas 335,0 m. Essa mudança estrutural na distribuição de diâmetros é a principal origem da economia de custos observada, pois aproveita os trechos onde a vazão é baixa para utilizar diâmetros menores e mais econômicos.

Figura 11 – Cenário 1: Comprimento total de tubos por diâmetro

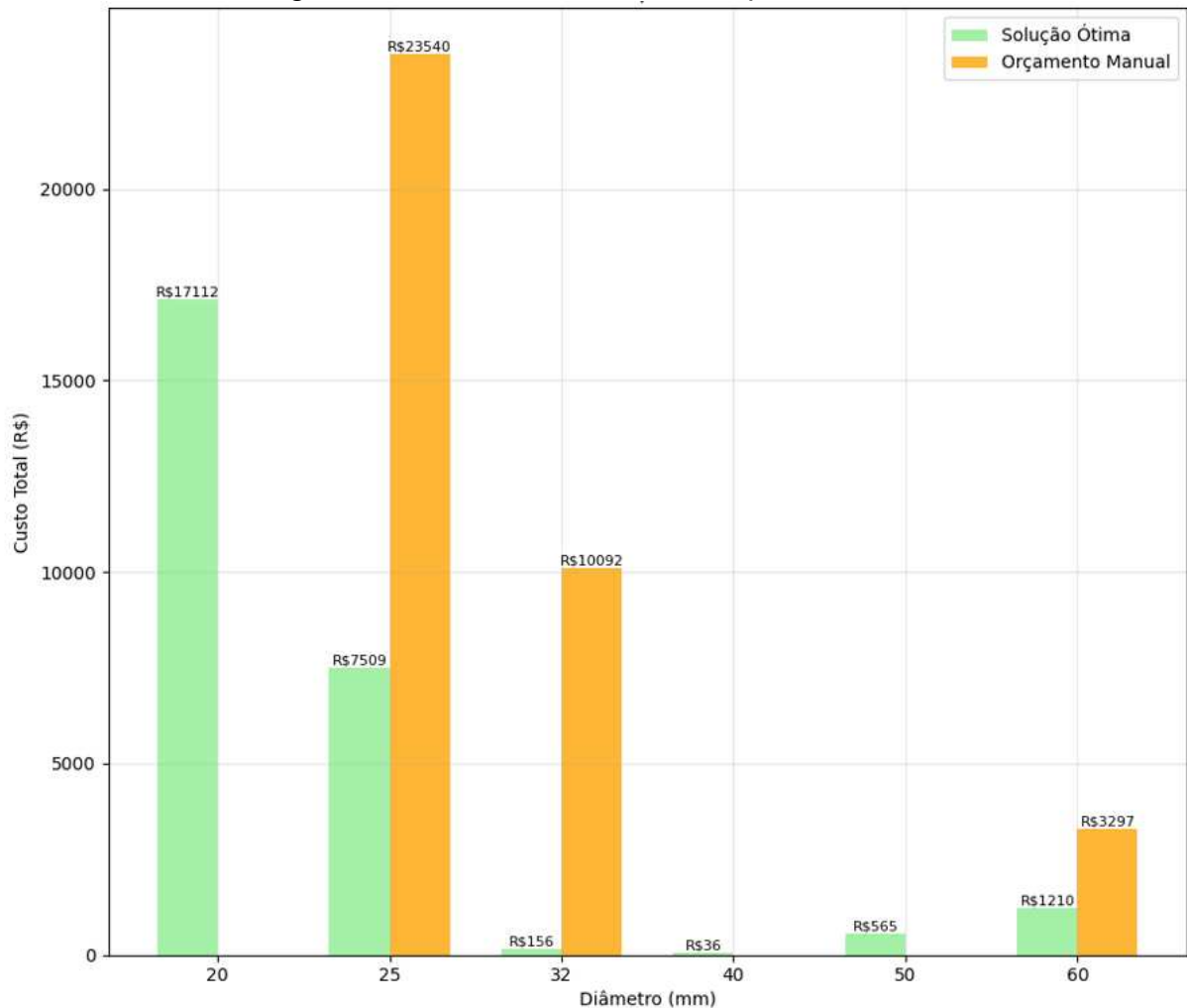


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 12 apresenta a composição dos custos por diâmetro, traduzindo em valores monetários o impacto da redistribuição observada na Figura 11. Na solução manual, o custo associado aos tubos de 25 mm atinge R\$ 23.540,00, valor muito

superior ao custo de todos os demais diâmetros somados, enquanto a solução ótima distribui os custos de forma mais equilibrada, com R\$ 17.112,00 em tubos de 20 mm, R\$ 7.509,00 em tubos de 25 mm e valores residuais em diâmetros maiores. Essa composição mais diversificada não apenas reduz o custo total, mas também indica um dimensionamento mais ajustado às demandas reais de cada trecho da rede.

Figura 12 – Cenário 1: Custo total por diâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

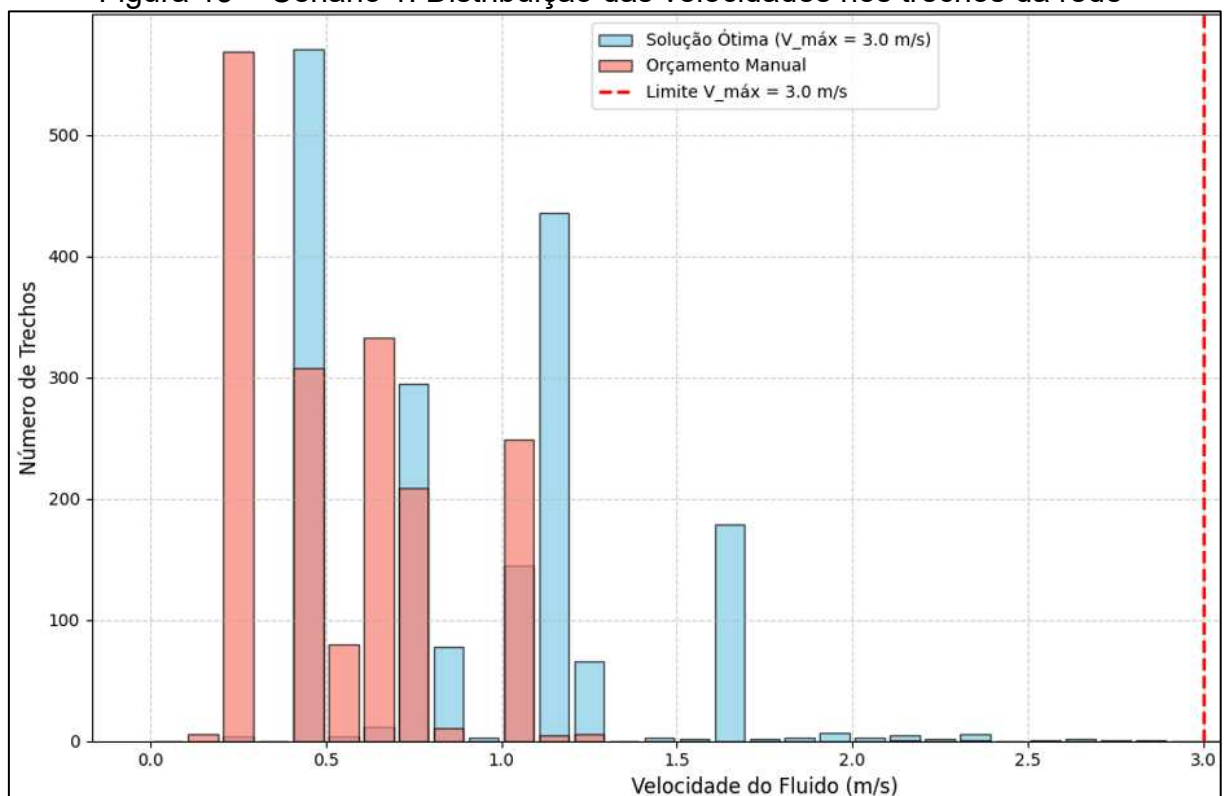
4.1.2 Cenário 1 - Distribuição de Velocidades nos Trechos da Rede

O histograma da Figura 13 é essencial para validar a estratégia de otimização e compreender o comportamento hidráulico de cada solução. Na solução manual (barras em salmão), observa-se que a grande maioria dos trechos opera em velocidades extremamente baixas, concentradas na faixa de 0,2 a 0,8 m/s, o que é uma evidência visual do superdimensionamento, pois ao adotar um diâmetro padrão

de 25 mm como medida de segurança, o projetista acaba subutilizando a capacidade hidráulica da tubulação em grande parte da rede, já que trechos com baixa vazão, que poderiam operar adequadamente com tubos de 20 mm, acabam recebendo o mesmo diâmetro dos trechos de maior demanda, resultando em velocidades muito abaixo do ideal.

A solução ótima (barras em azul) apresenta uma distribuição mais eficiente, embora também possua muitos trechos com baixa velocidade (correspondentes aos ramais finais de baixa vazão, onde o programa adotou o diâmetro de 20 mm), ela explora uma faixa de velocidades mais ampla e melhor distribuída, tendo um número significativo de trechos operando entre 1,0 e 1,8 m/s, demonstrando que o otimizador está explorando a capacidade dos diâmetros menores até um limite hidraulicamente seguro, antes de optar por diâmetros maiores. Essa estratégia maximiza o aproveitamento da capacidade de cada tubulação, gerando economia de custos sem comprometer o desempenho técnico. É importante notar que um número muito pequeno de trechos opera próximo ao limite de 3 m/s, sendo um ponto relevante para a análise do Cenário 2.

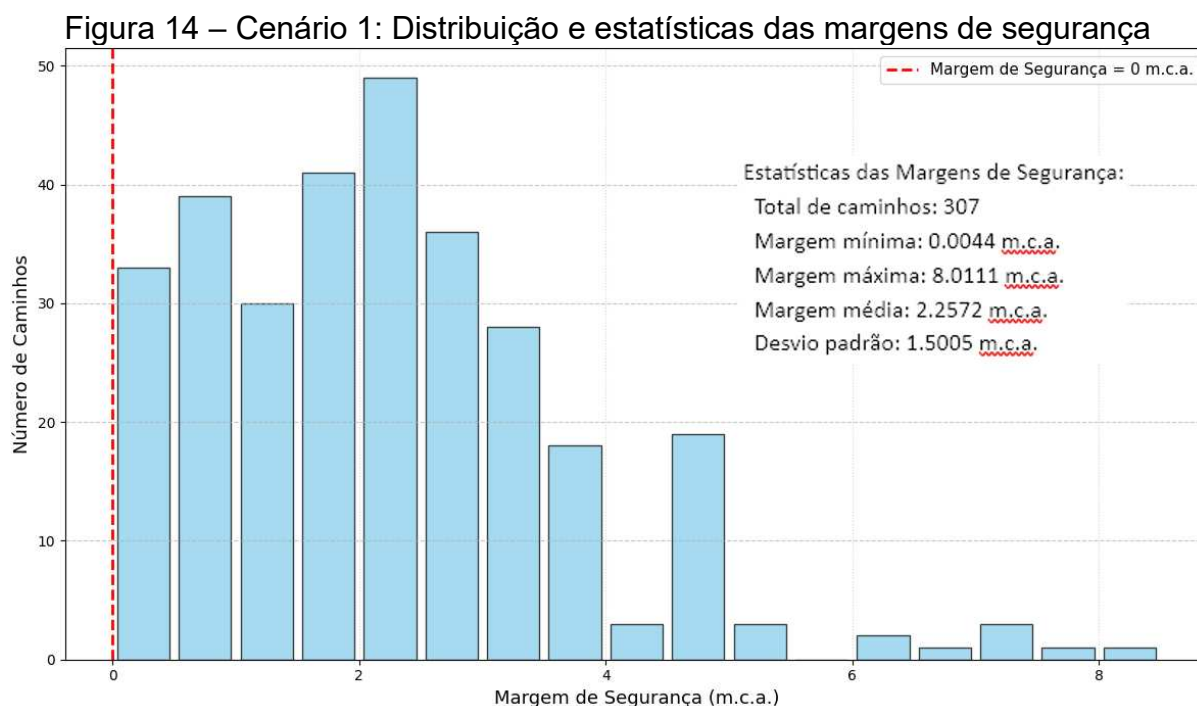
Figura 13 – Cenário 1: Distribuição das velocidades nos trechos da rede



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Cenário 1 - Distribuição de Margens de Segurança

A Figura 14 apresenta o histograma de distribuição das margens de segurança, definida como a diferença entre a perda de carga máxima admissível (pressão estática – pressão mínima no ponto) e a perda de carga efetiva em cada caminho hidráulico da rede. Esse indicador permite avaliar o quão próximo da restrição de pressão mínima a solução está operando, demonstrando a eficiência do programa. As estatísticas revelam uma margem média de 2,26 m.c.a, margem mínima de 0,0044 m.c.a, o que indica que a solução ótima consegue manter uma margem de segurança positiva em todos os caminhos, respeitando rigorosamente a restrição de pressão mínima de 1 m.c.a. margem máxima de 8,01 m.c.a com desvio padrão de 1,50 m.c.a, e um total de 307 caminhos hidráulicos analisados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 CENÁRIO 2 - VELOCIDADE MÁXIMA DE 2 M/S E PRESSÃO MÍNIMA DE 1 M.C.A.

O segundo cenário impõe uma restrição mais severa quanto à velocidade máxima do fluido, limitando em 2 m/s. Esse critério é frequentemente adotado quando se deseja maior conforto acústico e menor desgaste das tubulações, reduzindo ruídos

e prolongando a vida útil da instalação, a pressão mínima nos pontos de consumo permanece em 1 m.c.a, atendendo ao requisito normativo. O objetivo deste cenário é isolar o efeito da velocidade sobre o custo da solução, comparando diretamente com o Cenário 1.

4.2.1 Cenário 2 - Análise de Custos e Distribuição de Diâmetros

A Figura 15 apresenta o resultado financeiro central deste cenário, o custo total da solução manual permanece em R\$ 36.988,68, enquanto a solução ótima apresentou um custo de R\$ 26.705,92, resultando em uma economia de R\$ 10.282,76. Isso representa uma redução de 27,8% no custo total de materiais. O comprimento total de tubulação mantém-se idêntico (2.052,5 m) em ambas as soluções, confirmando que a economia provém exclusivamente da redistribuição de diâmetros.

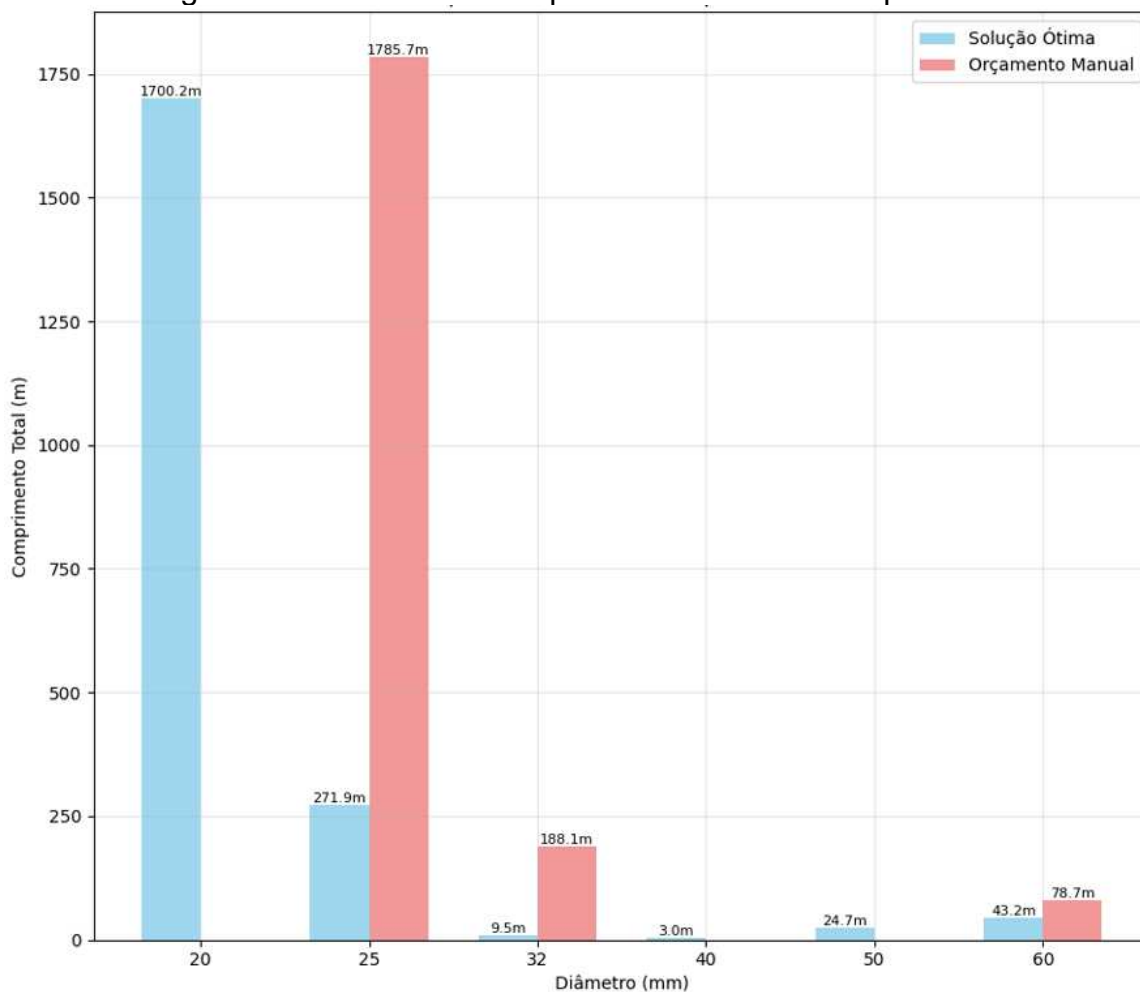
O resultado mais notável, no entanto, é a comparação com o Cenário 1, pois a imposição de uma restrição de velocidade 33% mais severa (de 3 m/s para 2 m/s) resultou em um aumento de custo de apenas R\$ 116,65 na solução ótima (de R\$ 26.589,27 no Cenário 1 para R\$ 26.705,92 no Cenário 2). Trata-se de um aumento de apenas 0,44%, um resultado que, à primeira vista, pode parecer contraintuitivo, mas que será esclarecido pela análise da distribuição de velocidades.

Figura 15 – Cenário 2: Resumo comparativo entre solução ótima e orçamento manual

Comparação: Solução Ótima vs Orçamento Manual
 Custo Total - Ótimo: R\$26705.92 | Manual: R\$36988.68 | Diferença: R\$10282.76
 Comprimento Total - Ótimo: 2052.5m | Manual: 2052.5m
 Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 16 apresenta a distribuição de comprimentos de tubulação por diâmetro. Comparando com o Cenário 1 (Figura 10), observa-se que a mudança foi sutil, aumentando o uso de tubos de 20 mm de 1.642,5 m para 1.700,2 m, e de diâmetros maiores, enquanto o uso de tubos de 25 mm foi reduzido de 335,0 m para 271,9 m, indicando que o modelo precisou fazer ajustes localizados em poucos trechos para atender à nova restrição, mantendo a estratégia geral de priorizar diâmetros menores sempre que possível.

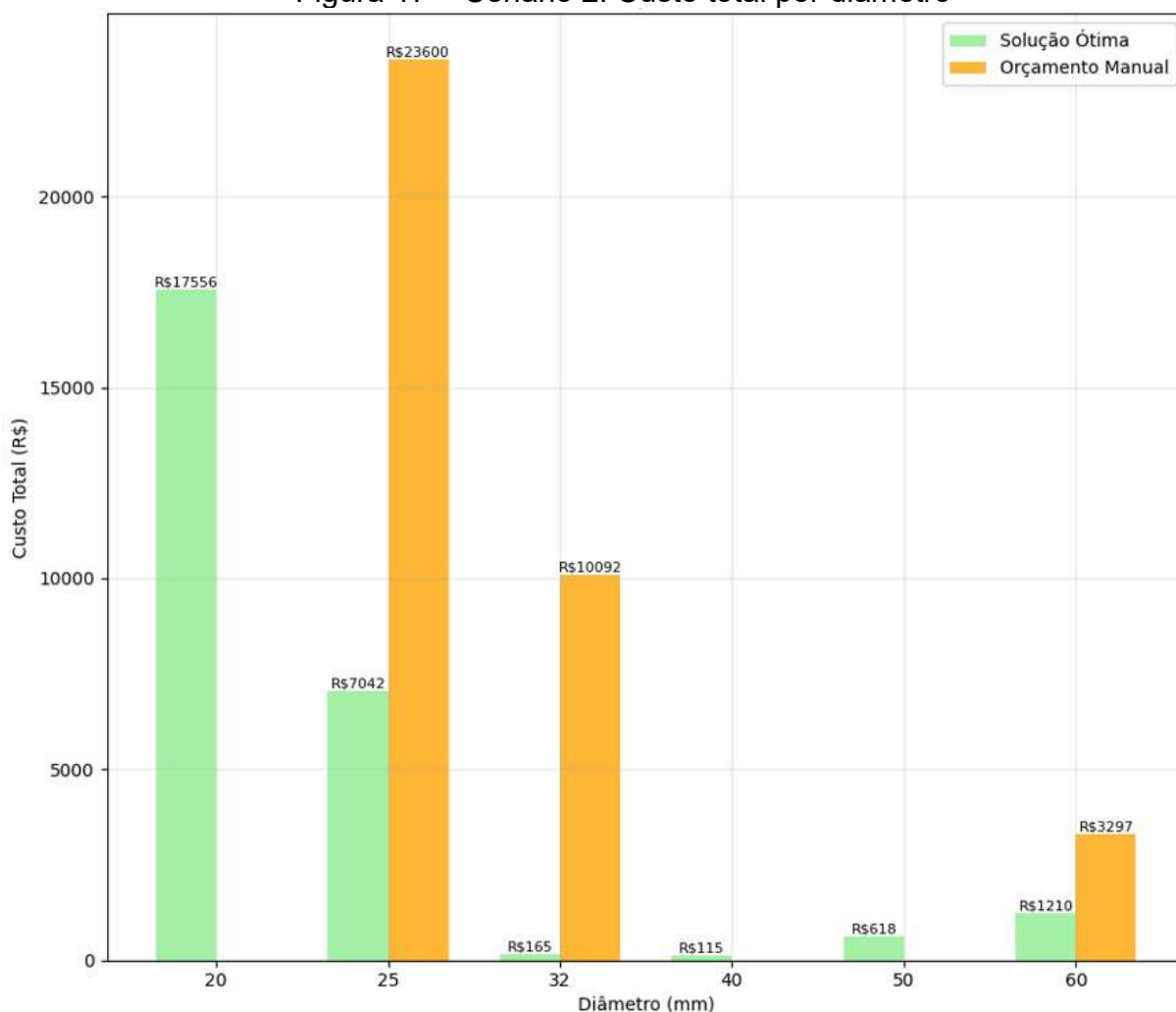
Figura 16 – Cenário 2: Comprimento total de tubos por diâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 17 traduz em custos a redistribuição de diâmetros observada na Figura 16, onde temos que o custo associado aos tubos de 20 mm aumentou ligeiramente para R\$ 17.556,00, enquanto o custo dos tubos de 25 mm foi reduzido para R\$ 7.042,00. A pequena diferença de R\$ 116,65 entre os dois cenários reflete o fato de que apenas um número restrito de trechos precisou ter seus diâmetros ajustados para manter as velocidades abaixo de 2 m/s, conforme analisado anteriormente na Figura 13, o que foi solucionado pelo aumento no uso de diâmetros maiores.

Figura 17 – Cenário 2: Custo total por diâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Cenário 2 - Distribuição de Velocidades nos Trechos da Rede

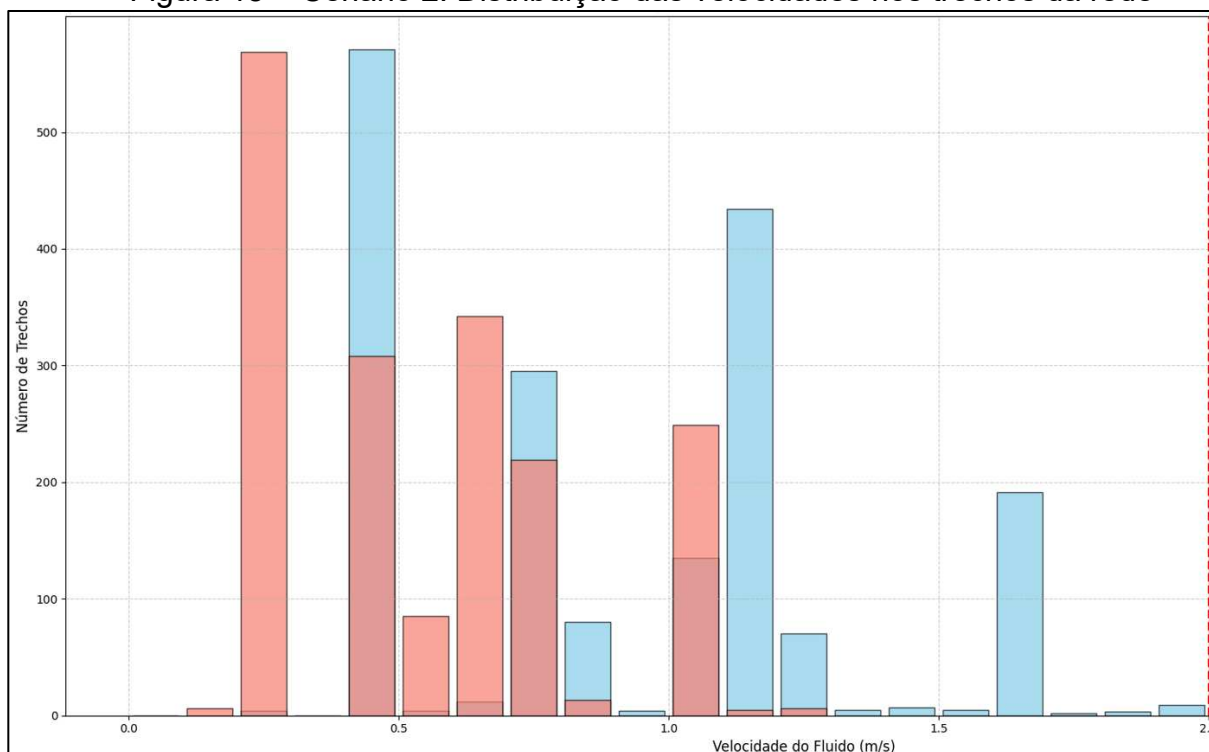
O histograma da Figura 18 é fundamental para compreender o baixo impacto da redução da velocidade máxima sobre o custo da solução, pois comparando com a Figura 13 (Cenário 1), observa-se que a distribuição de velocidades da solução ótima (barras em azul) é praticamente idêntica, com uma única diferença visível, a "cauda" da distribuição que antes se estendia até aproximadamente 2,5 m/s foi efetivamente "cortada" no limite de 2,0 m/s.

Essa análise visual confirma a hipótese apresentada na seção 4.1.2, pois a grande maioria dos trechos da solução ótima para o cenário 1 já operavam com velocidades abaixo de 2 m/s, tendo um número muito pequeno de trechos na faixa entre 2,0 e 3,0 m/s, e ao impor o novo limite, o otimizador precisou fazer ajustes apenas nestes poucos trechos críticos, aumentando seus diâmetros para reduzir a

velocidade para valores aceitáveis, e como essa mudança afetou um número reduzido de trechos, o impacto no custo total foi marginal.

A solução manual (barras em salmão) permanece inalterada, com a mesma concentração de velocidades na faixa de 0,2 a 0,8 m/s, reforçando a característica de superdimensionamento discutida anteriormente.

Figura 18 – Cenário 2: Distribuição das velocidades nos trechos da rede



Fonte: Elaborado pelo autor.

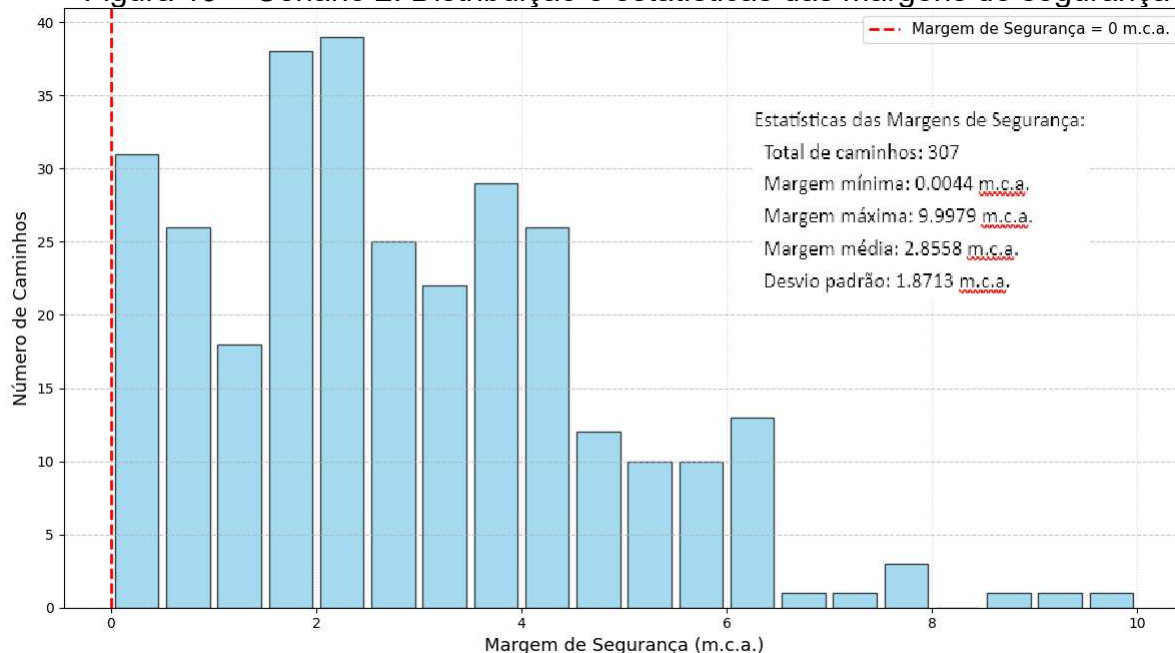
4.2.3 Cenário 2 - Distribuição de Margens de Segurança

A Figura 19 apresenta a distribuição de margens de segurança para o Cenário 2, com as estatísticas de margem média de 2,86 m.c.a, mínima de 0,0044 m.c.a, ou seja, garante a pressão mínima em todos os pontos, e máxima de 9,99 m.c., com desvio padrão de 1,87 m.c.a.

Comparando com o Cenário 1 (Figura 14), a distribuição de margens é muito similar, com ligeiro aumento na margem média (de 2,26 para 2,86 m.c.a.) e no desvio padrão (de 1,50 para 1,87 m.c.a.), indicando que a imposição da restrição de velocidade teve baixo impacto sobre as pressões da rede. A solução continua operando de forma ajustada, respeitando rigorosamente a restrição de pressão

mínima de 1 m.c.a. em todos os pontos, mas sem folgas excessivas que representariam superdimensionamento desnecessário.

Figura 19 – Cenário 2: Distribuição e estatísticas das margens de segurança



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 CENÁRIO 3: VELOCIDADE MÁXIMA DE 2 M/S E PRESSÃO MÍNIMA DE 2 M.C.A.

O terceiro e último cenário investigado mantém a velocidade máxima de 2 m/s e eleva a pressão mínima em todos os pontos de consumo para 2 m.c.a, o dobro do valor mínimo normativo, sendo um critério de projeto mais exigente, tal cenário pode ser desejável em situações onde se busca maior conforto aos usuários, funcionamento adequado de aparelhos de maior demanda ou maior margem de segurança operacional. O objetivo desta análise é isolar o efeito da pressão mínima nos pontos de consumo sobre o custo da solução, comparando-o diretamente com o Cenário 2.

4.3.1 Cenário 3 - Análise de Custos e Distribuição de Diâmetros

A Figura 20 revela um impacto significativamente maior da elevação da pressão mínima sobre o custo da solução ótima, o custo total da solução manual

permanece em R\$ 36.996,35, enquanto a solução ótima apresentou um custo de R\$ 27.779,33, resultando em uma economia de R\$ 9.217,01, representando uma redução de 24,9% no custo total de materiais, ainda expressiva, mas inferior aos 27,8% observados no cenário 2.

Ao comparar com o cenário 2, temos que a elevação da pressão mínima de 1 para 2 m.c.a resultou em um aumento de custo de R\$ 1.073,41 na solução ótima (de R\$ 26.705,92 para R\$ 27.779,33), representando um acréscimo de 4,02%, valor significativamente superior ao impacto de 0,44% causado pela redução da velocidade máxima entre os Cenários 1 e 2. Isso demonstra que a pressão mínima tem um efeito muito mais pronunciado sobre o custo da instalação do que a velocidade máxima para a rede do edifício em análise.

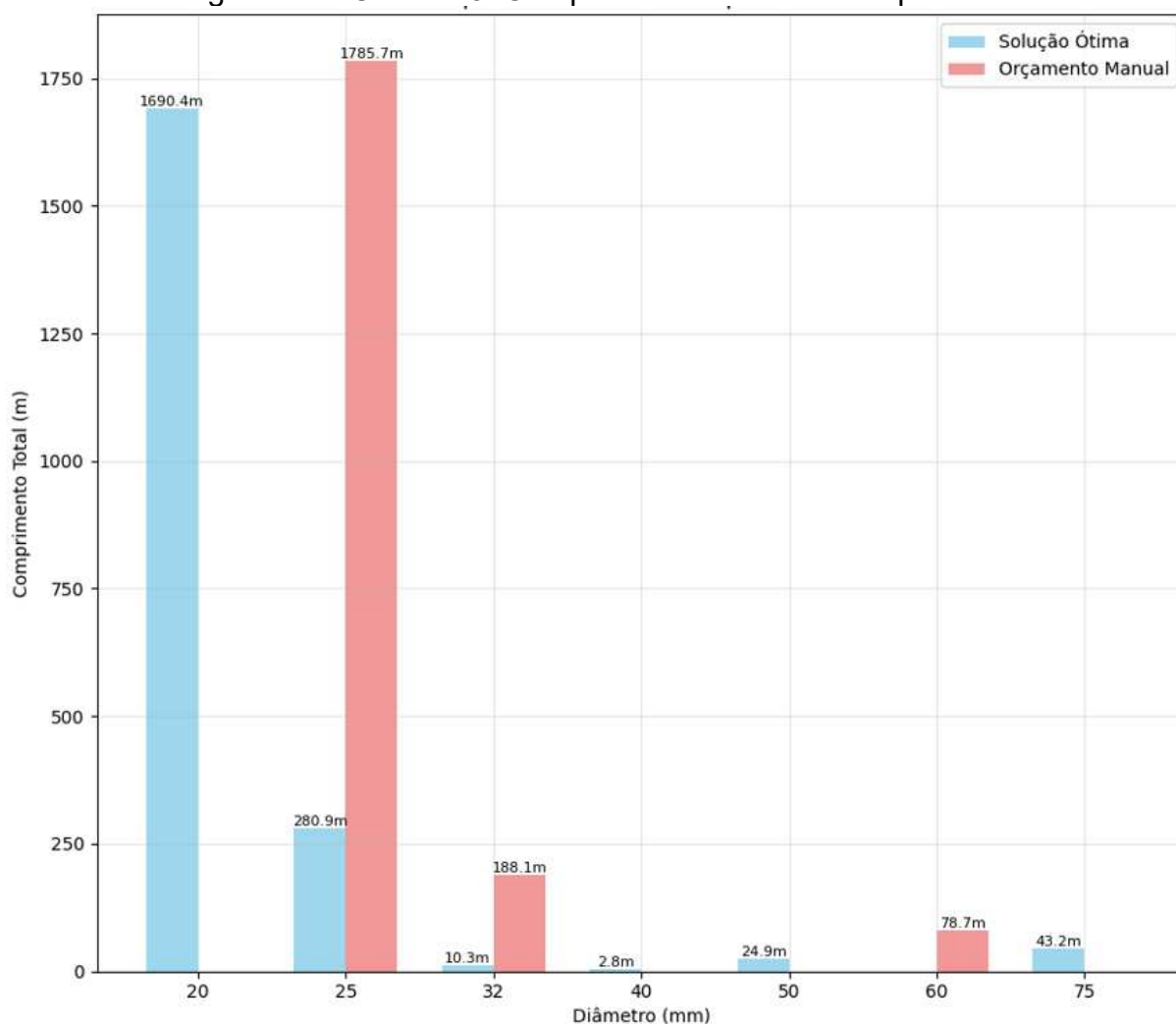
Figura 20 – Cenário 3: Resumo comparativo entre solução ótima e orçamento manual

Comparação: Solução Ótima vs Orçamento Manual
 Custo Total - Ótimo: R\$27779.33 | Manual: R\$36996.35 | Diferença: R\$9217.01
 Comprimento Total - Ótimo: 2052.5m | Manual: 2052.5m

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 21 mostra as mudanças estruturais na distribuição de diâmetros, que quando comparada ao Cenário 2 (Figura 16), temos pequenas variações no uso de tubos de 20 mm, que foi reduzido de 1.700,2 m para 1.690,4 m, e de 25 mm, que aumentou de 271,9 m para 280,9 m, o principal fator para o aumento dos custos é o surgimento de tubos 75 mm, com o mesmo comprimento atribuído anteriormente aos tubos de 60 mm (43,2 m), indicando que o modelo foi forçado a dimensionar de forma mais robusta os trechos iniciais da rede para garantir a pressão mínima mais elevada em todos os pontos. Essa mudança evidencia que a restrição de pressão afetou não apenas trechos isolados, mas exigiu uma reestruturação mais ampla da composição de diâmetros, especialmente nos trechos do barrilete e das colunas de distribuição.

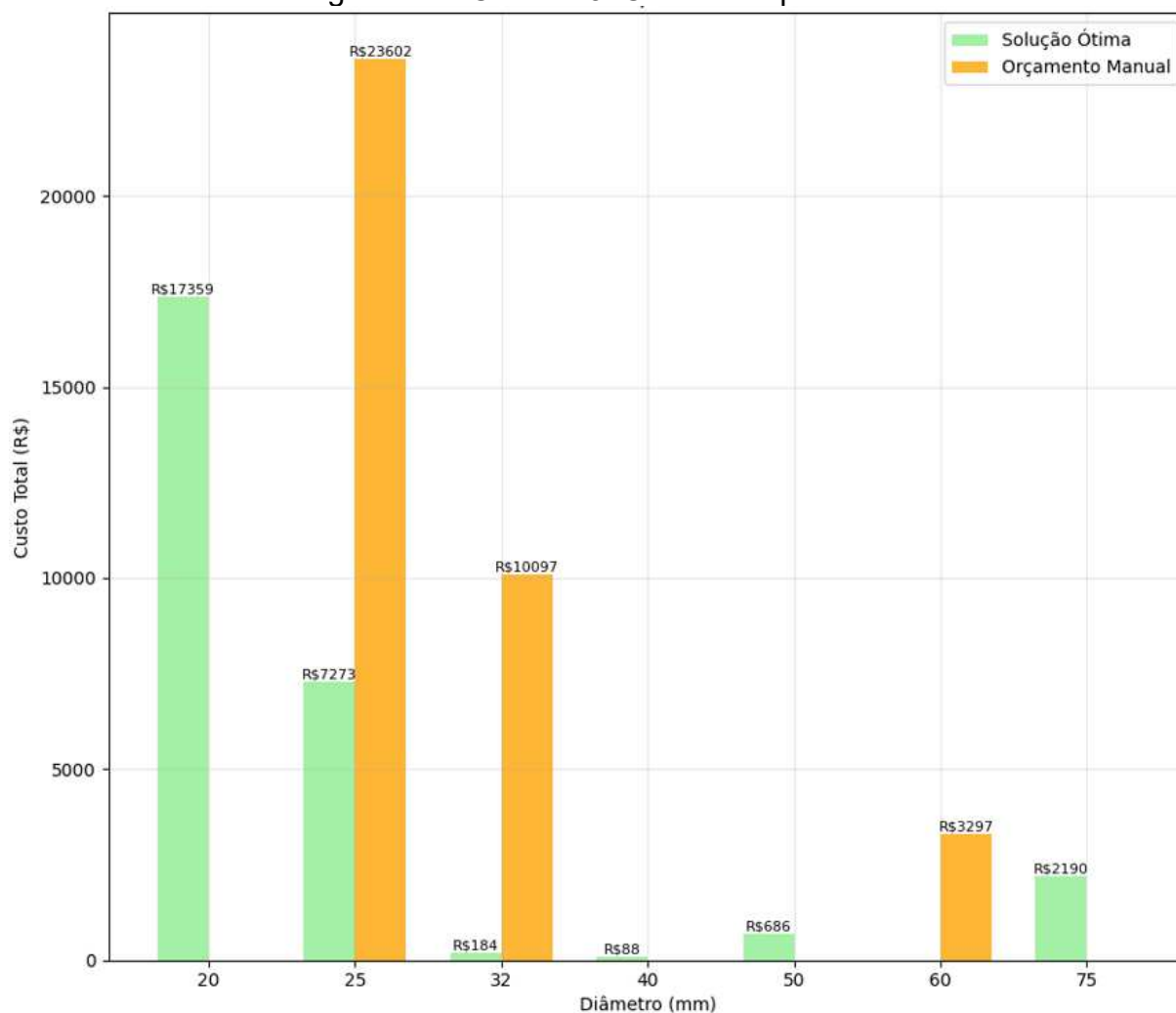
Figura 21 – Cenário 3: Comprimento total de tubos por diâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 traduz em custos a redistribuição de diâmetros observada na Figura 21. O surgimento de tubos de 75 mm adiciona R\$ 2.190,00 ao custo total, tornando a composição de custos mais diversificada, com participação significativa de diâmetros maiores, refletindo a necessidade de reduzir as perdas de carga para garantir as maiores pressões em todos os pontos da rede.

Figura 22 – Cenário 3: Custo total por diâmetro



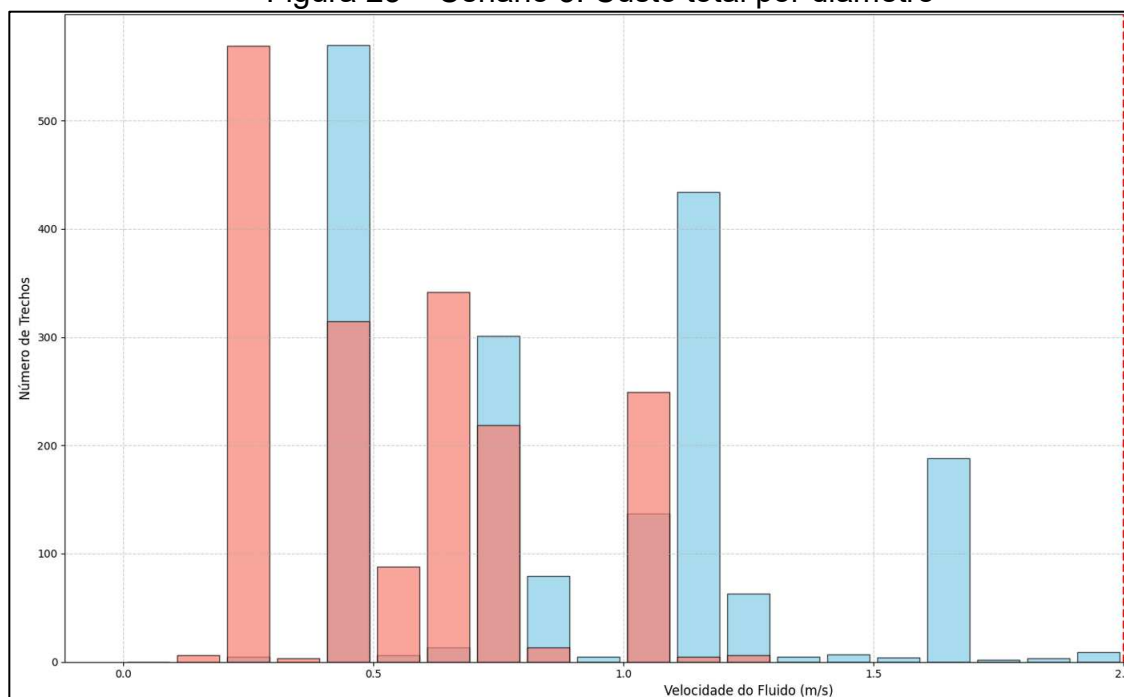
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Cenário 3 - Distribuição de Velocidades nos Trechos da Rede

O histograma da Figura 23 mostra uma distribuição de velocidades similar aos cenários anteriores, com a restrição de 2 m/s sendo rigorosamente respeitada. No entanto, comparando com a Figura 18 (Cenário 2), observa-se uma sutil mudança na distribuição, tendo um ligeiro aumento na concentração de trechos operando em velocidades intermediárias (entre 0,8 e 1,5 m/s), sugerindo que o aumento de diâmetros necessários para garantir a pressão mínima levou a redução de velocidades em diversos trechos.

A solução manual (barras em salmão) permanece inalterada, mantendo o mesmo padrão de superdimensionamento observado nos cenários anteriores. A diferença fundamental entre os Cenários 2 e 3 não está na distribuição de velocidades, mas sim no perfil de pressões, que será analisado a seguir.

Figura 23 – Cenário 3: Custo total por diâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

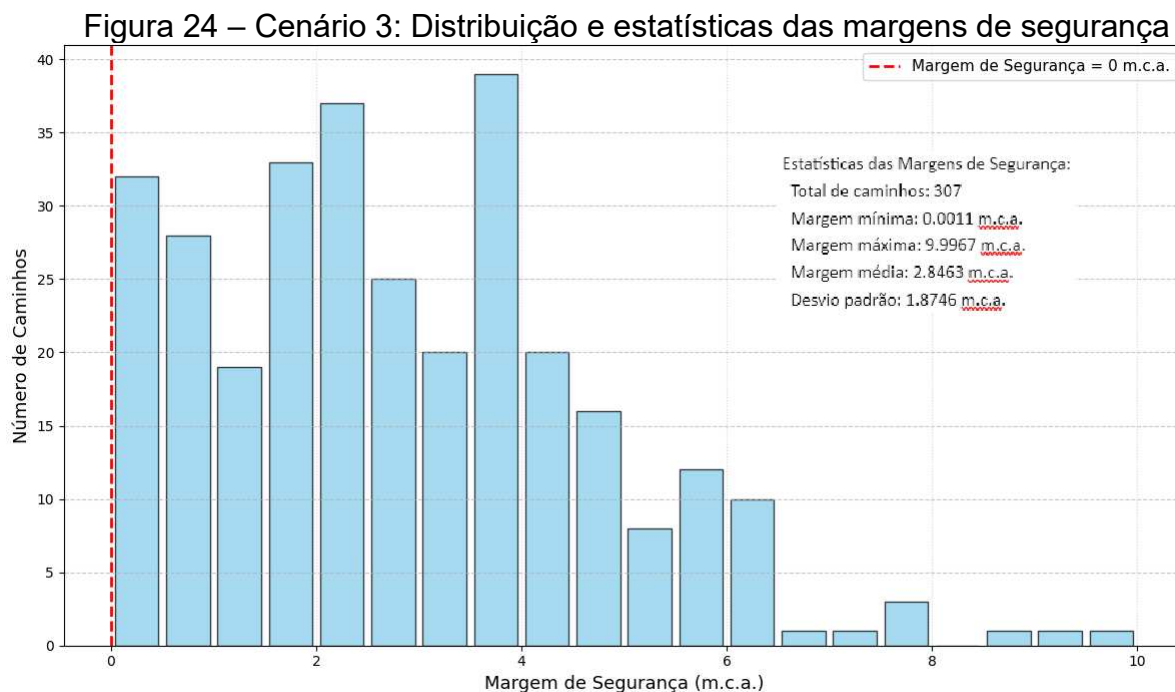
4.3.3 Cenário 3 - Distribuição de Margens de Segurança

A Figura 24 apresenta uma mudança visível e significativa na distribuição de margens de segurança quando comparada aos cenários anteriores. As estatísticas revelam uma margem média de 2,85 m.c.a., com margem mínima de 0,0011 m.c.a., atendendo a pressão mínima em todos os pontos e máxima de 9,99 m.c.a., com desvio padrão de 1,87 m.c.a.. O total de caminhos analisados permanece em 307.

Comparando com o Cenário 2 (Figura 19), a margem média permanece praticamente constante (2,86 m.c.a. no Cenário 2 versus 2,85 m.c.a. no Cenário 3), mas a margem mínima foi reduzida significativamente (de 0,0044 m.c.a. para 0,0011 m.c.a.), e o desvio padrão permaneceu similar (1,87 m.c.a. em ambos). Isso indica que o aumento da pressão mínima "consumiu" parte da margem de segurança disponível em diversos caminhos, forçando o modelo a ajustar os diâmetros de forma mais agressiva para atender à nova restrição.

A distribuição em forma de histograma mostra que, enquanto no Cenário 2 havia uma concentração maior de caminhos com margens entre 2 e 3 m.c.a., no Cenário 3 essa distribuição se tornou mais dispersa e uniforme, com maior presença de caminhos nas faixas extremas (muito baixas ou muito altas). Isso reflete a dificuldade do otimizador em equilibrar simultaneamente as pressões em toda a rede

quando a exigência mínima é elevada, resultando em maior heterogeneidade das margens de segurança.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Análise comparativa entre os 3 cenários

A análise conjunta dos três cenários permite extrair conclusões importantes sobre a sensibilidade do modelo às diferentes restrições técnicas. A variação da velocidade máxima de 3 m/s para 2 m/s (Cenário 1 para Cenário 2) teve impacto mínimo no custo (0,44%), pois a solução original já operava predominantemente abaixo do novo limite. Por outro lado, a elevação da pressão mínima de 1 m.c.a. para 2 m.c.a. (Cenário 2 para Cenário 3) teve um impacto significativo (4,02%), pois forçou um redimensionamento mais substancial da rede para garantir pressões adequadas em todos os pontos.

Esses resultados demonstram que, no contexto deste estudo de caso, a pressão mínima é um parâmetro mais crítico para o custo da instalação do que a velocidade máxima. Isso tem implicações práticas importantes: projetistas podem adotar critérios mais conservadores de velocidade (como 2 m/s) com impacto financeiro marginal, mas devem ter cautela ao especificar pressões mínimas muito acima do valor normativo, pois isso pode elevar significativamente os custos.

Em todos os três cenários, a economia em relação à solução manual permaneceu acima de 24%, demonstrando o valor consistente da metodologia proposta. A ferramenta não apenas encontra soluções de menor custo, mas também permite ao projetista avaliar quantitativamente o trade-off entre custo e critérios de desempenho, possibilitando escolhas informadas e equilibradas entre economia e qualidade técnica.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo teve como objetivo geral a proposição de um modelo matemático para a otimização econômica de projetos de sistemas prediais de água fria (SPAF). Os objetivos específicos traçados foram plenamente alcançados, iniciando-se pela formulação bem-sucedida de um modelo híbrido que integrou a robustez da Programação Linear Inteira Binária (PLIB) para a seleção global de diâmetros com uma abordagem heurística dedicada ao tratamento das perdas de carga localizadas e custos relacionados as reduções de diâmetro entre trechos de tubulação subsequentes. A validação dessa proposta se concretizou através da sua implementação computacional, resultando em uma ferramenta capaz de automatizar integralmente o dimensionamento hidráulico e a resolução do problema de minimização de custos. Por fim, a aplicação da ferramenta desenvolvida ao estudo de caso de um edifício real permitiu não apenas comparar quantitativamente a solução otimizada frente ao projeto realizado por um projetista, demonstrando ganhos econômicos expressivos, mas também validar a eficácia do modelo proposto diante da complexidade inerente às redes do SPAF.

A aplicação do modelo ao estudo de caso revelou ganhos econômicos consistentes e demonstrou a capacidade da ferramenta como um sistema de apoio à decisão. No cenário com os parâmetros máximos permitidos pela NBR 5626:2020 ($V_{\text{máx}} = 3 \text{ m/s}$; $P_{\text{mín}} = 1 \text{ m.c.a.}$), a otimização gerou uma economia de 28,00% frente à solução inicial do projeto. Ao adotar um critério mais rigoroso de velocidade ($V_{\text{máx}} = 2 \text{ m/s}$; $P_{\text{mín}} = 1 \text{ m.c.a.}$) a economia se manteve em 27,80%, um acréscimo de custo de apenas 0,44%, evidenciando que a maior parte da rede já operava abaixo deste limite. A análise mais relevante surgiu ao elevar a pressão mínima para 2 m.c.a, o que resultou em uma economia de 24,91% frente à solução inicial do projeto e um aumento de custo de 4,02% em relação ao cenário anterior, comprovando que, para o caso

analisado, a pressão mínima é um parâmetro de custo mais sensível do que a velocidade máxima, mas que mesmo para o cenário mais restritivo, ainda trouxe uma redução de custos expressiva. Esses resultados se mostram compatíveis e muito promissores quando comparados com casos descritos na literatura, como a economia de 19,30% obtida por Ninow (1980) em redes públicas, e os 12,39% alcançados por Barrêto Júnior (2006) na otimização de redes do SPAF.

Entre as principais contribuições deste trabalho, destaca-se a consolidação de um procedimento de otimização completo e automatizado, voltado especificamente para redes prediais ramificadas. A ferramenta desenvolvida demonstrou, através de diagnósticos hidráulicos como os histogramas de velocidades, sua capacidade de reduzir superdimensionamentos em projetos realizados somente focados em atender aos critérios normativos, mesmo quando estes são elaborados por profissionais capacitados. Ao permitir que o projetista quantifique o trade-off entre custo e desempenho, o modelo se estabelece como um recurso valioso para a tomada de decisões baseadas em dados, mantendo total conformidade com as restrições normativas da NBR 5626:2020 (ABNT, 2020).

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações devem ser reconhecidas, como o modelo não incorporar, diretamente no modelo de PLIB, os custos e perdas de carga associados às reduções de diâmetro, que são tratados no pós-processamento onde é realizado o ajuste heurístico. Adicionalmente, não se considera o uso de válvulas redutoras de pressão ou curvas, trata as conexões roscáveis como soldáveis, sem considerar suas diferenças de custos, não inclui os custos de montagem e manutenção da rede, somente os custos de aquisição dos componentes e foca exclusivamente na rede de distribuição a partir da saída do reservatório até os pontos de consumo, sem tratar dos tubos de abastecimento do mesmo.

Diante disso, como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- a) A integração das perdas de carga localizadas das reduções diretamente na função objetivo do modelo matemático.
- b) A inclusão das válvulas redutoras de pressão dentro do modelo, para tratar de projetos onde a pressão estática seja superior a 40 m.c.a, e diferenciar as conexões roscáveis das soldáveis, para melhorar a precisão dos custos considerados na otimização.
- c) A inclusão de custos de mão de obra e instalação na análise econômica.

- d) A extensão da metodologia para sistemas de água quente, considerando seus materiais e restrições específicas.

Em síntese, o trabalho demonstra que a aplicação de modelos de otimização ao dimensionamento de redes prediais de água fria é uma abordagem viável, eficaz e que gera benefícios econômicos concretos. A metodologia e a ferramenta desenvolvidas oferecem uma base sólida para a adoção de práticas de projeto mais racionais, transparentes e orientadas por dados no contexto da engenharia hidráulica predial, contribuindo para a evolução técnica e a sustentabilidade econômica do setor da construção civil.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO NETTO, José Martiniano de; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, Miguel. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5626** - Instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12721** - Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios - Procedimento. 2. Ed. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5626** - Instalação predial de água fria. 2. Ed. Rio de Janeiro, 2020.

BARRÊTO JÚNIOR, Manoel. **Otimização de um sistema de distribuição predial de água fria: Estudo de Caso**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/a75cec8a-26a9-4f84-ac86-ac0094e111d5>. Acesso em: 12 set. 2025

BAPTISTA, Márcio Benedito; COELHO, Márcia Maria Lara Pinto. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; JUNIOR, Geraldo de Andrade Ribeiro. **Instalações hidráulicas prediais utilizando tubos plásticos**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI)**. [S.l.]. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 05 novembro 2024.

COIN-OR FOUNDATION. **The COIN-OR Branch and Cut solver (CBC) user guide**. 2005. Disponível em: <https://www.coin-or.org/Cbc/cbcuserguide.html>. Acesso em: 16 set 2025.

CREDER, Hélio. **Instalações hidráulicas e sanitárias**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2006.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. ed. Tradução Ariovaldo Griesi; revisão técnica João Chang Junior. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

JÚNIOR, Roberto Carvalho. **Instalações hidráulicas e o projeto de arquitetura**. 6. ed. São Paulo: E. Blucher, 2013.

JÚNIOR, Gil Alves dos santos; OLIVEIRA, Karoliny da Cunha; SILVA, Tays Raymara dos Santos. **Análise comparativa de custos e viabilidade técnica no uso de tubulações de diferentes diâmetros nas instalações hidráulicas de uma residência unifamiliar**. International Contemporary Management Review, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 122–149, 2023. Disponível em: <https://www.icmreview.com/icmr/article/view/52>. Acesso em: 09 nov. 2024.

MALA-JETMAROVA, H.; SULTANOVA, N.; SAVIC, D. **Lost in Optimisation of Water Distribution Systems? A Literature Review of System Design**. Water, v. 10, n. 3, p. 307, mar. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/3/307>. Acesso em: 25 nov. 2024.

MELO, Patrícia Cristina Bandeira de. **NBR 5626: um comparativo entre as normas de 1998 e 2020 para instalações de água fria. 2022**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/c02a13a7-fa65-4e2e-9226-52888da34b4d>. Acesso em: 15 ago. 2025.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick (org). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

MOURA, Larissa Daniela Castro. **Estudo da composição de custos de projetos de habitações de interesse social financiados pelo programa Minha Casa Minha Vida**. 2022. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Planejamento Territorial) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2022. Disponível em: <https://tede2.pucgoias.edu.br/handle/tede/4876>. Acesso em: 6 nov. 2025.

NINOW, Jorge Luiz. **Um modelo matemático para otimizar redes de abastecimento de água**. 1980. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1980. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/76699>. Acesso em: 11 dez. 2025.

SILVA, Sheldon Alexandre Moraes da. **Estudo comparativo do dimensionamento de instalações prediais de água fria entre planilhas eletrônicas e software comercial em edifício residencial**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/1387>. Acesso em: 6 nov. 2025.

APÊNDICE A – PLANILHAS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Tabela A.1 – Planilha perda de carga redução.xlsx

	A	B	C	D	E
1	diâmetro nominal entrada	diâmetro nominal saída	A2 / A1	K	coeficiente
2	25	20	0,619427298	0,176744	0,00900836
3	32	20	0,373945448	0,308635	0,01573062
4	32	25	0,603695461	0,185196	0,00943916
5	40	25	0,376549587	0,307236	0,01565931
6	40	32	0,623740961	0,174426	0,00889024
7	50	25	0,240991736	0,380067	0,01937142
8	50	32	0,399194215	0,295069	0,01503921
9	50	40	0,64	0,165691	0,008445
10	60	25	0,163615705	0,421639	0,02149028
11	60	32	0,27102358	0,363932	0,01854903
12	60	50	0,678926623	0,144777	0,00737904
13	75	50	0,436472509	0,275041	0,01401838

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A.2 – Planilha vazões máximas.xlsx

	A	B	C	D
1	diâmetro nominal (mm)	diâmetro interno (m)	área (m ²)	vazão (m ³ /s)
2	20	0,017	0,0002269800692218630	0,0006809402076655880
3	25	0,0216	0,0003664353671147130	0,0010993061013441400
4	32	0,0278	0,0006069871166000840	0,0018209613498002500
5	40	0,0352	0,0009731397403759740	0,0029194192211279200
6	50	0,044	0,0015205308443374600	0,0045615925330123800
7	60	0,0534	0,0022396099868176300	0,0067188299604528800
8	75	0,0666	0,0034836806776391900	0,0104510420329176000
9	85	0,0756	0,0044888332471552400	0,0134664997414657000
10	110	0,0978	0,0075122077691904500	0,0225366233075713000

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A – PLANILHAS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Tabela A.1 – Planilha perda de carga localizada.xlsx

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	diâmetro nominal (mm)	joelho 90	joelho 45	te pass dir	te saída lat	entrada normal	rgl	rg
2	20	1,1	0,4	0,7	2,3	0,3	11,1	0,1
3	25	1,2	0,5	0,8	2,4	0,4	11,4	0,2
4	32	1,5	0,7	0,9	3,1	0,5	15	0,3
5	40	2	1	1,5	4,6	0,6	22	0,4
6	50	3,2	1	2,2	7,3	1	35,8	0,7
7	60	3,4	1,3	2,3	7,6	1,5	37,9	0,8
8	75	3,7	1,7	2,4	7,8	1,6	38	0,9
9	85	3,9	1,8	2,5	8	2	40	0,9
10	110	4,3	1,9	2,6	8,3	2,2	42,3	1

Fonte: Adaptado de Júnior (2013)

Tabela A.3 – Planilha pesos relativos.xlsx

	A	B	C	D	E	F
1	aparelho sanitário	peça de utilização	sigla	vazão de projeto (m ³ /s)	peso relativo	pressão mínima (m.c.a)
2	Bacia sanitária	Caixa de descarga	bscd	0,00015	0,3	1
3	Bacia sanitária	Válvula de descarga	bsvd	0,0017	32	1
4	Banheira	Misturador (água fria)	bm	0,0003	1	1
5	Chuveiro	Misturador (água fria)	cm	0,0002	0,4	1
6	Ducha	Misturador (água fria)	dm	0,0002	0,4	1
7	Chuveiro elétrico	Registro de pressão	cerp	0,0001	0,1	1
8	Lavadora de pratos	Registro de pressão	lprp	0,0003	0,1	1
9	Lavadora de roupas	Registro de pressão	lrrp	0,0003	0,1	1
10	Lavatório	Torneira	lt	0,00015	0,3	1
11	Lavatório	Misturador (água fria)	lm	0,00015	0,3	1
12	Pia	Torneira	pt	0,00025	0,7	1
13	Pia	Misturador (água fria)	pm	0,00025	0,7	1
14	Pia	Torneira elétrica	pte	0,0001	0,1	1
15	Tanque	Torneira	tt	0,00025	0,7	1
16	Torneira de jardim	Torneira	tjt	0,0002	0,4	1

Fonte: Adaptado de ABNT, 1998

ANEXO B – DADOS SINAPI

Tabela B.1 – Planilha dados sinapi.xlsx

	A	B	C	D	E	F	G
1	cod. sinapi	descrição	und	tipo	diâmetro nominal entrada	diâmetro nominal saída	preço
2	9867	TUBO PVC, SOLDABEL, DE 20 MM, AGUA FRIA (NBR-5648)	M	tubo	20	20	R\$ 3,50
3	7138	TE SOLDABEL, PVC, 90 GRAUS, 20 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL (NBR 5648)	UN	te	20	20	R\$ 1,01
4	3499	JOELHO, PVC SOLDABEL, 45 GRAUS, 20 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 45	20	20	R\$ 1,08
5	3542	JOELHO PVC, SOLDABEL, 90 GRAUS, 20 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 90	20	20	R\$ 0,56
6	6037	REGISTRO DE PRESSAO PVC, SOLDABEL, VOLANTE SIMPLES, DE 20 MM	UN	rgl	20	20	R\$ 13,87
7	6020	REGISTRO GAVETA BRUTO EM LATAO FORJADO, BITOLA 1/2"	UN	rg	20	20	R\$ 31,84
8	12773	HIDROMETRO UNIATO / MEDIDOR DE AGUA, DN 1/2", VAZAO MAXIMA DE 3 M3/H, PARA AGUA POTAVEL FRIA, RELOJOARIA PLANA, CLASSE B, HORIZONTAL (SEM CONEXOES)	UN	hidr	20	20	R\$ 160,92
9	9868	TUBO PVC, SOLDABEL, DE 25 MM, AGUA FRIA (NBR-5648)	M	tubo	25	25	R\$ 3,95
10	7139	TE SOLDABEL, PVC, 90 GRAUS, 25 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL (NBR 5648)	UN	te	25	25	R\$ 1,14
11	3500	JOELHO, PVC SOLDABEL, 45 GRAUS, 25 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 45	25	25	R\$ 1,43
12	3529	JOELHO PVC, SOLDABEL, 90 GRAUS, 25 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 90	25	25	R\$ 0,69
13	11719	REGISTRO DE PRESSAO PVC, SOLDABEL, VOLANTE SIMPLES, DE 25 MM	UN	rgl	25	25	R\$ 15,43
14	6016	REGISTRO GAVETA BRUTO EM LATAO FORJADO, BITOLA 3/4"	UN	rg	25	25	R\$ 33,59
15	12774	HIDROMETRO UNIATO / MEDIDOR DE AGUA, DN 3/4", VAZAO MAXIMA DE 5 M3/H, PARA AGUA POTAVEL FRIA, RELOJOARIA PLANA, CLASSE B, HORIZONTAL (SEM CONEXOES)0,	UN	hidr	25	25	R\$ 198,39
16	828	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, CURTA, COM 25 X 20 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	25	20	R\$ 0,56
17	9869	TUBO PVC, SOLDABEL, DE 32 MM, AGUA FRIA (NBR-5648)	M	tubo	32	32	R\$ 8,52
18	7140	TE SOLDABEL, PVC, 90 GRAUS, 32 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL (NBR 5648)	UN	te	32	32	R\$ 3,59
19	3501	JOELHO, PVC SOLDABEL, 45 GRAUS, 32 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 45	32	32	R\$ 3,94
20	3536	JOELHO PVC, SOLDABEL, 90 GRAUS, 32 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 90	32	32	R\$ 2,30
21	6019	REGISTRO GAVETA BRUTO EM LATAO FORJADO, BITOLA 1"	UN	rg	32	32	R\$ 53,02
22	12770	HIDROMETRO MULTIATO / MEDIDOR DE AGUA, DN 1", VAZAO MAXIMA DE 10 M3/H, PARA AGUA POTAVEL FRIA, RELOJOARIA PLANA, CLASSE B, HORIZONTAL (SEM CONEXOES)	UN	hidr	32	32	R\$ 782,56
23	829	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, CURTA, COM 32 X 25 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	32	25	R\$ 0,91
24	832	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, LONGA, COM 32 X 20 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	32	20	R\$ 2,68
25	9874	TUBO PVC, SOLDABEL, DE 40 MM, AGUA FRIA (NBR-5648)	M	tubo	40	40	R\$ 13,38
26	7141	TE SOLDABEL, PVC, 90 GRAUS, 40 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL (NBR 5648)	UN	te	40	40	R\$ 8,77
27	3502	JOELHO, PVC SOLDABEL, 45 GRAUS, 40 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 45	40	40	R\$ 5,67
28	3535	JOELHO PVC, SOLDABEL, 90 GRAUS, 40 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 90	40	40	R\$ 5,61
29	6017	REGISTRO GAVETA BRUTO EM LATAO FORJADO, BITOLA 1 1/4"	UN	rg	40	40	R\$ 72,26
30	12770	HIDROMETRO MULTIATO / MEDIDOR DE AGUA, DN 1", VAZAO MAXIMA DE 10 M3/H, PARA AGUA POTAVEL FRIA, RELOJOARIA PLANA, CLASSE B, HORIZONTAL (SEM CONEXOES)	UN	hidr	40	40	R\$ 782,56
31	812	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, CURTA, COM 40 X 32 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	40	32	R\$ 2,00
32	834	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, LONGA, COM 40 X 25 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	40	25	R\$ 3,47
33	9875	TUBO PVC, SOLDABEL, DE 50 MM, AGUA FRIA (NBR-5648)	M	tubo	50	50	R\$ 14,68
34	7142	TE SOLDABEL, PVC, 90 GRAUS, 50 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL (NBR 5648)	UN	te	50	50	R\$ 9,17
35	3503	JOELHO, PVC SOLDABEL, 45 GRAUS, 50 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 45	50	50	R\$ 7,12
36	3540	JOELHO PVC, SOLDABEL, 90 GRAUS, 50 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 90	50	50	R\$ 4,75
37	6010	REGISTRO GAVETA BRUTO EM LATAO FORJADO, BITOLA 1 1/2"	UN	rg	50	50	R\$ 91,23
38	12772	HIDROMETRO MULTIATO / MEDIDOR DE AGUA, DN 1 1/2", VAZAO MAXIMA DE 20 M3/H, PARA AGUA POTAVEL FRIA, RELOJOARIA PLANA, CLASSE B, HORIZONTAL (SEM CONEXOES)	UN	hidr	50	50	R\$ 1.300,60
39	819	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, CURTA, COM 50 X 40 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	50	40	R\$ 3,47
40	813	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, LONGA, COM 50 X 25 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	50	25	R\$ 4,03
41	820	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, LONGA, COM 50 X 32 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	50	32	R\$ 5,43
42	9873	TUBO PVC, SOLDABEL, DE 60 MM, AGUA FRIA (NBR-5648)	M	tubo	60	60	R\$ 24,15
43	7143	TE SOLDABEL, PVC, 90 GRAUS, 60 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL (NBR 5648)	UN	te	60	60	R\$ 29,44
44	3477	JOELHO, PVC SOLDABEL, 45 GRAUS, 60 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 45	60	60	R\$ 25,87
45	3539	JOELHO PVC, SOLDABEL, 90 GRAUS, 60 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 90	60	60	R\$ 27,53
46	6028	REGISTRO GAVETA BRUTO EM LATAO FORJADO, BITOLA 2"	UN	rg	60	60	R\$ 127,07
47	818	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, CURTA, COM 60 X 50 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	60	50	R\$ 6,48
48	816	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, LONGA, COM 60 X 25 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	60	25	R\$ 9,68
49	814	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, LONGA, COM 60 X 32 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	60	32	R\$ 12,02
50	9871	TUBO PVC, SOLDABEL, DE 75 MM, AGUA FRIA (NBR-5648)	M	tubo	75	75	R\$ 40,03
51	7144	TE SOLDABEL, PVC, 90 GRAUS, 75 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL (NBR 5648)	UN	te	75	75	R\$ 54,62
52	3478	JOELHO, PVC SOLDABEL, 45 GRAUS, 75 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 45	75	75	R\$ 62,03
53	3511	JOELHO, PVC SOLDABEL, 90 GRAUS, 75 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 90	75	75	R\$ 81,20
54	6011	REGISTRO GAVETA BRUTO EM LATAO FORJADO, BITOLA 2 1/2"	UN	rg	75	75	R\$ 263,54
55	821	BUCHA DE REDUCAO DE PVC, SOLDABEL, LONGA, COM 75 X 50 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	redução	75	50	R\$ 17,95
56	9872	TUBO PVC, SOLDABEL, DE 85 MM, AGUA FRIA (NBR-5648)	M	tubo	85	85	R\$ 55,68
57	7145	TE SOLDABEL, PVC, 90 GRAUS, 85 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL (NBR 5648)	UN	te	85	85	R\$ 74,27
58	3525	JOELHO, PVC SOLDABEL, 45 GRAUS, 85 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 45	85	85	R\$ 76,55
59	3513	JOELHO PVC, SOLDABEL, 90 GRAUS, 85 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 90	85	85	R\$ 97,08
60	6012	REGISTRO GAVETA BRUTO EM LATAO FORJADO, BITOLA 3"	UN	rg	85	85	R\$ 319,06
61	9870	TUBO PVC, SOLDABEL, DE 110 MM, AGUA FRIA (NBR-5648)	M	tubo	110	110	R\$ 87,14
62	7146	TE SOLDABEL, PVC, 90 GRAUS, 110 MM, PARA AGUA FRIA PREDIAL (NBR 5648)	UN	te	110	110	R\$ 159,47
63	3530	JOELHO PVC, SOLDABEL, 90 GRAUS, 110 MM, COR MARROM, PARA AGUA FRIA PREDIAL	UN	joelho 90	110	110	R\$ 196,71
64	6027	REGISTRO GAVETA BRUTO EM LATAO FORJADO, BITOLA 4"	UN	rg	110	110	R\$ 664,81

Fonte: Adaptado de SINAPI - Caixa Econômica Federal (dez. 2024, SC).