



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

GUILHERME MARQUES FARIAS

**OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO DE REDES COLETORAS DE ESGOTO UTILIZANDO
ESTRATÉGIAS DE CAMINHOS MÍNIMOS EM ÁRVORES DE BUSCA EM LARGURA**

FORTALEZA

2026

GUILHERME MARQUES FARIAS

OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO DE REDES COLETORAS DE ESGOTO UTILIZANDO
ESTRATÉGIAS DE CAMINHOS MÍNIMOS EM ÁRVORES DE BUSCA EM LARGURA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Professor Marco Aurélio Holanda de Castro, PhD.

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F238o Farias, Guilherme Marques.

Otimização do traçado de redes coletoras de esgoto utilizando estratégias de caminhos mínimos em árvores de busca em largura. / Guilherme Marques Farias. – 2026.
135 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro.

1. Redes coletoras de esgoto. 2. Otimização de traçado. 3. Árvores de busca em largura. 4. Teoria dos grafos. 5. nós terminais. I. Título.

CDD 627

GUILHERME MARQUES FARIAS

OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO DE REDES COLETORAS DE ESGOTO UTILIZANDO
ESTRATÉGIAS DE CAMINHOS MÍNIMOS EM ÁRVORES DE BUSCA EM LARGURA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 16/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, PhD (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luis Henrique Magalhães Costa (Coorientador)
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Dr. José Nilton de Abreu Costa
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

Profa. Dra. Renata Shirley de Andrade Araújo
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Prof. Dr. Paulo Fernando Soares
Universidade Estadual de Maringá (UEM)

À minha esposa, Brena, e a meus pais,
José Maria e Marta.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria e força, por ter me concedido a perseverança necessária para superar cada desafio e chegar até aqui.

Aos meus pais, José Maria e Marta, minha gratidão eterna pelo amor incondicional, pelos ensinamentos que moldaram meu caráter e pelo apoio constante em todas as fases da minha vida. Foram suas palavras de encorajamento e fé que me sustentaram nos momentos mais difíceis desta jornada.

À minha esposa, Brena, agradeço pela paciência, companheirismo e incentivo diários. Sua compreensão e apoio foram fundamentais para que eu pudesse dedicar-me com afinco a esta pesquisa, mesmo nos momentos de maior exigência.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro, sou profundamente grato pelos valiosos ensinamentos e por acreditar em meu potencial ao longo de toda a jornada acadêmica.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Luis Henrique Magalhães Costa, expresso sincera gratidão pelas inúmeras contribuições técnicas, pela disponibilidade e pelo apoio contínuo durante todas as etapas desta pesquisa.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), minha gratidão por proporcionar um ambiente acadêmico estimulante e repleto de oportunidades para o crescimento profissional e pessoal.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho. Cada palavra de apoio, cada gesto de incentivo e cada parceria foram fundamentais para a concretização deste sonho.

“Entregue o seu caminho ao Senhor; confie
Nele, e Ele agirá.” (Salmo 37:5)

RESUMO

O traçado de redes coletoras de esgoto é uma das fases mais desafiadoras no planejamento de sistemas de esgotamento sanitário, com grande influência sobre os custos de implantação e o desempenho hidráulico da rede. Em áreas urbanas com relevo irregular e alta densidade populacional, métodos convencionais, baseados na interpretação manual de curvas de nível e na experiência do projetista, tendem a resultar em soluções subótimas, que culminam em trechos invertidos, sobrecarga em poços de visita e necessidade de escavações profundas. Tais limitações reforçam a importância de abordagens automatizadas capazes de integrar critérios topográficos e hidráulicos no processo de definição do traçado. Diante desse cenário, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um algoritmo para geração automática do traçado de redes coletoras de esgoto, utilizando estratégias de caminhos mínimos aplicadas em árvores de busca em largura. A metodologia considera aspectos relacionadas à Teoria dos Grafos, com nós representando poços de visita e arestas correspondentes aos trechos de tubulação, e aplica rotinas para identificar e corrigir nós terminais e nós com múltiplas saídas. Foram utilizados critérios de declividade relativa, comprimento acumulado e penalização de trechos com sentido contrário ao fluxo gravitacional, com o objetivo de selecionar trajetórias hidráulicamente mais favoráveis e economicamente mais viáveis. O modelo foi validado em três estudos de caso reais, sendo estes, os bairros Alto da Expectativa e Belchior, no município de Sobral - CE, e uma rede de grande porte em Villa Hermosa, na República Dominicana. Os resultados demonstraram a eficácia do algoritmo em reduzir o número de trechos invertidos e reorganizar as sub-bacias de maneira a balancear as áreas de contribuição, mesmo em cenários com 3.157 trechos, 2.206 nós 219 nós terminais, como no caso da rede de Villa Hermosa. Além disso, constatou-se a eficiência econômica no estudo de caso do bairro Belchior, onde o traçado otimizado possibilitou uma redução de custo com tubulações e escavação da ordem de R\$ 90.302,74. O tempo computacional variou de três segundos em redes menores a quatro minutos para a rede de Villa Hermosa. O algoritmo proposto destacou-se pela capacidade de explorar todos os caminhos possíveis no grafo, selecionar o traçado mais eficiente e oferecer uma solução robusta e aplicável ao planejamento urbano no que tange à área de projetos de saneamento básico.

Palavras-chave: Redes coletoras de esgoto; Otimização de traçado; Árvores de busca em largura; Teoria dos grafos; nós terminais; trechos invertidos.

ABSTRACT

The layout of sewer collection networks is one of the most challenging phases in the planning of sanitation systems, with a significant influence on implementation costs and the hydraulic performance of the network. In urban areas with irregular terrain and high population density, conventional methods, based on the manual interpretation of contour lines and the designer's experience, tend to result in suboptimal solutions, culminating in inverted sections, overloading of manholes, and the need for deep excavations. These limitations reinforce the importance of automated approaches capable of integrating topographic and hydraulic criteria in the layout definition process. Given this scenario, this work proposes the development of an algorithm for the automatic generation of sewer collection network layouts, using shortest path strategies applied to breadth-first search trees. The methodology considers aspects related to Graph Theory, with nodes representing manholes and edges corresponding to pipe sections, and applies routines to identify and correct terminal nodes and nodes with multiple outlets. Criteria such as relative slope, accumulated length, and penalties for sections running against the gravitational flow were used to select hydraulically more favorable and economically viable trajectories. The model was validated in three real-world case studies: the Alto da Expectativa and Belchior neighborhoods in the municipality of Sobral, Ceará, and a large-scale network in Villa Hermosa, Dominican Republic. The results demonstrated the algorithm's effectiveness in reducing the number of inverted sections and reorganizing sub-basins to balance contributing areas, even in scenarios with 3.157 sections, 2.206 nodes, and 219 terminal nodes, as in the case of the Villa Hermosa network. Furthermore, economic efficiency was observed in the Belchior neighborhood case study, where the optimized layout resulted in cost reductions for piping and excavation of approximately R\$ 90.302,74. Computational time ranged from three seconds in smaller networks to four minutes for the Villa Hermosa network. The proposed algorithm stood out for its ability to explore all possible paths in the graph, select the most efficient route, and offer a robust and applicable solution for urban planning in the area of basic sanitation projects.

Keywords: Sanitary sewer networks; Layout optimization; Breadth-first search trees; Graph theory; Terminal nodes; Inverted sections.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Distribuição da cobertura de redes de esgotamento sanitário.....	24
Figura 2	– Representação de um sistema de esgotamento sanitário.....	26
Figura 3	– Seção transversal típica de um poço de visita.....	28
Figura 4	– Representação de um poço de visita associado a um tubo de queda.....	29
Figura 5	– Representação de um poço de transição.....	30
Figura 6	– Tubo de inspeção e limpeza em material flexível.....	31
Figura 7	– Ilustração de um traçado do tipo perpendicular.....	34
Figura 8	– Ilustração de um traçado do tipo leque.....	35
Figura 9	– Ilustração de um traçado do tipo distrital.....	36
Figura 10	– Ilustração de um traçado do tipo condominial.....	37
Figura 11	– Localização da tubulação de uma rede coletora de esgoto.....	39
Figura 12	– Ilustração de escoamento uniforme em canais abertos.....	41
Figura 13	– Representação da conservação da massa em um nó da rede.....	43
Figura 14	– Forças atuantes na tubulação de uma rede coletora de esgoto.....	44
Figura 15	– Ilustração de uma seção circular.....	46
Figura 16	– Possibilidades de definição da inclinação de tubulações.....	52
Figura 17	– Representação de um grafo não direcionado.....	56
Figura 18	– Representação de um grafo direcionado.....	57
Figura 19	– Exemplo de grafo base, gerado para um traçado de rede coletora de esgoto.	58
Figura 20	– Representação de um grafo direcionado sem ciclos.....	59
Figura 21	– Situações que ilustram as possíveis ligações entre PVs e trechos.....	60
Figura 22	– Representação de uma árvore de busca em largura.....	62
Figura 23	– Representação do algoritmo de busca em largura.....	64
Figura 24	– Fluxograma geral de execução da rotina computacional	73

Figura 25	– Ordenamento do sentido do fluxo a favor da topografia	74
Figura 26	– Procedimento para inversão de trechos ponta seca	75
Figura 27	– Rede hipotética criada para ilustrar a manipulação de dados pela Árvore 1..	76
Figura 28	– Ilustração do processo de expansão e poda feito pela Árvore 1.....	78
Figura 29	– Restrições apresentadas para a Árvore 1.....	79
Figura 30	– Restrição de caminhos mínimos para o nó terminal.....	81
Figura 31	– Inconsistências hidráulicas apresentadas para a rede processada pela Árvore 1.....	83
Figura 32	– Representação da solução para a primeira inconsistência.....	84
Figura 33	– Representação da solução para a segunda inconsistência.....	85
Figura 34	– Representação da única restrição para a expansão da Árvore 2.....	87
Figura 35	– Representação de trechos em aclave.....	89
Figura 36	– Representação do processo de expansão das Árvores 2 e 3.....	90
Figura 37	– Ilustração das restrições aplicadas à expansão da Árvore 3.....	91
Figura 38	– Execução das árvores para múltiplos PVs Finais.....	93
Figura 39	– Apresentação do estudo de caso 1 – Alto da Expectativa.....	95
Figura 40	– Perfil topográfico para o bairro Alto da Expectativa	95
Figura 41	– Rede coletora de esgoto para o bairro Alto da Expectativa.....	96
Figura 42	– Modelo de grafo base proposto para o bairro Alto da Expectativa	97
Figura 43	– Apresentação do estudo de caso 2 – Bairro Belchior.....	98
Figura 44	– Perfil topográfico para o bairro Belchior	98
Figura 45	– Rede coletora de esgoto para o bairro Belchior.....	99
Figura 46	– Modelo de grafo base proposto para o bairro Belchior	100
Figura 47	– Apresentação do estudo de caso 3 – Cidade de Villa Hermosa	102
Figura 48	– Traçado original proposto para o bairro Alto da Expectativa	105
Figura 49	– Traçado gerado pelo modelo de otimização para o bairro Alto da Expectativa	105

Figura 50 – Análise do PV15 no traçado do projeto original	106
Figura 51 – Modificação feita pelo modelo, no caminho de chegada ao PV 15	107
Figura 52 – Traçado original contendo os trechos T5, T6 e T7	108
Figura 53 – Traçado otimizado contendo os trechos T5, T6 e T7	109
Figura 54 – Traçado original apresentado para a rede do bairro Belchior	111
Figura 55 – Traçado otimizado apresentado para a rede do bairro Belchior	112
Figura 56 – Trechos invertido no traçado original.....	113
Figura 57 – Tubo de queda no traçado original.....	113
Figura 58 – Trechos invertido no traçado original, com elevado diâmetro.....	114
Figura 59 – Solução adotada pelo modelo para trechos invertidos no traçado original...	115
Figura 60 – Solução adotada pelo modelo para o trecho 10-1 no traçado original.....	115
Figura 61 – Solução adotada pelo modelo para o trecho 1-15 no traçado original.....	116
Figura 62 – Trechos afluentes ao PF_1 da sub-bacia A.....	118
Figura 63 – Trechos afluentes ao PF_2 da sub-bacia B.....	118
Figura 64 – Trechos afluentes ao PF_3 da sub-bacia E.....	119
Figura 65 – Trechos afluentes ao PF_4 da sub-bacia D.....	120
Figura 66 – Arquivo gerado pelo modelo de Rodrigues <i>et al.</i> (2019)	125
Figura 67 – Arquivo gerado pelo modelo proposto nesse estudo.....	126
Figura 68 – Inconsistências hidráulicas geradas nos nós N1, N2 e N10 pela solução de Rodrigues <i>et al.</i> (2019)	127
Figura 69 – Solução gerada pelo modelo proposto para o nós N1, N2 e N10.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de coeficiente de rugosidade de Manning.....	48
Tabela 2 – Equações para o cálculo da declividade mínima em tubulações	53
Tabela 3 – Exemplo de vetor de predecessores	63
Tabela 4 – Apresentação do exemplo de arquivo de entrada para a rotina computacional	70
Tabela 5 – Critério adotados para o dimensionamento hidráulico do bairro Belchior	101
Tabela 6 – Comparativo de diâmetro entre sub-bacias nos traçados.....	117
Tabela 7 – Comparativo de profundidades médias da rede entre sub-bacias nos traçados	121
Tabela 8 – Estimativa de orçamento para o traçado original de projeto.....	121
Tabela 9 – Estimativa de orçamento para o traçado gerado pelo modelo de otimização...	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABACOA	<i>Arc Based Ant Colony Optimization Algorithm</i>
AP	Amapá
BFS	<i>Breadth-First Search</i> (Busca em Largura)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CT	Cota do terreno
DDP	Programação Dinâmica Discreta
DFS	<i>Depth-First Search</i> (Busca em Profundidade)
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i>
ETE	Estação de tratamento de esgoto
GA	Algoritmos Genéticos
HP	Programação Heurística
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MINLP	Programação Inteira Não Linear Mista
MIP	<i>Mixed Integer Programming</i> (Programação Inteira Mista)
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
PR	Paraná
PV	Poço de visita
RJ	Rio de Janeiro
RO	Rondônia
SINISA	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SP	São Paulo
TIL	Terminal de inspeção e limpeza
TGA	<i>Tree Growing Algorithm</i>
SEINFRA	Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará

LISTA DE VARIÁVEIS

Símbolo	Significado	Dimensão
e	Número de Euler	[-]
L	Comprimento do trecho da rede coletora	[M]
h	Diferença de cotas entre as extremidades do trecho	[M]
I_{rel}	Declividade relativa	[M/M]
$I_{terreno}$	Declividade do terreno	[M/M]
I_{min}	Declividade mínima construtiva	[M/M]
$CT_{nó(m)}$	Cota do terreno no nó de montante	[M]
$CT_{nó(j)}$	Cota do terreno no nó de jusante	[M]
$I_{rel(média)}$	Declividade relativa média	[M/M]
N	Quantidade de trechos que fazem parte do caminho avaliado	[UN]
V_1	Velocidade média do escoamento da seção 1	[M/S]
V_2	Velocidade média do escoamento da seção 2	[M/S]
Y_1	Lâmina de água na seção 1	[M]
Y_2	Lâmina de água na seção 2	[M]
Z_1	Cota do fundo do conduto na seção 1	[M]
Z_2	Cota do fundo do conduto na seção 2	[M]
h_f	Perda de carga	[M]
Q	Vazão	[M ³ /S]
A_1	Área da seção 1	[M ²]
A_2	Área da seção 2	[M ²]
n_i	Nó i	[-]
Q_{nn}	Vazão afluente	[M ³ /S]
Q_s	Vazão efluente	[M ³ /S]
q_n	Vazão concentrada	[M ³ /S]
N	Arco de ligação entre os nós i e j	[-]
X	Variável binária direcional	[-]
K	Número total de nós	[UN]
ℓ	Comprimento do coletor	[M]
A	Área molhada	[M ²]

P	Perímetro molhado	[M]
γ	Peso específico do esgoto	[N/M ³]
F _T	Força tangencial	[N]
σ	Tensão trativa	[PA]
R	Raio hidráulico	[M]
I	Declividade	[M/M]
n	Coefficiente de rugosidade de Manning	[S.M ^{-1/3}]
C	Coefficiente de Chézy	[M ^{1/2} .S ⁻¹]
θ	Ângulo do setor circular	[RAD]
y	Lâmina de água	[M]
D	Diâmetro	[M]
Q _{ti}	Vazão inicial no trecho da rede coletora	[M ³ /S]
T _{xi}	Taxa de contribuição linear inicial	[L/S.M]
L _t	Comprimento do trecho	[M]
K ₁	Coefficiente de máxima vazão diária	[-]
K ₂	Coefficiente de máxima vazão horária	[-]
$\bar{Q}_{d,i}$	Vazão média inicial de esgoto doméstico	[L/S]
T _{inf}	Taxa de infiltração	[L/S.M]
P _i	População para início de plano	[HAB]
q _i	Consumo de água efetivo <i>per capita</i> inicial	[L/HAB.DIA]
Q _{tf}	Vazão final no trecho da rede coletora	[M ³ /S]
T _{xf}	Taxa de contribuição linear final	[L/S.M]
P _f	População para fim de plano	[HAB]
q _f	Consumo de água efetivo <i>per capita</i> final	[L/HAB.DIA]
Q _{pi}	Vazão de projeto de um trecho para início de plano	[L/S]
I _{máx}	Declividade máxima do trecho	[M/M]
Q _{pf}	Vazão de projeto de um trecho para fim de plano	[L/S]
D ₇₅	Diâmetro associado à lâmina líquida de 75%	[M]
V _c	Velocidade crítica	[M/S]
G	Grafo	[-]
V	Vértices do grafo	[-]
E	Arestas do grafo	[-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização e Problematização.....	19
1.2	Objetivos.....	21
1.3	Estrutura do trabalho.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Panorama do saneamento básico no Brasil	23
2.1.1	<i>Indicadores quantitativos do saneamento básico no Brasil.....</i>	<i>23</i>
2.2	Sistemas de esgotamento sanitário: conceitos e princípios gerais	25
2.2.1	<i>Definição de um sistemas de esgotamento sanitário</i>	<i>25</i>
2.2.2	<i>Elementos constituintes das redes coletoras de esgoto.....</i>	<i>27</i>
2.2.3	<i>Legislação e Normas Técnicas Brasileiras</i>	<i>31</i>
2.3	Traçado de redes coletoras de esgoto	33
2.3.1	<i>Condicionantes geométricos e construtivos do traçado</i>	<i>33</i>
2.3.2	<i>Localização da tubulação em vias públicas</i>	<i>38</i>
2.4	Fundamentos hidráulicos aplicados a redes coletoras de esgoto	40
2.4.1	<i>Caracterização do regime de escoamento em redes coletoras de esgoto.....</i>	<i>40</i>
2.4.2	<i>Lei da conservação da massa</i>	<i>42</i>
2.4.3	<i>Forças atuantes em um canal aberto</i>	<i>43</i>
2.4.4	<i>Parâmetros geométricos de uma seção circular de máxima eficiência</i>	<i>45</i>
2.5	Dimensionamento hidráulico de redes coletoras de esgoto	48
2.5.1	<i>Definição da vazão de esgoto sanitário nos trechos</i>	<i>48</i>
2.5.2	<i>Definição da declividade a ser adotada em projeto</i>	<i>51</i>
2.5.3	<i>Lâmina líquida máxima, velocidade crítica e diâmetro mínimo</i>	<i>54</i>
2.6	A teoria dos grafos e sua aplicação na modelagem de redes coletoras de esgoto.....	55
2.6.1	<i>Conceitos fundamentais de teoria dos grafos</i>	<i>55</i>
2.6.2	<i>Modelagem de redes coletoras de esgoto como grafos</i>	<i>57</i>
2.7	Algoritmos de busca em grafos: conceitos fundamentais	61
2.7.1	<i>Busca em largura</i>	<i>61</i>
2.7.2	<i>Algoritmo de busca em largura.....</i>	<i>63</i>
2.8	Otimização do traçado de redes coletoras de esgoto	65

2.8.1	<i>Abordagens de otimização aplicadas ao traçado de redes coletoras</i>	65
2.8.2	<i>Abordagens de otimização baseadas em teoria dos grafos</i>	67
3	METODOLOGIA	69
3.1	O processo de otimização do traçado de redes coletoras de esgoto	70
3.1.1	<i>Ajustes preliminares no grafo base</i>	74
3.1.2	<i>Execução da Árvore 1: Resolvendo caminhos para nós terminais</i>	76
3.1.3	<i>Execução das Árvores 2 e 3: Resolvendo os nós com múltiplas saídas</i>	82
3.2	Busca com múltiplos PVs finais e divisão em sub-bacias	92
3.3	Caracterização dos estudos de caso	93
3.3.1	<i>Estudo de caso 1: Bairro Alto da Expectativa</i>	94
3.3.2	<i>Estudo de caso 2: Bairro Belchior</i>	97
3.3.3	<i>Estudo de caso 3: Cidade de Villa Hermosa (República Dominicana)</i>	102
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	104
4.1	Aplicação do modelo no estudo de caso 1: rede do bairro Alto da Expectativa	104
4.2	Aplicação do modelo no estudo de caso 2: rede do bairro Belchior	109
4.3	Aplicação do modelo no estudo de caso 3: rede de Villa Hermosa	123
5	CONCLUSÃO	129
	REFERÊNCIAS	132

1 INTRODUÇÃO

A introdução deste trabalho apresenta uma visão geral sobre o tema da otimização automática de traçados de redes coletoras de esgoto, ressaltando a importância de modelos computacionais como ferramentas de apoio ao planejamento e execução de sistemas de esgotamento sanitário. Dentre as abordagens feitas neste capítulo, será apresentada uma contextualização da problemática, onde destaca-se os desafios enfrentados por projetistas na definição de traçados de redes coletoras, especialmente em áreas urbanas com topografia complexa, uma vez que devem ser estabelecidas premissas necessárias para que as soluções de traçado conciliem eficiência hidráulica e viabilidade econômica. Além disso, nesse trabalho são abordadas pesquisas que tratam da temática de otimização do traçados de redes coletoras de esgoto utilizando diferentes estratégias de modelagem computacional. Como último item, são apresentados os objetivos desse trabalho, destacando o objetivo geral e os objetivos específicos a serem alcançados com a metodologia proposta.

1.1 Contextualização e Problematização

O planejamento e a execução de sistemas de esgotamento sanitário representam etapas importantes e essenciais para garantir o desenvolvimento urbano sustentável e a promoção da saúde pública. Dentre os componentes apresentados para esses sistemas, a definição do traçado de uma rede coletora de esgoto constitui-se como uma das etapas mais cruciais, uma vez que esse processo envolve a análise de variáveis topográficas, hidráulicas e econômicas, que, quando não são devidamente integradas, podem comprometer a funcionalidade e a viabilidade do sistema. Em processos de dimensionamento convencionais, o traçado das redes é elaborado de forma manual, por métodos de tentativa e erro e tendo como base na interpretação de curvas de nível e a experiência do projetista. Apesar de ser comum tal metodologia, a abordagem em questão está sujeita a limitações que se tornam mais evidentes à medida que o tamanho e a complexidade das áreas urbanas aumentam (Ito, 2023).

Em cenários topograficamente desfavoráveis, a definição do traçado pode resultar na ocorrência de trechos com declividade contrária ao fluxo gravitacional, os quais podem elevar significativamente os custos de implantação e operação do sistema. Diante dessa situação, torna-se evidente a necessidade de metodologias que buscam automatizar o processo de geração do traçado, buscando a adoção de critérios técnicos capazes de otimizar simultaneamente o desempenho hidráulico e os custos construtivos de redes coletoras de esgoto.

Na literatura, a busca por métodos de otimização de traçado tem sido recorrente, como o trabalho desenvolvido por Rodrigues *et al.* (2019), que propuseram um algoritmo baseado em busca em profundidade (*Depth-First Search* – DFS) para otimizar o traçado de redes de esgoto, enfrentando os desafios de definir o traçado com menor profundidade de escavação. O modelo foi validado em dois estudos de caso, sendo estes uma rede hipotética e uma rede real de 125 trechos e 74 nós. Nos testes feitos, o algoritmo foi capaz de identificar trajetos alternativos que reduziram significativamente as profundidades dos coletores e evitaram situações hidráulicas inviáveis, como ciclos de fluxo.

Duque *et al.* (2020) propuseram uma metodologia de otimização matemática iterativa para resolver, de forma integrada, os problemas de seleção do traçado e dimensionamento hidráulico de redes coletoras. A abordagem consiste em um modelo de programação inteira mista (MIP) para definir a configuração da rede com base no fluxo e direção de cada trecho, seguido de um modelo para o dimensionamento hidráulico utilizando um algoritmo de caminho mínimo. O método foi testado em duas redes comumente usadas na literatura e em uma rede real. A metodologia apresentou resultados positivos, com reduções de até 42% nos custos totais de implantação.

A Teoria dos Grafos tem sido amplamente empregada, na literatura recente, como ferramenta de apoio na otimização de redes coletoras de esgoto. Ito (2023) desenvolveu uma metodologia que integra a Teoria dos Grafos com Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) para determinar o traçado e o dimensionamento ótimos dessas redes. Turan *et al.* (2019) propuseram uma abordagem baseada exclusivamente em conceitos de Teoria dos Grafos para a geração de traçados viáveis em sistemas de esgoto sanitário. Ambos os trabalhos evidenciam o potencial da Teoria dos Grafos para modelar a rede como um sistema ramificado sem ciclos, permitindo explorar algoritmos clássicos como árvores geradoras mínimas e caminhos mínimos para alcançar soluções otimizadas.

Apesar dos avanços apresentados na literatura, muitos dos modelos desenvolvidos ainda apresentam limitações quando aplicados a redes de grande porte e com alta complexidade topográfica, principalmente em termos de tempo de processamento e da necessidade de ajustes manuais para adaptação a diferentes cenários. Nesse sentido, o presente trabalho propõe uma solução inovadora para a geração automática do traçado de redes coletoras de esgoto, utilizando estratégias de caminhos mínimos em árvores de busca em largura aplicadas sobre o grafo base da rede. O algoritmo desenvolvido se destaca por sua capacidade de analisar todos os caminhos possíveis entre os poços de visita (PVs), avaliando-os com base em critérios topográficos e hidráulicos para identificar o traçado que represente a solução mais eficiente e viável.

1.2 Objetivos

Esta tese tem como objetivo principal desenvolver e validar um algoritmo para geração automática do traçado de redes coletoras de esgoto, utilizando estratégias de caminhos mínimos em árvores de busca em largura, com foco na otimização hidráulica e econômica, visando à aplicabilidade em redes reais e complexas do ponto de vista topográfico.

Para alcançar o objetivo principal, listam-se abaixo os principais objetivos específicos desta pesquisa:

- Modelar redes coletoras de esgoto como grafos direcionados, representando poços de visita como nós e trechos como arestas, com atribuição de pesos baseados em critérios hidráulicos e topográficos;
- Implementar rotinas de busca em largura para identificar e resolver situações críticas da rede, como nós terminais e nós com múltiplas saídas, garantindo a conectividade hidráulica e evitando ciclos de fluxo;
- Definir e aplicar métricas de avaliação baseadas em declividade relativa e comprimento acumulado para selecionar os caminhos mais eficientes;
- Validar o algoritmo em estudos de caso com redes de pequeno, médio e grande porte, analisando cenários com diferentes configurações topográficas e níveis de complexidade;
- Dimensionar hidráulicamente um dos estudos de caso, visando obter parâmetros comparativos, principalmente em termos de diâmetros dos coletores da rede;
- Avaliar a eficiência econômica da solução trazida pelo modelo proposto nesse trabalho, por meio do levantamento de custos relacionados a escavação e custo com tubulações;
- Verificar o desempenho computacional do algoritmo em termos de tempo de processamento para as redes apresentadas nos estudos de caso;
- Comparar os traçados otimizados gerados pelo modelo com os projetos originais, discutindo os impactos nas profundidades de escavação, no número de trechos invertidos e na distribuição das sub-bacias;
- Comparar os resultados obtidos com outras metodologias presentes na literatura.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho em questão está estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1 é apresentada uma introdução ao tema, contextualizando o problema, justificando a pesquisa e explicitando os objetivos geral e específicos a serem alcançados. No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica que aborda os fundamentos das redes coletoras de esgoto, conceitos de Teoria dos Grafos e algoritmos de otimização aplicados ao traçado de redes, além de discutir as contribuições mais relevantes da literatura recente. O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, detalhando o desenvolvimento do algoritmo proposto, as estratégias de caminhos mínimos em árvores de busca em largura, os critérios técnicos utilizados e os estudos de caso selecionados para validação do modelo. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, incluindo a análise comparativa entre os traçados originais e os gerados pelo algoritmo, bem como a discussão sobre o desempenho computacional e hidráulico do modelo. O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições da pesquisa e sugerindo perspectivas para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

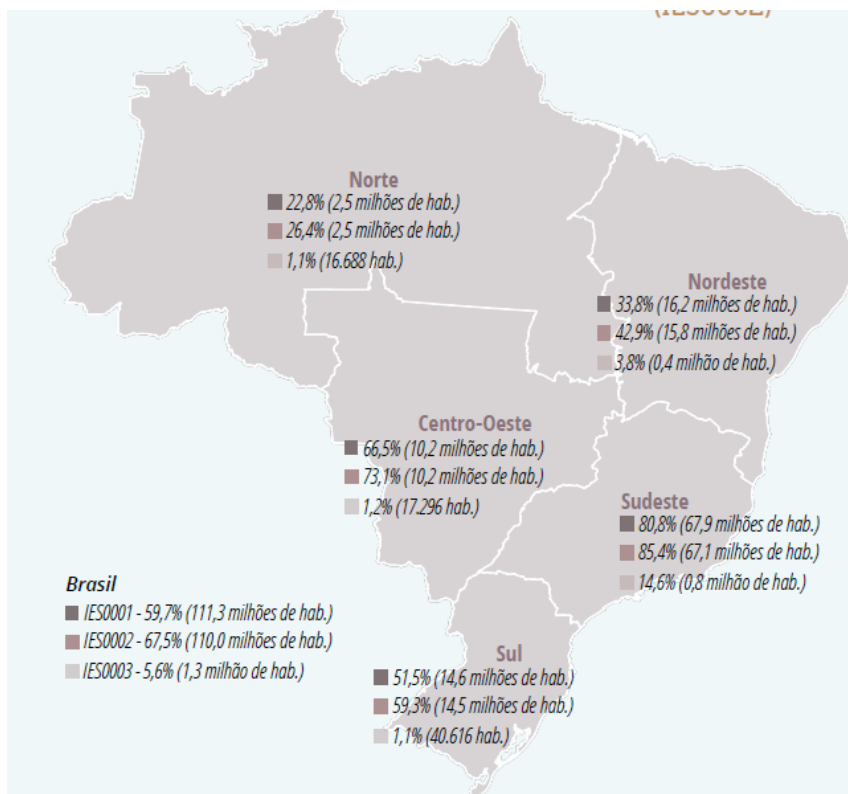
2.1 Panorama do saneamento básico no Brasil

2.1.1 Indicadores quantitativos do saneamento básico no Brasil

O saneamento básico representa um dos elementos fundamentais da saúde pública e do desenvolvimento socioeconômico sustentável. O acesso à água de qualidade e ao esgotamento sanitário reduz significativamente a incidência de doenças vinculadas à água e tende melhorar a qualidade de vida. De acordo com Borges *et al.* (2022), a universalização do saneamento representa um componente essencial para o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nº 6, que visa assegurar disponibilidade e manejo sustentável da água e do saneamento para todos.

No Brasil, a evolução dos indicadores de saneamento básico tem apresentado avanços de forma pontual, no entanto, ainda persistem graves desigualdades em algumas regiões brasileiras. De acordo com o Relatório dos serviços de Esgotamento Sanitário 2024, elaborado com base em dados dos Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA) relativos ao ano base de 2023, a cobertura média de coleta de esgoto no país atingiu 59,7% da população brasileira, o que corresponde a aproximadamente 131 milhões de pessoas atendidas. Apesar do avanço constatado, verifica-se que os dados indicam que há uma distância expressiva para o que se espera em relação à universalização dos serviços de saneamento. As disparidades regionais continuam expressivas. Como pode ser observado na Figura 1, o Sudeste lidera com 80,8% de cobertura, seguida pelo Centro-Oeste (66,5%) e Sul (51,5%), enquanto o Nordeste (33,8%) e o Norte (22,8%) ainda enfrentam grandes defasagens. (Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico, 2024).

Figura 1 – Distribuição da cobertura de redes de esgotamento sanitário



Fonte: Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (2024)

De forma complementar, as estimativas do Ranking do Saneamento 2025, elaborado pela GO Associados em parceria com o Instituto Trata Brasil, que trazem dados dos 100 municípios brasileiros mais populosos em 2023, apontam que apenas 36 municípios atingindo a meta de 90% de atendimento. Os resultados revelam que Franca (SP), Limeira (SP), Cascavel (PR) e Socoraba (SP) se aproximaram da universalização, superando 98% de cobertura, enquanto Macapá (AP), Porto Velho (RO) e Belford Roxo (RJ) registraram índices inferiores a 10%, reforçando o contraste entre as regiões mais e menos desenvolvidas (Instituto Trata Brasil; Go Associados, 2025).

O Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) define dentre suas metas, a universalização dos serviços de saneamento, com alcance até 2033, variando conforme as condições socioeconômicas de cada Unidade da Federação. O cumprimento dessas metas depende da ampliação dos investimentos e da integração entre os entes federativos, sobretudo nas regiões com menores níveis de cobertura, como nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Assim, o Plansab atua como diretriz estratégica, mas a efetividade das metas ainda está condicionada à capacidade de planejamento e gestão local (Santos; Mendes, 2023).

Os investimentos necessários para reverter esse cenário permanecem elevados. Portugal e Gonzaga (2025) estimam que o país precisará investir aproximadamente R\$ 893 bilhões até 2033 para alcançar a universalização do saneamento básico, dos quais R\$ 436 bilhões devem ser destinados à expansão e modernização dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto. Por outro lado, Instituto Trata Brasil e Go Associados (2025) evidenciam que o investimento médio dos 100 maiores municípios brasileiros em 2023 foi de R\$ 103,16 por habitante, valor insuficiente para atingir as metas estabelecidas quando se considera que o valor de investimento necessário é de R\$ 223,82 por habitante. Nesse contexto, o Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) surge como instrumento de incentivo à regionalização e à cooperação federativa, mas sua plena efetividade ainda depende da consolidação de modelos de regulação e fiscalização adequados (Instituto Trata Brasil; GO Associados, 2025).

Calvetti *et al.* (2025) apontam que o nível de atendimento em coleta e tratamento de esgoto apresenta forte correlação com indicadores socioeconômicos. O estudo demonstrou relação positiva superior a 0,9 entre o percentual de esgoto tratado e o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) municipal, e correlação negativa com o índice de Gini, indicando que a precariedade dos serviços sanitários é mais acentuada em áreas de maior desigualdade social. As constatações feitas reforçam que a cobertura de esgoto é também um elemento indicativo de vulnerabilidade social. Na mesma linha, Santos *et al.* (2024), destacam que a ausência de infraestrutura adequada de esgoto propicia a disseminação de microrganismos patogênicos e o aumento de doenças de veiculação hídrica, reforçando a importância do saneamento como elemento central da saúde pública e da qualidade de vida urbana.

2.2 Sistemas de esgotamento sanitário: conceitos e princípios gerais

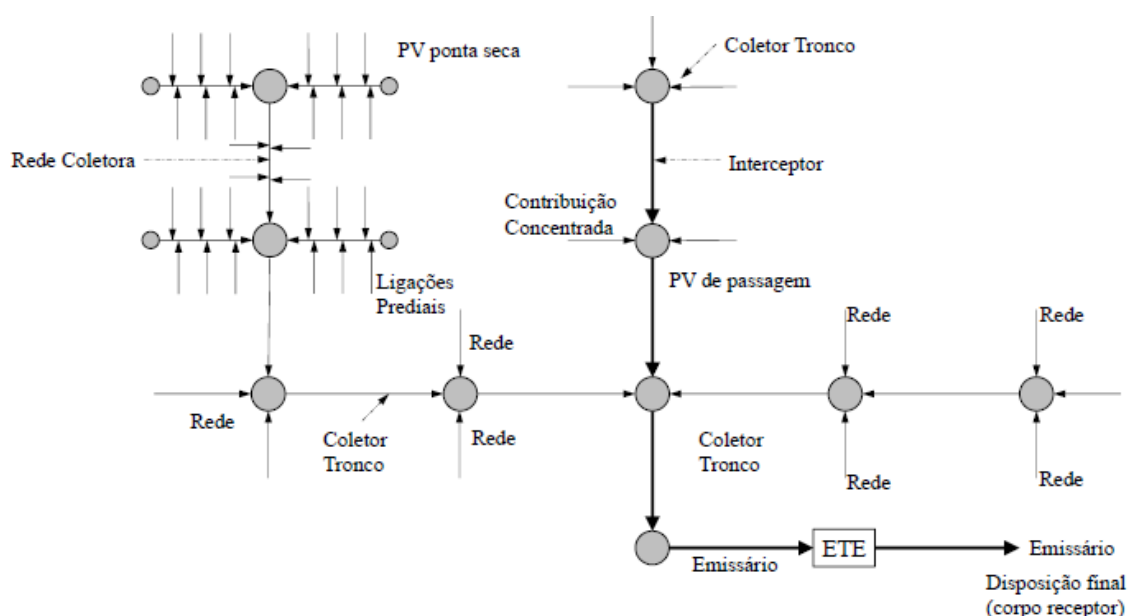
2.2.1 Definição de um sistemas de esgotamento sanitário

O sistema de esgotamento sanitário pode ser definido como o conjunto de obras, equipamentos e instalações operacionais destinados à coleta, ao transporte, ao tratamento e à disposição final dos esgotos sanitários gerados em uma determinada área.

Conforme Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), esses sistemas englobam a rede coletora e seus dispositivos, bem como as unidades de elevação e tratamento, sendo concebidos a partir de critérios técnicos, hidráulicos e operacionais. A Figura 2 apresenta, de forma esquemática, a organização de um sistema de esgotamento sanitário do tipo separador absoluto, mostrando a organização de um sistema de esgotamento sanitário do tipo separador absoluto, mostrando a os principais componentes desde a coleta dos esgotos nas edificações até a disposição final no corpo receptor. É possível observar que os esgotos provenientes das ligações prediais são

inicialmente conduzidos pelas redes coletoras, estas, por sua vez, convergem para coletores tronco responsáveis pela concentração das vazões oriunda dos coletores. Esses coletores direcionam os efluentes aos interceptores, e estes, posteriormente, aos emissários, que promovem o transporte até a estação de tratamento de esgotos (ETE), sendo o efluente tratado posteriormente lançado no corpo receptor por meio do emissário final.

Figura 2 – Representação de um sistema de esgotamento sanitário



Fonte: Ito (2023)

Em termos de classificação, os sistemas de esgotamento sanitário podem ser do tipo unitário, no qual esgotos e águas pluviais são conduzidos conjuntamente, ou do tipo separador, subdividido em separador parcial e separador absoluto (Rodrigues, 2006; Ribeiro *et al.*, 2024).

No sistema unitário, os esgotos sanitários, as águas pluviais e as águas de infiltração são transportados por uma única rede de canalizações, sendo essa tipologia historicamente adotada em cidades de clima temperado, onde predominam precipitações de menor intensidade e maior regularidade (Gehling; Benetti, 2005; Volschan, 2009). Conforme destacado por Volschan (2009), nesse sistema as redes são dimensionadas prioritariamente em função das vazões pluviais, o que implica grandes diâmetros, elevadas vazões em períodos chuvosos e a necessidade de dispositivos de extravasamento para proteção das estações de tratamento. No contexto brasileiro, caracterizado por eventos pluviométricos intensos e concentrados, essa configuração tende a apresentar limitações técnicas, operacionais e ambientais, sobretudo devido à ocorrência de extravasamentos frequentes.

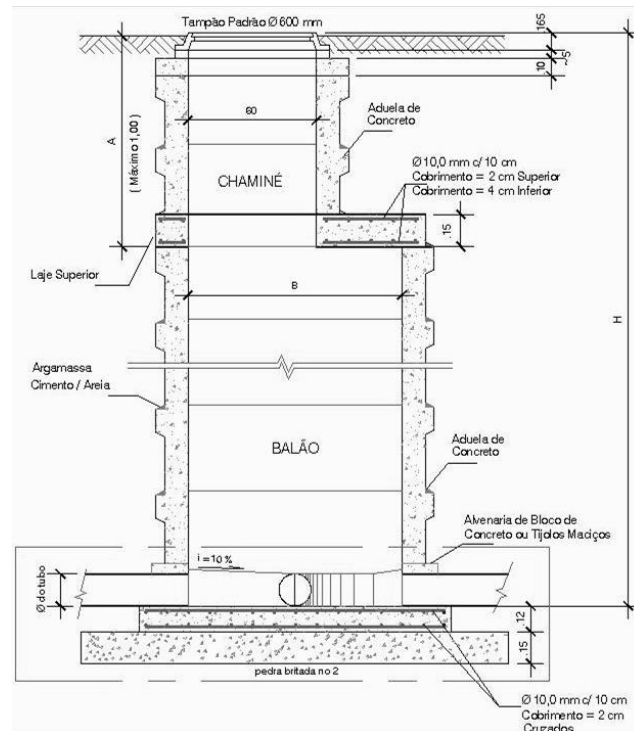
Por sua vez, os sistemas separadores distinguem-se pela condução independente dos esgotos sanitários e das águas pluviais, podendo ser classificados em separador parcial e separador absoluto. No sistema separador parcial, parte das águas pluviais provenientes de telhados e pátios é admitida na rede de esgotos sanitários, coexistindo com uma rede específica de drenagem pluvial, configuração historicamente adotada em algumas cidades brasileiras como solução intermediária (Volschan, 2009). Já no sistema separador absoluto, amplamente adotado no Brasil, os esgotos sanitários e as águas de resultantes de processos de infiltração são conduzidos por uma rede exclusiva, enquanto as águas pluviais são coletadas por um sistema de drenagem totalmente independente (Fundação Nacional da Saúde, 2006; Rodrigues, 2006).

2.2.2 Elementos constituintes das redes coletoras de esgoto

A rede coletora de esgoto sanitário é composta por um conjunto de elementos hidráulicos e dispositivos auxiliares que atuam de forma integrada para garantir a coleta, o transporte e o encaminhamento adequado dos esgotos gerados nas edificações até as unidades de tratamento ou disposição final. O elemento básico dessa estrutura é o coletor, tubulação enterrada destinada a receber diretamente as contribuições provenientes das ligações prediais, operando, em geral, sob escoamento por gravidade. À medida que os coletores passam a concentrar vazões provenientes de diferentes trechos da rede, eles assumem funções superiores em relação à hierarquia, surgindo os chamados coletores principais ou coletores-tronco, caracterizados por conduzir esgotos sem receber ligações prediais diretas (Rodrigues, 2006; Fundação Nacional da Saúde, 2006).

Nas extremidades das tubulações, a rede coletora apresenta dispositivos de acesso e manutenção indispensáveis ao seu funcionamento adequado. Podendo ser observados na Figura 3, os poços de visita constituem estruturas implantadas em pontos estratégicos da rede, como mudanças de direção, variações de declividade, alterações de diâmetro ou encontros de coletores, permitindo inspeção, limpeza, ventilação e execução de serviços corretivos. (Fundação Nacional da Saúde, 2006; Ribeiro *et al.*, 2024).

Figura 3 – Seção transversal típica de um poço de visita.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2024)

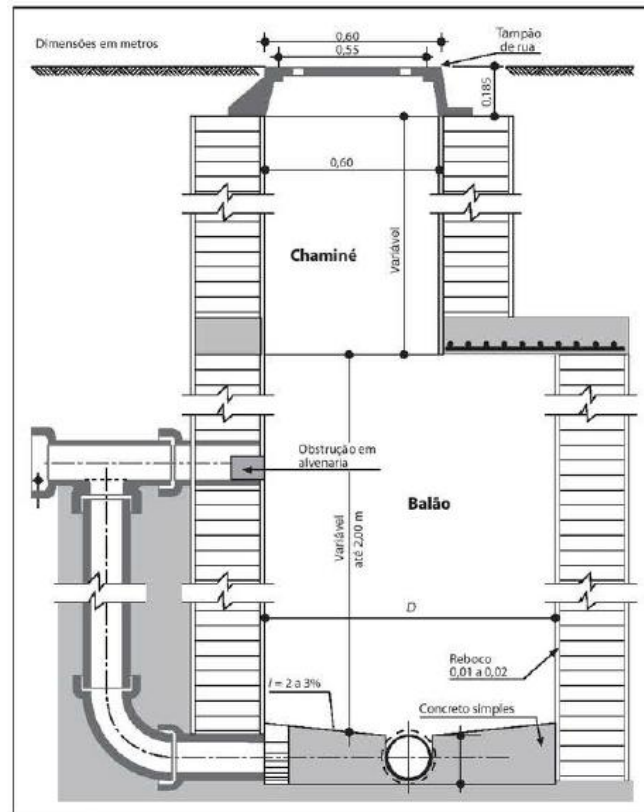
De acordo com Ribeiro *et al.* (2024), tradicionalmente, os PVs eram implantados em todos os pontos da rede. Entretanto, a evolução dos métodos construtivos e a disponibilidade de equipamentos mecanizados de limpeza permitiram a adoção de soluções alternativas, como poços de inspeção, terminais de inspeção e limpeza e caixas de passagem, sobretudo em redes de menor porte e menor profundidade. Todavia, tais soluções adicionais representam sistemas em que, geralmente, não há a possibilidade de visitação.

Apesar da possibilidade de adoção desses dispositivos alternativos, os autores ressaltam que o poço de visita permanece insubstituível em situações específicas que impõem maiores exigências hidráulicas e operacionais, como nos pontos de convergência de múltiplos trechos, nos locais onde se faz necessária a instalação de tubos de queda para dissipação de energia, nas extremidades de sifões invertidos ou passagens forçadas, bem como em trechos implantados a grandes profundidades. Nessas condições, a adoção do PV não se limita a uma escolha construtiva, mas constitui requisito técnico essencial para assegurar a segurança estrutural, a estabilidade do escoamento e a viabilidade das operações de manutenção ao longo da vida útil da rede coletora (Ribeiro *et al.*, 2024).

Como pode ser observado na Figura 4, em situações nas quais há diferenças significativas de cota entre os trechos afluente e efluente, o poço de visita pode ser associado a

um tubo de queda, dispositivo destinado a conduzir o esgoto verticalmente no interior do PV, dissipando energia e evitando a ocorrência de turbulências excessivas, erosões no fundo do poço e condições hidráulicas desfavoráveis ao escoamento.

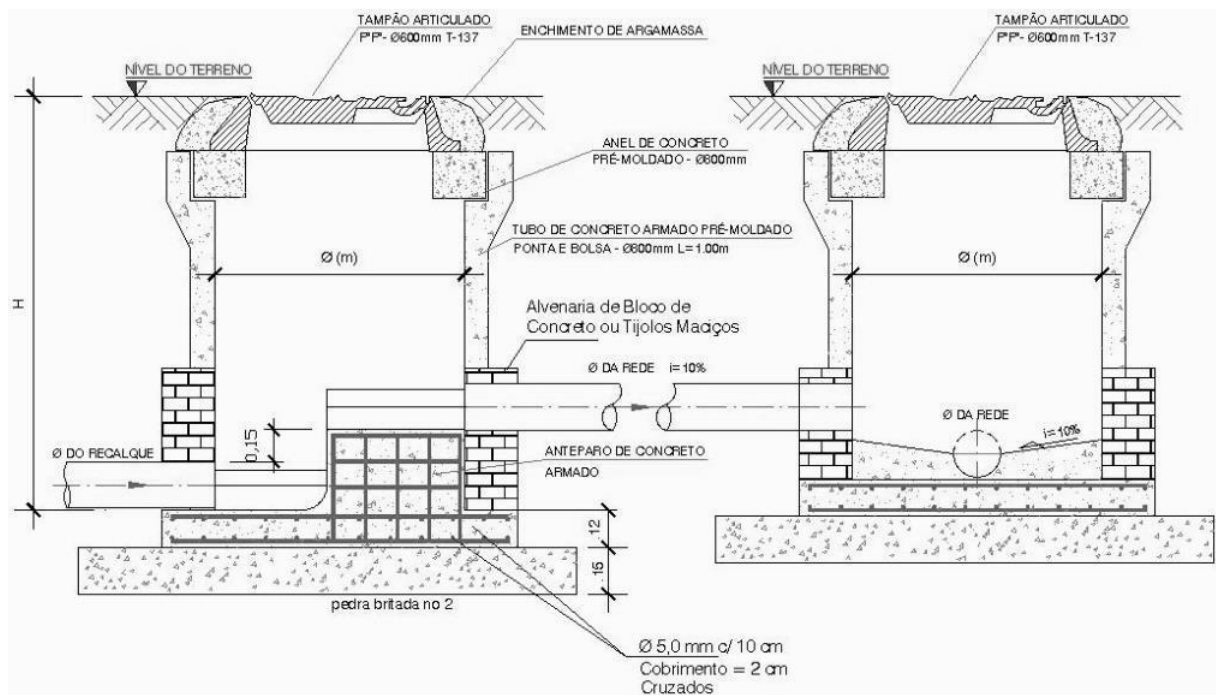
Figura 4 – Representação de um poço de visita associado a um tubo de queda



Fonte: Netto e Fernández (2018)

Como pode ser observado na Figura 5, os poços de transição (PV de transição), são dispositivos acessórios da rede coletora associados à necessidade de compatibilização entre diferentes condições de escoamento, especialmente quando há a descarga de esgotos provenientes de tubulações pressurizadas no interior de sistemas que operam por gravidade. Nessas situações, o PV de transição atua como elemento intermediário, permitindo a adaptação do regime hidráulico e a dissipação da energia do escoamento antes de sua condução pela rede coletora convencional. Assim, sua utilização não se configura como uma solução generalizada, mas como um dispositivo técnico aplicado pontualmente em trechos onde a simples conexão direta entre condutos poderia comprometer a operação adequada do sistema, exigindo cuidados adicionais de projeto e execução (Ribeiro *et al.*, 2024).

Figura 5 – Representação de um poço de transição.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2024)

Em relação a novos materiais empregados em redes coletoras de esgoto, o tubo de inspeção e limpeza em material flexível (Figura 6) é apresentado como uma alternativa construtiva aos dispositivos rígidos tradicionais, sendo empregado em situações específicas em que se busca maior facilidade de instalação e garantia de estanqueidade. De acordo com Ribeiro *et al.* (2024), a adoção de materiais flexíveis, como tubos plásticos, mostra-se vantajosa em contextos onde há presença de lençol freático elevado ou necessidade de rápida execução, desde que observados os critérios técnicos de ancoragem, vedação e compatibilização com as demais estruturas da rede coletora.

Figura 6 – Tubo de inspeção e limpeza em material flexível.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2024)

2.2.3 Legislação e Normas Técnicas Brasileiras

A concepção, o projeto e a operação de sistemas coletores de esgoto sanitário no Brasil estão fundamentados em um conjunto articulado de leis e normas técnicas que estabelecem diretrizes institucionais, critérios de desempenho e parâmetros mínimos de segurança, funcionalidade e qualidade. No âmbito legal, a Lei nº 11.445/2007, que institui a Política Nacional de Saneamento Básico, define o saneamento como um serviço público essencial e estabelece princípios como universalização do acesso, integralidade das ações e sustentabilidade econômico-financeira. A atualização do marco regulatório ocorre com a promulgação da Lei nº 14.026/2020, conhecida como Novo Marco Legal do Saneamento, que introduz metas explícitas de universalização e reforça a necessidade de eficiência técnica e econômica na prestação dos serviços (Brasil, 2020). Conforme discutido por Ito (2023), essa legislação amplia as exigências sobre o planejamento e o desempenho dos sistemas coletores, na medida em que a ampliação da cobertura de esgotamento sanitário passa a ser acompanhada por mecanismos de regulação, fiscalização e avaliação de resultados.

Do ponto de vista técnico, a normalização brasileira desempenha função fundamental ao padronizar conceitos, terminologias e critérios de projeto aplicáveis às redes coletoras de esgoto. De acordo com a descrição de Ribeiro *et al.* (2024), a seguir são apresentadas as principais normas presentes na literatura atualmente:

- **NBR 9649:1986** - Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário – Procedimentos;
- **NBR 7367:1988** - Projeto e assentamento de tubulações de PVC rígido para sistemas de esgoto sanitário;
- **ABNT NBR 7968:1983** - Diâmetros nominais em tubulações de saneamento nas áreas de rede de distribuição, adutoras, redes coletoras de esgoto e interceptores – Padronização;
- **NBR 9648:1986** - Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário;
- **NBR 9800:1987** - Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário – Procedimento;
- **NBR 15710:2009** - Sistemas de redes de coleta de esgoto sanitário doméstico a vácuo;
- **NBR 12207:2016** - Projeto de interceptores de esgoto sanitário;
- **NBR 12208:2020** – Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de esgoto — Requisitos;
- **NBR 15593:2023** - Sistemas de tubulação plástica para abastecimento de água, drenagem e esgotos sob pressão — Conexões soldáveis de polietileno (PE);
- **NBR 15750:2023** - Tubulações de PVC-O (cloreto de polivinila não plastificado orientado) para sistemas de transporte de água ou esgoto sob pressão — Requisitos e métodos de ensaios; e
- **NBR 17015:2023** - Execução de obras lineares para transporte de água bruta e tratada, esgoto sanitário e drenagem urbana, utilizando tubos rígidos, semirrígidos e flexíveis.

De forma integrada, as normas técnicas da ABNT elencadas desempenham a função de traduzir as diretrizes legais do saneamento básico em critérios objetivos de engenharia, assegurando que os sistemas coletores de esgoto sejam concebidos, dimensionados e executados segundo padrões mínimos de segurança, funcionalidade e durabilidade. Essas normas estabelecem desde os fundamentos para a concepção e o projeto das redes, por meio da padronização de terminologias, parâmetros geométricos e critérios construtivos, até requisitos específicos relacionados aos materiais, métodos de ensaio e procedimentos executivos, contemplando diferentes tipos de tubulações e condições de implantação.

2.3 Traçado de redes coletoras de esgoto

2.3.1 Condicionantes geométricos e construtivos do traçado

O traçado de uma rede coletora por gravidade é condicionado, simultaneamente, por fatores geométricos (relevo, malha viária, direção preferencial de escoamento e organização urbanística) e por limitações construtivas (escavação, profundidade, interferências e execução). Em termos geométricos, a diretriz central consiste em compatibilizar o alinhamento da rede com o sistema viário e com as cotas do terreno, de modo a garantir escoamento livre e continuidade hidráulica ao longo dos coletores, reduzindo a necessidade de soluções especiais e evitando profundidades excessivas de vala. Ferreira (2013) reforça que o traçado influencia diretamente os custos de construção, pois afeta extensão de rede, volumes de escavação e condições de execução, tornando indispensável avaliar alternativas geométricas ainda na fase de concepção.

Em relação ao arranjo geométrico em planta, Ribeiro *et al.* (2024) sistematizam tipologias de traçado que auxiliam a organizar a coleta em áreas urbanas, com destaque para redes perpendiculares, tipo leque, distrital e condominial, cujo emprego depende da configuração das quadras, do sentido das declividades predominantes e da hierarquização dos coletores. Pereira e Silva (2010) destacam que a definição da alternativa de traçado de redes coletoras de esgoto deve ser fundamentada em um estudo detalhado da concepção do sistema, uma vez que essa escolha influencia diretamente as profundidades das tubulações, a quantidade de singularidades e os volumes de movimentação de terra. Pereira e Silva (2010) ainda reforçam que um traçado tecnicamente adequado contribui para a redução dos custos de implantação da rede coletora e das demais unidades do sistema de esgotamento sanitário, ao minimizar escavações profundas e soluções construtivas mais complexas.

Como pode ser observado na Figura 7, as redes perpendiculares caracterizam-se por um traçado em que os coletores secundários convergem aproximadamente de forma ortogonal em direção a coletores principais ou troncos dispostos ao longo de cursos d'água. Essa configuração é típica de cidades atravessadas ou circundadas por rios, nas quais o sistema de esgotamento se desenvolve acompanhando as margens do corpo hídrico. Nesse arranjo, os coletores tronco recebem contribuições de diversos coletores independentes, conduzindo os esgotos ao interceptor marginal, responsável pelo transporte até o destino final. A topografia e a presença do curso d'água condicionam a existência de múltiplos coletores principais aproximadamente perpendiculares ao interceptor, organização que é adequada a áreas com drenagem natural bem definida (Alem Sobrinho; Tsutiya, 2000; Ribeiro *et al.*, 2024).

Figura 7 – Ilustração de um traçado do tipo perpendicular.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2024)

As redes em leque, como observa-se na Figura 8, são associadas a áreas com topografia acidentada, nas quais os coletores tronco se desenvolvem preferencialmente ao longo dos fundos de vale ou das partes mais baixas das bacias, enquanto os coletores secundários se dispõem de forma convergente, lembrando a abertura de um leque ou, em alguns casos, uma espinha de peixe. Esse tipo de traçado permite aproveitar as declividades naturais do terreno, facilitando o escoamento por gravidade e a organização das sub-bacias contribuintes (Alem Sobrinho; Tsutiya, 2000; Ribeiro *et al.*, 2024).

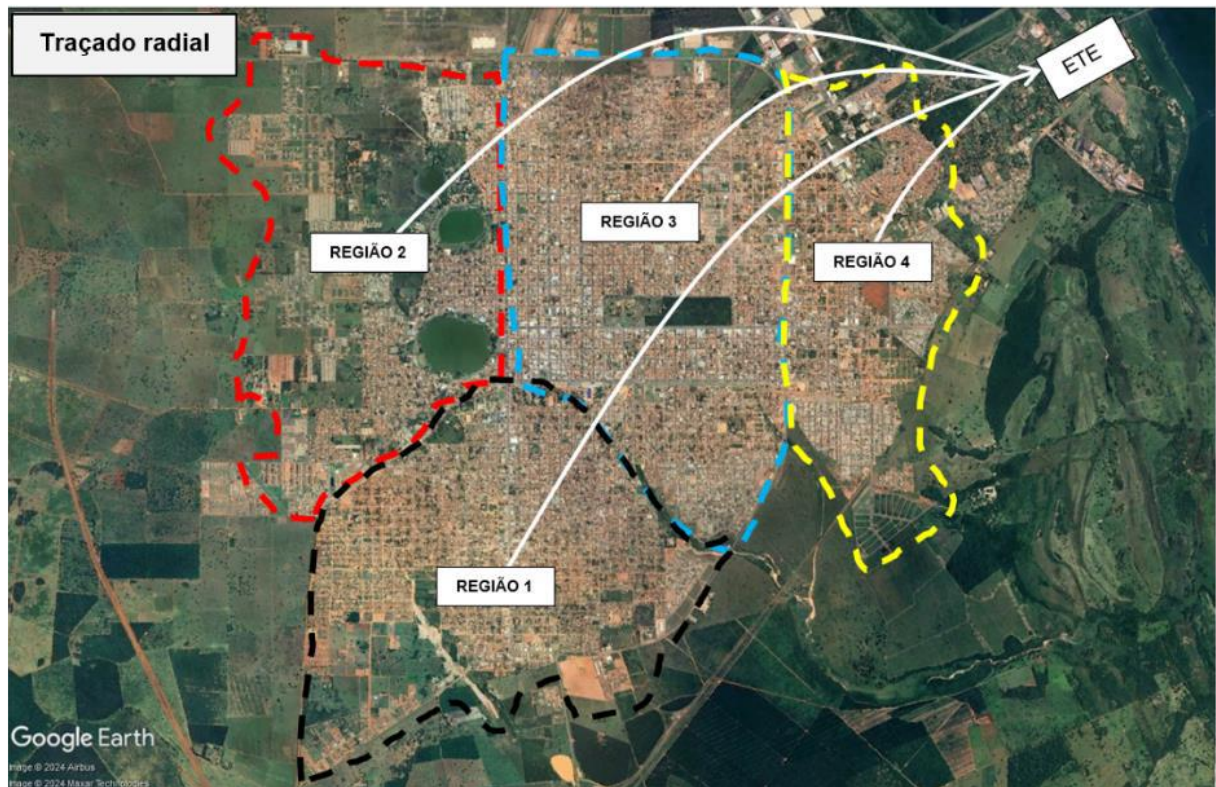
Figura 8 – Ilustração de um traçado do tipo leque.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2024)

As redes distritais, também denominadas radiais, cuja estrutura é apresentada na Figura 9, são características de cidades predominantemente planas, nas quais o território urbano é dividido em distritos ou setores independentes. Em cada distrito, os esgotos são conduzidos a um ponto baixo previamente definido, a partir do qual podem ser recalcados para outro setor, para um interceptor principal ou diretamente para a unidade de tratamento. Essa configuração permite maior controle operacional por áreas e facilita o planejamento por etapas, sendo particularmente útil em cidades extensas com baixa declividade natural. Em virtude da característica topográfica plana, esse tipo de rede pressupõe a existência de estações elevatórias para possibilitar o recalque de esgoto entre zonas (Alem Sobrinho; Tsutiya, 2000; Ribeiro *et al.*, 2024).

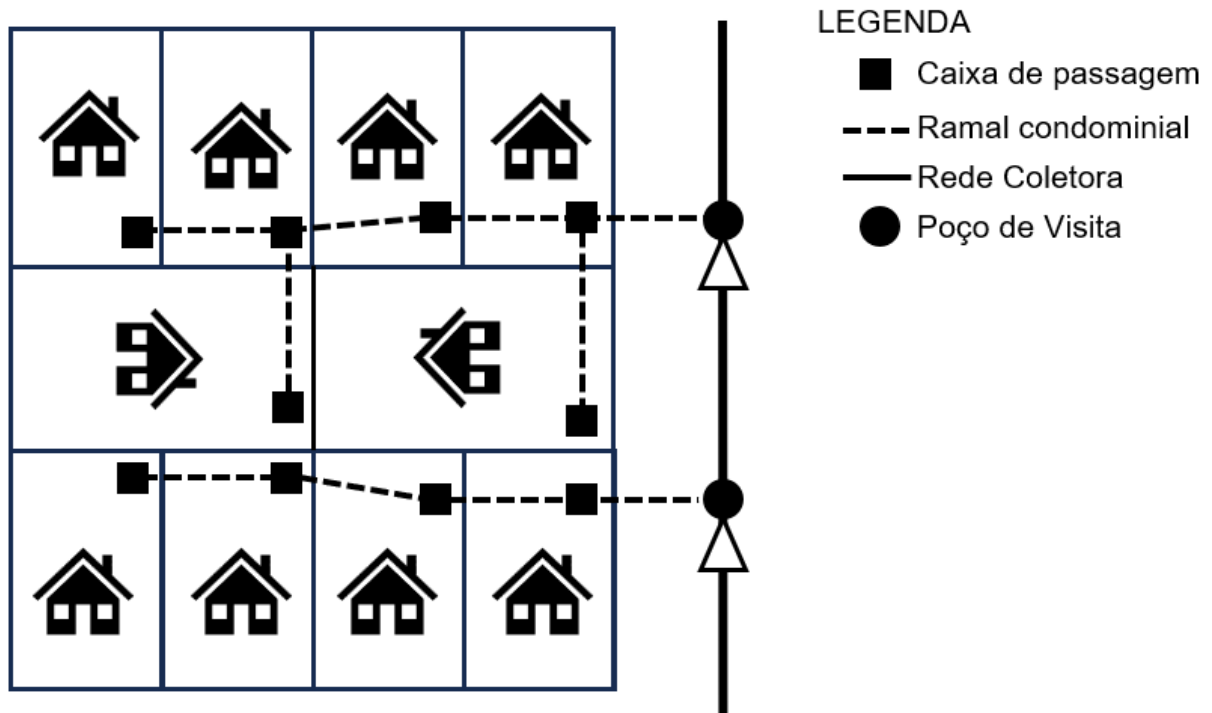
Figura 9 – Ilustração de um traçado do tipo distrital.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2024)

Por fim, o modelo de redes condominiais, que pode ser observado na Figura 10, diferenciam-se das configurações tradicionais por adotarem um traçado interno às quadras ou aos lotes, compartilhando ramais entre um conjunto reduzido de edificações. Conforme discutido por Ribeiro *et al.* (2024), esse tipo de solução tem sido empregado como alternativa técnica para a redução de extensões, profundidades e custos de implantação, especialmente em áreas de maior adensamento urbano, demandando, contudo, arranjos institucionais específicos e maior envolvimento dos usuários na operação e manutenção do sistema.

Figura 10 – Ilustração de um traçado do tipo condominial.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2024)

De forma complementar aos condicionantes geométricos e hidráulicos, o traçado de redes coletoras de esgoto deve ser analisado à luz dos instrumentos de planejamento urbano e de saneamento, os quais estabelecem diretrizes que condicionam a implantação da infraestrutura ao ordenamento territorial. Dessa forma, os planos diretores de urbanização e saneamento orientam o uso e a ocupação do solo, a hierarquização viária e a expansão dos serviços públicos, influenciando diretamente a definição dos eixos de coleta e a setorização do sistema. Nesse contexto, a compatibilização entre o projeto da rede coletora e os instrumentos de planejamento urbano constitui requisito essencial para assegurar a coerência do sistema ao longo do tempo, evitando soluções pontuais que comprometam sua eficiência futura (Ribeiro *et al.*, 2024).

Em relação às interferências e às condições construtivas, Fonseca *et al.* (2014) destacam que a execução de redes coletoras em áreas urbanizadas exige planejamento prévio da locação das valas e adequada compatibilização com as infraestruturas existentes. Os autores evidenciam que a ausência desse planejamento pode resultar em dificuldades durante a execução, demandando ajustes em campo e ocasionando atrasos e aumento de custos na implantação das redes coletoras de esgoto. Em consonância com Ribeiro *et al.* (2024), observa-se que a adequada consideração das interferências permite ajustar o alinhamento e a

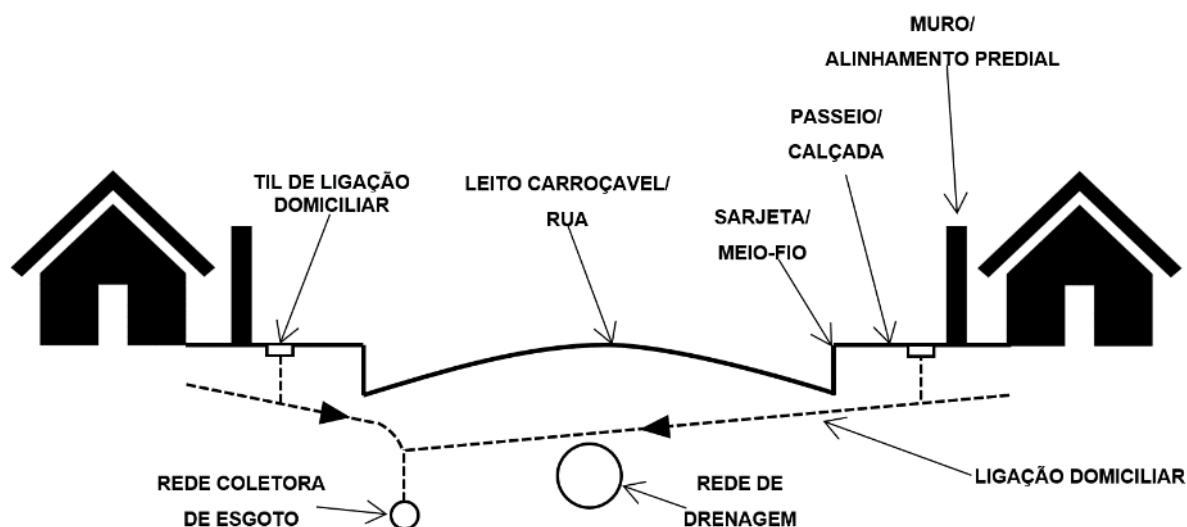
profundidade dos coletores, reduzindo riscos de danos a estruturas existentes e assegurando maior segurança durante a execução e a operação do sistema.

A caracterização do solo e elementos relacionados à geotecnia também exercem influência direta sobre o traçado e as soluções construtivas adotadas. O levantamento do tipo de solo, das estruturas e a realização de sondagens fornecem subsídios essenciais para a caracterização do subsolo, permitindo identificar limitações relacionadas à capacidade de suporte, à presença de rochas e às condições geométricas do terreno, que podem impor restrições ou inviabilizar determinadas soluções de traçado. A adequada consideração dessas características na fase de concepção contribui para a redução de profundidades excessivas, volumes de escavação e complexidade construtiva, refletindo diretamente nos custos e na segurança da implantação (Ferreira, 2013; Ribeiro *et al.*, 2024).

2.3.2 Localização da tubulação em vias públicas

A locação das tubulações coletoras no espaço viário constitui decisão fundamental no projeto de redes de esgotamento sanitário, uma vez que condiciona tanto a viabilidade das ligações prediais quanto as condições de execução, operação e manutenção do sistema. A solução preferencial consiste no assentamento da rede no eixo do leito carroçável, aproveitando a faixa central da via para garantir simetria hidráulica, facilidade de acesso e maior regularidade construtiva. Entretanto, a presença de galerias de águas pluviais ou de outras interferências no eixo da rua pode inviabilizar essa alternativa, exigindo o deslocamento da tubulação para um dos terços laterais do pavimento, preferencialmente aquele mais favorável às ligações prediais, de modo a reduzir profundidades excessivas e facilitar a conexão dos ramais domiciliares. A ilustração do processo de locação na presença de galerias pluviais no leito carroçável pode ser observada na Figura 11 (Ribeiro *et al.*, 2024).

Figura 11 – Locação da tubulação de uma rede coletora de esgoto.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2024)

Em situações específicas, a adoção de redes duplas tem sido indicada como alternativa tecnicamente vantajosa para a locação das tubulações coletoras. De acordo com Ribeiro *et al.* (2024), essa solução mostra-se particularmente adequada em vias públicas com largura superior a 15 m, pavimentação com largura maior que 10 m e tráfego intenso, bem como em trechos onde a presença de galerias de águas pluviais dificulta a implantação no eixo do leito carroçável. Ribeiro *et al.* (2024) também destacam que redes duplas podem ser necessárias quando se trata de coletores de grandes dimensões, com diâmetro superior a 400 mm, ou implantados a profundidades maiores que 4,0 m, situações nas quais a execução de ligações prediais diretas torna-se tecnicamente complexa ou inviável. Nessas condições, a duplicação da rede contribui para melhorar a acessibilidade às edificações e reduzir interferências com o tráfego, ainda que implique maior extensão de tubulações e, consequentemente, aumento dos custos de implantação.

Do ponto de vista normativo, a ABNT NBR 17015:2023 estabelece critérios quantitativos claros para a locação das redes de esgoto no leito carroçável, com o objetivo de garantir segurança sanitária e operacional. A norma define que a distância mínima entre as tubulações de água e esgoto deve ser de 1,00 m, devendo a rede de água permanecer no mínimo 0,20 m acima da rede de esgoto, inclusive no caso dos ramais. Para redes simples, a ABNT NBR 17015:2023 recomenda que a tubulação de esgoto seja posicionada em um dos terços laterais do pavimento, preferencialmente naquele mais favorável às ligações prediais. Já em redes duplas, a norma estabelece que as tubulações devem ser localizadas o mais próximo possível dos meios-fios, ocupando um terço lateral distinto em cada lado da via, de modo a

assegurar organização espacial e compatibilidade com os demais serviços urbanos (ABNT NBR 17015, 2023; Ribeiro *et al.*, 2024).

Quando a implantação das redes ocorre nos passeios, a norma impõe restrições geométricas adicionais, igualmente expressas de forma quantitativa. A ABNT NBR 17015:2023 determina que o eixo da tubulação de esgoto deve estar afastado, no mínimo, 0,80 m do alinhamento dos lotes, reduzindo interferências com áreas privadas e fundações de edificações. Além disso, quando as redes de água e esgoto são instaladas no mesmo nível, a separação mínima entre os eixos deve ser de 0,60 m, devendo, em situações de sobreposição, a tubulação de água permanecer acima da de esgoto, com afastamento vertical mínimo de 0,20 m. Ressalta-se que, apesar dessas recomendações normativas, a decisão final sobre a locação das tubulações deve considerar as condições locais, os hábitos da população, a intensidade do tráfego e a disponibilidade orçamentária, cabendo ao projetista avaliar a alternativa que proporcione maior viabilidade técnica, executiva e operacional ao sistema (ABNT NBR 17015, 2023; Ribeiro *et al.*, 2024).

2.4 Fundamentos hidráulicos aplicados a redes coletoras de esgoto

2.4.1 Caracterização do regime de escoamento em redes coletoras de esgoto

O funcionamento hidráulico das redes coletoras de esgoto sanitário é concebido, de forma predominante, para operar sob regime de escoamento livre, condição que orienta tanto os critérios de projeto quanto as metodologias de dimensionamento adotadas na prática da engenharia sanitária.

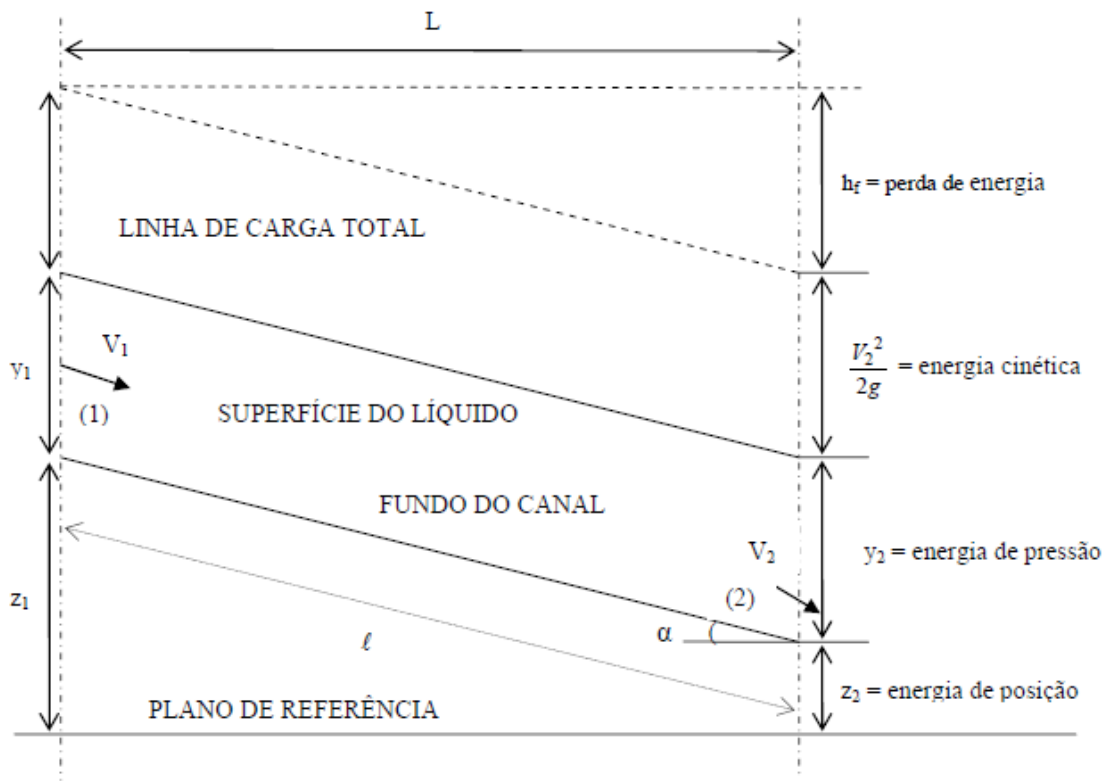
Para fins de cálculo hidráulico, deve-se considerar que cada trecho da rede esteja sob regime permanente e uniforme. O escoamento permanente caracteriza-se pela invariância temporal das propriedades hidráulicas em cada ponto do espaço, enquanto o escoamento uniforme pressupõe a constância do vetor velocidade, em módulo, direção e sentido, ao longo do trecho analisado. (Bezerra, 2011).

No contexto do regime permanente e uniforme, a aplicação da equação da continuidade e do teorema de Bernoulli constitui o arcabouço fundamental para a descrição do escoamento ao longo dos trechos. Considerando a Figura 12, ao se aplicar o teorema de Bernoulli entre os pontos 1 e 2, tem-se:

$$\frac{V_1^2}{2g} + Y_1 + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + Y_2 + Z_2 + h_f \quad (1)$$

Na Equação 1, V_1 e V_2 representam as velocidades médias do escoamento nas seções de controle 1 e 2, respectivamente. As lâminas de água nas seções são indicadas por Y_1 e Y_2 , enquanto Z_1 e Z_2 correspondem às cotas do fundo do conduto, definidas em relação a um plano de referência previamente estabelecido. Por sua vez, o parâmetro h_f representa as perdas de carga associadas à resistência ao escoamento. Além disso, o parâmetro g representa a aceleração da gravidade.

Figura 12 – Ilustração de escoamento uniforme em canais abertos.



Fonte: Rodrigues (2006)

Como destaca Bezerra (2011), quando o fluido em escoamento apresenta comportamento incompressível e mantém densidade constante, estabelece-se a conservação volumétrica ao longo do conduto, de modo que o volume que atravessa uma seção transversal é necessariamente igual ao volume que emerge em qualquer outra seção. Nessas condições, a vazão permanece inalterada ao longo do tubo, conforme expressa pela Equação 2, onde Q corresponde à vazão associada ao trecho analisado, A_1 e A_2 representam, respectivamente, as áreas molhadas das seções transversais 1 e 2. As variáveis V_1 e V_2 indicam as velocidades médias do escoamento nas seções 1 e 2, respectivamente.

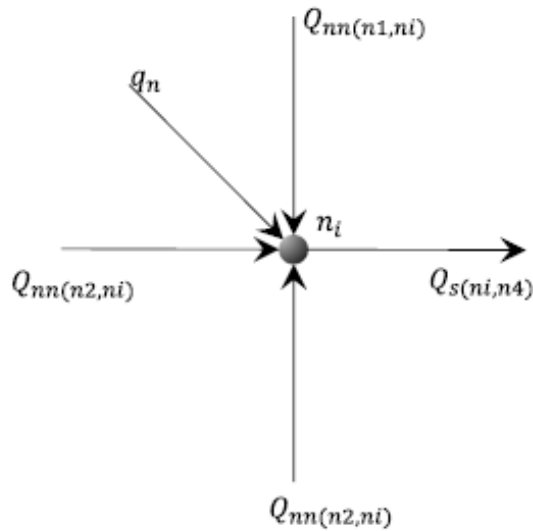
$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (2)$$

2.4.2 Lei da conservação da massa

Em redes coletoras de esgoto sanitário, a formulação hidráulica parte do pressuposto de escoamento livre, de modo que o comportamento do sistema possa ser descrito por relações típicas de canais, adotando-se a geometria de seções circulares parcialmente cheias. Nessa perspectiva, Ito (2023) destaca que os pontos de verificação (PVs ou nós) representam seções de controle do sistema, pois é nesses pontos que ocorrem a junção de vazões, mudanças de direção e de inclinação, acompanhando o traçado viário e a topografia. Assim, a conservação da massa, aplicada localmente em cada nó, garante coerência hidráulica entre trechos contribuintes e o trecho de saída associado ao nó analisado. Bogdan *et al.* (2014) afirmam que o princípio da continuidade é aplicado diretamente nos nós da rede coletora, os quais são tratados como pontos de convergência de vazões afluentes provenientes de diferentes sub-bacias ou trechos. Essa formulação assegura o balanço de massa em cada nó da rede, representando com fidelidade o comportamento do escoamento.

Como pode ser observado na Figura 13, do ponto de vista de balanço nodal, a conservação da massa no nó (n_i) é dada pela equivalência entre o somatório das vazões afluentes (Q_{nn}) e a vazão efluente (Q_s), considerando ainda a contribuição concentrada associada ao nó (q_n) (Ito, 2003).

Figura 13 – Representação da conservação da massa em um nó da rede.



Fonte: Ito (2023)

Em termos operacionais, essa condição pode ser escrita de forma sintética pela Equação 3, onde i e j representam os nós de montante e jusante, respectivamente, N é o arco de ligação entre os nós i e j , Q_N é a vazão de jusante da tubulação N entre o nó i e j , X_{ij} e X_{ji} representam as variáveis binárias direcional de i para j e de j para i , respectivamente e K é o número total de nós (Ito, 2023).

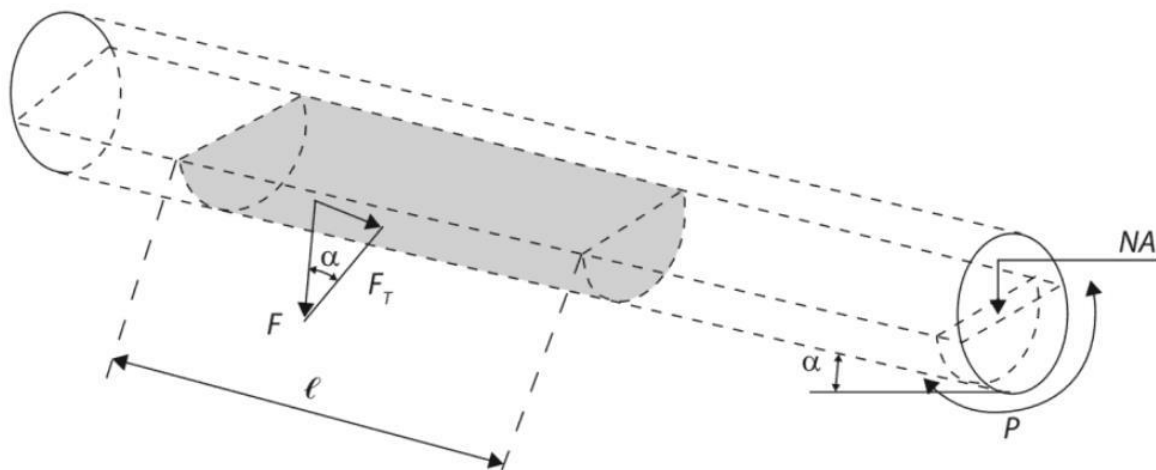
$$\sum_{j=1}^N X_{ji} Q_N - \sum_{j=1}^N X_{ij} Q_N = 0 ; \forall i \in \{1, \dots, K\} \quad (3)$$

2.4.3 Forças atuantes em um canal aberto

Em função da natureza de canal aberto, Rodrigues (2006) afirma que além de esgotos domésticos, nos coletores de esgoto são lançados diversos materiais como areia, resíduos, dentre outros materiais. Mendonça e Mendonça (2016) destacam que, em baixas velocidades, partículas mais densas tendem a permanecer próximas à geratriz inferior e podem se depositar, enquanto materiais leves podem se acumular junto à linha d'água; em contrapartida, quando as velocidades aumentam, ocorre o rearraste desses sólidos, frequentemente em elevadas concentrações, intensificando o atrito interno e podendo levar ao desgaste das paredes por abrasão, processo relevante para a durabilidade operacional do sistema.

Nesse contexto, a grandeza hidráulica central para representar a capacidade do escoamento em mobilizar material sedimentado é a tensão trativa (ou tensão de arraste), como pode ser observado na Figura 14, definida como o esforço tangencial unitário transmitido pelo líquido às paredes do coletor.

Figura 14 – Forças atuantes na tubulação de uma rede coletora de esgoto.



Fonte: Mendonça e Mendonça (2016)

Considere-se um trecho de coletor com comprimento ℓ , no qual o escoamento ocupa uma área molhada A e entra em contato com as paredes ao longo do perímetro molhado P . Segundo Mendonça e Mendonça (2016), o peso do líquido contido nesse trecho pela Equação 4, em que γ é o peso específico do esgoto.

$$F = \gamma A \ell \quad (4)$$

A resultante que efetivamente atua no sentido do escoamento é a componente tangencial desse peso ao longo da direção do coletor, para uma inclinação caracterizada pelo ângulo α . Assim, a componente tangencial do peso é:

$$F_T = F \operatorname{sen} \alpha \quad (5)$$

Substituindo-se a Equação 4 na Equação 5, obtém-se:

$$F_T = \gamma A \ell \operatorname{sen} \alpha \quad (6)$$

A tensão trativa σ é definida como a força tangencial distribuída por unidade de área de contato entre o fluido e as paredes. Para um trecho de comprimento ℓ , seu valor é definido de acordo com a Equação 7.

$$\sigma = \frac{F_T}{P \ell} \quad (7)$$

Substituindo-se a Equação 6 na Equação 7, obtém-se:

$$\sigma = \frac{F_T}{P \ell} = \frac{(\gamma A \ell) \text{sen } \alpha}{P \ell} = \gamma R \text{sen} \alpha \quad (8)$$

Considerando que o ângulo α é suficientemente pequeno para confundir o seno com a tangente, pode-se reescrever a Equação 8 como:

$$\sigma = \gamma R \text{tg} \alpha = \gamma R I \quad (9)$$

Onde, σ é a tensão de arraste (tensão trativa), em N/m², γ é o peso específico do esgoto doméstico (kN/m³), R é o raio hidráulico, em m e I diz respeito à declividade/gradiente de energia, em m/m.

2.4.4 Parâmetros geométricos de uma seção circular de máxima eficiência

Na formulação empírica proposta por Manning pode-se estabelecer uma correspondência entre o coeficiente de Chézy e o coeficiente de rugosidade de Manning, permitindo incorporar, de forma simplificada, os efeitos do atrito entre o fluido e as paredes do conduto (Ito, 2023).

A correspondência em questão pode ser observada por meio da Equação 10.

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (10)$$

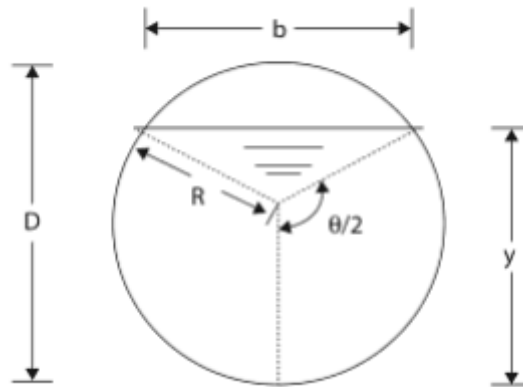
Sendo:

C – coeficiente de Chézy ($m^{1/2} \cdot s^{-1}$);

n – coeficiente de Manning ($s \cdot m^{-1/3}$);
 R – raio hidráulico (m).

Considerando um esquemático de uma seção circular, conforme apresentada na Figura 15, Mendonça e Mendonça (2016) cita que os parâmetros geométricos associados à seção circular podem ser determinados a partir da decomposição da área em setores e segmentos circulares, bem como pelo cálculo do arco de circunferência correspondente, utilizando-se, para tanto, as relações trigonométricas aplicáveis à geometria do círculo.

Figura 15 – Ilustração de uma seção circular.



Fonte: Mendonça e Mendonça (2016)

A partir da análise das relações na seção circular, as seguintes equações a seguir podem ser obtidas:

- Ângulo do setor circular (θ):

$$\theta = 2 \arccos \left(1 - 2 \frac{y}{D} \right) \quad (11)$$

Onde:

y – lâmina de água (m);
 D – Diâmetro (m).

- Área molhada (A):

$$A = \frac{D^2}{8} (\theta - \text{sen}\theta) \quad (12)$$

- Perímetro molhado (P):

$$P = \frac{\theta D}{2} \quad (13)$$

- Largura molhada (b):

$$b = D \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (14)$$

- Raio hidráulico (R):

$$R = \frac{D}{4} \left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right) \quad (15)$$

Combinando a Equação 10 com a Equação da Continuidade (Equação 2), bem como, considerando as relações obtidas por meio da análise da seção circular, obtem-se a Equação 16, que permite relacionar condições de dimensionamento com a condições geométricas de escoamento, bem como, mostra que, para área molhada, com declividade e coeficiente de rugosidade constantes, a vazão será máxima quando o perímetro molhado for mínimo (Mendonça; Mendonça, 2016; Ito, 2023).

$$Q = \frac{A^{5/3} I^{1/2}}{P^{2/3} n} \quad (16)$$

Sendo:

Q – vazão de escoamento em um determinado trecho (m³/s);

A – área molhada (m²);

P – perímetro molhado (m);

I – declividade da tubulação em determinado (m/m)

n - coeficiente de rugosidade do material da tubulação (s.m^{-1/3}).

Com base na análise da Equação 16, Mendonça e Mendonça (2016) afirmam quem a configuração de maior eficiência hidráulica para uma seção circular corresponde ao semicírculo, condição na qual o raio hidráulico assume valor equivalente a um quarto do diâmetro do conduto.

Em relação ao coeficiente de rugosidade do material da tubulação, a Tabela 1 apresenta valores propostos pro Alem Sobrinho e Tsutiya (2000) em função de determinados materiais que constituem as tubulações.

Tabela 1 – Valores de coeficiente de rugosidade de Manning.

Material dos condutos	n (coeficiente de rugosidade)
Cerâmico	0,013
Concreto	0,013
PVC	0,010
Ferro fundido com revestimento	0,012
Ferro fundido sem revestimento	0,013
Cimento amianto	0,011
Aço soldado	0,011
Poliéster, polietileno	0,011

Fonte: Alem Sobrinho e Tsutiya (2000)

2.5 Dimensionamento hidráulico de redes coletoras de esgoto

2.5.1 Definição da vazão de esgoto sanitário nos trechos

O dimensionamento hidráulico das redes coletoras de esgoto sanitário tem início com a determinação das vazões de projeto, etapa que sucede o estudo de projeção populacional e a definição das populações de início e de fim de plano. A partir dessas informações, procede-se à estimativa das contribuições de esgoto geradas pela população atendida, as quais constituem a base para o cálculo das vazões que irão escoar nos diferentes trechos da rede. A correta definição da vazão de projeto é fundamental, pois ela condiciona a escolha dos diâmetros, das declividades e dos demais parâmetros hidráulicos adotados no dimensionamento, assegurando que o sistema apresente desempenho adequado tanto nas condições iniciais de operação quanto ao longo do horizonte de planejamento considerado. Pereira e Silva (2010) destacam que as vazões devem ser calculadas de modo a garantir que as tubulações assentadas possuam capacidade hidráulica suficiente para atender às demandas do início e do fim de plano,

evitando intervenções futuras decorrentes do aumento progressivo da vazão associada ao crescimento populacional.

Conforme descrito por Pereira e Silva (2010), a vazão de esgoto em um trecho da rede coletora para início de plano (Q_{ti}), em litros por segundo (L/s), pode ser calculada pela Equação 17.

$$Q_{ti} = T_{xi} L_t \quad (17)$$

Onde:

T_{xi} – taxa de contribuição linear de início de plano (L/s.m);

L_t – comprimento do trecho (m);

Conforme Além Sobrinho e Tsutiya (2000), a taxa de contribuição linear para início de plano (T_{xi}) pode ser calculada pela Equação 18.

$$T_{xi} = \frac{K_2 \bar{Q}_{d,i}}{L_i} + T_{inf} \quad (18)$$

Sendo:

K_2 – coeficiente de máxima vazão horária;

$\bar{Q}_{d,i}$ – vazão média inicial de esgoto doméstico (L/s);

L_i – comprimento inicial total da rede coletora de esgoto (m);

T_{inf} – taxa de contribuição por infiltração (L/s.m).

Em relação ao cálculo da vazão média inicial de esgoto doméstico, Além Sobrinho e Tsutiya (2000) apresentam a Equação 19 para que seja possível o cálculo.

$$\bar{Q}_{d,i} = \frac{C P_i q_i}{86400} \quad (19)$$

Onde:

C – coeficiente de retorno;

P_i – população para início de plano (hab);

q_i - consumo de água efetivo *per capita* inicial (L/hab.dia).

O processo de cálculo da vazão de esgoto em um trecho da rede coletora para fim de plano (Q_{tf}) também ocorre de forma similar, sendo dado pela Equação 20.

$$Q_{tf} = T_{xf} L_t \quad (20)$$

Onde:

T_{xf} – taxa de contribuição linear de fim de plano (L/s.m);

Além Sobrinho e Tsutiya (2000), destacam que a taxa de contribuição linear para fim de plano (T_{xf}) difere do cálculo para início de plano, uma vez que, conforme evidenciado na Equação 21, insere-se o parâmetro K_1 , que corresponde ao coeficiente de máxima vazão diária. Os parâmetros $\bar{Q}_{d,f}$ e L_f dizem respeito à vazão média final de esgoto doméstico (L/s) e ao comprimento final total da rede coletora de esgoto (m), respectivamente.

$$T_{xf} = \frac{K_1 K_2 \bar{Q}_{d,f}}{L_f} + T_{inf} \quad (21)$$

A vazão média final de esgoto doméstico pode ser calculada, segundo Além Sobrinho e Tsutiya (2000), pela Equação 22.

$$\bar{Q}_{d,f} = \frac{C P_f q_f}{86400} \quad (22)$$

Onde:

P_f – população para fim de plano (hab);

q_f - consumo de água efetivo *per capita* final (L/hab.dia).

No contexto de normatizações brasileiras, destaca-se que a ABNT NBR 9649:1986 recomenda que na ausência de informações obtidas por meio de levantamentos consistentes e estatisticamente validados, deve ser adotada uma vazão mínima de 1,5 L/s em todos os trechos da rede coletora.

No dimensionamento hidráulico de redes coletoras de esgoto sanitário, a adoção de coeficientes empíricos constitui etapa fundamental para representar, de forma simplificada, as variações temporais e espaciais do consumo de água e da geração de esgotos. Entre esses

parâmetros, o coeficiente de retorno (C) é definido como a razão média entre o volume de esgoto efetivamente produzido e o volume de água consumido. Com base na literatura, o valor de C pode variar entre 0,7 e 1,2, em função de fatores como o estado de conservação das redes de água e esgoto. Na ausência de dados locais confiáveis, a ABNT NBR 9649:1986 recomenda a adoção de $C = 0,8$ (ABNT NBR 9649, 1986; Pereira; Silva, 2010).

No dimensionamento de redes coletoras de esgoto, a consideração das variações temporais do consumo é incorporada por meio dos coeficientes de máxima vazão diária (K1) e de máxima vazão horária (K2). O coeficiente K1 representa a relação entre a maior vazão diária observada ao longo do ano e a vazão média diária correspondente, permitindo contemplar oscilações associadas a hábitos da população e condições sazonais. A ABNT NBR 9649:1986 indica a adoção do valor de 1,2 para esse parâmetro. Complementarmente, as variações intradiárias são representadas pelo coeficiente de máxima vazão horária (K2), que expressa a relação entre a maior vazão horária e a vazão média diária, refletindo os períodos de maior concentração de consumo ao longo do dia. A literatura normalmente adota o valor de 1,5 para esse parâmetro (ABNT NBR 9649, 1986; Pereira; Silva, 2010).

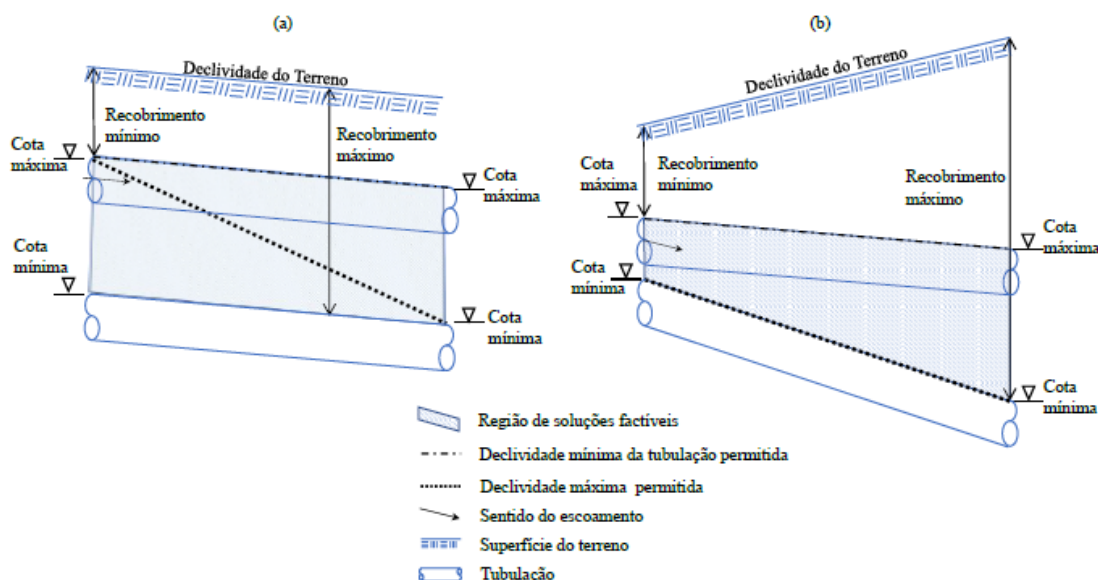
Além dos coeficientes associados ao consumo, o dimensionamento deve considerar a taxa de contribuição de infiltração (T_{inf}), que representa a parcela adicional de vazão decorrente da entrada de águas subterrâneas no sistema. Segundo a ABNT NBR 9649/1986, essa taxa depende de condições locais como o nível do lençol freático, a natureza do solo, a qualidade da execução da rede, o material das tubulações e o tipo de junta empregado. Na ausência de dados específicos, recomenda-se a adoção de valores entre 0,05 e 1,0 L/s.km (ABNT NBR 9649, 1986; Pereira; Silva, 2010).

2.5.2 Definição da declividade a ser adotada em projeto

A definição da declividade de projeto constitui uma etapa central no dimensionamento hidráulico das redes coletoras de esgoto, uma vez que condiciona simultaneamente o desempenho hidráulico do escoamento e as condições construtivas do sistema. De acordo com Pereira e Silva (2010), a declividade de projeto (I_p) deve ser estabelecida de forma a compatibilizar a declividade natural do terreno com a declividade mínima necessária para assegurar o transporte adequado do esgoto, buscando sempre minimizar as profundidades de escavação e atender aos critérios hidráulicos de lâmina líquida, tensão trativa e velocidade de escoamento.

Na Figura 16, verifica-se as faixas admissíveis para a implantação da tubulação ao longo de um trecho, destacando que esses limites não são fixos, podendo se alterar em função das características geométricas do terreno e das condições hidráulicas impostas pelo escoamento a montante. Em situações em que a superfície do terreno apresenta declividade descendente no sentido do escoamento, a configuração da tubulação deve obedecer ao arranjo ilustrado na Figura 16(a). Por outro lado, quando o terreno se encontra inclinado em sentido ascendente, torna-se necessária a adoção da solução geométrica correspondente à apresentada na Figura 16(b) (Ito, 2023).

Figura 16 – Possibilidades de definição da inclinação de tubulações.



Fonte: Ito (2023)

Para a definição da declividade de projeto, inicialmente, procede-se ao cálculo da declividade do terreno, obtida a partir das cotas do terreno nos pontos de montante e jusante do trecho analisado. Paralelamente, determina-se a declividade mínima do coletor. Conforme discutido por Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), a adoção de uma declividade mínima adequada deve assegurar o desenvolvimento de uma tensão trativa média igual ou superior a 1,0 Pa ao longo dos trechos da rede, de modo a evitar a deposição de sólidos e o comprometimento da capacidade hidráulica.

De acordo com Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), a declividade mínima pode ser estimada por meio da Equação 23 quando se considera um coeficiente de rugosidade n igual a 0,013. Na equação em questão, Q_{pi} representa a vazão de projeto de um trecho para início de plano, em L/s.

$$I_{mín} = 0,0055 Q_{pi}^{-0,47} \quad (23)$$

De forma mais generalista, Alem Sobrinho e Tsutiya (2000) propõem as equações apresentadas na Tabela 2 para o cálculo da declividade mínima em função do coeficiente de rugosidade de Manning.

Tabela 2 – Equações para o cálculo da declividade mínima em tubulações.

Declividade mínima (m/m)	n (coeficiente de rugosidade)
$I = 0,0065 Q^{-0,49}$	0,009
$I = 0,0061 Q^{-0,49}$	0,010
$I = 0,0058 Q^{-0,49}$	0,011
$I = 0,0056 Q^{-0,48}$	0,012
$I = 0,0055 Q^{-0,47}$	0,013
$I = 0,0051 Q^{-0,47}$	0,014
$I = 0,0049 Q^{-0,47}$	0,015
$I = 0,0048 Q^{-0,47}$	0,016

Fonte: Alem Sobrinho e Tsutiya (2000)

A definição da declividade máxima admissível tem como objetivo prevenir processos de desgaste das tubulações decorrentes da abrasão provocada pelo transporte de sólidos no interior da tubulação. Diante dessa premissa é estabelecido um limite superior para a velocidade do escoamento, usualmente fixado em 5 m/s, a partir do qual podem ocorrer danos ao material do coletor. Com base nesse critério, a declividade máxima ($I_{máx}$) pode ser estimada por meio de uma expressão empírica aproximada, apresentada na Equação 24, considerando que o coeficiente de rugosidade de Manning (n) é igual a 0,013 (Ito, 2023).

$$I_{máx} = 4,65 Q_{pf}^{-0,67} \quad (24)$$

Onde:

Q_{pf} - vazão de projeto de um trecho para fim de plano, em L/s.

A premissa básica é sempre adotar a declividade do terreno como declividade de projeto, quando essa está entre os limites máximo e mínimo estabelecidos pelos parâmetros calculados para as declividades. Essa prática tendência a rede a obter recobrimentos mínimos para o trecho, o que pode levar a redução substancial do volume de escavação. Todavia, quando

a declividade inicialmente adotada conduz a valores elevados de profundidade ou a condições construtivas desfavoráveis, Pereira e Silva (2010) recomendam a revisão da declividade de projeto para um valor intermediário no intervalo entre a declividade de terreno e a declividade mínima, de modo a compatibilizar o projeto com a necessidade de sempre prezar pela redução de escavação.

Após a definição final da declividade, procede-se à determinação dos demais parâmetros hidráulicos do trecho, como o diâmetro do coletor, a lâmina líquida relativa e a velocidade final de escoamento.

2.5.3 Lâmina líquida máxima, velocidade crítica e diâmetro mínimo

Em projetos de redes coletoras de esgoto, a definição do diâmetro da tubulação deve atender simultaneamente às exigências normativas e às condições hidráulicas de operação do sistema. Conforme estabelecido pela ABNT NBR 9649:1986 e discutido por Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), o diâmetro nominal mínimo admissível para coletores de esgoto sanitário é de 100 mm. Contudo, na prática brasileira, adota-se de forma predominante o diâmetro mínimo de 150 mm, em função de critérios operacionais, de manutenção e de maior segurança hidráulica, sendo o diâmetro de 100 mm restrito a situações específicas, como coletores auxiliares com vazões reduzidas (ABNT NBR 9649, 1986).

A lâmina de água máxima está associada à necessidade de garantir o funcionamento do sistema sob regime de escoamento livre. Segundo Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), as redes coletoras devem ser projetadas para operar com lâmina líquida igual ou inferior a 75% do diâmetro da tubulação ($Y/D \leq 0,75$), assegurando uma faixa superior destinada à ventilação do sistema e acomodação de flutuações excepcionais do nível do esgoto. Considerando um coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,013, o diâmetro (D_{75}) que satisfaz essa condição pode ser determinado a partir da Equação 25, onde Q_{pf} é a vazão de projeto de um trecho para fim de plano (m^3/s) e I é a declividade de projeto adotada para o coletor (m/m).

$$D_{75} = \left(0,0463 \frac{Q_{pf}}{\sqrt{I}} \right)^{0,375} \quad (25)$$

Por fim, a verificação da velocidade crítica é essencial para assegurar o adequado desempenho hidráulico da rede coletora. Quando a velocidade final de escoamento ultrapassa a velocidade crítica (V_c) dada pela Equação 26, a lâmina de água admissível passa a ser dada

por valores inferiores a 50% do diâmetro da tubulação. Nesses casos, especialmente quando $Y/D > 0,5$, a solução mais indicada consiste no aumento do diâmetro do coletor, de forma a restabelecer condições hidráulicas mais estáveis (Alem Sobrinho; Tsutiya, 2000).

$$V_c = 6 \sqrt{g R} \quad (26)$$

Em que:

R – raio hidráulico para a vazão de projeto de fim de plano (m)

g – aceleração da gravidade (m/s²)

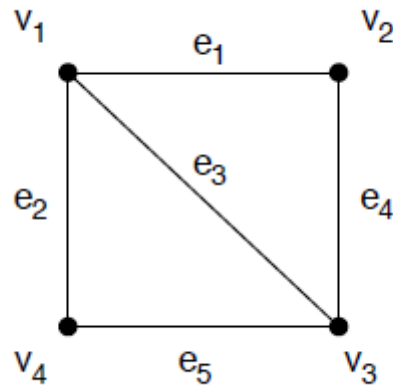
2.6 A teoria dos grafos e sua aplicação na modelagem de redes coletoras de esgoto

2.6.1 Conceitos fundamentais de teoria dos grafos

A Teoria dos Grafos constitui um ramo da matemática discreta voltado à modelagem de sistemas formados por elementos e pelas relações existentes entre eles, sendo amplamente utilizada na análise de estruturas complexas em diferentes áreas do conhecimento. Na formulação clássica da teoria dos grafos, um grafo $G (V, E)$ é definido a partir de um conjunto finito e não vazio V e de um conjunto E formado por pares não ordenados de elementos distintos de V , sendo V o conjunto de vértices e E o conjunto de arestas do grafo. Nesse contexto, uma aresta $e \in E$ pode ser representada pelo par de vértices $e = (u, v)$, em que u e v correspondem às extremidades da aresta, de tal modo que u e $v \in V$ (Gomes, 2022; Szwarcfiter, 2018; Melo, 2014; Rangel *et al.*, 2018).

Com o objetivo de ilustrar a representação de um grafo, é comum adotar representações gráficas para suas visualizações, onde os vértices são simbolizados por pontos e as arestas por segmentos de linha que os conectam. Com base nessa abordagem, cada aresta estabelece ligação exclusivamente entre dois vértices. Nessas representações, a posição geométrica dos elementos no plano não possui relevância estrutural, uma vez que o aspecto fundamental reside nas relações de conectividade, isto é, na identificação de quais vértices estão conectados entre si por meio das arestas (Gomes, 2022; Jurkiewicz, 2009; Feofiloff *et al.*, 2011; Donadelli, 2010). A Figura 17 apresenta um grafo composto por quatro vértices e cinco arestas.

Figura 17 – Representação de um grafo não direcionado.

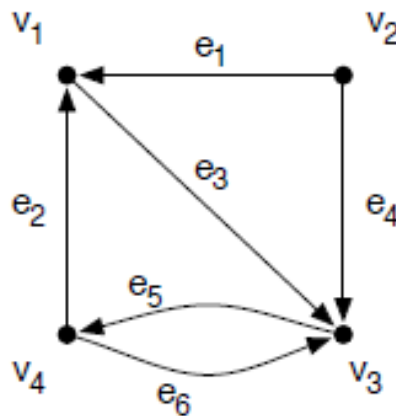


Fonte: Gomes (2022)

Na teoria dos grafos, a incidência corresponde à relação estabelecida entre uma aresta e um vértice, caracterizando o fato de a aresta estar conectada a esse vértice. Assim, diz-se que uma aresta é incidente a um vértice quando este está localizado em uma de suas extremidades. A adjacência, por sua vez, refere-se à relação entre dois vértices que estão conectados por intermédio de uma mesma aresta, sendo esses vértices denominados vizinhos. Em grafos não direcionados, o conceito de adjacência é uma relação simétrica, uma vez que, se um vértice é adjacente a outro, o inverso também é verdadeiro. No entanto, em grafos direcionados, essa simetria não se mantém, uma vez que a orientação das arestas impõe um sentido à conexão, fazendo com que a adjacência dependa da direção do arco considerado (Gomes, 2022; Rezende, 2002).

Um grafo direcionado, também denominado dígrafo, pode ser caracterizado como uma estrutura matemática definida por um conjunto não vazio de vértices e por um conjunto de arestas orientadas, onde cada aresta estabelece uma relação direcional entre dois vértices diferentes. Formalmente, em um dígrafo $G = (V, E)$, cada aresta $e \in E$ é representada por um par ordenado (u, v) , em que u corresponde ao vértice de origem e v ao vértice de destino, satisfazendo a condição u e $v \in V$. Diferentemente dos grafos não direcionados, a orientação das arestas implica que a relação de adjacência não é simétrica, uma vez que a existência de uma aresta de u para v não garante a existência de uma conexão no sentido inverso. Na representação gráfica de dígrafos, essa direcionalidade é usualmente indicada por setas que explicitam o sentido do fluxo entre os vértices, como pode ser observado na Figura 18 (Gomes, 2022).

Figura 18 – Representação de um grafo direcionado.



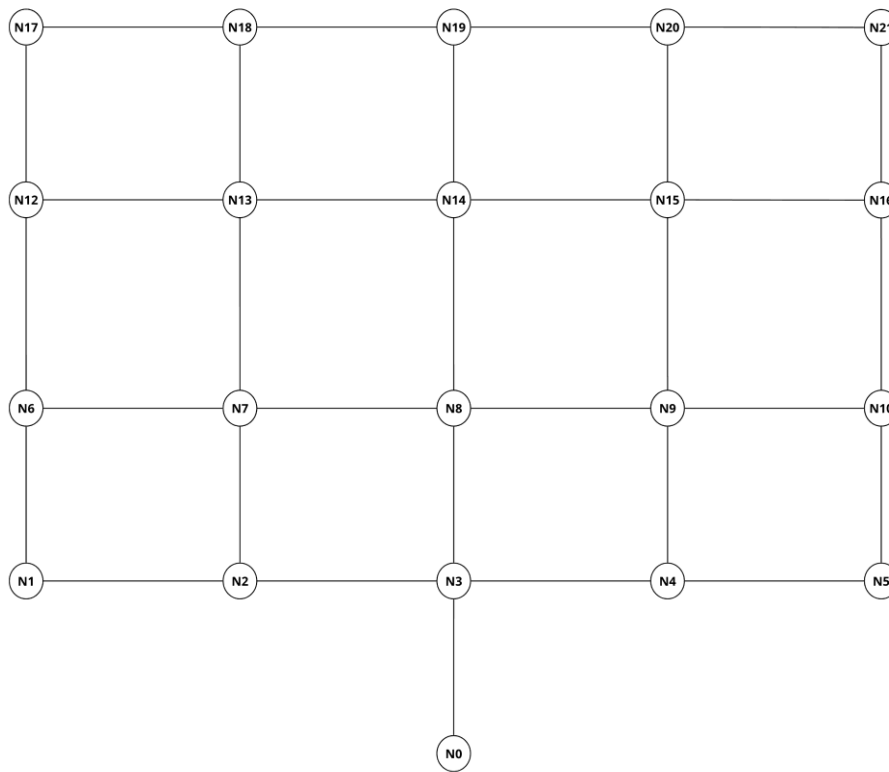
Fonte: Gomes (2022)

A abordagem de grafos direcionados permite compreender de forma mais detalhada o comportamento de redes complexas, como as de transporte urbano, drenagem e distribuição hidráulica, por meio da análise da conectividade e da direção dos fluxos. Concas *et al.* (2022) aplicaram essa metodologia na avaliação da estrutura de redes de transporte urbano, evidenciando a influência da direção dos arcos na propagação de fluxos em malhas interligadas. Dastgir *et al.* (2022) exploraram a aplicação de grafos direcionados na modelagem hidráulica de sistemas de drenagem urbana, demonstrando sua eficácia na identificação de condutos críticos e na otimização do desempenho de redes pluviais. Por outro lado, pesquisas como as de Ma *et al.* (2009) e Kaveh (2012), reforçam o potencial da técnica ao aplicá-la em contextos estruturais e de projeto de sistemas hidráulicos, destacando sua capacidade de simplificar o processo de modelagem e de aprimorar a eficiência computacional das análises.

2.6.2 Modelagem de redes coletoras de esgoto como grafos

Uma rede coletora de esgoto pode ser modelada sob a ótica da teoria dos grafos, onde os poços de visita (PVs) são caracterizados como vértices, enquanto as tubulações são consideradas como arestas. O grafo resultante, denominado grafo base, contém todas as ligações potenciais possíveis para o traçado de uma rede coletora, sendo caracterizado como um grafo não direcionado, uma vez que, inicialmente, não se apresenta um sentido definido para este, como pode ser observado na Figura 19 (Ito, 2023).

Figura 19 – Exemplo de grafo base, gerado para um traçado de rede coletora de esgoto

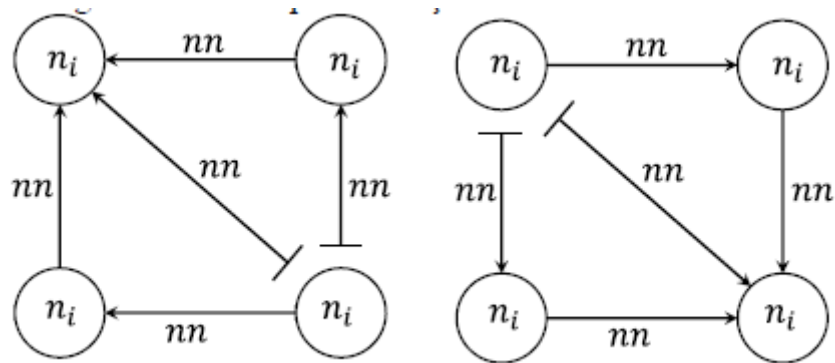


Fonte: Autor (2026)

Durante processos de otimização, os grafos base que representam uma rede coletora de esgoto podem ser manipulados por algoritmos de otimização, como Árvores Busca em Largura (*Breadth-First Search*, BFS), fazendo com que haja a necessidade de definição do sentido do fluxo de esgotamento sanitário, e, por consequência, o grafo passa a assumir as características de um grafo direcionado.

Em contraposição às configurações anelares, a implantação das tubulações em uma rede coletora de esgoto é realizada segundo uma estrutura do tipo árvore, de modo a assegurar que o escoamento hidráulico ocorra exclusivamente por gravidade, em regime de escoamento livre, e com a existência de apenas um caminho hidráulico entre cada ponto ou trecho contribuinte e o ponto de descarga. Nessa configuração, a rede coletora assume uma organização hierárquica, na qual as arestas são encadeadas por meio dos nós, permitindo a coleta progressiva do esgoto até o ponto de saída do sistema. Conforme ilustrado na Figura 20, observa-se que determinadas arestas são intencionalmente desconectadas, promovendo o seccionamento das mesmas e dos nós situados a montante, procedimento indicado graficamente por uma linha de corte perpendicular ao arco (Ito, 2023).

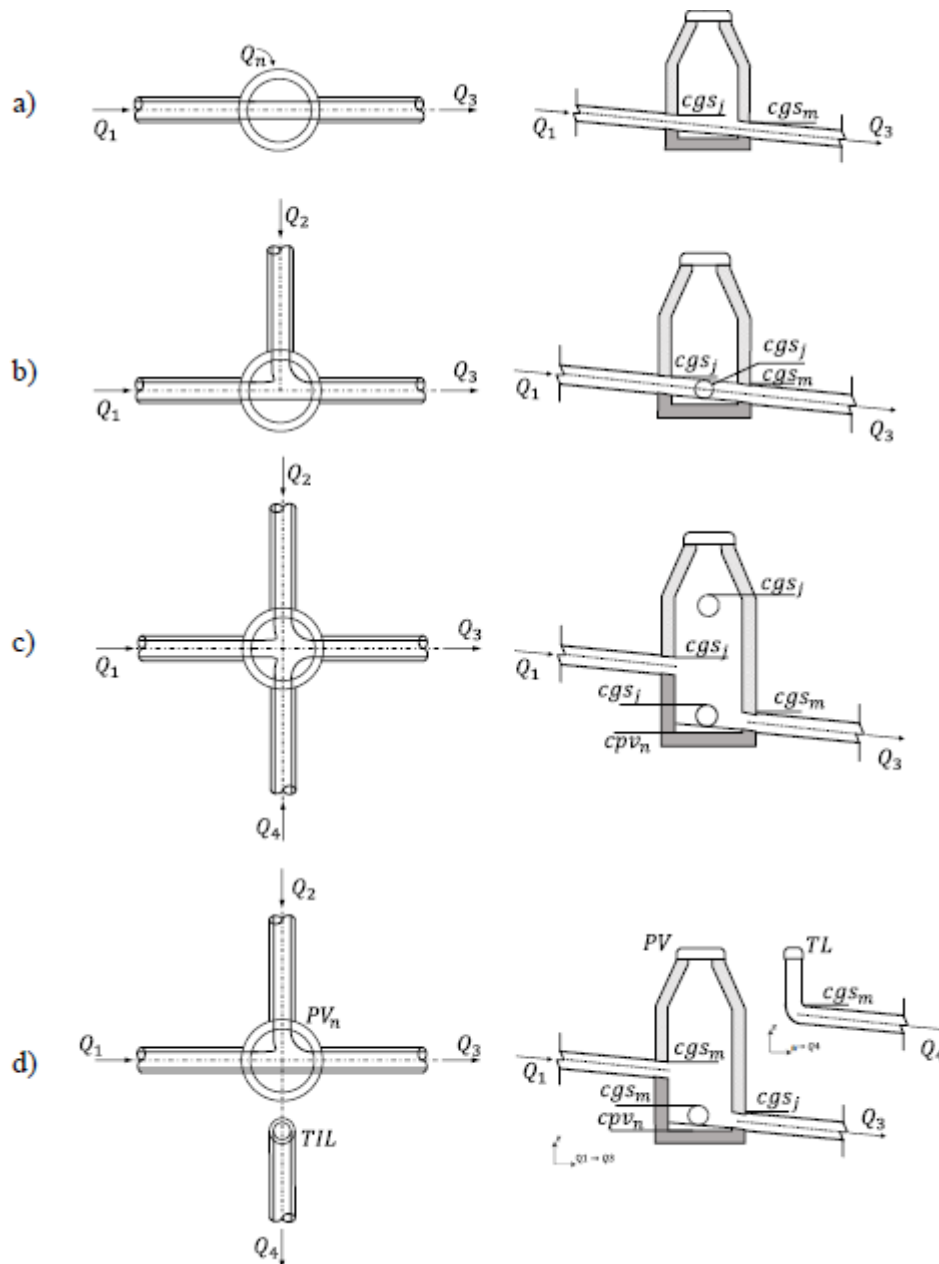
Figura 20 – Representação de um grafo direcionado sem ciclos



Fonte: Ito (2023)

A análise individual de um poço de visita permite avaliar, de forma detalhada, os trechos de tubulação que nele convergem e dele se originam. Nas configurações ilustradas nas Figuras 21(a) e 21(b), observa-se a ocorrência de trechos afluentes posicionados em uma mesma cota altimétrica, conduzindo o escoamento para um trecho de saída também localizado em cota equivalente. Por sua vez, a Figura 21(c) exemplifica situações em que os trechos contribuintes chegam ao poço em diferentes níveis altimétricos, sendo o escoamento direcionado para uma única saída situada na cota correspondente ao trecho mais baixo, em consonância com o princípio do escoamento por gravidade. Na Figura 21(d), são apresentadas configurações distintas de direcionamento, nas quais um mesmo poço de visita dispõe de dois sentidos de escoamento, com um trecho de saída implantado em cota inferior e outro trecho em cota superior, este último tendo origem em um terminal de inspeção e limpeza (TIL) (Ito, 2023).

Figura 21 – Situações que ilustram as possíveis ligações entre PVs e trechos



Fonte: Ito (2023)

De acordo com Turan *et al.* (2019), para garantir a viabilidade do sistema sanitário, o arranjo de conexões entre PVs e trechos da rede coletora deve atender a restrições específicas, dentre as quais pode-se destacar:

- A rede de esgoto representada como um grafo deve ser apresentada como uma árvore acíclica, não devendo conter ciclos. Isso significa que, entre quaisquer dois poços de

visita (vértices), deve existir apenas um caminho possível para o fluxo de águas residuais;

- A rede de esgoto sanitário deve incluir todos os poços de visita (vértices), ou seja, na representação em grafos, essa condição corresponde ao fato de que a árvore gerada deve assegurar que todos os pontos de coleta de esgoto estejam devidamente conectados à rede;
- A rede de esgoto sanitário deve conter todas as ligações de esgoto (arestas), logo, o grafo correspondente deve incluir todas as arestas possíveis que representam as tubulações entre os poços de visita;
- Cada poço de visita pode ter múltiplas entradas, mas apenas uma saída. Em termos de grafos, isso significa que o grau de saída de cada vértice deve ser igual a 1, enquanto o grau de entrada pode ser maior que 1, exceto para o vértice de destino (PV Final da rede);
- A árvore geradora da rede de esgoto deve ser direcionada para o ponto de descarga. A estrutura de traçado resultante deve formar uma árvore direcionada, de modo que todas as conexões da rede conduzam o fluxo de águas residuais para um único vértice alvo, que representa o PV final da rede.

2.7 Algoritmos de busca em grafos: conceitos fundamentais

2.7.1 Busca em largura

A busca em largura é uma das estratégias fundamentais para a exploração sistemática de grafos, sendo amplamente empregada na resolução de problemas que envolvem conectividade, rotas e análise estrutural. A ideia básica da busca em largura é examinar os vértices de um grafo de acordo com uma ordenação definida pelo número de arestas dos menores caminhos entre cada vértice e um vértice de origem arbitrário. Em cada etapa, são examinados todos os vértices situados a uma mesma distância, garantindo que cada vértice seja visitado apenas uma vez em todo o processo (Mexas, 1982; Gomes, 2022).

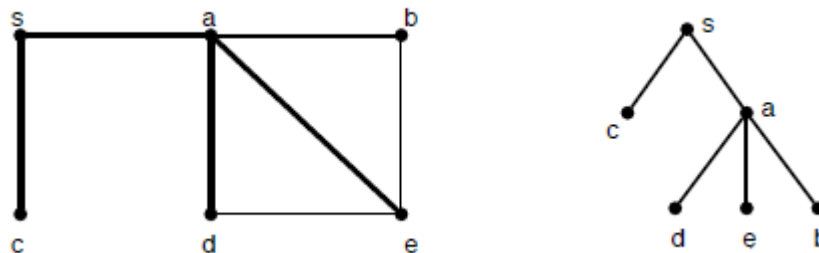
Abello *et al.* (2004) demonstram que a técnica de busca em largura pode ser empregada na decomposição e visualização de grandes estruturas conceituais representadas por grafos, permitindo identificar relações e reduzir a complexidade de análise em conjuntos extensos de dados. De forma complementar, Bondy e Murty (2008) destacam que, em grafos de grande dimensão, a verificação de conectividade por simples inspeção pode ser inviável,

sendo desejável o uso de um procedimento sistemático baseado nas propriedades das árvores de busca para identificar as possíveis conexões entre vértices e arestas. Wilson (1996) reforça esse entendimento ao afirmar que a busca em largura é empregada para determinar se um grafo é conexo e para produzir uma árvore geradora, o que evidencia seu papel central na exploração sistemática de grafos.

A busca em largura apresenta a característica fundamental de ao explorar o grafo a partir de um vértice de referência, o algoritmo alcança cada vértice por meio de caminhos que minimizam o número de arestas percorridas desde o vértice inicial. O conjunto desses percursos resulta em uma estrutura na forma de uma árvore, onde a raiz corresponde ao vértice de partida. A esse tipo de estrutura dá-se o nome de árvore de busca em largura (Gomes, 2022).

Analisando a Figura 22, tomando como ponto de partida o vértice *s*, a árvore de busca equivalente seria a mostrada ao lado direito do grafo.

Figura 22 – Representação de uma árvore de busca em largura.



Fonte: Gomes (2022)

A árvore resultante do processo de busca em largura pode ser caracterizada como uma árvore do tipo *n-ária*, uma vez que não é possível determinar previamente quantos descendentes cada vértice apresentará. Em estudos apresentados na literatura, nas árvores *n-árias*, cada nó mantém uma lista de referências para seus nós filhos, no entanto, no contexto específico da busca em largura, o interesse principal reside no registro dos caminhos utilizados para alcançar cada vértice do grafo. Sob essa perspectiva, embora o número de filhos de um nó seja indeterminado, é garantido que cada vértice, com exceção da raiz, possui exatamente um único predecessor. Dessa forma, não é necessário armazenar explicitamente todas as ligações descendentes associadas a cada nó da estrutura. Basta manter, para cada vértice, uma referência ao seu vértice pai, o que simplifica de maneira significativa a organização e o gerenciamento dos dados. Essa estratégia pode ser implementada por meio de um único vetor de referências

vinculado aos vértices do grafo, usualmente denominado vetor de predecessores (Gomes, 2022). Ao tomar-se como referência a árvore apresentada na Figura 22, o vetor de predecessores é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplo de vetor de predecessores.

v	s	a	b	c	d	e
$\rho(v)$	<i>nil</i>	s	a	s	a	a

Fonte: Adaptado de Gomes (2022)

2.7.2 Algoritmo de busca em largura

O algoritmo de busca em largura (*Breadth-First Search – BFS*) é um procedimento sistemático para exploração de grafos que parte de um vértice inicial e percorre os demais vértices em camadas sucessivas, de acordo com a menor distância topológica medida em número de arestas. Conforme apresentado no pseudocódigo, a BFS utiliza como estrutura central uma fila (FIFO), responsável por controlar a ordem de visita dos vértices e garantir a expansão progressiva do grafo a partir do vértice raiz.

A lógica de execução do algoritmo BFS é expressa por Gomes (2022) na Figura 23, tendo como premissa básica as seguintes condições:

- r : representa o vértice inicial;
- $estado(v)$: estado do vértice v ao longo da execução do algoritmo, que pode assumir um dos seguintes valores $\{NAO_VISITADO, VISITADO, ENCERRADO\}$. O valor $NAO_VISITADO$ significa que a busca ainda não atingiu este vértice. O valor $VISITADO$, indica que a busca já atingiu o vértice v , mas ele ainda tem vizinhos (vértices adjacentes) ainda não visitados. O valor $ENCERRADO$ indica que a visitação deste vértice está encerrada, isto é, tanto ele como todos os seus vizinhos já foram visitados pela busca;
- $\rho(v)$: referência ao vértice predecessor do vértice v na busca, representa seu pai na árvore de busca em largura;
- F : fila de vértices, que deve implementar as operações $F.INSERE(v)$, responsável pela inserção do vértice v no final da fila, e $F.REMOVE()$, que remove e retorna o primeiro vértice da fila F ;
- $d(v)$: atributo numérico que armazena a distância de s até v em quantidade de arestas percorridas.
- $adj(v)$: é uma iteração com todos os vértices adjacentes ao vértice v .

Figura 23 – Representação do algoritmo de busca em largura.

```

Algoritmo: BuscaEmLargura( $G, r$ )

para cada  $v \in V$  faça
   $estado(v) \leftarrow NAO\_VISITADO;$ 
   $\rho(v) \leftarrow nil;$ 
   $d(v) \leftarrow \infty;$ 

 $d(r) \leftarrow 0;$ 
 $estado(r) \leftarrow VISITADO;$ 
 $F \leftarrow \emptyset;$ 
 $F.INSERE(r);$ 

enquanto  $F \neq \emptyset$  faça
   $v_i \leftarrow F.REMOVE();$ 
  para cada  $v_j \in Adj(v_i)$  faça
    se  $estado(v_j) = NAO\_VISITADO$  então
       $F.INSERE(v_j);$ 
       $estado(v_j) \leftarrow VISITADO;$ 
       $\rho(v_j) \leftarrow v_i;$ 
       $d(v_j) \leftarrow d(v_i) + 1;$ 
   $cor(v_i) \leftarrow ENCERRADO;$ 

```

Fonte: Gomes (2022)

Inicialmente, todos os vértices $v \in V$ do grafo têm seus atributos configurados em um estado padrão, sendo esse o estado é definido como *NÃO_VISITADO*, o predecessor $\rho(v)$ é inicializado como nulo e a distância $d(v)$ é atribuída como infinita. Essa etapa é importante para garantir que nenhum vértice tenha sido explorado anteriormente. Na sequência do algoritmo, o vértice raiz r é fixado como *VISITADO* e sua distância é definida como zero ($d(r) = 0$) e ele é inserido na fila, marcando o início do processo de busca.

O processamento do algoritmo se dá enquanto a fila não estiver vazia. Nesse caso, a cada iteração, o primeiro vértice da fila é removido e passa a ser o vértice corrente v_i . Para esse vértice, o algoritmo percorre todos os seus vértices adjacentes $v_j \in adj(v_i)$. Caso um vértice adjacente ainda esteja no estado *NÃO_VISITADO*, ele é inserido no final da fila, seu estado é atualizado para *VISITADO*, seu predecessor é definido como o vértice corrente ($\rho(v_j) = v_i$) e sua distância é atualizada para $d(v_j) = d(v_i) + 1$, assegurando que cada vértice seja alcançado pela menor quantidade possível de arestas a partir da raiz.

Após a inspeção completa de todos os vértices adjacentes ao vértice corrente, seu estado é atualizado para *ENCERRADO*, indicando que tanto o vértice quanto todos os seus

vizinhos já foram devidamente processados. O processo se repete até que a fila esteja vazia, momento em que todos os vértices alcançáveis a partir do vértice raiz terão sido visitados.

Como resultado da execução da BFS, obtém-se simultaneamente duas estruturas fundamentais, sendo essas um vetor de distâncias $d(v)$, que armazena a menor distância topológica entre o vértice raiz e cada vértice do grafo, e um vetor de predecessores $\rho(v)$, que define explicitamente a árvore de busca em largura, enraizada em r .

2.8 Otimização do traçado de redes coletoras de esgoto

2.8.1 Abordagens de otimização aplicadas ao traçado de redes coletoras

Tendo em vista a importância do traçado para a implantação de redes coletoras de esgoto, sobretudo no que se refere à minimização dos custos de implantação e à garantia do adequado funcionamento hidráulico por gravidade, diversas abordagens de otimização do traçado vêm sendo propostas na literatura ao longo das últimas décadas. Esses estudos reconhecem que o problema de definição do traçado ótimo está intrinsecamente associado a um grande número de alternativas viáveis, à presença de restrições hidráulicas e construtivas, o que impõe dificuldades na obtenção das soluções. Nesse contexto, métodos de otimização clássicos e metaheurísticos têm sido amplamente empregados, destacando-se abordagens que tratam simultaneamente a definição do layout e o dimensionamento das tubulações, buscando soluções próximas do ótimo global com esforço computacional viável.

Moeini e Afshar (2017) propuseram uma metodologia para a otimização simultânea do traçado e do dimensionamento de redes coletoras de esgoto por gravidade, baseada em uma formulação do algoritmo de Otimização por Colônia de Formigas, denominada *Arc Based Ant Colony Optimization Algorithm* (ABACOA), acoplada a um algoritmo de crescimento de árvores (*Tree Growing Algorithm* – TGA). A rede é inicialmente representada como um grafo não dirigido contendo ramificações e malhas, a partir do qual o TGA é utilizado de forma incremental para gerar configurações viáveis do tipo árvore, compatíveis com o escoamento por gravidade. O ABACOA atua sobre essa estrutura para definir as profundidades de recobrimento nodais e, conseqüentemente, os declives das tubulações, sendo propostas versões sem restrições e com restrições do algoritmo, esta última incorporando explicitamente a restrição de declividade mínima durante o processo de construção da solução. A metodologia foi aplicada a três estudos de caso de diferentes escalas, e os resultados demonstraram que a versão restrita do algoritmo apresentou melhor desempenho, produzindo soluções com custos

inferiores aos obtidos por abordagens não restritas e por métodos previamente reportados na literatura, além de maior eficiência computacional e melhor comportamento de convergência.

No trabalho de Steele *et al.* (2016) é proposta uma metodologia para otimizar, de forma simultânea, o traçado e do dimensionamento de redes coletoras, com o objetivo de minimizar o custo total do sistema. Inicialmente, o traçado da rede é definido por meio de um modelo de Programação Inteira Não Linear Mista (MINLP), implementado no ambiente GAMS, no qual diferentes configurações de traçado ramificado são geradas a partir do conceito de linhas isonodais, garantindo conectividade hidráulica e escoamento unidirecional até o ponto final da rede. O modelo de traçado considera funções objetivo alternativas, como a minimização do comprimento total das tubulações e a minimização do somatório do produto entre vazão e comprimento dos trechos. Em uma segunda etapa, cada traçado candidato é submetido a um processo de otimização do perfil hidráulico utilizando o algoritmo de *Simulated Annealing*, implementado em planilha Excel, responsável por definir declividades e diâmetros comerciais das tubulações, respeitando restrições hidráulicas e construtivas, como limites de velocidade, recobrimento mínimo, continuidade de diâmetros e condições de ligação a sistemas existentes. Os resultados obtidos nos estudos de caso demonstram que a integração entre a otimização do traçado e do dimensionamento pode gerar reduções significativas de custo em comparação com abordagens convencionais, evidenciando que a simples minimização do comprimento da rede nem sempre conduz à solução economicamente mais eficiente.

Hassan *et al.* (2018) propõem um modelo híbrido para o projeto ótimo de redes coletoras de esgoto, combinando Algoritmos Genéticos (GA) com Programação Heurística (HP), denominado GA-HP, com o objetivo explícito de minimizar o custo total de implantação da rede, representado principalmente pelos custos associados à escavação e aos diâmetros das tubulações. O GA atua como solucionador externo, responsável pela definição dos diâmetros comerciais das tubulações, enquanto a HP funciona como solucionador interno, determinando as declividades ótimas, profundidades de assentamento, velocidades, lâminas relativas e demais parâmetros hidráulicos, além de computar penalizações associadas ao não atendimento das restrições. O problema de otimização é formulado com uma função objetivo de custo global, sujeita a restrições clássicas de projeto, como progressão de diâmetros, limites de velocidade mínima e máxima, profundidades mínimas e máximas de assentamento e limites admissíveis de declividade. O desempenho do modelo GA-HP é avaliado por meio de dois estudos de caso amplamente utilizados na literatura, sendo os resultados comparados com métodos consagrados, como Programação Dinâmica Discreta (DDP), Algoritmos Genéticos tradicionais, Otimização por Colônia de Formigas, *Simulated Annealing* e Busca Tabu. Os resultados demonstram que o

modelo proposto alcança soluções de menor custo global com número significativamente reduzido de avaliações e gerações, evidenciando maior eficiência computacional e robustez na obtenção de soluções ótimas, especialmente para redes de maior porte

2.8.2 Abordagens de otimização baseadas em teoria dos grafos

Nos últimos anos, a aplicação da teoria dos grafos tem ganhado destaque no contexto da otimização do traçado de redes coletoras de esgoto sanitário, sobretudo como alternativa para superar limitações observadas em métodos tradicionais de otimização matemática e heurística. Tais limitações estão associadas, principalmente, ao elevado custo computacional, à dificuldade de aplicação em redes reais de grande porte e à necessidade de simplificações excessivas da topologia urbana. Ao representar a rede coletora como uma estrutura matemática composta por vértices e arestas, os modelos baseados em grafos permitem explorar, de forma sistemática, as relações topológicas e direcionais entre os elementos do sistema, viabilizando a aplicação de algoritmos de busca e exploração eficientes, com reduzido esforço computacional e maior aderência às condições reais de projeto.

Rodrigues *et al.* (2019) propuseram um método para a otimização do traçado de redes coletoras de esgoto por gravidade, fundamentado na teoria dos grafos e na aplicação de um algoritmo de busca em profundidade (*Depth-First Search* – DFS). A metodologia parte da representação da rede como um grafo dirigido e ponderado, no qual os nós correspondem aos poços de visita e as arestas às tubulações, sendo os pesos associados às arestas definidos a partir de áreas de declividade desfavorável do terreno. O algoritmo identifica nós confluentes, sendo caracterizados como situações hidraulicamente inconsistentes em que há múltiplos trechos afluentes e ausência de escoamento a jusante. A partir desses nós o algoritmo gera árvores de busca que exploram todos os caminhos possíveis até os PVs finais das redes. Para cada caminho, é calculada a soma das áreas associadas a declividades nulas ou negativas, sendo selecionado aquele que minimiza esse valor, o que implica, indiretamente, a redução das profundidades de escavação e do custo da obra. A abordagem foi validada por meio de um estudo hipotético e de uma rede real com 125 trechos e 74 nós, apresentando tempos computacionais inferiores a 0,5 s, o que evidencia a aplicabilidade prática do modelo.

Por sua vez, Turan *et al.* (2019) propõem uma metodologia de geração de traçados factíveis para redes coletoras de esgoto sanitário fundamentada exclusivamente em conceitos de teoria dos grafos, com o objetivo de superar limitações recorrentes de abordagens anteriores que dependem de múltiplas estratégias heurísticas para eliminar ciclos e garantir a viabilidade

hidráulica do sistema. Os autores formulam inicialmente a rede viária como um grafo base não direcionado, contendo todos os poços de visita (vértices) e todos os possíveis trechos de tubulação (arestas), o qual naturalmente apresenta ciclos. Para contornar essa limitação, o grafo base é transformado em um grafo linha, permitindo que algoritmos clássicos de geração de árvores geradoras, como o de Dijkstra, sejam aplicados sem a exclusão prévia de trechos. A partir da obtenção de uma árvore geradora no grafo linha, realiza-se a transformação inversa, resultando em um traçado em forma de árvore no grafo original, direcionado ao ponto de saída e contendo todos os trechos da rede, atendendo simultaneamente às restrições topológicas de sistemas por gravidade. Os autores validam a metodologia em estudos de caso da literatura, demonstrando que o método é computacionalmente eficiente, conceitualmente simples e capaz de gerar traçados factíveis sem o uso de estratégias adicionais de corte de arcos, o que representa um avanço relevante no uso sistemático da teoria dos grafos aplicada à otimização do traçado de redes coletoras.

3 METODOLOGIA

A seção em questão tem como objetivo apresentar a metodologia de desenvolvimento de um algoritmo capaz de gerar automaticamente o traçado de redes coletoras de esgoto, utilizando técnicas de otimização baseadas em estratégias de caminhos mínimos em árvores de busca em largura. Para tal, foi elaborado um software que visa minimizar o custo de implantação das redes por meio da exploração do espaço de busca de todas as conexões possíveis entre trechos e poços de visita, de modo a identificar um traçado que apresente eficiência econômica e viabilidade hidráulica, considerando aspectos relacionados à escavação, à declividade dos trechos e aos custos com tubulações.

Para validar a metodologia, foram definidos três estudos de caso com diferentes configurações topográficas e dimensões de rede, tendo como objetivo avaliar o desempenho do algoritmo em situações complexas de redes reais.

O algoritmo proposto é composto por diferentes fases, sendo a configuração dos trechos ponta seca do traçado, a resolução de nós que não apresentam nenhuma saída (denominados nós terminais), a análise de nós com múltiplas saídas para determinar o fluxo prioritário, e a definição dos trechos que devem ser afastados da rede principal. Cada uma dessas etapas é conduzida por uma árvore de busca em largura, a qual percorre o grafo representando a rede coletora e avalia as soluções viáveis com base em critérios hidráulicos e topográficos. Caso um caminho alternativo não atenda aos requisitos estabelecidos, a árvore interrompe a expansão daquele ramo, caracterizando o processo de poda. Ao final do processamento, o software gera um arquivo de saída no formato DXF, contendo o traçado otimizado da rede, o qual pode ser analisado em ambientes CAD.

O algoritmo desenvolvido neste trabalho representa uma inovação significativa no processo de elaboração de projetos de redes coletoras de esgoto, que tradicionalmente são realizados de forma manual pelos projetistas. Em abordagens convencionais, o traçado é definido por meio da análise de plantas topográficas e curvas de nível, exigindo longas horas de trabalho para avaliar alternativas, conectar trechos e verificar a viabilidade hidráulica, podendo gerar erros e não garantir a melhor solução. Em contraste, o algoritmo aqui proposto automatiza essas etapas e entrega uma solução otimizada em tempo computacional reduzido, possibilitando ao projetista obter o traçado completo da rede em poucos segundos, a depender do arranjo de nós e de trechos apresentados.

As próximas seções deste capítulo detalharão os fundamentos da teoria dos grafos aplicada ao problema, os conceitos da busca em largura (BFS) como estratégia de expansão e

poda de caminhos no grafo, a estrutura e validação dos arquivos de entrada, o processamento interno das árvores de busca, bem como os estudos de caso propostos para análise do algoritmo, demonstrando a aplicabilidade do método proposto em diferentes cenários de projeto.

3.1 O processo de otimização do traçado de redes coletoras de esgoto

A rotina computacional proposta para a geração automática do traçado de redes coletoras de esgoto, desenvolvida na linguagem de programação C#, inicia-se com o carregamento e validação dos dados de entrada, tendo como base um arquivo que contém a representação da topologia inicial da rede, que formará o grafo base. Cada linha do arquivo descreve um trecho da rede, de modo a formar um par de nós (inicial e final), com suas respectivas coordenadas (X, Y). No arquivo de entrada também devem ser apresentadas as cotas altimétricas (Z) para cada um dos nós, bem como, uma variável binária que indica se o nó final é um ponto onde a rede se encerra (PV Final). A Tabela 4 apresenta a estrutura do arquivo de entrada utilizado pelo algoritmo.

Tabela 4 – Apresentação do exemplo de arquivo de entrada para a rotina computacional.

Nó inicial		Nó final		Cota inicial	Cota final	PV Final
(X)	(Y)	(X)	(Y)	(Z)	(Z)	
436228,0742	2041038,254	436208,0142	2041038,81	11,97194755	11,68676207	0
436212,7172	2041062,219	436208,0142	2041038,81	12,01853845	11,68676207	0
436145,7565	2041041,674	436173,5287	2041039,025	11,60662	11,54553573	0
436208,0142	2041038,81	436173,5287	2041039,025	11,68676207	11,54553573	0
436315,2584	2041405,763	436275,0704	2041414,036	12,62023161	11,5218242	0
436208,0142	2041038,81	436206,3804	2041023,859	11,68676207	11,47504394	1

Fonte: Autor (2026)

As coordenadas x e y, apresentadas nas colunas “Nó inicial (X)”, “Nó inicial (Y)”, “Nó final (X)” e “Nó final (Y)” definem a posição planimétrica dos nós no espaço, permitindo ao algoritmo obter características da rede como o comprimento dos trechos, por exemplo. Já as cotas altimétricas (Z) apresentadas nas colunas “Cota inicial (Z)” e “Cota final (Z)” são utilizadas para calcular os desníveis entre os nós, informação essencial para definir o sentido do fluxo gravitacional nos trechos e para o penalizar as soluções de caminhos inviáveis nas fases de otimização pelas árvores de busca em largura.

Na coluna “PV Final” verifica-se uma variável que define a existência de um PV final no trecho. Os dados da coluna em questão podem assumir os valores 0 ou 1, admitindo que a situação em que o valor é 1 indica que o nó final do trecho é um ponto final da rede (PV Final). Estes nós são tratados como destinos fixos no algoritmo, ou seja, são os pontos para onde o esgoto deverá ser conduzido quando a árvore de busca efetuar a otimização do traçado. Na situação em que o valor apresentado na coluna indica zero, considera-se que o nó final é um nó intermediário, ou seja, um ponto de passagem no traçado da rede. Estes nós não são pontos fixos da rede e podem, portanto, serem modificados ou ter seus trechos associados invertidos pelo algoritmo durante a otimização.

A rotina computacional proposta neste trabalho é estruturada como uma sequência de etapas, conforme ilustrado na Figura 24. O processo se inicia com a entrada de dados, que consiste no carregamento das informações referentes ao grafo base, como nós (PVs) e trechos da rede. Na etapa subsequente, o algoritmo realiza uma série de ajustes preliminares sobre o grafo base, onde, na etapa de correção do sentido dos trechos eles são avaliados e, caso necessário, são invertidos para garantir que o fluxo esteja orientado inicialmente de acordo com a topografia, ou seja, do nó de maior cota para o de menor cota. Além disso, também se executa um processo de correção todos os trechos isolados (pontas secas) inicialmente identificados no grafo base. Essa etapa tem como objetivo garantir que os trechos isolados não atuem como PV Final após o processo de inversão da topografia dos trechos, logo, caso o nó da extremidade final do trecho isolado não seja um nó inicial de outro trecho, faz-se a inversão das extremidades do nó isolado.

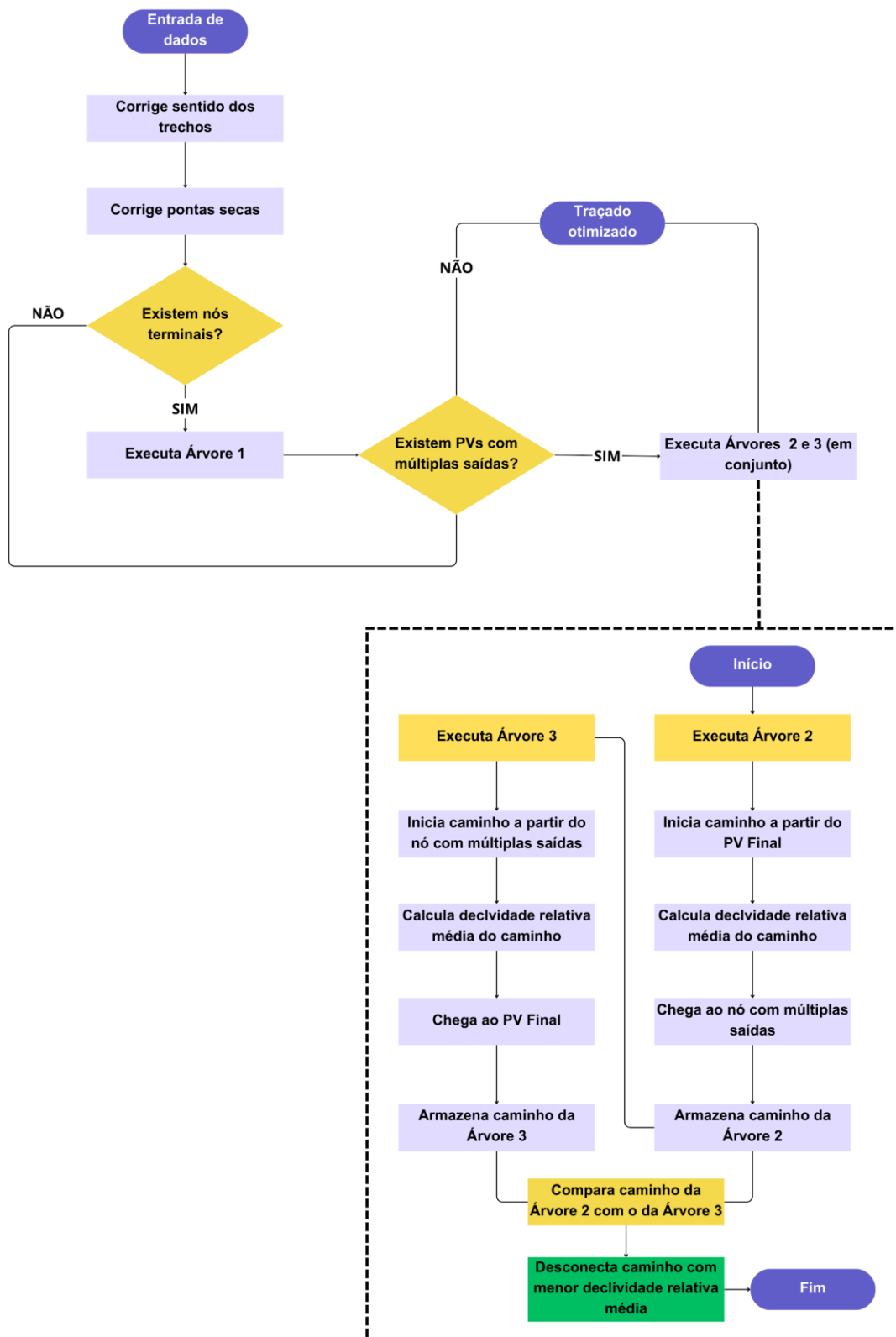
Com esses ajustes iniciais, o algoritmo entra na fase de processamento iterativo, que consiste em aplicar as Árvores de Busca em largura para resolver diferentes tipos de inconsistências na rede. O primeiro ponto de verificação é a existência de nós terminais, sendo estes, caracterizados por não possuírem nenhuma saída e, portanto, interrompem o fluxo da rede. Se esses nós forem identificados, o algoritmo executa a Árvore 1, cujo objetivo é conectar os nós terminais ao PV final mais próximo por meio do caminho mais curto e hidráulicamente viável, aplicando inversões de trechos quando necessário.

Após a resolução dos nós terminais, o algoritmo verifica se ainda existem PVs com múltiplas saídas, uma situação que pode levar à formação de ciclos e ramificações redundantes na rede, além de não obedecer a premissa de que em um nó pode haver múltiplas entradas, mas apenas uma saída. Caso tal condição seja encontrada, o algoritmo procede com a execução conjunta das Árvores 2 e 3. A Árvore 2 realiza uma busca em largura no grafo da rede, iniciando no PV final e expandindo até alcançar o nó com múltiplas saídas. Durante essa expansão, o

algoritmo encontra o caminho mínimo e, associado a esse, um parâmetro que reflete a declividade relativa média do caminho.

Tendo sido encontrado o nó com múltiplas saídas, entra em ação a *Árvore Invertida* (ou *Árvore 3*). Essa árvore inicia a partir de cada uma das demais saídas daquele nó com múltiplas conexões e realiza buscas no sentido inverso, percorrendo os caminhos alternativos em direção ao PV final com o objetivo de calcular a declividade relativa média de cada alternativa e compará-las com o caminho principal encontrado pela *Árvore 2*. Se a declividade relativa média de um desses caminhos alternativos for inferior ao encontrado pela *Árvore 2*, o trecho inicial que dá origem àquele caminho é afastado da rede principal e marcado como nova *ponta seca*. Dessa forma, apenas o caminho mais eficiente hidraulicamente e em termos de custo da rede é mantido conectado aos demais setores do traçado.

Figura 24 – Fluxograma geral de execução da rotina computacional.

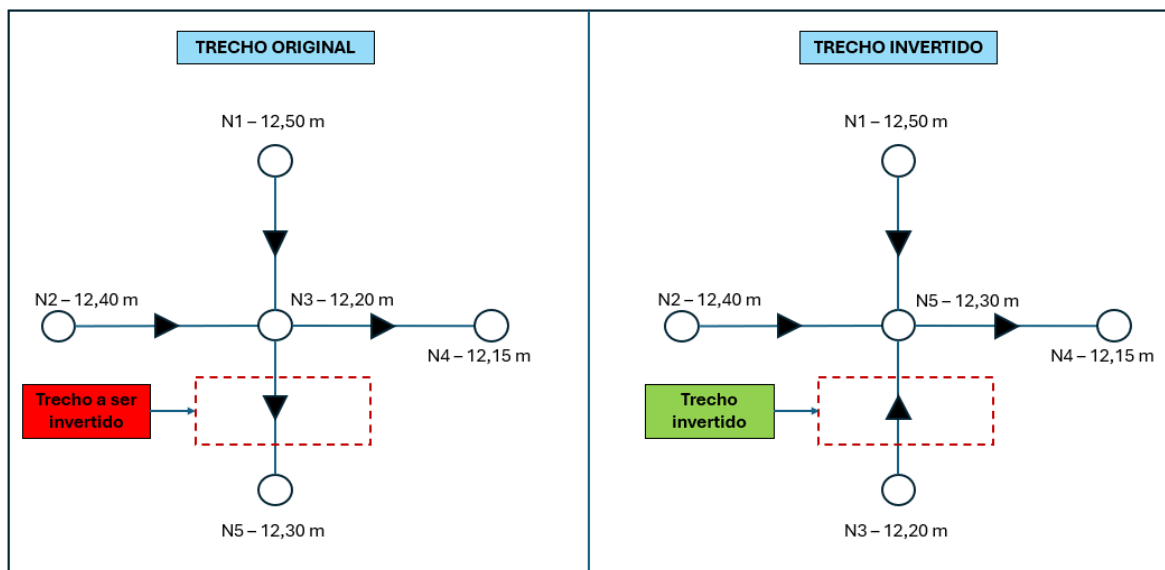


3.1.1 Ajustes preliminares no grafo base

Uma vez carregado o arquivo de entrada, o processamento inicial do algoritmo é dedicado à análise e ajuste da topologia do grafo base, assegurando que os dados de entrada estejam consistentes e em conformidade com os requisitos hidráulicos e topográficos necessários para as fases seguintes.

Na primeira etapa de processamento o algoritmo tem como objetivo realizar a verificação do sentido de todos os trechos, para isso, conforme o exemplo apresentado na Figura 25, com base na comparação entre as cotas dos nós inicial e final os trechos são avaliados quanto à direção do fluxo. Caso seja identificado um trecho cujo sentido esteja invertido, ou seja, com fluxo direcionado do nó de menor cota para o de maior cota, o algoritmo inverte automaticamente a ordem dos nós e de suas cotas, ajustando a orientação do trecho para respeitar o escoamento gravitacional. Essa correção é fundamental para as avaliações subsequentes a serem executadas pelas árvores de busca em largura, de modo que elas encontrem todos os trechos a favor da topografia e avaliem as alternativas mais viáveis de traçados. No exemplo apresentado na Figura 25, tem-se uma aresta orientada entre o nó N3, com cota igual a 12,20 m e o nó N5, com cota igual a 12,30 m. Percebe-se que a cota do nó final é maior do que a do nó inicial, o que implica em um trecho no sentido contrário ao caimento natural do terreno. Dessa forma, o algoritmo inverte as posições dos nós, o que faz com que se inverta o sentido do fluxo no trecho.

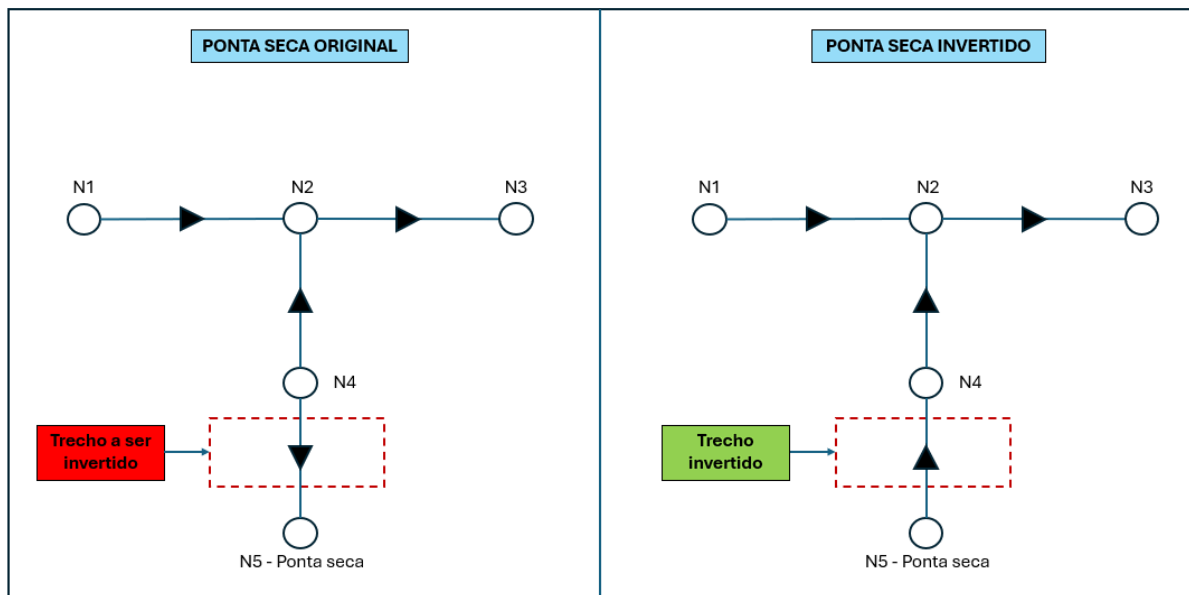
Figura 25 – Ordenamento do sentido do fluxo a favor da topografia



Fonte: Autor (2026)

A etapa seguinte envolve o ajuste automático de trechos isolados no grafo base, classificados como ponta seca, quando estes estão associados a nós que não possuem trechos saindo. Essa rotina tem como objetivo garantir que todos os trechos ponta seca que não possuem continuidade de fluxo sejam reorientados para refletir corretamente a continuidade do fluxo da rede coletora. A Figura 26 apresenta uma ilustração do processo de reordenamento de fluxo executado nesta etapa, onde a aresta orientada entre N4 e N5, mesmo estando no mesmo sentido do caimento natural do terreno, necessita ser invertido, pois caso não fosse feito este procedimento, não seria possível a continuidade do fluxo para os demais trechos da rede e este passaria a atuar como um PV Final.

Figura 26 – Procedimento para inversão de trechos ponta seca.



Fonte: Autor (2026)

Para cada um desses nós identificados, o algoritmo percorre os trechos associados e inverte sua orientação, trocando as posições de início e fim do trecho, bem como ajustando as cotas altimétricas de ambos os extremos. Essa inversão é essencial para redefinir o sentido do fluxo, permitindo que o trecho anteriormente direcionado para o nó isolado seja incorporado ao traçado principal da rede com fluxo coerente.

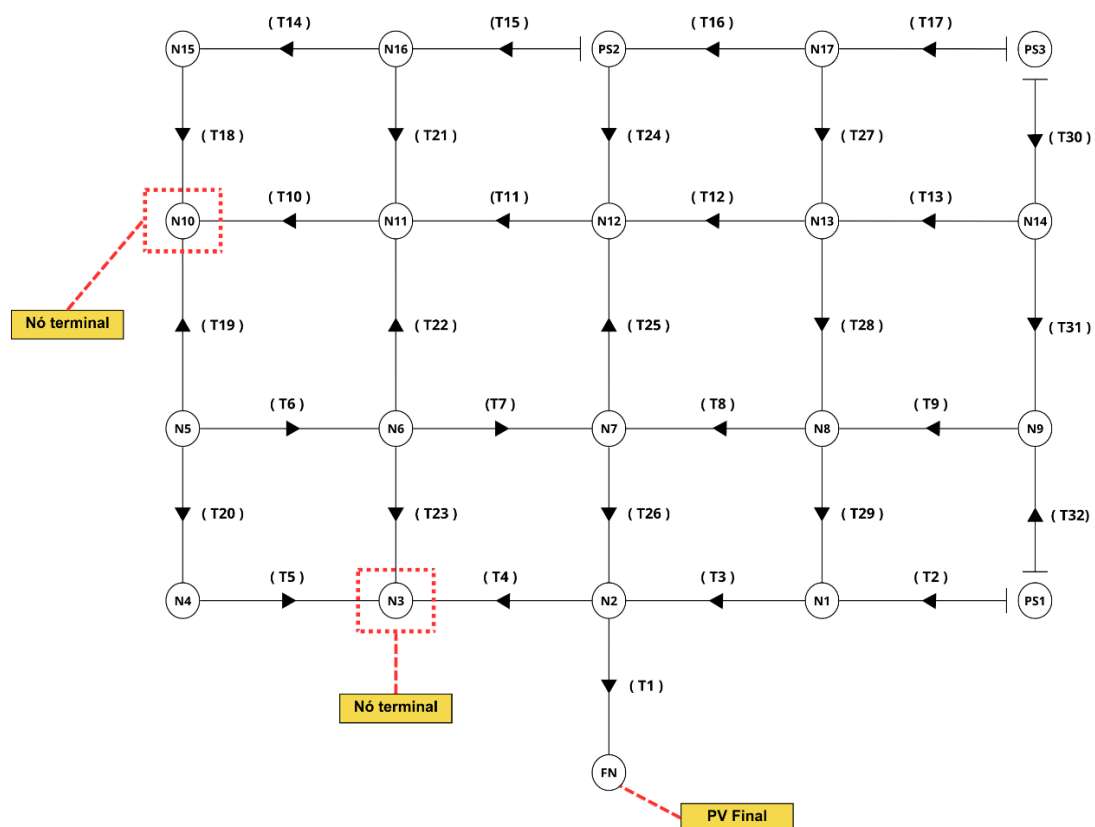
Além da inversão, os trechos processados nesta etapa são marcados como fixos e classificados como pontas secas. Essa marcação indica que esses trechos não serão alterados nas fases posteriores de otimização pelas árvores de busca em largura, preservando a integridade das alterações realizadas e evitando que sejam novamente invertidos em um momento posterior.

3.1.2 Execução da Árvore 1: Resolvendo caminhos para nós terminais

A execução do processo de busca e otimização feito pela Árvore 1 tem como objetivo resolver todos os problemas de nós terminais da rede, determinando os caminhos mais curtos que conectem todos os PVs da rede ao PV Final estabelecido. Todavia, tais caminhos devem apresentar viabilidade hidráulica e eficiência econômica. Como pode ser observado na Figura 27, entende-se pode nó terminal aquele que não é um PV Final e não apresenta nenhuma saída de fluxo. Quando a rede encontra situações nesta natureza, há uma interrupção de fluxo, o que torna o traçado inviável do ponto de vista hidráulico.

A estrutura lógica da Árvore 1 baseia-se em uma busca em largura pelos caminhos possíveis, avaliada por um conjunto de restrições que envolvem, dentre outros aspectos, o comprimento total dos caminhos e os desníveis altimétricos entre os nós.

Figura 27 – Rede hipotética criada para ilustrar a manipulação de dados pela Árvore 1.



Fonte: Autor (2026)

O processamento inicia-se a partir do ponto final da rede coletora (PV Final), previamente identificado na etapa de preparação dos dados. A partir desse nó, é realizada uma

busca com o objetivo de encontrar os nós terminais e resolvê-los, se necessário, através da inversão dos trechos. A Árvore inicia pelo primeiro caminho avaliado, que são os trechos que se conectam ao PV Final. A partir desta etapa, a Árvore ramifica analisando os demais nós da rede, analisando seus trechos adjacentes e verificando se os caminhos formados chegam ao PV Final. Nessa avaliação, o menor caminho que chega a cada nó da rede é armazenado para que possam ser avaliadas as restrições do problema.

Tomando como base o exemplo da Figura 27, a busca inicia pelo nó FN e pelo trecho T1, estes formam o primeiro caminho a ser avaliado. Após isso, a Árvore ramifica e passa a avaliar o nó N2 e seus trechos adjacentes (T3, T4 e T26). Nesse caso, formam-se mais três possibilidades de caminho, o caminho T3 – T1, o caminho T26 – T1 e, por fim, o caminho T4 – T1. Após isso, a Árvore expande e os próximos nós a serem avaliados seriam N1, N7 e N3, em conjunto com seus respectivos trechos adjacentes. A cada caminho encontrado, a rotina computacional acumula o comprimento dos trechos, uma vez que um dos objetivos da Árvore é chegar em cada nó pelo caminho mais curto, sendo necessário efetuar uma comparação entre as alternativas de caminho existentes e verificar a eficácia do caminho em função do conjunto de restrições impostas ao problema.

Considerando que na etapa de configurações iniciais a rotina computacional já efetua a correção do sentido dos trechos, para que fiquem a favor da topografia do terreno, uma das premissas de execução da Árvore 1 é que os caminhos que cheguem aos respectivos nós tenham o maior número possível de trechos a favor da topografia. Isso tendencia a rede a ter menores custos com escavações. Todavia, nem sempre é possível ter estas garantias devido as diferentes condições topográficas dos terrenos. Para avaliar tal questão, a partir do nó que está sendo analisado, a rotina computacional verifica quais são os trechos que estão saindo e os que estão chegando até ele. Esta ação é necessária para que seja dado um peso diferente aos nós que estão saindo, tendo em vista que, em termos hidráulicos, de um PV só pode haver uma saída para continuidade do fluxo. Nesse caso, os trechos que estão saindo do PV, como no caso do trecho T4 quando se está analisando o Nó 2 (N2) da Figura 27, sofre uma penalização em seu comprimento, dada pela Equação 27, que foi proposta para esse trabalho para que os trechos não sejam tratados como caminhos preferenciais durante a expansão da Árvore 1, logo, seu comprimento apresentará um valor maior do que o real.

$$L = L \cdot e^h \quad (27)$$

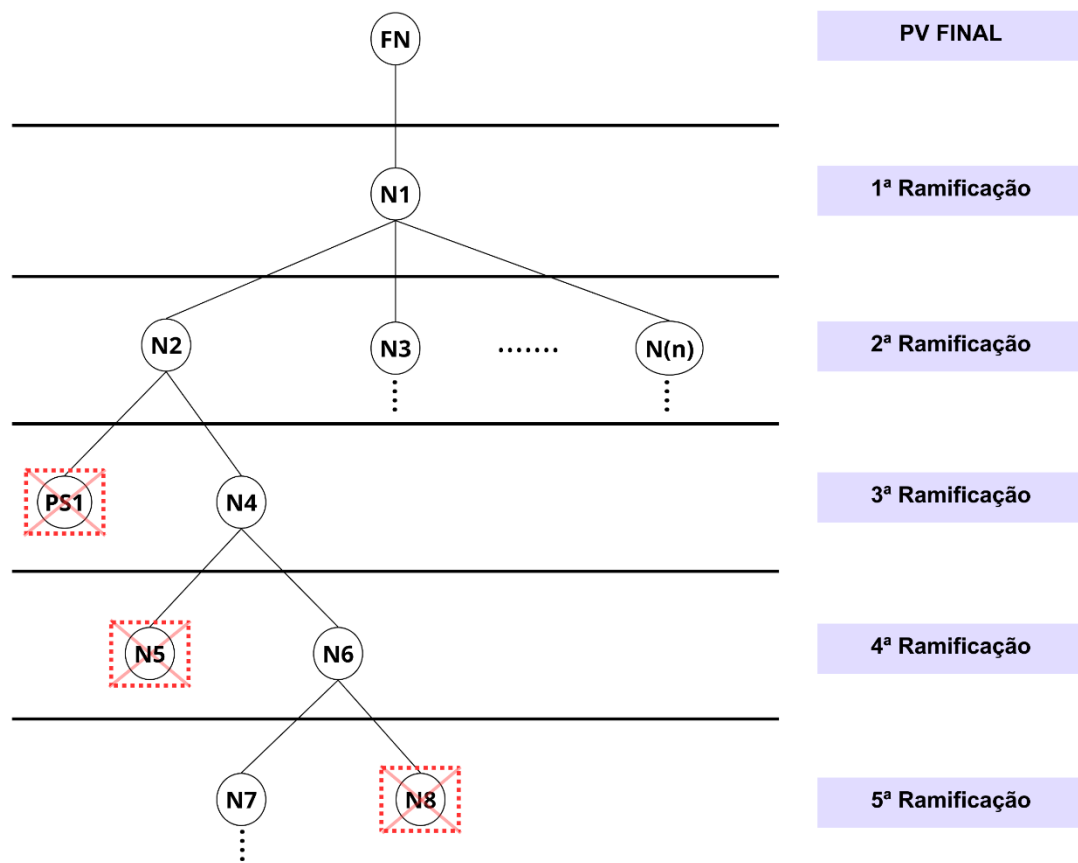
Onde:

L – comprimento do trecho [m]

h – diferença de cotas entre as extremidades do trecho [m]

Durante a execução da Árvore 1, a busca pelos caminhos possíveis é conduzida de forma controlada por um conjunto de restrições, que funcionam como critérios de poda dos ramos de expansão. Esses critérios são fundamentais para reduzir o espaço de busca cortando caminhos que não são viáveis. Dessa forma, a rotina computacional promove ganhos em termos de tempo computacional de execução. A Figura 28 apresenta uma ilustração da expansão e do processo de poda nos ramos.

Figura 28 – Ilustração do processo de expansão e poda feito pela Árvore 1.



Fonte: Autor (2026)

O primeiro critério consiste na análise do comprimento acumulado ao longo de cada caminho explorado. Para cada nó alcançado durante a expansão da Árvore, o algoritmo compara o comprimento total do caminho atual com o menor comprimento já registrado para esse nó, presente em um vetor de distâncias mínimas. Caso o comprimento acumulado seja superior ao

O terceiro critério de poda refere-se à prevenção da formação de ciclos ou anéis na rede. Para cada novo nó visitado, o algoritmo verifica se ele já está presente no histórico do caminho em expansão, caso positivo, o ramo é eliminado da lista de caminhos ativos. Essa medida assegura que o traçado da rede se mantenha como um grafo orientado acíclico, respeitando o princípio hidráulico de que o esgoto deve fluir continuamente a jusante sem retorno para pontos já percorridos. Considerando o exemplo da Figura 29 e avaliando um dos caminhos possíveis para o nó N7, parte-se dele em direção aos nós N8, N13 e N12, no entanto, ao se expandir o nó N12, encontra-se novamente o nó N7 por um dos caminhos, o que formaria um ciclo, uma vez que o caminho acumulado já passou por N7 uma vez, logo, ocorre uma poda do ramo da Árvore e o caminho em questão é interrompido.

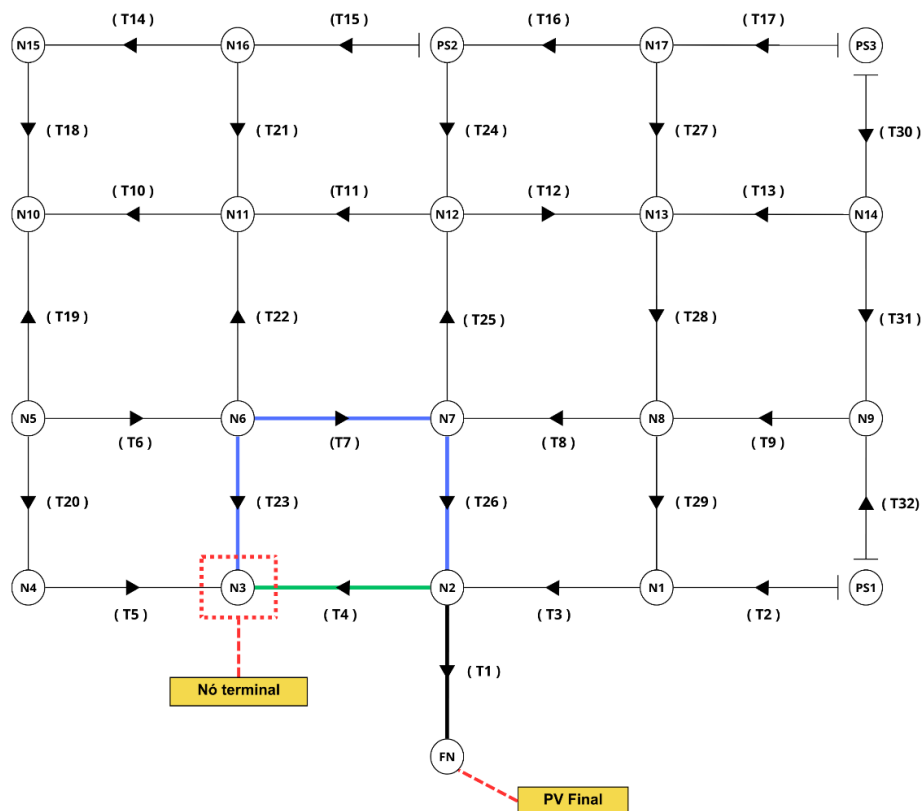
O quarto critério de poda aplicado durante a execução da Árvore 1 ocorre quando o algoritmo identifica um nó terminal durante a expansão dos caminhos, ocorrendo a interrupção do ramo imediatamente. A partir desse ponto, o algoritmo concentra seu processamento na resolução do nó terminal, armazenando o primeiro caminho encontrado até ele, que é considerado até então o caminho mínimo do nó terminal ao PV Final. A partir deste momento, a Árvore continua a expansão com o objetivo de encontrar um caminho viável (respeitando todas as restrições e penalizações para cada nó e trecho da expansão) que seja menor do que o mínimo armazenado até então, o que pode ser considerado um quinto critério para a poda dos ramos da Árvore 1. Caso não seja encontrado um caminho mínimo alternativo, o algoritmo encerra a expansão da árvore e inverte o sentido dos trechos que estão provocando a descontinuidade de fluxo, ou seja, os que foram penalizados ao longo do caminho encontrado, fazendo com que o nó terminal apresente uma saída e um caminho até alcançar o PV Final, deixando de ser caracterizado na próxima expansão da Árvore 1 como nó terminal. Vale ressaltar que os trechos que foram invertidos ao longo do caminho passam a ser caracterizados como fixos e não podem mais ter seu sentido invertido pelas Árvores de busca.

Como forma de ilustrar o processo adotado para a quarta e a quinta restrição de busca, pode-se observar a descrição da Figura 30. Considerando que a expansão da Árvore que encontrou o nó terminal N3 foi passando pelos trechos T1 e T4, este caminho é armazenado como caminho mínimo encontrado até então, sendo penalizado o trecho T4 por estar saindo do nó N2. A partir deste momento, a busca se concentra em encontrar um outro caminho que seja menor do que o atual. Um dos caminhos avaliados seria o que passa pelos trechos T1, T26, T7 e T23, porém, percebe-se graficamente que ao chegar no trecho T7 o caminho já é bem mais longo do que o inicialmente encontrado, o que faria com que ocorresse a poda do ramo da Árvore de busca. Todavia, supondo hipoteticamente que o até caminho até T7 fosse menor do

que o mínimo, ao chegar no trecho T23 o caminho sofreria uma penalização no seu comprimento por ser um trecho que está saindo do nó N26, o que, possivelmente faria com que este ramo da Árvore fosse podado por ultrapassar o caminho mínimo. Por fim, supondo que mesmo havendo as penalizações o caminho passando pelos trechos T1, T26, T7 e T23 fosse o menor encontrado, o trecho T23 e todos os outros trechos que foram penalizados ao longo deste caminho seriam invertidos, proporcionando a conexão direta entre o nó terminal e o PV Final.

Dessa forma, se estabelece a premissa de que o algoritmo prioriza a inversão do trecho que proporciona o menor caminho do nó terminal até o PV Final, o que faz com que o caminho a ser mantido como mínimo seja o que passa pelos trechos T1 e T4. A partir deste momento, o algoritmo inverte o sentido de T4 e marca-o como fixo, de modo que ele não tenha mais seu sentido invertido ao longo da busca das Árvores. Além disso, o algoritmo retira o nó N3 da lista de nós terminais, já que ele agora passará a ter uma saída e possibilitará a continuidade do fluxo. Tendo feito toda esta avaliação e resolvido o problema do nó terminal, o algoritmo inicia novamente a expansão dos caminhos iniciando todo o processo novamente a partir do PV Final, até que todas as inconsistências de nós terminal sejam resolvidas na rede.

Figura 30 – Restrição de caminhos mínimos para o nó terminal.

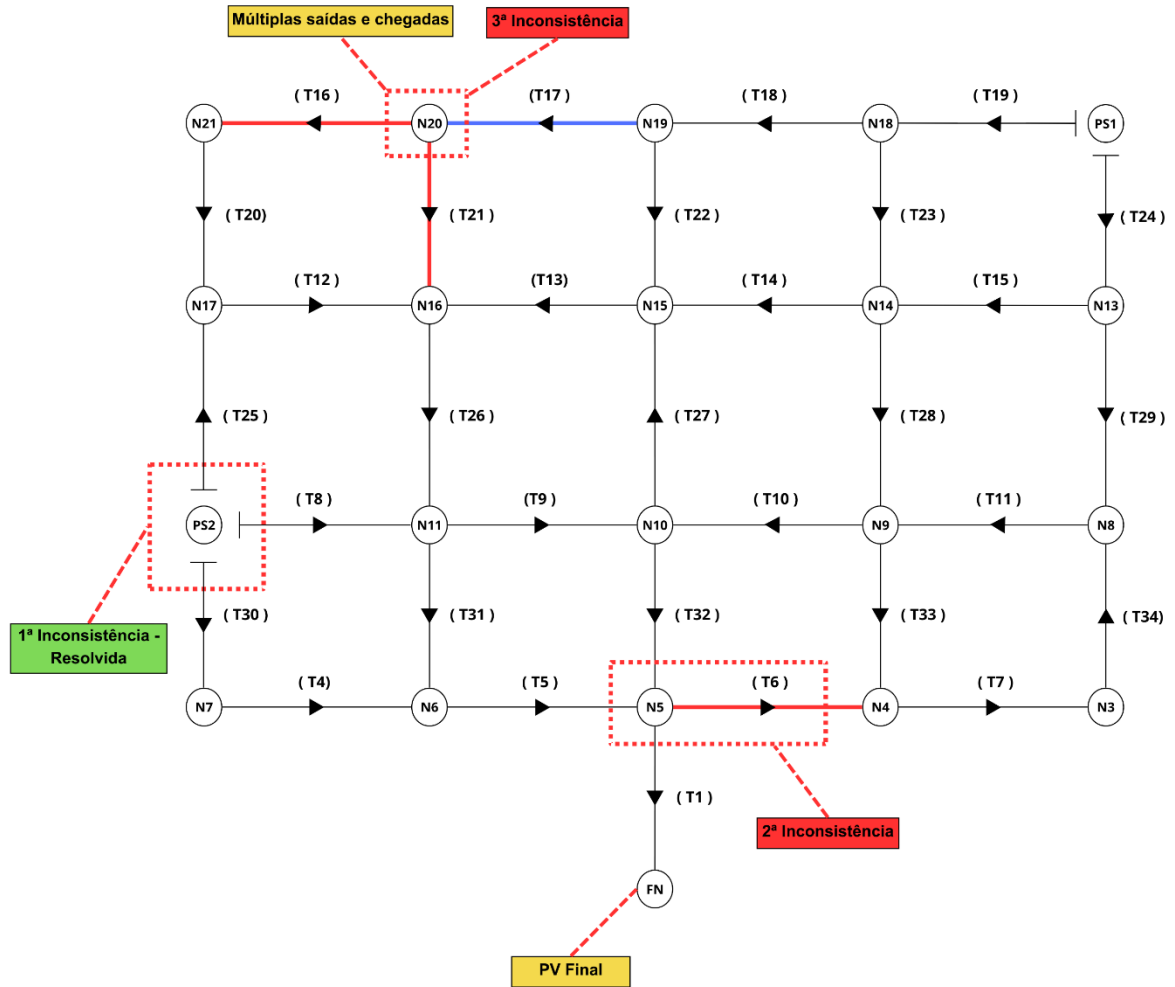


3.1.3 Execução das árvores 2 e 3: Resolvendo os nós com múltiplas saídas

Finalizado processamento de dados da *Árvore 1*, todos os nós terminais apresentados para a rede estarão resolvidos, o que significa que a rede não apresenta mais descontinuidade de fluxo, tendo em vista que os trechos que necessitavam ser invertidos foram resolvidos. Além disso, pela *Árvore 1* encontram-se os caminhos mínimos que chegam em cada nó da rede, que o levam ao PV Final. Todavia, apesar deste processamento ainda restam inconsistências hidráulicas na rede, uma vez que há a possibilidade de existência de nós que apresentam mais de uma saída, sendo necessário definir quais caminhos a partir das saídas destes nós originarão novos trechos pontas secas e quais prosseguirão para dar continuidade ao fluxo proveniente de outros trechos, o que é feito por meio da execução conjunta entre as *Árvores 2 e 3*.

O processamento das *Árvores* se concentra em resolver três inconsistências na rede, conforme apresentado na *Figura 31*. A primeira situação diz respeito ao que se observa no Nó N12, onde é possível perceber que existem apenas saídas do PV. A segunda inconsistência diz respeito aos nós que estão conectados à montante do trecho que está ligado ao PV Final, quando estes apresentam uma ou mais saídas além da que liga ao PV Final, como pode ser observado no nó N5 e no trecho T6. Por fim, a terceira inconsistência apresenta a situação em que existem trechos chegando a um determinado PV, mas também existem múltiplas saídas, como no caso do nó N20.

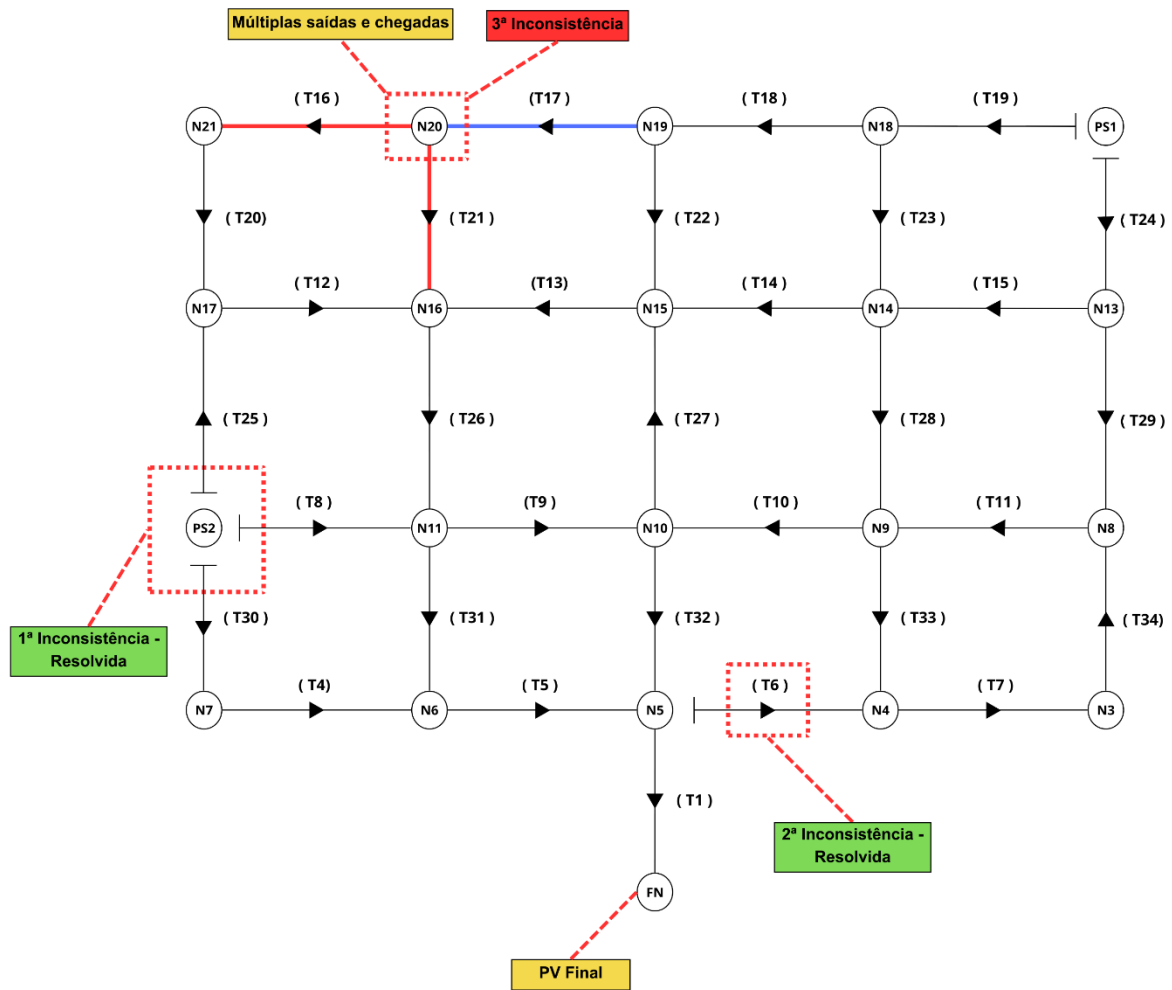
Figura 32 – Representação da solução para a primeira inconsistência.



Fonte: Autor (2026)

Assim como na primeira inconsistência, a segunda também já pode ter sua solução definida mesmo antes da execução da Árvore 2. Como o nó a montante do trecho que se liga ao PV Final só pode ter uma saída, as demais saídas deste nó devem ser consideradas pontas secas, como se observa na Figura 33, onde o trecho T6 foi transformado em ponta seca. Dessa forma, as duas primeiras inconsistências são resolvidas para todos os nós da rede que possuem estas características.

Figura 33 – Representação da solução para a segunda inconsistência.



Fonte: Autor (2026)

Considerando a problemática estabelecida como inconsistência 3, a Árvore 2, em conjunto com a Árvore 3 atuam em com o intuito de resolvê-la nos trechos que necessitam correção. A Árvore 2 inicia sua expansão partindo do PV Final até os trechos que apresentam mais de uma saída em mais de uma chegada, buscando encontrar e definir quais os trechos serão transformados em pontas secas. A exemplo da Árvore 1, toma-se como ponto inicial o PV Final e a Árvore se ramifica analisando os trechos que estão à montante dele. Para cada nó são analisados seus trechos adjacentes e a Árvore continua a expansão utilizando o conceito de busca em largura.

Durante a expansão, para cada trecho que faz parte do caminho são captadas informações sobre a declividade do terreno e calcula-se para ele uma declividade relativa (I_{rel}) de acordo com a Equação 28. O cálculo da declividade relativa e de seu valor acumulado ao longo do caminho são utilizados como parâmetro comparativo entre as soluções encontradas

pela Árvore 2 e a Árvore 3, definindo quais trechos que estão saindo do PV serão transformados em ponta seca.

$$I_{rel} = I_{terreno} - I_{min_c} \quad (28)$$

Onde:

$I_{terreno}$ – declividade de terreno no trecho (m/m)

I_{min_c} – declividade mínima construtiva (m/m)

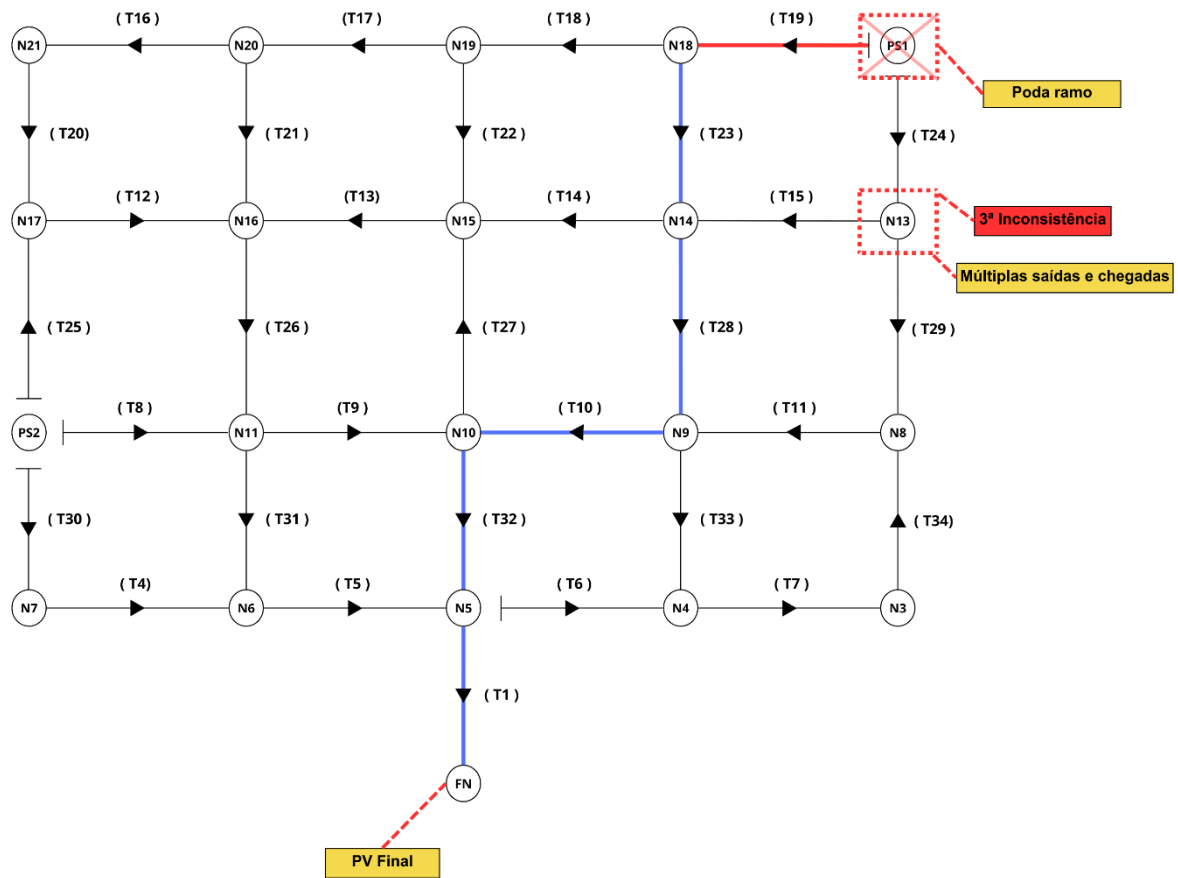
A declividade de terreno nos trechos pode ser obtida pela Equação 29, onde $CT_{nó(m)}$ representa a cota do nó de montante e $CT_{nó(j)}$ diz respeito à cota do nó de jusante do trecho, ambas em metros. A variável L , por sua vez, representa o comprimento do trecho, em metros.

$$I_{terreno} = \frac{(CT_{nó(m)} - CT_{nó(j)})}{L} \quad (29)$$

Em projetos de redes coletoras de esgoto, a definição de uma declividade mínima construtiva (I_{min_c}) é fundamental para garantir o adequado funcionamento hidráulico do sistema, assegurando que o esgoto alcance velocidades suficientes para o transporte de sólidos e evitando o acúmulo de detritos nas tubulações. No modelo computacional em questão, este parâmetro é atribuído pelo usuário, a depender da característica da rede. Para as redes avaliadas neste trabalho, após consultas a profissionais de saneamento, considerou-se a declividade de 0,005 m/m como a mínima construtiva.

Como todos os nós terminais são resolvidos pela Árvore 1, existe apenas uma restrição para a poda da Árvore 2, que ocorre quando o nó está conectado a um trecho ponta seca. A partir deste momento o ramo da árvore é podado e interrompe-se a busca do caminho até então avaliado. Na Figura 34, que mostra o processo de poda dos ramos da Árvore 2, partindo do PV Final (FN) a árvore busca ramificações para resolver a problemática do nó N13, que possui um trecho chegando (T24) e dois trechos saindo (T15 e T29). Um dos caminhos possíveis de serem avaliados seria o que passa pelos trechos T1, T32, T10, T28, T23 e T19, todavia, ao avaliar-se o nó que está à montante do trecho T19, percebe-se que este se trata de um trecho ponta seca. Dessa forma, a árvore poda o ramo de expansão e o caminho em questão é interrompido antes mesmo de alcançar no nó N13.

Figura 34 – Representação da única restrição para a expansão da Árvore 2.



Fonte: Autor (2026)

Após a Árvore 2 encontrar o nó que apresenta múltiplas saídas e pelos menos uma chegada, calcula-se a declividade relativa acumulada ao longo do caminho, possibilitando o cálculo de uma declividade relativa média, que é armazenada para que seja comparada aos valores encontrados para os outros caminhos de saída do nó até o PV Final.

A Árvore 3 pode ser definida como uma árvore inversa, uma vez que, ao invés de iniciar do PV Final, como as demais árvores apresentadas até então, parte do nó com múltiplas saídas em direção ao PV Final.

Durante a sua expansão são captadas as mesmas informações que a Árvore 2, no caso, a declividade relativa acumulada em cada trecho. Este procedimento é importante para que se tenha um parâmetro comparativo entre o caminho inicial encontrado pela Árvore 2 e os caminhos alternativos dados pela Árvore 3. O comparativo é feito através do cálculo de uma declividade relativa média ($I_{rel(média)}$) para cada caminho, que é obtida através da Equação 30. Ao se comparar a declividade relativa média dos caminhos encontrada pelas Árvores 2 e 3 é

feito um processo comparativo e o caminho que apresentar a menor declividade relativa média será desconectado do PV com múltiplas saída, gerando um novo trecho ponta seca.

$$I_{rel(média)} = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{rel(i)})}{N} \quad (30)$$

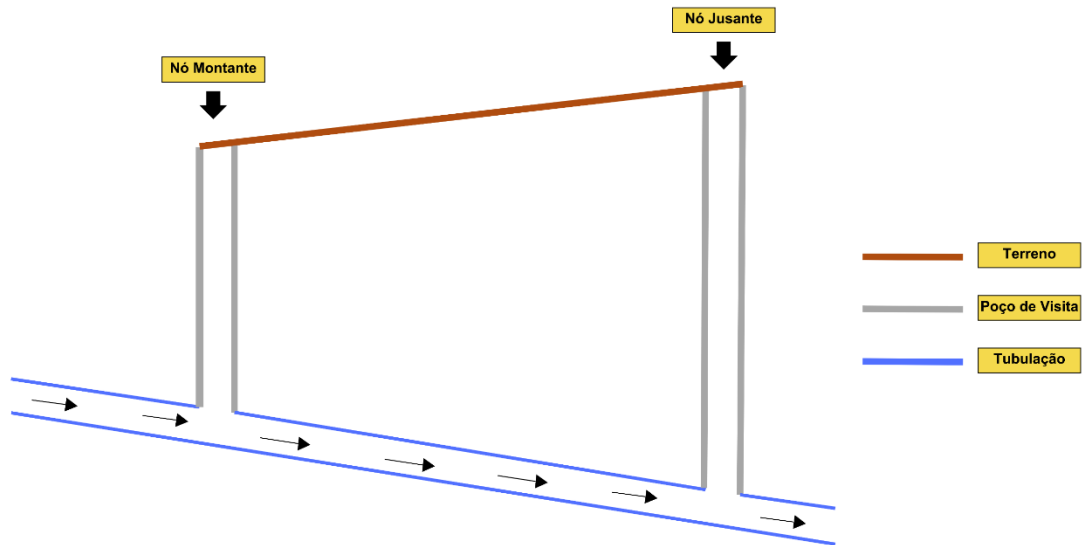
Onde:

N – Quantidade de trechos que fazem parte do caminho avaliado

I_{rel} – Declividade relativa de cada trecho (m/m)

A escolha do parâmetro de declividade relativa como definidor do trecho ponta seca parte da necessidade se comparar situações de trechos desfavoráveis ao longo do caminho, como por exemplo os trechos que necessitaram ter seu sentido de fluxo invertido ao longo do processamento da Árvore 1, ou seja, trechos com declividade negativa, que ficaram com sentido contrário ao caimento natural do terreno, como pode ser observado na Figura 35. Nestas situações, a diferença entre a declividade de terreno e a declividade mínima tende a ficar negativa, de acordo com a Equação 28. Neste caso, quanto mais trechos invertidos no caminho, mais negativa tende a ser a declividade relativa acumulada e, conseqüentemente, a declividade relativa média. Caso o caminho inicialmente encontrado pela Árvore 2 possua menos trechos invertidos e/ou mais trechos com a declividade de terreno maior que a declividade mínima (o que faria a declividade relativa média aumentar), o caminho encontrado pela Árvore 3 tende a originar uma ponta seca, pois a sua declividade relativa média tende a ser menor do que a encontrada pela Árvore 2.

Figura 35 – Representação de trechos em aclave.



Fonte: Autor (2026)

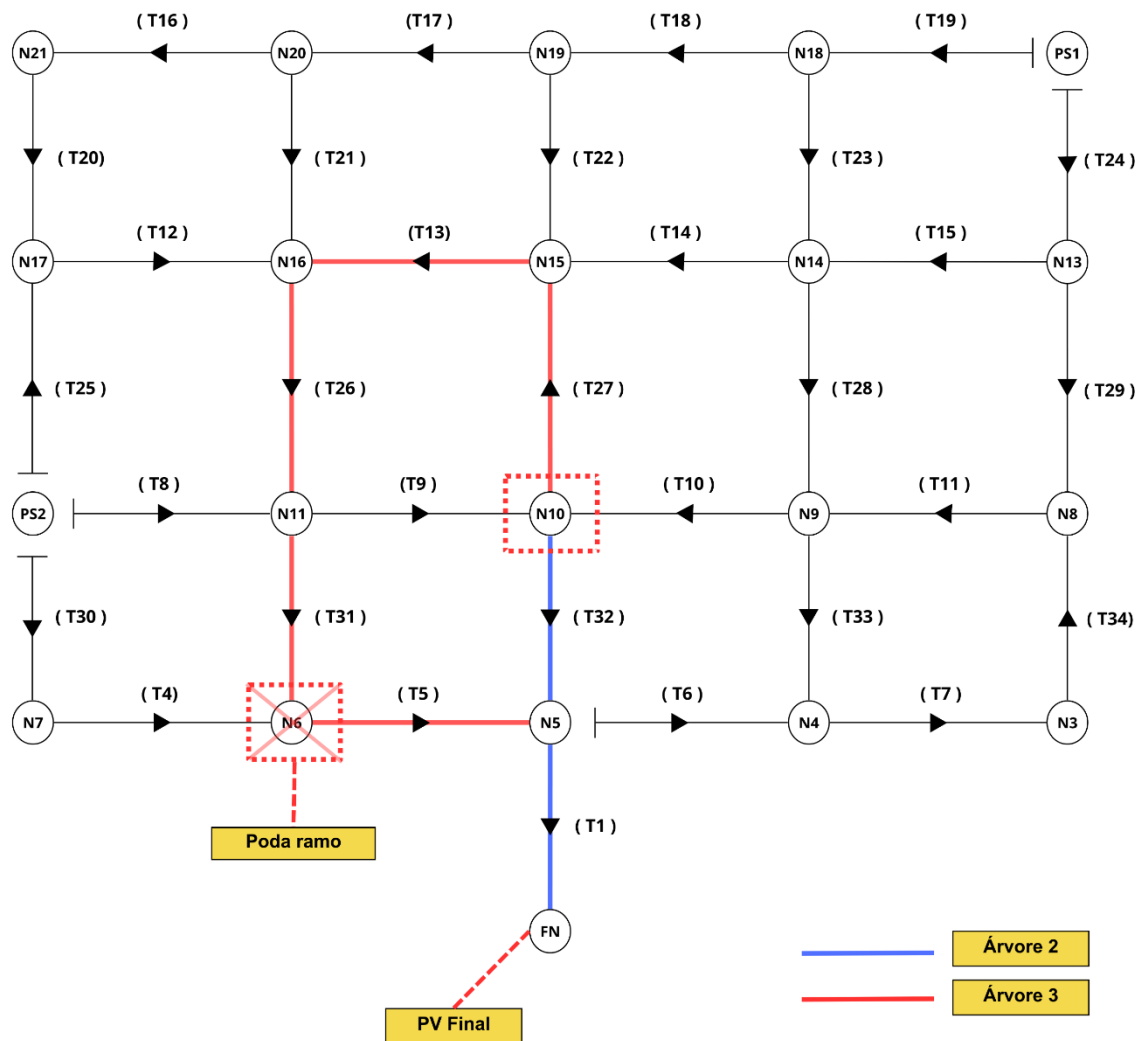
Essa abordagem constitui um processo de otimização do traçado da rede, uma vez que evita o acúmulo de grandes vazões em trechos invertidos. Caso essas trajetórias fossem mantidas como parte do fluxo principal, poderiam resultar em aumentos significativos nos diâmetros das tubulações e no volume de escavação necessário para implantação. Ao contrário, quando o algoritmo decide afastar essas trajetórias e transformá-las em pontas secas, o trecho invertido passa a funcionar como um ponto de contribuição isolado, recebendo apenas as vazões locais, tendendo a reduzir as vazões que passam pelos trechos invertidos e tornando o projeto mais econômico e tecnicamente viável.

Como forma de proporcionar um exemplo visual de atuação das Árvores 2 e 3 em conjunto, a Figura 36 apresenta uma ilustração de como ocorre o processo de expansão feito pela rotina computacional. Considerando o nó em análise N10, a Árvore 2 inicia a expansão a partir do PV Final (FN) por um dos caminhos possíveis de serem encontrados até o nó N10 (com duas saídas e duas chegadas), sendo este o que passa pelos trechos T1 e T32 (marcados em azul), na oportunidade, são armazenadas as informações de declividade relativa para cada um dos trechos.

Após encontrar o nó N10 ocorre o registro da declividade relativa média do caminho. A partir deste ponto, a Árvore 3 atuará no sentido de verificar possíveis caminhos alternativos que gerem uma declividade relativa média superior à que foi encontrada pela Árvore 2. O processo inicia-se no nó N10, buscando caminhos que cheguem ao PV Final. Um dos caminhos possíveis é o que passa pelos trechos T27, T13, T26, T31, T5, e T1. Vale destacar

A primeira restrição consiste na comparação da declividade relativa média do caminho atual com os valores já registrados para o nó destino. Para cada novo trecho expandido, o algoritmo calcula a declividade relativa média acumulada desde o início do caminho e armazena o maior valor encontrado até cada nó. Caso a declividade relativa média do caminho atual seja inferior ao maior valor já registrado para o nó em análise, o caminho é imediatamente descartado. Analisando a Figura 37, observa-se que durante a expansão do caminho do Nó N10 para o PV Final, caso se identifique que até o nó N6 já existe uma declividade relativa média inferior à que foi calculada para o caminho atual em um outro momento, ocorrerá a poda deste caminho e a *Árvore 3* interromperá a expansão por este ramo.

Figura 37 – Ilustração das restrições aplicadas à expansão da *Árvore 3*.



O segundo critério refere-se à detecção do PV Final ao longo do caminho. Isto significa que a busca chegou a seu destino e se faz necessário encerrar a busca no ramo. O terceiro critério está associado à prevenção da formação de ciclos (anéis) na rede, logo, durante a análise de cada caminho, o algoritmo verifica se o nó atual já está presente no histórico do caminho percorrido, o que configura a formação de um anel, caso seja detectada tal formação, o ramo é descartado.

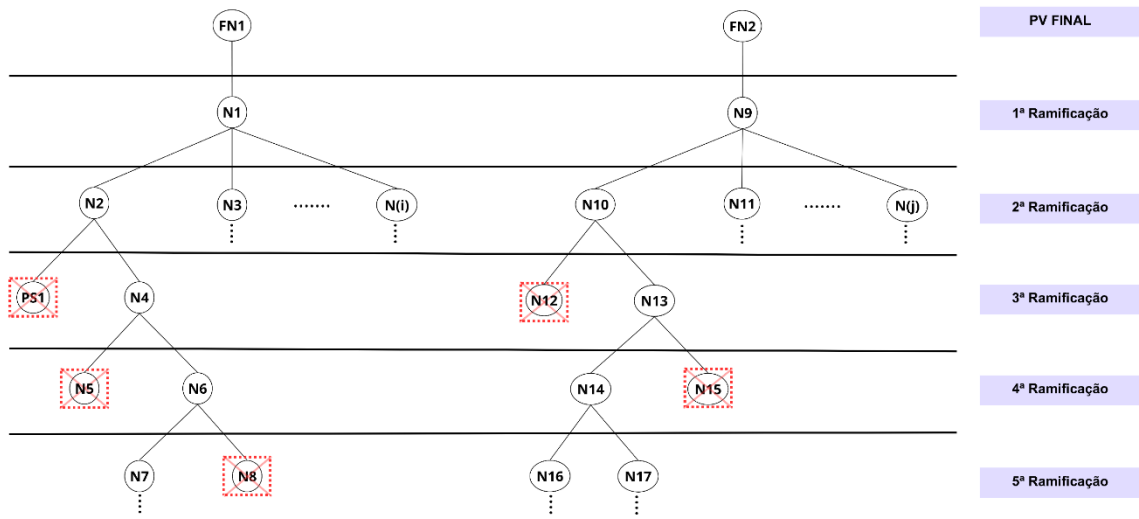
A execução combinada das Árvores 2 e 3 representa a etapa final de geração automática e otimização do traçado da rede coletora, consolidando um sistema hidráulica e topograficamente coerente. Após esta etapa, a rotina computacional gera um arquivo de saída, no formato DXF, com o desenho do traçado atualizado. No arquivo estão presentes informações sobre o posicionamento das tubulações, do sentido do fluxo em cada trecho, bem como, da cota de terreno em cada extremidade do trecho.

3.2 Busca com múltiplos PVs finais e divisão em sub-bacias

Em redes coletoras de esgoto que apresentam múltiplos pontos finais (PVs finais), a rotina computacional realiza o processamento das árvores de busca de maneira independente para cada PV final identificado, obedecendo aos mesmos princípios e restrições aplicadas, como mostra a ilustração apresentada na Figura 38. A identificação das sub-bacias é de extrema importância, pois permite determinar quais porções da rede conduzem o esgoto a cada ponto final específico, facilitando a análise hidráulica, o dimensionamento das tubulações e o planejamento operacional do sistema. Além disso, o reconhecimento das sub-bacias possibilita uma avaliação mais precisa das vazões afluentes a cada PV final, garantindo que o traçado da rede respeite as condições topográficas e hidráulicas locais.

Na situação de múltiplos PVs finais, após a resolução dos nós terminais pela Árvore 1, podem existir conexões diretas entre os trechos de diferentes sub-bacias. Porém, esta problemática é resolvida a partir do momento em que as Árvores 2 e 3 atuam no sentido de definir quais caminhos deverão originar os trechos pontas secas, efetuando automaticamente a divisão em sub-bacias.

Figura 38 – Execução das árvores para múltiplos PVs Finais.



Fonte: Autor (2026)

Após a execução das árvores para todos os PVs finais, o algoritmo executa uma rotina de identificação das sub-bacias, que associa a cada trecho da rede um índice correspondente ao PV final ao qual ele está conectado. O processo consiste em percorrer todos os trechos que possuem como nó final um PV final e propagar seu identificador a montante. Como resultado, cada trecho da rede passa a carregar um atributo indicando a qual área de contribuição ele pertence.

Além da atribuição dos índices de sub-bacias, o algoritmo também gera uma representação gráfica, que é exportada no arquivo de saída em formato DXF, permitindo a visualização das sub-bacias no ambiente CAD. Cada sub-bacia é destacada do arquivo DXF com uma cor diferenciada, possibilitando ao projetista identificar facilmente as áreas de contribuição associadas a cada PV final. Essa funcionalidade é de grande importância para análises hidráulicas e para o planejamento da operação e manutenção do sistema, especialmente em redes extensas e complexas com múltiplos pontos de lançamento.

3.3 Caracterização dos estudos de caso.

Para validar a aplicabilidade e a eficiência do algoritmo proposto, foram selecionados três estudos de caso envolvendo redes coletoras de esgoto com diferentes características topográficas, dimensões e níveis de complexidade. Os estudos abrangem cenários de pequeno, médio e grande porte, contemplando desde áreas urbanas compactas até redes extensas com múltiplas sub-bacias.

A avaliação do modelo de otimização proposto será conduzida a partir de três estudos de caso distintos, concebidos de forma a analisar, de maneira progressiva, o desempenho da metodologia sob diferentes perspectivas. No primeiro e no segundo estudos de caso, será realizada uma análise comparativa entre o traçado original das redes coletoras e as soluções obtidas por meio do modelo de otimização desenvolvido. Especificamente no segundo estudo de caso, essa comparação será ampliada para incluir a avaliação dos resultados do dimensionamento hidráulico e de uma estimativa de custo com escavação e tubulações associados a cada solução, permitindo analisar diferenças nos diâmetros das tubulações e, conseqüentemente, seus reflexos diretos nos custos de implantação da rede. No terceiro estudo de caso, a metodologia apresentada nesse trabalho será confrontada diretamente com o modelo apresentado por Rodrigues *et al.* (2019), sendo ambas aplicadas a uma mesma rede real, de modo a avaliar a capacidade de adaptação de cada abordagem frente às condições topográficas, hidráulicas e computacionais do problema.

3.3.1 Estudo de caso 1: Bairro Alto da Expectativa

O bairro Alto da Expectativa, localizado no município de Sobral, foi adotado como o primeiro estudo de caso para a aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho. Sobral possui aproximadamente 203 mil habitantes, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022), e configura-se como o quinto maior município do estado do Ceará, exercendo papel relevante como polo econômico, educacional e tecnológico no interior nordestino. Esse contexto tem favorecido a expansão da malha urbana em áreas periféricas, especialmente em regiões que já dispõem de infraestrutura básica e acessibilidade, como ocorre no bairro analisado.

O Alto da Expectativa encontra-se inserido em uma área de expansão urbana, marcada pelo crescimento demográfico progressivo e pela implantação recente de empreendimentos habitacionais. A proximidade com o centro administrativo da cidade confere ao bairro importância estratégica no processo de planejamento urbano de Sobral, sobretudo no que se refere à ampliação dos sistemas de infraestrutura. A Figura 39 apresenta a delimitação da área de estudo e sua relação espacial com o tecido urbano adjacente.

Figura 39 – Apresentação do estudo de caso 1 – Alto da Expectativa.



Fonte: Autor (2026)

A análise topográfica da rede coletora revela um relevo predominantemente plano, embora com leves variações altimétricas ao longo de sua extensão. O ponto de maior cota localiza-se a 79,34 metros, enquanto o ponto mais baixo atinge 66,76 metros, resultando em um desnível de 12,50 metros em linha reta entre as extremidades. Essa diferença, embora modesta, influencia a concepção da rede coletora ao exigir um traçado que garanta o escoamento gravitacional contínuo. O perfil topográfico apresentado na Figura 40 ilustra a distribuição das cotas ao longo das extremidades da rede do bairro.

Figura 40 – Perfil topográfico para o bairro Alto da Expectativa.



Fonte: Autor (2026)

O projeto original da rede coletora de esgoto do bairro, ilustrado na Figura 41, apresenta um total de 93 trechos e 71 poços de visita (PVs), distribuídos de forma a atender toda a área urbana prevista, podendo ser considerada de pequeno porte em comparação com os demais estudos de caso deste trabalho. Destaca-se que a rede foi concebida com uma única sub-bacia de esgotamento, convergindo para um PV final localizado no ponto de menor cota, o que facilita o direcionamento dos efluentes ao sistema de tratamento.

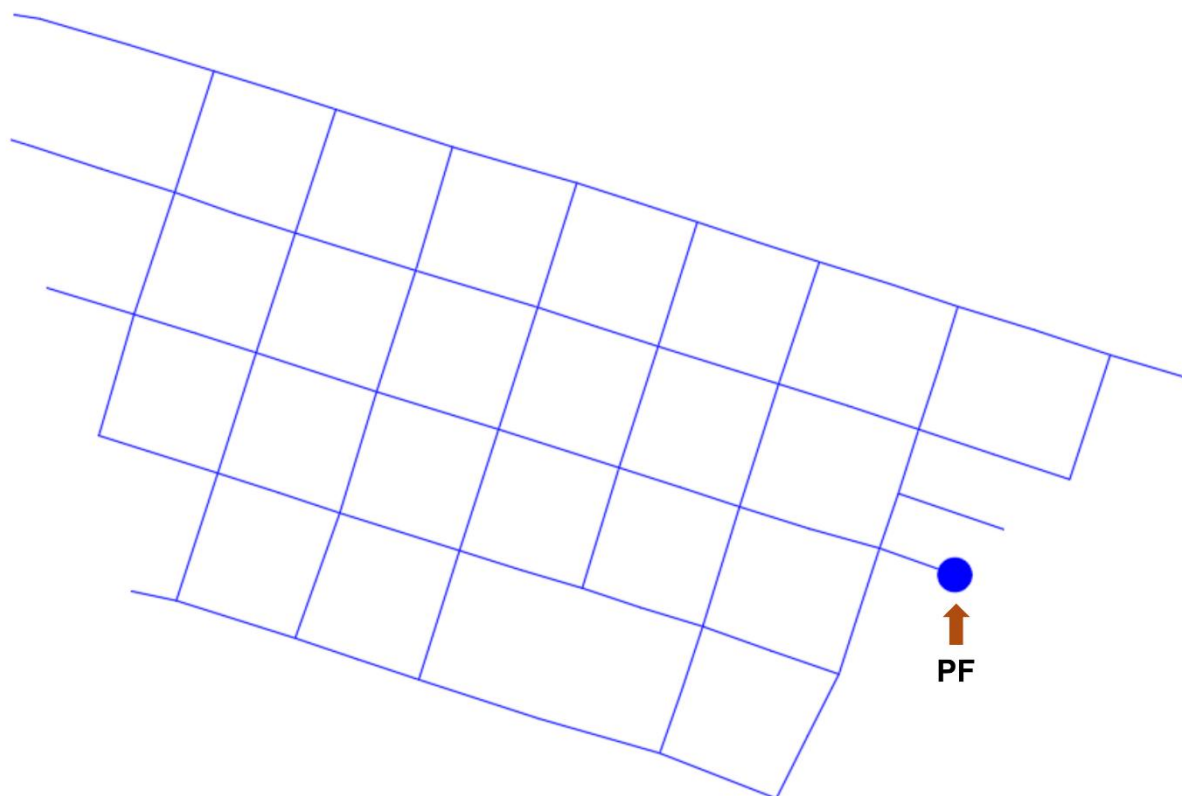
Figura 41 – Rede coletora de esgoto para o bairro Alto da Expectativa.



Fonte: Autor (2026)

A partir do traçado e do dimensionamento originais, foi construído o grafo base utilizado como entrada para o modelo computacional proposto. Esse grafo foi obtido pela junção de todos os trechos possíveis, formando uma malha completa que preserva as características topológicas do sistema real. Como ilustrado na Figura 42, o grafo base contém arestas, correspondentes aos trechos da rede, e vértices definidos pelas coordenadas geográficas dos PVs. Também é possível observar a marcação do PV final (PF).

Figura 42 – Modelo de grafo base proposto para o bairro Alto da Expectativa.



Fonte: Autor (2026)

Buscando avaliar a solução obtida por meio do modelo computacional proposto neste trabalho, o traçado gerado será comparado diretamente ao traçado originalmente concebido no projeto da rede coletora do bairro Alto da Expectativa. Essa análise comparativa permitirá verificar a capacidade da metodologia em reproduzir, de forma automática o traçado, bem como identificar eventuais diferenças na configuração dos trechos, na distribuição dos poços de visita e no direcionamento do escoamento.

3.3.2 Estudo de caso 2: Bairro Belchior

O bairro Belchior, segundo estudo de caso abordado nesse trabalho, também se localiza na Cidade de Sobral, no Estado do Ceará. Como pode ser visualizado na Figura 43, o bairro Belchior integra uma área urbana consolidada, mas com setores ainda em expansão. A região abriga diversos empreendimentos residenciais e comerciais, além de infraestrutura pública em constante aprimoramento, sendo considerada uma das áreas com maior potencial de crescimento populacional de Sobral.

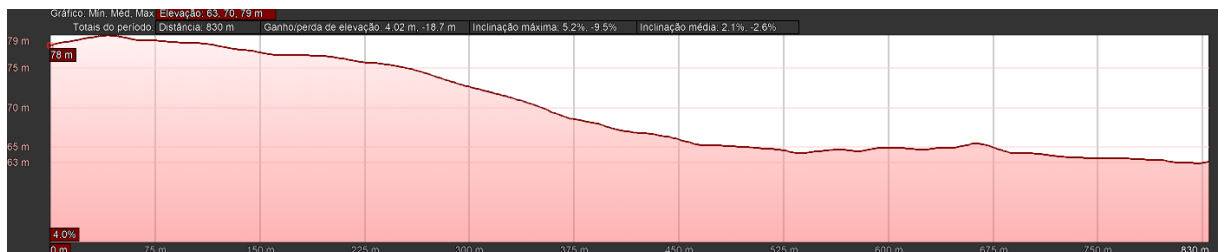
Figura 43 – Apresentação do estudo de caso 2 – Bairro Belchior



Fonte: Autor (2026)

A análise topográfica da área revela a presença de declividades mais acentuadas em comparação ao bairro Alto da Expectativa. O ponto mais elevado da área atinge uma cota de 68 metros, enquanto o ponto mais baixo encontra-se a 50,05 metros, resultando em um desnível de aproximadamente 17,05 metros. Essa variação altimétrica pode ser observada no perfil topográfico apresentado na Figura 44, que destaca os desafios potenciais para o escoamento por gravidade no traçado da rede coletora.

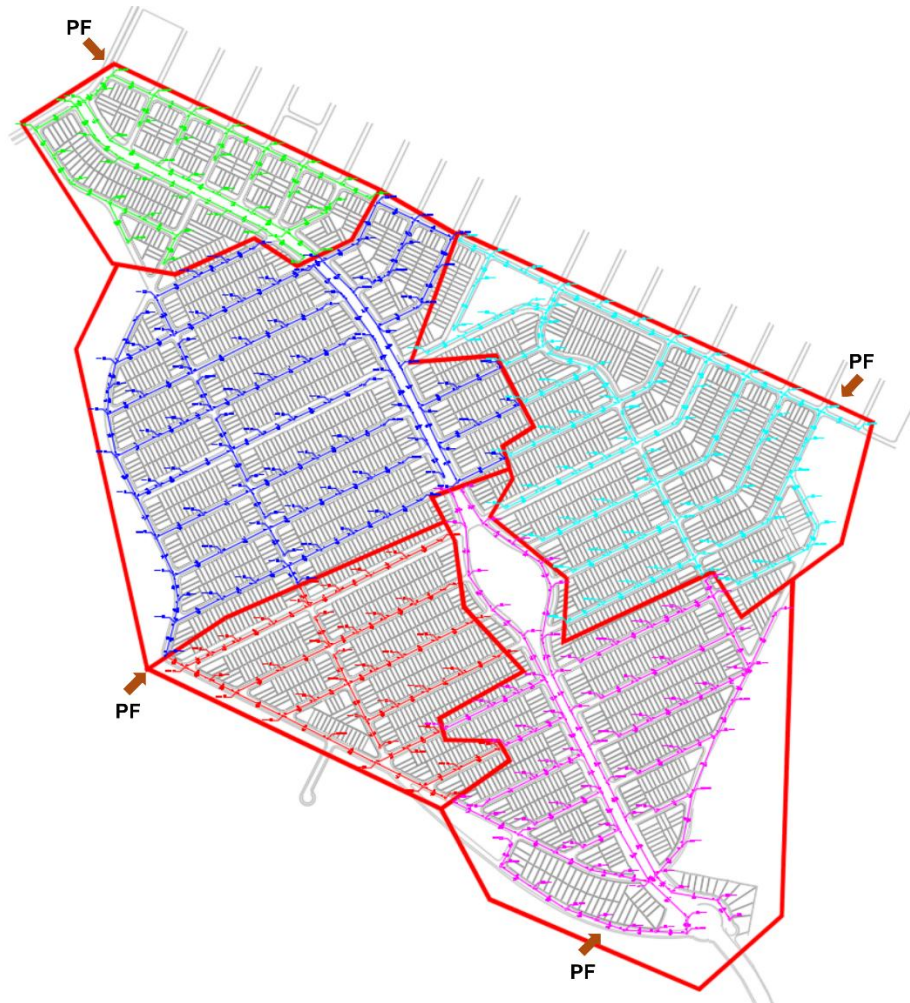
Figura 44 – Perfil topográfico para o bairro Belchior



Fonte: Autor (2026)

O projeto da rede coletora de esgoto para o bairro Belchior é consideravelmente mais complexo do que o do bairro Alto da Expectativa. Como ilustrado na Figura 45, a rede é composta por 304 trechos e 264 poços de visita (PVs), distribuídos em uma malha subdividida em cinco sub-bacias.

Figura 45 – Rede coletora de esgoto para o bairro Belchior

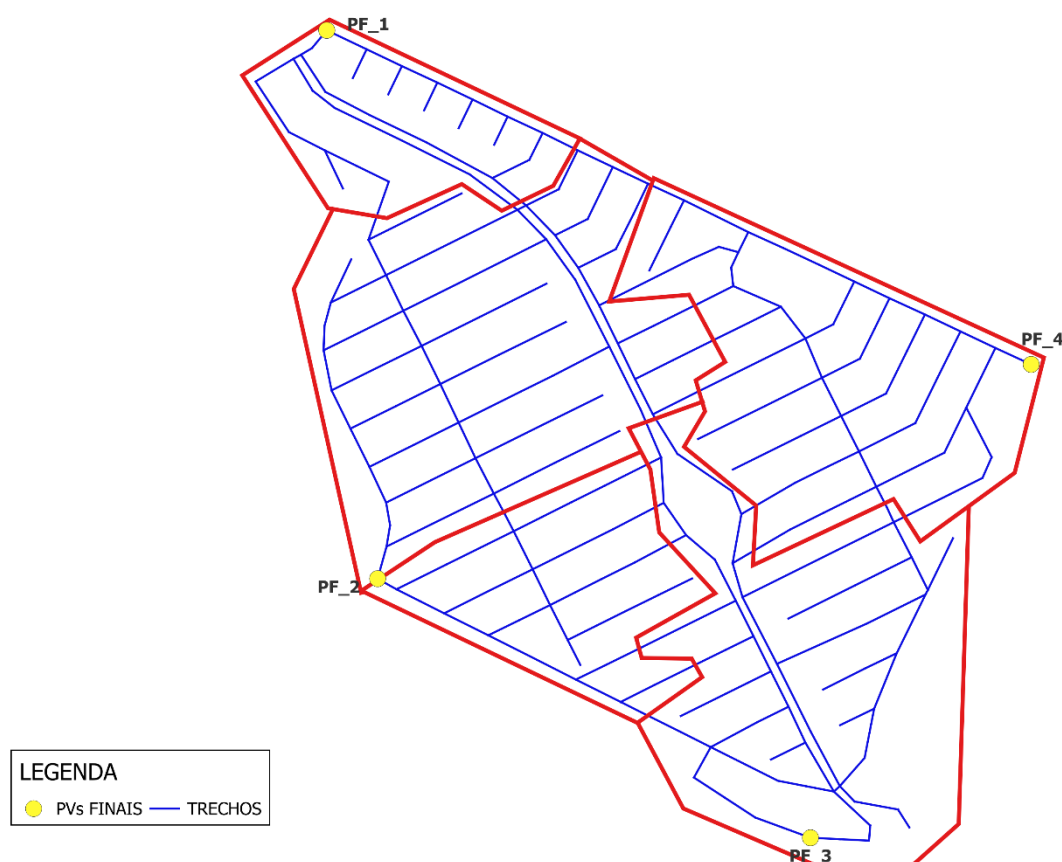


Fonte: Autor (2026)

Assim como na rede proposta para o bairro Alto da Expectativa, a partir do traçado original da rede dimensionada, foi gerado o grafo base para a aplicação do modelo computacional proposto neste trabalho. A Figura 46 apresenta a malha formada pela união de todos os trechos possíveis, respeitando a estrutura original da rede. Este grafo base é composto por 304 arestas e seus vértices correspondentes às coordenadas dos PVs. Além disso, foram caracterizados os pontos de PVs finais das cinco sub-bacias, os quais estão marcados com um círculo azul na Figura 46.

É importante destacar que, durante a construção do grafo, optou-se por não segmentar previamente os trechos de cada sub-bacia, permitindo a interconexão entre PVs e trechos pertencentes a diferentes áreas de contribuição. Essa abordagem foi proposital e adiciona complexidade ao modelo, uma vez que cabe ao algoritmo identificar, ao longo do processamento, os limites naturais entre as sub-bacias e definir quais trechos devem ser mantidos ou afastados para garantir um traçado otimizado e hidraulicamente eficiente.

Figura 46 – Modelo de grafo base proposto para o bairro Belchior



Fonte: Autor (2026)

Com o objetivo de avaliar de forma mais aprofundada os impactos da metodologia proposta, o segundo estudo de caso foi estruturado a partir de uma comparação sistemática entre o traçado original da rede coletora do bairro Belchior e o traçado obtido por meio do modelo computacional desenvolvido neste trabalho. Diferentemente do primeiro estudo de caso, a análise não se restringe apenas aos aspectos topológicos do traçado, mas incorpora também o processo completo de dimensionamento hidráulico para ambas as soluções. Para tanto, os dois traçados foram submetidos aos mesmos critérios e parâmetros de projeto, conforme apresentados na Tabela 5, assegurando condições equivalentes de comparação. O

dimensionamento hidráulico das redes foi realizado por meio de planilhas eletrônicas, nas quais foram aplicados os critérios normativos e hidráulicos adotados, enquanto o detalhamento técnico dos resultados, incluindo a representação dos trechos, poços de visita e respectivas características geométricas, foi elaborado com o auxílio do software AutoCAD.

Tabela 5 – Critério adotados para o dimensionamento hidráulico do bairro Belchior.

Sub-bacia	Vazão início (l/s)	Vazão fim (l/s)	n de Manning	Diâm. mín. (mm)	Rec. mín. (m)	Tx. Infil. (L/s.km)
Sub-bacia 1	2,281	2,738	0,013	150	0,9	1
Sub-bacia 2	9,719	11,663	0,013	150	0,9	1
Sub-bacia 3	4,021	4,825	0,013	150	0,9	1
Sub-bacia 4	5,719	6,863	0,013	150	0,9	1
Sub-bacia 5	6,823	8,188	0,013	150	0,9	1

Fonte: Autor (2026)

Com a finalidade de avaliar os impactos econômicos do traçado gerado pelo modelo proposto, em comparação com o projeto original, incorporou-se à análise do estudo de caso uma estimativa de custos associada à implantação da rede coletora de esgoto no bairro Belchior. A estimativa orçamentária foi elaborada com base na Tabela SEINFRA (Secretaria de Infraestrutura do Ceará) 028 – Insumos e Composições, adotando-se os mesmos códigos, composições e custos unitários para ambos os cenários de traçado analisados.

Para o cálculo dos volumes de escavação, adotou-se uma largura de vala constante igual a 0,75 m para todos os trechos da rede, independentemente do diâmetro da tubulação. Esse valor foi definido com base nas recomendações da ABNT NBR 17015:2023, tomando como referência os parâmetros usuais de escavação para implantação de redes coletoras de esgoto. As profundidades das valas foram determinadas a partir das informações obtidas com o dimensionamento hidráulico da rede para o traçado otimizado e o traçado original.

Os quantitativos de escavação foram segregados conforme as faixas de profundidade previstas nas composições da SEINFRA, distinguindo-se os volumes até 2,00 m e aqueles compreendidos entre 2,01 m e 4,00 m. Para o item de serviços relacionado ao assentamento das tubulações, os comprimentos foram contabilizados por diâmetro nominal, permitindo a aplicação direta das composições específicas para cada classe de tubo em PVC rígido com junta elástica.

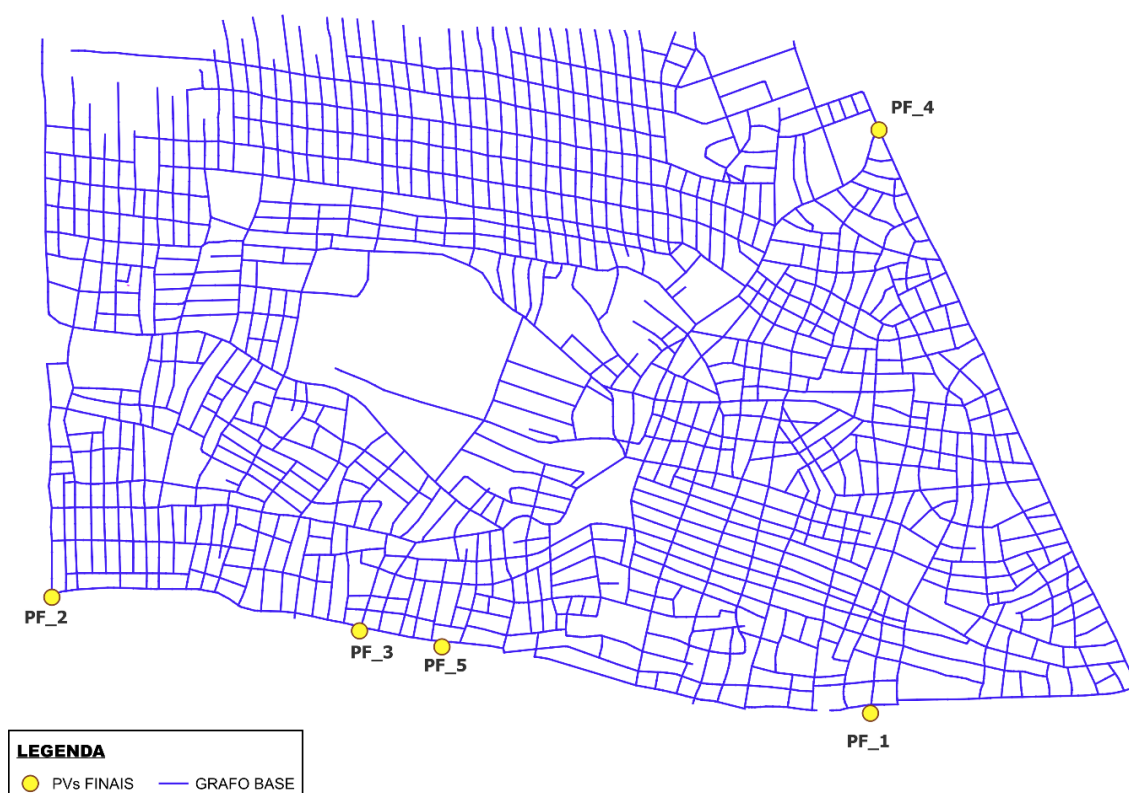
Em relação ao levantamento do quantitativo de tubulações, considerou-se exclusivamente os tubos necessários à implantação da rede coletora, conforme os quantitativos

resultantes de cada traçado dimensionado. Não foram incluídos custos adicionais associados a poços de visita, ligações prediais ou obras complementares, uma vez que o objetivo da análise foi comparar exclusivamente os impactos do traçado sobre o custo com escavações e diâmetros de tubulações.

3.3.3 Estudo de caso 3: Cidade de Villa Hermosa (República Dominicana)

O terceiro estudo de caso envolve uma rede coletora de esgoto real, localizada no município de Villa Hermosa, na República Dominicana, cujo grafo base gerado é apresentado na Figura 47. A rede apresenta uma malha urbana extensa e densa, atravessando regiões com variações altimétricas expressivas, onde se observa cotas próximas a 80 m nos setores mais elevados e valores em torno de 67 m nas áreas mais baixas, condição que impõe restrições relevantes ao direcionamento do escoamento por gravidade e à definição coerente dos sentidos de fluxo ao longo da rede.

Figura 47 – Apresentação do estudo de caso 3 – Cidade de Villa Hermosa.



Fonte: Autor (2026)

A representação da rede foi construída a partir da base planialtimétrica do terreno e do sistema viário existente, sendo modelada como um grafo direcionado composto por 3.157 arestas e 2.206 vértices. Na configuração original, identificam-se 129 nós terminais, o que evidencia a elevada complexidade topológica da rede e a presença de múltiplas discontinuidades no sentido natural do escoamento. A rede possui cinco poços de visita finais previamente definidos como pontos finais da rede, cuja localização estabelece, do ponto de vista conceitual, a expectativa de formação de cinco sub-bacias de contribuição após a reorganização do traçado.

A metodologia adotada neste estudo de caso possui caráter comparativo, fundamentando-se na execução da mesma rede em dois modelos distintos, sendo estes o proposto por Rodrigues *et al.* (2019) e o modelo desenvolvido neste trabalho. A partir dessa dupla aplicação, procede-se à avaliação comparativa dos traçados gerados, considerando-se aspectos como a reorganização dos sentidos de escoamento, a definição das sub-bacias associadas aos pontos finais e as coerências topológica, hidráulica e altimétrica das soluções obtidas, de modo a evidenciar as diferenças conceituais e operacionais entre as abordagens analisadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção tem como objetivo apresentar e analisar os resultados obtidos a partir da aplicação do algoritmo proposto nos três estudos de caso selecionados. Como descrito na metodologia, o algoritmo foi desenvolvido para realizar a geração automática do traçado de redes coletoras de esgoto, empregando estratégias de busca em largura para otimizar o sistema em termos hidráulicos e econômicos.

Inicialmente, serão detalhados os traçados otimizados gerados para cada estudo de caso, com destaque para as alterações promovidas pelo algoritmo em relação aos projetos originais. Aspectos como a definição automática de sub-bacias, a resolução de nós terminais e a identificação de trechos ponta seca serão discutidos, evidenciando a capacidade do método de lidar com redes de diferentes portes e níveis de complexidade topológica.

Na sequência, será realizada uma análise dos ganhos proporcionados pela metodologia em termos de eficiência econômica e redução de custos potenciais, considerando fatores como número de trechos invertidos e distribuição dos pontos finais (PVs finais) nas áreas analisadas. Também será discutido o tempo computacional necessário para o processamento de cada rede, onde será discutido a aplicabilidade do modelo proposto nesse trabalho como ferramenta de apoio a projetos de saneamento cenários reais. Além disso, para o estudo de caso 2 será discutido o dimensionamento hidráulico trazido pela solução do modelo proposto nesse trabalho, bem como, pela solução original de projeto.

Ao final, o estudo de caso 3 abordará as soluções geradas pelo modelo de Rodrigues *et al.* (2019) e pelo modelo proposto nesse trabalho, com o objetivo de avaliar qual a solução conseguiu convergir para uma solução factível.

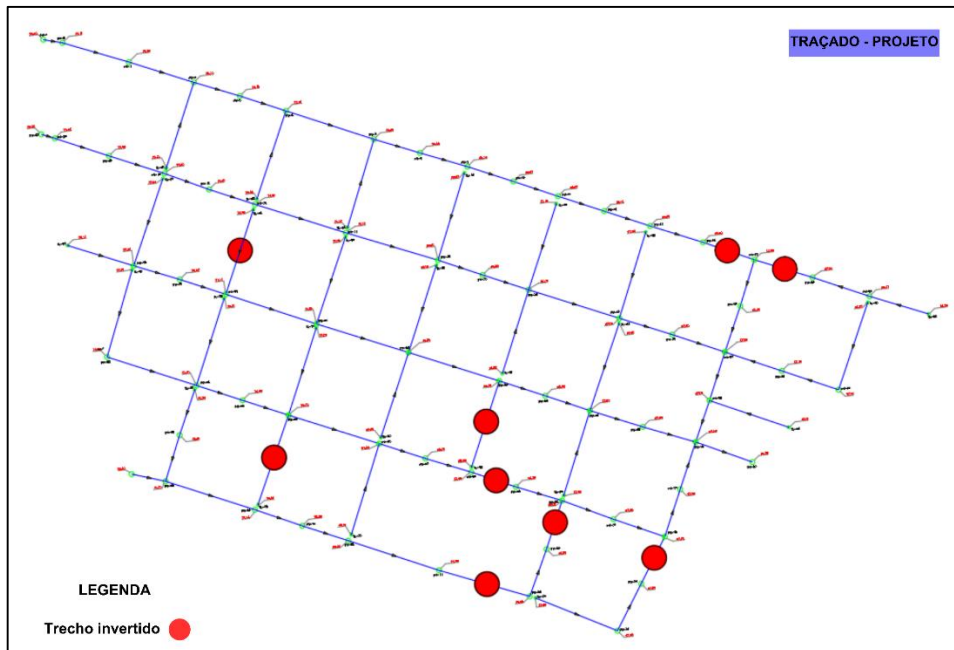
4.1 Aplicação do modelo no estudo de caso 1: rede do bairro Alto da Expectativa

A análise comparativa entre o traçado original do projeto e a configuração gerada pelo modelo para o bairro Alto da Expectativa evidencia avanços na otimização da rede coletora, uma vez que o número de trechos com fluxo contrário ao declive natural (trechos invertidos) foi sensivelmente reduzido no traçado otimizado. No projeto original, apresentado na Figura 48, observa-se a presença de nove trechos invertidos distribuídos principalmente nos setores mais baixo da rede, em relativa proximidade ao PV Final.

Em contraste, no traçado otimizado pelo modelo (Figura 49), a quantidade de trechos invertidos foi reduzida para seis, representando uma diminuição de 33% em relação ao

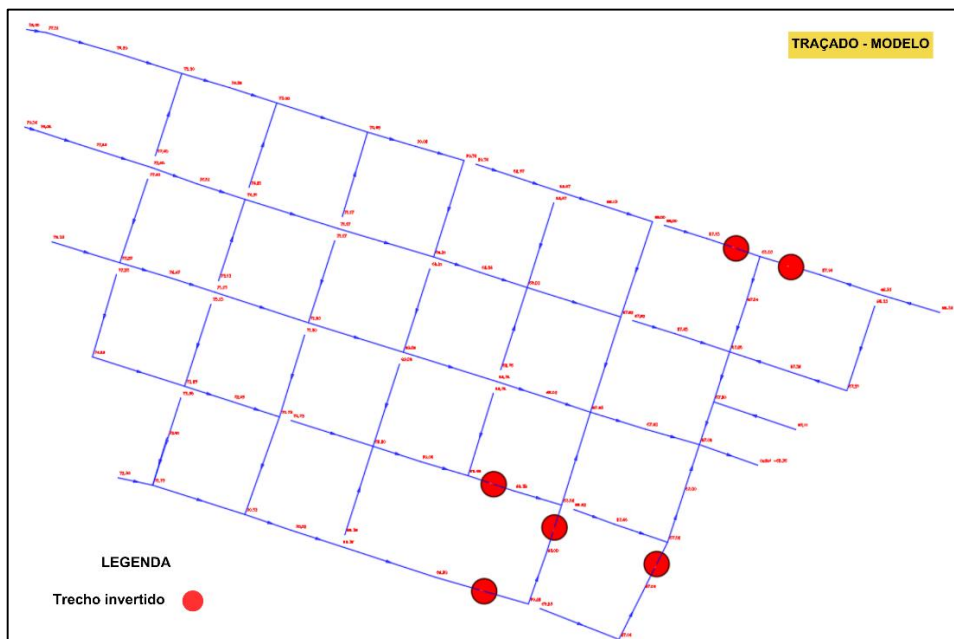
projeto original. Ao identificar caminhos que obrigariam o escoamento a vencer desníveis contrários ao relevo natural, o modelo optou por redirecionar os fluxos para alternativas mais próximas e compatíveis com a topografia, muitas vezes por meio da criação de pontas secas em trechos críticos.

Figura 48 – Traçado original proposto para o bairro Alto da Expectativa.



Fonte: Autor (2026)

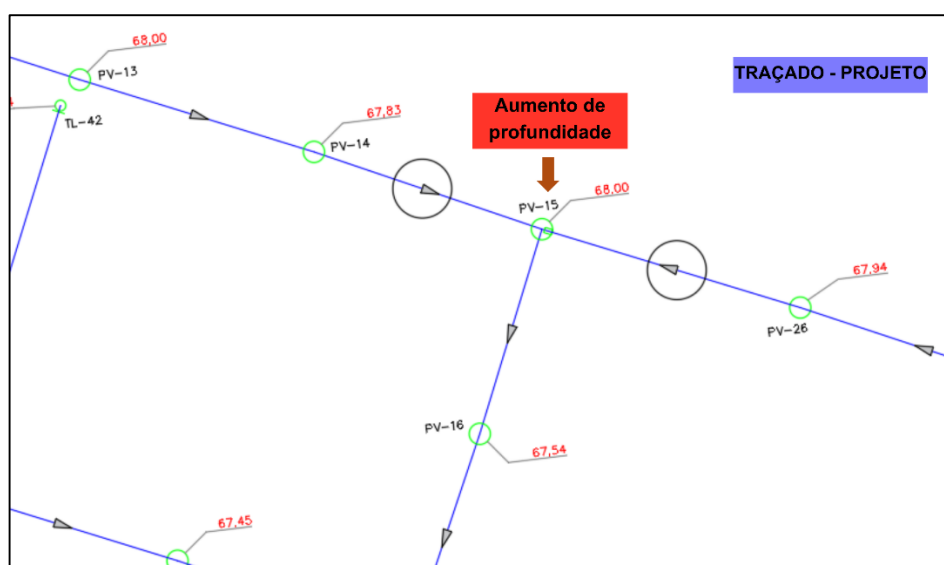
Figura 49 – Traçado gerado pelo modelo de otimização para o bairro Alto da Expectativa.



Fonte: Autor (2026)

Um exemplo da abordagem de otimização feita pelo modelo está na região do entorno do PV 15, como pode ser observado na Figura 50. No projeto original da rede do bairro Alto da Expectativa, o PV 15 se destaca como um ponto crítico do sistema. Localizado no caminho de um dos coletores de maior extensão da rede, ele recebe não apenas o fluxo acumulado de diversos setores a montante, mas também a chegada de dois trechos com fluxo contrário ao declive natural. Essa configuração tende a proporcionar um aumento considerável no volume de escoamento direcionado para os trechos a jusante, o que pode resultar na necessidade de aumentos de diâmetros nos trechos. Como resultado, torna-se necessário prever profundidades de escavação mais expressivas para atender à declividade mínima construtiva, impactando diretamente os custos de implantação e a complexidade de execução da rede.

Figura 50 – Análise do PV15 no traçado do projeto original.



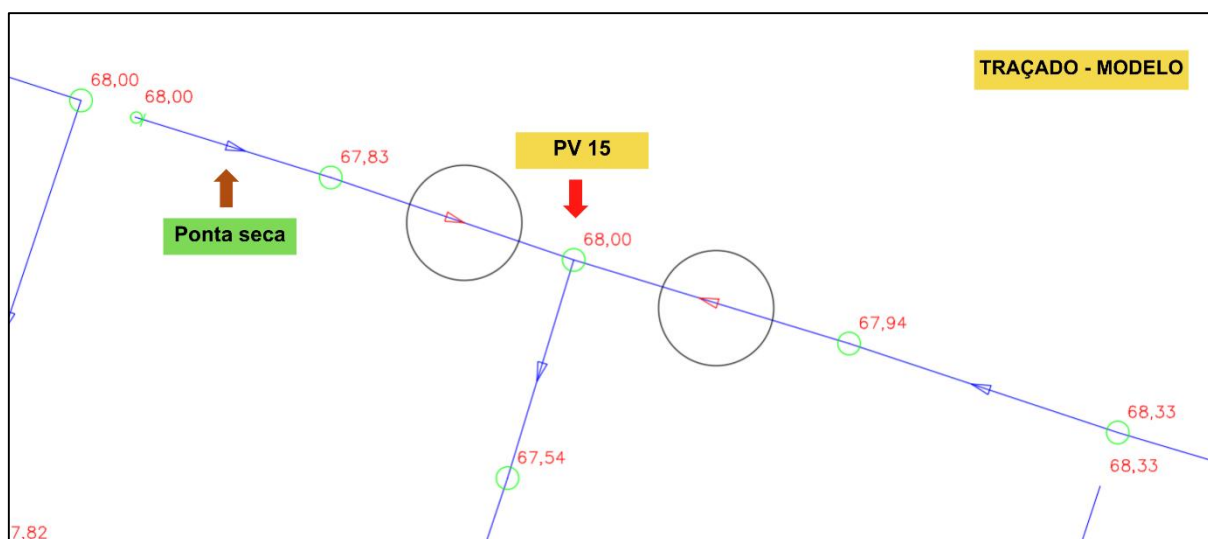
Fonte: Autor (2026)

Em contraste, como pode ser observado na Figura 51, o traçado otimizado proposto pelo modelo apresenta uma solução mais racional e tecnicamente eficiente. Embora o traçado otimizado não tenha conseguido obter uma solução que elimine a condição de inversão dos trechos que chegam ao PV 15, ao reconhecer essa condição crítica e o potencial acúmulo de vazões nos trechos invertidos, o algoritmo antecipou os impactos dessa configuração e optou por buscar alternativas de caminhos mais viáveis que minimizassem o efeito do acúmulo de fluxo nos trechos invertido. Para isso, promoveu a descontinuidade de fluxo no caminho que antes chegava ao PV 15, transformando um trecho próximo no seu entorno em ponta seca. Dessa forma, cria-se uma saída, topograficamente mais equilibrada, para parte das contribuições provenientes de setores mais distantes da rede. Essa decisão não apenas tende a

reduzir o volume de escoamento nos trechos invertidos, mas também possibilita um traçado com menor profundidade média de valas e diâmetros de tubulação mais compatíveis com as vazões locais.

Essa estratégia evidencia o potencial do modelo de considerar, de forma integrada, os aspectos topográficos e hidráulicos do sistema para propor soluções mais econômicas e eficientes. Ao evitar o acúmulo desnecessário de vazões em setores críticos e redistribuir o fluxo de maneira mais homogênea, o traçado otimizado promove um equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade construtiva, com ganhos operacionais e redução custo associados a trechos profundos.

Figura 51 – Modificação feita pelo modelo, no caminho de chegada ao PV 15.

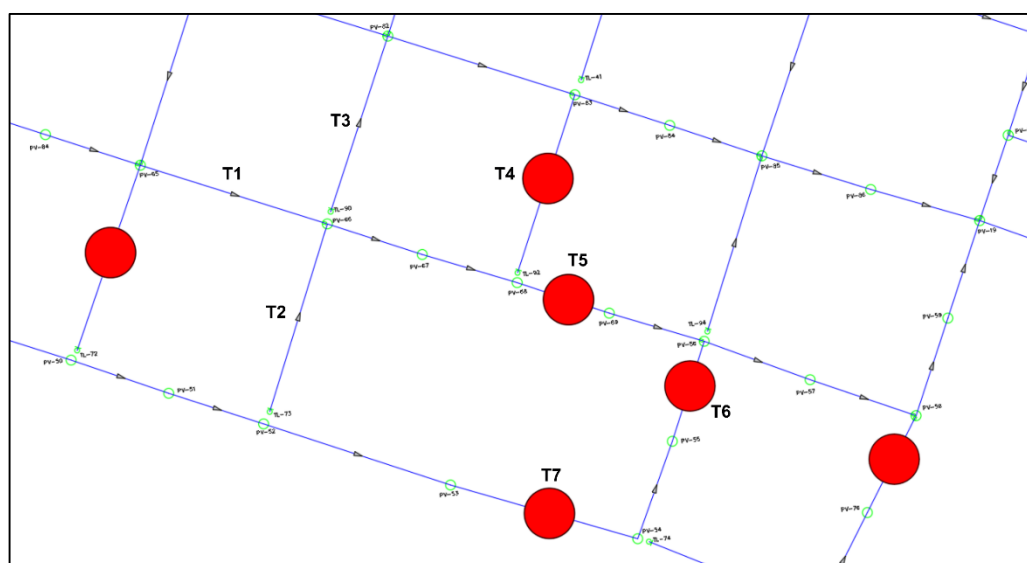


Fonte: Autor (2026)

Na análise na Figura 52, apresenta-se o setor composto pelos trechos T5, T6 e T7, onde observa-se uma situação recorrente tanto no traçado original, quanto no otimizado: a presença de trechos invertidos que, em função da topografia local, foram necessários para garantir a continuidade hidráulica da rede. Contudo, a solução apresentada pelo modelo para os demais trechos do setor revela uma abordagem mais estratégica e alinhada com a otimização do sistema.

No projeto original, o trecho T1 permanecia conectado ao restante da rede, ligado diretamente aos trechos T5, T6 e T7. Essa configuração tende a resultar um acúmulo de fluxo nos segmentos invertidos, potencializando a necessidade de maiores diâmetros e profundidades de escavação, sobretudo na região de maior concentração de cotas mais baixas.

Figura 52 – Traçado original contendo os trechos T5, T6 e T7.

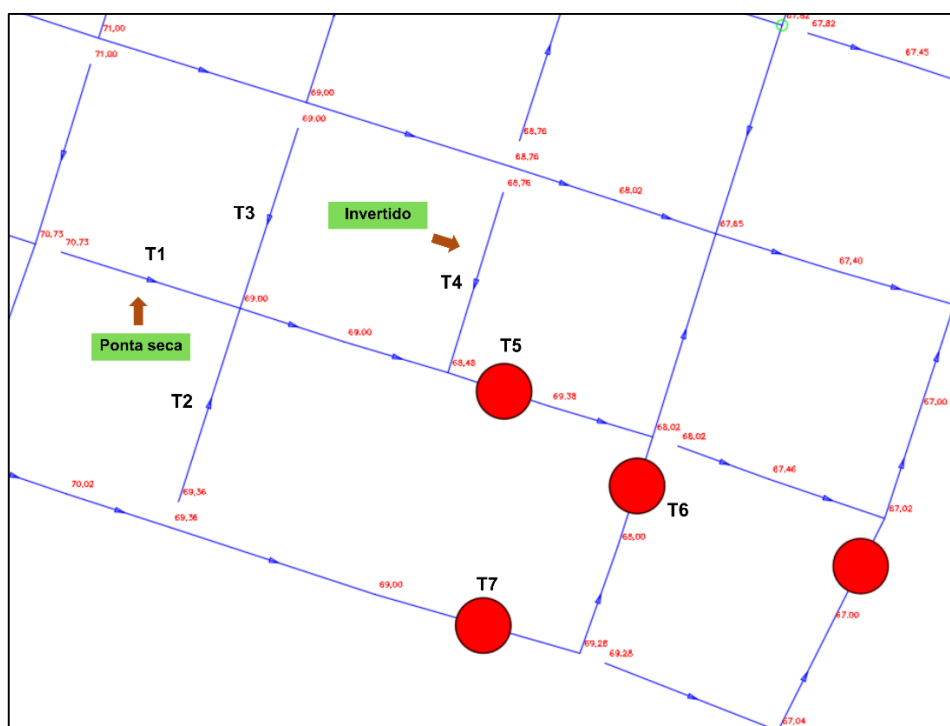


Fonte: Autor (2026)

Em contrapartida, como pode ser observado na Figura 53, o modelo identificou a criticidade desse cenário e optou por transformar o trecho T1 em ponta seca. Essa decisão contribuiu para aliviar o volume de esgoto que atingiria os trechos invertidos, reduzindo a sobrecarga hidráulica e, por consequência, minimizando a demanda por grandes escavações e diâmetros ampliados.

Além disso, o modelo solucionou uma inconsistência observada no trecho T4, que originalmente operava com fluxo contrário à declividade natural do terreno. No traçado otimizado, T4 passou a funcionar a favor da topografia. Essa alteração pontual, somada à transformação do T1 em ponta seca, reforça a lógica adotada pelo modelo de reduzir trajetórias com declividades desfavoráveis e redistribuir o escoamento de maneira mais eficiente ao longo da rede.

Figura 53 – Traçado otimizado contendo os trechos T5, T6 e T7.



Fonte: Autor (2026)

No processamento do estudo de caso referente ao bairro Alto da Expectativa, o algoritmo evidenciou sua capacidade de lidar de maneira eficiente com a rede coletora de esgoto proposta. O grafo base deste estudo apresentou seis nós terminais, cuja resolução foi realizada pela Árvore 1, além de 19 nós com múltiplas saídas que foram tratados pelas Árvores 2 e 3. Essas etapas exigiram que o algoritmo percorresse diferentes ramificações da rede para assegurar a correção das discontinuidades de fluxo e a eliminação de redundâncias hidráulicas, promovendo a organização dos caminhos de escoamento segundo critérios técnicos de otimização. Mesmo com essas operações, o tempo total de processamento foi de apenas 3 segundos, mostrando a aplicabilidade do modelo a redes reais.

4.2 Aplicação do modelo no estudo de caso 2: rede do bairro Belchior

A análise do traçado da rede coletora no bairro Belchior revela transformações significativas entre o projeto original e a solução gerada pelo modelo de otimização, principalmente no que diz respeito à reorganização das sub-bacias de esgotamento. As Figuras 54 e 55 permitem observar que o algoritmo promoveu alterações estratégicas para reduzir o número de trechos com fluxo contrário ao declive natural do terreno, priorizando uma configuração mais eficiente sob o ponto de vista hidráulico e econômico.

Um dos pontos de maior destaque é a unificação das sub-bacias B e C em uma única unidade. No traçado original (Figura 54), essas duas sub-bacias somavam quinze trechos invertidos, resultado da complexidade topográfica local. Como pode ser observado na Figura 55, o modelo, ao identificar essa concentração de inversões, optou por redefinir os limites e tratar as duas áreas como uma única sub-bacia, o que permitiu uma significativa redução do número de trechos invertidos para oito.

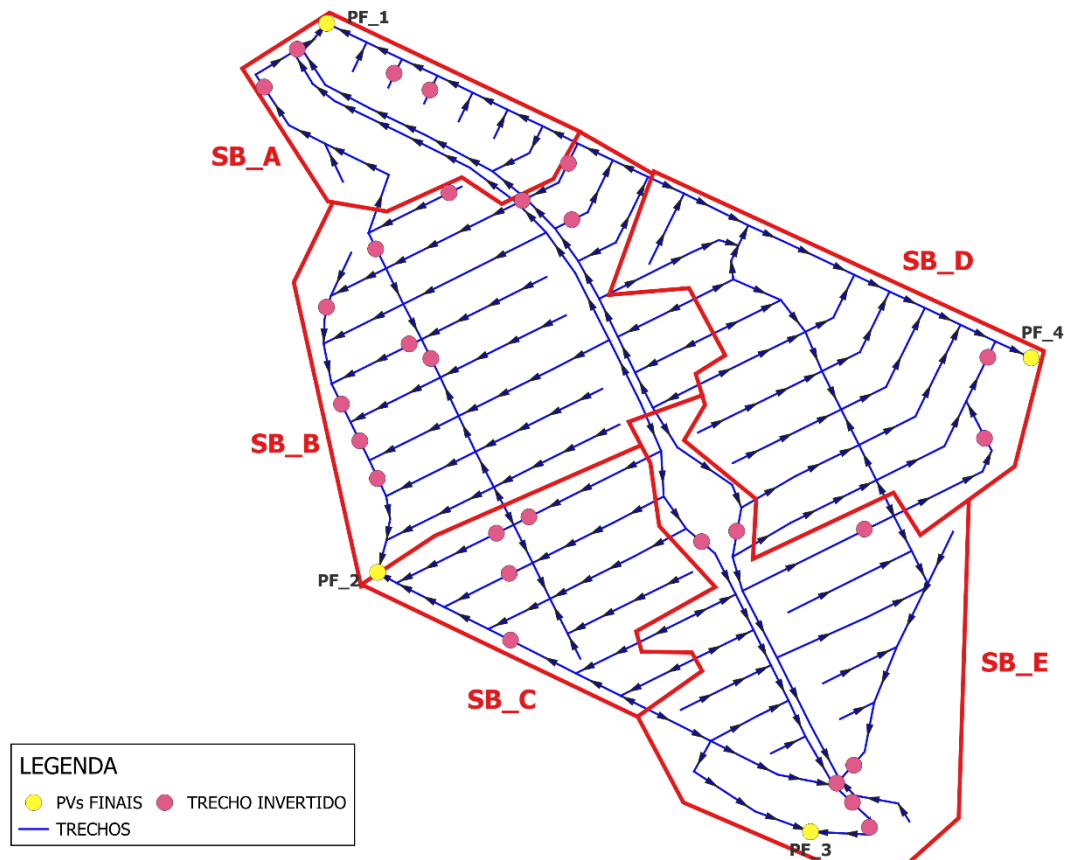
Além disso, para resolver problemas relacionados aos trechos invertidos na sub-bacia B, o modelo expandiu o domínio da sub-bacia A sobre áreas originalmente pertencentes às sub-bacias B e D. Essa redistribuição também contribuiu para a redução no número de trechos invertidos da antiga sub-bacia B, ainda que tenha provocado um leve aumento no número de inversões na sub-bacia A, que passou de quatro para cinco trechos com sentido de fluxo contrário à topografia. Essa compensação pontual é justificada pela lógica do modelo, que priorizou o alívio hidráulico em setores mais críticos, onde o acúmulo de vazões e as condições topográficas adversas poderiam resultar em custos construtivos mais elevados.

Um aspecto central que explica essas modificações é a estratégia do algoritmo de sempre buscar os caminhos mais curtos entre os nós da rede e os PVs finais das sub-bacias. Essa abordagem visa minimizar o comprimento total das tubulações e reduzir a concentração de grandes vazões em pontos específicos da rede, sobretudo em setores com declividades desfavoráveis. Ao distribuir os fluxos de maneira mais uniforme e direcioná-los para os PVs finais mais próximos, o modelo evita sobrecargas hidráulicas, o que resulta em menores profundidades de escavação e menores custos com tubulações de grandes diâmetros.

A sub-bacia D, por sua vez, apresentou poucas alterações entre os dois traçados. Em ambas as configurações, o número de trechos invertidos manteve-se o mesmo, mostrando que para essa sub-bacia, os traçados do modelo de otimização e o traçado original convergiram para uma mesma solução.

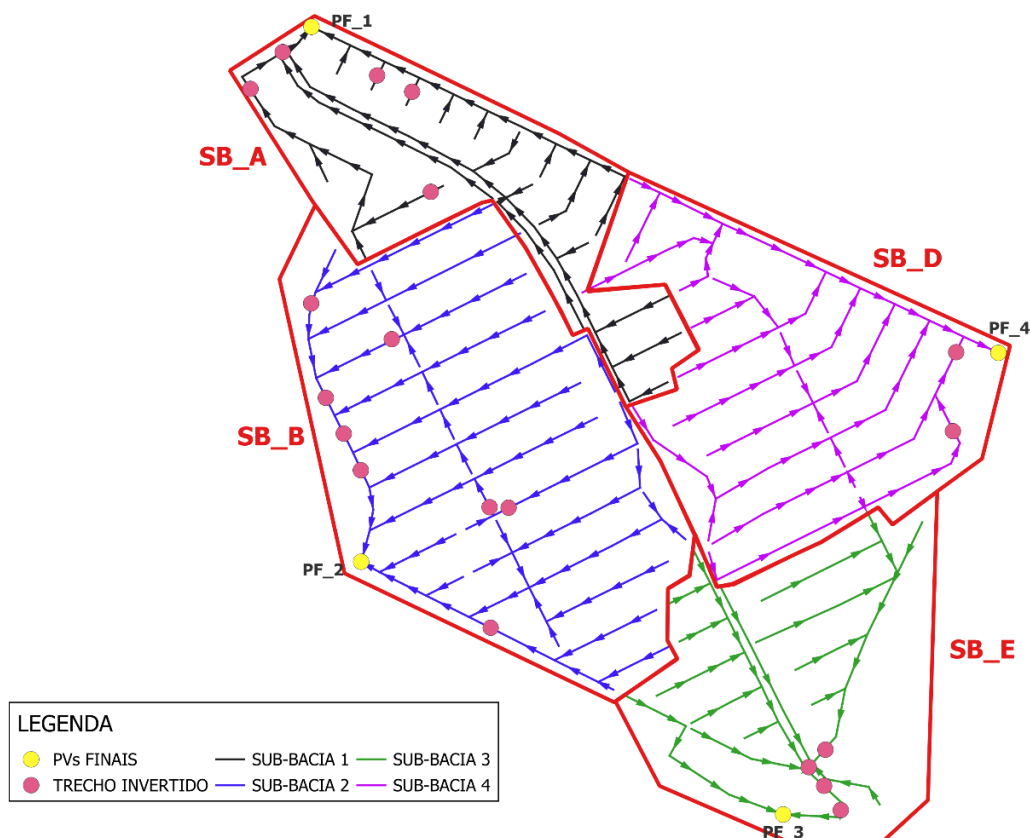
Já a sub-bacia E sofreu uma reorganização mais expressiva. No traçado original, sete trechos apresentavam fluxo contrário à declividade natural. O modelo, ao revisar o traçado e redistribuir parte do fluxo para áreas adjacentes, conseguiu reduzir o número de trechos invertidos para quatro. Essa mudança é particularmente relevante, pois evidencia a eficácia do algoritmo em propor uma solução otimizada, favorecendo uma configuração de rede mais alinhada com o caimento natural do terreno e, conseqüentemente, menos onerosa do ponto de vista construtivo.

Figura 54 – Traçado original apresentado para a rede do bairro Belchior.



Fonte: Autor (2026)

Figura 55 – Traçado otimizado apresentado para a rede do bairro Belchior.

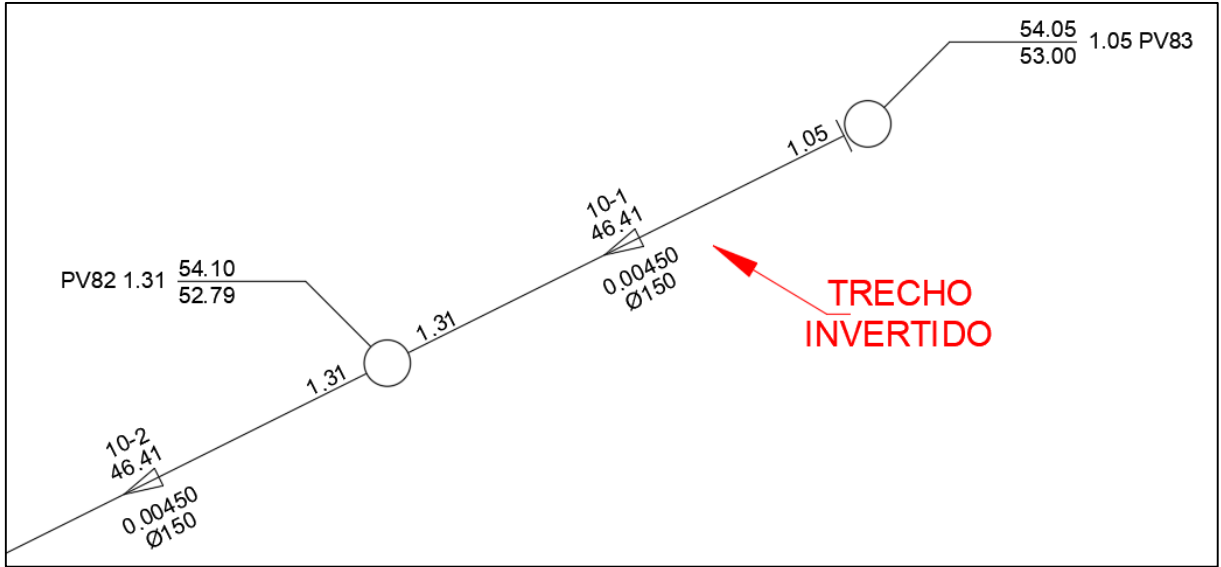


Fonte: Autor (2026)

As Figuras 56, 57 e 58 apresentam um caso desfavorável, em termos de elevação de custo da rede coletora de esgoto proposta no projeto original. No traçado, o trecho 10-1 se apresenta como ponta seca com fluxo invertido, configurando uma condição hidráulica desfavorável. Essa situação se agravava ao longo do caminho até o PV Final da sub-bacia B, com a presença de outro trecho invertido (10-4), como pode ser observado na Figura 57, resultando em um acúmulo de trechos críticos consecutivos. Além disso, a inversão do fluxo no trecho 10-4 implicou um rebaixamento significativo da linha de fundo no poço de visita a jusante deste, gerando um desnível acentuado entre a tubulação e o fundo do PV no trecho 1-12, com profundidade de assentamento de 1,67 m. Tal diferença demandou a utilização de um tubo de queda para garantir a transição hidráulica adequada, mas, ao mesmo tempo, representou um aumento no volume de escavação e no custo construtivo do sistema.

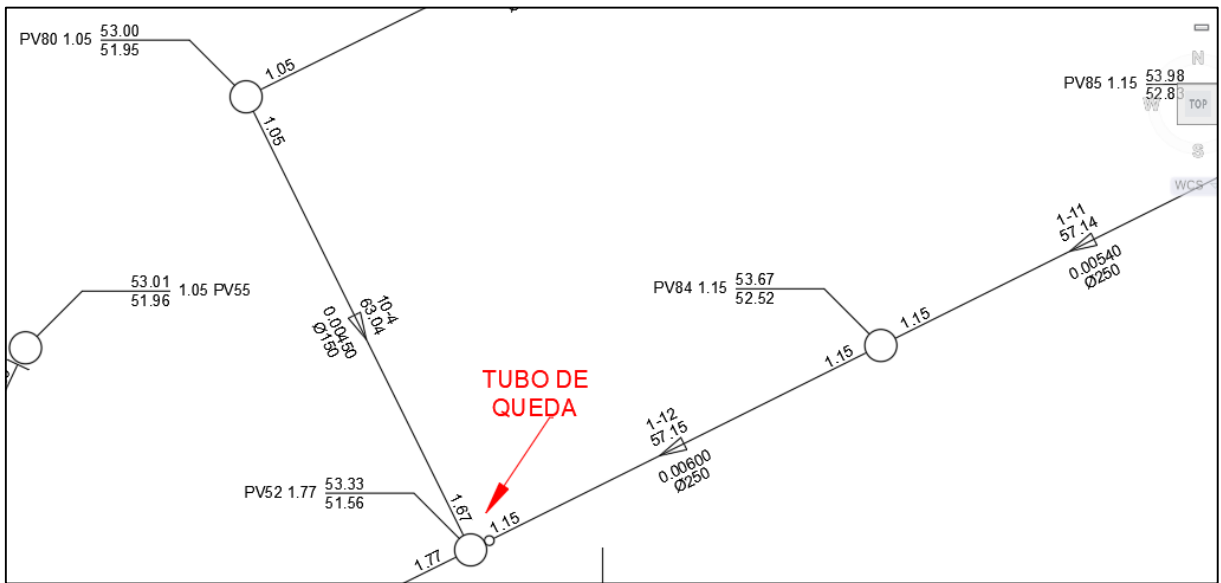
A complexidade do traçado original se intensificava ao considerar o trecho 1-15 (Figura 58), também invertido, situado mais à jusante no mesmo caminho, configurando o coletor com maior concentração de trechos desfavoráveis na rede. Essa configuração, além de técnica e economicamente indesejável, tende a resultar em maiores diâmetros de tubulação no trecho em questão, onde se presencia a necessidade de um diâmetro de 300 mm.

Figura 56 – Trechos invertido no traçado original.



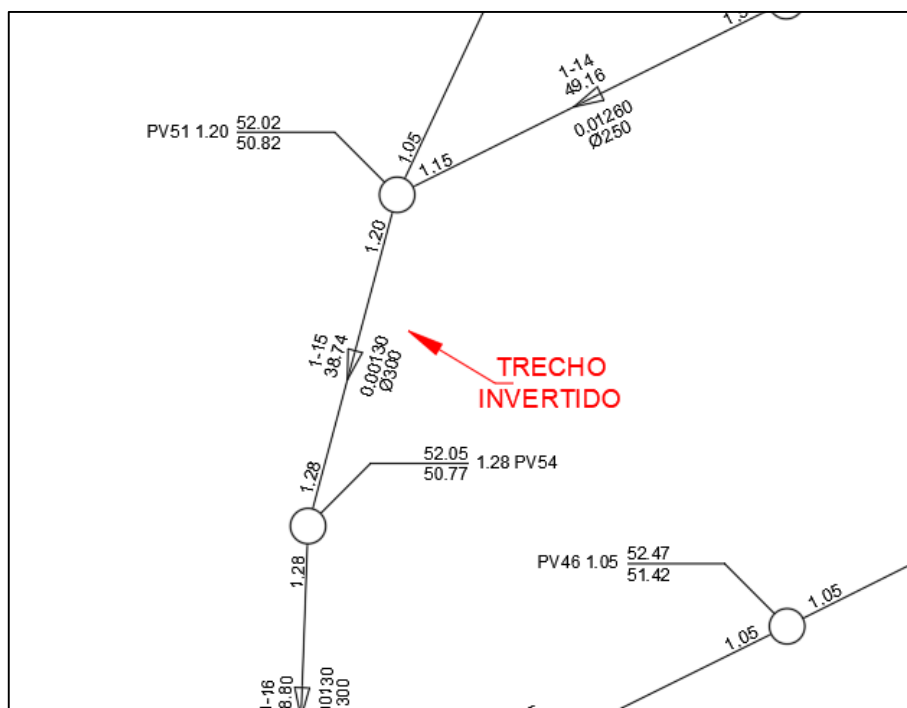
Fonte: Autor (2026)

Figura 57 – Tubo de queda no traçado original.



Fonte: Autor (2026)

Figura 58 – Trechos invertido no traçado original, com elevado diâmetro.



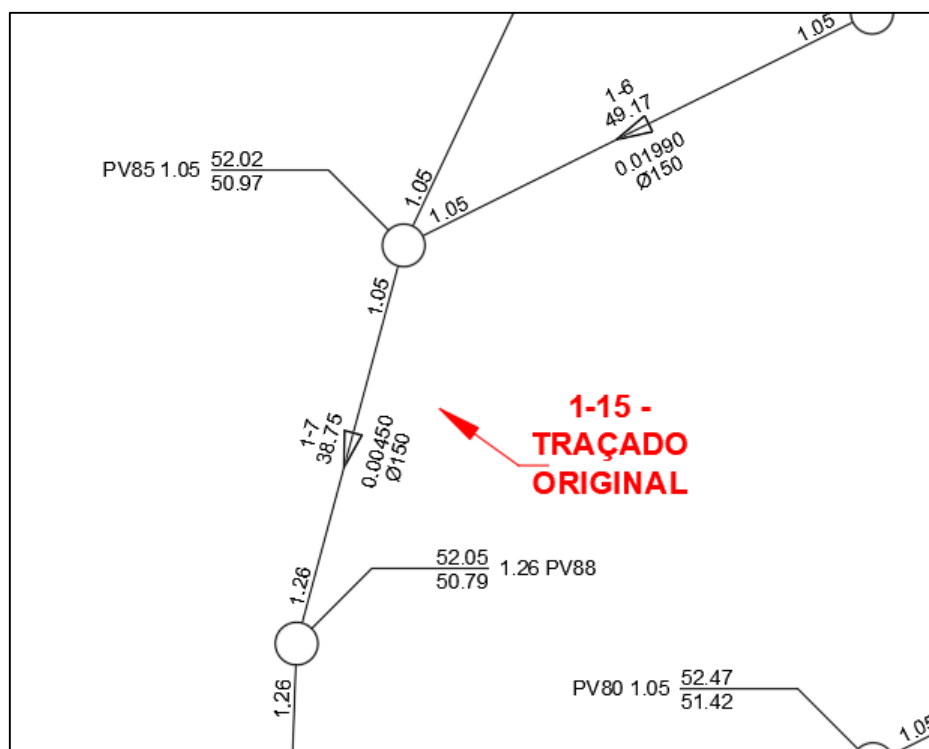
Fonte: Autor (2026)

A solução do modelo de otimização para esse conjunto de problemas pode ser observada na Figura 59, onde trecho 10-4 (traçado original) foi convertido em ponta seca, interrompendo a continuidade do fluxo e impedindo que as vazões provenientes do setor a montante se acumulassem nos trechos invertidos subsequentes. Essa decisão promoveu uma redistribuição de cargas e tendenciou a rede a eliminar a necessidade do tubo de queda anteriormente previsto no trecho 1-12, já que o desnível entre as conexões não existe mais com a nova configuração. Além disso, no referido trecho verificou-se a redução substancial de diâmetro, passando de 250 mm no traçado original, para 150 mm na solução trazida pelo modelo.

Por outro lado, o trecho 10-1 (Figura 60), por ser uma ponta seca que já havia tido seu sentido de fluxo fixado na etapa anterior do processamento, não pôde ser invertido. Para atenuar os efeitos hidráulicos dessa condição, o algoritmo buscou uma conexão alternativa para o trecho, integrando-o diretamente ao PV final da sub-bacia A através de um caminho mais curto e topograficamente mais favorável.

300 mm para o mesmo, o alívio de vazões e de profundidades ao longo do coletor fez com que houvesse uma redução de diâmetro do trecho para 150 mm, que é o diâmetro mínimo da rede, mostrando a robustez da solução empregada pelo modelo otimizador.

Figura 61 – Solução adotada pelo modelo para o trecho 1-15 no traçado original.



Fonte: Autor (2026)

A análise comparativa apresentada na Tabela 6 evidencia diferenças relevantes na distribuição dos diâmetros das tubulações entre o traçado original e o traçado otimizado, considerando as sub-bacias avaliadas. De modo geral, observa-se que a solução obtida pelo modelo proposto tende a concentrar a utilização de diâmetros menores, especialmente o diâmetro de 150 mm, ao mesmo tempo em que reduz ou elimina a necessidade de tubulações de maior porte em diversas sub-bacias. Esse comportamento indica que o traçado otimizado promove uma organização mais eficiente das contribuições hidráulicas, distribuindo os escoamentos de forma mais equilibrada ao longo da rede e evitando a superconcentração de vazões em determinados trechos, situação recorrente em traçados definidos manualmente.

Ao se analisar individualmente as sub-bacias, verifica-se que, no traçado original, há uma presença significativa de diâmetros superiores a 200 mm, totalizando 26 diâmetros. Particularmente, nas sub-bacias B e C são empregados diâmetros de até 350 mm. No traçado otimizado, por sua vez, observa-se uma redução expressiva desses diâmetros, com

predominância quase absoluta de tubulações de 150 mm e uso pontual de diâmetros intermediários, totalizando apenas 1 diâmetro superior a 200 mm. Tal resultado sugere que a metodologia proposta foi capaz de reorganizar o direcionamento dos fluxos, minimizando extensões excessivas de coletores principais e favorecendo uma configuração mais ramificada.

Tabela 6 – Comparativo de diâmetro entre sub-bacias nos traçados.

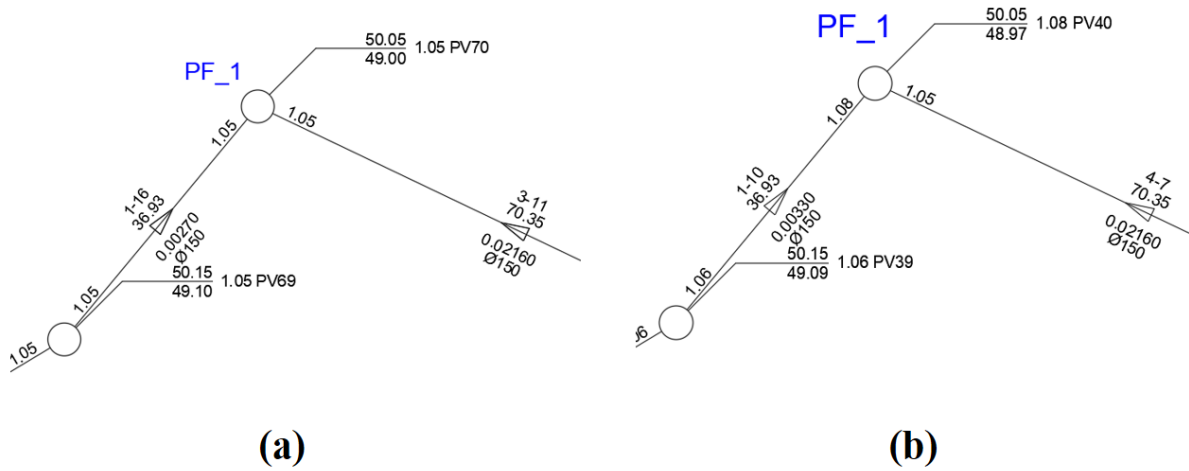
	Diâmetro (mm)	Sub-bacia A	Sub-bacia B	Sub-bacia C	Sub-bacia D	Sub-bacia E
Traçado original	150	39	75	33	71	67
	200	0	0	3	1	1
	250	0	9	2	3	0
	300	0	5	3	0	0
	350	0	4	0	0	0
Traçado otimizado	150	69	103	-	81	55
	200	0	7	-	1	4
	250	0	1	-	0	0
	300	0	0	-	0	0
	350	0	0	-	0	0

Fonte: Autor (2026)

Em termos de dimensionamento, é importante destacar que, em função do traçado gerado pelo modelo proposto nesse trabalho ter juntado as sub-bacias B e C e formado uma única, considerou-se a junção das vazões de projeto das duas sub-bacias no processo de dimensionamento hidráulico.

Ao se efetuar uma análise sobre os PVs finais de cada sub-bacia, onde normalmente se concentram as vazões oriundas de todo o escoamento, percebe-se diferenças notórias entre a solução trazida pelo traçado otimizado e o traçado original da rede. Como pode ser observado na Figura 62, no caso do PV final da sub-bacia A (PF_1), verifica-se que não houveram modificações nos diâmetros com as soluções propostas pelos dois traçados, no entanto como pode na situação (a), o trecho 1-16 do traçado otimizado apresentou profundidade a jusante menor do que o trecho 1-10 do traçado original, apresentado na situação (b), evidenciando mais uma vez a tendência de redução de custos proposta pelo traçado otimizado.

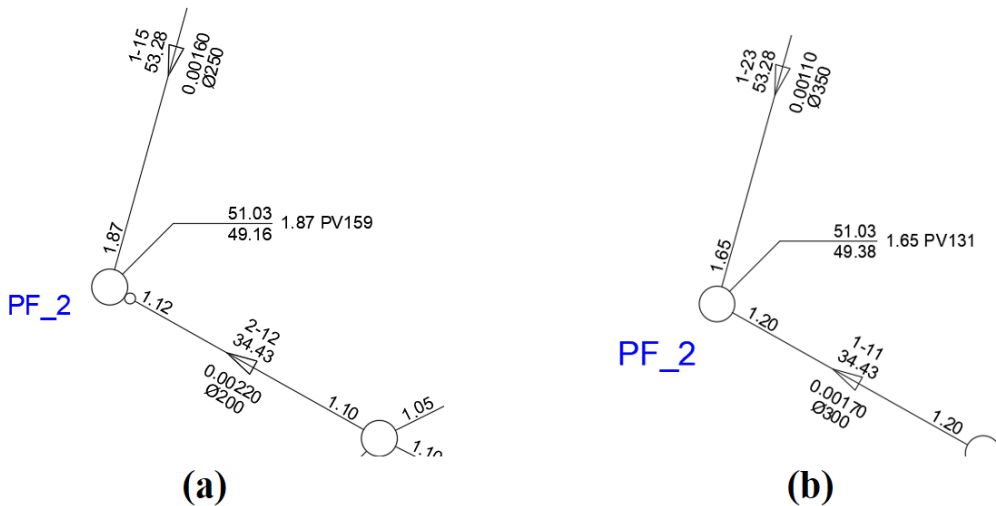
Figura 62 – Trechos afluentes ao PF_1 da sub-bacia A.



Fonte: Autor (2026)

Para o PV final da sub-bacia B (PF_2), que pode ser observado na Figura 63, constatou-se a maior diferença entre as duas soluções trazidas. Na situação (b), percebe-se que no traçado original os dois trechos afluentes ao PV final apresentavam diâmetro de 300 mm e 350 mm, o que representava uma situação desfavorável sob o ponto de vista de custo. Por outro lado, como se observa na situação (a), o modelo de otimização conseguiu reorganizar as sub-bacias B e C do traçado original e transformá-las em uma única sub-bacia. Tal reorganização possibilitou um alívio de vazões ao longo dos coletores, de modo que os diâmetros dos trechos afluentes fossem reduzidos para 200 mm e 250 mm, que reforça a eficiência global do método proposto em termos de redução de custos.

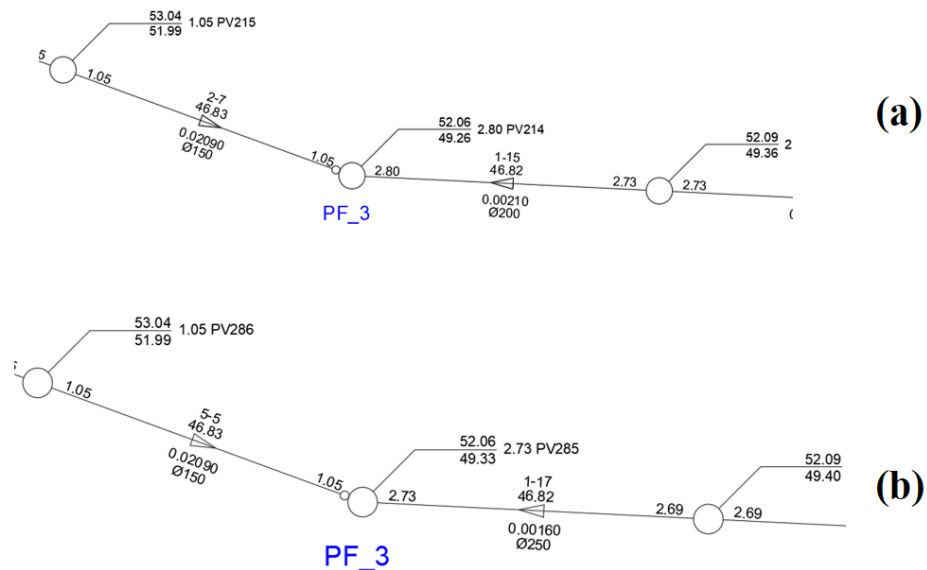
Figura 63 – Trechos afluentes ao PF_2 da sub-bacia B.



Fonte: Autor (2026)

A exemplo do PF_2, no PF_3 da sub-bacia E também observou-se uma redução substancial de diâmetro, tendo em vista que ao se avaliar a Figura 64(b) o diâmetro do trecho afluente 1-17, que era de 250 mm, passou a ser de 200 mm com a solução trazida pelo modelo de otimização.

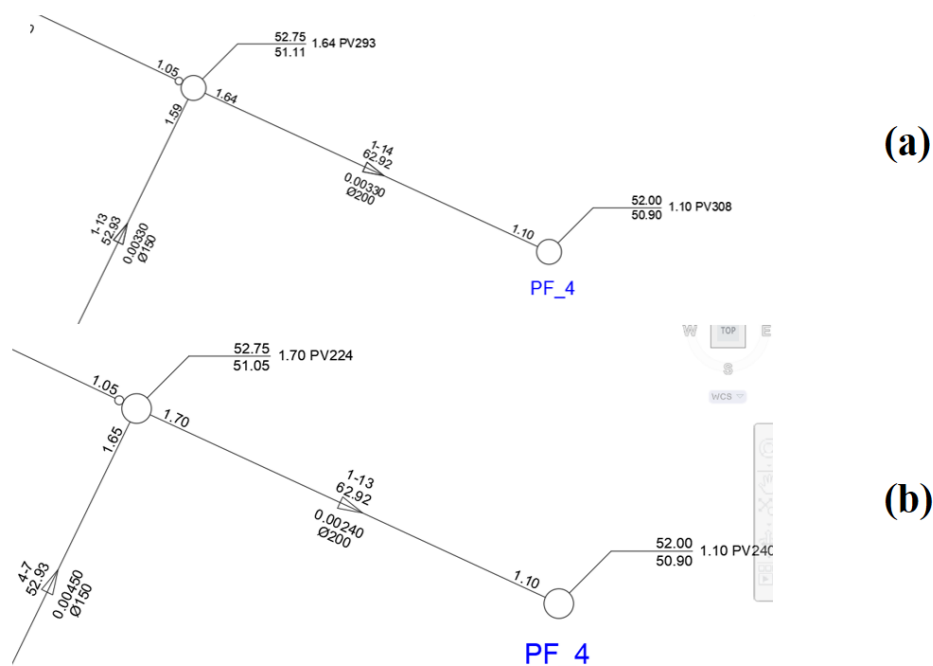
Figura 64 – Trechos afluentes ao PF_3 da sub-bacia E.



Fonte: Autor (2026)

Analisando a Figura 65, para a sub-bacia D ocorreu uma convergência entre as duas soluções avaliadas, uma vez que não houveram mudanças expressivas nos diâmetro dos trechos afluentes pelos dois traçados gerados, sendo constatado o valor de 200 mm em ambas as situações. O fato em questão é justificado em função de os dois traçados apresentarem solução bem parecida para a sub-bacia D, não havendo mudanças bruscas na configuração do traçado.

Figura 65 – Trechos afluentes ao PF_4 da sub-bacia D.



Fonte: Autor (2026)

Em termos de profundidades médias da rede, também foi possível verificar uma superioridade da solução otimizada em relação ao traçado original da rede. Os dados apresentados na Tabela 7, foram obtidos com base nas profundidades de montante de cada trecho da rede em cada sub-bacia. Os resultados mostram que, com exceção da sub-bacia E, onde os valores se mantiveram próximos, em todas as outras sub-bacias da rede houveram reduções na profundidade média, com destaque para a junção executada pelo modelo de otimização para as sub-bacias B e C. Ao se efetuar uma média dos valores obtidos para as referidas sub-bacias, verifica-se o valor de 1,161 m, o que se mostra acima do valor de profundidade da solução adotada com a junção das duas sub-bacias pelo modelo de otimização, que resultou em um valor de 1,136 m. As constatações mostram que além da potencializar a redução de diâmetros da rede, o traçado otimizado também tende a provocar reduções expressivas em termos de escavação, o que impõe uma tendência de redução do custo global da rede coletora.

Tabela 7 – Comparativo de profundidades médias da rede entre sub-bacias nos traçados.

	Profundidades médias de PVs (m)				
	Sub-bacia A	Sub-bacia B	Sub-bacia C	Sub-bacia D	Sub-bacia E
Traçado original	1,177	1,175	1,147	1,221	1,080
Traçado otimizado	1,161	1,136		1,215	1,085

Fonte: Autor (2026)

Com o objetivo de avaliar a eficiência econômica da solução proposta pelo modelo de otimização, procedeu-se à avaliação comparativa dos quantitativos e custos associados à implantação da rede coletora de esgoto no bairro Belchior, considerando, de um lado, o traçado gerado no projeto original, cujas informações de estimativa de orçamento são apresentadas na Tabela 8 e, de outro, o traçado gerado pelo modelo de otimização proposto neste trabalho, onde as informações de estimativas de quantitativo podem ser observadas na Tabela 9.

Tabela 8 – Estimativa de orçamento para o traçado original de projeto.

Item	Descrição	Unid.	Quant.	Custo (R\$)	
				Unitário	Total
1	Escavação em valas, valetas, canais e fundações.				
1.1	Escavação mecânica solo de 1ª cat. prof. até 2,00m.	M³	14.939,86	9,97	148.950,40
1.2	Escavação mecânica solo de 1ª cat. prof. de 2,01 a 4,00 m.	M³	1.073,98	13,19	14.165,80
2	Assentamento de tubo, inclusive transporte e limpeza.				
2.1	Assentamento de tubos e conexões em PVC, JE DN 150mm	M	16.306,93	5,80	94.580,17
2.2	Assentamento de tubos e conexões em PVC, JE DN 200mm	M	339,85	7,56	2.569,26
2.3	Assentamento de tubos e conexões em PVC, JE DN 250mm	M	747,63	9,81	7.334,22
2.4	Assentamento de tubos e conexões em PVC, JE DN 300mm	M	398,40	12,02	4.788,75
2.5	Assentamento de tubos e conexões em PVC, JE DN 350mm	M	187,37	13,36	2.503,24
3	Fornecimento de tubulação				
3.1	Tubo PVC rígido OCRE JE DN 150 (NBR-7362)	M	16.306,93	29,86	486.924,82
3.2	Tubo PVC rígido OCRE JE DN 200 (NBR-7362)	M	339,85	46,01	15.636,45
3.3	Tubo PVC rígido OCRE JE DN 250 (NBR-7362)	M	747,63	79,07	59.114,85
3.4	Tubo PVC rígido OCRE JE DN 300 (NBR-7362)	M	398,40	126,84	50.532,82
3.5	Tubo PVC rígido OCRE JE DN 350 (NBR-7362)	M	187,37	199,76	37.428,73
TOTAL GERAL					924.529,51

Fonte: Autor (2026)

Tabela 9 – Estimativa de orçamento para o traçado gerado pelo modelo de otimização.

Item	Descrição	Unid.	Quant.	Custo (R\$)	
				Unitário	Total
1	Escavação em valas, valetas, canais e fundações.				
1.1	Escavação mecânica solo de 1ª cat. prof. até 2.00m.	M³	15.056,75	9,97	150.115,80
1.2	Escavação mecânica solo de 1ª cat. prof. de 2,01 a 4,00 m.	M³	893,94	13,19	11.791,07
2	Assentamento de tubo, inclusive transporte e limpeza.				
2.1	Assentamento de tubos e conexões em PVC, JE DN 150mm	M	17.846,87	5,80	103.511,82
2.2	Assentamento de tubos e conexões em PVC, JE DN 200mm	M	581,77	7,56	4.398,17
2.3	Assentamento de tubos e conexões em PVC, JE DN 250mm	M	53,28	9,81	522,66
3	Fornecimento de tubulação				
3.1	Tubo PVC rígido OCRE JE DN 150 (NBR-7362)	M	17.846,87	29,86	532.907,40
3.2	Tubo PVC rígido OCRE JE DN 200 (NBR-7362)	M	581,77	46,01	26.767,14
3.3	Tubo PVC rígido OCRE JE DN 250 (NBR-7362)	M	53,28	79,07	4.212,71
TOTAL GERAL					834.226,77

Fonte: Autor (2026)

No que se refere aos serviços de escavação (Item 1), observou-se que o volume total estimado no traçado gerado pelo modelo apresentou comportamento semelhante ao do projeto original, com pequena redistribuição entre as faixas de profundidade. Enquanto o projeto original demandou aproximadamente 16.013,84 m³ de escavação, o traçado otimizado resultou em cerca de 15.950,69 m³, evidenciando uma leve redução global, associada principalmente à diminuição dos trechos com profundidades superiores a 2,00 m. Essa redistribuição refletiu diretamente no custo total de escavação, que passou de R\$ 163.116,20, no projeto original, para R\$ 161.906,87, no modelo proposto.

Em relação ao assentamento de tubulações (Item 2), a solução gerada pelo modelo apresentou alterações mais expressivas nos quantitativos por diâmetro. Verificou-se um aumento significativo da extensão de tubulações com DN (diâmetro nominal) de 150 mm, acompanhada da redução substancial dos comprimentos associados a diâmetros maiores, como DN 250 mm, DN 300 mm e DN 350 mm, que estavam presentes no projeto original. Como consequência, o custo total de assentamento de tubos foi reduzido de R\$ 111.775,64, no cenário original, para R\$ 108.432,65, no modelo otimizado. Redução ainda mais significativa foi observada no item de fornecimento de tubulação (Item 3), cujo custo total passou de R\$ 649.637,67 para R\$ 563.887,25, refletindo o menor emprego de tubulações de maior diâmetro, que possuem custo unitário significativamente mais elevado.

De forma consolidada, o custo total estimado para a rede coletora no bairro Belchior foi reduzido de R\$ 924.529,51, no projeto original, para R\$ 834.226,77, no traçado gerado pelo modelo, correspondendo a uma economia aproximada de 9,8%, que se traduz, em termos financeiros, em uma redução de custo aproximada de R\$ 90.302,74. Esse resultado evidencia que, além de atender aos critérios hidráulicos e topográficos, a metodologia proposta apresenta potencial concreto de redução de custos de implantação, especialmente por meio da racionalização dos diâmetros adotados e da redução de trechos mais profundos de escavação.

O desempenho do algoritmo proposto também se destacou de maneira significativa no que diz respeito ao tempo de processamento. Para o estudo de caso do bairro Belchior, cujo grafo base de entrada apresentava uma configuração de maior complexidade, o modelo precisou resolver um conjunto de 10 nós terminais com a execução da Árvore 1. Na sequência, as Árvores 2 e 3 foram responsáveis por tratar 26 nós que apresentavam múltiplas saídas, redistribuindo os fluxos de maneira a otimizar o traçado e reduzir inconsistências hidráulicas, como trechos invertidos e anéis.

Mesmo considerando a quantidade expressiva de operações envolvidas, o algoritmo finalizou todo o processamento em um tempo aproximado de 4 segundos, indicando uma boa eficiência computacional, que se traduz em sua capacidade de lidar com redes de médio e grande porte sem demandar tempos elevados de execução.

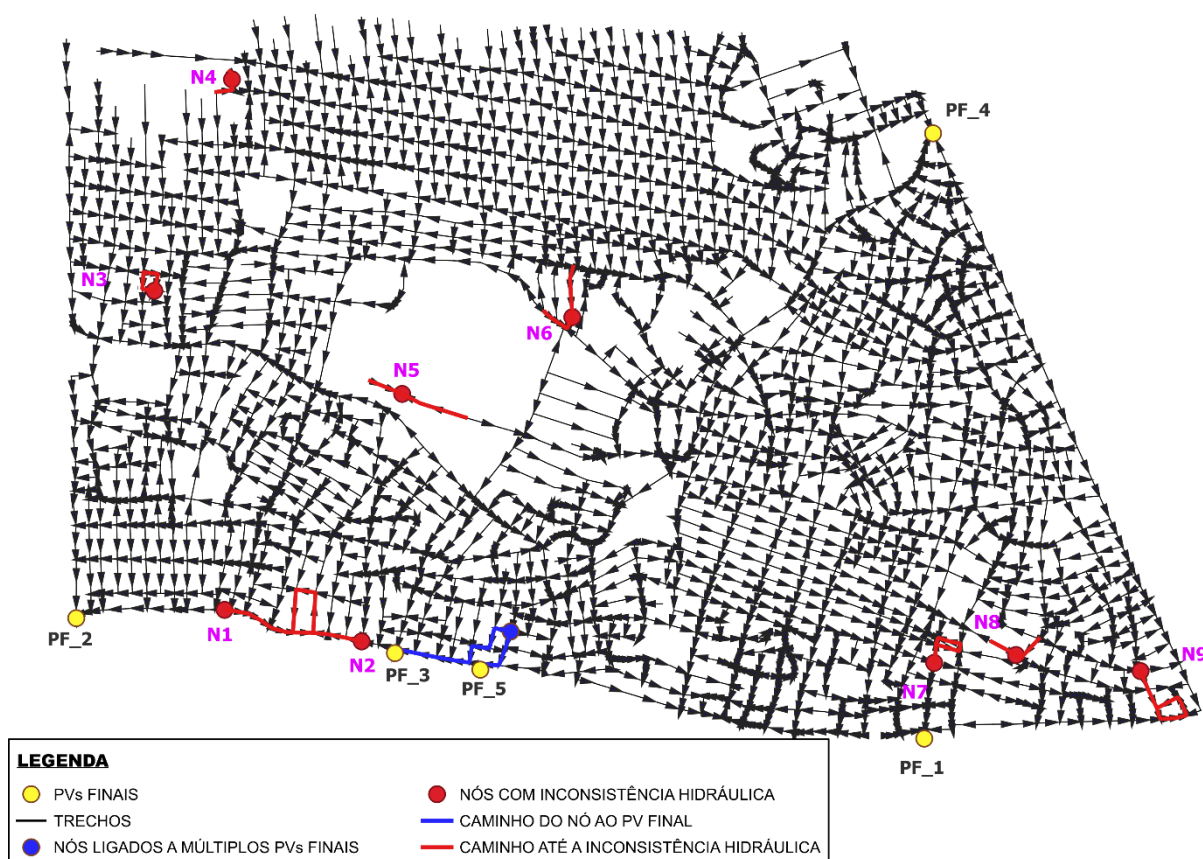
4.3 Aplicação do modelo no estudo de caso 3: rede de Villa Hermosa

Observa-se inicialmente que os tempos computacionais obtidos pelas duas abordagens analisadas neste estudo evidenciam diferenças relevantes quando aplicadas a uma rede real de grande porte, como a de Villa Hermosa. A metodologia proposta neste trabalho apresentou um tempo total de execução da ordem de 4 minutos para o processamento completo da rede, enquanto a aplicação do algoritmo de Rodrigues *et al.* (2019) demandou aproximadamente 10 minutos para a geração do traçado correspondente. Esses valores tornam-se particularmente expressivos quando comparados aos procedimentos convencionais de definição manual do traçado, nos quais a elaboração de redes dessa dimensão exige elevado esforço técnico e tempo significativamente superior, sobretudo em função do grande número de nós, trechos e possibilidades de conectividade.

Quando confrontados com resultados da literatura, os ganhos de desempenho tornam-se ainda mais evidentes. Em Duque *et al.* (2020), por exemplo, os autores reportam três estudos de caso resolvidos por meio de um algoritmo híbrido que combina programação inteira mista e

programação dinâmica para a otimização do traçado de redes coletoras de esgoto. No primeiro, com 79 trechos e 78 PVs, verificou-se um tempo computacional da ordem de 45 minutos. O segundo, com 144 trechos e 81 PVs, demandou aproximadamente 115 minutos e o terceiro, referente a uma rede real com 160 trechos e 109 PVs, apresentou tempo de execução em torno de 113 minutos. Esses resultados indicam que, mesmo para redes de porte relativamente reduzido quando comparadas à rede analisada neste trabalho, os tempos computacionais reportados na literatura são significativamente mais elevados. Ressalta-se, ainda, que não foram identificados, nos trabalhos analisados, estudos de caso com dimensão comparável à rede de Villa Hermosa, o que reforça a contribuição da metodologia proposta no que se refere à viabilidade computacional e à aplicabilidade em redes reais de grande porte.

Como observado na Figura 66, correspondente à saída do modelo proposto por Rodrigues *et al.* (2019), o traçado obtido não resulta na definição de sub-bacias associadas a cada PV final. Embora seja possível identificar um direcionamento geral do escoamento, a rede permanece em termos topológicos, contínua, sem a delimitação clara de áreas de contribuição específicas para cada PV Final, sendo perceptível a presença de diversos nós com mais de uma saída. Para exemplificar tal comportamento observa-se na Figura 66 um nó destacado em azul, conectado simultaneamente a dois PVs finais distintos (PF_3 e PF_5), indicando que um mesmo ponto da rede está associado a mais de um ponto final. Do ponto de vista físico-hidráulico, essa configuração é incompatível com o comportamento esperado de redes por gravidade, em que cada nó deve ter um único caminho de condução até o PV final correspondente à sua sub-bacia, preservando a unidirecionalidade do escoamento e a coerência topológica do sistema.

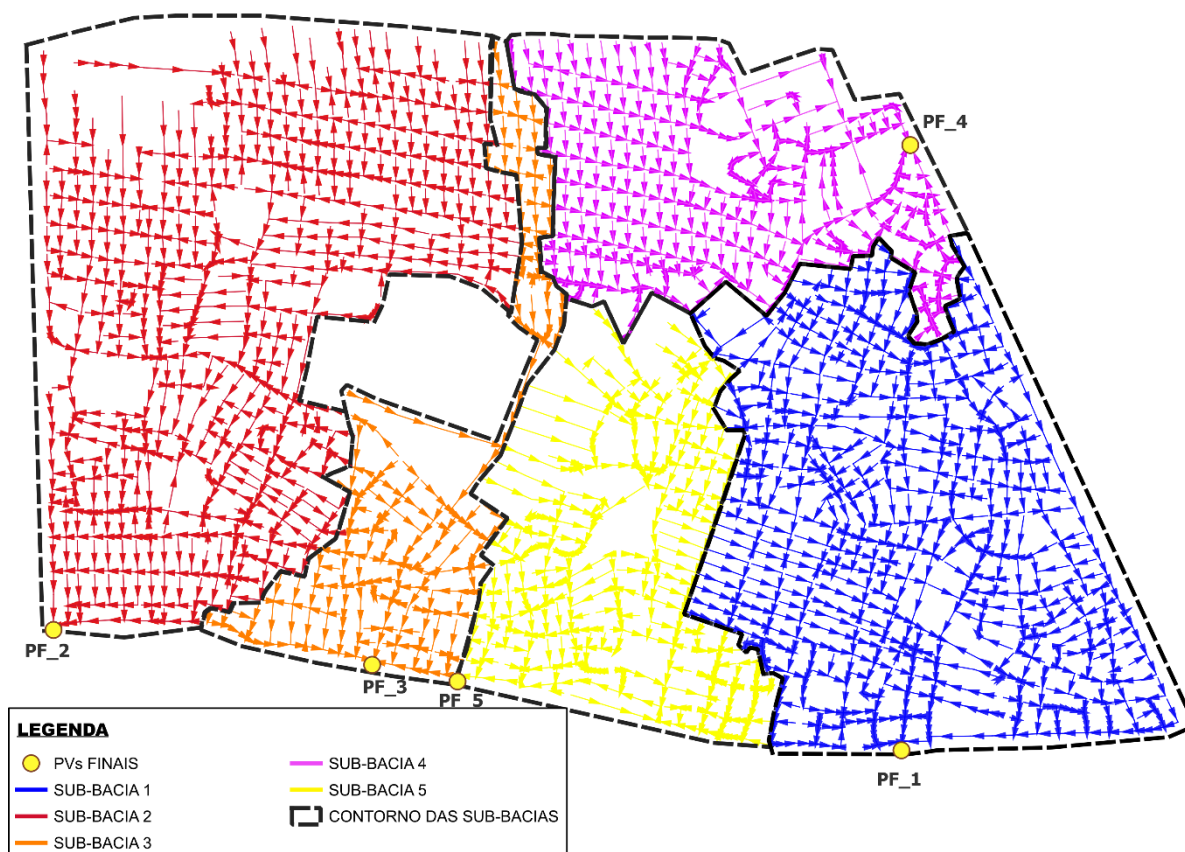
Figura 66 – Arquivo gerado pelo modelo de Rodrigues *et al.* (2019).

Fonte: Autor (2026)

Além disso, a Figura 66 evidencia a ocorrência de diversas inconsistências hidráulicas ao longo do traçado. Os nós N1, N2, N7 e N9 encontram-se associados a anéis, caracterizando discontinuidades no sentido de escoamento. Observa-se também a presença dos nós N3, N4, N5, N6 e N8 como nós terminais, isto é, sem continuidade de condução de fluxo a jusante. Ressalta-se que esses nós não eram originalmente terminais, passando a assumir essa condição ao longo do processo de ajuste do traçado. O comportamento da solução trazido reflete a estratégia adotada no algoritmo de Rodrigues *et al.* (2019) que, ao identificar um nó terminal, o método executa uma busca local a partir desse nó, encontra a primeira solução capaz de remover a terminalidade e, em seguida, fixa o trecho modificado, impedindo que ele seja reavaliado em etapas posteriores. Esse procedimento, embora resolva pontualmente uma inconsistência, pode bloquear alternativas globais de reconexão e induzir a formação de novos nós terminais em outras regiões da rede, como observado nos resultados. Além disso, tal abordagem não garante que, partindo do nó terminal, a inversão do primeiro trecho viável encontrado garante um caminho que conecte o nó terminal ao PV final da rede.

Em contraposição, conforme mostra a Figura 67, a aplicação da metodologia proposta neste trabalho resulta em um traçado claramente organizado em cinco sub-bacias, compatíveis com a existência de cinco PVs finais. Cada sub-bacia apresenta um conjunto de trechos cujo sentido de escoamento converge para o respectivo ponto final, não sendo observada a ocorrência de nós conectados a múltiplos PVs finais nem a identificação de anéis ou nós terminais após o processamento. Esse comportamento decorre diretamente da lógica adotada na metodologia proposta, na qual a correção das inconsistências relacionadas a nós terminais é conduzida a partir do PV final em direção ao nó terminal, por meio da estrutura da Árvore 1. Dessa forma, cada ajuste topológico já garante, desde sua origem, a existência de um caminho contínuo conectando o nó ao PV final da sub-bacia correspondente. Cabe destacar também a atuação conjunta das árvores 2 e 3, que atuam de forma complementar no processo de subdivisão da rede em sub-bacias, garantindo que cada PV possua apenas uma única saída.

Figura 67 – Arquivo gerado pelo modelo proposto nesse estudo.

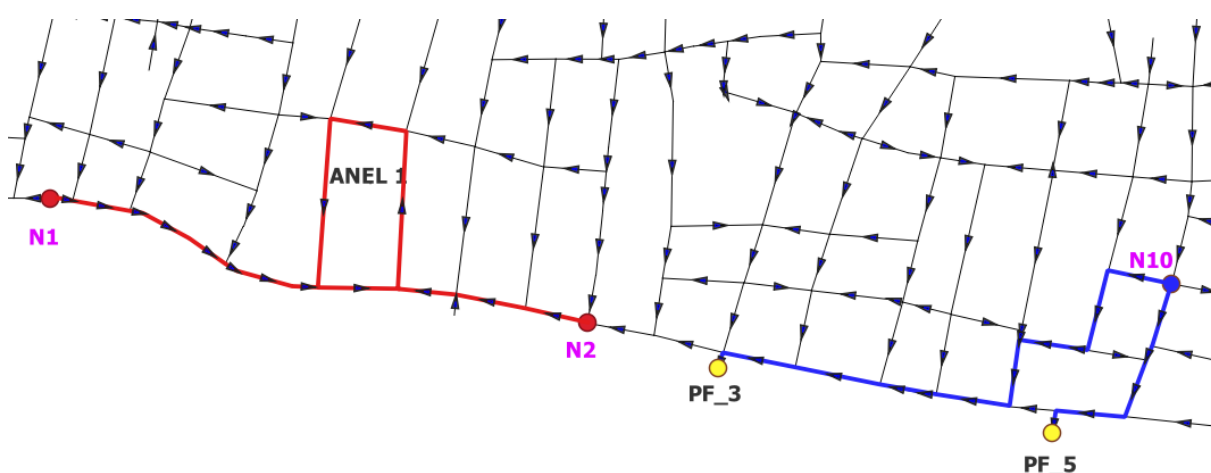


Fonte: Autor (2026)

Como forma de discutir em detalhes algumas soluções adotadas pelo modelo proposto para resolver as inconsistências hidráulicas apresentadas nos resultados obtidos pela

metodologia de Rodrigues *et al.* (2019), apresenta-se na Figura 68 os casos particulares dos problemas relacionados aos nós N1, N2 e N10. Nesse caso, observa-se a presença de dois nós conectados a um anel (N1 e N2), bem como a conexão direta do nó N10 com dois PVs Finais (PF_3 e PF_5). Além disso, verifica-se que o nó N1 apresenta mais de uma saída, o que também caracteriza uma situação de inconsistência hidráulica sob a ótica de problemas de otimização de redes por gravidade.

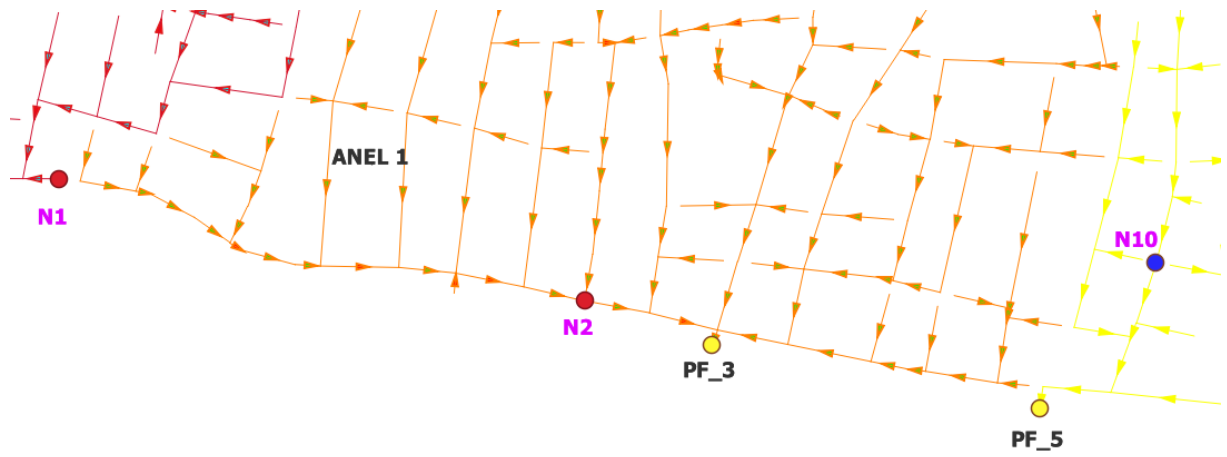
Figura 68 – Inconsistências hidráulicas geradas nos nós N1, N2 e N10 pela solução de Rodrigues *et al.* (2019).



Fonte: Autor (2026)

Como pode ser observado na Figura 69, a abordagem proposta nesse trabalho contornou a problemática evidenciada para o nó N1 por meio da atuação conjunta das Árvores 2 e 3, que possibilitou a desconexão desse nó em relação ao restante do traçado. Tal procedimento resultou na separação estrutural entre os nós N1 e N2, que passaram a pertencer a sub-bacias distintas. Observa-se ainda, que as Árvores 2 e 3 também atuaram diretamente na eliminação do ANEL 1, por meio da desconexão de um trecho que na solução trazida por Rodrigues *et al.* (2019), contribuía para a formação do ciclo. Com a remoção desse trecho, a possibilidade de manutenção do anel é eliminada, e o conjunto de trechos remanescente passa a apresentar um sentido de escoamento compatível com uma rede por gravidade. De forma análoga, o problema associado ao nó N10 foi resolvido quando, ainda por meio da atuação das Árvores 2 e 3, um dos caminhos existentes foi desconectado, permitindo a redefinição das sub-bacias. Como resultado, o nó N10 deixa de apresentar conectividade múltipla, passando a estar associado ao PV final 5, enquanto o caminho desconectado passa a compor a sub-bacia associada ao PV final 3.

Figura 69 – Solução gerada pelo modelo proposto para o nós N1, N2 e N10.



Fonte: Autor (2026)

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo geral a criação e validação de um algoritmo capaz de gerar automaticamente o traçado de redes coletoras de esgoto, utilizando estratégias de caminhos mínimos em árvores de busca em largura, com foco na otimização hidráulica e econômica do sistema. A metodologia proposta foi testada e aplicada a diferentes redes reais, com variados níveis de porte e complexidade topográfica, permitindo avaliar a aplicabilidade e eficácia do modelo em cenários de projeto próximos à realidade prática.

Os resultados obtidos nos estudos de caso evidenciaram que o algoritmo desenvolvido atingiu plenamente os objetivos propostos. Em primeiro lugar, a modelagem das redes como grafos direcionados permitiu representar com precisão os elementos da rede, com poços de visita como nós e trechos como arestas, possibilitando a exploração de todas as conexões potenciais e garantindo a completude da análise. As rotinas implementadas nas Árvores 1, 2 e 3 demonstraram ser eficazes na identificação e resolução de nós terminais e nós com múltiplas saídas, corrigindo discontinuidades de fluxo e eliminando ciclos indesejados na malha.

Em uma análise dos resultados, no bairro Alto da Expectativa, uma rede de pequeno porte, o modelo solucionou seis nós terminais e dezenove nós com múltiplas saídas em apenas 3 segundos, reconfigurando o traçado para reduzir a quantidade de trechos invertidos e redistribuir as contribuições hidráulicas. Como exemplo, destacam-se as alterações no entorno do PV 15, onde a criação de uma ponta seca evitou o acúmulo de grandes vazões em trechos invertidos, mitigando a necessidade de valas profundas e diâmetros elevados.

No bairro Belchior, que representa uma rede de porte intermediário e subdividida originalmente em cinco sub-bacias, o algoritmo demonstrou sua robustez e capacidade de reorganizar a rede para otimizar o desempenho hidráulico. Foram processados dez nós terminais e vinte e seis nós com múltiplas saídas, com tempo computacional de apenas 4 segundos. Entre as principais otimizações, destacam-se a unificação das sub-bacias B e C, que originalmente apresentavam 15 trechos invertidos. A solução proposta pelo modelo reduziu esse número para 8, ao mesmo tempo em que redistribuiu as áreas de contribuição, criando trajetos mais curtos entre os PVs finais e os nós da rede. Além disso, o algoritmo ampliou a sub-bacia A sobre áreas anteriormente pertencentes às sub-bacias B e D, promovendo um alívio das cargas hidráulicas em trechos desfavoráveis topograficamente e, ao mesmo tempo, removendo trechos invertidos. A sub-bacia E passou por ajustes importantes, reduzindo de sete para quatro o número de

trechos invertidos, o que demonstra a capacidade do modelo em propor soluções mais aderentes à topografia e menos onerosas em termos construtivos. Além disso, o dimensionamento hidráulico possibilitou verificar, em termos quantitativos qual o traçado se apresentou mais eficiente do ponto de vista de custos. Em contraposição à solução original de traçado, que apresentava diversos trechos com diâmetros superiores a 200 mm, verificou-se que a solução trazida pelo modelo de otimização possibilitou redução significativa no número de trechos com diâmetros superiores a 200 mm, confirmando que a solução adotada é, de fato, otimizada e apresenta um potencial para redução de custos. A eficiência econômica do traçado otimizado para o estudo de caso do bairro Belchior foi confirmada por meio da análise da estimativa de custo com escavação e tubulações, onde percebeu-se uma redução de custo de, aproximadamente, 9,8% em relação ao custo do traçado original, perfazendo uma redução de R\$ 90.302,74. As reduções de custo mais expressivas ocorreram em virtude da diminuição de diâmetros superiores a 200 mm no traçado otimizado.

A eficácia do modelo de otimização também demonstrou eficiência quando comparada à solução trazida pelo modelo de Rodrigues *et al.* (2019) para a rede de Villa Hermosa. Verificou-se que o traçado otimizado conseguiu contornar problemas de inconsistências hidráulicas presenciadas na rede, as quais não foram solucionadas pelo modelo de Rodrigues *et al.* (2019). O estudo de caso de Villa Hermosa mostrou que as estratégias de busca trazidas pelas árvores de busca em largura, iniciando do PV final, garantem caminhos válidos a todos os nós da rede, evitando a ocorrência de problemas com restrições hidráulicas. Além disso, a atuação conjunta das árvores 2 e 3 evidenciou a capacidade de divisão da rede em sub-bacias, mesmo em redes de grande porte.

O desempenho computacional alcançado em redes de diferentes portes demonstra a eficiência do algoritmo, que se mostrou capaz de processar redes com centenas de nós e trechos em tempos viáveis para uso em projetos reais. Além disso, o modelo diferencia-se por sua capacidade de analisar todos os caminhos possíveis entre os nós da rede e os PVs finais, selecionando o caminho mínimo com base em critérios de declividade relativa e comprimento acumulado. Essa característica permite não apenas eliminar situações hidráulicas inviáveis, como ciclos de fluxo e trechos invertidos desnecessários, mas também redistribuir as áreas de contribuição de forma a evitar sobrecargas em setores críticos.

Com isso, conclui-se que o trabalho contribui de maneira significativa para a área do Saneamento Básico, apresentando uma solução inovadora que alia rigor técnico, aplicabilidade prática e eficiência computacional.

Como perspectivas futuras, destaca-se a possibilidade de ampliação da metodologia proposta de modo que o algoritmo possa também atuar na definição ótima da localização dos PVs finais, selecionando, dentre os pontos tecnicamente viáveis, aqueles que conduzam a soluções globalmente mais eficientes do ponto de vista do traçado da rede. No presente trabalho, a definição prévia dos PVs finais constitui uma condição necessária para a execução do modelo, o que abre espaço para investigações futuras voltadas à incorporação dessa etapa ao processo de otimização. Adicionalmente, recomenda-se a integração do modelo de traçado com rotinas de dimensionamento hidráulico, permitindo uma abordagem ainda mais unificada, bem como sua incorporação em ambientes GIS, o que pode representar uma alternativa promissora para o aumento da eficiência no desenvolvimento de projetos de redes coletoras de esgoto.

REFERÊNCIAS

- ABELLO, J.; POGEL, A. J.; MILLER, L. Breadth First Search Graph Partitions and Concept Lattices. **Journal of Universal Computer Science**, v. 10, n. 8, p. 934–954, 2004. DOI: <https://doi.org/10.3217/jucs-010-08-0934>
- ALEM SOBRINHO, P.; TSUTIYA, M. T. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. 2. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17015:2023 – Execução de obras lineares para transporte de água bruta e tratada, esgoto sanitário e drenagem urbana, utilizando tubos rígidos, semirrígidos e flexíveis**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- BEZERRA, A. A. **Dimensionamento hidráulico de redes coletoras de esgoto sanitário usando o critério de atendimento crítico**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- BOGDAN, L.; PETRICZEK, G.; STUDZIŃSKI, J. Computer Dynamic Modelling of Communal Sewage Networks. *Journal of Automation. Mobile Robotics and Intelligent Systems*, v. 8, n. 4, p. 50–58, 2014. DOI: 10.14313/JAMRIS_4-2014/37
- BONDY, J. A.; MURTY, U. S. R. **Graph Theory**. Graduate Texts in Mathematics, v. 244. London: Springer, 2008.
- BORGES, M. C. P.; ABREU, S. B.; LIMA, C. H. R.; CARDOSO, T.; YONAMINE, S. M.; ARAUJO, W. D. V.; SILVA, P. R. S.; MACHADO, V. B.; MORAES, V.; SILVA, T. J. B.; REIS, V. A.; SANTOS, J. V. R.; REIS, M. L.; CANAMARY, É. A.; VIEIRA, G. C.; MEIRELES, S. The Brazilian National System for Water and Sanitation Data (SNIS): Providing information on a municipal level on water and sanitation services. **Journal of Urban Management**, v. 11, p. 530–542, 2022.
- BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm>. Acesso em: 29 dez. 2025.
- CALVETTI, F. S.; MACHADO, J. P.; PEREIRA, C. H.; BIANCHI, A. L. Correlações Socioeconômicas com Infraestrutura de Saneamento Básico: Um Estudo Comparativo em Três Capitais Brasileiras. **Periódico técnico e científico cidades verdes**, v. 13, 2025.
- CONCAS, A.; FENU, C.; REICHEL, L.; RODRIGUEZ, G.; ZHANG, Y. Chained structure of directed graphs with applications to social and transportation networks. **Applied Network Science**, v. 7, n. , 2022. DOI: 10.1007/s41109-022-00502-x.

DASTGIR, A.; HESARKAZZAZI, S.; OBERASCHER, M.; HAJIBABAIE, M.; MINAEI, A.; SITZENFREI, R. Exploring the Potential of Hydraulically Informed Graph Analysis for Urban Drainage Networks. **World Environmental and Water Resources Congress**, 2022. DOI: 10.1061/9780784484258.064.

DONADELLI, J. **Teoria dos grafos: uma breve introdução com algoritmos**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

DUQUE, N.; DUQUE, D.; AGUILAR, A.; SALDARRIAGA, J. Sewer Network Layout Selection and Hydraulic Design Using a Mathematical Optimization Framework. **Water**, v. 12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12123337>

FEOFILOFF, P.; KOHAYAKAWA, Y.; WAKABAYASHI, Y. **Uma introdução sucinta à teoria dos grafos**. São Paulo: Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 2011.

FERREIRA, R. H. A. **Avaliação do custo de construção em função do traçado da rede coletora de esgoto sanitário**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

FONSECA, R. M. C.; SARMENTO, A. P.; PAULA, H. M. Práticas executivas de redes coletoras de esgoto sanitário. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, n. 3, p. 61–69, 2014. DOI: 10.5216/reec.v9i3.32031

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de saneamento**. 3. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006.

GEHLING, G. R.; BENETTI, A. D. Aceitabilidade de sistema combinado de esgotos em planos diretores de esgotamento sanitário. **In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. João Pessoa, 2005.

GOMES, P. C. R. **Grafos: conceitos fundamentais, algoritmos e aplicações**. Blumenau: Editora do Instituto Federal Catarinense, 2022.

HAGER, W. H. **Wastewater hydraulics: theory and practice**. 2. ed. Berlin: Springer, 2010.

HASSAN, W. H.; JASSEM, M. H.; MOHAMMED, S. S. A GA-HP model for the optimal design of sewer networks. **Water Resources Management**, v. 32, p. 865–879, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1843-y>

INSTITUTO TRATA BRASIL; GO ASSOCIADOS. **Ranking do saneamento do Instituto Trata Brasil de 2025 (SNIS/SINISA 2023)**. São Paulo, 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

ITO, A. H. **Otimização no traçado e dimensionamento de redes coletoras de esgoto sanitário**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

JURKIEWICZ, S. **Grafos – Uma introdução**. Rio de Janeiro: Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

KAVEH, A. New developments in graph products and applications in structural engineering. **Pollack Periodica**, v. 7, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1556/pollack.7.2012.s.10>

MA, W.; WANG, D.; TING, K. L. A graph-based approach for hydraulic system automated conceptual design. **ASME/IFTOMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots**, 2009.

MELO, G. S. **Introdução à Teoria dos Grafos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, João Pessoa, 2014.

MENDONÇA, S. R.; MENDONÇA, L. C. **Sistemas sustentáveis de esgotos orientações técnicas para projeto e dimensionamento de redes coletoras, emissários, canais, estações elevatórias, tratamento e reuso na agricultura**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

MEXAS, M. P. **Um estudo sobre técnicas de busca em grafos e suas aplicações**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1982.

MOEINI, R.; AFSHAR, M.H. Arc Based Ant Colony Optimization Algorithm for optimal design of gravitational sewer networks. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 8, p. 207–223, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.03.003>

NETTO, J. M. A.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

PEREIRA, J. A. R.; SILVA, J. M. S. **Rede coletora de esgoto sanitário: projeto, construção e operação**. 2. ed. rev. e ampl. Belém, 2010.

PORTUGAL, A. C.; GONZAGA, V. C. **Gestão, controle e regulação do saneamento básico**. 2. ed. Florianópolis: Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas – IBRAOP, 2025.

RANGEL, S.; OLIVEIRA, V. A.; ARAÚJO, S. A. **Elementos de teoria dos grafos: notas de aula**. São José do Rio Preto: Universidade Estadual Paulista – UNESP, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, 2018.

REZENDE, P. C. **Algoritmos em grafos: material didático**. Campinas: Universidade de Campinas, 2002.

RIBEIRO, V. O.; CORREIA, N. F.; SILVA, J. V. M. A. **Notas de projeto: redes coletoras de esgoto**. Seven Publicações Acadêmicas, v. 1, 2024. DOI: 10.56238/livrosindi202446-001

RODRIGUES, G. P. W. **Computação gráfica e modelagem computacional aplicadas ao traçado e dimensionamento hidráulico de redes coletoras de esgoto sanitário**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

RODRIGUES, G. P. W.; COSTA, L. H. M.; FARIAS, G. M.; CASTRO, M. A. H. A depth-first search algorithm for optimizing the gravity pipe networks layout. **Water Resources Management**, v. 33, p. 4583–4598, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02373-x>

SANTOS, A. N. S.; VALERIO, E. C. N.; FRAGA, F. V.; SOUZA, C. M. D.; TOSSANI, H. A.; FARIAS, F. M.; SOUSA, M. G. S.; GUIMARÃES, E.; ASSUNÇÃO, I. D.; XAVIER, T. S.; TERTO, F. L.; BRITO, A. S. L.; NASCIMENTO, R. L.; MORAES, F. M.; OLIVEIRA, A. S. Radiografia do saneamento básico no Brasil”: navegando pelos labirintos da gestão do saneamento básico em cidades brasileiras em 2024 e as consequências para a população. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 8, p. 1–30, 2024.

SANTOS, G. R.; MENDES, A. T. Dados e indicadores dos serviços de água e esgotamento sanitário no Brasil. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, v. 29, p. 171-189, 2023.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO BÁSICO (SINISA). **Relatório dos Serviços de Esgotamento Sanitário**. Brasília, 2024.

STEELE, J. C.; MAHONEY, K.; KAROVIC, O.; MAYS, L. W. Heuristic optimization model for the optimal layout and pipe design of sewer systems. **Water Resources Management**, v. 30, p. 1605-1620, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1191-8>

SZWARCFITER, J. L. **Teoria computacional de grafos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

TURAN, M.E.; BACAK-TURAN, G.; CETIN, T.; ASLAN, E. Feasible sanitary sewer network generation using graph theory. **Advances in Civil Engineering**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/8527180>

VOLSCHAN, I. Sistema unitário x sistema separador absoluto. **Revista DAE**, n. 180, p. 40–43, 2009.

WILSON, R. J. **Introduction to Graph Theory**. 4. ed. Harlow: Longman, 1996.