



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

**ARTEMISA FONTINELE FROTA**

**GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA A PARTIR  
DA DEFINIÇÃO DAS LINHAS CENTRAIS DAS RUAS**

**FORTALEZA**

**2023**

ARTEMISA FONTINELE FROTA

GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA A PARTIR DA  
DEFINIÇÃO DAS LINHAS CENTRAIS DAS RUAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Ph.D. Marco Aurélio Holanda de Castro.

Coorientador: Prof. Ph.D. Luis Henrique Magalhães Costa.

FORTALEZA

2023

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)

---

F961g Frota, Artemisa Fontinele.  
Geração automática de redes de distribuição de água a partir da definição das linhas centrais das ruas /  
Artemisa Fontinele Frota. – 2023.  
75 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2023.

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

Coorientação: Prof. Dr. Luis Henrique Magalhães Costa.

1. Redes de distribuição de água. 2. Linha central da rua. 3. EPANET. 4. Equações paramétricas de retas.  
I. Título.

CDD 627

---

ARTEMISA FONTINELE FROTA

GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA A PARTIR DA  
DEFINIÇÃO DAS LINHAS CENTRAIS DAS RUAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 13 / 02 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes  
Universidade Federal do Pará (UFPA)

A Deus, todo poderoso.

À toda a minha família, em especial aos meus pais Mildredes e Vicente, e a todos que me apoiaram durante este processo.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por me conceder saúde e capacidade durante todas as etapas da minha vida até agora, sendo fonte de amor, perseverança, justiça e esperança.

Aos meus pais, Mildredes e Vicente, por todo cuidado, esforço e amor incondicional que dedicaram a mim desde sempre, pelo apoio e incentivo aos meus sonhos, por não medir esforços em buscar minha felicidade. Obrigada por serem minha fortaleza.

A todos da minha família, por suas palavras de apoio e por acreditarem no meu potencial. Em especial, agradeço à minha irmã mais velha Tamirys, que sempre foi minha amiga, confidente e apoiadora, que comemorou cada vitória minha como se fosse sua e me ajudou a superar os diversos desafios que a vida adulta traz.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marco Aurélio, pela excelente orientação, sendo uma referência para mim como profissional e professor.

Ao meu querido coorientador Prof. Dr. Luis Henrique, que para mim é um exemplo de profissional e pessoa desde o início da minha graduação, sendo o maior incentivador da minha carreira acadêmica. Obrigada por todo o conhecimento repassado, pelas oportunidades, pelo reconhecimento e confiança dados a mim, pela paciência e dedicação em cada orientação e, por fim, por todos os conselhos e pela amizade que foi construída durante todos esses anos.

Ao Prof. José Nilton de Abreu Costa, pela ajuda e orientação quanto à fundamentação matemática da metodologia proposta, a qual foi indispensável para elaboração desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes, por aceitar fazer parte da banca examinadora, pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos demais colegas e amigos que a Universidade Federal do Ceará (UFC) me proporcionou, em especial, minha amiga e companheira de estudos Rosa Lindjhenys, que foi um grande apoio para mim durante o mestrado. Agradeço por todas as conversas e seu companheirismo, que me ajudaram em momentos difíceis dessa jornada.

Aos professores da Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), pela dedicação aos alunos, pelo apoio e incentivo à pesquisa.

Ao meu namorado Genisson, que desde o ensino médio me apoiou em todas as minhas decisões e me incentivou a sempre buscar meu crescimento profissional e pessoal, sendo para mim uma fonte de força e amor.

Aos meus demais amigos, que contribuíram com palavras de apoio e estiveram comigo durante esse processo. Agradeço especialmente às minhas amigas de infância, Narcisia

e Ana Keyla, que foram fundamentais em todas as minhas conquistas, sempre me apoiando incentivando e sendo fonte de conforto para mim.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio concedida a mim durante o período de desenvolvimento desta dissertação.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

“Tudo posso naquele que me fortalece.”  
(Filipenses, 4:13).

## RESUMO

Este trabalho propõe um algoritmo de geração automática do traçado de redes de distribuição de água no EPANET utilizando apenas o layout das ruas contido em um arquivo CAD. Para isso, foi feita a leitura de um arquivo CAD, cuja extensão é DXF, e foram identificadas todas as entidades que compõem os limites das ruas, sendo realizada a conversão dos arcos em conjuntos de linhas de pequeno comprimento que formem uma geometria semelhante ao arco original. Dessa forma, todo o layout das ruas será composto apenas por linhas, as quais serão trabalhadas matematicamente por meio de equações paramétricas de retas. Para isso, inicialmente são definidas as linhas centrais das ruas em uma primeira versão, as quais são estendidas gerando pontos de interseção que serão utilizados para determinar os nós da rede. Logo após, as linhas que interceptarem o layout das ruas são aparadas, garantindo que todas as linhas centrais fiquem totalmente dentro dos limites das ruas. Em seguida, são geradas as tubulações que ligam os nós os quais foi comprovado conectividade e, por fim, as junções das tubulações são identificadas para criação do arquivo de entrada do EPANET. Três layouts de ruas com diferentes particularidades foram utilizados para comprovação da eficácia do modelo, sendo um hipotético e dois reais. Para todos os layouts de ruas testados, o algoritmo proposto obteve resultados satisfatórios, gerando automaticamente todo o traçado das redes em um arquivo de entrada do EPANET. Além disso, os resultados foram comparados com os obtidos pelo modelo de Costa e Rodrigues (2021), que é um trabalho pioneiro sobre o tema. Vale destacar que o presente modelo traz como inovação o bom desempenho tanto para ruas ortogonais quanto para ruas inclinadas e arqueadas.

**Palavras-chave:** redes de distribuição de água; linha central da rua; EPANET; equações paramétricas de retas.

## ABSTRACT

This work proposes an algorithm for automatically generating the layout of water distribution networks in EPANET using only the layout of the streets contained in a CAD file. For this, a CAD file was read, whose extension is DXF, and all the entities that make up the boundaries of the streets were identified, and the arcs were converted into sets of short lines that form a geometry similar to the arc original. In this way, the entire layout of the streets will be composed only of lines, which will be mathematically worked through parametric equations of straight lines. For this, initially the central lines of the streets are defined in a first version, which are extended generating intersection points that will be used to determine the nodes of the network. Afterwards, the lines that intersect the street layout are trimmed, ensuring that all centerlines are fully within the street boundaries. Next, the pipelines connecting the nodes with proven connectivity are generated and, finally, the junctions of the pipelines are identified to create the EPANET input file. Three street layouts with different particularities were used to prove the effectiveness of the model, one hypothetical and two reals. For all street layouts tested, the proposed algorithm obtained satisfactory results, automatically generating all the network layouts in an EPANET input file. In addition, the results were compared with those obtained by the model by Costa and Rodrigues (2021), which is a pioneering work on the subject. It is worth mentioning that the present model brings as an innovation the good performance both for orthogonal streets and for inclined and arched streets.

**Keywords:** water distribution networks; central street lines; EPANET; parametric equations of lines.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Possíveis situações para as retas p e q.....	22
Figura 2	– Fluxograma do modelo proposto.....	26
Figura 3	– Segmentos de retas e pontos do problema.....	28
Figura 4	– 1ª condição para duas linhas formarem uma rua não atendida.....	31
Figura 5	– Pontos que definem a reta da linha central da rua.....	33
Figura 6	– Correção para layouts com canteiro central.....	37
Figura 7	– Identificação das linhas para cada uma das situações possíveis.....	38
Figura 8	– Linha a ser estendida.....	39
Figura 9	– Estendendo as linhas centrais das ruas.....	40
Figura 10	– Cortando as linhas centrais das ruas na interseção com o layout.....	41
Figura 11	– Definição dos nós da rede.....	43
Figura 12	– Influência das estratégias na centralização das linhas.....	43
Figura 13	– Análise dos nós para definição das tubulações.....	44
Figura 14	– Exemplo real do estudo de caso 1.....	49
Figura 15	– Estudo de caso 1: Layout lido e linhas centrais da rua em uma primeira versão.....	49
Figura 16	– Estudo de caso 1: Linhas centrais das ruas atualizadas.....	50
Figura 17	– Estudo de caso 1: Nós iniciais da rede.....	51
Figura 18	– Estudo de caso 1: Tubulações iniciais da rede.....	51
Figura 19	– Rede gerada no EPANET pelo modelo proposto para o exemplo real do estudo de caso 1.....	52
Figura 20	– Rede gerada no EPANET por Costa e Rodrigues (2021) para o exemplo real do estudo de caso 1.....	53
Figura 21	– Layout hipotético do estudo de caso 2.....	55
Figura 22	– Ângulos em relação a horizontal do layout hipotético do estudo de caso 2....	55

Figura 23 – Estudo de caso 2: Layout lido e linhas centrais das ruas em uma primeira versão.....	56
Figura 24 – Estudo de caso 2: Linhas centrais das ruas atualizadas.....	57
Figura 25 – Estudo de caso 2: Nós iniciais da rede.....	58
Figura 26 – Estudo de caso 2: Tubulações iniciais da rede.....	58
Figura 27 – Rede gerada no EPANET pelo modelo proposto para o exemplo hipotético do estudo de caso 2.....	60
Figura 28 – Rede gerada no EPANET por Costa e Rodrigues (2021) para o exemplo hipotético do estudo de caso 2.....	60
Figura 29 – Detalhe de falhas geradas por Costa e Rodrigues (2021) .....	61
Figura 30 – Exemplo de layout de ruas real do estudo de caso 3.....	63
Figura 31 – Estudo de caso 3: Layout lido e linhas centrais das ruas em uma primeira versão.....	63
Figura 32 – Estudo de caso 3: Linhas centrais das ruas após correção para avenidas com canteiro central.....	64
Figura 33 – Estudo de caso 3: Linhas centrais das ruas atualizadas.....	64
Figura 34 – Estudo de caso 3: Nós iniciais da rede.....	65
Figura 35 – Estudo de caso 3: Tubulações iniciais da rede.....	65
Figura 36 – Rede gerada no EPANET pelo modelo proposto para exemplo real do estudo de caso 3.....	66
Figura 37 – Rede gerada no EPANET pelo modelo de Costa e Rodrigues (2021) para exemplo real do estudo de caso 3.....	66
Figura 38 – Estudo de caso 3: Detalhe da rotatória central gerada pelo modelo proposto.	67
Figura 39 – Estudo de caso 3: Detalhe da rotatória central gerada por Costa e Rodrigues (2021) .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis de entrada utilizadas para os três estudos de caso.....	47
Tabela 2 – Resumo dos resultados para os 3 estudos de caso.....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Design assistido por computador, em português)
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i> (Formato de Troca de Desenho, em português)
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de desenvolvimento integrado, em português)
LCR	Linha central da rua
MDS	<i>Modular Design System</i> (Sistema de design modular, em português)
RDA	Rede de distribuição de água
SNIS	Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento
UFC	Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Problematização e contextualização</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>19</b>
1.2.1	Objetivo Geral.....	19
1.2.2	Objetivos Específicos.....	19
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Vetor diretor</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2</b>	<b>Equações paramétricas de retas</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Interseção entre retas</b> .....	<b>22</b>
<b>2.4</b>	<b>Ângulo entre dois vetores</b> .....	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Linguagem de programação</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Fluxograma do modelo</b> .....	<b>25</b>
<b>3.3</b>	<b>Leitura do layout das ruas</b> .....	<b>27</b>
<b>3.4</b>	<b>Linha central da rua</b> .....	<b>27</b>
3.4.1	Identificando pares de linhas que formam ruas .....	28
3.4.1	Pontos que definem a linha central da rua na primeira versão.....	32
3.4.2	Correção para avenidas com canteiro central .....	36
3.4.3	Atualização da linha central da rua .....	38
<b>3.5</b>	<b>Identificação dos nós</b> .....	<b>41</b>
3.5.1	Estratégia 1 – Média das coordenadas dos pontos.....	41
3.5.2	Estratégia 2 – Ponto que gere a menor alteração no ângulo das linhas centrais das ruas .....	42
3.5.3	Comparação entre as estratégias 1 e 2 .....	
<b>3.6</b>	<b>Identificação dos tubos</b> .....	<b>43</b>

		15
3.7	<b>Geração da rede no EPANET .....</b>	<b>45</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>47</b>
4.1	<b>Estudo de caso 1 – Exemplo real de Rodrigues et. al (2019).....</b>	<b>48</b>
4.2	<b>Estudo de caso 2 – Exemplo hipotético .....</b>	<b>54</b>
4.3	<b>Estudo de caso 3 – Exemplo real de loteamento.....</b>	<b>62</b>
4.4	<b>Aparato geral de resultados .....</b>	<b>68</b>
5	<b>DISPONIBILIDADE DE DADOS.....</b>	<b>70</b>
6	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste tópico é introduzido o tema do presente estudo, em que são feitas a problematização e a contextualização que justificam a necessidade desta dissertação. Além disso, será apresentada uma síntese do referencial teórico e da metodologia utilizada para desenvolver este estudo. Por último, são definidos os objetivos gerais e específicos deste trabalho, assim como a estrutura do mesmo, enumerando cada um dos tópicos que serão abordados no decorrer desta leitura.

### 1.1 Problematização e contextualização

A rede de distribuição de água (RDA) é um dos principais componentes do sistema de abastecimento de água, sendo definida por Gomes (2004) como o conjunto de tubulações, conexões e peças destinado a conduzir água em quantidade, qualidade e pressão suficientes para o abastecimento dos diversos pontos de consumo, sejam eles de uso doméstico, industrial ou público.

Dessa forma, as redes de distribuição de água têm sido objeto de estudo para os mais diversificados tipos de pesquisas, que abordam temas relacionados a implantação, ampliação e operação do sistema. Além disso, destaca-se o fato de que grande parte dos estudos realizados utilizam redes de referência fictícias. Em alguns casos, essas redes diferem muito da realidade, o que incentivou diversos autores a desenvolverem metodologias para criação de RDAs que possuíssem aspectos reais e atendessem as necessidades específicas dos pesquisadores da área.

Möderl et al. (2007), por exemplo, aplicou uma abordagem estocástica para avaliação de desempenho em sistemas de distribuição de água, em que os autores desenvolveram um sistema de design modular (MDS) para sistemas de distribuição de água, sendo possível criar uma variedade de sistemas de distribuição de água diferentes.

Posteriormente, Möderl et al. (2011) apresentaram um estudo para geração sistemática de redes virtuais para abastecimento de água, sendo criadas uma infinidade de redes com características divergentes usando o MDS baseado em teoria dos grafos. Os autores destacam que o layout e as propriedades desses sistemas são representativos de exemplos típicos encontrados na prática, fazendo uma comparação do conjunto virtual com três estudos de caso do mundo real e demonstrando que os sistemas possuem características semelhantes.

Muranho et al. (2012), por outro lado, inovaram desenvolvendo uma extensão do software EPANET, cujo nome é WaterNetGen, a qual fornece um procedimento automático para gerar modelos sintéticos de RDAs. Outra ferramenta foi elaborada por Trifunović et al. (2013) visando a geração de redes sintéticas com propriedades predefinidas ou randomizadas, a qual é baseada nos princípios da teoria dos grafos e conecta qualquer semente de nós preparada no software EPANET, evitando cruzamentos de tubos ou duplicações desnecessárias.

Sitzenfrei et al. (2013) também publicou uma proposta para geração de RDAs a partir de sistemas de informações geográficas (GIS) utilizando densidade geográfica, densidade habitacional e elevação como dados de entrada. Destaca-se também De Corte e Sörensen (2014), que desenvolveram a ferramenta HydroGen, que gera RDAs de tamanho arbitrário e características variadas em formato EPANET ou GraphML. Outra metodologia mais recente encontrada na literatura é a proposta por Hallmann e Kuhlemann (2018), em que os autores propõem um gerador para modelos de rede de água com tamanho arbitrário e propriedades realistas.

Posto isso, nota-se que muitos autores realizaram estudos para gerar RDAs fictícias que apresentassem características realistas e diversas. Dessa forma, essas redes poderiam ser utilizadas como estudo de caso para testar ou comparar estratégias de otimização e software recém-desenvolvido ou até mesmo serem usadas para *benchmarking*, o que justifica o empenho dos autores para que essas redes virtuais apresentem características mais realistas o possível.

Entretanto, cada vez mais, a necessidade de implementar métodos que criem redes reais aumenta para atender não só a demanda dos pesquisadores como também auxiliar o trabalho de profissionais da área do saneamento. O rápido crescimento da população e da urbanização representam um grande desafio para os engenheiros municipais na tomada de decisão quanto a construção, operação e manutenção de sistemas de distribuição de água.

No Brasil, por exemplo, cada vez mais a importância do saneamento é reconhecida por meio do aumento dos investimentos na área. A Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007), que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, foi sancionada em 2007, quando o índice médio de atendimento do abastecimento de água era de 80,9% da população total, segundo o SNIS (PMSS, 2009). Conforme BRASIL (2019), esse percentual aumentou para 83,5% em 2017, mostrando que ainda não ocorreu a universalização desse serviço mesmo após 10 anos da criação da Lei nº 11.445. Dessa forma, foi criada em 2020 a Lei nº 14.026 (BRASIL, 2020), que atualiza o marco legal do saneamento básico e tem como uma das metas que, até o final do ano de 2033, o atendimento da população com água potável deve ser pelo menos de 99%.

Dessa forma, alguns softwares foram desenvolvidos visando a aplicação em projetos reais de RDAs. O EpaCAD (ITA, 2020) e AQUACAD (Costa, 2019), por exemplo, são recursos gratuitos que convertem um arquivo CAD em um arquivo EPANET, importando automaticamente as principais propriedades dos componentes da RDA, entretanto, é preciso que primeiramente as tubulações sejam desenhadas manualmente no arquivo AutoCAD. Outra ferramenta que automatiza parte do processo de construção da RDA é o Sistema UFC, desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional da UFC (Universidade Federal do Ceará), porém, também deixa a cargo do usuário o lançamento do layout da rede.

Assim, automatizar o processo de lançamento do traçado consiste em um grande desafio para os pesquisadores da área, sendo a diversidade de traçados urbanos um dos maiores obstáculos. Conforme Mascaró (2005), os traçados urbanos são definidos a partir da topografia local, das características dos usuários e do motivo pelo qual transitam pelas vias, podendo ser ortogonais, que apresentam menor custo e maior taxa de aproveitamento do espaço, ou não-ortogonais. Além disso, o traçado urbano ainda pode apresentar malhas fechadas, abertas ou semiabertas ou até mesmo ser uma combinação de diversos tipos de traçados.

Todavia, um modelo foi desenvolvido por Costa e Rodrigues (2021) para geração automática de RDAs em um arquivo de entrada EPANET, o qual converte o layout do arranjo das ruas projetado em ambiente CAD em uma imagem binária e utiliza um conjunto de algoritmos desenvolvido sobre o tema processamento de imagem binária, sendo utilizados como estudos de caso um layout hipotético e outro real. Entretanto, os autores destacam que para arruamentos com grande número de ruas inclinadas, tubos e nós podem ser gerados de forma inadequada, o que não ocorre em situações em que todas as ruas são ortogonais.

Posto isso, este trabalho apresenta um algoritmo de geração automática do traçado de RDAs no EPANET a partir dos arruamentos contidos em um arquivo CAD, que pode ser aplicado para variados tipos de arranjos de ruas, sejam elas ortogonais, inclinadas ou arqueada. Com esse intuito, o algoritmo tem início com a leitura do arquivo CAD que contém o arruamento salvo com a extensão DXF (*Drawing Exchange Format*), fazendo a conversão de todas as entidades que compõem os limites das ruas em linhas, para, posteriormente, definir as linhas centrais das ruas (LCRs) por meio das equações paramétricas de retas. Em seguida, as linhas centrais das ruas são estendidas gerando pontos de interseção entre elas, os quais serão utilizados para determinar os nós da rede de modo que altere o mínimo possível os ângulos das linhas centrais das ruas. Para identificação das tubulações é necessário checar a conectividade entre os nós por meio de duas condições, as quais serão detalhadas posteriormente.

Por fim, são definidas as junções das tubulações e a rede pode ser criada em um arquivo de entrada do EPANET, cuja extensão é INP. Logo, este modelo, da mesma forma que o de Costa e Rodrigues (2021), automatiza totalmente o processo de construção do traçado da rede, não sendo preciso que o usuário lance manualmente as tubulações no desenho, entretanto, apresenta como inovação o fato de que, até o momento, não foram identificadas restrições quanto ao arranjo das ruas, sendo aplicado a todos os tipos de redes reais.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo Geral***

O objetivo geral do presente trabalho é criar um algoritmo de geração automática do traçado de redes de distribuição de água em um arquivo de entrada do EPANET a partir do layout das ruas desenhado em um arquivo CAD, o qual pode ser aplicado para os mais diversos tipos de arranjos de ruas.

Dessa forma, esse modelo pode ser utilizado por pesquisadores e profissionais da área como uma ferramenta rápida e de fácil uso para a geração de redes de distribuição de água de forma automática, sem a necessidade de preparar o traçado da rede manualmente ou de fazer posteriores correções no layout gerado.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

São objetivos específicos dessa dissertação:

- Converter todas as entidades que constituem o layout das ruas em linhas para que sejam tratadas matematicamente como segmentos de retas;
- Definir a linha central de todas as ruas por meio de uma metodologia fundamentada na aplicação de equações paramétricas de retas;
- Identificar os nós e os tubos que compõem a rede de distribuição de água;
- Criar um arquivo de entrada do EPANET (extensão INP) contendo a rede de distribuição de água;
- Executar o algoritmo proposto para 3 estudos de casos com diferentes características, visando a comprovação da eficácia do modelo para variados tipos de arruamentos;

- Comparar os resultados obtidos por este modelo com outro trabalho pioneiro sobre o tema.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

**Capítulo 1** – Introdução do trabalho, em que é contextualizado e problematizado o tema, justificando a necessidade do presente estudo. Em seguida, são expostos os objetivos e a estrutura deste trabalho.

**Capítulo 2** – Referencial teórico, sendo apresentada a fundamentação matemática utilizada para desenvolvimento do modelo.

**Capítulo 3** – Metodologia, expondo todo o processo de desenvolvimento do modelo, desde a leitura do arquivo DXF até a geração do arquivo de entrada do EPANET.

**Capítulo 4** – Resultados e discussões, em que são apresentados três estudos de caso e feito a comparação dos resultados com os de outra metodologia pioneira sobre o tema.

**Capítulo 5** – Disponibilidade de dados, em que são fornecidas as informações sobre todos os arquivos criados nesta dissertação.

**Capítulo 6** – Conclusão, que finaliza o estudo visando declarar o cumprimento dos objetivos e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma revisão teórica da fundamentação matemática utilizada para o desenvolvimento deste projeto. Assim, as retas foram abordadas quanto a sua representação por meio de equações paramétricas, sendo expostos conceitos e deduções necessárias para o entendimento da metodologia aplicada para a criação do algoritmo proposto.

### 2.1 Vetor diretor

Os vetores do plano ou do espaço são representados por segmentos orientados, isto é, aqueles que têm a mesma direção, o mesmo sentido e o mesmo comprimento. Assim, o vetor diretor de uma reta ( $\vec{u}$ ) pode ser qualquer vetor não-nulo e paralelo a ela. Para o cálculo do vetor diretor é necessário conhecer apenas dois pontos pertencentes a reta, cujas coordenadas são representadas por  $(x_1, y_1, z_1)$  e  $(x_2, y_2, z_2)$ , conforme apresenta a equação (1), em que  $a$ ,  $b$  e  $c$  são as componentes do vetor diretor.

$$\vec{u} = (a, b, c) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \quad (1)$$

O vetor diretor unitário de uma reta ( $\vec{u}_u$ ), por sua vez, é aquele cujo modulo é igual a 1 e pode ser calculado utilizando a equação (2), em que  $a_u$ ,  $b_u$  e  $c_u$  são as componentes do vetor diretor unitário.

$$\vec{u}_u = (a_u, b_u, c_u) = \left( \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \quad (2)$$

### 2.2 Equações paramétricas de retas

Ao examinar retas de maneira analítica, qualquer reta pode ser representada por um sistema de equações cujo conjunto de soluções é igual ao conjunto dos pontos da reta. Esse sistema é denominado como equações paramétricas e pode ser aplicado para calcular as coordenadas  $(x, y, z)$  de um ponto da reta em função de um parâmetro, que nesse caso foi chamado de  $\lambda$ , como apresenta o sistema de equações (3), em que  $(x_0, y_0, z_0)$  são as coordenadas de um ponto conhecido da reta.

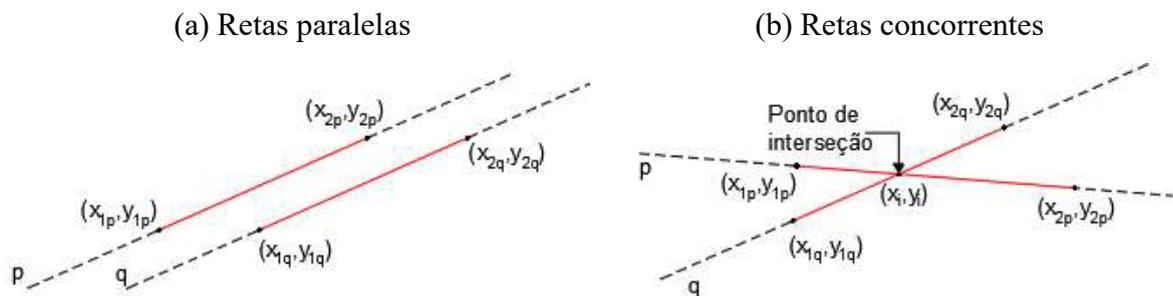
$$\begin{cases} x = x_0 + \lambda a & (3a) \\ y = y_0 + \lambda b \quad (\lambda \in R) & (3b) \\ z = z_0 + \lambda c & (3c) \end{cases}$$

Vale ressaltar que as equações paramétricas determinam todos os pontos pertencentes à reta, a qual apresenta comprimento infinito. Dessa forma, um ponto calculado utilizando essas equações pode não pertencer ao segmento de reta delimitado pelos pontos utilizados para o cálculo do vetor diretor.

### 2.3 Interseção entre retas

A Figura 1 ilustra duas retas quaisquer denominadas de p e q em duas possíveis situações: as retas são paralelas (Figura 1a) ou as retas são concorrentes (Figura 1b). Os vetores diretores das retas p e q são definidos pelas equações (4) e (5), respectivamente.

Figura 1 – Possíveis situações para as retas p e q



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\vec{u}_p = (a_p, b_p) = (x_{2p} - x_{1p}, y_{2p} - y_{1p}) \quad (4)$$

$$\vec{u}_q = (a_q, b_q) = (x_{2q} - x_{1q}, y_{2q} - y_{1q}) \quad (5)$$

Para determinar se duas retas são concorrentes ou paralelas deve-se calcular o determinante de seus vetores diretores, conforme apresenta a equação (6). Se o determinante for igual a zero as retas são paralelas, caso o contrário ( $\det \neq 0$ ) as retas são concorrentes, ou seja, se interceptam em um ponto.

$$\det = \begin{vmatrix} a_p & b_p \\ a_q & b_q \end{vmatrix} = a_p b_q - a_q b_p \quad (6)$$

Sendo as retas concorrentes, o ponto de interseção pode ser calculado utilizando as equações paramétricas. Assim, as equações paramétricas da reta p são dadas pelo sistema da

equação (7) em função do parâmetro  $\lambda$ , ao passo que a reta q é representada pelo sistema da equação (8) em função do parâmetro  $\mu$ .

$$\begin{cases} x_p = x_{1p} + a_p \lambda \\ y_p = y_{1p} + b_p \lambda \end{cases} \quad \begin{matrix} (7a) \\ (7b) \end{matrix}$$

$$\begin{cases} x_q = x_{1q} + a_q \mu \\ y_q = y_{1q} + b_q \mu \end{cases} \quad \begin{matrix} (8a) \\ (8b) \end{matrix}$$

Igualando as equações de x e y dos sistemas das equações (7) e (8) obtém-se as equações (9) e (10):

$$x_{1p} + a_p \lambda = x_{1q} + a_q \mu \quad (9)$$

$$y_{1p} + b_p \lambda = y_{1q} + b_q \mu \quad (10)$$

A etapa seguinte é calcular um dos parâmetros ( $\lambda$  ou  $\mu$ ) e substituí-lo nas equações de sua respectiva reta. Dessa forma, optou-se por calcular o valor do parâmetro  $\lambda$ . Colocando em evidência o parâmetro  $\mu$  na equação (9), foi obtida a equação (11).

$$\mu = \frac{x_{1p} - x_{1q} + a_p \lambda}{a_q} \quad (11)$$

Substituindo a equação (11) na equação (10) e isolando o parâmetro  $\lambda$ , tem-se a equação (12):

$$\lambda = \frac{a_q (y_{1p} - y_{1q}) + b_q (x_{1q} - x_{1p})}{a_p b_q - a_q b_p} \quad (12)$$

Substituindo a equação (12) na equação (7), tem-se as coordenadas do ponto de interseção [equação (13)].

$$x_i = x_{1p} + a_p \left[ \frac{a_q (y_{1p} - y_{1q}) + b_q (x_{1q} - x_{1p})}{a_p b_q - a_q b_p} \right] \quad (13a)$$

$$y_i = y_{1p} + b_p \left[ \frac{a_q (y_{1p} - y_{1q}) + b_q (x_{1q} - x_{1p})}{a_p b_q - a_q b_p} \right] \quad (13b)$$

## 2.4 Ângulo entre dois vetores

Para calcular o ângulo entre dois vetores será utilizado como exemplo as retas p e q (Seção 2.3), visto que seus vetores diretores já estão definidos. Assim, o cosseno do ângulo  $\theta$  formado entre as duas retas, tal que  $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ , é definido pela equação (14), sendo  $\|\vec{u}_p\|$  e  $\|\vec{u}_q\|$  as normas dos vetores diretores das retas p e q, respectivamente.

$$\cos \theta = \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{u}_q}{\|\vec{u}_p\| \cdot \|\vec{u}_q\|} \quad (14)$$

Colocando a equação (14) em função das componentes dos vetores diretores e evidenciando  $\theta$ , obtém-se valor do ângulo formado entre as duas retas, conforme apresenta a equação (15).

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{a_p a_q + b_p b_q}{\sqrt{a_p^2 + b_p^2} \cdot \sqrt{a_q^2 + b_q^2}} \right) \quad (15)$$

### 3 METODOLOGIA

Esta seção é destinada ao detalhamento de todos os procedimentos metodológicos empregados na elaboração do algoritmo abordado no presente trabalho. Inicialmente foram apresentados os recursos necessários para criação e execução do código. Em seguida, foi apresentado o fluxograma do modelo proposto, em que foi descrito sucintamente cada uma das etapas do modelo. Logo após, foi explicado o tratamento dado às informações obtidas a partir de leitura do arquivo de entrada visando o reconhecimento do layout das ruas. As próximas subseções destacaram os procedimentos utilizados para definição das linhas centrais das ruas e para identificação dos nós e dos tubos da rede de distribuição de água. Por fim, foi apresentado o processo de geração do arquivo de entrada do EPANET.

#### 3.1 Linguagem de programação

O algoritmo foi elaborado utilizando a IDE (*Integrated Development Environment*) Microsoft Visual Studio 2019 e a linguagem de programação C#. Conforme enfatiza Microsoft Learn (2022), o C# é uma linguagem moderna, orientada a objeto e fortemente tipada, permitindo que os desenvolvedores criem muitos tipos de aplicativos seguros e robustos. Vale destacar que por ser uma linguagem orientada a objetos as entidades contidas no arquivo CAD podem ser manuseadas via programação de maneira rápida e direta.

Ressalta-se ainda que para o desenvolvimento e a execução do modelo utilizou-se um computador com processador Intel® Core™ i7-8565U, velocidade base de 1,99 GHz, 4 núcleos, 8 processadores lógicos, memória RAM instalada de 16 GB e caches L1, L2 e L3 iguais a 256KB, 1 MB e 8 MB, respectivamente.

#### 3.2 Fluxograma do modelo

Para gerar automaticamente a RDA a partir do arruamento é preciso identificar e caracterizar, via linguagem de programação, todas as entidades que formam o layout das ruas. Posto isso, o arruamento deve ser desenhado no ambiente CAD e salvo no formato DXF, o qual conterá todas as informações relativas ao desenho na forma de códigos.

Desse modo, o algoritmo começa com a leitura do arquivo DXF e a decodificação do tipo e da posição de todas as entidades que foram desenhadas no layer dos limites das ruas, as quais devem ser do tipo linha ou arco. Em seguida, cada arco identificado deve ser convertido

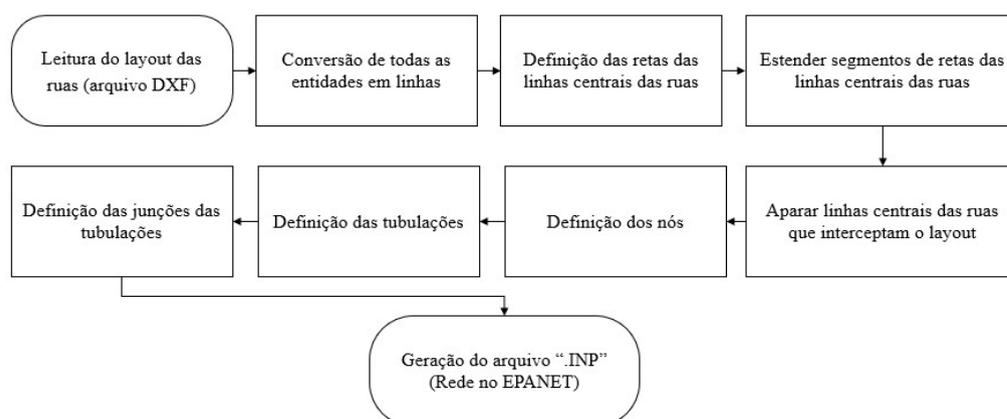
em um conjunto de linhas de pequeno comprimento que forme uma geometria semelhante ao arco original, visto que a metodologia aplicada neste trabalho é baseada em equações paramétricas de retas. Assim, o algoritmo considera que o layout das ruas é formado apenas por linhas, sendo elas tratadas matematicamente como segmentos de reta.

O próximo passo é determinar as equações paramétricas das retas das linhas centrais de cada uma das ruas, sendo elas imprescindíveis para execução das próximas etapas. Para isso, inicialmente são definidos os pares de linhas que formam ruas e posteriormente são traçadas as linhas centrais das ruas em uma primeira versão, dado que seus pontos extremos serão ajustados nas seguintes etapas.

Logo após, as linhas centrais das ruas são estendidas a uma distância em que elas se interceptem nos cruzamentos. Em seguida, visto que nenhum ponto dessas linhas pode estar fora das ruas, as linhas que apresentarem interseção com alguma linha do layout das ruas são aparadas. Para a identificação dos nós da RDA são utilizados os pontos de interseção entre as linhas centrais das ruas, sendo escolhido como nó para cada cruzamento o ponto de interseção que modifique o menos possível os ângulos das linhas centrais das ruas.

A etapa subsequente é definir as tubulações da rede, em que é verificada a conectividade entre cada um dos nós. Desse modo, para que haja conectividade entre dois nós, a tubulação criada não deve interceptar os limites das ruas e o ângulo formado entre ela e os outros tubos que estariam conectados aos mesmos nós deve ser analisado quanto a um ângulo limite definido. Ademais, os nós que apresentam apenas duas tubulações conectadas, sendo o ângulo entre essas tubulações maior que um ângulo limite informado pelo usuário, são transformados em junções de tubulações. Por fim, o arquivo de entrada do EPANET que contém o layout da rede é gerado. A Figura 2 apresenta o fluxograma do modelo proposto.

Figura 2 – Fluxograma do modelo proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 Leitura do layout das ruas

O layout das ruas deve ser desenhado em um ambiente CAD utilizando apenas entidades dos tipos linha e arco, sendo o arquivo salvo no formato DXF (*Drawing Exchange Format*). Conforme destacam Costa e Rodrigues (2021), esse formato foi criado em 1982 pela Autodesk para solucionar problemas de compatibilidade entre programas. Além disso, os arquivos DXF possuem código aberto, possibilitando que o desenho seja interpretado via linguagem de programação. A referência de codificação desse tipo de arquivo é abordada detalhadamente em Autodesk Autocad (2022).

Vale ressaltar que a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste projeto é baseada em equações paramétricas de retas, sendo necessário que todos os elementos que compõem os limites das ruas sejam interpretados pelo algoritmo como retas. Para isso, todos os arcos existentes no layout das ruas devem ser convertidos em conjuntos de retas de pequeno comprimento que representem uma geometria equivalente ao arco original.

Dessa forma, utilizou-se como estratégia a definição de um comprimento de arco mínimo ( $L_{arc,min}$ ), o qual deve ser informado pelo usuário, para o cálculo do número de linhas em que o arco será dividido ( $N$ ), conforme apresenta a equação (16), na qual  $\theta_{arc}$  representa o ângulo total do arco e  $\theta_{div}$  o valor aproximando em que seria dividido o ângulo total do arco, sendo este último também definido pelo usuário. Caso o comprimento do arco analisado seja menor ou igual ao comprimento de arco mínimo ( $L_{arc,min}$ ), o arco será dividido em apenas 4 linhas ( $N = 4$ ).

$$N = trunc\left(\frac{\theta_{arc}}{\theta_{div}}\right) \quad (16)$$

Vale destacar que a escolha dos valores para  $L_{arc,min}$  e  $\theta_{div}$  influenciam fortemente na construção do layout da rede e no tempo de execução do algoritmo. Assim, quanto maior for o valor de  $N$  mais semelhante ao arco original o conjunto de retas será, porém, a divisão de arcos em muitas linhas excessivamente pequenas tornará a execução do código muito mais lenta desnecessariamente. Por outro lado, caso o valor de  $N$  seja muito pequeno, o arco formado pelo conjunto de retas não será fiel ao arco original, sendo o arruamento resultante discrepante do original, o que geraria erros em etapas futuras.

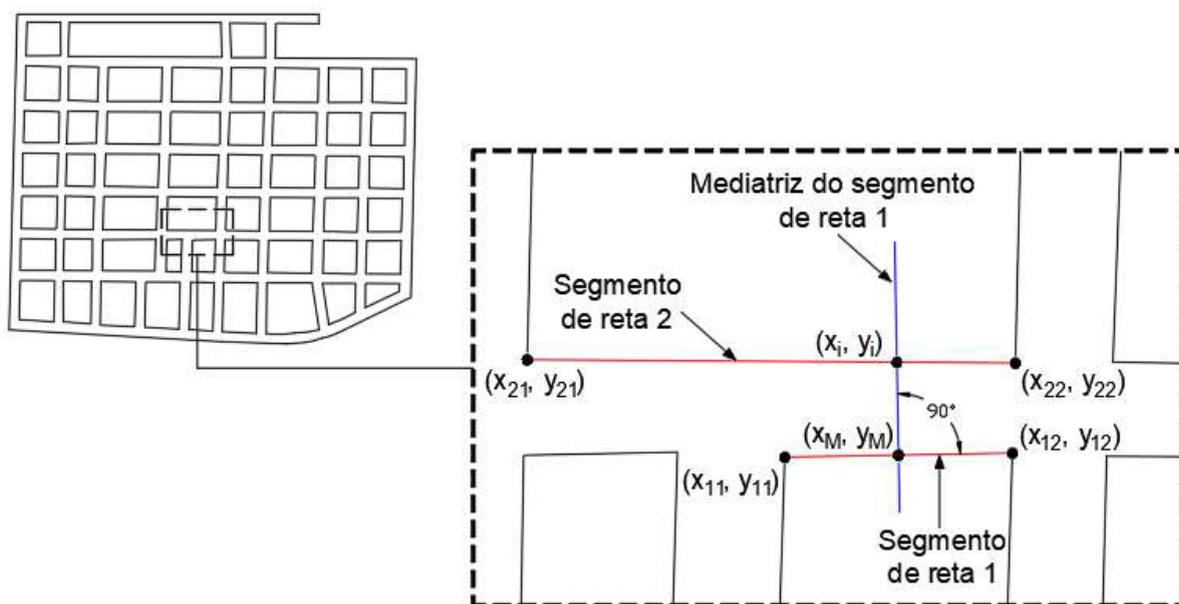
### 3.4 Linha central da rua

### 3.4.1 Identificando pares de linhas que formam ruas

Após a definição de todas as linhas que constituem o layout das ruas é necessário que sejam determinados todos os pares de linhas que formam ruas. Para isso, cada linha do layout foi testada com todas as outras e foram verificadas três condições necessárias para que o par de linhas forme uma rua, as quais serão explicadas posteriormente.

Para a demonstração matemática dos cálculos, utilizou-se como exemplo duas linhas que formam uma rua qualquer do layout de Rodrigues et. al (2019), que é detalhado no estudo de caso 1 (Seção 4.1), conforme a Figura 3. Além disso, foi definido que sempre a linha menor será considerada o seguimento de reta 1 e a linha maior será o segmento de reta 2. Os pontos que formam os segmentos de retas apresentam as coordenadas  $(x_{ij}, y_{ij})$ , em que  $i$  é o número do segmento de reta e  $j$  é o número do ponto do segmento. Também foi usada uma linha imaginária que é mediatriz do segmento de reta 1, que foi chamada de reta S, a qual passa pelo ponto médio do seguimento de reta 1, que possui coordenadas  $(x_M, y_M)$ , e intercepta o segmento de reta 2 no ponto de coordenadas  $(x_i, y_i)$ .

Figura 3 – Segmentos de retas e pontos do problema



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desse modo, todas as coordenadas dos pontos que delimitam os segmentos de retas 1 e 2 são obtidas durante a leitura do layout das ruas (Seção 3.3), enquanto as coordenadas do ponto médio do segmento de reta 1 são facilmente calculadas por meio das equações (17) e

(18), sendo preciso obter apenas as coordenadas do ponto de interseção do segmento de reta 2 com a mediatriz do segmento de reta 1 ( $x_i, y_i$ ).

$$x_M = \frac{x_{11} + x_{12}}{2} \quad (17)$$

$$y_M = \frac{y_{11} + y_{12}}{2} \quad (18)$$

Para isso, a montagem das equações paramétricas foi feita conforme a Seção 2.2 e o procedimento descrito na Seção 2.3 será utilizado para determinar o ponto de interseção entre as retas S e 2. Os vetores diretores das retas 1, 2 e S são mostrados nas equações (19), (20) e (21), respectivamente. Vale destacar que a reta S, por ser mediatriz do segmento de reta 1, é perpendicular a reta 1, logo, seu vetor diretor pode ser definido trocando as componentes a e b do vetor diretor da reta 1 e invertendo o sinal de um deles.

$$\vec{u}_1 = (x_{12} - x_{11}, y_{12} - y_{11}) = (a_1, b_1) \quad (19)$$

$$\vec{u}_2 = (x_{22} - x_{21}, y_{22} - y_{21}) = (a_2, b_2) \quad (20)$$

$$\vec{u}_S = (y_{12} - y_{11}, x_{11} - x_{12}) = (b_1, -a_1) \quad (21)$$

Assim, montando as equações paramétricas da reta 1 em função do parâmetro  $\mu$  obtém-se as equações (22) e (23). Do mesmo modo, as equações paramétricas da reta 2 são determinadas em função do parâmetro  $\lambda$  [equações (24) e (25)]. A reta S, por sua vez, tem as equações (26) e (27) como equações paramétricas em função do parâmetro  $\delta$ .

$$x_1 = x_{11} + (x_{12} - x_{11})\mu \quad (22)$$

$$y_1 = y_{11} + (y_{12} - y_{11})\mu \quad (23)$$

$$x_2 = x_{21} + (x_{22} - x_{21})\lambda \quad (24)$$

$$y_2 = y_{21} + (y_{22} - y_{21})\lambda \quad (25)$$

$$x_s = x_M + (y_{12} - y_{11})\delta \quad (26)$$

$$y_s = y_M + (x_{11} - x_{12})\delta \quad (27)$$

Para encontrar as coordenadas do ponto de interseção da reta S com a reta 2, é necessário igualar as equações de x e y das duas retas, assim, tem-se as equações (28) e (29):

$$x_{21} + (x_{22} - x_{21})\lambda = x_M + (y_{12} - y_{11})\delta \quad (28)$$

$$y_{21} + (y_{22} - y_{21})\lambda = y_M + (x_{11} - x_{12})\delta \quad (29)$$

Isolando o parâmetro  $\lambda$  na equação (28), obtém-se a equação (30):

$$\lambda = \frac{x_M - x_{21} + (y_{12} - y_{11})\delta}{x_{22} - x_{21}} \quad (30)$$

Substituindo a equação (30) na equação (29), tem-se a equação (31):

$$y_{21} + (y_{22} - y_{11}) \left[ \frac{x_M - x_{21} + (y_{12} - y_{11})\delta}{x_{22} - x_{21}} \right] = y_M + (x_{11} - x_{12})\delta \quad (31)$$

Multiplicando a equação (31) por  $(x_{22} - x_{21})$  é obtida a equação (32):

$$\begin{aligned} & y_{21}(x_{22} - x_{21}) + (y_{22} - y_{11})[x_M - x_{21} + (y_{12} - y_{11})\delta] \\ & = y_M(x_{22} - x_{21}) + (x_{11} - x_{12})(x_{22} - x_{21})\delta \end{aligned} \quad (32)$$

Reorganizando os termos da equação (32) e colocando em evidência o parâmetro  $\delta$ , tem-se a equação (33):

$$\delta = \frac{(x_{22} - x_{21})(y_M - y_{21}) - (y_{22} - y_{11})(x_M - x_{21})}{(y_{22} - y_{11})(y_{12} - y_{11}) + (x_{22} - x_{21})(x_{12} - x_{11})} \quad (33)$$

Dessa forma, substituindo o parâmetro  $\delta$  apresentado na equação (33) nas equações (26) e (27) tem-se as coordenadas do ponto de interseção da reta S com a reta 2, conforme apresentam as equações (34) e (35).

$$x_i = x_M + (y_{12} - y_{11}) \frac{(x_{22} - x_{21})(y_M - y_{21}) - (y_{22} - y_{11})(x_M - x_{21})}{(y_{22} - y_{11})(y_{12} - y_{11}) + (x_{22} - x_{21})(x_{12} - x_{11})} \quad (34)$$

$$y_i = y_M + (x_{11} - x_{12}) \frac{(x_{22} - x_{21})(y_M - y_{21}) - (y_{22} - y_{11})(x_M - x_{21})}{(y_{22} - y_{11})(y_{12} - y_{11}) + (x_{22} - x_{21})(x_{12} - x_{11})} \quad (35)$$

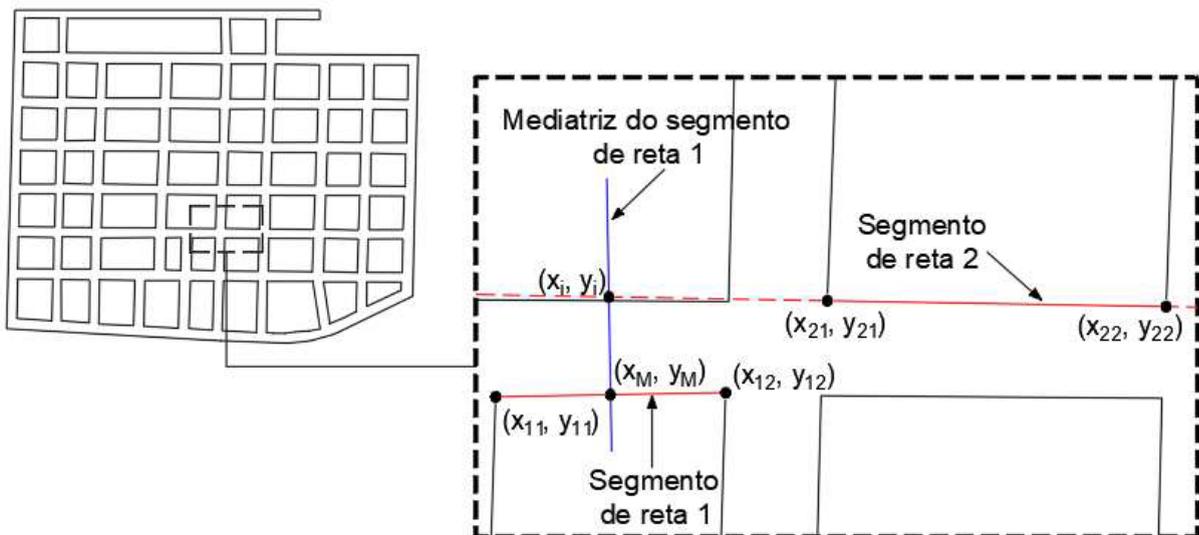
Em posse dos valores das coordenadas de todos os pontos necessários, é possível agora verificar as três condições para que as duas linhas constituam uma rua. A primeira condição é que o ponto de interseção da reta S com a reta 2 deve pertencer ao segmento da reta 2 que forma a linha do layout, logo, as equações (36) e (37) precisam ser atendidas. As variáveis  $x_{2,\min}$  e  $x_{2,\max}$  são, respectivamente, as abscissas de menor e maior valor dos pontos que delimitam o segmento de reta 2, enquanto as variáveis  $y_{2,\min}$  e  $y_{2,\max}$  são o menor e o maior valor, respectivamente, das ordenadas dos pontos que delimitam o segmento de reta 2.

$$x_{2,\min} \leq x_i \leq x_{2,\max} \quad (36)$$

$$y_{2,min} \leq y_i \leq y_{2,max} \quad (37)$$

Essa verificação é necessária visto que as equações paramétricas definem todos os pontos pertencentes às retas, sendo as linhas do layout apenas segmentos contidos dentro delas. Logo, o ponto de interseção da reta S com a reta 2 pode não estar contido no segmento da reta 2 que forma a linha do layout. Um exemplo disso é apresentado na Figura 4, em que a combinação verificada é formada pelo segmento de reta 1 mostrado anteriormente e o segmento de reta 2 é uma linha do layout do quarteirão vizinho. Observando a Figura 4, verifica-se que o ponto de interseção encontrado pertence a um ponto da reta 2 que não se encontra dentro do segmento de reta que forma a linha do layout, não validando a primeira condição para que as linhas constituam uma rua.

Figura 4 – 1ª condição para duas linhas formarem uma rua não atendida



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima condição checa a distância entre o ponto médio do segmento de reta 1 e o ponto de interseção da mediatriz do segmento de reta 1 com o segmento de reta 2, que é definida pela equação (38).

$$d = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2} \quad (38)$$

Dessa forma, a distância  $d$  deve ser igual ou próxima a largura média das ruas ( $W_s$ ), a qual é informada pelo usuário juntamente com uma variável que simboliza o percentual de variação da largura das ruas ( $V_i$ ), sendo esta última necessária devido às ruas nem sempre

possuem larguras exatamente iguais. Posto isso, a segunda condição é atendida se a equação (39) for verdadeira.

$$w_s - w_s v_t < d < w_s + w_s v_t \quad (39)$$

A terceira e última condição a ser verificada é se os segmentos de reta são paralelos ou próximos disso. Com esse propósito, o usuário deve fornecer como dado de entrada um ângulo máximo entre as duas retas que contêm os segmentos que representam as linhas do layout ( $\theta_{\text{máx}}$ ). Adaptando a equação (15) ao problema, o ângulo entre as retas dos segmentos 1 e 2 ( $\theta$ ) pode ser calculado pela equação (40).

$$\theta = \cos^{-1} \left( \left| \frac{(x_{12} - x_{11})(x_{22} - x_{21}) + (y_{12} - y_{11})(y_{22} - y_{21})}{\sqrt{(x_{12} - x_{11})^2 + (y_{12} - y_{11})^2} \cdot \sqrt{(x_{22} - x_{21})^2 + (y_{22} - y_{21})^2}} \right| \right) \quad (40)$$

Dessa maneira, para que a terceira condição seja atendida, a equação (41) deve ser atendida.

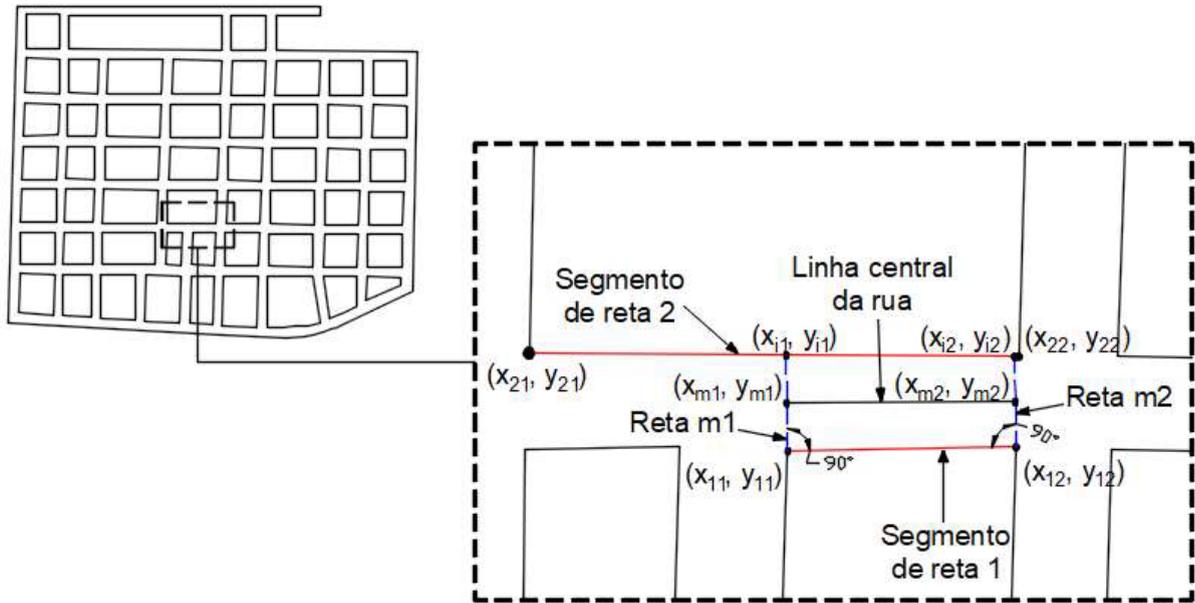
$$\theta < \theta_{\text{máx}} \quad (41)$$

### 3.4.1 Pontos que definem a linha central da rua na primeira versão

Após comprovar que as duas linhas constituem uma rua, o próximo passo é determinar os pontos que delimitam a linha central da rua em uma primeira versão, isto é, um segmento de reta que esteja contido na reta da linha central da rua, mas com pontos delimitadores que ainda serão ajustados em etapas futuras. Para isso, esses pontos foram definidos inicialmente com o auxílio de retas perpendiculares ao segmento de reta 1, interceptando seus pontos extremos. Essas retas foram denominadas de retas m1 e m2 e são ilustradas na Figura 5.

Novamente, as equações paramétricas das retas m1 e m2 podem ser montadas seguindo as instruções da Seção 2.2. Assim, o ponto conhecido da reta m1, também pertencente ao segmento de reta 1, possui coordenadas  $(x_{11}, y_{11})$  e o parâmetro utilizado na representação dessa reta é o  $\gamma$ . Para a reta m2 o ponto conhecido é a outra extremidade do segmento de reta 1, cujas coordenadas são  $(x_{12}, y_{12})$ , e o parâmetro utilizado é o  $\rho$ . Além disso, ambas as retas são perpendiculares a reta 1, assim como a reta S, logo, possuem vetores diretores iguais, conforme a equação (42).

Figura 5 – Pontos que definem a reta da linha central da rua



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$\vec{u}_s = \vec{u}_{m1} = \vec{u}_{m2} = (y_{12} - y_{11}, x_{11} - x_{12}) = (b_1, -a_1) \quad (42)$$

Assim, as equações paramétricas da reta m1 são apresentadas pelas equações (43) e (44) e as equações paramétricas da reta m2 são apresentadas pelas equações (45) e (46).

$$x_{m1} = x_{11} + (y_{12} - y_{11})\gamma \quad (43)$$

$$y_{m1} = y_{11} + (x_{11} - x_{12})\gamma \quad (44)$$

$$x_{m2} = x_{12} + (y_{12} - y_{11})\rho \quad (45)$$

$$y_{m2} = y_{12} + (x_{11} - x_{12})\rho \quad (46)$$

Em seguida, as coordenadas dos pontos em que as retas m1 e m2 interceptam a reta 2 devem ser calculadas seguindo o procedimento descrito na Seção 2.3. Para a reta m1 o ponto de interseção com a reta 2 possui coordenadas  $(x_{i1}, y_{i1})$  e para a reta m2 as coordenadas do ponto de interseção com a reta 2 são  $(x_{i2}, y_{i2})$ . A interseção da reta m1 com a reta 2 pode ser obtida igualando as equações para x [equações (24) e (43)] e y [equações (25) e (44)] de ambas as retas. Assim, temos as equações (47) e (48):

$$x_{21} + (x_{22} - x_{21})\lambda = x_{11} + (y_{12} - y_{11})\gamma \quad (47)$$

$$y_{21} + (y_{22} - y_{21})\lambda = y_{11} + (x_{11} - x_{12})\gamma \quad (48)$$

Visando a simplificação dos cálculos, as equações serão demonstradas utilizando as componentes dos vetores diretores das retas, sendo os vetores diretores das retas S, m1 e m2 apresentados na equação (42) e os vetores diretores das retas 1 e 2 apresentados nas equações (19) e (20). Assim, as equações (47) e (48) podem ser reescritas como:

$$x_{21} + a_2 \lambda = x_{11} + b_1 \gamma \quad (49)$$

$$y_{21} + b_2 \lambda = y_{11} - a_1 \gamma \quad (50)$$

Isolando o parâmetro  $\gamma$  na equação (49), tem-se a equação (51):

$$\gamma = \frac{x_{21} - x_{11} + a_2 \lambda}{b_1} \quad (51)$$

Substituindo a equação (51) na equação (50), tem-se a equação (52):

$$y_{21} + b_2 \lambda = y_{11} - a_1 \left( \frac{x_{21} - x_{11} + a_2 \lambda}{b_1} \right) \quad (52)$$

Multiplicando a equação (52) por  $b_1$ , tem-se a equação (53):

$$b_1 y_{21} + b_1 b_2 \lambda = b_1 y_{11} - a_1 (x_{21} - x_{11} + a_2 \lambda) \quad (53)$$

Reorganizando os termos da equação (53) e isolando o parâmetro  $\lambda$ , obtém-se a equação (54):

$$\lambda = \frac{a_1 (x_{11} - x_{21}) + b_1 (y_{11} - y_{21})}{a_1 a_2 + b_1 b_2} \quad (54)$$

Substituindo o parâmetro  $\lambda$  encontrado na equação (54) nas equações (24) e (25) tem-se as coordenadas do ponto de interseção da reta m1 com a reta 2, conforme apresentam as equações (55) e (56).

$$x_{i1} = x_{21} + a_2 \left[ \frac{a_1 (x_{11} - x_{21}) + b_1 (y_{11} - y_{21})}{a_1 a_2 + b_1 b_2} \right] \quad (55)$$

$$y_{i1} = y_{21} + b_2 \left[ \frac{a_1 (x_{11} - x_{21}) + b_1 (y_{11} - y_{21})}{a_1 a_2 + b_1 b_2} \right] \quad (56)$$

O mesmo processo pode ser feito para determinar o ponto de interseção da reta m2 com a reta 2. Dessa forma, iguala-se as equações paramétricas de x [equações (24) e (45)] e de y [equações (25) e (46)] das retas 2 e m2, conforme as equações (57) e (58).

$$x_{21} + (x_{22} - x_{21}) \lambda = x_{12} + (y_{12} - y_{11}) \rho \quad (57)$$

$$y_{21} + (y_{22} - y_{21}) \lambda = y_{12} + (x_{11} - x_{12}) \rho \quad (58)$$

Para simplificação dos cálculos, as equações (57) e (58) podem ser reescritas como as equações (59) e (60), respectivamente, em função das componentes dos vetores diretores.

$$x_{21} + a_2 \lambda = x_{12} + b_1 \rho \quad (59)$$

$$y_{21} + b_2 \lambda = y_{12} - a_1 \rho \quad (60)$$

Isolando o parâmetro  $\rho$  na equação (59), tem-se a equação (61):

$$\rho = \frac{x_{21} - x_{12} + a_2 \lambda}{b_1} \quad (61)$$

Substituindo a equação (61) na equação (60), tem-se a equação (62):

$$y_{21} + b_2 \lambda = y_{12} - a_1 \left( \frac{x_{21} - x_{12} + a_2 \lambda}{b_1} \right) \quad (62)$$

Multiplicando a equação (62) por  $b_1$ , tem-se a equação (63):

$$b_1 y_{21} + b_1 b_2 \lambda = b_1 y_{12} - a_1 (x_{21} - x_{12} + a_2 \lambda) \quad (63)$$

Reorganizando os termos da equação (63) e isolando o parâmetro  $\lambda$ , obtém-se a equação (64):

$$\lambda = \frac{a_1 (x_{12} - x_{21}) + b_1 (y_{12} - y_{21})}{a_1 a_2 + b_1 b_2} \quad (64)$$

Substituindo o parâmetro  $\lambda$  encontrado na equação (64) nas equações (24) e (25) tem-se as coordenadas do ponto de interseção da reta  $m_2$  com a reta 2, conforme apresentam as equações (65) e (66).

$$x_{i2} = x_{21} + a_2 \left[ \frac{a_1 (x_{12} - x_{21}) + b_1 (y_{12} - y_{21})}{a_1 a_2 + b_1 b_2} \right] \quad (65)$$

$$y_{i2} = y_{21} + b_2 \left[ \frac{a_1 (x_{12} - x_{21}) + b_1 (y_{12} - y_{21})}{a_1 a_2 + b_1 b_2} \right] \quad (66)$$

Calculados os pontos de interseção, pode-se então encontrar os pontos que formam a linha central da rua em uma primeira versão. Dessa forma, esses pontos são estabelecidos como sendo o ponto médio entre o ponto da extremidade do segmento de reta 1 e o ponto de interseção entre a perpendicular do segmento de reta 1 (retas  $m_1$  e  $m_2$ ) e a reta 2. Assim, as

coordenadas dos pontos que formam a linha central podem ser calculadas pelas equações (67) a (70).

$$x_{m1} = \frac{x_{11} + x_{i1}}{2} \quad (67)$$

$$y_{m1} = \frac{y_{11} + y_{i1}}{2} \quad (68)$$

$$x_{m2} = \frac{x_{12} + x_{i2}}{2} \quad (69)$$

$$y_{m2} = \frac{y_{12} + y_{i2}}{2} \quad (70)$$

### 3.4.2 Correção para avenidas com canteiro central

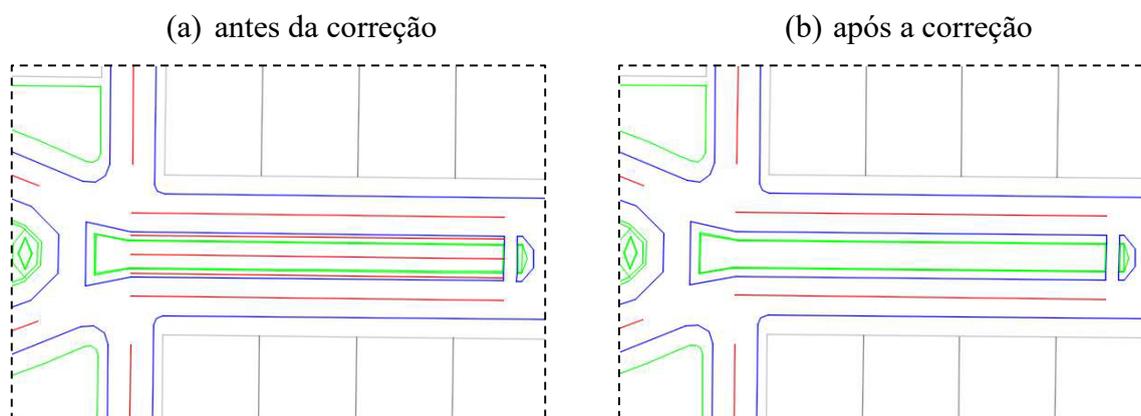
É importante destacar que para arruamentos que apresentam quarteirões com uma das dimensões muito pequenas, se aproximando da largura das ruas, podem ser geradas, erroneamente, linhas que invadam os limites das ruas, como ocorre principalmente quando o layout das ruas apresenta avenidas com canteiro central. Posto isso, foi adicionada ao algoritmo uma rotina para corrigir essas possíveis falhas.

A Figura 6 apresenta uma parte de um loteamento localizado em Mossoró-RN, que foi utilizado como terceiro estudo de caso neste trabalho (ver Seção 4.3). Em azul são mostrados os limites das ruas e em vermelho as linhas centrais das ruas geradas na primeira versão. A Figura 6a mostra as linhas geradas sem que haja a correção, em que são observadas linhas dentro do canteiro central, visto que as linhas que o formam atendem as condições para formarem uma rua.

Assim, uma estratégia semelhante a utilizada para determinar se duas linhas formam ou não uma rua (ver Seção 3.4.1) foi implementada, porém, as linhas analisadas foram as linhas centrais das ruas. Assim, ao constatar que as linhas atendem as três condições impostas, as linhas passam a pertencer a um mesmo grupo.

Na Figura 6a, por exemplo, todas as linhas vermelhas que são horizontais pertencem a um mesmo grupo, pois atendem as três condições. Analisando o grupo exemplificado, nota-se que as linhas que precisam ser excluídas ficam sempre entre duas outras linhas vermelhas, enquanto as linhas que ficam nas extremidades devem ser mantidas.

Figura 6 – Correção para layouts com canteiro central



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, para identificar as linhas que precisam ser excluídas, cada linha do grupo é analisada individualmente traçando uma reta mediatriz que passa por seu ponto médio de coordenadas  $(x_M, y_M)$  e intercepta cada uma das outras linhas do mesmo grupo em um ponto de coordenadas  $(x_i, y_i)$ . A linha analisada deve ser classificada quanto ao ângulo que faz com o eixo horizontal direito no sentido anti-horário ( $\alpha$ ) em um dos seguintes casos:

- Caso 1:  $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$  ou  $225^\circ \leq \alpha \leq 315^\circ$ ;
- Caso 2:  $\alpha < 45^\circ$  ou  $\alpha > 315^\circ$  ou  $135^\circ \leq \alpha \leq 225^\circ$ .

Vale destacar que cada caso não possui apenas um intervalo de ângulo devido ao fato de que o ângulo  $\alpha$  depende de qual ponto da linha foi definido primeiro, variando em  $180^\circ$  quanto sua ordem é invertida. Feita a classificação da linha, é calculado o ponto de interseção de sua mediatriz com cada uma das outras linhas pertencentes ao mesmo grupo segundo o procedimento descrito na Seção 2.3. Examinando o ponto médio da linha analisada e o ponto de interseção da mediatriz com outra linha do mesmo grupo são constatadas duas possíveis situações para cada um dos casos, sendo elas:

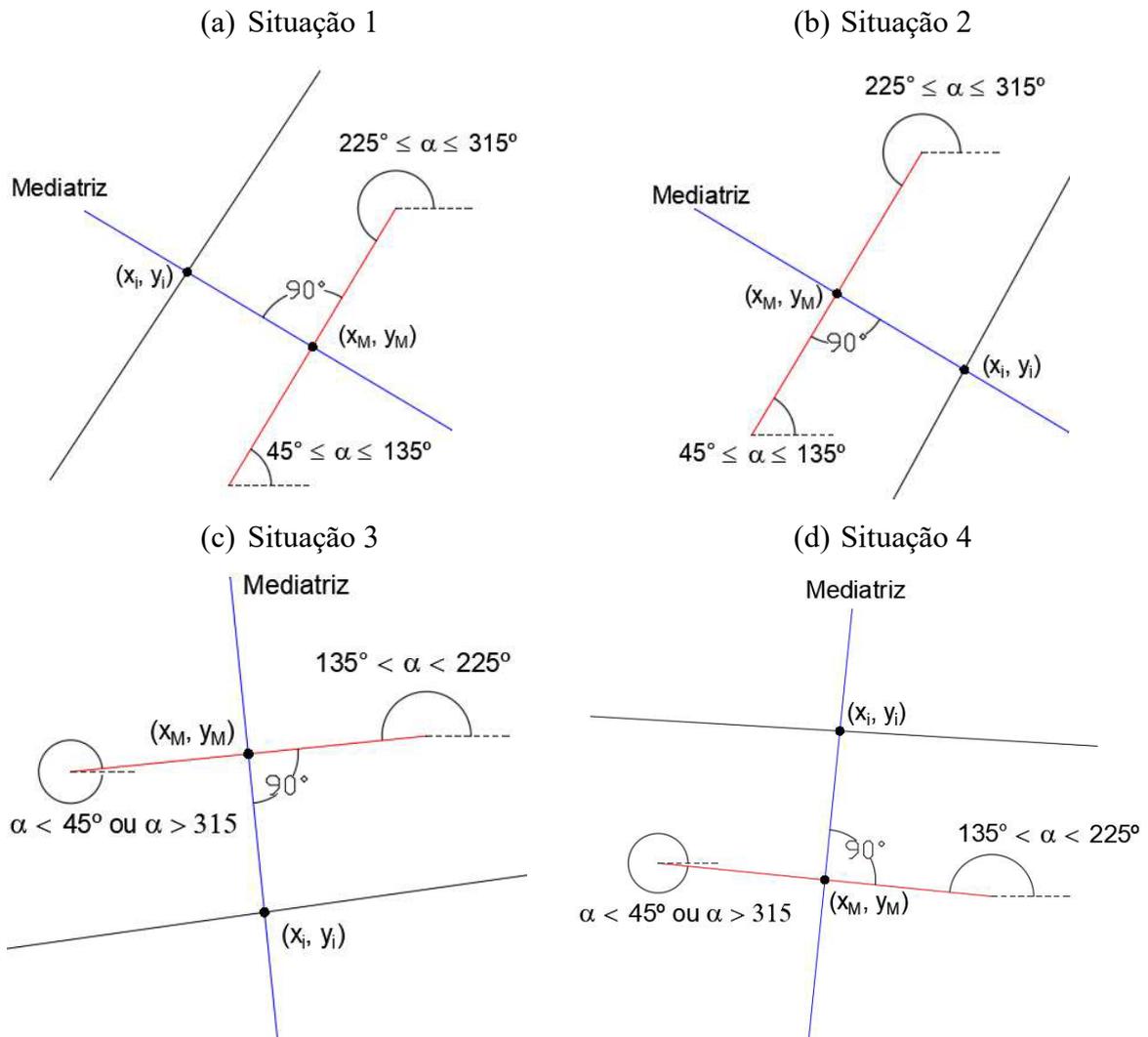
- Situação 1: a linha analisada se enquadra no caso 1 e  $x_i < x_M$ ;
- Situação 2: a linha analisada se enquadra no caso 1 e  $x_i > x_M$ ;
- Situação 3: a linha analisada se enquadra no caso 2 e  $y_i < y_M$ ;
- Situação 4: a linha analisada se enquadra no caso 2 e  $y_i > y_M$ ;

Logo, são possíveis quatro situações diferentes, ilustradas pela Figura 7, em que a linha analisada é mostrada na cor vermelha, sua mediatriz na cor azul e a outra linha do grupo na cor preta. A linha analisada deve ser excluída se atender uma das seguintes verificações:

- Se enquadra no caso 1 e existe no mesmo grupo pelo menos uma linha em que  $x_i < x_M$  e pelo menos uma linha em que  $x_i > x_M$ ;

- Se enquadra no caso 2 e existe no mesmo grupo pelo menos uma linha em que  $y_i < y_M$  e pelo menos uma linha em que  $y_i > y_M$ .

Figura 7 – Identificação das linhas para cada uma das situações possíveis



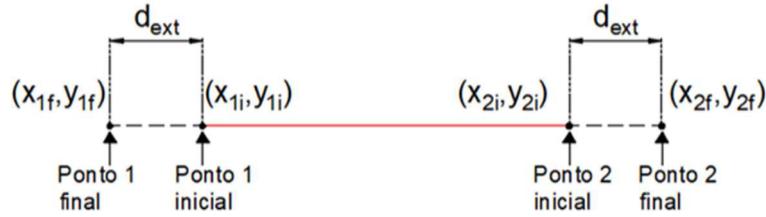
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.4.3 Atualização da linha central da rua

Visando a identificação dos nós, as linhas centrais das ruas em uma primeira versão devem ser estendidas até que elas se cruzem, gerando pontos de interseção nas esquinas, os quais serão posteriormente utilizados para definir os nós da rede. Para isso, o usuário deve definir uma distância para estender cada extremidade da linha ( $d_{ext}$ ) que se adeque ao layout estudado. Dessa forma, o valor dessa variável não deve ser tão pequeno a ponto de que não ocorra a interseção entre as linhas nos cruzamentos e nem tão grande a ponto de que ocorram

interseções com linhas de outras quadras. A Figura 8 apresenta a representação das variáveis envolvidas no processo de estender uma linha, o qual também utiliza as equações paramétricas.

Figura 8 – Linha a ser estendida



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, sendo o segmento de reta da linha central da rua formado pelos pontos 1  $(x_{1i}, y_{1i})$  e 2  $(x_{2i}, y_{2i})$ , o seu vetor diretor é dado pela equação (71):

$$\vec{u} = (a, b) = (x_{2i} - x_{1i}, y_{2i} - y_{1i}) \quad (71)$$

Adaptando a equação (2), o vetor diretor unitário, por sua vez, é dado pela equação (72):

$$\vec{u}_u = (a_u, b_u) = \left[ \frac{(x_{2i} - x_{1i})}{\sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2}}, \frac{(y_{2i} - y_{1i})}{\sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2}} \right] \quad (72)$$

Sabendo que o vetor diretor unitário sempre aponta do ponto 1 para o ponto 2, para calcular as coordenadas dos novos pontos que formam a linha após estendê-la, utiliza-se as equações paramétricas da reta. Dessa forma, para calcular as coordenadas do novo ponto 1  $(x_{1f}, y_{1f})$ , o ponto conhecido é o ponto 1 inicial  $(x_{1i}, y_{1i})$ , o vetor diretor unitário será negativo, visto que a extensão da linha ocorrerá no sentido oposto ao do vetor, e o parâmetro da equação será a distância estendida ( $d_{ext}$ ), conforme mostram as equações (73) e (74).

$$x_{1f} = x_{1i} - a_u d_{ext} \quad (73)$$

$$y_{1f} = y_{1i} - b_u d_{ext} \quad (74)$$

Para o ponto 2 final, por outro lado, o ponto conhecido será o ponto 2 inicial  $(x_{2i}, y_{2i})$ , o vetor diretor unitário será positivo, pois a reta será estendida no mesmo sentido do vetor, e o parâmetro também será a distância estendida ( $d_{ext}$ ), resultando nas equações (75) e (76).

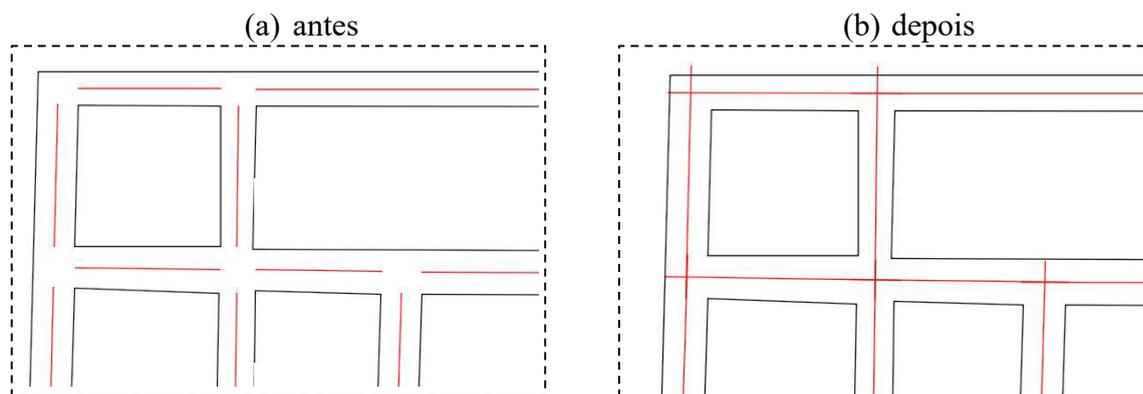
$$x_{2f} = x_{2i} + a_u d_{ext} \quad (75)$$

$$y_{2f} = y_{2i} + b_u d_{ext} \quad (76)$$

Ressalta-se que nessa situação foi preciso usar o vetor diretor unitário porque o parâmetro utilizado para construir as equações paramétricas foi a distância estendida, que é informada pelo usuário na mesma unidade do desenho do layout. Posto isso, o valor do módulo do vetor dever ser igual a 1 para que a distância entre os pontos iniciais e finais seja exatamente igual a distância estendida.

A Figura 9 ilustra o recorte do canto superior esquerdo do layout de Rodrigues et. al (2019), abordado no estudo de caso 1 (Seção 4.1), sendo apresentadas pela a Figura 9a as linhas centrais das ruas antes de estendê-las, onde observa-se que não há interseção entre as linhas, e na Figura 9b são mostradas as linhas centrais das ruas após a extensão, em que ocorrem as interseções das linhas nos cruzamentos.

Figura 9 – Estendendo as linhas centrais das ruas



Fonte: Elaborada pelo autor.

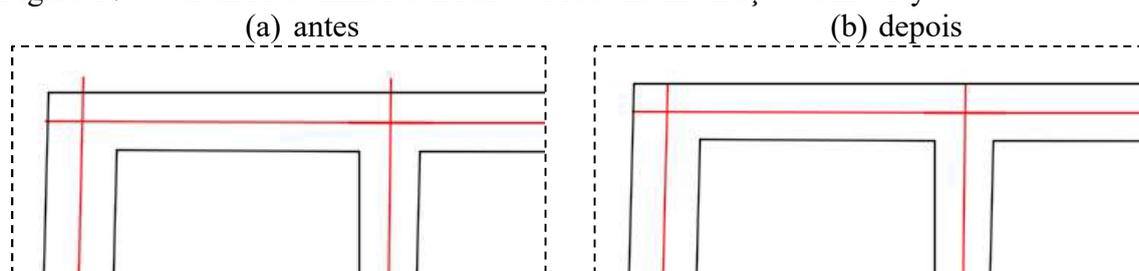
Em seguida, é necessário verificar se nenhuma das linhas estendidas cortou o layout. Isso pode ocorrer devido à presença de ruas com diferentes larguras e inclinações, entre outras excentricidades que o layout das ruas estudado possa apresentar eventualmente. Dessa forma, caso alguma das linhas centrais extrapole os limites das ruas, como é ilustrado na Figura 10a, é preciso que seja feita uma correção.

Assim, para cada uma das linhas centrais das ruas é averiguado se há interseção com alguma das linhas do layout e, caso exista, o ponto da linha que está mais próximo da interseção tem suas coordenadas atualizadas para serem iguais às coordenadas do ponto de interseção. Logo após, a fim de eliminar a interseção entre as linhas e evitar que ocorram erros em etapas futuras, a linha central da rua é aparada apenas na extremidade em que houve a interseção em 0,1 unidade de comprimento, estando completamente dentro dos limites da rua, conforme ilustra a Figura 10b.

O procedimento de aparar a linha é semelhante ao de estender, sendo necessário

apenas inverter o sinal do vetor diretor unitário nas equações (73) e (74) caso o ponto alterado seja o ponto 1 ou nas equações (75) e (76) caso o ponto alterado seja o ponto 2. Outra alternativa é inserir uma distância  $d_{\text{ext}}$  negativa, visto que o processo de aparar ocorre no sentido inverso ao de estender.

Figura 10 – Cortando as linhas centrais das ruas na interseção com o layout



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.5 Identificação dos nós

A estratégia utilizada para definir os nós da rede tem como primeira etapa fazer a divisão dos pontos de interseção gerados pelo cruzamento das linhas centrais das ruas em grupos, em que cada grupo resultará em um nó final. Para isso, o critério utilizado foi a distância entre os nós. Dessa forma, uma distância máxima entre dois pontos para que eles pertençam a um mesmo grupo ( $W_{sr}$ ) deve ser informada como dado de entrada e seu valor deve ser próximo da largura das ruas.

Na segunda etapa foram testadas duas estratégias para definir o nó de cada grupo: média das coordenadas dos pontos e ponto que gere a menor alteração no ângulo das linhas centrais das ruas.

#### 3.5.1 Estratégia 1 – Média das coordenadas dos pontos

As coordenadas do nó final serão dadas pela média das coordenadas dos  $N$  pontos que pertencem ao grupo, conforme apresentam as equações (77) e (78).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (77)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (78)$$

### 3.5.2 *Estratégia 2 – Ponto que gere a menor alteração no ângulo das linhas centrais das ruas*

O nó final escolhido será aquele que gere a menor alteração no ângulo das linhas centrais das ruas. Assim, as linhas apresentam um ângulo inicial que foi definido em sua criação (Seção 3.4), entretanto, ao optar por um dos pontos do grupo como nó, as linhas que dão origem aos outros pontos do grupo terão sua extremidade mais próxima conectada ao ponto escolhido, causando alteração em seus ângulos, ao passo que as linhas que geraram o ponto de interseção escolhido permaneceram com o ângulo inicial inalterado.

Dessa forma, o somatório do módulo da diferença entre o ângulo inicial (linha central da rua sem alteração) e o ângulo final (linha central da rua ligada ao ponto que será o nó) de todas as linhas que passam por todos os pontos de interseção do grupo deve ser calculado utilizando a equação (79).

$$\Delta_{ang} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{NL_i} |\theta_{f_{ij}} - \theta_{i_{ij}}| \quad (79)$$

Sendo N o número de pontos do grupo,  $NL_i$  o número de linhas que estão conectadas ao ponto i,  $\theta_{i_{ij}}$  o ângulo inicial da linha j que está conectada ao ponto i e  $\theta_{f_{ij}}$  o ângulo final da linha j que estava conectada ao ponto i. Logo, o ponto do grupo escolhido como nó será aquele que minimize a equação (79).

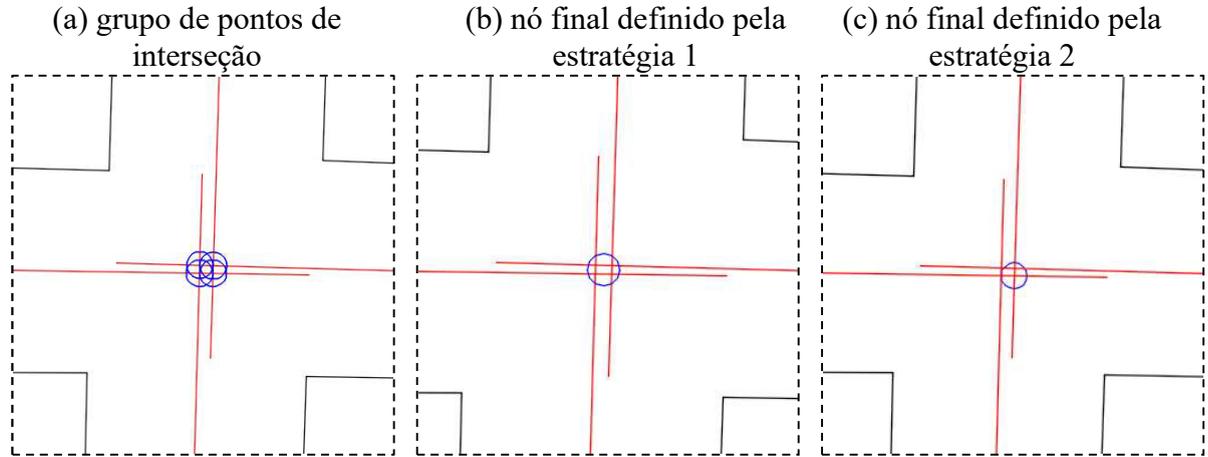
### 3.5.3 *Comparação entre as estratégias 1 e 2*

A Figura 11 apresenta uma comparação entre os nós definidos para um grupo com quatro pontos de interseção (Figura 11a). Na Figura 11b é mostrado o ponto escolhido como nó utilizando a média das coordenadas dos pontos (estratégia 1), em que se verifica a centralização do nó. Em contrapartida, a Figura 11c apresenta o nó escolhido utilizando a segunda estratégia, que resultará em uma alteração nos ângulos das duas linhas que não passam por ele.

Para analisar a influência que as diferentes estratégias têm em relação a centralização das linhas nas ruas foi utilizado um recorte do canto inferior direito do layout abordado no estudo de caso 1 (Seção 4.1), que apresenta ruas ortogonais e inclinadas (Figura 12). A Figura 12a mostra as linhas centrais das ruas com seus respectivos pontos de interseção. Os nós obtidos utilizando a estratégia 1 são apresentados na Figura 12b, enquanto utilizando a

estratégia 2 são definidos os nós da Figura 12c.

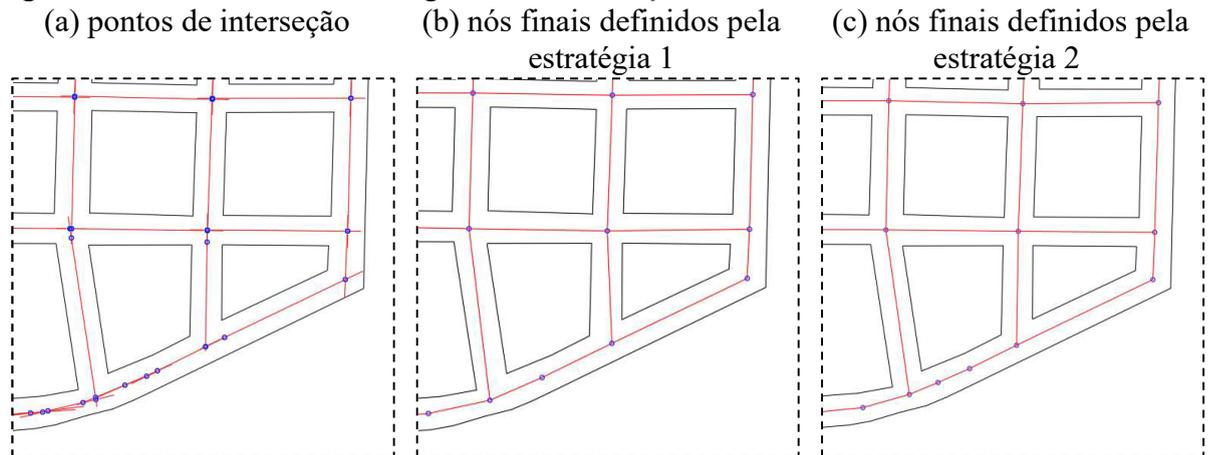
Figura 11 – Definição dos nós da rede



Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando os resultados obtidos pelas duas estratégias nota-se que a estratégia 1 apresenta um bom desempenho para ruas ortogonais, porém, em ruas inclinadas a alteração gerada nos ângulos das linhas é excessiva, fazendo com que as linhas não fiquem centralizadas na rua. A estratégia 2, por sua vez, apresentou bom desempenho tanto para ruas ortogonais como para ruas inclinadas. Dessa forma, optou-se pela a estratégia 2 para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 12 – Influência das estratégias na centralização das linhas



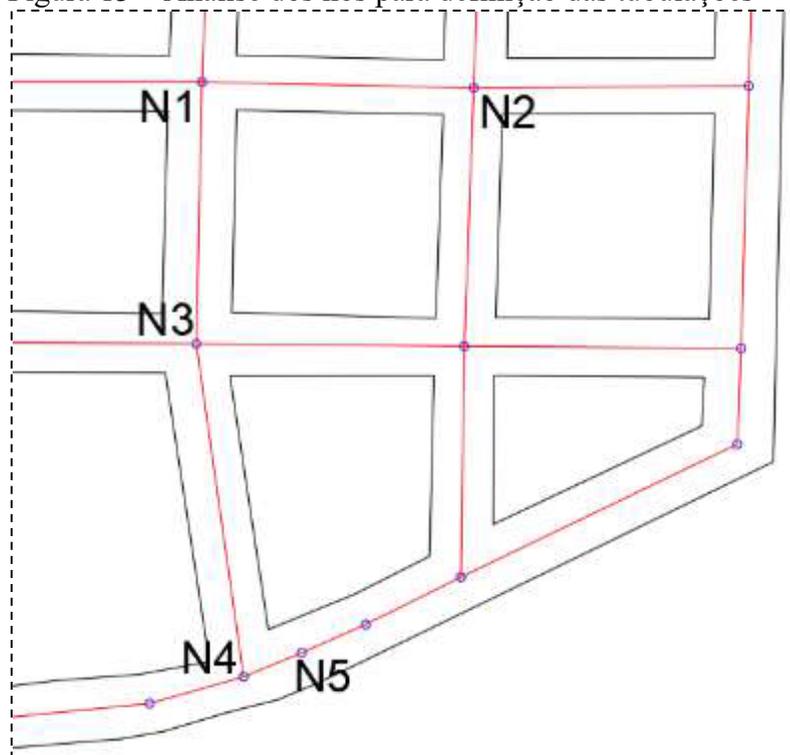
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.6 Identificação dos tubos

Após definir todos os nós da rede é preciso identificar quais deles possuem ligação,

isto é, as tubulações que os conectam. Desse modo, para cada possível combinação de par de nós são analisadas duas condições para que os nós estejam conectados. Para facilitar a explicação, serão utilizados os nós destacados na Figura 13, que apresenta o recorte do canto inferior esquerdo do layout tratado no estudo de caso 1 (Seção 4.1).

Figura 13 – Análise dos nós para definição das tubulações



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, a primeira condição enuncia que o segmento de reta estabelecido pela ligação dos pontos não deve cruzar nenhuma linha do layout. Por exemplo, o segmento formado pelos nós N1 e N2 satisfaz essa condição, porém o segmento formado pela ligação entre os nós N2 e N3 interceptaria duas linhas do layout, não atendendo a primeira condição. Vale destacar que a verificação da existência de pontos de interseção dos segmentos com cada linha do layout das ruas é feita utilizando o procedimento descrito na Seção 2.3.

A segunda condição a ser verificada declara que a ligação do nó deve ocorrer com o nó mais próximo que esteja aproximadamente no mesmo sentido e na mesma direção. Posto isso, um ângulo máximo ( $\theta'_{\text{máx}}$ ) que pode ocorrer entre dois segmentos de retas, os quais apresentam vetores diretores que têm origem no mesmo nó, precisa ser informado como dado de entrada.

Desse modo, utilizando a equação (15) é calculado o ângulo entre todos os segmentos que atenderam a primeira condição e apresentam vetor diretor com origem no

mesmo nó e, se esse ângulo for menor que  $\theta'_{\text{máx}}$ , apenas o segmento de menor comprimento é mantido, isto é, a ligação do nó de origem é feita com o nó mais próximo.

Como exemplo disso, tem-se o nó N4 que satisfaz a primeira condição de conexão com os nós N1 e N3, pois os segmentos de retas  $\overline{N4N1}$  e  $\overline{N4N3}$  não apresentam interseção com nenhuma das linhas que limitam as ruas. Entretanto, o ângulo gerado entre esses segmentos é pequeno, devendo ser menor que o ângulo  $\theta'_{\text{máx}}$ , o que resulta na ligação do nó N4 apenas com o nó mais próximo (N3).

É preciso salientar que o usuário precisa especificar um ângulo  $\theta'_{\text{máx}}$  que não seja muito pequeno, evitando conexões indesejadas como, por exemplo, a que poderia ocorrer entre N1 e N4 se  $\theta'_{\text{máx}}$  fosse menor que o ângulo entre os segmentos  $\overline{N4N1}$  e  $\overline{N4N3}$ . Além disso,  $\theta'_{\text{máx}}$  não deve ser muito grande a ponto desconsiderar conexões que deveriam ocorrer. Por exemplo, se  $\theta'_{\text{máx}}$  fosse maior que o ângulo entre os segmentos  $\overline{N4N5}$  e  $\overline{N4N3}$  a ligação entre os nós N4 e N3 não ocorreria.

Terminada a verificação da conectividade entre os nós, as tubulações podem ser definidas ligando os nós de cada par que satisfazem ambas as condições.

### 3.7 Geração da rede no EPANET

O modelo finaliza com a conversão das informações referentes aos nós e aos tubos em um arquivo de entrada do EPANET, cuja extensão é “.inp”. Costa e Rodrigues (2021) destacam que essa extensão é o formato nativo do EPANET em que a topologia da rede é descrita. Além disso, os arquivos INP são compatíveis com diversos pacotes de modelos de computador gratuitos e comerciais. A estrutura para a criação desse tipo de arquivo é detalhada em Rossman (2000).

Vale destacar que alguns nós identificados na Seção 3.5 são necessários apenas para definir a geometria da rede. Geralmente, esses nós ocorrem em ruas arqueadas, sendo a conexão com apenas dois outros nós uma característica comum a todos eles. Todavia, alguns nós que também possuem essa característica são necessários também para a análise das variáveis hidráulicas da rede, como por exemplo, os nós de esquinas com apenas 2 saídas.

Posto isso, mais uma variável de entrada deve ser informada pelo usuário:  $A_{\text{jun}}$ , que representa o valor limite para o ângulo formado entre os dois únicos tubos que estão conectados a esses nós. Assim, o ângulo formado entre os tubos pode ser calculado por meio da equação (15) e caso este ângulo seja maior que o valor limite informado ( $\theta > A_{\text{jun}}$ ), o nó é transformado

em junção de tubulação. Dessa forma, a conversão desses nós em junções diminui o número de nós e tubulações da rede e, por consequência, otimiza o tempo de processamento das simulações hidráulicas executadas no EPANET.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção tem como finalidade a apresentação e discussão dos resultados obtidos pelo presente estudo. Dessa forma, visando comprovar a eficácia o modelo proposto, três estudos de caso com layouts de ruas que apresentam diferentes características e particularidades são abordados. Destaca-se que dois deles são reais e um é hipotético. A Tabela 1 contém os valores adotados das variáveis de entrada do algoritmo para a geração das redes de distribuição de água no EPANET de cada um dos estudos de caso. Salienta-se que as variáveis referentes à medidas de comprimento devem ser inseridas com a mesma unidade apresentada no arquivo CAD.

Tabela 1 – Variáveis de entrada utilizadas para os três estudos de caso

<b>Variável de entrada</b>	<b>Estudo de caso 1</b>	<b>Estudo de caso 2</b>	<b>Estudo de caso 3</b>
Ângulo de divisão dos arcos ( $\theta_{div}$ )	6°	10°	6°
Comprimento mínimo dos arcos ( $L_{arc,min}$ )	20	20	20
Ângulo máximo entre retas para serem consideradas paralelas ( $\theta_{máx}$ )	10°	10°	10°
Largura média da rua ( $W_s$ )	15	12	6
Percentual de variação da largura da rua ( $V_t$ )	0,25	0,50	1,25
Distância entre dois pontos para pertencerem ao mesmo grupo ( $W_{sr}$ )	15	15	10
Distância a serem estendidas as extremidades das linhas ( $d_{ext}$ )	15	15	10,2
Ângulo máximo entre duas linhas para considerá-las aproximadamente na mesma direção ( $\theta'_{máx}$ )	20°	20°	30°
Ângulo limite para transformar nós em junções ( $A_{jun}$ )	120°	155°	120°

Fonte: Elaborada pelo autor.

Vale destacar que os resultados obtidos pelo presente modelo são comparados com os resultados obtidos pelo modelo de Costa e Rodrigues (2021). O modelo citado, assim como o exposto neste trabalho, apresentou uma proposta para a geração automática do arquivo de entrada EPANET a partir do layout das ruas projetado em ambiente CAD, porém, com uma metodologia completamente diferente.

Assim, Costa e Rodrigues (2021), construíram uma imagem binária a partir do layout lido no arquivo CAD, na qual cada pixel será preto se estiver dentro da rua e, caso contrário, o pixel será branco. Para determinar a localização das tubulações e dos nós que estão no meio das ruas, os autores utilizaram um método de afinamento de imagens binárias de Zhang e Suen. Em seguida, para definir os pixels que serão considerados nós, Costa e Rodrigues (2021) desenvolveram um conjunto de algoritmos sobre o tema processamento de imagens binárias.

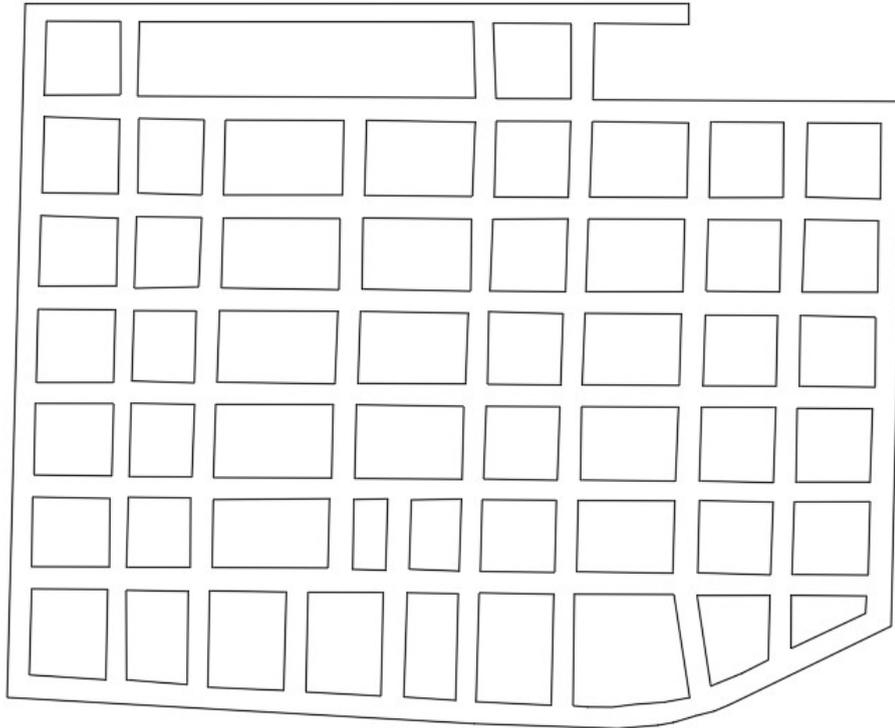
#### **4.1 Estudo de caso 1 – Exemplo real de Rodrigues et. al (2019)**

O primeiro estudo de caso consiste em um layout real que foi apresentado inicialmente por Rodrigues et al. (2019) e posteriormente foi utilizado como estudo de caso por Costa e Rodrigues (2021). A Figura 14 exibe o desenho do layout, que foi criado em um software CAD e salvo com extensão “.dxf” para ser lido pelo algoritmo proposto.

Dessa forma, esse layout é composto apenas por entidades do tipo linha e possui esquinas que variam de 1 a 4 saídas, sendo a maioria de seus quarteirões formados por quadriláteros. Além disso, conforme destacam Costa e Rodrigues (2021), várias de suas ruas são inclinadas, apesar de parecerem retas à primeira vista, constatando a proximidade que seus ângulos apresentam de ruas ortogonais. Os autores ainda mencionam que a presença de ruas inclinadas é a ocorrência mais complexa de ser resolvida pelo algoritmo proposto por eles.

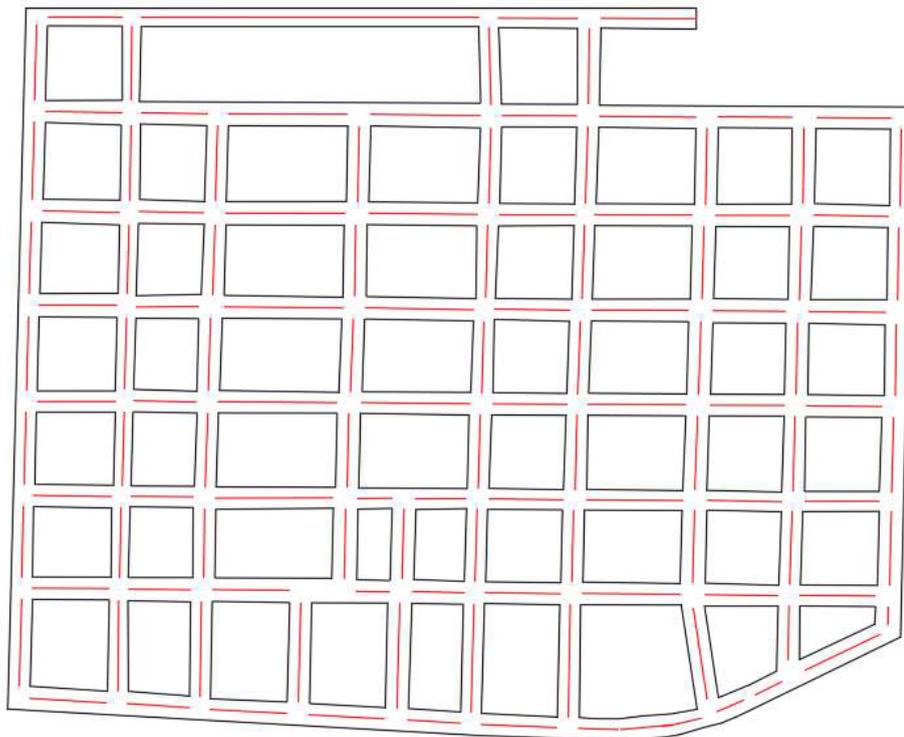
Os valores apresentados pela Tabela 1 foram utilizados para executar o algoritmo, sendo os resultados obtidos em cada etapa do modelo mostrados a seguir. Dessa forma, ao realizar a leitura do arquivo DXF foram identificadas um total de 233 linhas, não havendo conversões durante a etapa de leitura do layout (Seção 3.3), como esperado, visto que o layout em questão não possui nenhum arco em sua composição. Um total de 130 linhas centrais de ruas em uma primeira versão foram geradas corretamente e são mostradas na Figura 15, juntamente com o layout lido, que é exatamente igual ao original.

Figura 14 – Exemplo real do estudo de caso 1



Fonte: Rodrigues et al. (2019).

Figura 15 – Estudo de caso 1: Layout lido e linhas centrais da rua em uma primeira versão

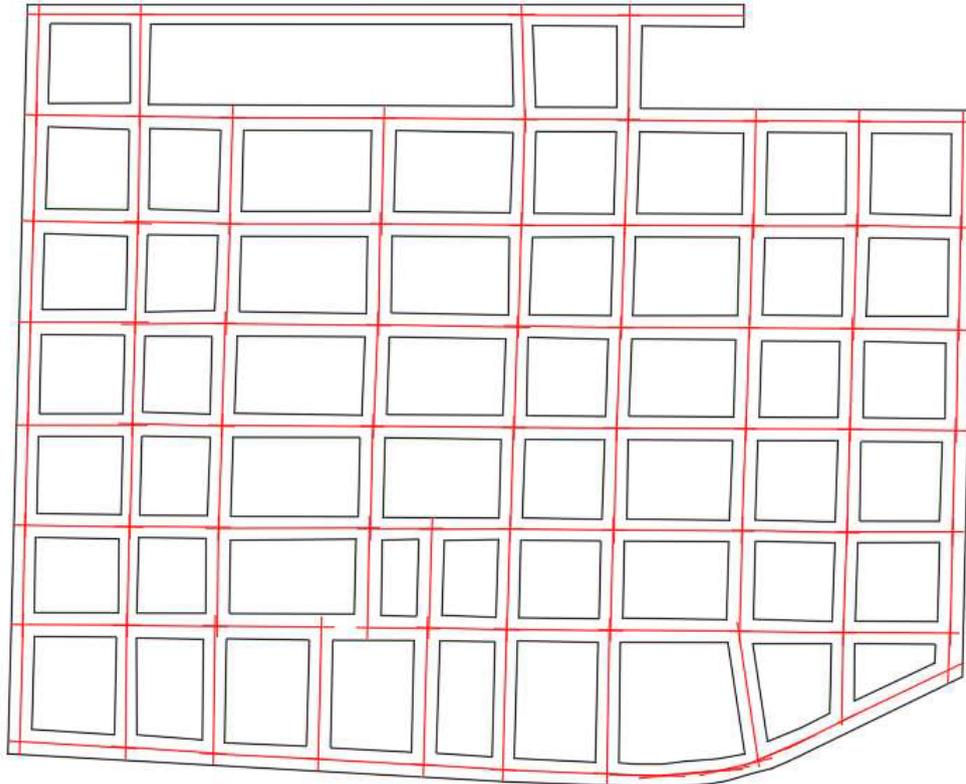


Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao realizar a atualização das linhas centrais das ruas (Figura 16), o algoritmo identificou um total de 469 pontos gerados pelas interseções das linhas centrais das ruas, os quais deram origem a 76 nós, sendo destacados na Figura 17. Ao realizar a verificação da conectividade entre os nós foram definidas 128 tubulações, as quais são apresentadas na Figura 18, em que se nota o posicionamento correto dos tubos dentro das ruas e dos nós nos cruzamentos.

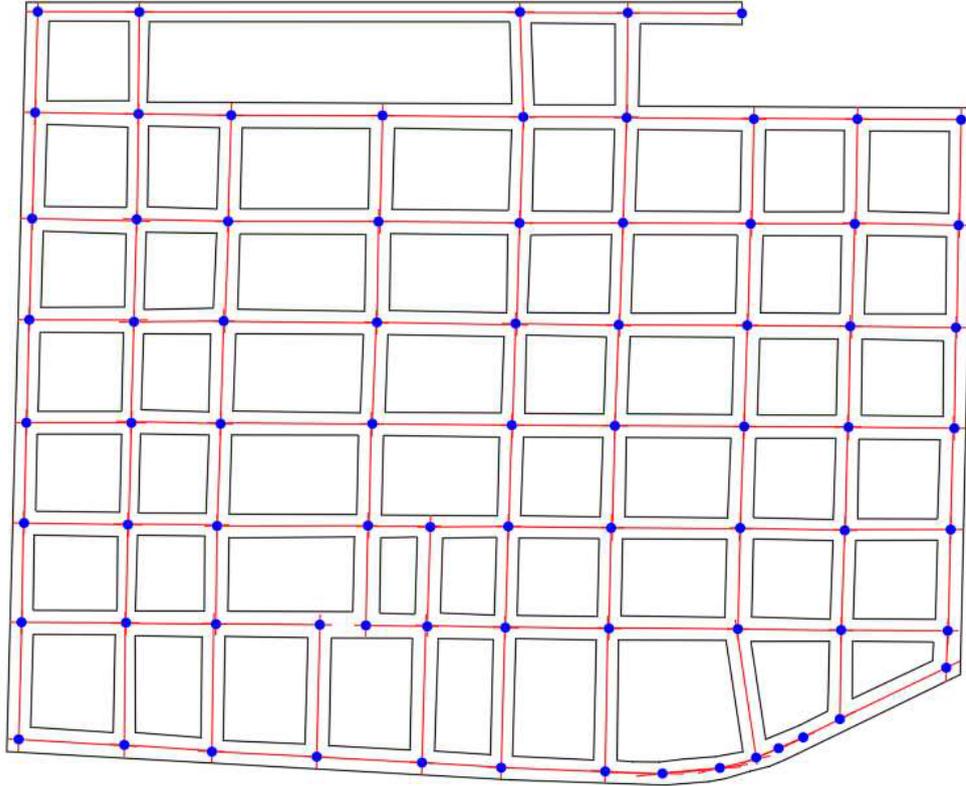
Por fim, para a criação do arquivo de entrada do EPANET, os 4 nós que formam a geometria arqueada no canto inferior direito foram transformados em junções, sendo o número final de nós e tubulações da rede iguais a, respectivamente, 72 e 124. A rede final resultante no EPANET é apresentada na Figura 19.

Figura 16 – Estudo de caso 1: Linhas centrais das ruas atualizadas



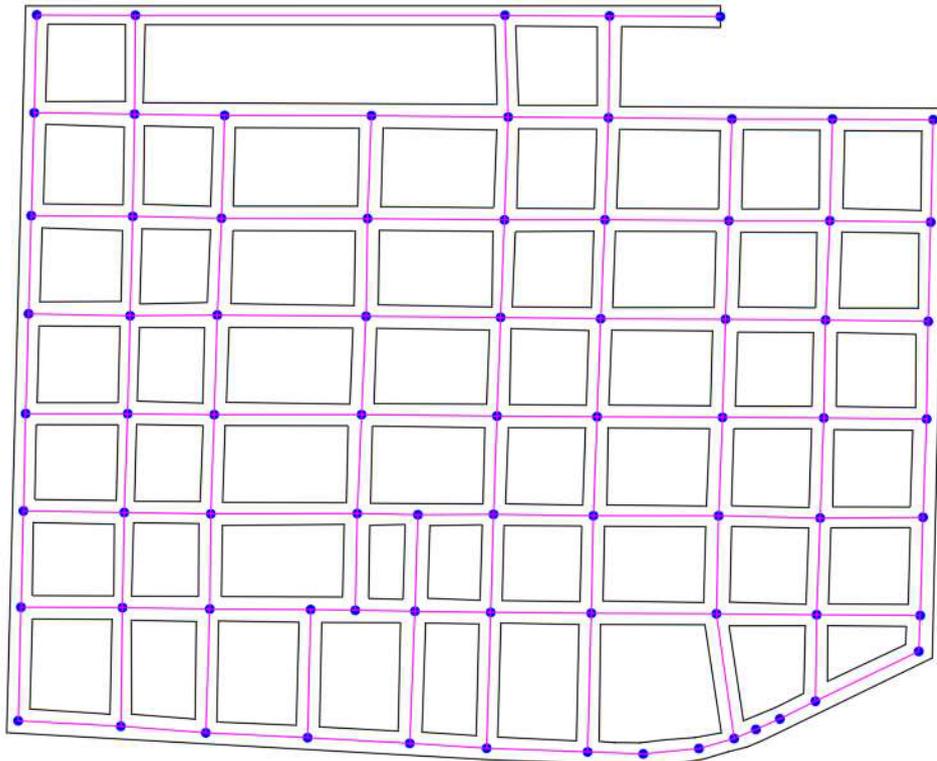
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Estudo de caso 1: Nós iniciais da rede



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Estudo de caso 1: Tubulações iniciais da rede



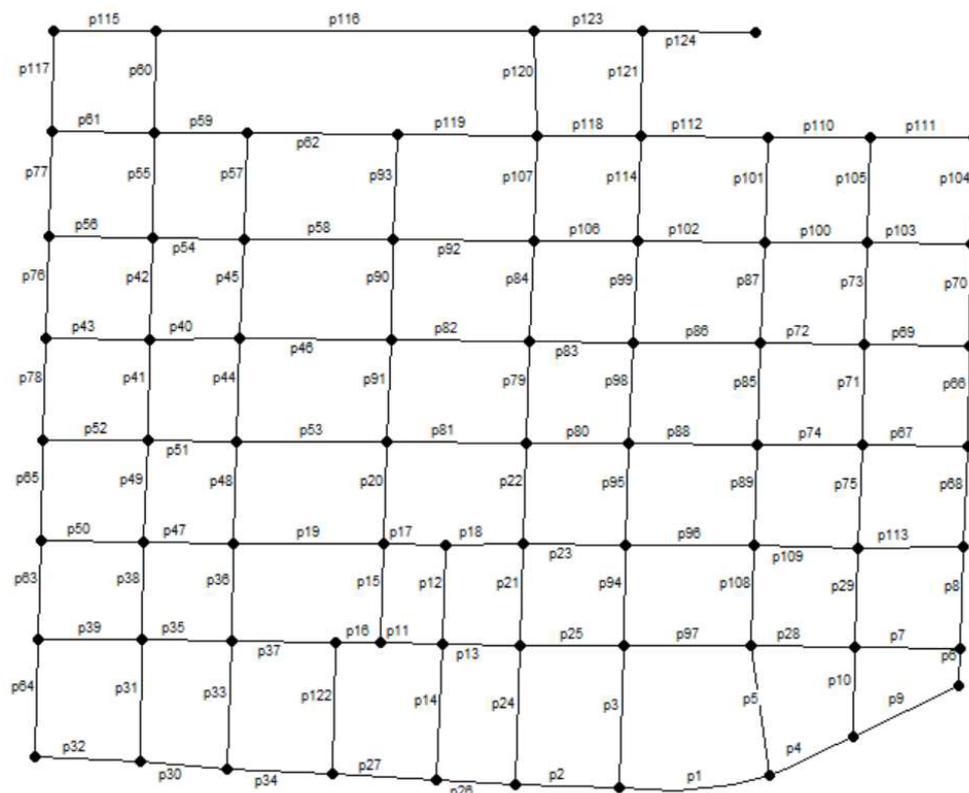
Fonte: Elaborada pelo autor.

Visando a comparação dos resultados com um trabalho pioneiro sobre o mesmo tema, a rede resultante no EPANET executada pelo modelo de Costa e Rodrigues (2021) é mostrada na Figura 20, em que também se nota a semelhança com o layout original (Figura 14). Entretanto, são observados pontos em que o presente modelo se sobressaiu em relação ao modelo de Costa e Rodrigues (2021).

Por exemplo, examinando a geometria da rua arqueada na parte inferior direita do layout, nota-se que o presente modelo, ao converter alguns nós em junções, lança as tubulações seguindo exatamente o layout da rua, sem que haja a criação de nós extras. Costa e Rodrigues (2021), por outro lado, para a mesma situação cria uma tubulação reta e que não é totalmente fiel a geometria arqueada dessa rua.

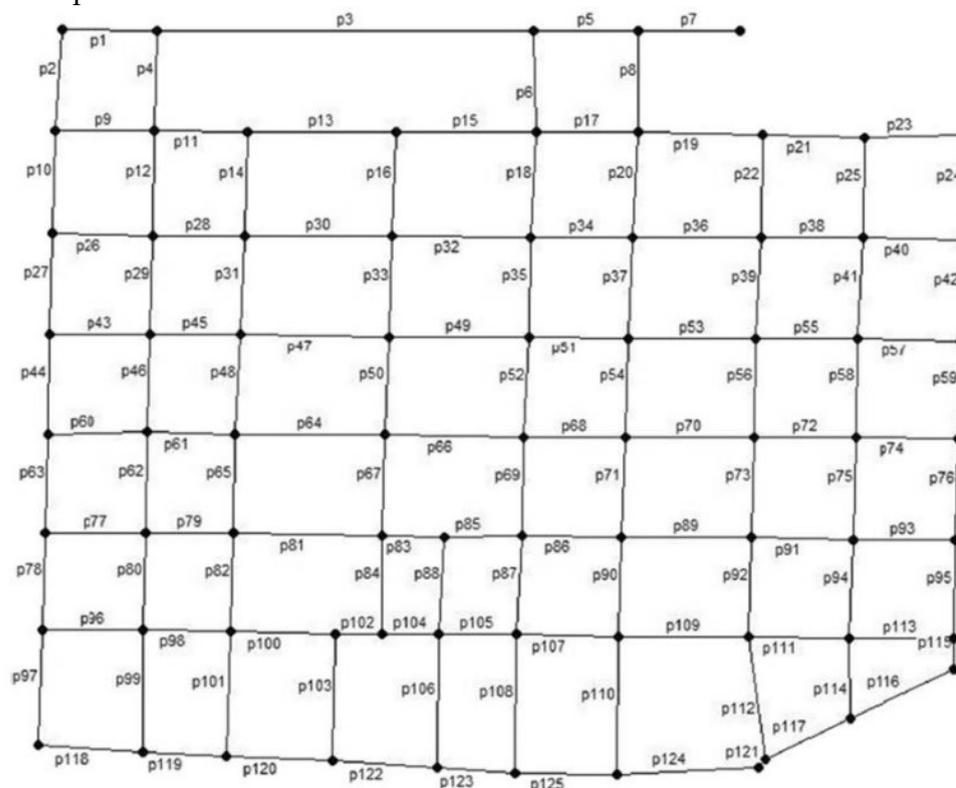
Os tubos de pequeno comprimento são outro desafio para o modelo de Costa e Rodrigues (2021), conforme destacam os autores. Para esse estudo de caso, o menor tubo gerado por seu modelo foi o p121, com 7,5 m de comprimento, que foi gerado devido a existência de um nó extra entre os tubos p121 e p124, que não é criado ao se utilizar o presente modelo.

Figura 19 – Rede gerada no EPANET pelo modelo proposto para o exemplo real do estudo de caso 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 – Rede gerada no EPANET por Costa e Rodrigues (2021) para o exemplo real do estudo de caso 1



Fonte: Costa e Rodrigues (2021).

Os autores ainda destacam que a geração de nós extras está relacionada com a sensibilidade que seu modelo apresenta quanto a escolha do ângulo limite para a definição dos nós da rede. Assim, o valor adotado para esse ângulo, caso seja muito alto, pode criar nós muito próximos e desnecessários e, por consequência, gerar tubulações muito pequenas, o que aumenta também o custo computacional para executar as simulações hidráulicas no EPANET. Em contrapartida, a escolha de um ângulo limite mais baixo pode excluir tubulações que devem ser criadas.

Para exemplificar a sensibilidade de seu algoritmo, Costa e Rodrigues (2021) apresentaram os resultados utilizando 3 valores diferentes para o ângulo limite que define os nós da rede. O ângulo ideal identificado pelos autores foi de  $145^\circ$  (rede mostrada na Figura 20). Os outros dois valores testados variaram esse ângulo em  $20^\circ$ , o que representa apenas 13,8% de seu valor, sendo que os resultados obtidos mostram a geração de dezenas de nós extras ao adotar o valor de  $165^\circ$  e a exclusão de tubos quando o valor do ângulo é de  $125^\circ$ .

O presente modelo, por sua vez, não demonstrou grande sensibilidade a alterações em seus parâmetros de entrada para esse estudo de caso. Em testes realizados, ao modificar, por exemplo, a variável  $W_{sr}$ , que influencia diretamente a quantidade de nós da rede, para os valores 20 e 10 (o que representa uma alteração em um terço de seu valor para mais ou para menos,

respectivamente) o mesmo resultado foi obtido. Outro teste alterando em 50% o valor do parâmetro  $\theta'_{m\acute{a}x}$ , que está relacionado a identificação das tubulações, também obteve o mesmo resultado, sendo os valores testados iguais a  $10^\circ$  e a  $30^\circ$ . Dessa forma, é possível concluir que o modelo proposto não apresenta uma sensibilidade a variação de parâmetros tão grande quanto o desenvolvido por Costa e Rodrigues (2021).

Vale destacar ainda que a maioria dos valores de outros parâmetros de entrada é estabelecido de acordo com o layout das ruas abordado. Por exemplo, a largura média da rua ( $W_s$ ) e seu percentual de variação ( $V_t$ ) são valores definidos a partir do desenho do arruamento, não sendo necessário grande esforço do usuário para especificá-los. É preciso ressaltar ainda que o tempo computacional para execução de todo o processo foi de 0,32 s, sendo bem menor (cerca de 10,3 vezes) que o tempo obtido por Costa e Rodrigues (2021), que foi de 3,30 s.

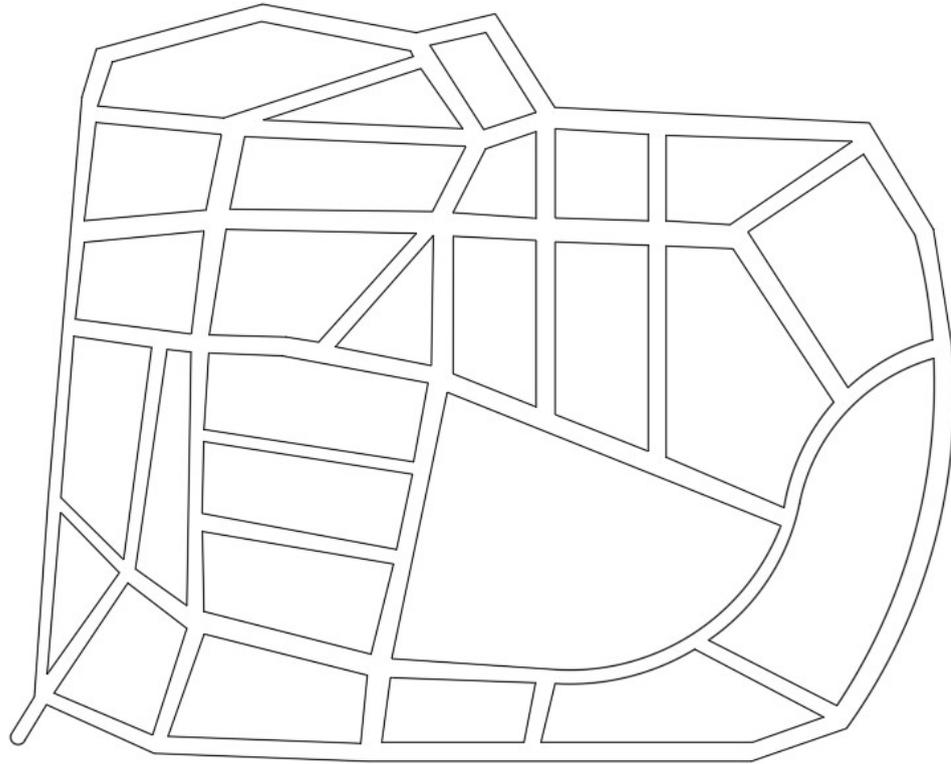
#### **4.2 Estudo de caso 2 – Exemplo hipotético**

O layout abordado no segundo estudo de caso é hipotético e foi criado para demonstrar a aplicabilidade do presente modelo para cenários que apresentem alta complexibilidade na geometria do layout. A Figura 21 apresenta o design abordado, sendo verificada a existência de quarteirões com diversos tamanhos e formatos, formando polígonos que variam de 3 a 5 lados e dando origem a cruzamentos com até 5 saídas. Além disso, o layout ainda contém ruas formadas por arcos de diferentes comprimentos e orientações.

Ressalta-se ainda que foram adicionadas ruas bastante inclinadas propositalmente, sendo seus ângulos com o eixo horizontal destacados na Figura 22, em que são encontradas desde linhas totalmente horizontais, cujo ângulo é  $0^\circ$ , até linhas perfeitamente verticais, com ângulos de  $90^\circ$ . Dessa forma, pode-se dizer que em comparação com o estudo de caso 1, este apresenta um desafio bem maior devido ao nível de complexidade da geometria do layout.

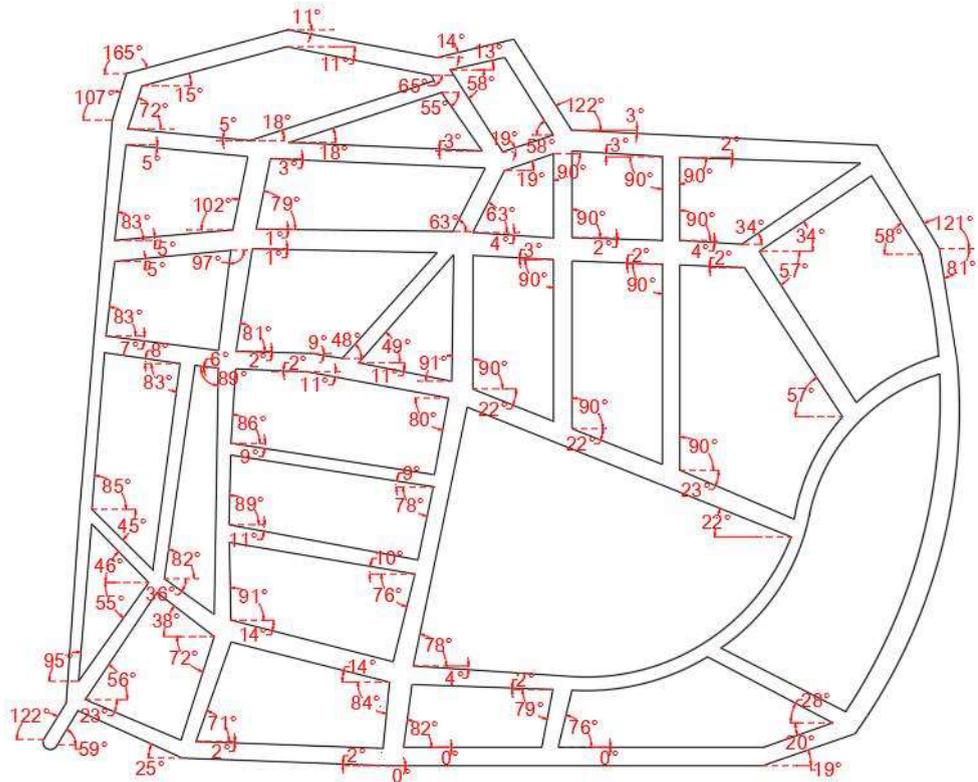
Executando o algoritmo com os valores propostos na Tabela 1 para esse estudo de caso, foram identificados 120 linhas e 10 arcos no layout original das ruas. Após a conversão dos arcos em linhas, o layout final apresentou um total de 159 linhas, sendo ele ilustrado na Figura 23, em que é possível observar que as geometrias formadas pelas retas nas ruas arqueadas são muito semelhantes aos arcos originais. A Figura 23 também apresenta as 82 linhas centrais de ruas geradas em uma primeira versão.

Figura 21 – Layout hipotético do estudo de caso 2



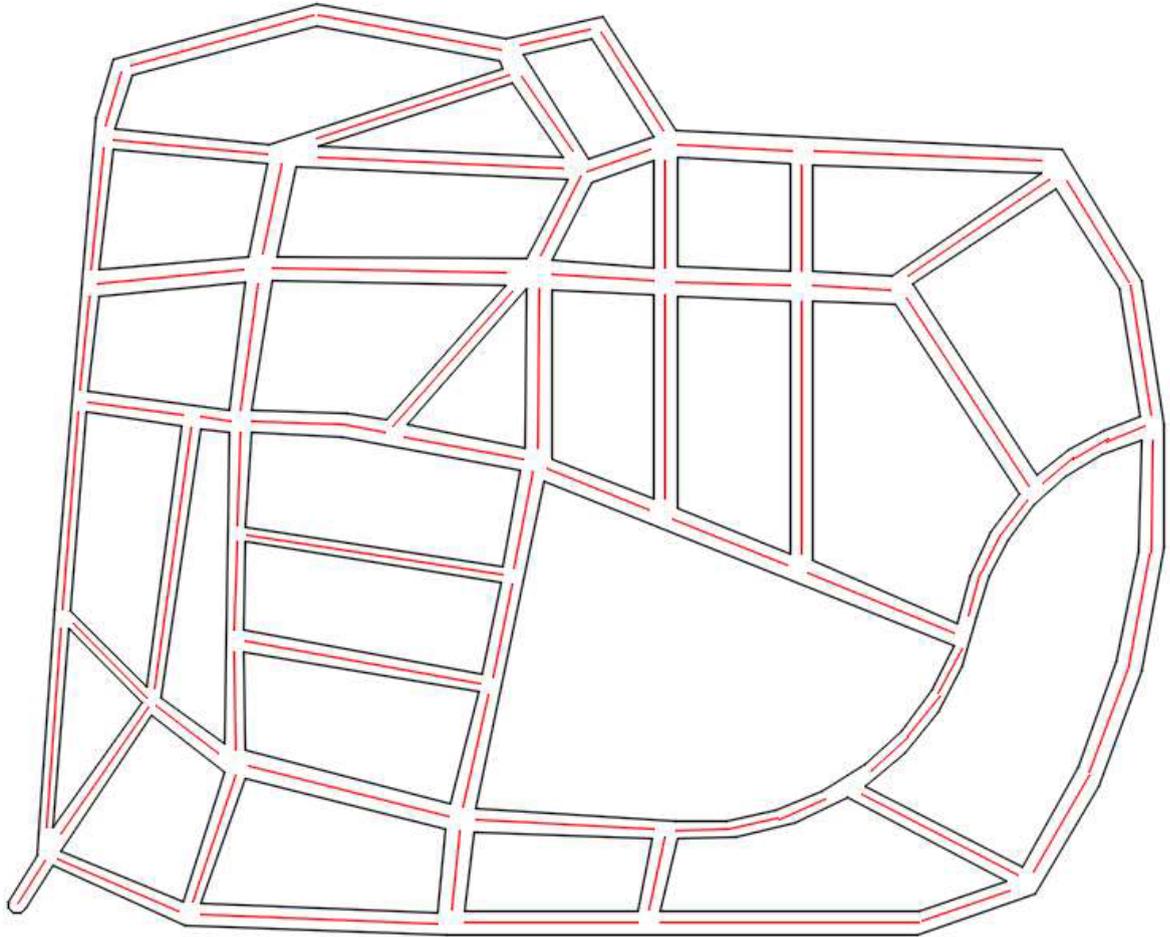
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – Ângulos em relação a horizontal do layout hipotético do estudo de caso 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

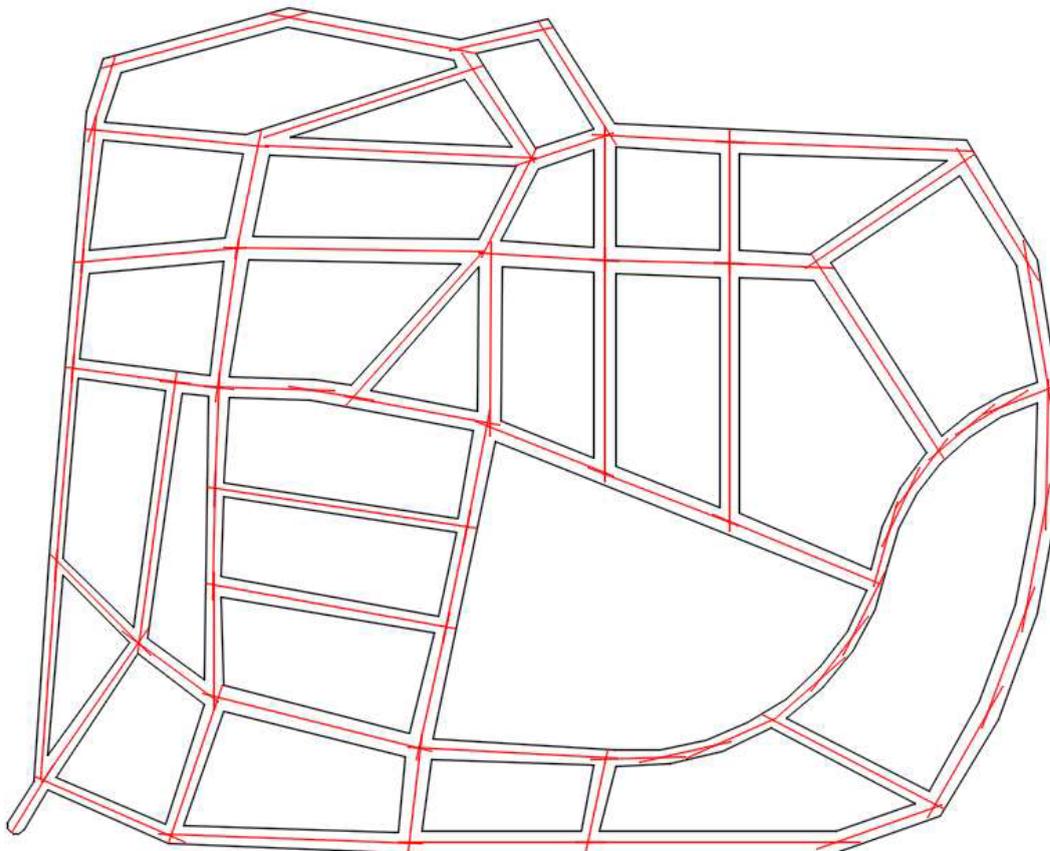
Figura 23 – Estudo de caso 2: Layout lido e linhas centrais das ruas em uma primeira versão



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 24, por sua vez, apresenta as linhas centrais das ruas após atualizá-las, gerando 296 pontos de interseção entre elas. A etapa de definição dos nós (Seção 3.5) identificou 59 nós (mostrados na Figura 25) utilizando a estratégia 2, que, conforme foi explicado anteriormente, foi escolhida por apresentar bom desempenho tanto com ruas ortogonais como também com ruas inclinadas.

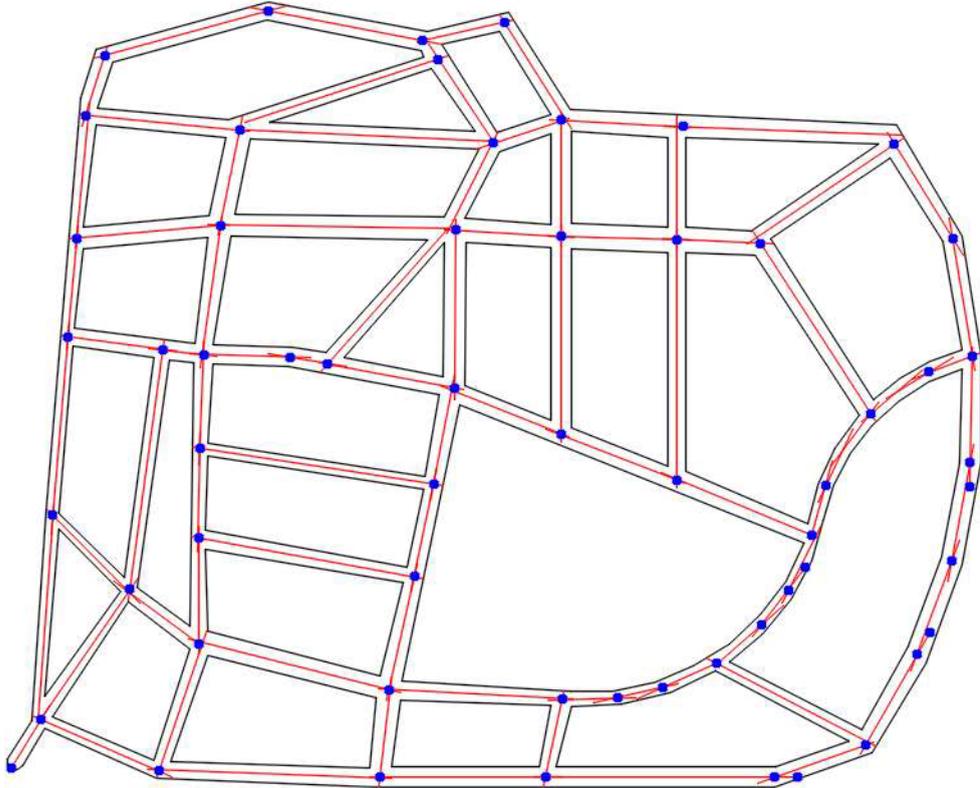
Figura 24 – Estudo de caso 2: Linhas centrais das ruas atualizadas



Fonte: Elaborada pelo autor.

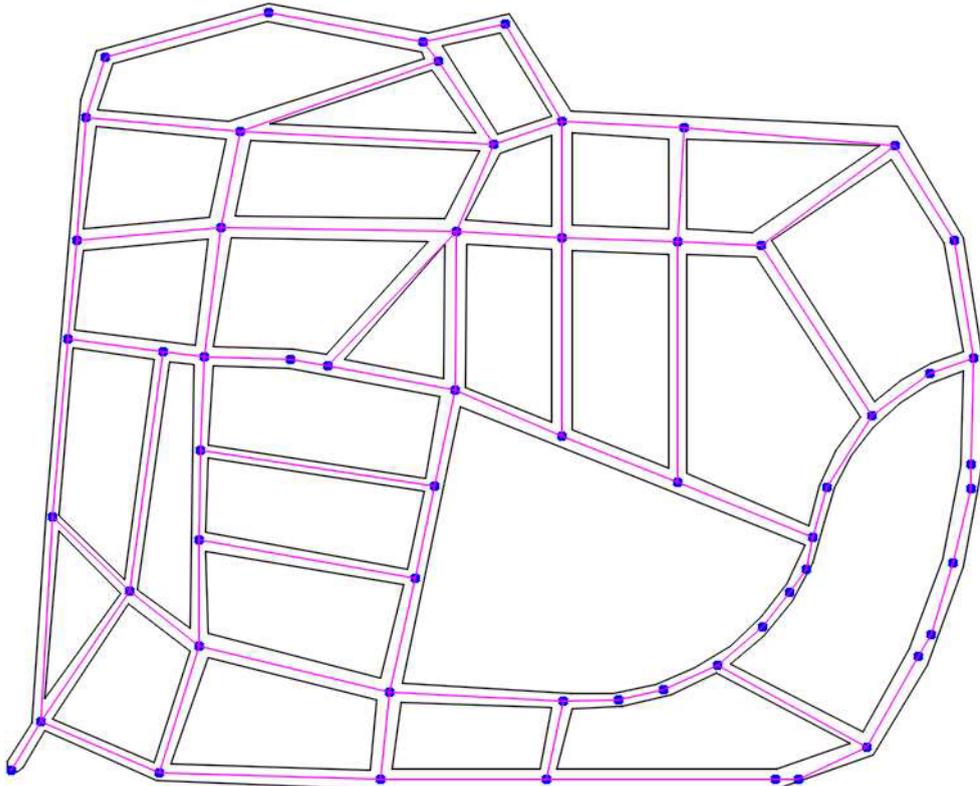
Na etapa de definição das tubulações (Seção 3.6) foram identificadas um total de 85 tubulações, as quais são mostradas na Figura 26. Ao analisar o posicionamento dos tubos dentro das ruas, assim como a disposição dos nós nos cruzamentos, conclui-se que, embora os resultados não sejam tão bons quanto no primeiro estudo de caso, o objetivo foi alcançado, visto que todos os nós e todas as tubulações estão localizadas dentro dos limites das ruas. Na última etapa do algoritmo, 14 nós foram convertidos em junções para geração da rede no EPANET, que é apresentada na Figura 27, sendo o número final de nós e tubulações da rede iguais a, respectivamente, 45 e 71.

Figura 25 – Estudo de caso 2: Nós iniciais da rede



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 – Estudo de caso 2: Tubulações iniciais da rede



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vale ressaltar que por causa da elevada variabilidade dos ângulos das ruas do layout abordado nesse estudo de caso, a definição dos valores dos parâmetros exigiu maior sensibilidade do usuário que no estudo de caso 1. Dessa forma, a variável mais influenciada foi o  $\theta'_{\text{máx}}$ , pois esse layout apresenta ângulos entre ruas bem pequenos que se aproximam do valor máximo adotado.

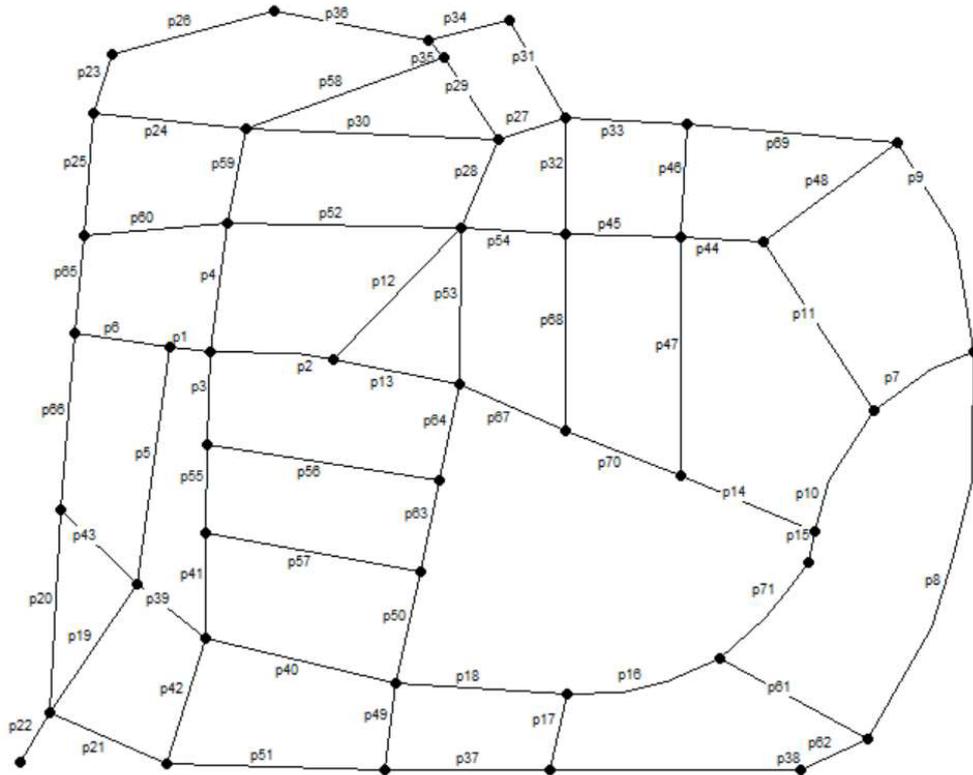
Para comparação dos resultados, também foi executado esse layout utilizando o modelo proposto por Costa e Rodrigues (2021), obtendo a rede apresentada na Figura 28, que, embora semelhante com o layout das ruas, apresentou diversas inconsistências. Inicialmente destaca-se o fato de que, assim como para o estudo de caso 1, o algoritmo de Costa e Rodrigues (2021) apresentou tubulações retas em ruas arqueadas, não demonstrando a mesma precisão que o presente modelo. Como exemplo disso, tem-se a tubulação p80 (Figura 28), que além de não representar fielmente a geometria do arco original contém um trecho localizado dentro do quarteirão, invadindo os limites da rua.

Além disso, outra falha identificada na rede criada por Costa e Rodrigues (2021) para esse estudo de caso é a geração de vários nós extras desnecessários, visto que a rede resultante possui um total de 58 nós, 13 a mais que a rede gerada pelo modelo proposto. Por consequência, a rede ainda apresenta várias tubulações de pequeno comprimento, cujos menores tubos (p48 e p71) apresentam apenas 2,40 m de comprimento.

Outra imperfeição apresentada na rede de Costa e Rodrigues (2021) foi a não criação de tubulações em duas ruas, as quais foram contempladas pelas tubulações p9 e p53 pelo presente modelo (ver Figura 27). A elevada sensibilidade do algoritmo de Costa e Rodrigues (2021) ao definir o valor do ângulo limite para a definição dos nós da rede é o motivo para a não criação do tubo p9, em que foi escolhido o valor de  $145^\circ$ . Realizando alguns testes, verificou-se que para a geração dessa tubulação é necessário aumentar o valor desse ângulo, o que causaria, todavia, outro problema: inúmeros nós extras e, por consequência, diversas tubulações de pequeno comprimento seriam geradas. Por exemplo, ao adotar o valor de  $155^\circ$  o tubo p9 seria gerado com sucesso, entretanto, o número de nós da rede aumentaria em 20 unidades.

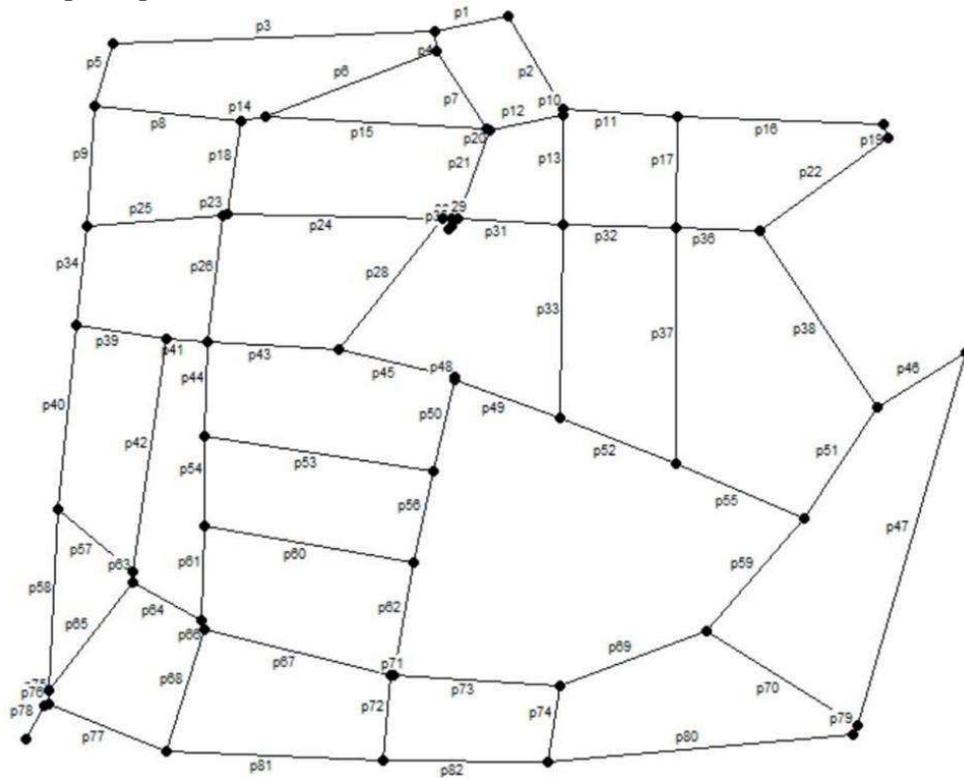
Em contrapartida, mesmo modificando, seja para mais ou para menos, o valor do ângulo limite para definição dos nós, a tubulação p53 não consegue ser identificado pela metodologia de Costa e Rodrigues (2021). Provavelmente, isso acontece porque a metodologia utilizada pelos autores só contempla cruzamentos com até 4 saídas, sendo o cruzamento do qual deriva essa tubulação composto por 5 tubos.

Figura 27 – Rede gerada no EPANET pelo modelo proposto para o exemplo hipotético do estudo de caso 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Rede gerada no EPANET por Costa e Rodrigues (2021) para o exemplo hipotético do estudo de caso 2

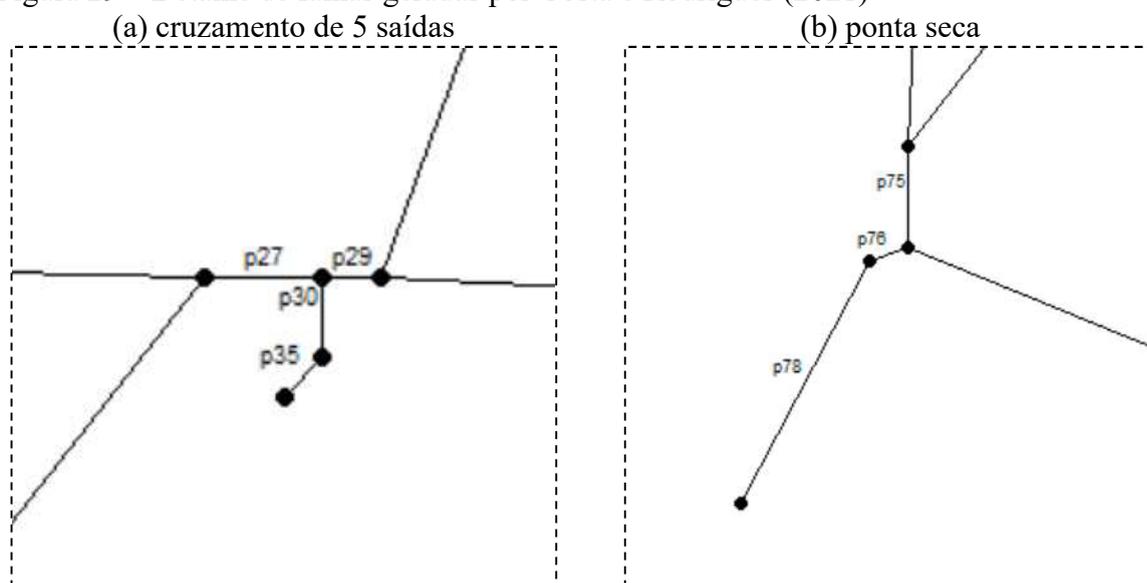


Fonte: Elaborada pelo autor.

O algoritmo proposto por esse trabalho, por sua vez, não demonstrou dificuldades para esse tipo de situação, visto que para esse cruzamento apenas um nó foi gerado e as 5 tubulações que derivam dele seguem o layout corretamente. O algoritmo de Costa e Rodrigues (2021), por outro lado, além de não criar o tubo p53 (na Figura 27), gerou um emaranhado de nós no cruzamento de 5 saídas, como ilustra o detalhe da Figura 29a, em que se nota a presença de uma ponta seca de pequena extensão.

O algoritmo de Costa e Rodrigues (2021) ainda apresentou para a rua sem saída localizada no canto inferior esquerdo do layout outra inconsistência que deve ser destacada: conforme apresenta o detalhe da Figura 29b, no cruzamento do qual deriva a ponta seca foram criados 3 nós, o que gerou 2 cruzamentos e um nó extra no tubo da rua sem saída. Dessa forma, novamente, a metodologia de identificação dos nós de Costa e Rodrigues (2021) se depara com uma situação não prevista: o encontro de 3 ruas não ortogonais. Isso reitera as dificuldades enfrentadas por esse modelo quando aplicado em layouts com elevado número de ruas inclinadas.

Figura 29 – Detalhe de falhas geradas por Costa e Rodrigues (2021)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Somado às inconsistências apresentadas ao criar a rede, ainda é preciso ressaltar que o modelo de Costa e Rodrigues (2021) completou todo o processo de geração da rede em 3,27 s, enquanto o modelo atual precisou de apenas 0,28 s, o que representa uma redução de tempo de, aproximadamente, 12 vezes em comparação com o modelo dos autores supracitados.

### 4.3 Estudo de caso 3 – Exemplo real de loteamento

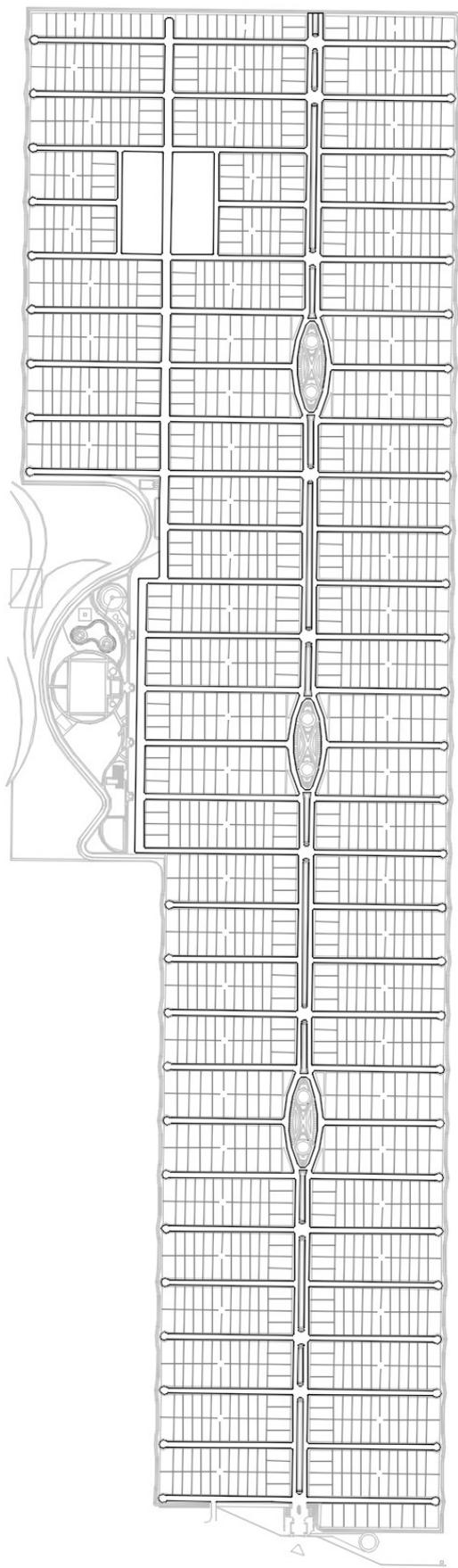
Para terceiro estudo de caso foi utilizado um loteamento localizado na cidade de Mossoró, no estado do Rio Grande Norte, Brasil. Optou-se por esse layout, ilustrado pela Figura 30, para demonstrar a eficácia do algoritmo em um projeto real e de maiores dimensões. Somado a isso, ainda pode-se encontrar nesse estudo de caso elementos comuns aos arruamentos de cidades, como canteiros centrais de avenidas e rotatórias.

Outra característica que merece destaque nesse estudo de caso é a presença de ruas com larguras muito diferentes, variando de 6 a 11,1 metros. Dessa forma, optou-se por definir a largura média das ruas ( $W_s$ ) como sendo igual a 6, visto que a maioria das ruas possuem essa largura. O valor escolhido para  $V_t$  foi bem alto (1,25) quando comparado aos outros estudos de caso devido a grande diferença entre os valores de largura da rua. Outra alternativa seria escolher um valor intermediário entre 6 e 11,1 m para  $W_s$  e diminuir o valor de  $V_t$ . Vale salientar que nas duas situações é preciso observar o intervalo de valores obtidos pela equação (39) para que todas as larguras de ruas fiquem dentro dessa faixa. Outra particularidade desse layout é o fato de que as quinas dos quarteirões são formadas por pequenos arcos, assim como as pontas das diversas ruas sem saídas que darão origem às pontas secas na rede de distribuição de água.

Ao executar o modelo utilizando os valores apresentados na Tabela 1, a partir do arquivo DXF foram de lidas 417 linhas e 389 arcos, resultando em um total de 3908 linhas após a conversão dos arcos em linhas. Inicialmente, foram geradas 244 linhas centrais de ruas em uma primeira versão, as quais são mostradas na Figura 31, assim como o layout lido. Conforme esperado, linhas desnecessárias foram criadas próximas aos canteiros centrais das avenidas, sendo necessário excluí-las. Assim, após a aplicar a correção (Seção 3.4.2) o número de linhas centrais de ruas em uma primeira versão diminuiu para 186, não havendo mais linhas erroneamente lançadas, como mostra a Figura 32.

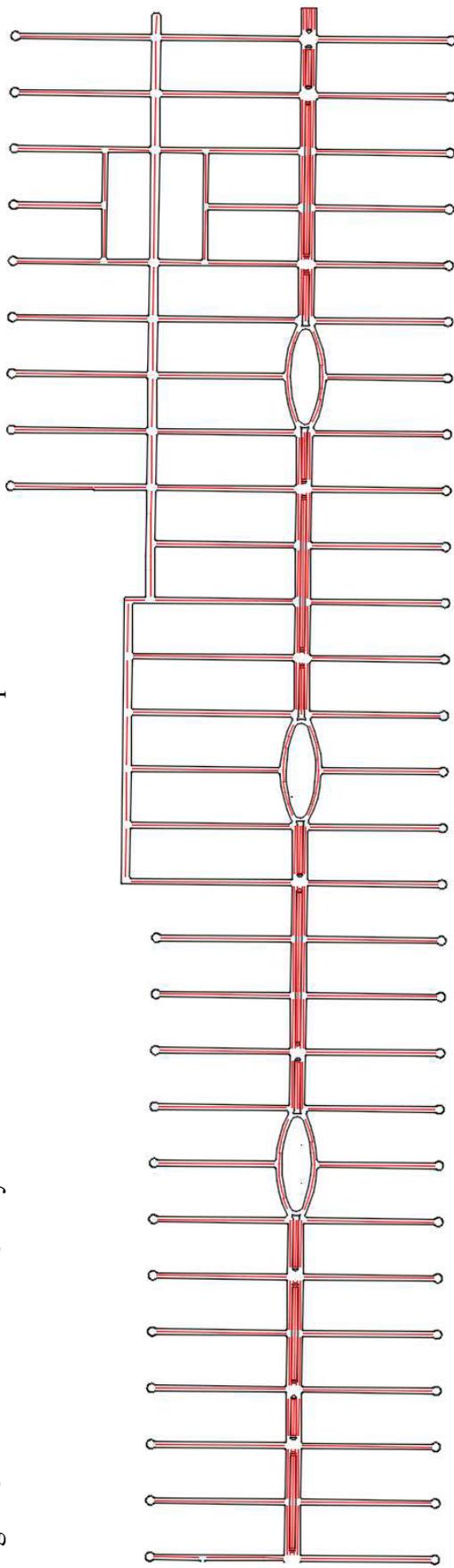
Após atualizar as linhas centrais das ruas, que são apresentadas na Figura 33, foram criados 467 pontos de interseção, os quais deram origem a 183 nós, ilustrados na Figura 34. Ao verificar a conectividades entre os nós da rede, foram identificadas 211 tubulações, as quais são mostradas na Figura 35. Para criação do arquivo INP foram convertidos 49 nós em junções de tubulações, sendo a rede final composta por 134 nós e 162 tubulações, que é apresentada na Figura 36. O elevado número de junções é explicado pela presença de muitas ruas arqueadas (rotatórias). O layout abordado nesse estudo de caso também foi executado utilizando o algoritmo de Costa e Rodrigues (2021), sendo seu resultado exposto na Figura 37, em que se nota várias imperfeições.

Figura 30 – Exemplo de layout de ruas real do estudo de caso 3



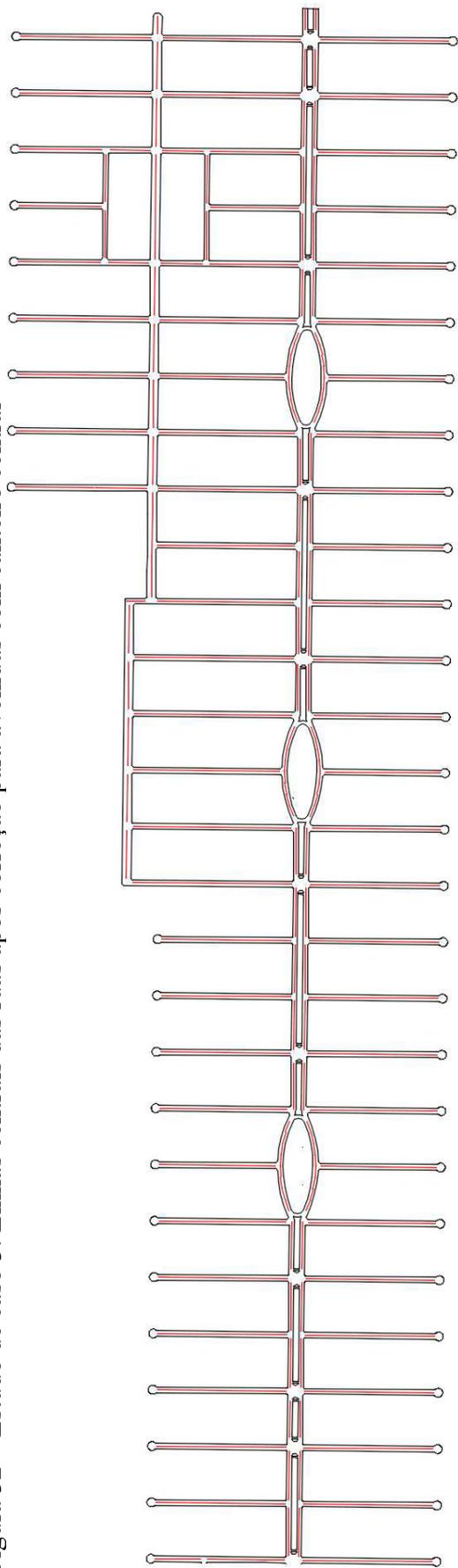
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 31 – Estudo de caso 3: Layout lido e linhas centrais das ruas em uma primeira versão



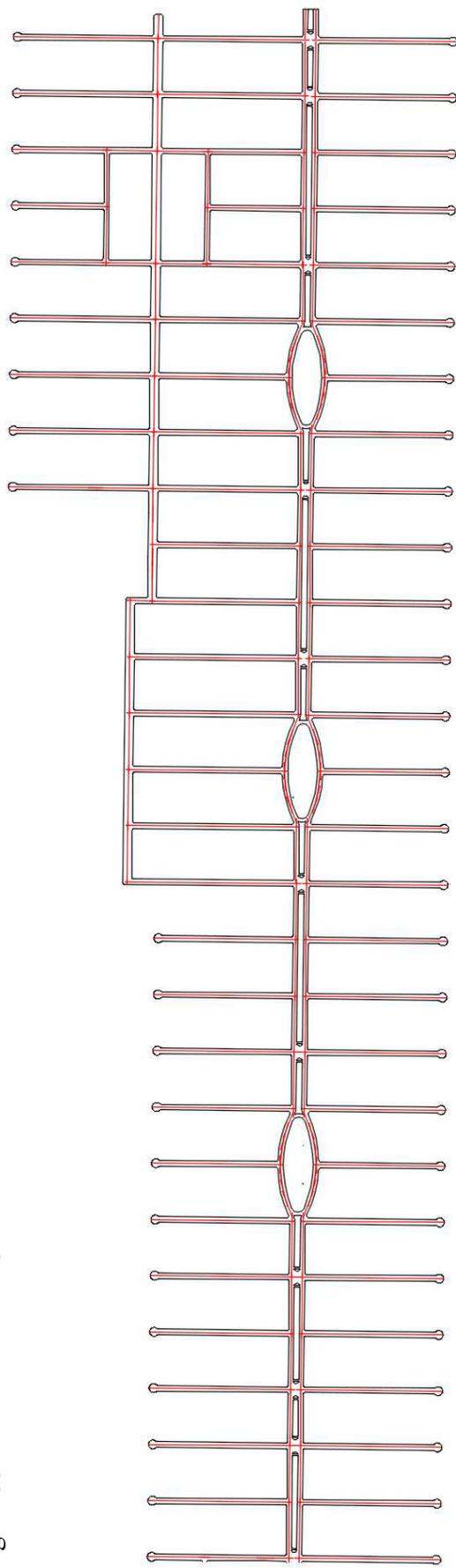
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Estudo de caso 3: Linhas centrais das ruas após correção para avenidas com canteiro central



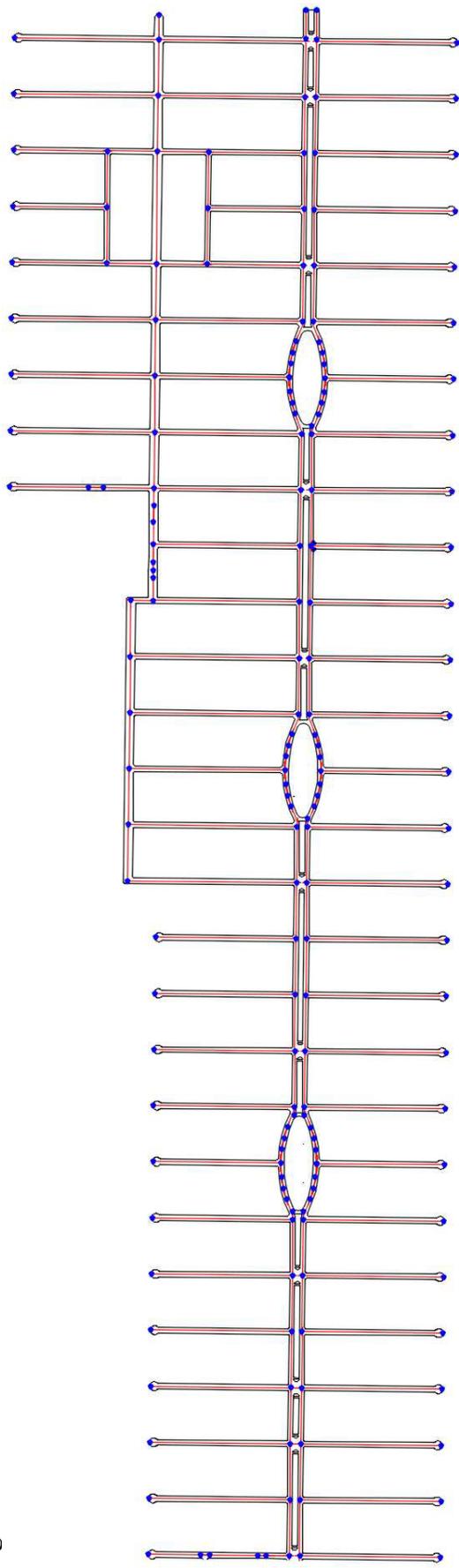
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33 – Estudo de caso 3: Linhas centrais das ruas atualizadas



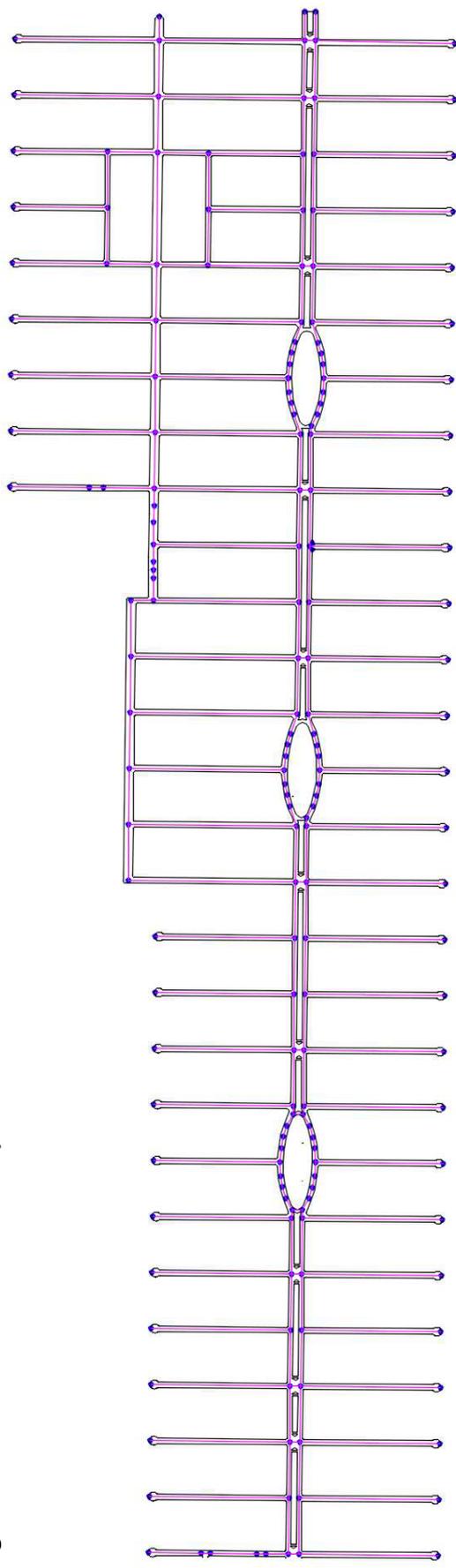
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 – Estudo de caso 3: Nós iniciais da rede



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 35 – Estudo de caso 3: Tubulações iniciais da rede



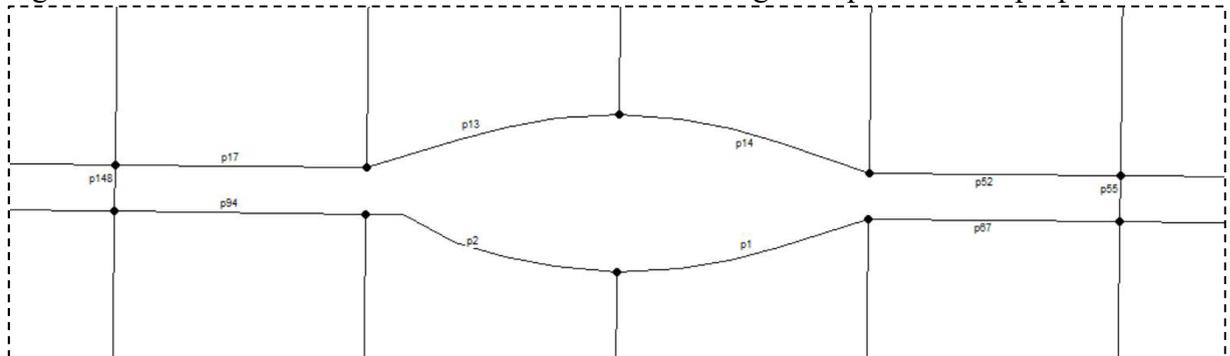
Fonte: Elaborada pelo autor.



A partir da análise da Figura 37, verifica-se que o modelo proposto por Costa e Rodrigues (2021) não apresenta um bom desempenho para layouts que possuem arcos. Por exemplo, em diversas pontas secas da parte inferior do layout, as quais são formadas por semicírculos, foram criados nós extras e, conseqüentemente, tubulações de pequeno comprimento (p233 a p242). Isso ocorre, provavelmente, devido ao afinamento da imagem binária acompanhar o formato dos arcos mesmo quando eles possuem raio muito pequeno, como também ocorre nas quinas dos cruzamentos, o que posteriormente gera erros na identificação dos nós. A avenida com canteiro central também foi gerada de maneira irregular, pois também apresenta extremidades formadas por arcos de pequeno raio.

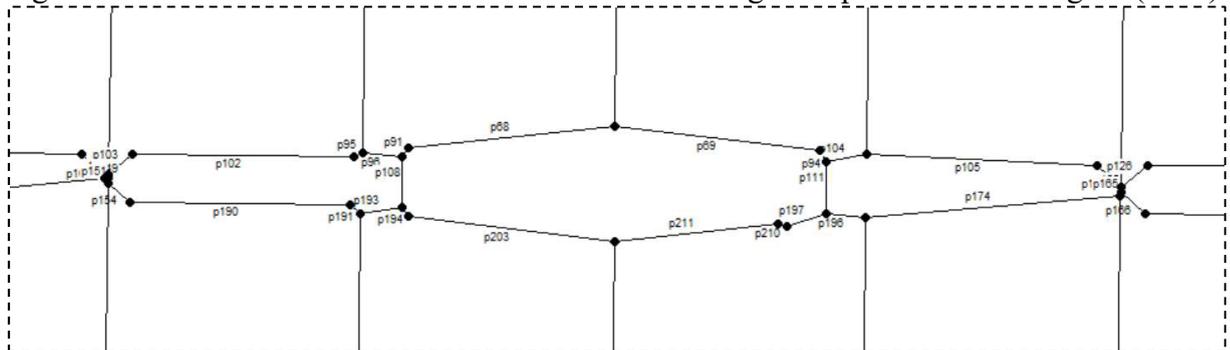
As rotatórias, que são formadas por arcos com raios grandes, também foram criadas com a presença de nós extras e não seguem o layout original das ruas. A Figura 38 apresenta o detalhe da rotária central do layout gerada pelo presente modelo, em que verifica-se resultados fieis ao layout original e o bom desempenho do modelo para essa particularidade desse estudo de caso, enquanto a Figura 39 apresenta a parte da rede gerada para esse mesmo recorte do layout utilizando o modelo de Costa e Rodrigues (2021), sendo notória a presença de várias imperfeições na rede quando comparada com o layout original.

Figura 38 – Estudo de caso 3: Detalhe da rotatória central gerada pelo modelo proposto



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 – Estudo de caso 3: Detalhe da rotatória central gerada por Costa e Rodrigues (2021)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto ao tempo computacional, o algoritmo levou 33,4 s para executar todo o processo, o que demonstra um aumento excessivo do tempo em função do aumento de tamanho do layout. O modelo de Costa e Rodrigues (2021), por sua vez, apresentou um tempo computacional para esse estudo de caso de 115,7 s, sendo apenas 3,46 vezes maior que o tempo obtido pelo presente modelo. Dessa forma, para esse estudo de caso, embora o tempo obtido pelo presente modelo seja menor que o obtido por Costa e Rodrigues (2021), a diferença entre os tempos computacionais de execução diminuiu em comparação com os outros estudos de caso.

Isso pode ser explicado pelo fato desse layout de ruas possuir muito arcos, os quais darão origem a muitas linhas de pequeno comprimento, o que influencia diretamente no tempo computacional. Uma alternativa para diminuir o tempo computacional é aumentar o valor do parâmetro  $\theta_{div}$ . Por exemplo, utilizando o valor de  $15^\circ$ , o número de linhas após a conversão dos arcos é de 2580 e o tempo computacional do processo diminui para 17,6 s. Em contrapartida, esse aumento no valor de  $\theta_{div}$  pode comprometer a geometria do arco formado pelas pequenas retas, podendo a tubulação final não formar um arco bem definido, como foi no caso do uso do valor de  $15^\circ$ , ou até mesmo ultrapassar os limites das ruas, como seria o caso se o valor utilizado fosse  $20^\circ$ .

#### **4.4 Aparato geral de resultados**

A Tabela 2 apresenta o resumo dos resultados para os três estudos de caso, em que se destaca o fato de que para todos os estudos de caso o presente modelo apresentou redes com menor número de nós e de tubos e um tempo total de execução bem menor que o modelo proposto por Costa e Rodrigues (2021).

Tabela 2 – Resumo dos resultados para os 3 estudos de caso

	<b>Estudo de caso 1</b>	<b>Estudo de caso 2</b>	<b>Estudo de caso 3</b>	
Nº de linhas do layout original	233	120	417	
Nº de arcos do layout original	0	10	389	
Nº de linhas do layout após conversão dos arcos	233	159	3908	
Nº de linhas centrais das ruas	130	82	244	
Nº de linhas centrais das ruas após correção	130	82	186	
Nº de pontos de interseção entre as LCRs	469	296	467	
Nº de nós inicial	76	59	183	
Nº de tubulações inicial	128	85	211	
Nº de nós convertidos em junções	4	14	49	
Nº de nós final	Modelo proposto	72	45	134
	Costa e Rodrigues (2021)	73	58	212
Nº de tubulações final	Modelo proposto	124	71	162
	Costa e Rodrigues (2021)	125	82	242
Tempo computacional (s)	Modelo proposto	0,32	0,28	33,4
	Costa e Rodrigues (2021)	3,30	3,27	115,7

Fonte: Elaborada pelo autor.

## **5 DISPONIBILIDADE DE DADOS**

O código completo do modelo desenvolvido neste trabalho é disponibilizado para download através do link [www.aquacad.net/automaticgeneration2](http://www.aquacad.net/automaticgeneration2), assim como todos os arquivos de entrada no formato DXF contendo os layouts de ruas utilizados nos três estudos de caso.

## 6 CONCLUSÕES

O algoritmo apresentado por este trabalho gerou automaticamente o traçado das redes distribuição de água em um arquivo de entrada do EPANET a partir dos arruamentos contidos em um arquivo DXF. A metodologia proposta teve início com leitura do arquivo DXF e conversão de todas as entidades do desenho em linhas, as quais foram tratadas matematicamente como segmentos de retas, possibilitando a aplicação das equações paramétricas. Identificou-se a linha central de cada uma das ruas e os pontos de interseção criados pelos cruzamentos delas foram utilizados para a definição dos nós. Em seguida, checkou-se a conectividade entre os nós e identificou-se as tubulações. Por fim, foram definidas as junções das tubulações e criado o arquivo de entrada do EPANET.

Para comprovação da eficácia do modelo proposto foram abordados três estudos de casos, sendo os resultados obtidos para todos eles satisfatórios, em que todas as redes geradas foram semelhantes aos seus respectivos layouts originais das ruas. Dessa forma, todas as ruas foram contempladas com tubulações localizadas dentro de seus limites e os nós foram locados adequadamente nos cruzamentos. Embora a definição dos parâmetros de entrada para cada estudo de caso tenha exigido maior sensibilidade do usuário conforme a variabilidade dos ângulos das ruas aumentasse, foi possível gerar todas as redes sem imperfeições. Em contrapartida, o modelo de Costa e Rodrigues (2021) demonstrou trabalhar bem apenas com ruas ortogonais, gerando diversas falhas nas redes com muitas ruas inclinadas e arqueadas.

Comparando as redes geradas pelas duas metodologias, verifica-se que o modelo proposto em todos os estudos de caso apresentou redes com menos nós e tubos, sendo bem maior a diferença para os estudos de caso 2 e 3, que são os que possuem maior grau de complexibilidade no layout. Assim, as diferentes particularidades de cada um dos estudos de casos comprovaram o diferencial deste trabalho, que é a aplicabilidade nos mais diversos tipos de layout, sendo eficaz mesmo com a presença de ruas bastante inclinadas e arqueadas.

Em termos de tempo computacional, este projeto também apresentou resultados satisfatórios, sendo bem menor que o de Costa e Rodrigues para todos os estudos de caso. Destaca-se que essa diferença foi maior para os estudos de caso 1 e 2, em que se obteve um tempo mais de 10 vezes menor que Costa e Rodrigues (2021), enquanto para o estudo de caso 3 foi apenas 3,5 vezes menor. Posto isso, foi observado que tempo computacional de execução está diretamente relacionado com o número de linhas do layout. Dessa forma, deve-se especificar com atenção o ângulo divisão dos arcos, visto que ele influencia fortemente o

número final de linhas quando o layout possui muitos arcos em sua composição, como foi o caso do estudo de caso 3, que apresentou um tempo elevado em comparação com os outros.

Dessa forma, conclui-se que o modelo proposto cumpriu seu objetivo, visto que todas as redes foram geradas de forma automática no EPANET, sem a necessidade de preparar o traçado da rede manualmente ou de fazer posteriores correções no layout gerado. Para estudos futuros, pretende-se adaptar a metodologia exposta para gerar automaticamente traçados de redes de esgoto.

## REFERÊNCIAS

AUTODESK AUTOCAD. **About the DXF Format (DXF)**, 2022. Autodesk Inc. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/OARX/2019/ENU/?guid=GUID-235B22E0-A567-4CF6-92D3-38A2306D73F3>. Acesso em: 11 ago. 2022.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm). Acesso em: 15 nov. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrôpole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art7](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art7). Acesso em: 15 nov. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2017**. Brasília: SNS/MDR, 2019.

COSTA, L. H. M. AQUACAD – aplicação online para automação de projetos de saneamento. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 30., 2019, Natal. **Anais eletrônicos** [...]. Natal: ABES, 2019. Disponível em: <https://abesnacional.com.br/XP/XPEasyArtigos/Site/Uploads/Evento45/TrabalhosCompletoPDF/II-340.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2022.

COSTA, L.H.M.; RODRIGUES, G.P.W. Automatic Generation of Water Distribution Networks from Streets Layout. **Water Resour Manage**, Suíça, v. 35, p. 1299–1319, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02785-8>. Acesso em: 06 out. 2022.

DE CORTE, A.; SÖRENSEN, K. HydroGen: an Artificial Water Distribution Network Generator. **Water Resour Manage**, Suíça, v. 28, p. 333–350, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0485-y>. Acesso em: 06 out. 2022.

GOMES, Heber Pimentel. **Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias**. 2 ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2004.

HALLMANN, C.; KUHLEMANN, S. Model generator for water distribution systems. *In*: Kliewer, N., Ehmke, J., Borndörfer, R. (eds). **Operations Research Proceedings 2017**. Suíça, Springer, Cham, 2018, p. 245–251. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89920-6\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89920-6_34). Acesso em: 17 nov. 2022.

ITA. **EPACAD**. Universidade Politécnica de Valência, Valência, 2020. Disponível em: <https://www.epacad.com/>. Acesso em: 16 out. 2022.

MASCARÓ, Juan Luis. **Loteamentos urbanos**. 2 ed. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2005.

MICROSOFT LEARN. **A tour of the C# language**. Microsoft, 2022. Disponível em: <https://learn.microsoft.com/pt-br/dotnet/csharp/tour-of-csharp/>. Acesso em: 06 out. 2022.

MÖDERL, M.; FETZ, T.; RAUCH, W. Stochastic approach for performance evaluation regarding water distribution systems. **Water Sci Technol**, Londres, v. 56, n. 9, p. 29–36, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2007.598>. Acesso em: 6 nov. 2022.

MÖDERL, M.; SITZENFREI, R.; FETZ, T.; FLEISCHHACKER, E.; RAUCH, W. Systematic generation of virtual networks for water supply. **Water Resour. Res.**, Washington, v. 47, n. 2, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2009WR008951>. Acesso em: 20 nov. 2022.

MURANHO, J.; FERREIRA, A.; SOUSA, J.; GOMES, A.; MARQUES, A.S. WaterNetGen: an EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing. **Water Supply**, Londres, v.12, n. 1, p. 117-123, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2011.121>. Acesso em: 20 nov. 2022.

PMSS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2007**. Brasília: MCIDADES.SNSA, 2009.

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 Resour Manag**, Suíça, v. 33, n. 13, p. 4583–4598, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02373-x>. Acesso em: 15 nov. 2022.

ROSSMAN, L.A. **EPANET 2 Users Manual**. Cincinnati, U. S. Environmental Protection Agency, 2000.

SITZENFREI, R.; MÖDERL, M.; RAUCH, W. Automatic generation of water distribution systems based on GIS data. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdã, v. 47, p. 138-147, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.006>. Acesso em: 17 nov. 2022.

TRIFUNOVIĆ, N.; MAHARJAN, B.; VAIRAVAMOORTHY, K. Spatial network generation tool for water distribution network design and performance analysis. **Water Supply**, Londres, v. 13, n. 1, p. 1-19, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2013.008>. Acesso em: 15 nov. 2022.