

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

THAYSE AMANDA SIQUEIRA SANTOS

**AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA DE CONDOMÍNIOS HORIZONTAIS**

CARUARU

2019

THAYSE AMANDA SIQUEIRA SANTOS

**AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA DE CONDOMÍNIOS HORIZONTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco – Centro
Acadêmico do Agreste – como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Hidráulica.

Orientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra.

CARUARU

2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

- S237a Santos, Thayse Amanda Siqueira.
Avaliação do dimensionamento de sistemas de distribuição de água de condomínios horizontais. / Thayse Amanda Siqueira Santos. – 2019.
80 f. il. : 30 cm.
- Orientador: Saulo de Tarso Marques Bezerra.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.
1. Abastecimento de água. 2. EPANET (Programa de computador). 3. Custos. 4. Resiliência (Ecologia). I. Bezerra, Saulo de Tarso Marques (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2019-110)

THAYSE AMANDA SIQUEIRA SANTOS

**AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA DE CONDOMÍNIOS HORIZONTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco – Centro
Acadêmico do Agreste – como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco – CAA

Prof^a. Dr^a. Elizabeth Amaral Pastich Gonçalves
Universidade Federal de Pernambuco – CAA

Prof. Dr. Edevaldo Miguel Alves
Universidade Federal de Pernambuco – CAA

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos
(Coordenador da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso)
Universidade Federal de Pernambuco – CAA

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria José e Severino, pelo exemplo de vida, pelo apoio incondicional, pelo amparo nos momentos mais complicados e pela confiança e orgulho que sempre demonstraram e que serviram de estímulo para que eu conseguisse seguir em frente.

Aos meus irmãos: Haryson e Anderson pelo apoio, incentivo e ajudas em diferentes momentos da minha vida.

A meu namorado Letônio, por sempre me incentivar nos momentos mais difíceis, por me reanimar nos momentos de cansaço e pela motivação e encorajamento demonstrados ao longo da minha vida acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra, pela orientação, disponibilidade, compreensão, pelos ensinamentos e, principalmente, pela sua paciência ao longo deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Alessandro Romário Echevaria Antunes pela imensa contribuição para a minha formação acadêmica nos dois anos de orientação no projeto de Iniciação Científica.

Aos demais professores da universidade, que me passaram seus conhecimentos e contribuíram para minha formação.

À LVF Empreendimentos pela oportunidade de estágio, por me receberem tão bem, pelos ensinamentos e pela preocupação em vários momentos.

Aos meus colegas de trabalho da Pórtis, empresa júnior de Engenharia Civil, a qual tive a honra de integrar por 1 ano, pelas experiências, pelo incentivo, aprendizado e, principalmente, pela paciência.

Por fim, à UFPE e a todos aqueles que não foram mencionados, mas que de alguma forma contribuíram com meu desenvolvimento.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo fazer uma análise comparativa entre métodos de dimensionamento de uma rede de distribuição de água, projetada para o abastecimento público de um condomínio horizontal localizado em Caruaru-PE, dando ênfase à eficiência econômica e hidráulica de cada solução obtida. A metodologia aqui proposta para a avaliação econômica dos dimensionamentos calcula o custo de implantação da rede considerando as despesas de aquisição das tubulações, conexões e acessórios que compõem a mesma. A fim de alcançar tais objetivos, foram utilizadas como ferramentas de cálculo hidráulico o simulador hidráulico EPANET versão 2.0, o Excel e o método LENHSNET de otimização, seguindo os procedimentos propostos pela NBR 12218/2017 e pela norma de projetos da COMPESA. Finalizada a análise e com a população e vazão de projeto definidas, foi proposta a concepção e o dimensionamento otimizado de uma rede alternativa de tipologia malhada para o condomínio. Os resultados apresentados por todos os métodos e traçados estudados demonstraram que não é possível alcançar a condição de velocidade mínima exigida pela NBR 12218 para todos os trechos quando a vazão de projeto é muito pequena. As soluções apresentadas por todos os métodos foram satisfatórias para o dimensionamento das redes, no entanto não foi possível otimizar os resultados da rede malhada no Excel, pois o otimizador do *software*, Solver®, não suporta a quantidade de restrições imposta. Apesar do entrave, o recurso se mostrou eficiente quando aplicado a redes ramificadas gerando custos de implantação muito próximos aos obtidos no EPANET. Quanto à rede alternativa, foi possível observar que, como era de se esperar para uma rede malhada, a mesma apresentou custo de implantação superior quando comparada ao traçado ramificado. Apesar de perder no desempenho econômico, a rede proposta se mostrou mais confiável em razão da sua resiliência na ocorrência de falhas nos condutos que a permite se adaptar a situações adversas sem a interrupção em grande escala do abastecimento. Por fim, foi comprovado que não se deve generalizar na escolha do tipo de traçado, pois todo caso deve ser estudado de acordo com as suas particularidades e todos os prós e contras devem ser avaliados atentamente por um profissional antes de tomar qualquer decisão.

Palavras-chave: Rede ramificada. Custos. EPANET. Rede malhada. Resiliência.

ABSTRACT

The present study aims to make a comparative analysis between methods of sizing a water distribution network, designed for the public supply of a horizontal condominium located in Caruaru-PE, emphasizing the economic and hydraulic efficiency of each solution obtained. The methodology proposed here for the economic evaluation of the sizing calculates the cost of implementing the network considering the costs of acquiring the pipes, connections and accessories that make up the network. In order to achieve these objectives, the Hydraulic Simulator EPANET version 2.0, Excel and the LENHSNET optimization method were used as hydraulic calculation tools, following the procedures proposed by NBR 12218/2017 and the COMPESA project standard. After the analysis and with the population and project flow defined, it was proposed to design and optimize the dimensioning of an alternative network of meshes typology for the condominium. The results presented by all the methods and models studied showed that it is not possible to reach the minimum speed condition required by NBR 12218 for all the sections when the project flow is very small. The solutions presented by all the methods were satisfactory for the sizing of the networks, however it was not possible to optimize the results of the looped network in Excel, because the software optimizer, Solver®, does not support the amount of restrictions imposed. Despite the obstacle, the resource proved efficient when applied to branched networks generating deployment costs very close to those obtained in the EPANET. As for the alternative network, it was possible to observe that, as expected for a looped network, it had higher implantation cost when compared to the branched model. Despite the loss in economic performance, the proposed network proved more reliable due to its resilience in the occurrence of faults in the ducts that allows it to adapt to adverse situations without the large-scale interruption of supply. Finally, it has been established that the choice of type of route should not be generalised, because any case should be studied according to its particularities and all pros and cons should be carefully evaluated by a professional before making any decision.

Keywords: Branched network. Cost. EPANET. Looped network. Resilience.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo	21
Figura 2 – Esquema Hidráulico do setor 2	22
Figura 3 – Tubo de PVC PBA.....	33
Figura 4 – Tubo de PVC DEFoFo.....	34
Figura 5 – Janela de entrada de parâmetros do Solver	40
Figura 6 – Caixa de diálogo do <i>Solver</i>	41
Figura 7 – Página inicial do EpaCAD	42
Figura 8 – Janela de configuração de conversão do EpaCAD	43
Figura 9 – Tela inicial do EPANET	44
Figura 10 – Esquema de cálculo do consumo-base dos nós	44
Figura 11 – Janela de edição de propriedades dos nós (à esquerda) e dos trechos (à direita)	45
Figura 12 – Janela de edição de propriedades do reservatório de nível fixo	45
Figura 13 – Janela de configuração dos dados dos tubos	46
Figura 14 – Janela de edição das opções de simulação	46
Figura 15 – Janela de configuração dos dados do projeto	47
Figura 16 – Relatório da otimização	48
Figura 17 – Rede modelada no AutoCAD	55
Figura 18 – Distribuição de pressões na rede existente	57
Figura 19 – Distribuição das velocidades na rede existente.....	58
Figura 20 – Distribuição de pressões na rede malhada	60
Figura 21 – Distribuição das velocidades na rede malhada	61
Figura 22 – Pressão nos nós para os métodos aplicados à rede ramificada	62
Figura 23 – Comportamento das pressões nas duas tipologias de traçado	63

Figura 24 – Velocidade em cada nó para os métodos aplicados à rede ramificada	64
Figura 25 – Velocidade em cada nó aplicado às duas tipologias de traçado	65
Figura 26 – Comparativo das perdas de carga unitária para os métodos aplicados à rede ramificada	66
Figura 27 – Comparativo das perdas de carga unitária nas duas tipologias de traçado	67
Figura 28 – Pressões para situações de rompimento de trechos T3, T9 e T10	69
Figura 29 – Pressões para situações de rompimento de trechos T10, T11 e T14	70
Figura 30 – Pressões para situações de rompimento de trechos T26, T33 e T48	71
Figura 31 – Pressões para situações de rompimento de trechos T50, T51 e T52	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição da rede de distribuição de água	23
Tabela 2 – Distribuição dos comprimentos por trecho da rede existente.....	24
Tabela 3 – Distribuição das cotas por nó da rede existente	24
Tabela 4 – Reserva mínima para combate a incêndios em função da classe de ocupação do risco	27
Tabela 5 – Principais classes de ocupação e de risco.....	28
Tabela 6 – Classes de Risco	28
Tabela 7 – Limites práticos de vazão para tubulações de rede de distribuição	32
Tabela 8 – Valores do coeficiente C sugeridos para a fórmula de Hazen-Williams para tubos usados com aproximadamente 20 anos	36
Tabela 9 – Coeficientes de Rugosidade para a Fórmula de Hazen-Williams	36
Tabela 10 – Custos de implantação, por metro linear, das tubulações em função do diâmetro nominal.....	38
Tabela 11 – Resumo dos Parâmetros e Critérios de Projeto	50
Tabela 12 – Parâmetros de cálculo da demanda de água.....	51
Tabela 13 – Resumo dos resultados obtidos.....	51
Tabela 14 – Cálculo hidráulico da Rede de Distribuição de água.....	53
Tabela 15 – Orçamento dos custos de implantação	54
Tabela 16 – Verificações dos limites de velocidade e pressão	54
Tabela 17 – Consumo-base dos nós	56
Tabela 18 – Distribuição dos diâmetros da rede existente	56
Tabela 19 – Consumo-base dos nós da rede malhada	59
Tabela 20 – Resumo dos resultados obtidos por cada metodologia.....	68

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
GRG2	Gradientes Reduzidos Generalizados
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
GPL	Gradiente de Programação Linear
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
MINLP	<i>Mixed integer non-Linear programming</i>
MINPGA	<i>Multiscale Island Niche Pareto Genetic Algorithm</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OMS	Organização Mundial da Saúde
PVC	Policloreto de Vinila
RDA	Redes de Distribuição de Água
RNF	Reservatório de Nível Fixo
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
NPE	Norma de Projetos de Engenharia
TSIB	Tarifa de Seguro - incêndio do Brasil
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{conduto}	Área do conduto
D_{int}	Diâmetro interno
f	Fator de atrito
g	Aceleração da gravidade
h_f	Perda de Carga contínua
J	Perda de Carga unitária
k_1	Coeficiente de variabilidade máxima diária do fluxo
k_2	Coeficiente de variabilidade máxima horária do fluxo
L_{jus}	Comprimento da tubulação à jusante do trecho
L_{Trecho}	Comprimento do trecho
L_{total}	Comprimento total da tubulação
N_{lotes}	Número de lotes
P	Previsão da população a ser atendida
qpc	Consumo Per Capita
$Q_{d>c}$	Vazão do dia de maior consumo
Q	Vazão de projeto
Q_{sing}	Vazão especial necessária para o atendimento de consumidores singulares
Q_{mar}	Vazão de distribuição em marcha
Q_{jus}	Vazão à jusante do trecho
Q_{trecho}	Vazão do trecho
Q_{fic}	Vazão fictícia
TO	Taxa de ocupação
$V_{\text{útil}}$	Volume útil
$V_{\text{incêndio}}$	Volume de combate a incêndio
$V_{\text{emergência}}$	Volume de emergência para adução

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
4	METODOLOGIA	21
4.1	ÁREA DE ESTUDO.....	21
4.2	LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES.....	23
4.3	ESTIMATIVA DA DEMANDA DE ÁGUA	25
4.3.1	População de Projeto	25
4.3.2	Volume de Reservação	26
4.3.3	Vazão do Projeto.....	29
4.4	CRITÉRIOS E PARÂMETROS DE PROJETO.....	31
4.4.1	Velocidade.....	31
4.4.2	Diâmetros	32
4.4.3	Material da tubulação	33
4.4.4	Perda de Carga	34
4.4.5	Pressão Disponível	37
4.4.6	Custo de Implantação.....	37
4.5	DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO.....	38
4.5.1	Microsoft Office Excel.....	38
4.5.2	EPANET	41
4.6	SIMULAÇÃO DE FALHAS MECÂNICAS	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1	RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DA REDE RAMIFICADA NO EXCEL	51

5.2	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA REDE RAMIFICADA NO EPANET.....	54
5.3	RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DA REDE MALHADA	59
5.4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A REDE RAMIFICADA E A REDE MALHADA.....	62
5.5	ANÁLISE DA RESILIÊNCIA DA REDE MALHADA.....	68
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
	REFERÊNCIAS.....	75
	APÊNDICE A – TRAÇADO BASE DA REDE RAMIFICADA.....	79
	APÊNDICE B – TRAÇADO BASE DA REDE MALHADA	80

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, inúmeros são os debates ocorridos em cenário mundial em torno dos problemas oriundos da má administração da água e de sua disponibilidade às gerações futuras. Segundo relatório divulgado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), 2,1 bilhões de pessoas no mundo não têm acesso a água potável dos quais 263 milhões precisam viajar mais de trinta minutos para recolher água de fontes seguras e 159 milhões sequer bebem água tratada.

Questões como inundações, seca, desperdício e deficiência de saneamento básico têm colocado em evidência a necessidade de implantação de sistemas de abastecimento de água (SAA) cada vez mais eficientes. A eficiência em um SAA está diretamente relacionada ao volume de perdas na distribuição.

As perdas de água em sistemas de abastecimento podem ocorrer por diversas razões: extravasamento de reservatórios, execução de manutenções, procedimentos de limpeza, ligações clandestinas, entre outros. No entanto, as perdas mais frequentes ocorrem devido a vazamentos nas tubulações e conexões o que faz da rede de distribuição de água (RDA) o componente mais crítico do SAA.

Com base em dados fornecidos pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) referente ao ano de 2017 (BRASIL, 2019), no Brasil o índice médio anual de perdas na distribuição foi de 38,3%. Ao analisar os resultados segundo os prestadores de serviço de abrangência regional, 52% volume de água disponibilizado pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) não foi contabilizado como volume utilizado pelos consumidores.

Segundo estudo encomendado pelo movimento Menos Perda, Mais Água do Instituto Trata Brasil, em parceria com a GO Associados, o volume de água tratada desperdiçado durante a distribuição causou a perda no faturamento de cerca de 10,560 bilhões de reais em 2016, correspondendo a 92% de todo o capital investido em saneamento básico no Brasil no referido ano (R\$ 11,5 milhões). Convém salientar que índices de perdas elevados tem relação direta com o mau planejamento e com a manutenção deficiente do sistema.

Neste contexto, nota-se a fundamental importância de que as companhias de saneamento do país tenham uma maior atenção com a gestão dos recursos hídricos trabalhando com ferramentas eficientes de concepção e manutenção dos sistemas de abastecimento.

A análise econômica e financeira tem papel fundamental na elaboração de qualquer projeto de engenharia, sobretudo em sistemas de abastecimento público de água por apresentarem custos elevados. Um dos maiores desafios das companhias de saneamento consiste em suprir a crescente necessidade de água da população de forma eficiente investindo o menor capital possível para isso.

Segundo Tsutiya (2004), dentro do capital investido em um sistema de abastecimento público, o dimensionamento de redes de distribuição de água (RDA) representam uma parcela significativa de 38% a 76% sobre o custo total de implantação do sistema que, ao contrário das despesas de captação de água, aumentam conforme o tamanho da população atendida.

Um grande número de pesquisas tem sido realizadas ao longo dos anos na área de otimização do dimensionamento de RDA, cada uma com suas características próprias, mas um objetivo em comum: encontrar a solução de menor custo que cumpra todas as restrições hidráulicas recomendadas pelas normas técnicas. No entanto, são poucos os estudos que avaliam a confiabilidade da permanência do abastecimento na ocorrência de mudanças de cenário de funcionamento.

Sob o ponto de vista hidráulico, diferentes soluções podem garantir o mesmo padrão de qualidade e a perfeita funcionalidade do sistema, mas dificilmente resultarão em um mesmo custo final e, principalmente, na mesma capacidade de adaptação à eventos adversos. Daí surge a necessidade de estudar e comparar metodologias de resolução do problema avaliando os custos envolvidos, a resiliência e os parâmetros obtidos em cada etapa do projeto permitindo a escolha da solução mais adequada.

Diante dos fatos apresentados, a principal motivação para sustentar o presente trabalho reside na possibilidade de estudar, desenvolver e utilizar ferramentas voltadas para a resolução e otimização de problemas reais comuns aos profissionais da Engenharia Civil que analisam não só a eficácia da solução, mas também a eficiência da mesma, buscando atender as necessidades de cada projeto por meio de soluções mais econômicas e confiáveis. O estudo é fundamentado em uma análise comparativa entre métodos de dimensionamento de RDA objetivando avaliar as condições de menor custo de implantação de uma rede de abastecimento público e sua resiliência na ocorrência de avarias no sistema.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho proposto tem como objetivo fazer uma análise comparativa entre métodos de dimensionamento de redes de distribuição de água projetadas para o abastecimento público de um condomínio horizontal, localizado no município de Caruaru-PE, por meio das planilhas da Microsoft Office Excel, do simulador hidráulico EPANET e do método de otimização LENHSNET, seguindo os procedimentos da NBR 12218 (ABNT, 2017) e da norma de projetos da COMPESA, a fim de analisar as condições de menor custo de implantação de uma rede de abastecimento público e sua resiliência.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- I. Realizar o dimensionamento hidráulico otimizado da rede de distribuição de água de tipologia ramificada no Microsoft Office Excel através do método GRG não linear acoplado ao *software*;
- II. Realizar o dimensionamento hidráulico otimizado de uma rede alternativa, de tipologia malhada, utilizando o método LENHSNET;
- III. Comparar os métodos de dimensionamento das redes de distribuição de água, os custos de implantação envolvidos na concepção e os parâmetros hidráulicos obtidos;
- IV. Realizar simulações de falha mecânica na rede malhada visando avaliar a resiliência da mesma.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Gomes (2009), sistema de abastecimento de água compreende o conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados a suprir a demanda de água de cada ponto de consumo doméstico, industrial e público de uma comunidade devendo garantir água tratada em quantidade e qualidade com o menor dispêndio possível. Esses sistemas são constituídos por unidades funcionais que envolvem desde a captação da água bruta no manancial até a sua distribuição para a população após o devido tratamento.

A rede de distribuição é o componente final de um sistema de abastecimento de água. Essa unidade é caracterizada pelo conjunto de equipamentos (reservatórios, tubulações, bombas, etc.) responsáveis por levar a água tratada ao consumidor final. Uma rede, quando mal dimensionada, pode resultar em um atendimento ineficiente da demanda e, conseqüentemente, no prejuízo econômico dos envolvidos.

O dimensionamento de uma rede de distribuição de água é um processo complexo, pois o projeto deve garantir que a rede opere sem falhas que possam comprometer a qualidade da água tratada e confiabilidade a ponto de suprir as necessidades da população em condições anormais como, por exemplo, a necessidade de manutenções devido a avarias ocorridas no sistema.

Na busca por sistemas mais confiáveis e eficientes, várias metodologias de dimensionamento de redes de distribuição de água têm sido utilizadas ao longo dos anos. Técnicas hidráulicas de engenharia desenvolvidas nas décadas de 60 e 70, que envolviam grande quantidade e repetição de cálculos, hoje são feitas de forma surpreendente por modelos de simulação numérica que além de dimensionar, otimizam o resultado economizando tempo, reduzindo o risco de erros e minimizando o custo. São apresentados, a seguir, os principais trabalhos publicados sobre o assunto em ordem cronológica.

Karmeli et al. (1968) propuseram um modelo baseado no método da programação linear para encontrar a solução de menor custo a partir da distribuição otimizada dos diâmetros comerciais para redes ramificadas novas ou parcialmente estendidas. Schaake e Lai (1969) formularam um método de dimensionamento de redes malhadas a custo mínimo desenvolvendo um modelo de programação linear por meio da transformação das variáveis e linearização das restrições.

Shamir (1974) elaborou um método de otimização para o dimensionamento e/ou a operação de redes malhadas de distribuição de água baseado na programação técnica dos Gradientes Reduzidos Generalizados (GRG2). O modelo utiliza técnicas de gradientes aproximados, processos iterativos, programação separável, índices de performance e conceitos de superfície de pressão e diâmetro equivalente para realizar uma busca aleatória das variáveis de decisão onde a função objetivo, resultado da soma dos custos de implantação e operação, sofre penalidades sempre que houver uma violação das restrições.

Alperovits e Shamir (1977) desenvolveram o primeiro modelo de otimização a incorporar o cálculo da rede no procedimento. A técnica, denominada Gradiente de Programação Linear (LPG), utiliza a programação linear para encontrar a solução mais econômica na rede de distribuição de água e, em seguida, calcula o gradiente do custo total em função das mudanças ocorridas na distribuição.

Mascaró (1979) apresentou um estudo acerca da ordem de grandeza dos custos das obras de implantação de sistemas de abastecimento urbano com ênfase em redes de distribuição e das variáveis de maior interesse à política urbana como o traçado da rede e a densidade populacional.

Morgan e Goulter (1982 *apud* MORGAN e GOULTER, 1985) estudaram um modelo de otimização de custos para o dimensionamento de redes malhadas de distribuição de água na qual são utilizados dois programas lineares vinculados, um para projetar o *layout* da rede e outro para determinar a solução de menor custo de implantação.

Morgan e Goulter (1985) desenvolveram um processo de otimização dos custos de implantação de projetos de dimensionamento, expansão e/ou reforço de RDA por meio da elaboração de um algoritmo fundamentado em programação linear heurística que utiliza a técnica de *Hardy-Cross* para garantir a consistência hidráulica dos diversos *layouts* gerados a partir das diferentes combinações de demanda e tubulação.

Walski et al. (1990 *apud* LOPES, 2002) apresentaram um procedimento de otimização que enumera exaustivamente todas as combinações possíveis de diâmetros e seleciona a de menor custo global, dentro das especificações. As tubulações são divididas em grupos nos quais todos os trechos possuem os mesmos diâmetros. Os diâmetros desses grupos são alterados segundo uma lista de valores

comerciais possíveis e a rede é calculada em cada combinação, para verificação das restrições. O método torna-se ineficiente no caso de redes de grande porte.

Leal (1995) propôs a análise dos métodos iterativos de programação, GRANADOS e WADISO, para dimensionar economicamente redes ramificadas pressurizadas. O estudo teve como objetivo comparar o custo total das tubulações obtido pelas metodologias empregadas bem como estender o método Granados a redes malhadas por meio da associação do problema com a técnica dos anéis de *Hardy Cross*.

Venturini (1997) apresentou uma alternativa para a resolução de problemas de operação de RDA. A solução proposta consiste no emprego de um método iterativo de programação linear dotado de recursos especiais para contornar a não linearidade de algumas equações e capaz de analisar diferentes objetivos a serem alcançados, tais como minimizar a vazão bombeada, maximizar o fornecimento em determinados pontos de consumo, minimizar a perda de carga ou as despesas com energia elétrica, entre outros.

Gomes e Formiga (2001) estudaram um método de dimensionamento econômico de redes malhadas de distribuição de água denominado PNL2000. A técnica tem como objetivo encontrar a solução com menor soma dos custos de investimento e operação por meio da busca dos diâmetros das tubulações e da cota piezométrica de bombeamento. Para tal, os autores utilizaram um modelo de programação não linear processado na ferramenta Solver das planilhas Excel da Microsoft Office.

Gomes et al. (2006) propuseram uma comparação entre metodologias de cálculo da vazão específica nos nós de uma rede de distribuição de água utilizando o simulador hidráulico EPANET. A vazão específica foi calculada com base no comprimento de rede e no número de economias e os dados observados para comparação foram os relatórios de consumo, pressão e velocidade.

Motiee et al. (2007) desenvolveram uma metodologia para avaliar as perdas físicas de água em redes de distribuição utilizando o simulador hidráulico EPANET e o Sistema de Informação Geográfica (SIG). Furusawa (2011) propôs o desenvolvimento de um modelo de programação não linear para o dimensionamento otimizado de RDA pressurizadas e em regime permanente para a determinação da solução com soma mínima de custos de implantação e operação.

Gouveia (2012) propôs o desenvolvimento de um algoritmo iterativo e dinâmico de otimização do dimensionamento de RDA utilizando o *toolkit* de programação do EPANET para minimizar os custos de implantação das tubulações e de energia de bombeamento. Okumura e Ramírez (2012) desenvolveram um estudo de concepção de SAAs comparando, tecnicamente e economicamente, os resultados obtidos utilizando o *software* EPANET 2.0 e planilhas Excel da Microsoft Office.

Farina et al. (2014) propuseram uma análise comparativa de precisão entre o EPANET e um modelo iterativo de simulação criado pelos autores que corrige a rugosidade na tubulação a fim de representar a irregularidade na distribuição ocorrida em situações reais. Diuana e Ogawa (2015) propuseram uma comparação entre os simuladores hidráulicos EPANET, WaterCAD e o Sistema UFC investigando a performance, as facilidades e as dificuldades de cada modelo com o intuito de facilitar a escolha do método mais eficiente pelos futuros usuários.

Riccaldone (2016) apresentou uma análise comparativa entre os modelos computacionais de simulação hidráulica EPANET, LENHSNET, REDEMWEB e UFC-4 por meio do dimensionamento otimizado de duas redes de distribuição de água onde foram avaliadas a eficiência hidráulica e a minimização do custo de implantação das tubulações.

Pinnto et al. (2017) desenvolveram o primeiro modelo de otimização a incorporar na função objetivo os custos de manutenção ao longo da vida útil da rede por meio de um algoritmo evolucionário multiobjetivo e multipopulação denominado MINPGA. REGIS (2018) propôs a elaboração de um modelo de programação não linear inteira mista (MINLP) modelado para auxiliar o ensino do dimensionamento de redes de distribuição de água considerando as restrições de projeto brasileiras.

Similar à Okumura e Ramírez (2012), o presente trabalho visa comparar os resultados obtidos no dimensionamento e otimização de uma rede de distribuição de água para abastecimento público utilizando o EPANET versão 2.0, seu módulo otimizador, o LENHSNET, e uma planilha de cálculo hidráulico criada no *software* Microsoft Office Excel avaliando os diferentes tipos de traçado.

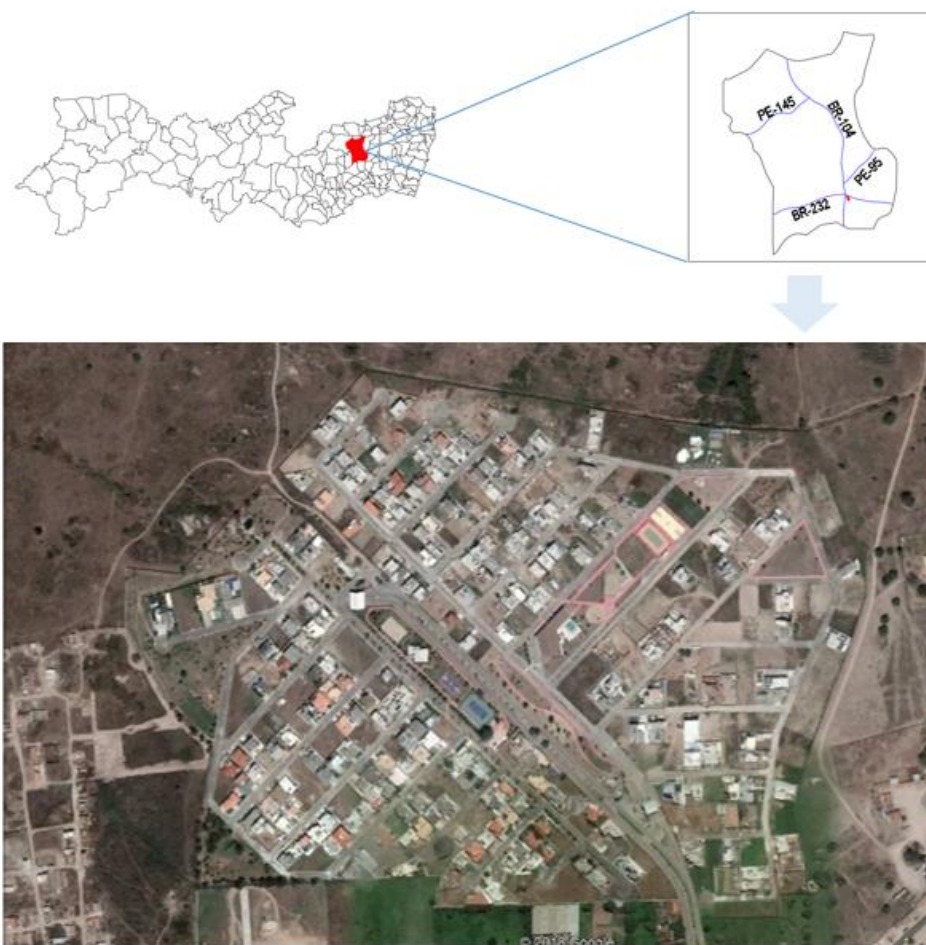
4 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados a área de estudo, os procedimentos metodológicos de levantamento de informações, estudos de concepção da rede de distribuição de água e as demais etapas desenvolvidas ao longo deste trabalho para a execução dos objetivos pretendidos.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) corresponde a um condomínio residencial de alto padrão localizado no município de Caruaru, mesorregião Agreste de Pernambuco, dentro dos limites do bairro Universitário, área urbana com população estimada de 5.711 habitantes segundo o Censo 2010 do IBGE (IBGE, 2019).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo

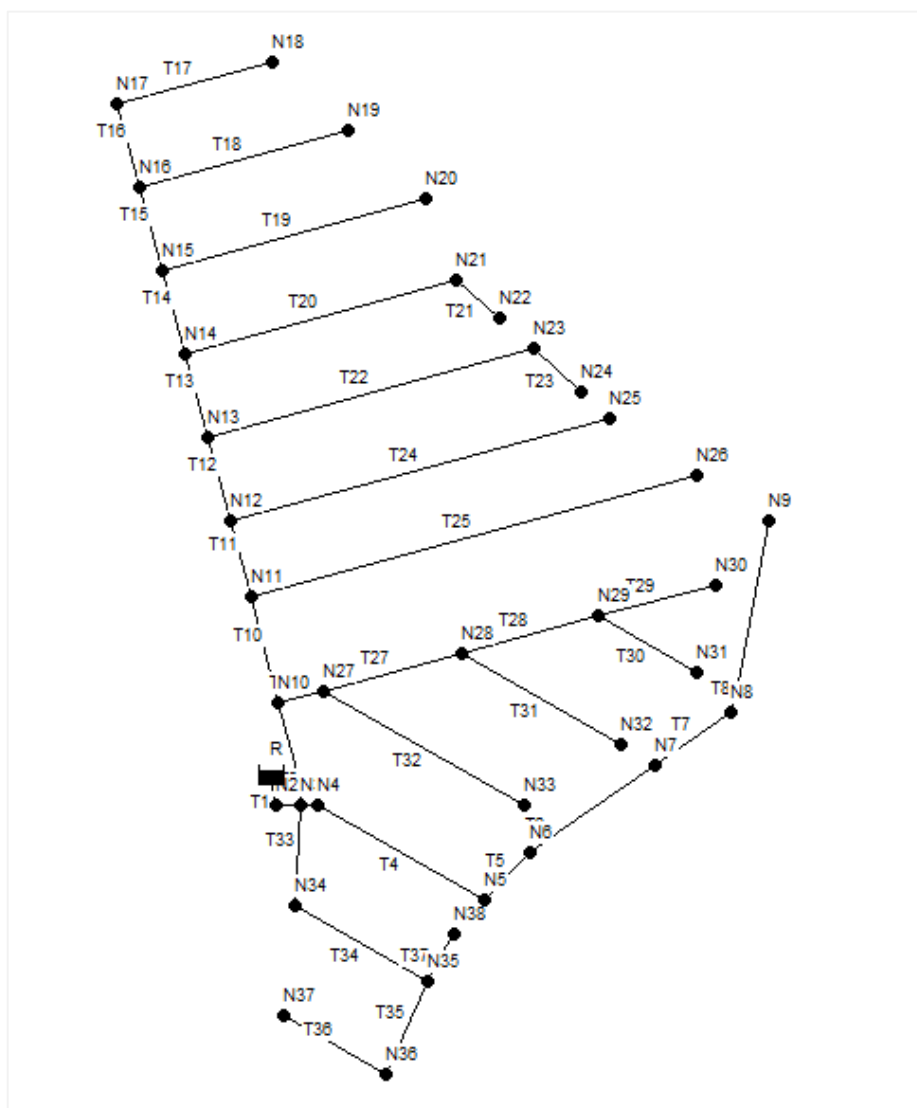


Fonte: Adaptado de Google Earth Pro. Satélite: DigitalGlobe. Imagem de 11/05/2017.

O condomínio, localizado à margem da rodovia PE-95, tem área total aproximada de 340.000 m², média de 596 metros de elevação, coordenadas geográficas 08°14'54" sul e 35°57'02" oeste. O residencial está localizado dentro dos limites da Zona Residencial 2 do município (ZR2), caracterizada por possuir, predominantemente, habitações unifamiliares de alto e médio padrão, de baixa densidade construtiva e lotes de tamanho médio com edificações isoladas no lote.

A rede de distribuição de água já existente no condomínio é dividida em dois setores, ambos de tipologia ramificada, sendo abastecida através de um reservatório de nó fixo na origem permitindo uma pressão dinâmica mínima de 6 mca no ponto mais crítico da rede. O setor 2, estudo de caso deste trabalho, possui 37 trechos (T1 a T37) e 37 nós (nó 1 a nó 37), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Esquema Hidráulico do setor 2



Fonte: A autora (2019)

É apresentado na Tabela 1 um resumo dos dados do estudo de caso. A rede de distribuição de água foi simulada pelo programa EPANET 2.0 e dimensionada através de planilhas da Microsoft Office Excel, conforme detalhado adiante.

Tabela 1 – Descrição da rede de distribuição de água

Descrição da rede	
Nº de nós	37
Nº de reservatórios	1
Nº de trechos	37
Unidade de vazão	LPS (L/s)
Fórmula de perda de carga	Hazen-Williams

Fonte: A autora (2019)

4.2 LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES

Os dados do condomínio disponibilizados para a execução deste trabalho consistiram em arquivos vetoriais contendo mapas de distribuição dos lotes e o levantamento planialtimétrico do local e uma prancha impressa com o traçado da rede ramificada. Os arquivos de dados vetoriais foram disponibilizados em formato DWG, visualizável e editável em qualquer programa do tipo *Computer Aided Design* (CAD). Para a manipulação das informações foi utilizada a versão estudantil de 2017 do *software* AutoCAD da Autodesk®.

Como o traçado da rede só foi disponibilizado em documento impresso, foi necessário modelar toda a rede no AutoCAD utilizando como base a planta de distribuição dos lotes fornecida. Por se tratar de uma rede existente, os parâmetros principais como os comprimentos dos trechos que compõem a rede de distribuição, bem como as cotas do terreno e a vazão distribuída em cada trecho já constavam na prancha. Na Tabela 2, apresenta-se a distribuição dos comprimentos por trecho da rede, enquanto a Tabela 3 mostra as cotas do terreno para cada nó.

Tabela 2 – Distribuição dos comprimentos por trecho da rede existente

Trecho	Extensão (m)	Trecho	Extensão (m)	Trecho	Extensão (m)	Trecho	Extensão (m)
T1	6,55	T11	65,50	T21	40,25	T31	127,30
T2	19,65	T12	58,50	T22	238,15	T32	160,70
T3	8,50	T13	61,05	T23	44,45	T33	72,30
T4	136,75	T14	59,80	T24	233,80	T34	101,55
T5	46,00	T15	58,50	T25	321,60	T35	67,65
T6	105,75	T16	61,35	T26	37,20	T36	66,75
T7	61,25	T17	102,85	T27	99,75	T37	39,60
T8	134,15	T18	142,50	T28	99,75		
T9	72,30	T19	183,75	T29	84,00		
T10	74,90	T20	197,95	T30	77,90		
TOTAL (m)				3570,25			

Fonte: A autora (2019)

Tabela 3 – Distribuição das cotas por nó da rede existente

Nó	Cota (m)	Nó	Cota (m)	Nó	Cota (m)	Nó	Cota (m)
RES	599,00	N10	599,90	N20	591,70	N30	592,50
N1	599,00	N11	600,50	N21	589,90	N31	594,70
N2	599,20	N12	601,80	N22	588,90	N32	596,50
N3	599,30	N13	601,95	N23	586,70	N33	598,00
N4	598,10	N14	601,90	N24	588,90	N34	598,20
N5	597,00	N15	600,80	N25	585,95	N35	596,30
N6	594,90	N16	597,70	N26	599,80	N36	595,80
N7	593,40	N17	591,80	N27	595,10	N37	598,30
N8	587,80	N18	594,10	N28	591,95		
N9	598,10	N19	592,90	N29	590,10		

Fonte: A autora (2019)

4.3 ESTIMATIVA DA DEMANDA DE ÁGUA

Antes de analisar a eficiência de uma rede de distribuição de água, deve-se avaliar a eficácia da mesma, ou seja, a capacidade que a rede tem de distribuir água tratada a todos os consumidores durante todo o período para o qual foi projetada. Para tal, fatores como população de projeto, volume de reservação e vazão de projeto devem ser definidos conforme os itens a seguir.

4.3.1 População de Projeto

Redes de distribuição de água devem ser dimensionadas com base na previsão da população a ser atendida. Para tal, é necessário trabalhar com dados característicos da população levando em consideração a evolução da mesma ao longo do horizonte de projeto. Segundo Gomes (2009), o alcance, ou horizonte, do projeto corresponde ao período de atendimento das estruturas físicas projetadas, tanto equipamentos como obras civis.

Existem inúmeras formas de prever a população a ser atendida ao longo do horizonte de projeto. Esta previsão pode ser feita por meio do uso de modelos matemáticos, projeções demográficas e até extrapolações gráficas. Como o presente trabalho propõe o dimensionamento da RDA de um condomínio fechado, onde não há previsão de crescimento populacional significativo devido à limitação do número de lotes na área de estudo, a população de projeto corresponde ao cenário onde todos os lotes foram vendidos e estão ocupados por residências.

O condomínio analisado é composto por 440 lotes dos quais 270 fazem parte do setor estudado neste trabalho. Foi adotada a situação onde cada lote abriga apenas uma residência e a taxa de ocupação aplicada foi de 4,2 hab./residência. Esta taxa foi determinada a partir de dados levantados no Censo realizado em 2000 pelo IBGE (2000) em que foram utilizadas amostras de domicílios particulares permanentes e população residente para situação domiciliar urbana conforme apresentado na Equação (1).

$$TO = \left(\frac{\text{Domicílios particulares permanentes}}{\text{População residente}} \right)_{\text{situação urbana}} \quad (1)$$

Desta forma, a previsão de população foi calculada a partir da Equação (2):

$$P = TO \cdot N_{\text{lotes}} \quad (2)$$

Onde:

P = Previsão da população a ser atendida (hab.);

TO = Taxa de ocupação (hab./residência);

N_{lotes} = Número de lotes do setor (residência).

4.3.2 Volume de Reservação

Os reservatórios de distribuição de água devem ser dimensionados de forma a acumular um volume capaz de suprir não só a demanda de consumo, mas também as demandas de emergência motivadas por paralisação da adução e/ou incêndio. Para o dimensionamento do volume utilizado nos setores para consumo, também chamado de volume útil, foi utilizada a Equação (3) apresentada por Heller e Pádua (2010).

$$V_{\text{útil}} = \frac{1}{3} Q_{d>c} \cdot 86400 \quad (3)$$

Onde:

$V_{\text{útil}}$ = volume médio de água requerido por dia para consumo em (m³/dia);

$Q_{d>c}$ = demanda média diária de água em (L/s) calculada conforme a Equação (4).

$$Q_{d>c} = \frac{P \cdot q_{pc} \cdot k_1}{86400} \quad (4)$$

Onde:

q_{pc} = Consumo Per Capita (L/hab/dia);

k_1 = Coeficiente de variabilidade máxima diária do fluxo (adimensional) com valor adotado de 1,2.

O consumo per capita (qpc), expresso em (L/hab./dia), representa a quantidade média de água utilizada por um habitante para suprir suas necessidades diárias. O qpc é calculado em cidades com sistema de abastecimento de água por meio da divisão da quantidade de água aduzida durante os 365 dias do ano pela população total abastecida por esse sistema. Gomes (2009) afirma que cidades beneficiadas com SAA eficiente possuem consumo per capita entre 100 e 200. Para o presente trabalho foi adotado o valor de 150 (L/hab./dia).

Para determinar o volume necessário para combate a incêndios, deve-se identificar o tipo de ocupação urbana da área e consultar os regulamentos seguidos pelo Corpo de bombeiros da localidade. Em Pernambuco, o Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico para o Estado de Pernambuco – COSCIP estabelece reservas mínimas para combate a incêndios com base na classe de ocupação do risco conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Reserva mínima para combate a incêndios em função da classe de ocupação do risco

Reservatórios	Risco (pela TSIB)	Volume (em litros)
Elevados	A	7.200
	B	15.000
	C	21.600
Subterrâneos ou superfície	A	21.600
	B	54.000
	C	60.000

Fonte: Brasil (1997)

A classificação da área de estudo quanto às classes de ocupação e de risco pode ser encontrada no próprio COSCIP e nas tabelas da Tarifa de Seguro - Incêndio (TSIB) adotadas pela maioria dos Corpo de Bombeiros Militares Estaduais. Na Tabela 5 é apresentada uma tipificação das principais classes de ocupação do COSCIP, enquanto a Tabela 6 mostra as classes de risco definidas pela Superintendência de Seguros Privados (SUSEP).

Tabela 5 – Principais classes de ocupação e de risco

Tipo	Ocupação	Tipificação
A	Residencial Privativa Unifamiliar	Condomínios de casas térreas ou assobradadas isoladas e assemelhados.
B	Residencial Privativa Multifamiliar	Condomínios de casas térreas ou assobradadas não isoladas, edifícios de apartamentos em geral e condomínios verticais e assemelhados.
C	Residencial Coletiva	Pensionatos, internatos, alojamentos, mosteiros, conventos, residências geriátricas e assemelhados.
D	Residencial Transitória	Hotéis, motéis, pensões, hospedarias, pousadas, albergues e assemelhados.
E	Comercial	Edifícios de lojas de departamentos, magazines, galerias comerciais, supermercados em geral, mercados, centros comerciais e assemelhados.

Fonte: Adaptado de Brasil (1997)

Tabela 6 – Classes de Risco

Classe de Risco	Descrição
A	Riscos isolados cuja classe de ocupação, na TSIB, seja 1 ou 2, excluídos os “depósitos”, que devem ser considerados como Classe B.
B	Riscos isolados cuja classe de ocupação, na TSIB, seja 3, 4, 5 ou 6 e os depósitos da classe de ocupação 1 ou 2.
C	Riscos isolados cuja classe de ocupação, na TSIB, seja 7, 8, 9, 10, 11, 12 ou 13.

Fonte: PERNAMBUCO (2019)

Conforme apresentado na Tabela 5, a área de estudo deste trabalho corresponde a uma edificação de ocupação residencial unifamiliar tipo A, cuja descrição nas tabelas da TSIB corresponde a uma ocupação de risco do tipo moradia pertencente à classe de ocupação 1. Logo, um condomínio horizontal composto por residências unifamiliares deve possuir uma reserva mínima de incêndio de 7.200 litros.

Por fim, para calcular o volume total de reservação deve-se determinar a volume de emergência para adução. Esta reserva tem como objetivo assegurar que o sistema de abastecimento de água não entre em colapso caso venha a ocorrer rompimento de tubulação ou falta de energia. Usualmente, esta reserva de

emergência é definida como 1/3 (um terço) da soma dos volumes útil e de combate a incêndio calculada pela Equação (5). Logo, o volume total de reservação é calculado pela Equação (6).

$$V_{\text{emergência}} = \frac{V_{\text{útil}} + V_{\text{incêndio}}}{3} \quad (5)$$

$$V = V_{\text{útil}} + V_{\text{emergência}} + V_{\text{incêndio}} \quad (6)$$

4.3.3 Vazão do Projeto

O volume de água consumido em uma rede de abastecimento sofre variações significativas ao longo do tempo. De um modo geral, a quantidade de água requerida por uma população sofre variações anuais, mensais, diárias, horárias e instantâneas influenciadas, sobretudo, por mudanças das atividades, dos hábitos e das condições climáticas.

Para o dimensionamento das tubulações e demais estruturas de uma rede de distribuição é necessário, primeiramente, definir a vazão do projeto, ou seja, a demanda diária máxima de água ao longo do ano capaz de suprir as necessidades da população no dia e hora de maior consumo.

Para levar em consideração as variações diárias e horárias de demanda ao longo do ano, a vazão de projeto do presente trabalho foi calculada seguindo a metodologia proposta por Heller e Pádua (2010), apresentada na Equação (7), onde são utilizados coeficientes de variabilidade máxima diária (k_1) e horária (k_2) na expressão cujo produto é denominado coeficiente de reforço. Usualmente e na ausência de dados confiáveis, os coeficientes k_1 e k_2 assumem os valores de 1,2 e 1,5 respectivamente.

$$Q = \frac{P \cdot q_{pc} \cdot k_1 \cdot k_2}{86400} + Q_{\text{sing}} \quad (7)$$

Onde:

Q = Vazão de projeto (L/s);

q_{pc} = Consumo Per Capita (L/hab/dia);

k_1 = Coeficiente de variabilidade máxima diária do fluxo (adimensional);

k_2 = Coeficiente de variabilidade máxima horária do fluxo (adimensional);

Q_{sing} = Vazão especial necessária para o atendimento de consumidores singulares calculada em (L/s) e igual a zero para este trabalho.

Segundo a NBR 12218 (ABNT, 2017), o dimensionamento de redes de distribuição de água com trechos ramificados pode ser feito por meio do cálculo da perda de carga (h_f) com base na vazão fictícia do trecho (Q_{fic}) desde que seja admitida uma distribuição uniforme do consumo ao longo do trecho, denominada vazão de distribuição (Q_{dist}), calculada pela Equação (8).

$$Q_{\text{dist}} = Q_{\text{mar}} \cdot L_{\text{trecho}} \quad (8)$$

Onde (L_{trecho}) é o comprimento do trecho, em metros, e (Q_{mar}) é a taxa linear de distribuição, também chamada de distribuição em marcha, calculada em (L/s/m) pela Equação (9).

$$Q_{\text{mar}} = \frac{Q}{L_{\text{total}}} \quad (9)$$

Onde:

Q = Vazão de projeto (L/s);

L_{total} = Comprimento total da tubulação.

A vazão fictícia ou equivalente corresponde a uma vazão imaginária, de valor constante ao longo de toda a extensão do conduto, criada para ser utilizada como parâmetro no cálculo da perda de carga reduzindo problemas de subdimensionamento ou superdimensionamento da rede. A vazão fictícia é calculada pela vazão da extremidade de jusante somada à metade da vazão distribuída no trecho conforme a Equação (10).

$$Q_{\text{fic}} = Q_{\text{jus}} + \frac{Q_{\text{dist}}}{2} \quad (10)$$

Onde:

Q_{jus} = Vazão da extremidade à jusante do trecho (L/s) calculada pela Equação (11);

Q_{dist} = Vazão de distribuição no trecho (L/s);

L_{jus} = Comprimento da tubulação à jusante do trecho (m).

$$Q_{jus} = Q_{mar} \cdot L_{jus} \quad (11)$$

4.4 CRITÉRIOS E PARÂMETROS DE PROJETO

4.4.1 Velocidade

Redes de distribuição de água devem estar sujeitas a restrições de velocidade criadas para garantir o correto funcionamento do sistema assim como a durabilidade das tubulações, a redução do custo de implantação e, principalmente, a segurança.

Gomes (2009) afirma que quanto maior a velocidade de circulação da água em um conduto, menor será o diâmetro necessário e, conseqüentemente, maior será a economia na aquisição e instalação da tubulação, no entanto, surgem problemas como o aumento da perda de carga, do custo de bombeamento, do desgaste nas peças e acessórios e, por conseguinte, do custo de manutenção. Em contrapartida, velocidades muito baixas aumentam a durabilidade da tubulação, mas tendem a aumentar a corrosão interna devido ao acúmulo de materiais em suspensão.

A NBR 12218 (ABNT, 2017) estabelece os limites de 0,6 m/s para a velocidade mínima em condutos de redes de distribuição de água e 3,5 m/s para a velocidade máxima. Segundo Gomes (2009), em redes de pequeno porte, a vazão de projeto costuma ser muito pequena impossibilitando que a velocidade mínima seja atingida e inviabilizando o dimensionamento em *softwares* de simulação hidráulica que exigem restrições.

Neste trabalho, optou-se por não definir uma velocidade mínima para os condutos, trabalhando apenas com o limite máximo de 3,5 m/s, visto o porte da rede de distribuição de água analisada. A velocidade de circulação da água em um conduto é calculada pela Equação da continuidade apresentada na Equação (12).

$$Q_{fic} = v \cdot A_{conduto} \quad (12)$$

Onde:

Q_{fic} = Vazão fictícia (m^3/s)

$A_{conduto}$ = Área do conduto (m^2);

D_{int} = Diâmetro interno do conduto (m).

4.4.2 Diâmetros

A NBR 12218 (ABNT, 2017) recomenda que redes de distribuição de água sejam dimensionadas com diâmetro mínimo dos condutos de 50 mm a fim de evitar perdas de carga excessivas no sistema de abastecimento público. Além das recomendações da norma, Heller e Pádua (2010) ressaltam a importância da escolha correta dos diâmetros para evitar transtornos e novos gastos com obras de ampliação do sistema.

Além das recomendações descritas acima, os diâmetros de uma RDA devem ser compatíveis com os diâmetros comercializados atualmente no Brasil para utilização em redes de distribuição de água. Usualmente, muitos projetistas utilizam a os dados da Tabela 7 adaptada de Martins (1976 *apud* FURUSAWA, 2011) para relacionar a vazão máxima admissível com o diâmetro interno do conduto para o dimensionamento em planilha Excel.

Tabela 7 – Limites práticos de vazão para tubulações de rede de distribuição

Diâmetro Nominal	Diâmetro Interno (mm)	Vazão máxima (L/s)
50	53,4	1,0
75	75,6	2,2
100	108,4	4,7
150	156,4	14,1
200	204,2	28,3
250	252,0	53,9
300	299,8	84,8

Fonte: Adaptado de Martins (1976 *apud* FURUSAWA, 2011)

Apesar da existência de tabelas que relacionam o diâmetro mínimo com a vazão no conduto, neste trabalho os mesmos são escolhidos pelos módulos otimizadores: *Solver* e LENHSNET, em função do objetivo a ser alcançado e de

restrições impostas, como será mostrado mais adiante. Os diâmetros internos apresentados na Tabela 7 foram adotados como diâmetros de projeto neste trabalho.

4.4.3 Material da tubulação

São inúmeros os tipos de materiais empregados na confecção de tubos para sistemas de abastecimento de água. A escolha do material mais adequado é influenciada por fatores como a limitação de fabricação, o custo, a disponibilidade, a durabilidade, o local de implantação, entre outros. Dentre os materiais mais utilizados atualmente na fabricação de condutos para RDA, destacam-se o policloreto de vinila (PVC), o ferro fundido (FoFo) e o polietileno de alta densidade (PEAD).

Em relação aos materiais empregados na construção da rede de distribuição de água deste trabalho, foram adotados tubos de PVC rígido do tipo PBA JEI 15, para diâmetros nominais inferiores a 100 mm, e MPVC DEFoFo para os demais. O PVC é um material muito versátil, amplamente utilizado na construção civil, sobretudo em projetos de adutoras e sistemas de abastecimento, devido à sua elevada resistência à corrosão aliada ao baixo peso que reduz consideravelmente os custos de implantação correspondentes ao transporte e instalação dos condutos.

Os tubos de PVC da linha PBA (Figura 3) são aplicados em sistemas de adução e distribuição de água para uso residencial e industrial, instalações de combate a incêndio e para irrigação. São fabricados seguindo as recomendações da NBR 5647 (ABNT, 2019) e são compostos por uma junta elástica integrada que confere maior estanqueidade e facilidade de instalação. A classe 15 tem capacidade de suportar pressões nominais de até 75 mca.

Figura 3 – Tubo de PVC PBA



Fonte: Amanco (2019)

Os tubos de PVC da linha DEFoFo (Figura 4) são aplicados em sistemas enterrados de abastecimento público para conduzir água bruta do ponto de captação até as estações de tratamento e/ou distribuir a água tratada contida nos reservatórios de distribuição. Além da junta elástica integrada, os condutos são fabricados com um composto modificador de impacto que confere ao produto resistência similar ao ferro fundido. São fabricados seguindo as recomendações da NBR 7665 (ABNT, 2007).

Figura 4 – Tubo de PVC DEFoFo



Fonte: Amanco (2019)

4.4.4 Perda de Carga

Fluidos contidos em tubulações pressurizadas sofrem perdas de energia constantemente, seja por efeito do atrito entre o líquido e as paredes internas dos condutos (perda de carga contínua) e/ou por efeito da turbulência causada pela mudança de direção do traçado ou existência de peças e conexões (perda de carga localizada). Geralmente as perdas de carga localizadas podem ser desprezadas em tubulações de grande extensão como ocorre em RDA, pois seu valor é muito pequeno quando comparado com a perda contínua.

As perdas de carga contínuas são determinadas por meio de expressões empíricas elaboradas em diferentes condições experimentais. Segundo Gomes (2009), as equações mais utilizadas para o cálculo da perda de energia são as de Hazen-Williams (H-W) e Darcy-Weisbach (D-W) apresentadas, respectivamente, nas equações (13) e (14).

A Equação de Darcy-Weisbach, também conhecida como fórmula universal, é a expressão mais indicada para o cálculo da perda de carga sendo recomendada pela norma de projetos de rede de distribuição de água para abastecimento público, a NBR 12218 (ABNT, 2017). Apesar de ser mais abrangente devido à possibilidade de

utilização em qualquer tipo de líquido, material e estado dos condutos, em redes de distribuição de água a estimativa da perda de carga é equivalente às demais expressões devido à imprecisão da rugosidade dos tubos (GOMES, 2009).

$$h_f = f \cdot \left(\frac{L_{\text{trecho}}}{D_{\text{int}}} \cdot \frac{v^2}{2g} \right) \quad (13)$$

Onde:

h_f = Perda de carga contínua desenvolvida por Darcy-Weisbach (mca);

f = Fator de atrito (adimensional);

D_{int} = Diâmetro interno do tubo (m);

L_{trecho} = Comprimento do trecho (m);

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

Q_{fic} = Vazão fictícia (m³/s).

Devido à sua facilidade de aplicação, a Equação de Hazen-Williams é a expressão mais utilizada para o cálculo da perda de carga contínua em tubulações de água e esgoto com diâmetro interno maior ou igual a 50 mm sendo, portanto, utilizada nos dimensionamentos do presente trabalho.

$$h_f = J \cdot L_{\text{trecho}} \quad (14)$$

Onde J é a perda de carga unitária calculada segundo a Equação (15).

$$J = \frac{10,674}{D_{\text{int}}^{4,871}} \cdot \left(\frac{Q_{\text{fic}}}{C} \right)^{1,852} \quad (15)$$

Apesar de a expressão apresentar limitações de precisão devido ao uso de um fator de rugosidade constante para cada material, apresenta bons resultados quando comparada à fórmula universal [Equação (13)], em que C é o coeficiente de rugosidade do conduto cujo valor é definido de acordo com o tipo de material da tubulação conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores do coeficiente C sugeridos para a fórmula de Hazen-Williams para tubos usados com aproximadamente 20 anos

Material do tubo	Coeficiente C¹
Aço soldado com revestimento betuminoso	85
Aço soldado com revestimento de epóxi	110
Ferro fundido sem revestimento permanente	90
Ferro fundido dúctil, revestimento de argamassa de concreto	110
Ferro fundido dúctil, revestimento epóxico	115
PVC ou resina com fibra	132,5
PEAD	135
Aço galvanizado roscado	75
Cobre, latão, bronze ou aço inox	135

Fonte: Adaptado de Netto (2018)

Segundo as diretrizes gerais para elaboração de projetos de rede de distribuição dos sistemas de abastecimento de água, padronizadas pela Companhia Pernambucana de Saneamento através da norma de projetos de engenharia (COMPESA, 2019), devem ser considerados para o cálculo da perda de carga no final de plano os coeficientes de rugosidade contidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficientes de Rugosidade para a Fórmula de Hazen-Williams

Material da Tubulação	Coeficiente de Rugosidade (C)
Ferro Fundido Dúctil	110
PVC	132,5
PEAD	135

Fonte: Adaptado de COMPESA (2019)

Porto (2006) afirma que perdas unitárias de carga variam de 1 m/km a 10 m/km e recomenda que o máximo gradiente hidráulico seja igual a 8m/km, como estabelecido na antiga norma brasileira NB 594/1977. A Companhia Pernambucana de Saneamento, por sua vez, estabelece que os trechos de uma rede de distribuição de água devem apresentar uma perda de carga unitária máxima de 10 m/km. Este trabalho segue o limite estipulado pela COMPESA.

¹ Para tubos com diâmetro nominal (DN) de até 125 mm e água pouco incrustante e pouco corrosiva à temperatura de aproximadamente 20°C.

4.4.5 Pressão Disponível

Sistemas de abastecimento de água em operação estão constantemente sujeitos a variações das pressões estáticas (situação de consumo nulo) e dinâmicas (rede em plena carga) que, por sua vez, tem relação direta com as perdas físicas de água no sistema, a durabilidade das tubulações, o custo energético de bombeamento e o custo de implantação dos condutos para suportar a pressão excessiva sem romper.

A NBR 12218 (ABNT, 2017) estabelece limites de 10 mca para a pressão dinâmica mínima na rede e 50 mca para a pressão estática máxima podendo os projetistas não respeitar os limites desde que justifiquem os valores utilizados tecnicamente e, principalmente, economicamente. Os limites foram criados para assegurar que a água alcance os reservatórios domiciliares gerando o menor custo possível.

A Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA, 2019) estabelece que as pressões dinâmicas mínimas e estáticas máximas em redes de distribuição de água não devem extrapolar o intervalo de 10 a 40 mca. A COMPESA também estabelece que, em situações específicas, onde a região possui regime de abastecimento intermitente, como é o caso da área de estudo deste trabalho, é permitido reduzir a pressão dinâmica mínima admissível para 6 mca.

4.4.6 Custo de Implantação

Em projetos de sistemas de abastecimento público os custos envolvidos na implantação de redes de distribuição de água estão relacionados diretamente com o tamanho da população atendida correspondendo a 38% do custo total em RDA para até 10.000 habitantes (GOMES, 2009). Dentre as despesas de implantação da rede, os custos referentes à compra de tubulações são os mais significativos, pois variam de acordo com o comprimento dos condutos, o material escolhido, os diâmetros e a pressão requerida.

É importante frisar que o presente trabalho analisa apenas os custos de implantação da rede, sem abordar outros custos decorrentes da operação e manutenção de um SAA, tais como o tratamento de água, os custos construtivos, a mão de obra, a manutenção, entre outros. Para a estimativa de custos de implantação

de cada concepção de rede analisada, este trabalho contabiliza apenas o investimento para aquisição de equipamentos das instalações hidráulicas (tubulações, conexões e acessórios).

Para determinar o preço unitário das tubulações (ver Tabela 10), são empregadas as planilhas do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), para o Estado de Pernambuco, referente ao mês de abril de 2019 onde é acrescido 1% ao custo total de implantação da rede para estimar os gastos referentes à compra de acessórios e conexões.

Tabela 10 – Custos de implantação, por metro linear, das tubulações em função do diâmetro nominal

Diâmetro Nominal	Tipo de Tubo	Custo/metro (R\$/m)
50	PVC PBA JEI 15 – (0,75 MPa)	16,31
75	PVC PBA JEI 15 – (0,75 MPa)	32,04
100	MPVC DEFOFO – (1 MPa)	37,23
150	MPVC DEFOFO – (1 MPa)	100,20
200	MPVC DEFOFO – (1 MPa)	169,81
250	MPVC DEFOFO – (1 MPa)	258,51
300	MPVC DEFOFO – (1 MPa)	367,09

Fonte: Adaptado de Caixa (2019)

4.5 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Os itens subsequentes mostram como foi feito o processo de dimensionamento e orçamento da rede na planilha de cálculo do Microsoft Office Excel e no EPANET.

4.5.1 Microsoft Office Excel

Estabelecidos os critérios e parâmetros de projeto necessários para o dimensionamento da rede, foi criada uma planilha de cálculo hidráulico no Microsoft Office Excel dividida em duas partes: dimensionamento hidráulico e orçamento dos custos de implantação. A sequência de cálculo é apresentada a seguir.

Sequência de cálculo referente ao dimensionamento hidráulico:

Coluna 1: Identificação do trecho;

Colunas 2 e 3: Identificação dos nós, respectivamente, à jusante e à montante do trecho;

Coluna 4: Comprimento total da tubulação à jusante do trecho;

Coluna 5: Comprimento do trecho;

Coluna 6: Comprimento total da tubulação à montante do trecho;

Coluna 7: Vazão da extremidade à jusante do trecho – nula para pontos de extremidade – Equação (11);

Coluna 8: Vazão de distribuição do trecho – Equação (8);

Coluna 9: Vazão fictícia – Equação (10);

Coluna 10: Diâmetro interno do conduto;

Coluna 11: Velocidade, através da Equação (12);

Coluna 12: Perda de carga unitária calculada pela Equação de Hazen-Williams – Equação (15);

Coluna 13: Perda de carga contínua – Equação (14);

Coluna 14 e 15: Cota piezométrica, respectivamente, à montante e à jusante do trecho calculada pela diferença entre a cota piezométrica do nó à montante e a perda de carga do trecho;

Colunas 16 e 17: Cotas do terreno para os nós à montante e à jusante do trecho;

Colunas 18 e 19: Pressão disponível à montante e à jusante calculadas, respectivamente, pela diferença entre as cotas piezométricas e as cotas do terreno. Sequência de cálculo referente ao orçamento dos custos de implantação:

Coluna 1: Diâmetros nominais disponíveis (ver Tabela 7);

Coluna 2: Diâmetros internos correspondes aos nominais (ver Tabela 7);

Coluna 3: Tipo de tubo utilizado para cada diâmetro;

Coluna 4: Custo por metro de tubulação para cada diâmetro (ver Tabela 10);

Coluna 5: Comprimento total das tubulações para cada diâmetro (obtido por meio da soma dos comprimentos dos trechos correspondentes);

Coluna 6: Custo total por diâmetro (produto entre o custo por metro de tubulação e o comprimento total por diâmetro).

Após construída a planilha e inseridos os dados de projeto específicos da rede, tais como os comprimentos, as cotas do terreno para os pontos de consumo e para o

reservatório e a cota piezométrica do reservatório, foi iniciado o processo de dimensionamento ótimo da rede ramificada através do suplemento *Solver* do Excel.

Primeiramente, a ferramenta *Solver* foi acionada na opção de análise da guia “Dados” do Excel e, em seguida, foram preenchidos os parâmetros necessários para a otimização na janela aberta (Figura 5) onde foram informadas as variáveis de decisão (diâmetro de cada trecho) e as restrições do problema (diâmetros, pressões e velocidades máximas e mínimas permitidas).

Figura 5 – Janela de entrada de parâmetros do *Solver*

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para: ☐ Máx. ☐ Mín. ☒ Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

- \$A\$23 >= 0
- \$A\$24 <= 3.5
- \$A\$25 >= 6
- \$A\$26 <= 40
- \$K\$8:\$K\$44 <= 299.8
- \$K\$8:\$K\$44 >= 53.4

☒ Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

Método de Solução
Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Ajuda Resolver Fechar

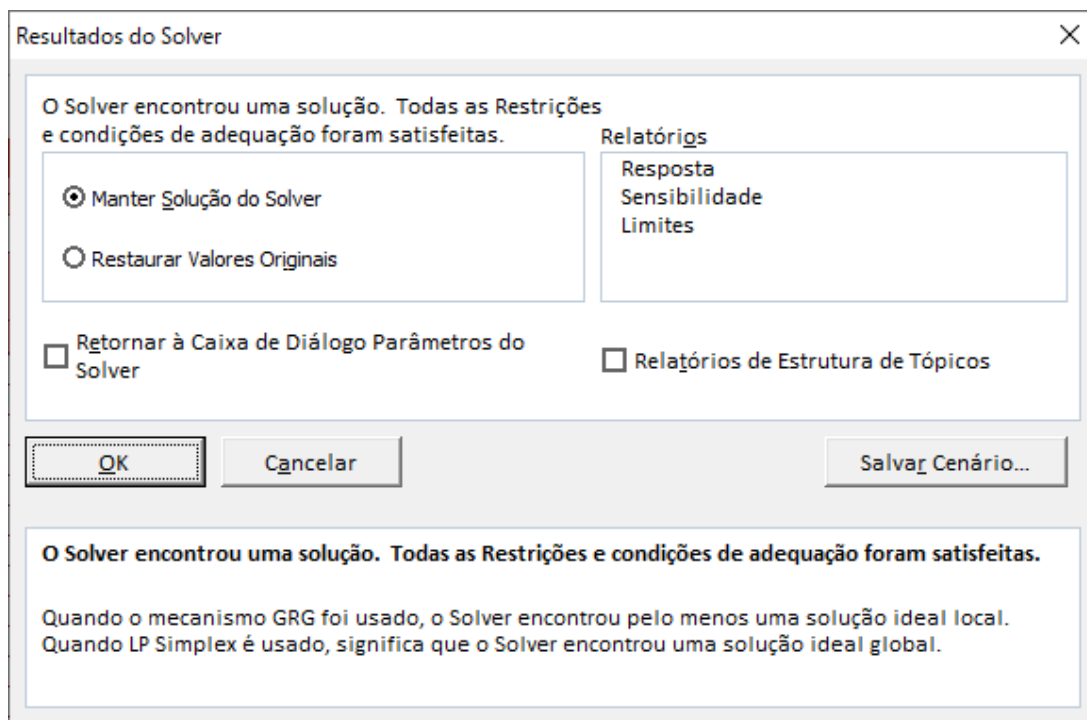
Fonte: A autora (2019)

Assim como Gomes (2009), foi utilizado um artifício para definir a célula objetivo de otimização do problema em redes ramificadas. Para tal, foram escolhidas três células vazias na planilha as quais foram atribuídos às duas primeiras os valores de (1) e (-1), respectivamente, a fim de criar uma Equação de resultado nulo na terceira

célula, denominada célula objetivo. Por fim, foi escolhido o método de solução de gradientes reduzidos generalizados (GRG) aplicado a problemas não lineares.

Após acionada a opção “Resolver” da Figura 5, foi aberta uma caixa de diálogo (Figura 6) informando se foi possível ou não encontrar uma solução. Finalizado o dimensionamento otimizado, os diâmetros obtidos foram ajustados para os valores comerciais mais próximos.

Figura 6 – Caixa de diálogo do Solver



Fonte: A autora (2019)

Além da utilização das planilhas de cálculo para o dimensionamento da rede ramificada com base no traçado existente, a rede também foi simulada utilizando o programa EPANET, conforme apresentado no item seguinte.

4.5.2 EPANET

O EPANET é um *software* gratuito de código aberto desenvolvido em 1993 pela Agência Norte-Americana de Proteção Ambiental (EPA) para realizar simulações de redes pressurizadas de distribuição de água. A versão brasileira do programa, EPANET 2.0, foi produzida pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e possui, além

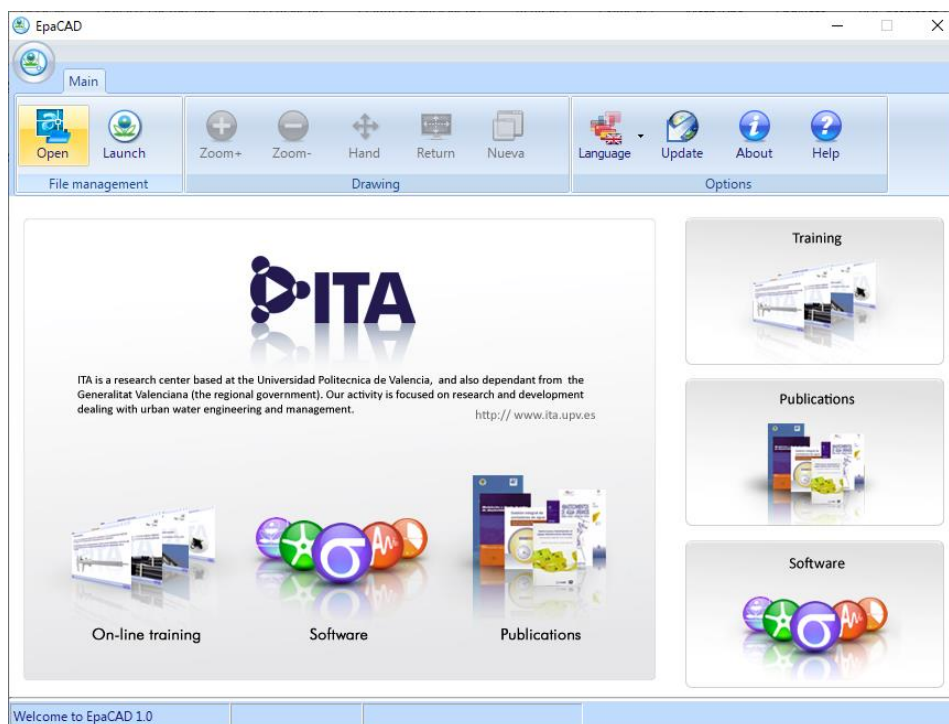
do simulador hidráulico, um módulo de programação capaz de dimensionar, calibrar, reabilitar e otimizar sistemas de abastecimento público.

Traçar uma rede no EPANET pode ser um processo complicado quando não se dispõe de *softwares* complementares. Para tal, este trabalho utiliza o AutoCAD e o EpaCAD como programas auxiliares ao dimensionamento da rede. Para trabalhar com informações no EPANET extraídas de um arquivo CAD é necessário, primeiramente, fazer um tratamento dos dados a fim de gerar um arquivo capaz de ser lido pelo simulador, pois o mesmo não é capaz de trabalhar com informações contidas em formato DWG, extensão dos arquivos do AutoCAD.

Para tal, o arquivo com o desenho da rede de distribuição passou por um processo de limpeza onde permaneceu apenas a camada utilizada para o desenho da rede e, em seguida, foram salvos em formato de desenho de intercâmbio (DXF) aceito por diversos programas, entre eles o EpaCAD.

O EpaCAD (Figura 7) é um *software* gratuito desenvolvido por um grupo de pesquisa da Escola Politécnica de Valência na Espanha capaz de importar propriedades de arquivos CAD em formato DXF e converter para um formato compatível com o EPANET.

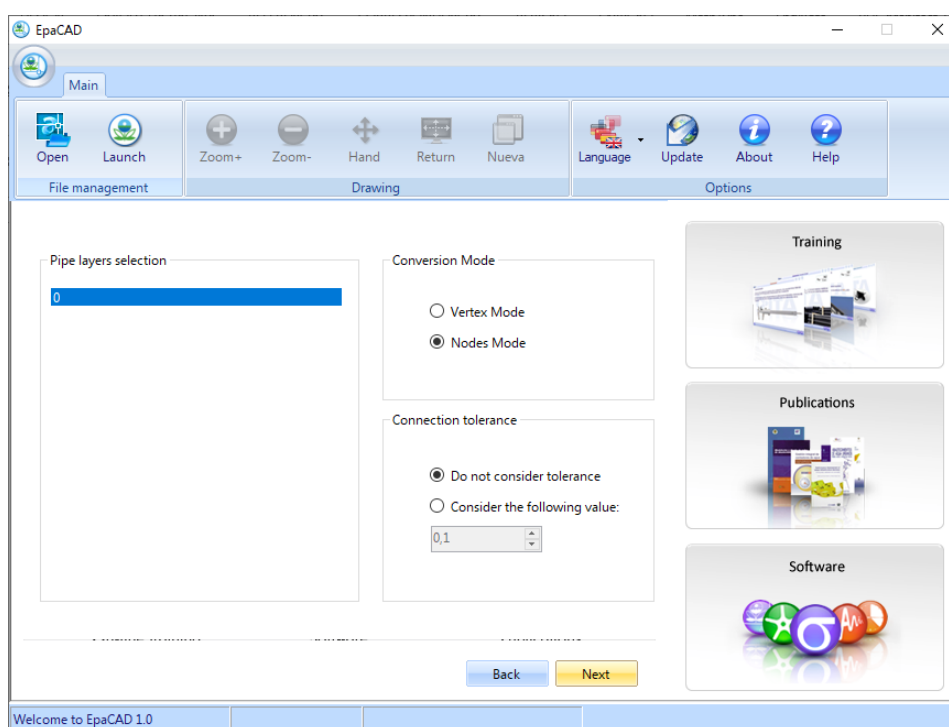
Figura 7 – Página inicial do EpaCAD



Fonte: A autora (2019)

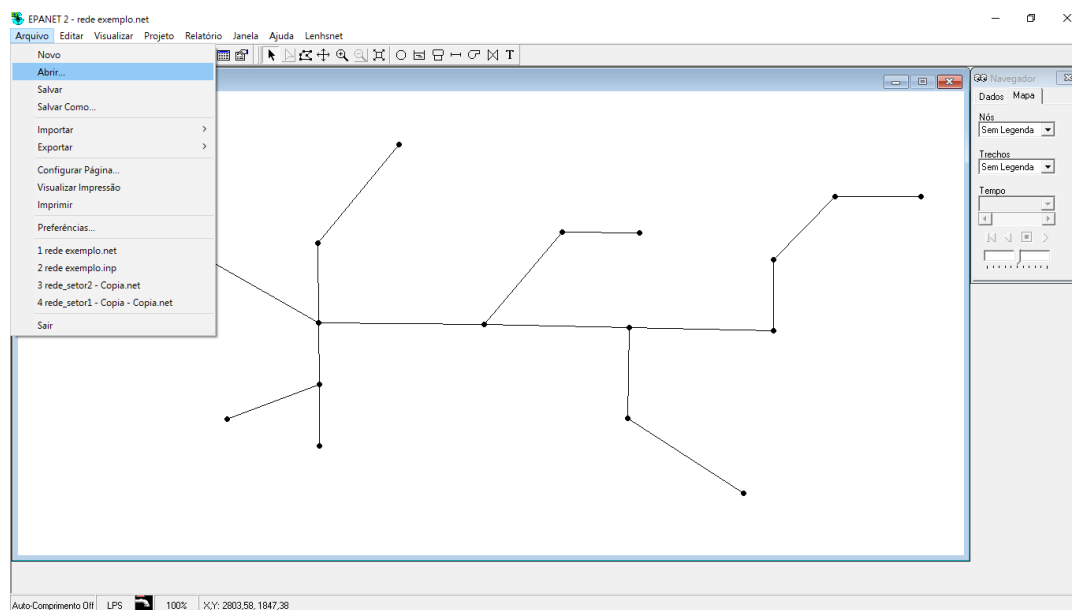
Para iniciar a importação, o arquivo DXF da rede foi aberto no EpaCAD e, em seguida, convertido para um arquivo de texto separado por tabulações com extensão INP. Para realizar a conversão deve-se selecionar as camadas utilizadas no desenho da rede e a forma de inserção dos nós (Figura 8). O arquivo gerado transforma conjuntos de linhas do desenho em trechos da rede e posiciona os nós ao fim de cada trecho ou vértice conforme a escolha do usuário. Ao final do processo o programa abre uma janela de confirmação da conversão.

Figura 8 – Janela de configuração de conversão do EpaCAD



Fonte: A autora (2019)

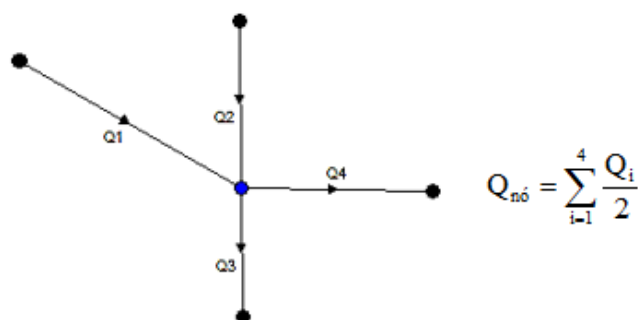
De posse do desenho em formato compatível, foi iniciado o processo de modelagem da rede em EPANET. Para iniciar a modelagem, o arquivo INP foi aberto no programa conforme ilustrado na Figura 9. Em seguida, o reservatório de nível fixo foi adicionado ao mapa da rede e as propriedades comuns aos trechos e/ou nós (por exemplo, rugosidade das tubulações) foram inseridas através do recurso de edição de grupo contido na guia “Editar”.

Figura 9 – Tela inicial do EPANET

Fonte: A autora (2019)

Ao realizar a conversão de um projeto em CAD para formato INP as extensões das linhas desenhadas são transformadas em comprimento das tubulações, no entanto parâmetros como diâmetro, nível d'água do reservatório, cota do terreno e consumo-base dos nós precisam ser inseridos manualmente. Neste trabalho, os parâmetros inseridos nas propriedades dos trechos e nós foram os mesmos do projeto original fornecido.

Para realizar o dimensionamento estático da rede no EPANET, ou seja, simular o cenário de consumo do projeto original, é necessário estimar o consumo-base de cada nó. Este consumo-base é calculado pela soma da metade da vazão de distribuição dos trechos ligados ao nó, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Esquema de cálculo do consumo-base dos nós

Fonte: A autora (2019)

Após calculado o consumo-base, os dados principais de entrada foram inseridos nas propriedades dos respectivos nós. Da mesma forma, as correções no comprimento dos trechos e a inserção dos diâmetros foram realizados na janela de propriedades dos trechos e a cota do nível d'água no editor de propriedades do reservatório, conforme ilustrado nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 – Janela de edição de propriedades dos nós (à esquerda) e dos trechos (à direita)

Nó N1		Trecho T13	
Propriedade	Valor	Propriedade	Valor
*Identificador do Nó	N1	*Identificador do Trecho	T13
Coordenada X	3318.89	*Nó Inicial	N10
Coordenada Y	1565.52	*Nó Final	N13
Descrição		Descrição	
Zona		Zona	
*Cota	599	*Comprimento	50
Consumo-Base	3	*Diâmetro	53.4
		*Rugosidade	132.5

Fonte: A autora (2019)

Figura 12 – Janela de edição de propriedades do reservatório de nível fixo

RNF R	
Propriedade	Valor
*Identificador do RNF	R
Coordenada X	3454.15
Coordenada Y	1732.31
Descrição	
Zona	
*Nível de Água	605

Fonte: A autora (2019)

Antes de iniciar a simulação estática da rede é necessário configurar os parâmetros dos tubos. Para tal fim, a guia LENHSNET foi aberta e a opção “Dados dos Tubos” acionada abrindo a caixa de diálogo mostrada na Figura 13. Na janela de edição foram inseridos os diâmetros internos, rugosidades, tipos e custos em reais por metro referentes aos diâmetros nominais de tubulações atualmente comercializadas contidos na Tabela 10.

Figura 13 – Janela de configuração dos dados dos tubos

Diâmetro	Rugosidade	Tipo	Custo (\$/m)
53.4	132.5	PBA_JEI_15	16.31
75.6	132.5	PBA_JEI_15	32.04
108.4	132.5	DEFOFO	37.23
156.4	132.5	DEFOFO	100.20
204.2	132.5	DEFOFO	169.81
252	132.5	DEFOFO	258.51
299.8	132.5	DEFOFO	367.09

Abrir Salvar Fechar

Fonte: A autora (2019)

Uma vez adicionadas as propriedades dos nós, trechos e reservatório e os dados dos tubos, foram configuradas as unidades de vazão e a fórmula de cálculo da perda de carga contínua por meio da seleção de “Opções de Simulação” na guia “Projetos” (Figura 14).

Figura 14 – Janela de edição das opções de simulação

Propriedade	Valor
Unidades de Vazão	LPS
Fórmula de Perda de Carga	H-W
Densidade	1
Viscosidade Relativa	1
No. Máximo de Iterações	40
Erro Máximo de Convergência	0.001
Se Não Convergir	Continue
Padrão	1
Fator de Consumo	1.0
Expoente p/ Fórmula do Emissor	0.5
Relatório de Estado	No
CHECKFREQ	2
MAXCHECK	10
DAMPLIMIT	0

Fonte: A autora (2019)

Finalizadas as etapas de inserção de dados e configuração de opções de simulação, a rede foi dimensionada através da opção “Executar Simulação” na guia “Projetos”. Concluído o dimensionamento, as caixas de informação e de estado da simulação foram exibidas e os resultados puderam ser observados por meio de gráficos e/ou tabelas para nós e trechos obtidos na guia “Relatório”. Finalizada a simulação da rede ramificada, são apresentados a seguir os procedimentos de dimensionamento otimizado da rede malhada.

Assim como na rede ramificada, todas as etapas de modelagem e conversão do traçado para formato compatível com o EPANET foram realizadas para a rede malhada. Quanto ao traçado (ver Apêndice B), foi utilizado o desenho da rede original e a localização das ruas, disponível no arquivo vetorial fornecido de distribuição dos lotes, para criar uma rede em malhas formando 13 anéis.

Para realizar o dimensionamento otimizado da rede malhada foi necessário configurar os dados de dimensionamento do projeto e os parâmetros dos tubos utilizados. Para inserir dados do projeto no EPANET a guia LENHSNET foi aberta e a opção “Dados do Projeto” foi acionada abrindo a caixa de diálogo mostrada na Figura 15.

Figura 15 – Janela de configuração dos dados do projeto

Dados do Projeto

Cota Piezométrica na Origem

Trechos Ignorados

Limites

☒ Sim ☐ Não	Velocidade Máxima =	3.5	m/s
☒ Sim ☐ Não	Velocidade Mínima =	0	m/s
☒ Sim ☐ Não	Pressão Máxima =	40	mca
	Pressão Mínima =	6	mca

Cota de Cabeceira Fixa | Cota de Cabeceira Variável

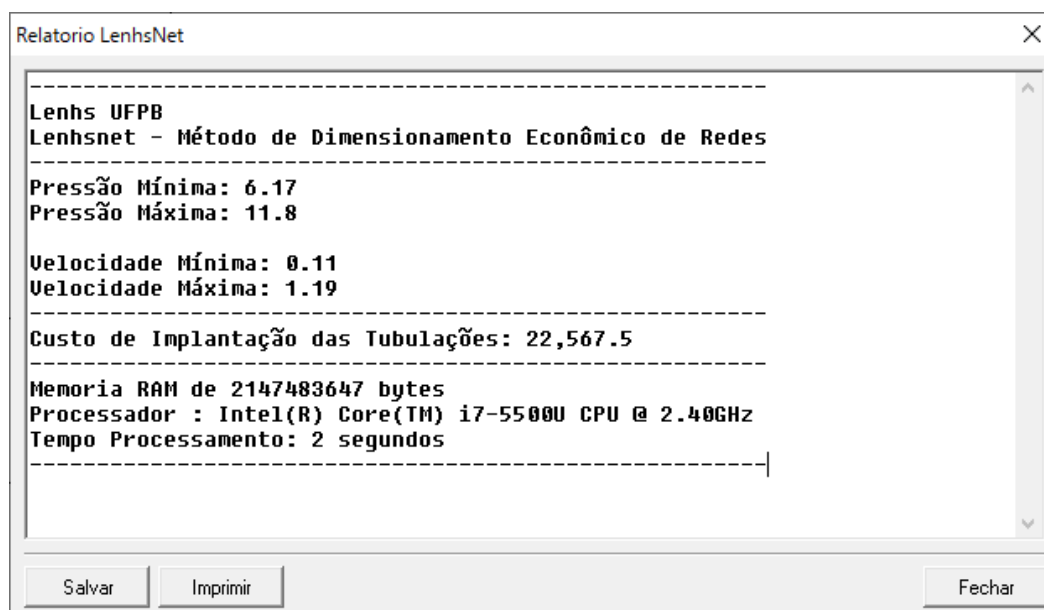
Dividir ultimo trecho para aproveitamento de pressão
☐ Sim ☒ Não

Fonte: A autora (2019)

Na caixa de diálogo é possível escolher entre as opções de dimensionamento de cota piezométrica de cota fixa ou variável na origem. Como o reservatório deste trabalho tem nível fixo, foi selecionada a opção “Cota Fixa” para a cota piezométrica de cabeceira. Além da forma de simulação, os limites mínimos e máximos de velocidade e pressão foram inseridos adotando, respectivamente, os valores estabelecidos nos itens 4.4.1 e 4.4.5 deste procedimento metodológico.

Para realizar o dimensionamento otimizado da rede malhada, a opção “Executar Dimensionamento” na guia LENHSNET foi selecionada e os resultados da otimização puderam ser observados através das tabelas e gráficos da guia projetos junto ao relatório final da guia LENHSNET onde são apresentados os limites de pressão e velocidade alcançados bem como o custo total de implantação das tubulações (Figura 16).

Figura 16 – Relatório da otimização



Fonte: A autora (2019)

4.6 SIMULAÇÃO DE FALHAS MECÂNICAS

Quanto à tipologia do traçado, as redes de distribuição de água podem ser classificadas em malhadas, ramificadas ou mistas. As redes ramificadas são caracterizadas por apresentarem escoamento unidirecional, ou seja, um único sentido de fluxo. As redes malhadas, por sua vez, contém trechos interligados formando anéis

que a permitem distribuir a água em diferentes direções a depender da demanda requerida.

Apesar das redes de distribuição do tipo ramificada tenderem a ser menos complexas e apresentar um menor custo devido à necessidade de uma quantidade menor de tubos, sob o ponto de vista hidráulico, estas apresentam uma grande desvantagem em relação ao traçado malhado, a sua confiabilidade de abastecimento contínuo.

A confiabilidade hidráulica é um parâmetro de desempenho importante dos sistemas de abastecimento de água, pois está diretamente relacionada com a capacidade do sistema de fornecer água de qualidade na quantidade requerida e sob pressões adequadas aos consumidores finais.

A confiabilidade de uma rede de distribuição de água, também chamada de resiliência, é definida por Goulter (1995) como a habilidade do sistema de suprir a demanda que lhe está sendo imposta em diferentes cenários. Devido ao escoamento ser unidirecional em redes ramificadas, em caso de falhas mecânicas de um trecho (ruptura, incrustação, etc.), todos os condutos a jusante do trecho avariado não receberão água ou apresentarão problemas significativos de pressão.

Redes malhadas, por outro lado, possuem a capacidade de reagir e de superar as condições adversas geradas por falhas mecânicas em trechos do sistema, por meio da adaptação do fluxo por percursos alternativos ao dimensionado, evitando interrupção no fornecimento de água, quando se faz necessária a manutenção de algum trecho.

Como forma de comprovar essa vantagem das redes malhadas, foi proposta a análise de falhas mecânicas na rede malhada deste trabalho, onde foram simuladas situações de quebra de trechos específicos da rede. A escolha dos trechos foi condicionada à faixa de pressão e à proximidade do reservatório, ou seja, foram escolhidos os trechos que contém os nós de maior e menor pressão disponível bem como os mais próximos do reservatório mantenedor da rede.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas próximas seções são apresentados e discutidos os resultados obtidos no estudo de caso para os métodos de dimensionamento propostos bem como do processo de dimensionamento otimizado no LENHSNET para a rede malhada. Para isso, são utilizadas tabelas comparativas e gráficos a fim de analisar e correlacionar os resultados atingidos para cada situação.

Para finalizar o estudo, é feita uma avaliação da resiliência da rede malhada. Para todos os métodos utilizados, foram considerados os parâmetros e condições de projeto apresentados na metodologia e resumidos na Tabela 11.

Tabela 11 – Resumo dos Parâmetros e Critérios de Projeto

Parâmetro	Valor	Unidade
Cota piezométrica do Reservatório	609,7	m
Extensão da rede	3.570,25	m
Número de Nós	37	-
Número de Trechos	37	-
Menor cota	585,95	m
Maior cota	601,95	m
Número de lotes	270	lote
Pressão dinâmica mínima requerida	6,00	mca
Pressão estática máxima requerida	40,00	mca
Velocidade mínima requerida	0,00	m/s
Velocidade máxima requerida	3,50	m/s
Taxa de ocupação por domicílio	4,20	hab./lote
Consumo Per Capita	150,00	L/hab./dia
Vazão singular	0,00	L/s
Material da Tubulação para DN<100	PVC PBA JEI 15	-
Material da Tubulação para DN>=100	MPVC DEFoFo	-
Método de cálculo da Perda de Carga	Hazen-Williams (H-W)	-
Coeficiente de rugosidade de H-W	132,5	-

Fonte: A autora (2019)

De posse das condições de projeto citadas na Tabela 11 e das equações propostas na metodologia, foram calculados os parâmetros necessários para estimar a demanda de água requerida pela população da área de estudo. A Tabela 12 contém um resumo dos dados calculados.

Tabela 12 – Parâmetros de cálculo da demanda de água

Parâmetro	Valor	Unidade
População de Projeto	1134	hab.
Volume de Reservação	100,32	m ³
Vazão de Projeto	3,54375	L/s
Vazão de distribuição em marcha	0,000992578	L/s/m

Fonte: A autora (2019)

A seguir, são apresentados os resultados atingidos e a comparação dos diâmetros, velocidades e perdas de carga nos trechos bem como a pressão nos nós obtidas em cada método.

5.1 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DA REDE RAMIFICADA NO EXCEL

De posse do traçado real da rede (ver Apêndice A), dos comprimentos existentes, das restrições impostas e dos valores calculados acima para população de projeto, vazão de projeto e vazão de distribuição em marcha, foram elaboradas as tabelas de cálculo no Excel.

Após realizados todos os procedimentos de inserção de dados e aplicação das equações apresentadas na metodologia, a rede foi dimensionada no Excel através do método de Gradiente Reduzido Generalizado não linear (GRG não linear) acoplado ao suplemento *Solver* pertencente ao pacote da Microsoft Office. Na Tabela 13 é exposto um resumo dos principais parâmetros obtidos.

Tabela 13 – Resumo dos resultados obtidos

Parâmetro	Valor	Unidade
Extensão com DN 50	3.331,35	m
Extensão com DN 75	166,60	m
Extensão com DN 100	72,30	m
Pressão dinâmica mínima obtida	6,230	mca
Pressão estática máxima obtida	23,10	mca
Velocidade mínima obtida	0,009	m/s
Velocidade máxima obtida	0,789	m/s
Perda de carga mínima obtida	0.00015	m/km
Perda de carga máxima obtida	0.45704	m/km
Custo total de implantação + 1%	62.987,55	R\$

Fonte: A autora (2019)

Nos resultados obtidos é notável que em 81,1% da rede ramificada a pressão atendeu as recomendações de pressão dinâmica mínima e estática máxima da NBR 12218/2017 de, respectivamente, 10 e 50 mca. e em todos os nós foram respeitados os limites de 6 mca e 40 mca exigidos pela COMPESA.

Outro aspecto muito importante a ser levado em conta diz respeito a velocidade mínima encontrada em 15 dos 37 trechos da rede, que foi inferior a 0,06 m/s, valor 90% menor que o mínimo recomendado pela NBR 12218/2017. Nota-se também que apenas 2 trechos alcançaram a velocidade mínima de 0,6 m/s atingindo uma velocidade máxima de 0,789 m/s.

Ao analisar a perda de carga, vê-se que 67,6% dos trechos apresentaram perda de carga unitária inferior a 1,0 m/km, valor 90% menor que os 10 m/km admitidos pela COMPESA, sendo o maior e o menor valor encontrados iguais a, respectivamente, 0,00379 m/km e 10,48078 m/km.

Por fim, quanto a relação de diâmetros dos condutos utilizados, a rede ramificada foi dimensionada com 32 trechos com canalização de 50 mm (86,5%), 4 de 75 mm (10,8%) e 1 de 100 mm (2,7%) apresentando um custo parcial de implantação das tubulações de R\$ 62.363,91 ao qual deve ser somado o valor de 1% referente às despesas com conexões e acessórios totalizando R\$ 62.987,55.

Nas tabelas 14, 15 e 16 são apresentadas, respectivamente, as tabelas de cálculo hidráulico, orçamento dos custos de implantação da rede e uma tabela extra de verificação das restrições hidráulicas impostas, onde a numeração dos nós e trechos se encontra no apêndice A.

Tabela 14 – Cálculo hidráulico da Rede de Distribuição de água

CÁLCULO HIDRÁULICO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO																		
qpc (L/hab./dia)	150	k1	1,2	N° de habitantes por lote (hab./lote)		4,2	Cota Piezométrica (m)		609,70	Q (L/s)	3,54375	Consumo (m³)	68,04	Emergência (m³)		25,08		
Coeficiente C	132,5	k2	1,5	N° de lotes	270	Pop. total	1134	Extensão (m)		3570,250	Qmar (L/s/m)	0,00099258	Incêndio (m³)	7,20	Volume total (m³)		100,32	
Trecho	Nós		Comprimento (m)			Vazão (L/s)			Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	J (m/km)	hf (m)	Cota Piezométrica (m)		Cota do terreno (m)		Pressão disponível (m)	
	Jus.	Mont.	Jus.	Trecho	Mont.	Jus.	Trecho	Fictícia					Mont.	Jus.	Mont.	Jus.	Mont.	Jus.
T37	37	34	0,00	39,60	39,60	0,00	0,04	0,02	53,4	0,009	0,00379	0,000150	609,35	609,35	598,20	598,30	11,15	11,05
T36	36	35	0,00	66,75	66,75	0,00	0,07	0,03	53,4	0,015	0,00996	0,000665	609,34	609,34	596,30	595,80	13,04	13,54
T35	35	34	66,75	67,65	134,40	0,07	0,07	0,10	53,4	0,045	0,07684	0,005198	609,35	609,34	598,20	596,30	11,15	13,04
T34	34	33	174,00	101,55	275,55	0,17	0,10	0,22	53,4	0,100	0,34072	0,034600	609,38	609,35	598,00	598,20	11,38	11,15
T33	33	2	275,55	72,30	347,85	0,27	0,07	0,31	53,4	0,138	0,62425	0,045134	609,43	609,38	599,20	598,00	10,23	11,38
T32	32	26	0,00	160,70	160,70	0,00	0,16	0,08	53,4	0,036	0,05070	0,008147	609,26	609,25	599,80	596,50	9,46	12,75
T31	31	27	0,00	127,30	127,30	0,00	0,13	0,06	53,4	0,028	0,03293	0,004192	609,14	609,13	595,10	594,70	14,04	14,43
T30	30	28	0,00	77,90	77,90	0,00	0,08	0,04	53,4	0,017	0,01326	0,001033	609,11	609,11	591,95	592,50	17,16	16,61
T29	29	28	0,00	84,00	84,00	0,00	0,08	0,04	53,4	0,019	0,01525	0,001281	609,11	609,11	591,95	590,10	17,16	19,01
T28	28	27	161,90	99,75	261,65	0,16	0,10	0,21	53,4	0,094	0,30513	0,030436	609,14	609,11	595,10	591,95	14,04	17,16
T27	27	26	388,95	99,75	488,70	0,39	0,10	0,44	53,4	0,194	1,17621	0,117327	609,26	609,14	599,80	595,10	9,46	14,04
T26	26	09	649,40	37,20	686,60	0,64	0,04	0,66	53,4	0,296	2,56122	0,095277	609,35	609,26	598,10	599,80	11,25	9,46
T25	25	10	0,00	321,60	321,60	0,00	0,32	0,16	53,4	0,071	0,18323	0,058928	609,10	609,05	599,90	585,95	9,20	23,10
T24	24	11	0,00	233,80	233,80	0,00	0,23	0,12	53,4	0,052	0,10152	0,023735	608,96	608,94	600,50	588,90	8,46	20,04
T23	23	22	0,00	44,45	44,45	0,00	0,04	0,02	53,4	0,010	0,00469	0,000209	608,46	608,46	588,90	586,70	19,56	21,76
T22	22	12	44,45	238,15	282,60	0,04	0,24	0,16	53,4	0,072	0,18902	0,045016	608,51	608,46	601,80	588,90	6,71	19,56
T21	21	20	0,00	40,25	40,25	0,00	0,04	0,02	53,4	0,009	0,00390	0,000157	608,22	608,22	591,70	589,90	16,52	18,32
T20	20	13	40,25	197,95	238,20	0,04	0,20	0,14	53,4	0,062	0,14032	0,027777	608,25	608,22	601,95	591,70	6,30	16,52
T19	19	14	0,00	183,75	183,75	0,00	0,18	0,09	53,4	0,041	0,06498	0,011941	608,13	608,12	601,90	592,90	6,23	15,22
T18	18	15	0,00	142,50	142,50	0,00	0,14	0,07	53,4	0,032	0,04058	0,005783	608,09	608,08	600,80	594,10	7,29	13,98
T17	17	16	0,00	102,85	102,85	0,00	0,10	0,05	53,4	0,023	0,02218	0,002282	608,08	608,08	597,70	591,80	10,38	16,28
T16	16	15	102,85	61,35	164,20	0,10	0,06	0,13	53,4	0,059	0,12987	0,007967	608,09	608,08	600,80	597,70	7,29	10,38
T15	15	14	306,70	58,50	365,20	0,30	0,06	0,33	53,4	0,149	0,71717	0,041954	608,13	608,09	601,90	600,80	6,23	7,29
T14	14	13	548,95	59,80	608,75	0,54	0,06	0,57	53,4	0,257	1,96441	0,117472	608,25	608,13	601,95	601,90	6,30	6,23
T13	13	12	846,95	61,05	908,00	0,84	0,06	0,87	53,4	0,389	4,24454	0,259129	608,51	608,25	601,80	601,95	6,71	6,30
T12	12	11	1190,60	58,50	1249,10	1,18	0,06	1,21	53,4	0,541	7,81267	0,457041	608,96	608,51	600,50	601,80	8,46	6,71
T11	11	10	1482,90	65,50	1548,40	1,47	0,07	1,50	75,6	0,335	2,14785	0,140684	609,10	608,96	599,90	600,50	9,20	8,46
T10	10	09	1870,00	74,90	1944,90	1,86	0,07	1,89	75,6	0,422	3,28801	0,246272	609,35	609,10	598,10	599,90	11,25	9,20
T9	09	02	2631,50	72,30	2703,80	2,61	0,07	2,65	108,4	0,287	1,05773	0,076474	609,43	609,35	599,20	598,10	10,23	11,25
T8	08	07	0,00	134,15	134,15	0,00	0,13	0,07	53,4	0,030	0,03629	0,004868	609,18	609,18	593,40	587,80	15,78	21,38
T7	07	06	134,15	61,25	195,40	0,13	0,06	0,16	53,4	0,073	0,19171	0,011742	609,20	609,18	594,90	593,40	14,30	15,78
T6	06	05	195,40	105,75	301,15	0,19	0,10	0,25	53,4	0,110	0,40962	0,043317	609,24	609,20	597,00	594,90	12,24	14,30
T5	05	04	301,15	46,00	347,15	0,30	0,05	0,32	53,4	0,144	0,67122	0,030876	609,27	609,24	598,10	597,00	11,17	12,24
T4	04	03	347,15	136,75	483,90	0,34	0,14	0,41	53,4	0,184	1,06317	0,145388	609,41	609,27	599,30	598,10	10,11	11,17
T3	03	02	483,90	8,50	492,40	0,48	0,01	0,48	53,4	0,216	1,43272	0,012178	609,43	609,41	599,20	599,30	10,23	10,11
T2	02	01	3544,05	19,65	3563,70	3,52	0,02	3,53	75,6	0,786	10,40961	0,204549	609,63	609,43	599,00	599,20	10,63	10,23
T1	01	RES	3563,70	6,55	3570,25	3,54	0,01	3,54	75,6	0,789	10,48078	0,068649	609,70	609,63	599,00	599,00	10,70	10,63
SOMA			3570,25															

Fonte: A autora (2019)

Tabela 15 – Orçamento dos custos de implantação

CUSTO DE IMPLANTAÇÃO					
DN	DI (mm)	Tubo de PVC	Custo/m (R\$)	Comprimento Total (m)	Custo Total (R\$)
50	53,4	PBA JEI 15	16,31	3.331,35	54.334,32
75	75,6	PBA JEI 15	32,04	166,60	5.337,86
100	108,4	DEFoFo	37,23	72,30	2.691,73
150	156,4	DEFoFo	100,20	0,00	0,00
200	204,2	DEFoFo	169,81	0,00	0,00
250	252,0	DEFoFo	258,51	0,00	0,00
300	299,8	DEFoFo	367,09	0,00	0,00
CUSTO DA TUBULAÇÃO					62.363,91
TOTAL + ACRÉSCIMO DE 1%					62.987,55

Fonte: A autora (2019)

Tabela 16 – Verificações dos limites de velocidade e pressão

VERIFICAÇÕES			
Critério	Valor	Referência	Situação
Velocidade Mínima	0,009	0,6	Não atende
Velocidade Máxima	0,789	3,5	
Pressão Mínima	6,230	6	Atende
Pressão Máxima	23,095	40	

Fonte: A autora (2019)

5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA REDE RAMIFICADA NO EPANET

De posse do traçado da rede ramificada, dos comprimentos reais, das restrições impostas e dos valores calculados para população de projeto, vazão de projeto e vazão de distribuição em marcha, a rede foi modelada no AutoCAD, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17– Rede modelada no AutoCAD

Fonte: A autora (2019)

Modelada a rede no AutoCAD, os arquivos foram convertidos para formato INP, configurados no EPANET e simulados. São apresentados na Tabela 17 os consumos-base dos nós da rede calculados segundo a metodologia proposta em 4.5.2 e na Tabela 18 os diâmetros da rede ramificada utilizados como parâmetro de entrada no *software*.

Tabela 17 – Consumo-base dos nós

Nó	Consumo (L/s)	Nó	Consumo (L/s)	Nó	Consumo (L/s)	Nó	Consumo (L/s)
1	0,01625	11	0,17757	21	0,01998	31	0,06318
2	0,08573	12	0,17752	22	0,14025	32	0,07975
3	0,07209	13	0,15822	23	0,02206	33	0,08628
4	0,09070	14	0,14990	24	0,11603	34	0,10363
5	0,07531	15	0,13020	25	0,15961	35	0,06670
6	0,08288	16	0,08149	26	0,14772	36	0,03313
7	0,09697	17	0,05104	27	0,16219	37	0,01965
8	0,06658	18	0,07072	28	0,12985		
9	0,09152	19	0,09119	29	0,04169		
10	0,22929	20	0,11822	30	0,03866		

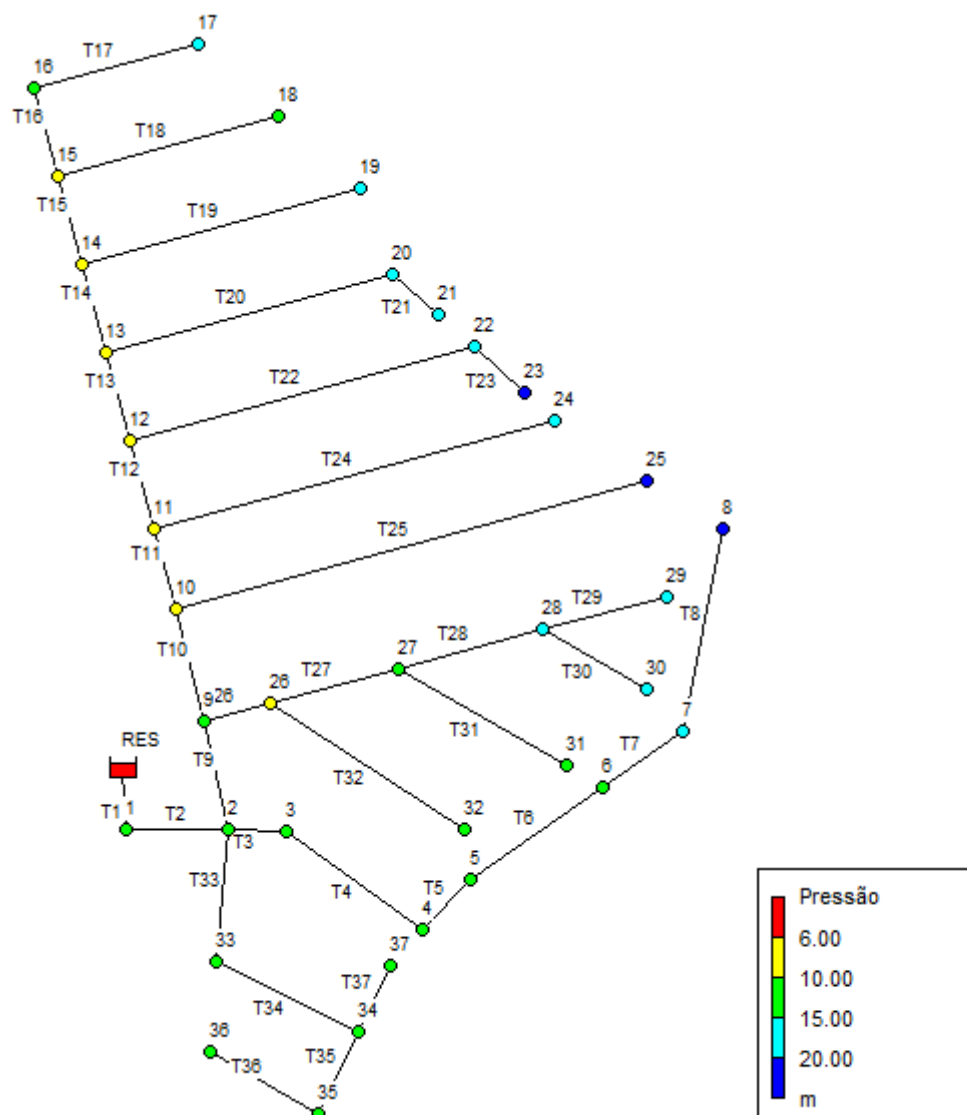
Fonte: A autora (2019)

Tabela 18 – Distribuição dos diâmetros da rede existente

Trecho	DN	Trecho	DN	Trecho	DN	Trecho	DN
T1	100	T11	75	T21	50	T31	50
T2	100	T12	50	T22	50	T32	50
T3	50	T13	50	T23	50	T33	50
T4	50	T14	50	T24	50	T34	50
T5	50	T15	50	T25	50	T35	50
T6	50	T16	50	T26	50	T36	50
T7	50	T17	50	T27	50	T37	50
T8	50	T18	50	T28	50		
T9	75	T19	50	T29	50		
T10	75	T20	50	T30	50		

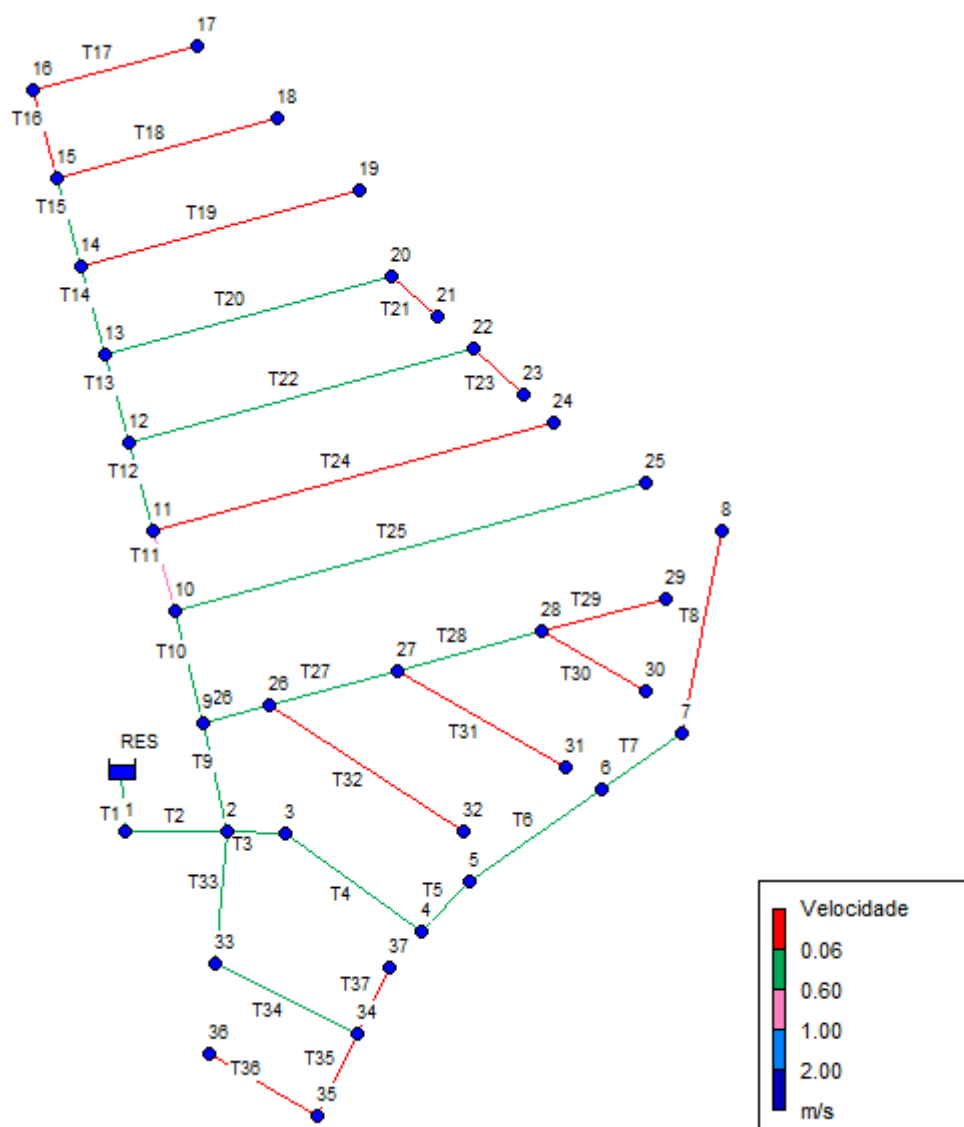
Fonte: A autora (2019)

Nos resultados obtidos, nota-se que em 30 dos 37 nós da rede ramificada, a pressão atendeu as recomendações de pressão dinâmica mínima e estática máxima da NBR 12218/2017 e em todos os nós foram respeitados os limites de 6 mca e 40 mca exigidos pela COMPESA sendo o menor valor observado de 6,09 mca e o maior de 22,95 mca. Na Figura 18 é ilustrado o mapa de distribuição de pressões da rede.

Figura 18 – Distribuição de pressões na rede existente

Fonte: A autora (2019)

Outro ponto relevante notado diz respeito a velocidade mínima encontrada na rede. Todos os trechos apresentaram velocidade inferior a 0,6 m/s dos quais 40,5% resultaram em valor inferior a 0,06 m/s e 75,7% menor que 0,25 m/s. Os limiares observados foram de 0,009 m/s e 0,590 m/s. Na Figura 19 é ilustrado o mapa de distribuição de velocidades da rede.

Figura 19 – Distribuição das velocidades na rede existente

Fonte: A autora (2019)

Quanto à perda de carga, todos os trechos apresentaram perda de carga unitária inferior aos 10 m/km admitidos pela COMPESA, dos quais 28 (75,7%) obtiveram valor menor que 0,3 m/km, valor 97% menor que o limite, sendo o maior e o menor valor encontrados iguais a, respectivamente, 0,00370 m/km e 7,82881 m/km.

Por fim, quanto a relação de diâmetros dos condutos utilizados, a rede ramificada foi simulada com 32 trechos de 50 mm (86,5%), 3 de 75 mm (8,1%) e 2 de 100 mm (5,4%) apresentando um custo parcial de implantação das tubulações de R\$ 62.124,65 ao qual deve ser somado o valor de 1% referente às despesas com conexões e acessórios totalizando R\$ 62.745,90.

5.3 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DA REDE MALHADA

Com os dados de cota do terreno, população de projeto e vazão de projetos definidos, foi possível realizar o dimensionamento otimizado de uma rede malhada no LENHSNET buscando identificar qual seria a melhor tipologia de traçado para a rede de distribuição de água do condomínio do ponto de vista econômico.

A identificação das cotas dos nós e dos comprimentos dos trechos complementares ao traçado ramificado foram obtidos por meio dos mapas de distribuição dos lotes e do levantamento planialtimétrico fornecidos. O critério utilizado para o cálculo do consumo-base dos nós foi o mesmo utilizado para a simulação da rede ramificada. O consumo-base de cada nó é apresentado na Tabela 19 e o traçado da rede malhada está ilustrado no apêndice B.

Tabela 19 – Consumo-base dos nós da rede malhada

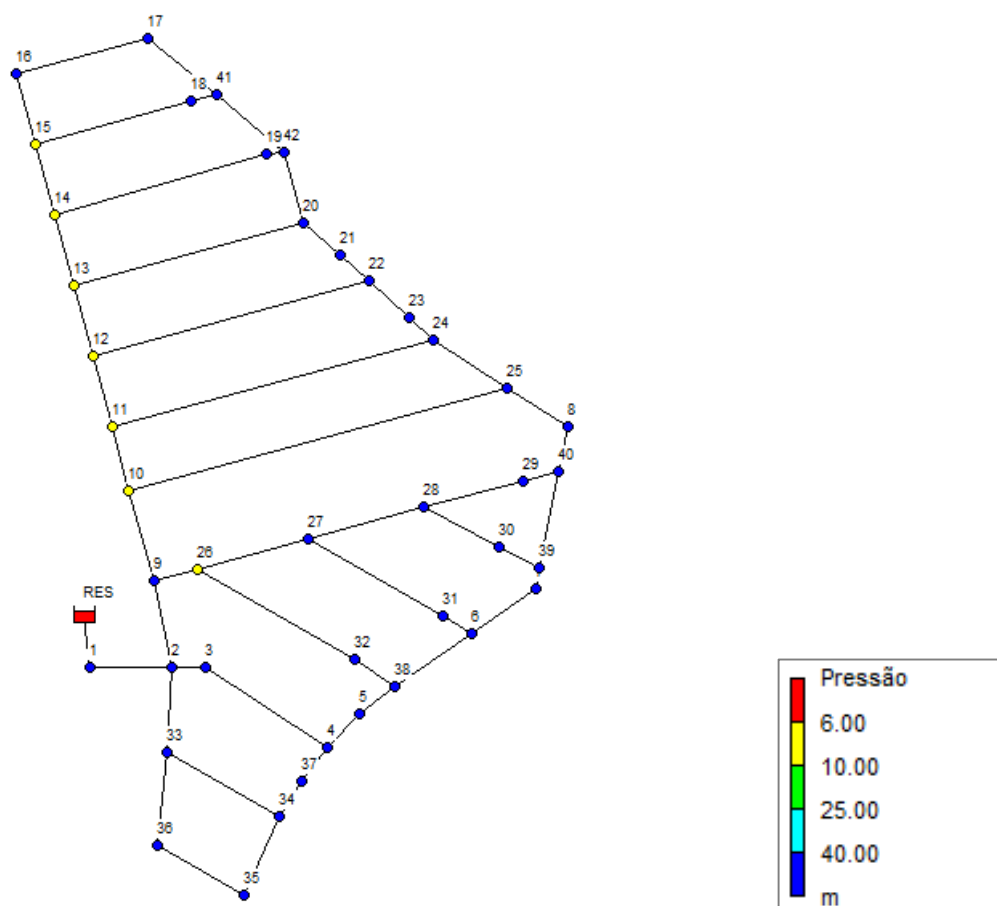
Nó	Consumo (L/s)	Nó	Consumo (L/s)	Nó	Consumo (L/s)
1	0,01367	15	0,12797	29	0,04788
2	0,07317	16	0,08583	30	0,04552
3	0,06061	17	0,07298	31	0,06198
4	0,09897	18	0,06152	32	0,08020
5	0,03134	19	0,07884	33	0,10131
6	0,06641	20	0,12593	34	0,08712
7	0,03067	21	0,02990	35	0,05597
8	0,03976	22	0,13102	36	0,05652
9	0,07410	23	0,02981	37	0,03924
10	0,18593	24	0,13905	38	0,05727
11	0,14744	25	0,18893	39	0,05374
12	0,14979	26	0,12420	40	0,06369
13	0,13196	27	0,13636	41	0,06236
14	0,12668	28	0,10917	42	0,05894

Fonte: A autora (2019)

Para a concepção da rede malhada, dois trechos da rede original foram divididos ficando o novo traçado com 42 nós e 55 trechos. Esta foi dimensionada utilizando os mesmos materiais, rugosidades e demais parâmetros utilizados para a rede ramificada.

Após realizados todos os procedimentos de inserção de dados e configurações no EPANET e no LENHSNET apresentados na metodologia, a rede foi dimensionada e otimizada. A Figura 20 ilustra a distribuição de pressões na rede.

Figura 20 – Distribuição de pressões na rede malhada

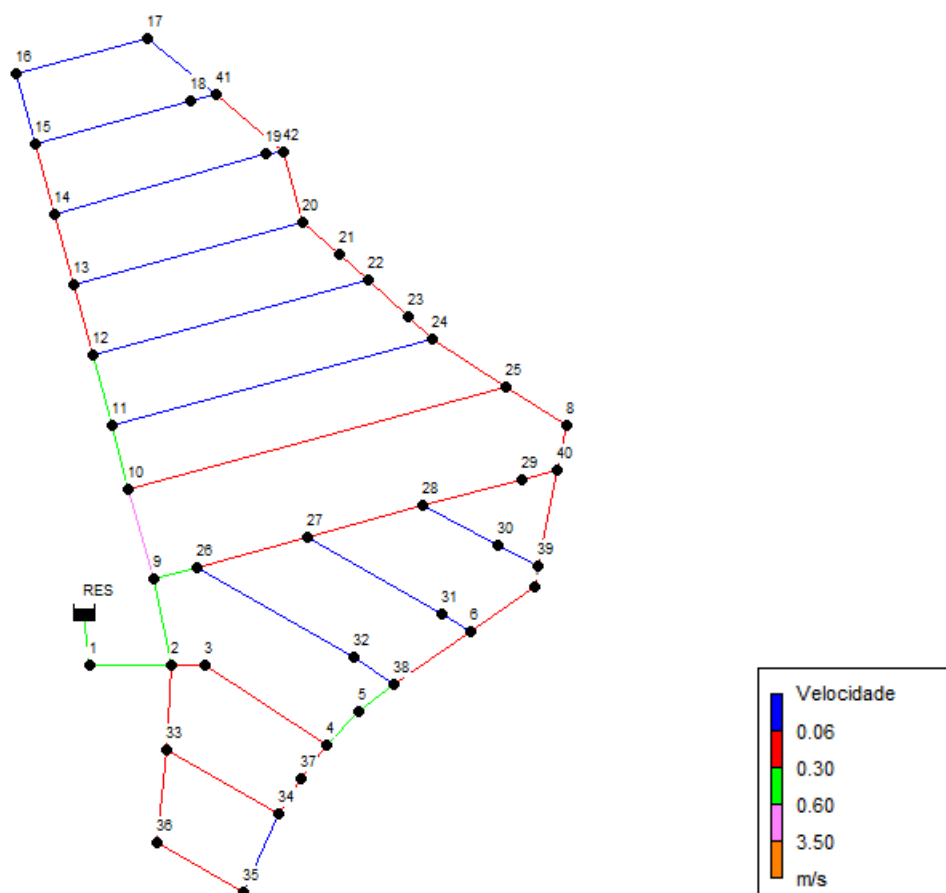


Fonte: A autora (2019)

A partir da Figura 20 é possível verificar que em 83,4% da rede malhada a pressão atende as recomendações de pressão dinâmica mínima e estática máxima da NBR 12218/2017 de, respectivamente, 10 e 50 mca. e em todos os nós é respeitada o valor mínimo de 6 mca exigido pela COMPESA.

Outra observação realizada diz respeito a velocidade mínima encontrada em 17 dos 52 trechos da rede, que foi inferior a 0,06 m/s, valor 90% menor que o mínimo recomendado pela NBR 12218/2017. Nota-se também pela Figura 21 que apenas um trecho alcança a velocidade mínima de 0,6 m/s.

Figura 21 – Distribuição das velocidades na rede malhada



Fonte: A autora (2019)

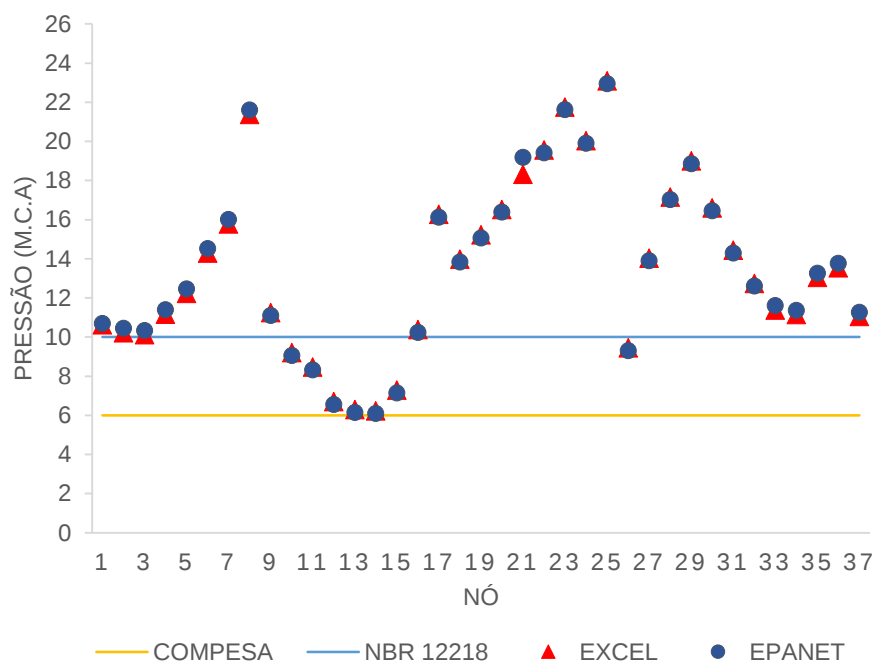
Outra diferença observada diz respeito a perda de carga unitária, onde todos os resultados obtidos para a rede malhada apresentaram valor inferior aos 10 m/km admitidos pela COMPESA, sendo aproximadamente 51% abaixo de 1 m/km e o maior valor encontrado igual a 9,57 m/km.

Por fim, quanto a relação de diâmetros dos condutos utilizados, a rede malhada foi dimensionada com 52 trechos com tubos de 50 mm (94,6%), 1 de 75 mm (1,8%) e 2 de 100 mm (3,6%) apresentando um custo parcial de implantação das tubulações de R\$ 70.986,70 ao qual deve ser somado o valor de 1% referente às despesas com conexões e acessórios totalizando R\$ 71.696,567.

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A REDE RAMIFICADA E A REDE MALHADA

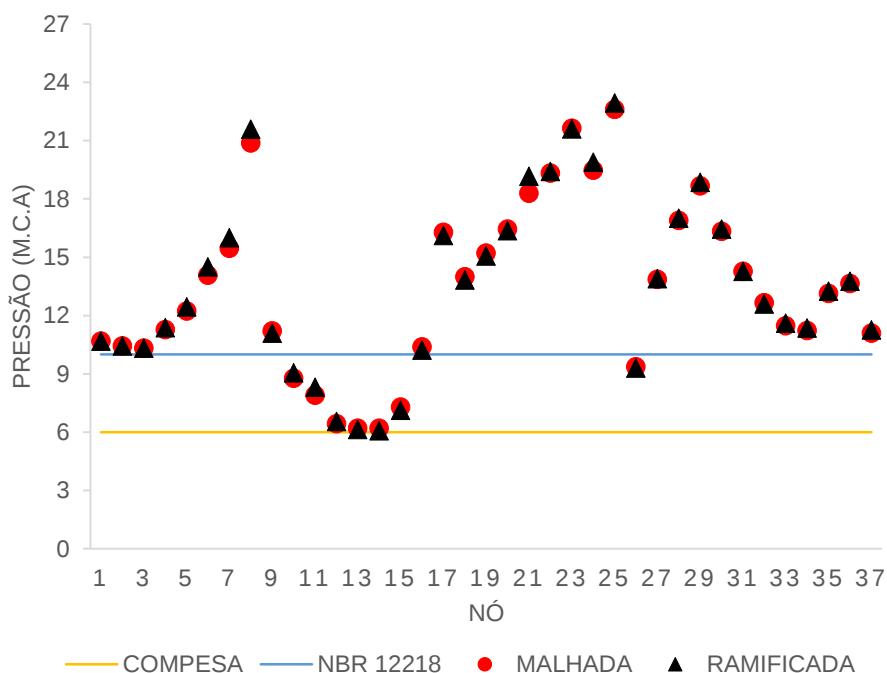
Nesta seção serão apresentadas comparações de custos e dos parâmetros hidráulicos das redes ramificada e malhada bem como a concordância entre os resultados obtidos pelo cálculo hidráulico nas planilhas Excel e a simulação no EPANET. Para tal efeito, foram adotados gráficos de dispersão para avaliar a correlação. Na Figura 22, é exibido um gráfico de comparação da pressão de cada nó, obtidos pelos dois métodos de dimensionamento da rede ramificada.

Figura 22 – Pressão nos nós para os métodos aplicados à rede ramificada



Fonte: A autora (2019)

A análise da Figura 22 mostra que o método de dimensionamento por meio de planilhas de cálculo hidráulico no Excel apresentou resultados satisfatórios de pressão na rede quando comparados aos valores obtidos no EPANET para a rede existente havendo correlação de 0,999 entre as duas soluções. Na Figura 23 é apresentado o comportamento da pressão de cada nó para as duas tipologias.

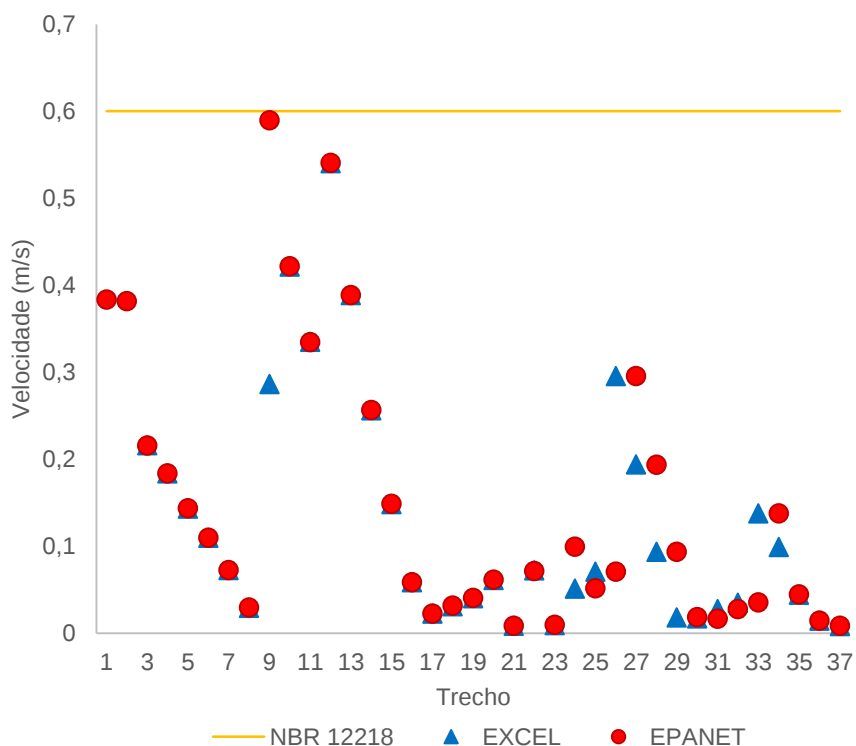
Figura 23 – Comportamento das pressões nas duas tipologias de traçado

Fonte: A autora (2019)

Nos resultados obtidos na Figura 23 é notável a proximidade dos valores de pressão atingidos pelas redes ramificada e malhada assumindo um índice de correlação de 0,999. Assim, quanto à pressão disponível, todas as tipologias de traçado e os métodos estudados são equivalentes.

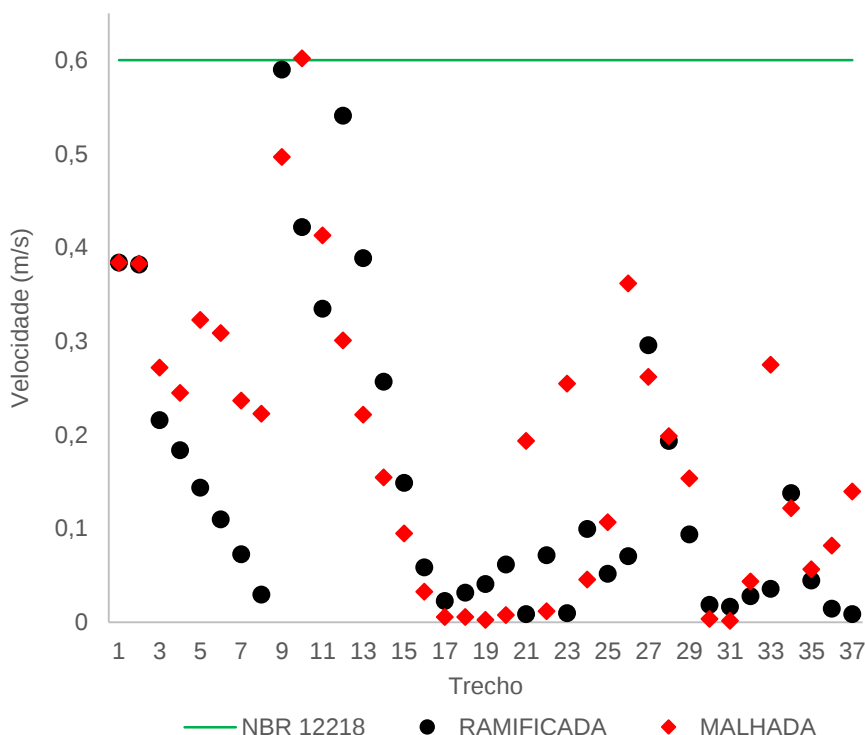
Outro aspecto muito importante a ser levado em consideração diz respeito às velocidades na rede. Conforme ilustrado nas Figura 24, os resultados apresentados pelos métodos de planilhas Excel e EPANET apresentam grande proximidade para a maioria dos nós, sendo também equivalentes para o cálculo das velocidades, no entanto o índice de correlação calculado foi de 0,806 devido aos resultados de alguns pontos isolados.

Figura 24 – Velocidade em cada nó para os métodos aplicados à rede ramificada



Fonte: A autora (2019)

Comparando os resultados observados no cálculo hidráulico da rede ramificada com a rede malhada (Figura 25), nota-se que há uma concordância intermediária entre os valores de velocidade dos dois traçados cujo índice de correlação resultou em 0,71. É possível notar também que 43,2% dos trechos coincidentes entre os dois traçados apresentam maior velocidade na rede malhada contribuindo para a redução do acúmulo de sedimentos nos pontos de consumo.

Figura 25 – Velocidade em cada nó aplicado às duas tipologias de traçado

Fonte: A autora (2019)

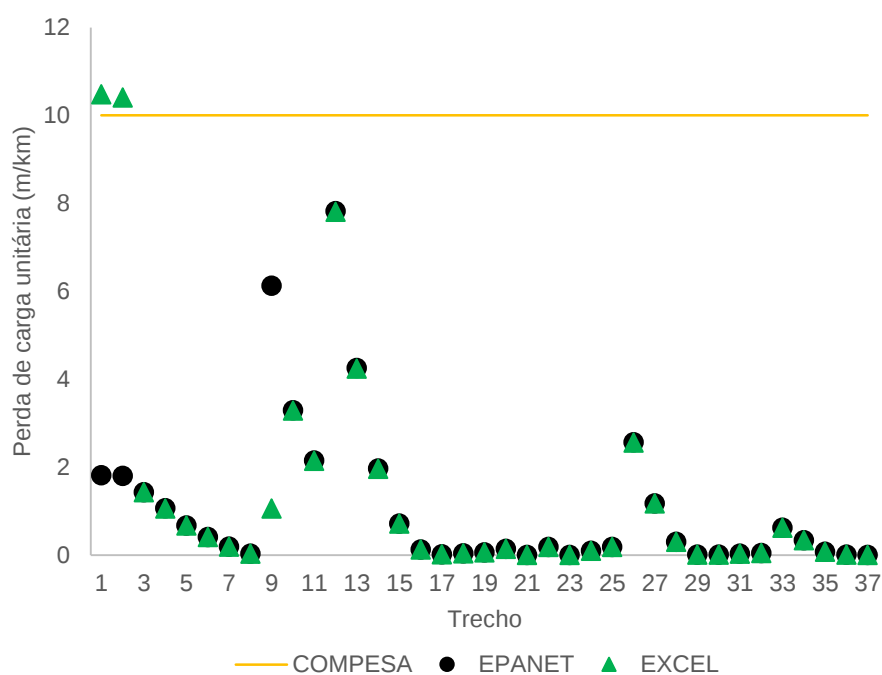
Ao analisar os resultados, pode-se afirmar que os métodos de cálculo hidráulico estudados obtiveram valores diferentes para os diâmetros das tubulações em 3 dos 37 trechos avaliados, correspondendo a 8,1% dos trechos da rede de distribuição de água, o que acarreta uma pequena diferença no custo de implantação das canalizações. O custo de implantação das tubulações calculado no EPANET foi 0,4% menor (R\$ 62.745,90) se comparado ao obtido pelo Excel, cujo valor foi de R\$ 62.987,55. Esta pequena diferença de R\$ 241,65, resultante de arredondamentos e métodos de cálculo de cada programa, é considerada insignificante perante o montante total.

Ao comparar os valores adotados para a rede ramificada simulada no EPANET com os diâmetros ótimos da rede malhada, 94,6% dos condutos dimensionados apresentam os mesmos diâmetros nos dois traçados. Apesar da semelhança, a rede malhada requer maior investimento para a implantação das tubulações visto que a rede possui maior comprimento dos condutos.

Analisando os valores obtidos de perdas de carga unitária para os métodos aplicados à rede ramificada (Figura 26), nota-se 91,9% dos trechos apresentaram coincidência de resultados. No entanto, 3 dos 37 trechos da rede obtiveram diferença

considerável entre as duas soluções reduzindo a correlação de perda de carga entre os métodos para 0,585. Esta discrepância pode ser justificada pela diferença das vazões utilizadas pelos métodos, onde nas planilhas Excel foi usada uma vazão fictícia. Notou-se também que a solução obtida no Excel não respeitou o limite estabelecido pela COMPESA em todos os trechos.

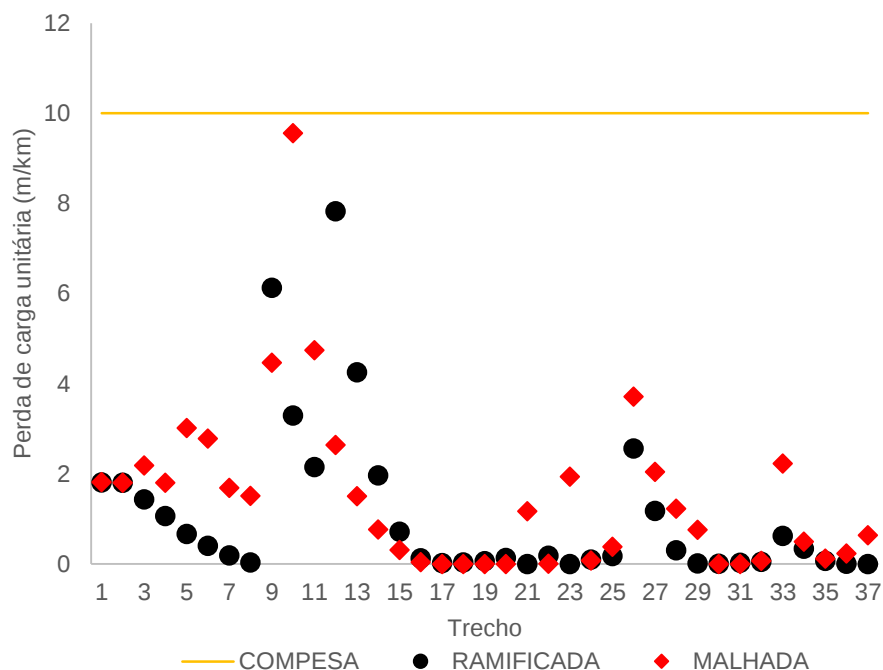
Figura 26 – Comparativo das perdas de carga unitária para os métodos aplicados à rede ramificada



Fonte: A autora (2019)

Ao comparar o comportamento da perda de carga nos dois traçados (Figura 27), observa-se que os resultados apresentaram divergências consideráveis entre as duas soluções, onde 21 dos 37 trechos em comum obtiveram perda de carga unitária superior em pelos menos 50% na rede malhada. Logo, quanto ao parâmetro perda de carga, o método de dimensionamento e a tipologia de traçado tem grande influência nos valores obtidos, apresentando diferenças consideráveis entre as soluções apresentadas.

Figura 27 – Comparativo das perdas de carga unitária nas duas tipologias de traçado



Fonte: A autora (2019)

Na comparação entre os traçados, a rede malhada necessitou de 575,1 metros a mais de tubulação, que corresponde a 16,1% do comprimento total da rede ramificada. Por esta razão, o custo de implantação das tubulações, conexões e acessórios calculado no LENHSNET para a rede malhada foi 14,3% maior (R\$ 71.696,567) se comparado ao obtido no EPANET, cujo valor foi de R\$ 62.745,90.

Na Tabela 20 é apresentado um resumo dos principais parâmetros analisados por cada método para as duas tipologias de rede. Apesar de perder no desempenho econômico, a rede malhada apresenta uma grande vantagem em relação ao traçado ramificado existente: a segurança no abastecimento. São apresentados, a seguir, os resultados obtidos na simulação de falhas mecânicas da rede malhada.

Tabela 20 – Resumo dos resultados obtidos por cada metodologia

Parâmetro	Ramificada		Malhada	Unidade
	Excel	EPANET		
Extensão com DN 50	3.331,35	3.331,25	4.145,40	m
Extensão com DN 75	166,60	212,70	74,90	m
Extensão com DN 100	72,30	26,20	26,20	m
Pressão dinâmica mínima obtida	6,230	6,09	6,21	mca
Pressão estática máxima obtida	23,10	22,95	22,62	mca
Velocidade mínima obtida	0,009	0,009	0,002	m/s
Velocidade máxima obtida	0,789	0,590	0,602	m/s
Perda de carga unitária mínima obtida	0,00379	0,00370	0,00029	m/km
Perda de carga unitária máxima obtida	10,48078	7,82881	9,56590	m/km
Custo total de implantação + 1%	62.987,55	62.745,90	71.696,567	R\$

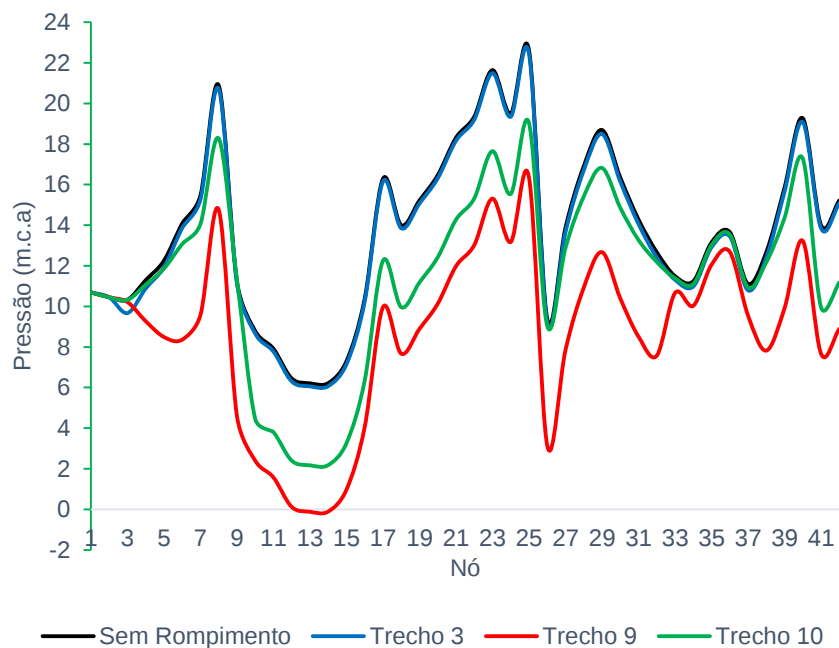
Fonte: A autora (2019)

5.5 ANÁLISE DA RESILIÊNCIA DA REDE MALHADA

Com a base de dados adquiridos da rede malhada apresentada nas seções anteriores, e em particular a série de pressões obtidas nos 42 nós da rede para os 11 trechos escolhidos para a quebra, são realizadas todas as análises e os resultados obtidos são apresentados e discutidos nesta seção.

Para a análise da resiliência da rede, foram simuladas 12 situações: a primeira quando a rede estiver com todos os seus trechos intactos e as demais quando a rede estiver, respectivamente, com o trecho T3, T9, T10, T11, T14, T26, T33, T48, T50, T51 e T52 avariado (ver Apêndice B).

A escolha dos trechos a serem quebrados para simulação foi condicionada à faixa de pressão na rede sem avarias e à proximidade do reservatório. Na Figura 28 é apresentado as pressões nas situações sem rompimento, rompimento do trecho T3, rompimento do trecho T9 e rompimento do trecho T10.

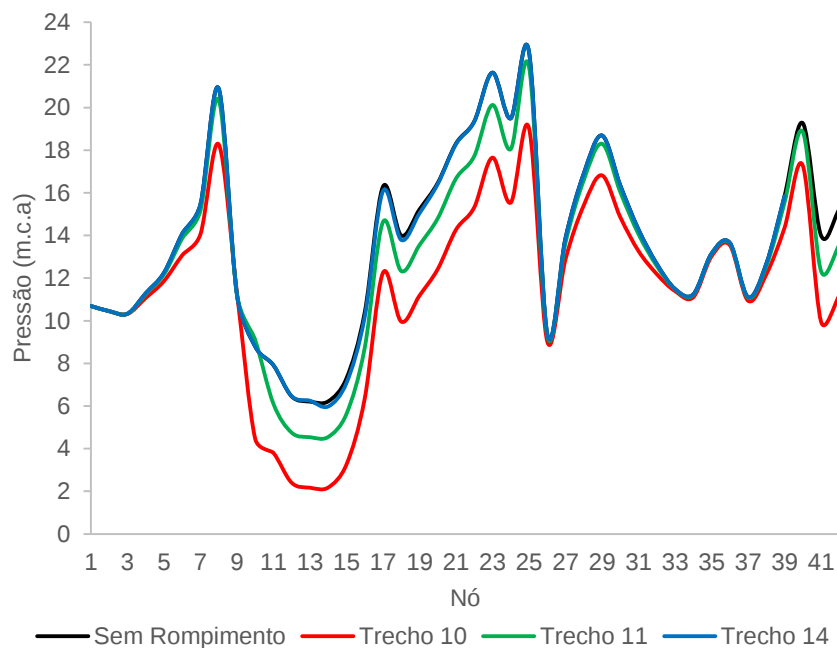
Figura 28 – Pressões para situações de rompimento de trechos T3, T9 e T10

Fonte: A autora (2019)

Quando o trecho T3 está fora de operação, toda a rede permanece funcionando sem interrupções e com pressão superior a 6 mca. Quando o trecho T9 está avariado, há uma grande queda de pressão, porém 85,7% dos pontos de consumo assumem pressão superior a 4 mca, onde 78,6% dos nós respeitarão a pressão mínima requerida. Nota-se que existirão dois nós onde a pressão será negativa (nós 13 e 14) ou seja, apenas nestes nós não haverá abastecimento.

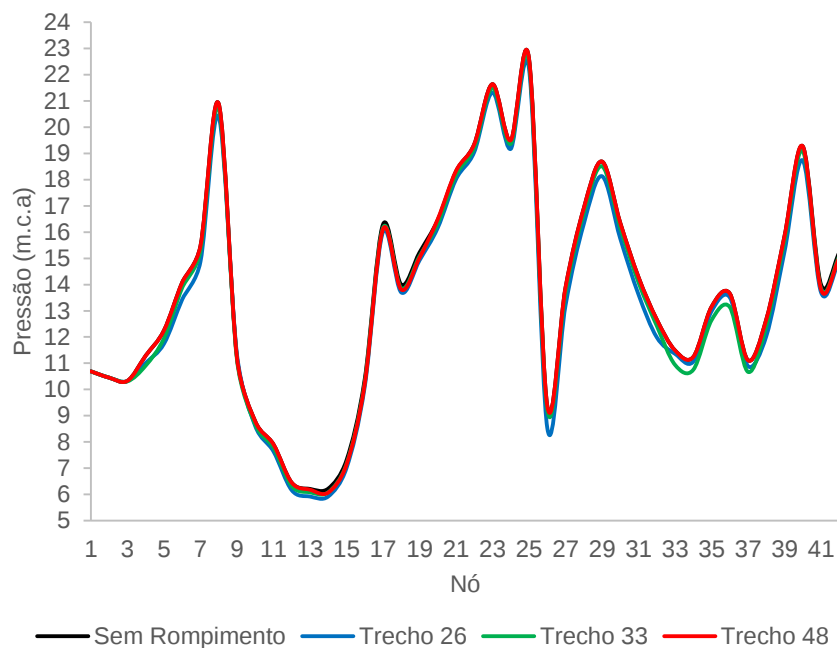
Ao analisar o trecho T10, nota-se que 85,7% dos nós permanece respeitando a pressão dinâmica mínima de 6 mca requerida pela Companhia Pernambucana de Saneamento, onde 92,7% assume pressão superior a 3 mca quando o trecho quebra. Na Figura 29 são apresentadas as situações de falha para os trechos T10, T11 e T14.

Figura 29 – Pressões para situações de rompimento de trechos T10, T11 e T14



Fonte: A autora (2019)

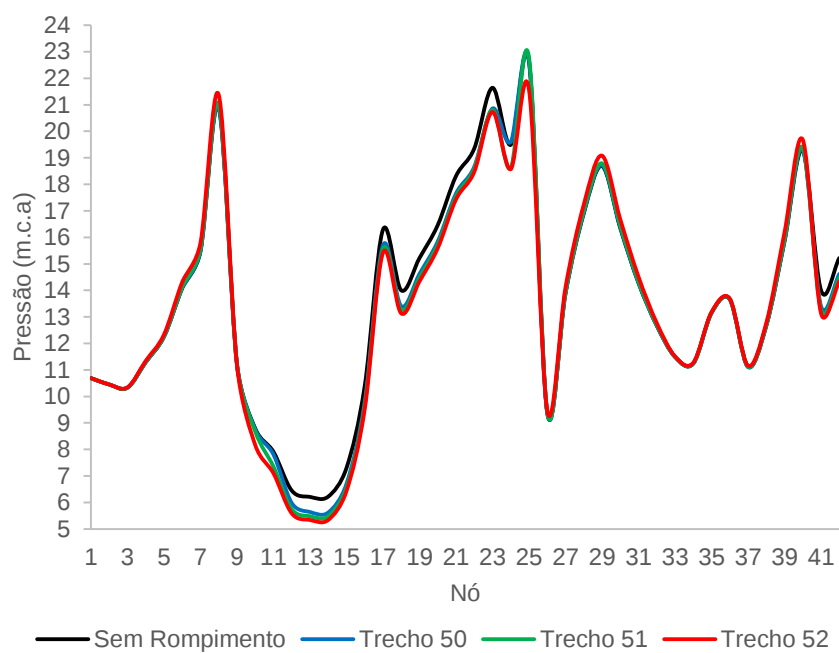
Ao analisar a Figura 29, percebe-se que a falha do trecho T14 pouco interfere na carga hidráulica dos nós, o que demonstra a capacidade de adaptação da rede. Quando o trecho T11 está fora de operação, toda a rede permanece funcionando sem interrupções com 90,5% dos trechos assumindo pressão superior a 6 mca e todos com carga energética maior que 4,5 mca. Na Figura 30 são mostradas as situações de falha para os trechos T26, T33 e T48.

Figura 30 – Pressões para situações de rompimento de trechos T26, T33 e T48

Fonte: A autora (2019)

Nos resultados obtidos para a simulação de ruptura dos trechos T26, T33 e T48, é notável que a variação de pressão ocorrida na rede devido à mudança de percurso da água para chegar aos nós pouco interfere no abastecimento, pois nos trechos T33 e T48 a rede permaneceu funcionando sem interrupções respeitando os limites de pressão e, no Trecho T26, todos os trechos assumiram pressão superior a 5,92 mca.

Situação semelhante ocorre com a simulação de falha dos trechos T50, T51 e T52, trechos de maior pressão na rede, onde as variações de pressão são desprezíveis e todos os nós da rede assumiram pressões acima do limite inferior de 6 mca. A Figura 31 apresenta a situação sem avarias com as simulações de ruptura destes trechos.

Figura 31 – Pressões para situações de rompimento de trechos T50, T51 e T52

Fonte: A autora (2019)

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Por meio dos resultados obtidos, conclui-se que todos os métodos de dimensionamento analisados apresentaram soluções satisfatórias para o dimensionamento de redes de distribuição de água, no entanto demonstraram também que não é possível alcançar a condição de velocidade mínima exigida pela NBR 12218/2017 para todos os trechos quando a vazão de projeto é muito pequena.

O Excel, em comparação com o EPANET, é muito menos prático na etapa de simulação de redes de distribuição de água além de possuir limitações de restrições e variáveis no suplemento *Solver* que impediu a otimização da rede malhada por meio de planilhas. Apesar do entrave, o recurso se mostrou eficiente quando aplicado a redes ramificadas gerando custos de implantação muito próximos aos obtidos no EPANET para a rede existente.

Observou-se no dimensionamento da rede ramificada no Excel que nem sempre o processo de otimização resulta na solução mais econômica, pois o traçado da rede, ou até mesmo as condições de simulação impostas, podem levar o simulador a convergir para soluções de custo ótimo local não sendo a solução mais econômica.

Um problema no funcionamento do LENHSNET durante o dimensionamento ótimo da rede malhada foi observado ao avaliar a perda de carga. O método citado não permite limitar a perda de carga do sistema para o valor admitido pela Companhia Pernambucana de Saneamento. Sendo assim, ao dimensionar a rede, notou-se que alguns trechos apresentaram perda de carga fora da tendência e muito próximos do limite de 10 m/km.

Quanto à rede alternativa, foi possível observar que, como era de se esperar para uma rede malhada, a mesma apresentou custo de implantação superior quando comparada ao traçado ramificado. Apesar de perder no desempenho econômico, a alternativa se mostrou mais confiável em razão da sua resiliência na ocorrência de falhas nos condutos que a permite se adaptar a situações adversas sem a interrupção em grande escala do abastecimento.

Por fim, conclui-se que não se deve generalizar na escolha do tipo de traçado, pois todo caso deve ser estudado de acordo com as suas particularidades e todos os prós e contras devem ser avaliados atentamente por um profissional antes de tomar qualquer decisão.

Com a finalidade de expandir os conhecimentos adquiridos neste trabalho, são apontadas algumas sugestões para trabalhos complementares:

- Comparação com outros métodos de simulação hidráulica existentes no mercado.
- Desenvolvimento de um método de dimensionamento acoplado ao EPANET capaz de limitar a perda de carga durante a otimização;
- Estudo de calibração da rede de distribuição de água existente;
- Determinação e aplicação de coeficientes de variação de consumo k_1 e k_2 diferentes dos usualmente adotados.

REFERÊNCIAS

[ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12211**: Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro, 1992, 14 p.

[ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 2017, 4 p.

[ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 07665**: Sistemas para adução e distribuição de água - Tubos de PVC 12 DEFOFO com junta elástica – Requisitos. Rio de Janeiro, 2007, 12 p.

[ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 05647 - 4**: Sistemas para adução e distribuição de água - Tubos e conexões de PVC 6,3 com junta elástica e com diâmetros nominais até DN 100 – Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2019, 15 p.

ALPEROVITS, Elyahu; SHAMIR, Uri. Projeto de sistemas ótimos de distribuição de água. **Pesquisa de recursos hídricos**, v. 13, n. 6, p. 885-900, 1977.

AMANCO. **Linha Infraestrutura**. Catálogo Técnico. Disponível em: < <http://amanco.com.br/downloads#catalogo-de-produtos>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

BRASIL. **Decreto nº. 19.644, de 13 de março de 1997**. Aprova o regulamento da Lei nº 11.186, de 22 de dezembro de 1994 e da outras providencias. Recife, 1997.

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.

BOTELHO, M. H. C.; RIBEIRO JR., G. A. **Instalações hidráulicas prediais**: usando tubos de PVC e PPR. 3ª ed. São Paulo: E. Blucher, 2010.

[CAIXA] Caixa Econômica Federal. **[Sinapi] Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Recife, Brasil, 2019. Disponível em: < <http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>> Acesso em: 27 mai. 2019.

[COMPESA] Companhia pernambucana de Saneamento. **Diretrizes Gerais para Elaboração de Projetos de Rede de Distribuição dos Sistemas de Abastecimento de Água**. Disponível em: < <https://servicos.compesa.com.br/wp->

content/uploads/2018/11/NPE-007-Projetos-de-Rede-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-Revis%C3%A3o-1.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2019.

DIUANA, F. A.; OGAWA, S. C. C. P. **Análise Comparativa dos Modelos Hidráulicos EPANET, WaterCAD e Sistema UFC para Sistemas de Abastecimento de Água – Rede de Distribuição**. 2015. p.105. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

FARINA, Giulia; CREACO, Enrico; FRANCHINI, Marco. Using EPANET for modelling water distribution systems with users along the pipes. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 31, n. 1, p. 36-50, 2014.

FURUSAWA, R. T. **Contribuição ao dimensionamento de rede de distribuição de água por critério de custo global**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GOUVEIA, R. M. M. **Modelo computacional de otimização para dimensionamento de redes de distribuição de água abastecidas por múltiplos bombeamentos**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

GOMES, Heber Pimentel; FORMIGA, Klebber Teodomiro Martins. PNL2000 – Método prático de dimensionamento econômico de redes malhadas de abastecimento de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 1-108, 2001.

GOMES, Daniel Mescoito et al. A importância da distribuição de vazão nos nós na simulação hidráulica utilizando o software EPANET. **VI SEREA-Seminário Iberoamericano sobre sistemas de Abastecimento urbano de água**, João Pessoa. VI SEREA, 2006.

GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes Elevatórias**. 3ª Ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2009.

GOULTER, Ian. Analytical and Simulation Models for Reliability Analysis in Water Distribution Systems. **Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems**, vol 14, p. 235-266, 1995.

HELLER, L.; DE PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. – 2ª ed. rev. e atual. – Belo Horizonte: UFMG, v. 2, 2010.

[IBGE] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sinopse por Setores**. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/?nivel=st>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

KARMELI, David; GADISH, Yoram; MEYERS, Selwyn. Design of optimal water distribution networks. **Journal of the Pipeline Division**, v. 94, n. 1, p. 1-10, 1968.

LEAL, A. F. **Estudo comparativo de métodos de otimização de redes malhadas pressurizadas**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995, 141p.

LOPES, A. V. **Otimização do Dimensionamento e Análise de Confiabilidade de Redes de Distribuição de Água**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2002, 148p.

MASCARÓ, J. L. **Custos de infraestrutura: um ponto de partida para o desenho económico urbano**. 1979. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979.

MORGAN, David Rhys; GOULTER, Ian C. Optimal urban water distribution design. **Water Resources Research**, v. 21, n. 5, p. 642-652, 1985.

MOTIEE, Homayoun; MCBEAN, Edward; MOTIEI, Alireza. Estimating physical unaccounted for water (UFW) in distribution networks using simulation models and GIS. **Urban Water Journal**, v. 4, n. 1, p. 43-52, 2007.

NETTO, J. M. A.; Y FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de hidráulica**. 9ª ed. São Paulo: Blucher, 2018. 632 p.

OKUMURA, D. B.; RAMÍREZ, L. R. L. **Estudo de Concepção da Rede de Abastecimento de Água para a Vila Joaniza/Ilha do Governador**. 2012. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PERNAMBUCO. Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco. **Tabelas da Tarifa de Seguro de Incêndio do Brasil**. Disponível em: <<http://www.bombeiros.pe.gov.br/web/cbmpe/coscip>>. Acesso em: 05 jun. 2019.

PINNTTO, M. R. et al. Dimensionamento econômico otimizado de redes de distribuição de água considerando custos de manutenção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 145-153, 2017.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4ª ed. São Carlos: EESC – USP, 2006.

REGIS, P. O. A. **Um modelo de programação matemática para o ensino do dimensionamento de redes de distribuição de água**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

RICCALDONE, D. **Comparação de dimensionamento de redes de distribuição de água por modelos computacionais**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

ROSSMAN, Lewis A. EPANET 2 Manual de usuario. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2001.

SCHAAKE, John C.; LAI, Fu Hsiung. **Linear programming and dynamic programming application to water distribution network design**. MIT Hydrodynamics Laboratory, 1969.

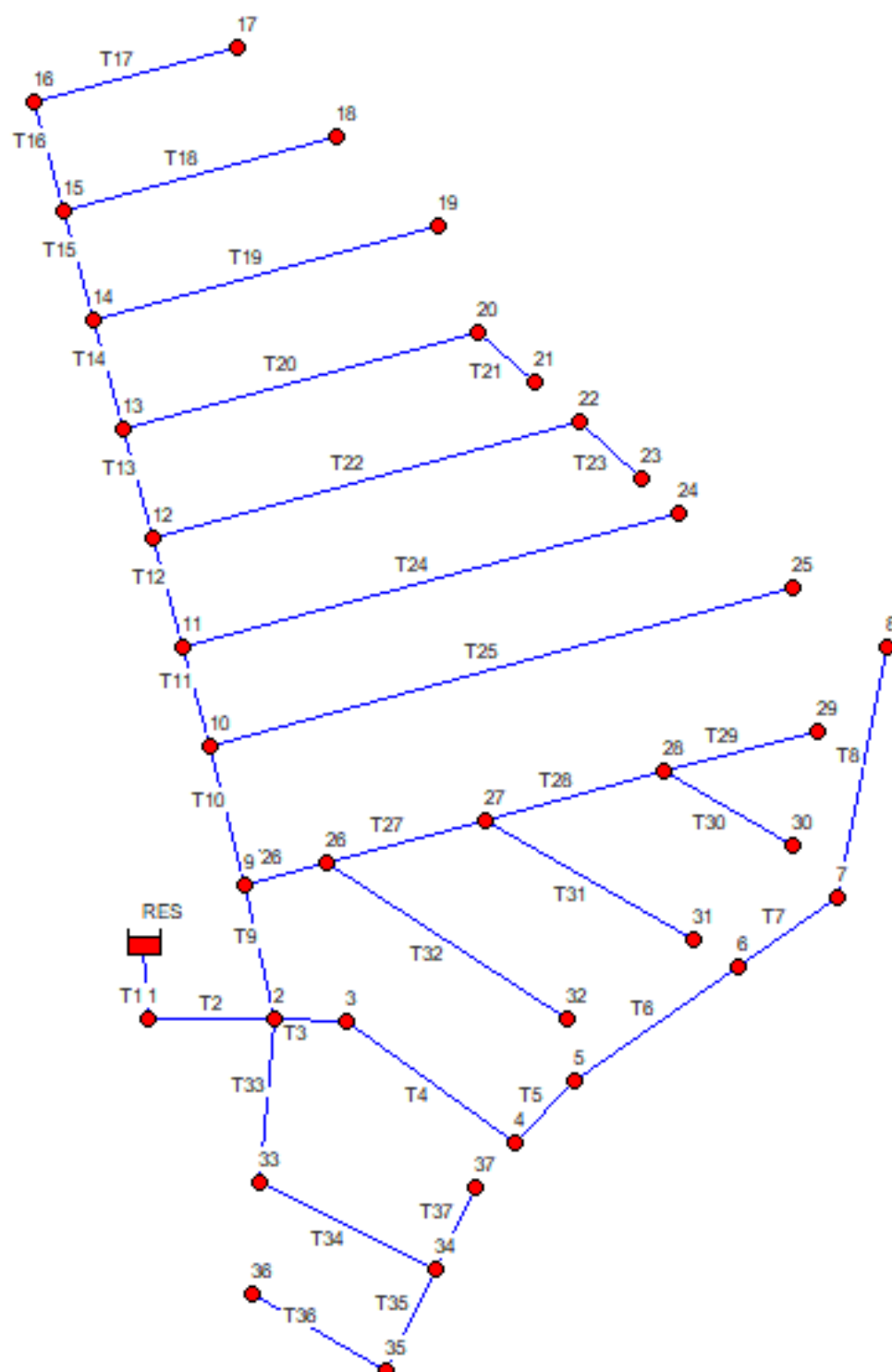
SHAMIR, U. Optimal design and operation of water distribution systems. **Water resources research**, v. 10, n. 1, p. 27-36, 1974.

TIGRE S/A – Tubos e Conexões. **Infraestrutura Água**. Catálogo Técnico. Disponível em: <<https://www.tigre.com.br/catalogos-tecnicos>>. Acesso em: 27 abr. 2019.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

VENTURINI, M. A. A. G. **Contribuição ao estudo de otimização de redes hidráulicas através de um modelo de programação linear**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 1997.

APÊNDICE A – TRAÇADO BASE DA REDE RAMIFICADA



APÊNDICE B – TRAÇADO BASE DA REDE MALHADA

