



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Diego Riccaldone

Comparação de dimensionamento de redes de distribuição de água por modelos computacionais

Ouro Preto
2016

Diego Riccaldone

**Comparação de dimensionamento de redes de distribuição de água por
modelos computacionais**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Ferraz de Mello

Ouro Preto

2016

R489c Riccaldone, Diego.
Comparação de dimensionamento de redes de distribuição de água por
modelos computacionais [manuscrito] / Diego Riccaldone . - 2016.
147f.: il.: color; graf; tabs.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Mello.
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Civil.
1. Engenharia civil. 2. Hidráulica . 3. Água - distribuição . 4. Computação -
Modelos matemáticos. 5. Água - Consumo. I. Mello, Carlos Eduardo . II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Diego Riccaldone

**Comparação de dimensionamento de redes de distribuição de água por
modelos computacionais**

Monografia de conclusão de curso para
obtenção do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto,
defendida e aprovada em 22 de julho de
2016, pela banca examinadora constituída
pelos professores:

BANCA EXAMINADORA



Prof. Carlos Eduardo Ferraz de Mello



Prof. Antenor Rodrigues Barbosa Junior



Prof. Gilberto Queiroz da Silva

AGRADECIMENTOS

- Aos meus familiares, amigos, professores do DECIV e a todos aqueles que participaram de forma direta ou indireta da minha caminhada.
- Ao professor Carlos Eduardo Ferraz de Mello pela orientação e disponibilidade.
- À Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino de qualidade e à Fundação Gorceix pela viabilização de recursos que ajudaram na minha formação acadêmica.
- À república Tigrada pelos anos de amizade e companheirismo.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma comparação de modelos computacionais para o dimensionamento de redes de distribuição de água. Os altos custos envolvidos nas redes de distribuição de água, principalmente no que diz respeito aos projetos, construção e operação das mesmas, refletem a importância de se estudar meios de minimizar o desperdício de água. A meta a ser alcançada é o dimensionamento otimizado de redes, com ênfase na eficiência hidráulica e econômica, minimizando os custos do sistema. A metodologia aqui proposta para o dimensionamento considerou o custo com a implantação das tubulações e valores de pressões adequadas, com a consequente diminuição das perdas de energia do sistema. A fim de alcançar tais objetivos, foram estudados quatro modelos computacionais: RedemWeb, Epanet, Lenhsnet e UFC-4. Realizaram-se estudos de casos com duas redes de distribuição de água: rede Setor Secundário e rede Bonito de Minas. Os resultados alcançados pelo Lenhsnet demonstraram dimensionamentos adequados para a operação das redes, apesar de apresentarem, em alguns trechos, altas perdas de carga. Já com o UFC-4, onde se pode limitar a perda de carga, o dimensionamento não foi possível por problemas técnicos de aplicação do programa computacional. O RedemWeb e o Epanet também apresentaram resultados de dimensionamentos adequados, porém não possibilitaram a otimização dos resultados e, portanto, apresentaram maiores gastos com as tubulações.

Palavras-chave: Rede de distribuição de água. Modelo Computacional. Otimização.

ABSTRACT

This work presents a comparison of computational models for designing water distribution networks. The high costs involved in water distribution networks, especially as regards projects and operation thereof, reflect the importance of studying ways to minimize water waste. The goal to be achieved is the optimized dimensioning of networks, with an emphasis on the hydraulic efficiency and minimizing the economic costs of the system. The methodology proposed here for dimensioning considered the cost with the implantation of pipes, and appropriate pressure values, with the consequent reduction of energy losses from the system. In order to achieve these goals, four computational model shave been studied: RedemWeb, Epanet, Lenhsnet and UFC-4. Case studies were conducted with two water distribution networks: Setor Secundário and Bonito de Minas. The results achieved by the Lenhsnet demonstrated adequate dimensioning for the operation of the networks, despite performing in some stretches high-energy losses. The UFC-4, where you can limit the loss of energy, did not provide results, due to technical problems occurred in use of the program. The RedemWeb and the Epanet also presented appropriate dimensioning, but not allow the optimization of the results and, therefore, presented greater spending on pipes.

Keywords: Water distribution network. Computational model. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Partes constituintes de um sistema de abastecimento de água..... | 20 |
| Figura 2: Captação de água..... | 20 |
| Figura 3: Estação elevatória de água bruta..... | 21 |
| Figura 4: Adutora de água..... | 21 |
| Figura 5: Estação de tratamento..... | 22 |
| Figura 6: Reservatório de água..... | 22 |
| Figura 7: Assentamento da tubulação da rede de distribuição de água..... | 23 |
| Figura 8: Tubulação de pvc..... | 24 |
| Figura 9: Tubulação de ferro fundido..... | 25 |
| Figura 10: Esquema de uma rede ramificada..... | 26 |
| Figura 11: Esquema de uma rede malhada com quatro anéis ou malhas..... | 27 |
| Figura 12: Rede mista..... | 28 |
| Figura 13: Esquema da equação de bernoulli representando a linha de energia e linha piezométrica em escoamento permanente..... | 31 |
| Figura 14: Equilíbrio de forças no escoamento permanente..... | 33 |
| Figura 15: Ábaco de moody..... | 38 |
| Figura 16: Bombas hidráulicas..... | 43 |
| Figura 17: Válvula redutora de pressão..... | 44 |
| Figura 18: Convenções utilizadas para as equações fundamentais..... | 50 |
| Figura 19: Dados de entrada do programa RedemWeb..... | 56 |
| Figura 20: Visualização dos resultados do programa RedemWeb..... | 56 |
| Figura 21: Relatório de advertência de pressão negativa..... | 58 |
| Figura 22: Visualização do autocad com os ícones do módulo UFC2..... | 63 |
| Figura 23: Visualização do autocad com os ícones do módulo UFC2..... | 63 |

| | |
|---|-----|
| Figura 24: Visualização do autocad com os ícones das propriedades | 64 |
| Figura 25: Comandos do UFC-3 | 64 |
| Figura 26: Tabela de nós e trechos | 65 |
| Figura 27: Planilha de quantitativos | 65 |
| Figura 28: Exemplo de um reservatório | 66 |
| Figura 29: Dados de entrada de um reservatório | 67 |
| Figura 30: Dados de entrada de um reservatório | 67 |
| Figura 31: Layout UFC-4 dos dados de entrada de restrição..... | 68 |
| Figura 32: Resultados pelo otimização por algoritmo genérico | 69 |
| Figura 33: Gráfico de custo mínimo por geração | 70 |
| Figura 34: Layout Lenhsnet..... | 61 |
| Figura 35: Dados do projeto | 61 |
| Figura 36: Dados dos tubos | 62 |
| Figura 37: Resultados do relatório | 62 |
| Figura 38: Representação da rede Setor Secundário | 72 |
| Figura 39: Representação da rede Bonito de Minas | 74 |
| Figura 40: Resultados dos parâmetros hidráulicas dos nós e trechos | 79 |
| Figura 41: Layout dos dados de entrada e resultado de um nó | 92 |
| Figura 42: Layout dos dados de entrada e resultado de um trecho | 93 |
| Figura 43: Relatório hidráulico da rede Setor Secundário pelo Epanet..... | 98 |
| Figura 44: Relatório hidráulico da rede Bonito de Minas pelo Epanet..... | 103 |
| Figura 45: Dados de projeto do Lenhsnet | 105 |
| Figura 46: Relatório hidráulico da rede Setor Secundário pelo Lenhsnet | 109 |
| Figura 47: Relatório hidráulico da rede Setor Secundário pelo Lenhsnet | 114 |
| Figura 48: Gráfico de comparação dos resultados das pressões em cada nó aplicado por cada programa da rede Setor Secundário | 116 |

| | |
|--|-----|
| Figura 49: Gráfico de comparação dos resultados das perdas de carga em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário | 120 |
| Figura 50: Gráfico de comparação dos resultados dos diâmetros em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário | 122 |
| Figura 51: Gráfico de comparação dos resultados das velocidades em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário | 124 |
| Figura 52: Gráfico de comparação dos resultados das vazões em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário | 126 |
| Figura 53: Gráfico de comparação dos resultados das pressões em cada nó aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas | 129 |
| Figura 54: Gráfico de comparação dos resultados das perdas de carga em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas | 134 |
| Figura 55: Gráfico de comparação dos resultados dos diâmetros em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas | 137 |
| Figura 56: Gráfico de comparação dos resultados das velocidades em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas | 140 |
| Figura 57: Gráfico de comparação dos resultados das vazões em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas | 143 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Coeficiente de rugosidade absoluta equivalente | 37 |
| Tabela 2: Coeficiente C da fórmula de Hazen-Willians | 41 |
| Tabela 3: Velocidade e vazão máxima para cada diâmetro | 45 |
| Tabela 4: Elementos necessários para o cálculo de uma rede ramificada..... | 48 |
| Tabela 5: Descrição da rede do Setor Secundário..... | 71 |
| Tabela 6: Descrição da rede Bonito de Minas | 73 |
| Tabela 7: Descrição do cálculo da rede Setor Secundário no RedemWeb..... | 76 |
| Tabela 8: Dados dos nós da rede Setor Secundário..... | 76 |
| Tabela 9: Dados dos parâmetros hidráulicos dos trechos da rede Setor Secundário | 77 |
| Tabela 10: Sentido de cada trecho em cada anel da rede Setor Secundário | 78 |
| Tabela 11: Resultados dos parâmetros hidráulicos dos trechos da rede Setor Secundário pelo RedemWeb..... | 80 |
| Tabela 12: Resultados dos parâmetros hidráulicos dos nós da rede Setor Secundário pelo RedemWeb..... | 81 |
| Tabela 13: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Setor Secundário pelo RedemWeb..... | 82 |
| Tabela 14: Dados dos tubos..... | 82 |
| Tabela 15: Descrição do cálculo da rede Bonito de Minas no RedemWeb..... | 83 |
| Tabela 16: Dados dos nós da rede Bonito de Minas pelo RedemWeb | 83 |
| Tabela 17: Dados dos trechos da rede Bonito de Minas pelo RedemWeb | 85 |
| Tabela 18: Resultado dos parâmetros hidráulicos dos trechos da rede Bonito de Minas pelo RedemWeb | 87 |
| Tabela 19: Resultados dos parâmetros hidráulicos dos nós da rede Bonito de Minas pelo RedemWeb..... | 89 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 20: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Bonito de Minas pelo RedemWeb..... | 91 |
| Tabela 21: Dados e resultados dos parâmetros hidráulicos dos nós da rede Setor Secundários pelo Epanet | 94 |
| Tabela 22: Dados dos parâmetros hidráulicos dos trechos da rede Setor Secundário pelo Epanet | 95 |
| Tabela 23: Resultados dos parâmetros hidráulicos da rede Setor Secundário pelo Epanet..... | 96 |
| Tabela 24: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Setor Secundário pelo Epanet..... | 97 |
| Tabela 25: Dados e resultados dos parâmetros hidráulicos nos nós da rede Bonito de Minas pelo Epanet..... | 99 |
| Tabela 26: Dados e resultados dos parâmetros hidráulicos nos trechos da rede Bonito de Minas pelo Epanet..... | 100 |
| Tabela 27: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Bonito de Minas pelo Epanet | 103 |
| Tabela 28: Dados dos nós e resultados dos parâmetros hidráulicos nos nós da rede Setor Secundário de minas pelo Lenhsnet..... | 106 |
| Tabela 29: Características e resultados dos parâmetros hidráulico dos trechos da rede Setor Secundário pelo Lenhsnet | 107 |
| Tabela 30: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Setor Secundário pelo Lenhsnet..... | 108 |
| Tabela 31: Dados e resultados dos parâmetros hidráulicos dos nós da rede Bonito de Minas pelo Lenhsnet | 109 |
| Tabela 32: Dados e resultados dos parâmetros hidráulicos dos trechos da rede Bonito de Minas pelo Lenhsnet | 111 |
| Tabela 33: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Bonito de Minas pelo Lenhsnet..... | 114 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 34: Tabela de comparação dos resultados das pressões em cada nó aplicado por cada programa da rede Setor Secundário | 115 |
| Tabela 35: Cota do reservatório da rede Setor Secundário aplicado em cada programa..... | 116 |
| Tabela 36: Custo das tubulações da rede Setor Secundário aplicado em cada programa..... | 117 |
| Tabela 37: Tabela de comparação dos resultados das perdas de carga em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário | 118 |
| Tabela 38: Tabela de comparação dos resultados dos diâmetros em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário | 120 |
| Tabela 39: Tabela de comparação dos resultados das velocidades em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário | 122 |
| Tabela 40: Tabela de comparação dos resultados das vazões em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário | 124 |
| Tabela 41: Tabela de comparação dos resultados das pressões em cada nó aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas | 127 |
| Tabela 42: Cota do reservatório da rede Bonito de Minas aplicado em cada programa..... | 129 |
| Tabela 43: Custo das tubulações da rede Bonito de Minas aplicado em cada programa..... | 130 |
| Tabela 44: Tabela de comparação dos resultados das perdas de carga em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas | 130 |
| Tabela 45: Tabela de comparação dos resultados dos diâmetros em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas | 134 |
| Tabela 46: Tabela de comparação dos resultados das velocidades em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas | 137 |
| Tabela 47: Tabela de comparação dos resultados das vazões em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas | 140 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 - INTRODUÇÃO | 16 |
| 2 - OBJETIVOS | 18 |
| 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 19 |
| 3.1 Redes de Distribuição de Água..... | 19 |
| 3.2 Partes Constituintes de um Sistema de Abastecimento de Água | 19 |
| 3.3 Conduitos hidráulicos..... | 23 |
| 3.4 Principais materiais usados nas tubulações de redes de água..... | 24 |
| 3.5 Tipos de Rede e seus componentes..... | 25 |
| 3.5.1 Rede Ramificada | 26 |
| 3.5.2 Rede Malhada | 27 |
| 3.5.3 Rede Mista..... | 27 |
| 3.6 Características do Escoamento | 28 |
| 3.7 Equações fundamentais do escoamento | 29 |
| 3.7.1 Equação da continuidade | 29 |
| 3.7.2 Equação de Bernoulli..... | 30 |
| 3.7.3 Tensão de cisalhamento na parede das tubulações..... | 32 |
| 3.7.4 Equações da Perda de Carga..... | 34 |
| 3.7.4.1 Equação de Darcy-Weissbach | 34 |
| 3.7.4.2 Equação de Hazen-Willians..... | 40 |
| 3.8 Condições do Projeto..... | 42 |
| 3.8.1 Pressões mínimas e máximas na rede | 42 |
| 3.8.2 Velocidades mínimas e máximas na rede | 44 |
| 3.8.3 Diâmetro mínimo | 45 |
| 3.8.4 Perda de carga | 46 |
| 3.9 Dimensionamentos de redes de abastecimento de água | 46 |
| 3.9.1 Vazão de adução e distribuição | 46 |
| 3.9.2 Redes ramificadas | 48 |
| 3.9.3 Redes malhadas..... | 49 |
| 3.10 Análises hidráulicas de rede de abastecimento | 53 |
| 3.11 Programas utilizados..... | 54 |
| 3.11.1 RedemWeb..... | 54 |
| 3.11.2 Epanet | 57 |
| 3.11.2.1 Capacidades de modelagem hidráulica utilizando o Epanet | 58 |

| | |
|--|-----|
| 3.11.2.2 Etapas a seguir na utilização do Epanet..... | 59 |
| 3.11.3 Lenhsnet..... | 60 |
| 3.11.4 UFC..... | 62 |
| 3.11.4.1 Critério de limite para a perda de carga unitária..... | 68 |
| 3.11.4.2 Critério de Verificação da precisão do Dimensionamento Econômico | 70 |
| 4 – METODOLOGIA E RESULTADOS..... | 71 |
| 4.1 Rede Setor Secundário..... | 71 |
| 4.2 Rede Bonito de Minas..... | 73 |
| 4.3 Simulação pelo RedemWeb..... | 74 |
| 4.3.1 Rede Setor Secundário..... | 76 |
| 4.3.2 Rede Bonito de Minas..... | 83 |
| 4.4 Simulação pelo Epanet..... | 91 |
| 4.4.1 Rede Setor Secundário..... | 91 |
| 4.4.2 Rede Bonito de Minas..... | 98 |
| 4.5 Simulação pelo Lenhsnet..... | 104 |
| 4.5.1 Rede Setor Secundário..... | 105 |
| 4.5.2 Rede Bonito de Minas..... | 109 |
| 4.6 Simulação pelo UFC-4..... | 114 |
| 4.7 Comparações dos resultados..... | 115 |
| 4.7.1 Rede Setor Secundário..... | 115 |
| 4.7.2 Rede Bonito de Minas..... | 127 |
| 5 – CONCLUSÕES..... | 144 |
| 6 – RECOMENDAÇÕES..... | 145 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 146 |

1 - INTRODUÇÃO

Um sistema de abastecimento de água (SAA) é constituído por uma sequência de etapas que envolvem a captação da água bruta, que através de uma tubulação (adutora) é conduzida até uma ETA (Estação de Tratamento de Água) para que possa ser tratada. Na estação de tratamento, ela passa por vários processos físicos e químicos, no qual a água bruta se torna potável para que possa ser distribuída à população. Dentro desse sistema encontra-se: acessórios, bombas, tubulações, estações de tratamento, estações elevatórias, válvulas e demais instalações destinadas ao abastecimento de água. Ao longo de sua distribuição, vários fatores devem ser atendidos, como a pressão mínima e máxima da rede, velocidade mínima e máxima, perda de carga máxima por trecho, além de uma qualidade mínima de aceitação.

Depois de tratada, a água é conduzida até um reservatório, e inserida na rede de distribuição para abastecimento de residências, indústrias e comércio. O sistema de distribuição de água é composto por tubulações e órgãos acessórios que têm por finalidade fornecer, em regime contínuo, água potável em quantidade, qualidade e pressão adequadas a múltiplos consumidores. Esse sistema de distribuição é de extrema importância para o desenvolvimento das populações em termos sociais e econômicos, além de garantir um melhor nível de saúde à sociedade e uma melhor qualidade de vida.

Para que haja uma redução das perdas hídricas é necessário que a pressão esteja dentro dos padrões de uma rede de distribuição de água. Isso é fundamental para a redução de vazamentos, e é um fenômeno conhecido há muito tempo pelas companhias de saneamento e distribuição de água. Segundo relatório do Sistema Nacional de Informações de Saneamento - SNIS (2014), no Brasil há uma perda média de água na distribuição de 36,7%. A rede de distribuição é o componente de maior custo do sistema de abastecimento de água, algo em torno de 50 a 75% do custo total. Logo, o dimensionamento de forma correta, dentro das condições impostas pelas normas, fará com que as redes funcionem de forma adequada, gerando menores gastos com a manutenção no futuro.

Existem vários softwares hoje que realizam o dimensionamento de redes de distribuição de água, de forma otimizada ou não e, conseqüentemente, com menores gastos. Entre os existentes, destaca-se: o RedemWeb, o Epanet, o Lenhsnet e o UFC-4, tendo sido os softwares utilizados. A partir de dados da rede, tais como, demandas e cotas topográficas dos nós, nível dos reservatórios, comprimentos e rugosidades das tubulações, pôde-se determinar nos nós: as cotas piezométricas e pressões; e nos trechos: os diâmetros, velocidades, vazões e perdas de carga.

2 - OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é obter um dimensionamento otimizado de redes, com ênfase na eficiência econômica e hidráulica, usando os softwares RedemWeb, Epanet, Lenhsnet e UFC-4.

A solução ótima a ser obtida pelo dimensionamento proposto é a que minimiza o custo de investimento (implantação das tubulações) e maximiza a eficiência hidráulica da rede.

Dentre os objetivos, também está a comparação dos resultados dos softwares aplicados e poder definir qual o melhor projeto a ser aplicado e o custo de cada um deles.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Redes de Distribuição de Água

Segundo Porto (2006), um sistema de distribuição de água é o conjunto de tubulações, acessórios, reservatórios, bombas, válvulas, etc., que tem a finalidade de atender, dentro de condições sanitárias de vazão e pressão convenientes, cada um dos diversos pontos de consumo de uma cidade ou setor de abastecimento.

O abastecimento de água, desde os reservatórios de distribuição até os pontos de consumo da cidade (ligações domiciliares, hidrantes, chafarizes, dentre outros), realiza-se através de uma ou várias redes de distribuição, com a finalidade de garantir vários objetivos, distinguindo-se dois grandes grupos (BARBOSA et al., 1999):

- Objetivos técnicos ligados ao desempenho hidráulico, tais como a garantia das pressões mínimas e máximas, a garantia de água suficiente para seus variados destinos, confiabilidade operacional, etc.;
- Objetivos econômicos traduzidos pela minimização dos custos associados aos componentes do sistema e aos custos operacionais.

3.2 Partes Constituintes de um Sistema de Abastecimento de Água

O sistema de abastecimento de água compõe-se, geralmente, das seguintes partes: captação, recalque ou sistema de elevação, adução, estação de tratamento de água, reservatório e rede de distribuição (Figura 1).

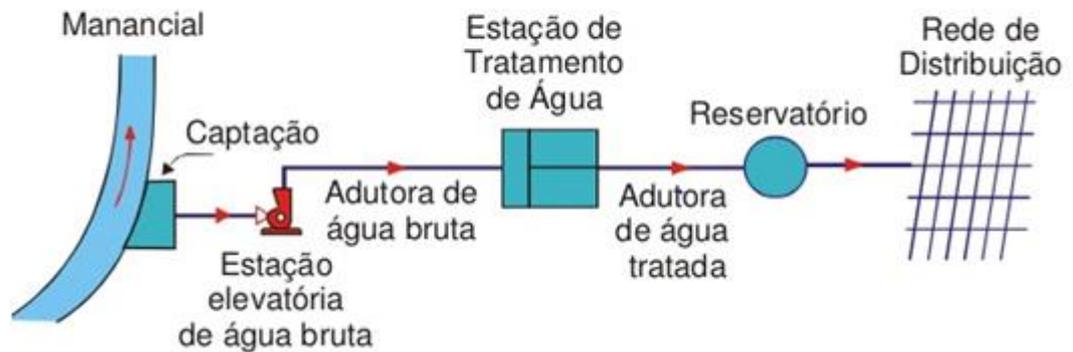


Figura 1: Partes constituintes de um sistema de abastecimento de água
 Fonte: <http://pt.slideshare.net/mackenzista2/aula-captao-adutorasrev>

- Captação: Estrutura para a retirada da água junto ao manancial (fonte de onde se retira a água) destinada ao sistema de abastecimento (Figura 2).
- Estação elevatória ou de recalque: Sistema para elevação da água de um ponto para o outro (Figura 3).



Figura 2: Captação de água
 Fonte: <http://www.manausambiental.com.br/galeria/manaus-ambiental>



Figura 3: Estação elevatória de água bruta
Fonte: <http://www.adp.pt/pt/?id=61&img=13&bl=2>

- Adutora: Pode ser de água bruta ou água tratada. É a tubulação para a condução da água entre as diversas unidades do sistema (Figura 4).



Figura 4: Adutora de água
Fonte: <http://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/rio-piloes#0>

- Estação de tratamento: Instalações destinadas à retirada de impurezas indesejáveis ao emprego final da água (Figura 5).



Figura 5: Estação de tratamento

Fonte: <http://www.autoracing.com.br/forum/index.php?showtopic=77220>

- Reservatório: Armazenamento de água para compensação de equilíbrio, de emergência ou acidental e de incêndio. Elemento do sistema de abastecimento de água destinado a regularizar as variações entre as vazões de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição (Figura 6).



Figura 6: Reservatório de água

Fonte: <http://www.cesan.com.br/noticias/cesan-inaugura-reservatorios-de-agua-em-vila-velha/>

- Rede de distribuição: Sistema formado por tubulações e acessórios, destinado a garantir água até o consumidor (casas, indústrias, etc.), de modo a atender as demandas exigidas (Figura 7).



Figura 7: Assentamento da tubulação da rede de distribuição de água

Fonte: <http://eunapolis.ba.gov.br/?p=1864>

3.3 Condutos hidráulicos

Os condutos hidráulicos podem se classificar, do ponto de vista da pressão de funcionamento, em:

- Condutos forçados: escoamento nos quais a pressão interna é diferente da pressão atmosférica. Nesse tipo de conduto, as seções transversais são sempre fechadas e o fluido circulante as enche completamente.
- Condutos livres: nestes, o escoamento apresenta em superfície livre, na qual atua a pressão atmosférica. A seção não necessariamente apresenta perímetro fechado e quando isto ocorre, para satisfazer a condição de superfície livre, a seção transversal funciona parcialmente cheia.

As redes de distribuição de água são considerados como escoamento em condutos forçados.

3.4 Principais materiais usados nas tubulações de redes de água

- PVC (Policloreto de Vinila) - A linha de tubos PVC (figura 8) possui a função de conduzir água potável em sistemas enterrados de adução e distribuição de água potável. Possui uma resistência inferior em relação ao tubo de ferro fundido.



Figura 8: Tubulação de PVC

Fonte: http://www.aecweb.com.br/prod/e/tubos-e-conexoes-amanco-ductilfort_9126_27474

- Ferro Fundido (figura 9) - Maior resistência em comparação aos tubos de PVC para redes de água. Foi desenvolvido com a função de conduzir água. É aplicado na execução do sistema de adução (água bruta e água tratada) e distribuição em sistemas enterrados de abastecimento de água.



Figura 9: Tubulação de ferro fundido

Fonte: <http://www.rfcomercial.com.br/produtos/linha-saneamento-tubos-de-ferro-fundido/>

3.5 Tipos de Rede e seus componentes

De modo geral, qualquer que seja o desenho da rede de distribuição de água, pode-se dizer que ela é constituída por dois tipos de canalizações: a principal e a secundária.

- Principal: são as tubulações de maior diâmetro que tem por finalidade abastecer as canalizações secundárias da rede.
- Secundária: são as tubulações de menor diâmetro que tem por finalidade abastecer diretamente os pontos de consumo do sistema de abastecimento de água.

De acordo com a disposição das canalizações principais e o sentido do escoamento nas canalizações secundárias, as redes são classificadas como rede ramificada, malhada ou mista.

3.5.1 Rede Ramificada

A rede é classificada como ramificada (figura 10) quando o abastecimento se faz a partir de uma tubulação alimentada por um reservatório de montante ou mesmo sob pressão de bombeamento, sendo que a distribuição da água é feita diretamente para os condutos secundários e o sentido da vazão em qualquer trecho é conhecido. (PORTO, 2006).

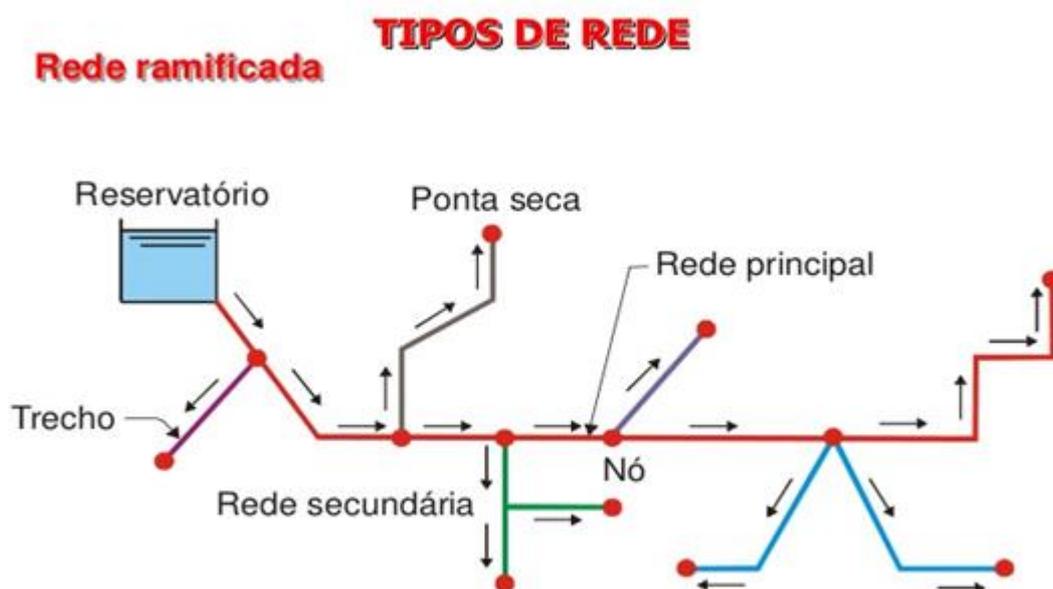


Figura 10: Esquema de uma rede ramificada
Fonte: Tsutiya (2004).

Conforme a Figura 10, os pontos de derivação de vazão e/ou de mudança de diâmetros são chamados de nós e a tubulação entre dois nós é chamada de trecho. O sentido do escoamento se dá da tubulação tronco ou principal para as tubulações secundárias, até as extremidades mortas ou secas.

Em uma rede ramificada, se acontecer algum problema que interrompa o escoamento em uma tubulação, isso compromete todo o abastecimento nas tubulações situadas a jusante da mesma. Logo, a escolha de uma rede ramificada para um projeto deve ser feita apenas em casos em que a topografia e os pontos a serem abastecidos não permitam o traçado como rede malhada.

3.5.2 Rede Malhada

As redes malhadas são constituídas por tubulações principais ou troncos que formam anéis ou malhas, de maneira que há possibilidade de reversibilidade no sentido das vazões. A vantagem dessa rede em relação à rede ramificada é justamente o fato do abastecimento poder ocorrer por outro caminho. Com esse traçado, pode-se realizar as manutenções da rede com o mínimo de interrupção no fornecimento de água (Figura 11).

Rede Malhada em Anel

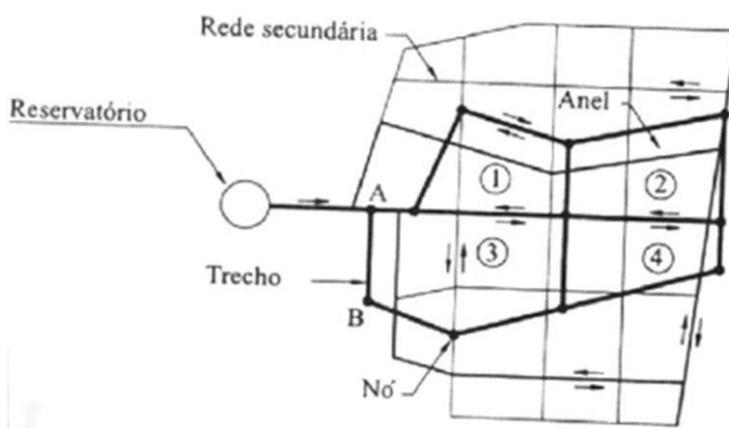


Figura 11: Esquema de uma rede malhada com quatro anéis ou malhas
Fonte: Porto (2006), página 170.

3.5.3 Rede Mista

Redes mistas correspondem à conjunção, numa mesma rede de distribuição de água, das duas configurações anteriores (Figura 12).

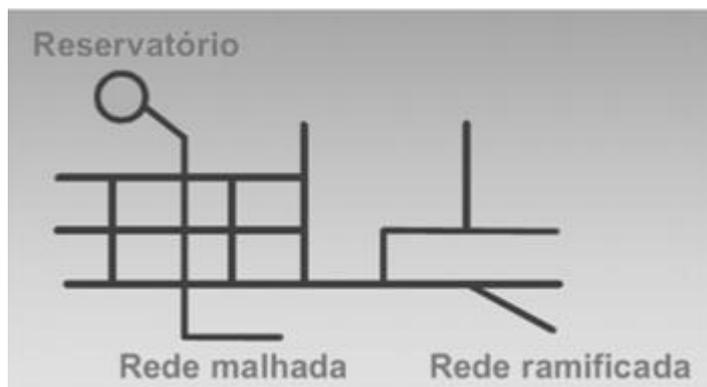


Figura 12: Rede mista
Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/1317351/>

3.6 Características do Escoamento

Quanto à variação no tempo, os escoamentos se classificam em permanentes e transitórios. Na rede de distribuição de água, o escoamento na rede é transitório, pois as vazões variam, mas em um trecho específico eles são permanentes, pois a vazão é a mesma. No regime permanente, não há variação das características do escoamento com relação ao tempo, ou seja, a velocidade, a vazão, a pressão, dentre outras não variam com o tempo. Já no caso dos transitórios temos a variação dessas grandezas com o tempo.

Quanto à posição, o escoamento pode ser uniforme ou variado (não uniforme). No caso das redes de distribuição, ele é variado, em decorrência da variação dos diâmetros, da velocidade e da vazão. Mas em um trecho específico eles são permanentes, pois a sua velocidade média e a vazão permanecem a mesma. No escoamento uniforme, a velocidade e a vazão permanecem constantes com a posição.

Quanto à trajetória das partículas, o escoamento pode ser laminar ou turbulento. Na rede de distribuição de água, o escoamento é turbulento pelo fato das partículas do líquido ter trajetórias irregulares, causando uma transferência da quantidade de movimento de uma parte a outra do fluido, formando turbilhões. No escoamento laminar, o fluido se move em camadas ou lâminas, ou seja, as camadas do fluido se movem sem perturbação, sendo que uma porção de água não se mistura com as outras.

Com relação à dimensão, classificamos os escoamentos em: unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. Os escoamentos unidimensionais são desprezíveis as variações das grandezas na direção transversal ao escoamento, tendo em vista as variações dessas mesmas grandezas ao longo do escoamento. Os escoamentos em condutos forçados são considerados unidimensionais, uma vez que as grandezas, do tipo velocidade, pressão e propriedades físicas, são expressas em termos de valores médios constantes para a seção transversal. No escoamento bidimensional admite-se que as variações das grandezas podem ser expressas em função de duas coordenadas, ou seja, as variações da velocidade, da pressão e das demais grandezas podem ser descritas num plano paralelo ao escoamento. O tridimensional é o mais geral, sendo que suas características variam nas três dimensões, sendo sua análise bastante complexa. Na rede de distribuição de água considera-se para efeito de cálculo o escoamento unidimensional.

3.7 Equações fundamentais do escoamento

Para facilitar os estudos dos escoamentos, pode-se, na maior parte dos casos, tratá-los como sendo do tipo unidimensional e em regime permanente.

3.7.1 Equação da continuidade

Equação baseada no princípio de conservação de massa. Para o caso de um conduto forçado escoando um líquido incompressível, pode-se dizer que a massa que entra de um lado (seção 1) é igual à massa que sai do outro lado do conduto (seção 2). Matematicamente, ela é expressa por:

$$\rho \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho \cdot A_2 \cdot V_2 \quad (3.1)$$

Para:

ρ =massa específica (kg/m³).

V =velocidade média (m/s).

A =área da seção (m²).

A equação (3.1) pode ser simplificada em:

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (3.2)$$

Onde Q é a vazão (m³/s).

3.7.2 Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli representa a conservação da energia (Figura 13). Nos escoamentos ela é expressa por:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (3.3)$$

Para:

Z → Cota geométrica (m)

p → Pressão (Pa = $\frac{N}{m^2}$)

γ → Peso específico ($\frac{N}{m^3}$)

α → Coeficiente de Coriolis (adimensional)

V → Velocidade média (m/s)

g → Aceleração da gravidade (m/s²)

ΔH → Perda de carga (m)

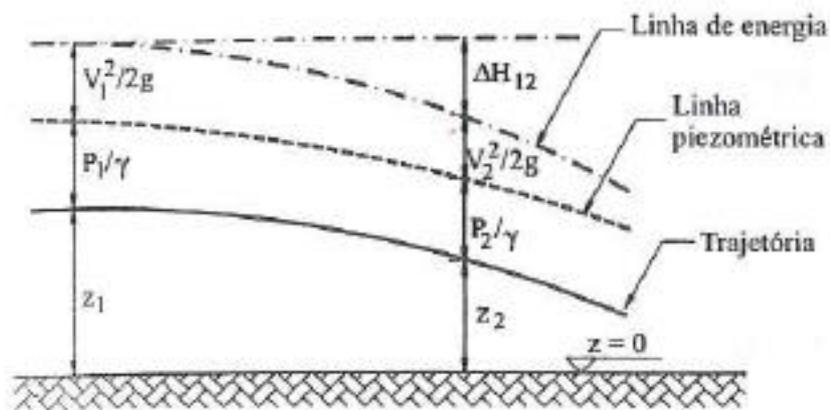


Figura 13: Esquema da equação de Bernoulli representando a linha de energia e linha piezométrica em escoamento permanente
 Fonte: Porto (2006), página 10.

Parte da energia dos escoamentos de fluidos reais é dissipada na forma de calor devido às resistências ao escoamento (turbulência, atrito, etc.). Na hidráulica essa perda de energia por unidade de peso de fluido é chamada de perda de carga.

O fator α é um fator de correção para energia cinética, cujo valor vai depender do perfil de velocidades do escoamento. Em geral adota-se para ele o valor igual a 1. Sua expressão matemática é dada por:

$$\alpha = \frac{\int v^3 \cdot dA}{A \cdot V_{med}^3} \quad (3.4)$$

Na física sabe-se que é possível a conversão de energia cinética (energia do movimento) em energia potencial. No caso dos escoamentos, as grandezas envolvidas são energias por unidade de peso de líquido, na qual:

$Z(m) \rightarrow$ Energia ou carga de posição (energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência);

$P/\gamma(m) \rightarrow$ Energia ou carga de pressão;

$\alpha \frac{v^2}{2g}(m) \rightarrow$ Energia ou carga de velocidade;

$\Delta H(m) \rightarrow$ Perda de carga ou perda de energia.

Conhecendo-se o plano horizontal de referência e as cotas geométricas das seções (do plano horizontal até o centro do tubo), podem-se representar os valores de $\frac{P}{\gamma}$, obtendo-se o lugar geométrico dos pontos cujas cotas são dadas por $\frac{P}{\gamma} + Z$ e designados como linha piezométrica. Cada valor da soma $\frac{P}{\gamma} + Z$ e chamado de cota piezométrica. Se à linha piezométrica acrescentarem-se os valores da carga cinética $\frac{V^2}{2g}$, obtém-se a linha de energia, que designa a energia mecânica total por unidade de peso de líquido, de forma que:

$$H = \frac{P}{\gamma} + Z + \frac{V^2}{2g} \quad (3.5)$$

3.7.3 Tensão de cisalhamento na parede das tubulações

Considere-se o escoamento de um fluido real, incompressível, em regime permanente e uniforme, através de uma tubulação circular de diâmetro constante e área A . As forças que atuam sobre fluido são as forças de pressão, de gravidade e de cisalhamento devido ao atrito com a parede da tubulação. O diagrama de forças, mostrado na figura 14, permite concluir que na condição de equilíbrio dinâmico na direção x , tem-se:

$$\sum F_x = p_1A - p_2A - \tau_0PL + W \sin\theta = 0 \quad (3.6)$$

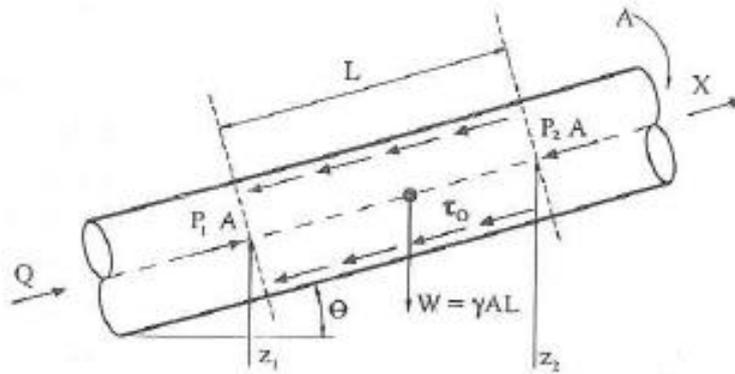


Figura 14: Equilíbrio de forças no escoamento permanente
 Fonte: Porto (2006), página 15

Em que τ_0 é a tensão média de cisalhamento entre o fluido e o perímetro da seção em contato com o fluido, P o perímetro da seção e W o peso do fluido correspondente ao volume ocupado, tem-se:

$\text{sen}\theta = \frac{z_2 - z_1}{L}$ e $W = \gamma AL$, a equação 3.6 fica:

$(p_1 - p_2) \cdot A - \tau_0 \cdot P \cdot L - \gamma \cdot A \cdot (Z_2 - Z_1) = 0$ que desenvolvida torna-se:

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} + Z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + Z_2\right) = \frac{\tau_0}{\gamma} \cdot \frac{P}{A} \cdot L \quad (3.7)$$

Observando, na equação anterior, que a diferença entre os dois primeiros termos é a perda de carga ΔH entre as seções 1 e 2 (regime permanente e uniforme) e definindo como raio hidráulico, R_h , a relação entre a área A da seção ocupada pelo fluido e o perímetro P da seção, em contato com o fluido, parâmetro que reflete as dimensões e aspecto da seção reta do escoamento, vem:

$$\Delta H = \frac{\tau_0}{\gamma} \cdot \frac{L}{R_h} \quad (3.8)$$

Definindo como perda de carga unitária, $J(m/m) = \Delta H/L$, a relação entre a perda de carga ΔH entre as seções 1 e 2 e o comprimento do trecho L, a equação precedente fica:

$$\tau_0 = \gamma \cdot R_h \cdot J \quad (3.9)$$

Esta equação representa a tensão de cisalhamento média na parede das tubulações. Esta expressão é válida tanto para condutos forçados quanto para condutos livres, no escoamento uniforme. Em tubos de seção circular, a tensão tangencial distribui-se uniformemente no perímetro e coincide com o valor médio dado pela equação acima.

3.7.4 Equações da Perda de Carga

Em um escoamento parte da energia é transformada em calor devido às resistências ao escoamento. O principal fator da existência da perda de carga é a viscosidade do líquido e a rugosidade da tubulação, o que implica na presença do atrito entre as partículas do fluido e a tubulação e também partículas fluindo com velocidades diferentes. Essa energia não será mais recuperada nas formas cinéticas ou potencial e essa perda é chamada de perda de carga (ΔH). Essa perda de carga pode ser dividida em dois tipos: a contínua e a localizada.

- Contínua: perda de energia ao longo da tubulação.
- Localizada: perda de energia devida à presença de aparelhos na tubulação.

Geralmente em projetos de rede de distribuição as perdas localizadas são desprezadas.

3.7.4.1 Equação de Darcy-Weissbach

Pela análise dimensional aplicada ao escoamento forçado, temos a fórmula universal de perda de carga ou equação de Darcy-Weissbach (também denominada de equação universal de perda de carga), na qual relaciona-se a perda de carga com os parâmetros geométricos do conduto onde o escoamento ocorre e as propriedades do fluido. A equação universal da perda de carga (para condutos de área circular) é dada por:

$$\Delta H = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3.10)$$

Usando a equação da continuidade $Q = A \cdot V \Rightarrow V = \frac{Q}{A}$ e substituindo na equação universal da perda de carga (3.10), tem-se:

$$J = \frac{\Delta H}{L} = \frac{f}{D} \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2g} \Rightarrow \frac{\Delta H}{L} = \frac{f}{D} \frac{\left(\frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}\right)^2}{2g}, \text{ que simplificada fica:}$$

$$J = \frac{8 \cdot f}{\pi^2 \cdot g} \cdot \frac{Q^2}{D^5} \text{ ou } J = f \frac{1}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (3.11)$$

Onde:

$J = \frac{\Delta H}{L}$ → É a perda de carga unitária (m/m);

f → Fator de atrito (adimensional);

g → Aceleração da gravidade (m/s²);

Q → Vazão (m³/s);

D → Diâmetro(m);

V → Velocidade média (m/s);

L → Comprimento do conduto (m).

Determinação (Cálculo) do fator de atrito

O fator de atrito f depende de outros 2 adimensionais: o número de Reynolds e rugosidade relativa.

- **Número de Reynolds:** É a razão entre as forças de inércia e as forças de viscosidade. Ele serve como indicador do grau de turbulência do movimento classificando o regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície.

Segundo Porto (2006), para valores do número de Reynolds menores que 2.300 o escoamento será laminar, e para valores maiores que 4.000 o escoamento será turbulento. Entre estes dois valores o escoamento é considerado como transitório.

Em projetos de rede de distribuição de água considera-se o regime do escoamento como turbulento.

$$Rey = \frac{V.D}{\nu} \quad (3.12)$$

Onde:

V → Velocidade do escoamento (m/s);

D → Diâmetro da tubulação (m);

ν → Viscosidade cinemática da água (m²/s).

A viscosidade dinâmica (μ) é a resistência que o fluido apresenta ao escoamento (deformação) e, num escoamento unidirecional, é dada pela relação entre a tensão tangencial e o gradiente de velocidade (kg/s.m).

A **Viscosidade Cinemática** (ν) é a relação entre a viscosidade dinâmica (μ) pela massa específica (ρ):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.13)$$

A viscosidade cinemática da água a 20C° tem o valor de $1,01 \times 10^{-6}$ (m²/s).

Rugosidade Relativa: Número adimensional que é representado pela divisão da rugosidade absoluta pelo diâmetro da tubulação.

$$e = \frac{\varepsilon}{D} \quad (3.14)$$

Onde:

e → Rugosidade relativa (número adimensional)

ε → Rugosidade absoluta (mm)

D → Diâmetro (mm)

Tabela 1: Coeficiente de rugosidade absoluta equivalente

| Material | ε (mm) Rugosidade absoluta equivalente |
|--|--|
| Aço comercial novo | 0,0045 |
| Aço laminado novo | 0,04 a 0,10 |
| Aço soldado novo | 0,05 a 0,10 |
| Aço soldado limpo, usado | 0,15 a 0,20 |
| Aço soldado moderadamente oxidado | 0,40 |
| Aço soldado revestido de cimento centrifugado | 0,10 |
| Aço laminado revestido de asfalto | 0,05 |
| Aço galvanizado com costura | 0,15 a 0,20 |
| Aço galvanizado sem costura | 0,06 a 0,15 |
| Ferro forjado | 0,05 |
| Ferro fundido novo | 0,25 a 0,50 |
| Ferro fundido com leve oxidação | 0,30 |
| Ferro fundido velho | 3 a 5 |
| Ferro fundido centrifugado | 0,05 |
| Ferro fundido em uso com cimento centrifugado | 0,10 |
| Ferro fundido com revestimento asfáltico | 0,12 a 0,20 |
| Ferro fundido oxidado | 1 a 1,5 |
| Concreto centrifugado novo | 0,16 |
| Concreto armado liso com vários anos de uso | 0,20 a 0,30 |
| Concreto com acabamento normal | 1 a 3 |
| Cobre latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados. | 0,0015 a 0,0010 |

Fonte: Porto (2006), página 49.

Conhecidos os valores do número de Reynolds e da rugosidade relativa é possível obter o fator de atrito f pelo ábaco de Moody (Figura 15).

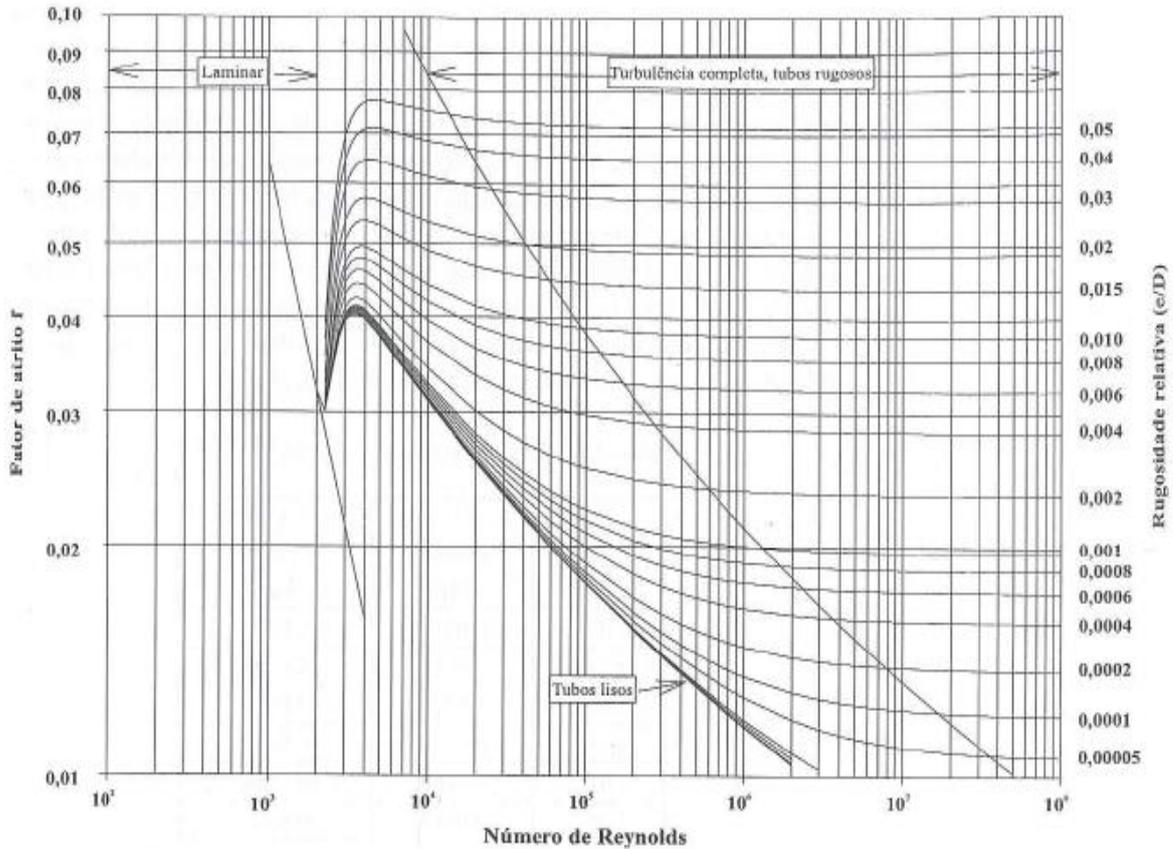


Figura 15: Ábaco de Moody
Fonte: Porto (2006), página 47.

Pelo ábaco de Moody, observa-se a existência de 5 situações:

- 1) Caso de $Re < 2300$ – escoamento laminar, o fator de atrito independe da rugosidade e vale:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.15)$$

- 2) Caso de $2300 < Re < 4000$ – região crítica onde o valor de f não fica caracterizado.

3) Caso do escoamento turbulento hidraulicamente liso onde o fator de atrito só depende do número de Reynolds e pode ser calculado pela relação:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2. \log\left(\frac{Re \cdot \sqrt{f}}{2,51}\right) \quad (3.16)$$

Esse caso acontece se $\frac{Re \cdot \sqrt{f}}{D/\varepsilon} < 14,14$

4) Caso de transição entre o escoamento turbulento hidraulicamente liso e o rugoso, onde o fator de atrito depende simultaneamente da rugosidade relativa e do número de Reynolds. O valor de f pode ser calculado por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2. \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}}\right) \quad (3.17)$$

Essa equação é válida para $14,14 < \frac{Re \cdot \sqrt{f}}{D/\varepsilon} < 198$

5) Caso de turbulência completa, onde o escoamento é hidraulicamente rugoso. O fator de atrito só depende da rugosidade relativa e pode ser calculado por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2. \log\left(\frac{3,71D}{\varepsilon}\right) \quad (3.18)$$

Essa equação é válida para $\frac{Re \cdot \sqrt{f}}{D/\varepsilon} > 198$

Onde:

f → Fator de atrito (adimensional);

ε → Rugosidade da tubulação (mm);

D → Diâmetro (mm);

V → Velocidade (m/s);

ν → Viscosidade cinemática (m²/s);

$Rey = \frac{VD}{\nu} \rightarrow$ Número de Reynolds (adimensional).

O ábaco de Moody foi reproduzido na fórmula de Swamee, apresentada a seguir.

$$f = \left\{ \left[\left(\frac{64}{Rey} \right) + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Rey} \right)^6 \right]^{-16} \right]^{0,125} \right\} \quad (3.19)$$

Temos também fórmulas explícitas para o fator de atrito, como a de Blasius, para o escoamento turbulento hidraulicamente liso e a fórmula desenvolvida por Swamee-Jain para o regime de escoamento turbulento hidraulicamente de transição, apresentadas a seguir:

$$f = \frac{0,316}{Rey^{0,5}} \quad (3.20)$$

Válida para: $3 \times 10^3 \leq Rey \leq 10^5$.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (3.21)$$

Válida para: $10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{D} \leq 10^{-2}$ e $5 \times 10^3 \leq Rey \leq 10^8$.

3.7.4.2 Equação de Hazen-Willians

O cálculo do fator de atrito é bastante complicado sem o uso de computadores, por isso muitos pesquisadores desenvolveram fórmulas empíricas para o cálculo direto da perda de carga unitária, na qual cada uma delas está relacionada a um tipo de problema específico. Na rede de distribuição de água aplicamos a fórmula de Hazen-Willians, adequada a condutos de seção circular com diâmetros superiores a 75 mm, conduzindo somente água fria.

$$J = \frac{10,65}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,85} \quad (3.22)$$

Onde:

J → Perda de carga unitária em (m/m);

C → Coeficiente de rugosidade que depende do material da tubulação;

Q → Vazão em metros cúbicos por segundo (m^3/s);

D → Diâmetro em metros (m).

Tabela 2: Coeficiente C da fórmula de Hazen-Willians

| Material | Valor do coeficiente C |
|---------------------------------------|------------------------|
| Aço corrugado (chapa ondulada) | 60 |
| Aço com juntas lock-bar, tubos novos | 130 |
| Aço com juntas lock-bar, em serviço | 90 |
| Aço galvanizado | 125 |
| Aço rebitado, tubos novos | 110 |
| Aço rebitado em uso | 85 |
| Aço soldado, tubos novos | 130 |
| Aço soldado em uso | 90 |
| Aço soldado com revestimento especial | 130 |
| Cobre | 130 |
| Concreto, bom acabamento | 130 |
| Concreto, acabamento comum | 120 |
| Ferro fundido novo | 130 |
| Ferro fundido após 15-20 anos de uso | 100 |
| Ferro fundido usado | 90 |
| Ferro fundido revestido de cimento | 130 |
| Madeiras em aduelas | 120 |
| Tubos extrudados, P.V.C | 150 |

Fonte: Porto (2006), página 54.

A fórmula de Hazen-Willians é recomendada, preliminarmente, para:

- Escoamento turbulento de transição;
- Líquido: água a 20°C, pois não leva em conta o efeito viscoso;
- Diâmetro: em geral maior ou igual a 75 mm;
- Origem: experimental com tratamento estatístico dos dados;
- Aplicação: redes de distribuição de água, adutoras, sistemas de recalque.

3.8 Condições do Projeto

No projeto de uma rede de distribuição de água deve-se ficar atento à determinadas condições. Estas condições estão relacionadas com a pressão, velocidade e a perda de carga unitária. Essas condições são estabelecidas pela norma NBR12218/1994 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

3.8.1 Pressões mínimas e máximas na rede

Dois tipos de pressões são importantes para o estudo das redes de distribuição de água: a pressão dinâmica e a pressão estática.

- Pressão estática: pressão da água quando ela está parada dentro da tubulação. O seu valor é medido em m.c.a (metro de coluna d água), sendo $1\text{m.c.a} = 1\text{kgf/cm}^2$.
- Pressão dinâmica: É a pressão da água quando ela está em movimento. Esta pressão depende do traçado da tubulação e dos diâmetros adotados nos tubos. O seu valor é a pressão estática menos as perdas de carga distribuídas e localizadas.

A pressão dinâmica mínima está relacionada com a chegada de água aos consumidores. A pressão estática máxima está relacionada com um maior custo energético no bombeamento, pois este custo é diretamente proporcional à altura manométrica de impulsão, um maior custo de implantação das tubulações para

suportar a pressão, pois as possibilidades de rompimento das tubulações aumentam as perdas de água crescem com o aumento das pressões de serviço, pois a vazão nas fissuras ou juntas dos tubos aumenta com o acréscimo de pressão, aumentando assim o consumo.

O controle da pressão mínima pode ser feito através da instalação de bombas (Figura 16) e o controle da pressão máxima pode ser feito por válvulas redutoras de pressão (Figura 17), que são dispositivos que controlam o fluxo de um líquido até que um nível de pressão determinado seja atingido.

De acordo com as normas da ABNT (norma NBR 12218/1994) temos para essas pressões:

- Pressão dinâmica mínima de 10 m.c.a (100 kPa)
- Pressão estática máxima de 50 m.c.a (500 kPa)



Figura 16: Bombas hidráulicas

Fonte: <http://www.inovabombas.com.br/resources/DSC04177.jpg>



Figura 17: Válvula redutora de pressão

Fonte: <http://equipedeobra.pini.com.br/construcaoreforma/35/imagens/i267803.jpg>

3.8.2 Velocidades mínimas e máximas na rede

As restrições na velocidade estão relacionadas com a segurança e com a durabilidade das canalizações e também com o custo de implantação.

Para baixas velocidades o material será mais bem conservado tendo uma maior durabilidade. Esta velocidade está limitada a 0,6 m/s, pois abaixo disto a consequência é a possibilidade da deposição de sedimentos nas canalizações. Nas velocidades altas, o valor se limita a 3,5 m/s, pois acima desse valor a tubulação passa a sofrer um alto desgaste.

De acordo com a norma NBR 12218/1994 da ABNT temos:

- Velocidade mínima de 0,6 m/s
- Velocidade máxima de 3,5 m/s

No entanto, em pequenas redes de distribuição de água, com pequenas vazões nos trechos, nem sempre é possível garantir a velocidade mínima de 0,6 m/s. Isto se deve ao fato da norma impor um diâmetro mínimo de 75 mm para as tubulações, com a finalidade de evitar perdas excessivas no sistema, não sendo

possível garantir uma velocidade de 0,6 m/s, caso a vazão no trecho seja inferior a 1,18 L/s.

É comum usar também em relação às velocidades máximas admissíveis nos projetos, a seguinte equação empírica:

$$V_{m\acute{a}x}(m/s) = 0,60 + 1,5D(m) \quad (3.23)$$

Esta relação é usada para o pré-dimensionamento dos diâmetros em redes ramificadas e malhadas. Em forma de tabela a equação anterior fica:

Tabela 3: Velocidade e vazão máxima para cada diâmetro

| D (mm) | $V_{m\acute{a}x}$ (m/s) | $Q_{m\acute{a}x}$ (L/s) |
|--------|-------------------------|-------------------------|
| 50 | 0,68 | 1,34 |
| 60 | 0,69 | 1,95 |
| 75 | 0,71 | 3,14 |
| 100 | 0,75 | 5,89 |
| 125 | 0,79 | 9,69 |
| 150 | 0,83 | 14,67 |
| 200 | 0,90 | 28,27 |
| 250 | 0,98 | 47,86 |
| 300 | 1,05 | 74,22 |
| 350 | 1,13 | 108,72 |
| 400 | 1,20 | 150,80 |
| 500 | 1,35 | 265,10 |

Fonte: Porto (2006), página 173

3.8.3 Diâmetro mínimo

De acordo com a norma da ABNT (NBR 12218/1994) é recomendado um diâmetro mínimo de 50 mm para as tubulações secundárias. Já para a tubulação principal recomenda-se 100 mm, admitindo-se 75 mm.

3.8.4 Perda de carga

Em uma tubulação quanto maior o comprimento do tubo, menor será o seu diâmetro e maior será a perda de carga para uma dada vazão. Outro fator determinante da perda de carga é a rugosidade interna dos tubos. Recomenda-se a perda de carga máxima de 8 a 10 m/km para tubulações com diâmetros inferiores a 400 mm. Em geral, as perdas de carga unitárias (J) nas tubulações variam de 0,1m/100m a 1m/100m.

3.9 Dimensionamentos de redes de abastecimento de água

Depois dos conceitos básicos de escoamento e de suas equações serão abordados dois métodos simples e clássicos para o cálculo de redes ramificadas e malhadas. Todas as aplicações em redes malhadas e ramificadas serão, na maioria dos casos, em sistemas gravitacionais, sem pressurização por bomba e abastecidos por um único reservatório. Antes disso é importante ter conhecimento da vazão de adução e de distribuição.

Segundo a norma NBR-12218/1994 o dimensionamento dos circuitos fechados formados por condutos principais e a análise do funcionamento global da rede devem ser realizados por métodos de cálculo iterativos, que garantam resíduos máximos de vazão e de carga piezométrica de 0,1 L/s e 0,5 kPa, respectivamente.

3.9.1 Vazão de adução e distribuição

Um sistema público de abastecimento de água é constituído por várias unidades, como captação, bombeamento, adução, unidade de tratamento, reservação e, finalmente, a rede de distribuição. O dimensionamento de cada unidade tem por parâmetro de cálculo a vazão de demanda, que é diretamente proporcional à população a ser atendida. A vazão média necessária pode ser expressa como:

$$Q_m = \frac{P \cdot q_m}{3600 \cdot h} \text{ (L/s)} \quad (3.24)$$

Onde:

P → população a ser abastecida, determinada por métodos estatísticos de previsão populacional, a ser atingida no horizonte do projeto;

q_m → taxa ou cota de consumo per capita média da comunidade em l/hab.dia (um valor de referência, usualmente adotado é de 200);

h → número de horas por dia de operação do sistema ou da unidade considerada.

Para levar em conta as variações diárias de demanda ao longo do ano, a vazão média é multiplicada por um coeficiente de reforço k_1 , definido como coeficiente do dia de maior consumo, na forma:

$$Q_a = k_1 \cdot Q_m = \frac{k_1 \cdot P \cdot q_m}{3600 \cdot h} \text{ (L/s)} \quad (3.25)$$

A vazão Q_a é denominada vazão de adução e é utilizada, segundo Porto (2006), para o dimensionamento das unidades do sistema que estão a montante dos reservatórios, como captação, bombeamento, adução, tratamento e reservação.

Como o consumo de água em uma cidade varia no decorrer do dia, são previstos reservatórios de distribuição com capacidade adequada para suprir as vazões necessárias ao decorrer do dia nas horas de grande consumo (k_2). Desta forma, a vazão de distribuição é dada por:

$$Q_d = k_2 \cdot Q_a = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot P \cdot q_m}{3600 \cdot h} \text{ (L/s)} \quad (3.26)$$

onde:

k_1 → Coeficiente do dia de maior consumo, que assume valor usual de 1,2;

k_2 → Coeficiente da hora de maior consumo do dia de maior consumo, cujo valor comum é de 1,5;

3.9.2 Redes ramificadas

Segundo a NBR 12218/1994, o cálculo de redes ramificadas pode ser feito, admitindo-se a distribuição uniforme do consumo ao longo do trecho (distribuição em marcha), e calcula-se a perda de carga com base na vazão fictícia do trecho (vazão da extremidade de jusante somada à metade da vazão distribuída).

O cálculo da rede ramificada é feito com o auxílio de uma planilha. O preenchimento da planilha obedece à seguinte sequência.

Tabela 4: Elementos necessários para o cálculo de uma rede ramificada

| Trecho | L | Vazão | | | | | | | Cota Piezométrica | | Cota do nó | | Pressão Disponível | |
|--------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|---|---|----|-------------------|----|------------|----|--------------------|----|
| | | Q _j | Q _d | Q _m | Q _f | D | V | Δh | J | M | J | M | J | M |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |

Fonte: Baptista et al.(2010), página 113

Para facilitar o uso da planilha, os números da sequência de 1 a 15 são:

- 1) Numeração do trecho faz-se de jusante para montante;
- 2) Comprimento do trecho, dado em metros;
- 3) Vazão de jusante;
- 4) Vazão distribuída no trecho dada por:

$$Q_d = q_m \cdot L \quad (3.27)$$

- 5) Vazão de montante no trecho, dada por: $Q_m = Q_j + Q_d$

- 6) Vazão fictícia, dada por:

$$Q_f = \frac{Q_m + Q_j}{2} \text{ ou } Q_f = \frac{Q_m}{\sqrt{3}} \text{ qdo } Q_j = 0 \quad (3.28)$$

- 7) Diâmetro escolhido com base no critério de velocidade máxima no trecho (Tabela 3);

- 8) Velocidade média de escoamento dada por: $V = \frac{4.Q}{\pi.D^2}$ (equação da continuidade);

- 9) Perda de carga total no trecho;

- 10) Cota piezométrica de jusante;

- 11) Cota piezométrica de montante é dada por: $[11] = [10] + [9]$;

- 12) Cota do nó (seção) de jusante, obtida na planta;
- 13) Cota do nó (seção) de montante;
- 14) Pressão disponível de jusante é dada por: $[14] = [10] - [12]$;
- 15) Pressão disponível de montante é dada por: $[15] = [11] - [13]$.

3.9.3 Redes malhadas

Segundo a NBR 12218/1994, O dimensionamento dos condutos principais, que formam circuitos fechados, pode ser feito supondo consumos localizados nos pontos nodais e em pontos singulares intermediários. Os consumidores especiais ou singulares, considerados conforme definições da NBR 12211 devem ter suas vazões associadas a pontos nodais ou singulares intermediários, em caso de a rede formar circuitos fechados.

De acordo com Porto (2006), em uma rede malhada as equações são escritas de modo a satisfazer duas condições básicas para o equilíbrio do sistema, que são:

- A soma algébrica das vazões em cada nó da rede é igual a zero.
- A soma algébrica das perdas de carga (partindo e chegando ao mesmo nó) em qualquer circuito fechado dentro do sistema (malhas ou anéis) é igual a zero.

Para aplicação dessas duas condições, em geral, convencionam-se que as vazões que afluem ao nó são positivas, e as que derivam dele são negativas. Para os anéis, convencionam-se como sentido positivo de percurso o sentido horário, de modo que as vazões e, conseqüentemente, as perdas de carga serão positivas se forem coincidentes com o sentido prefixado de percurso, caso contrário, serão negativas. A Figura 18 mostra a convenção a ser utilizada nas aplicações.

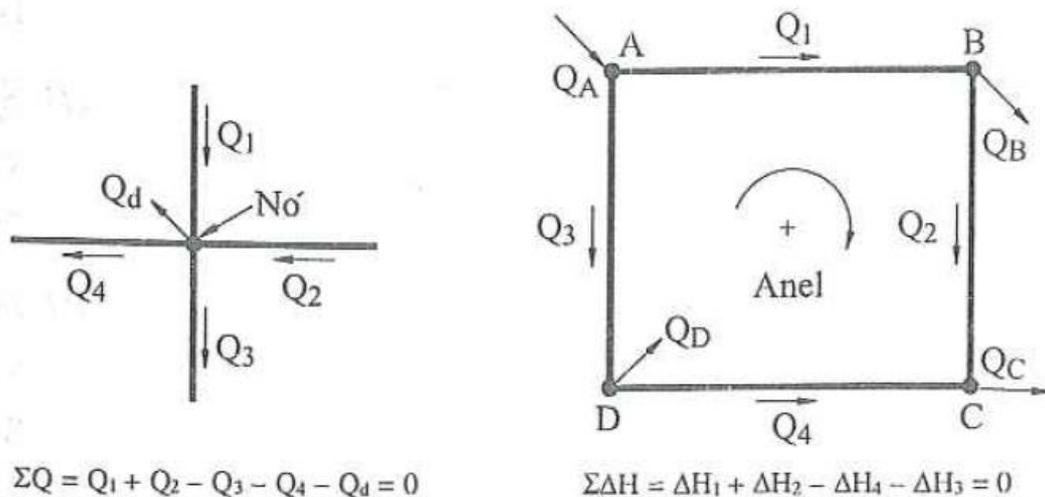


Figura 18: Convenções utilizadas para as equações fundamentais
 Fonte: Porto (2006), página 179

No cálculo da perda de carga em cada trecho da rede utiliza-se uma equação de resistência na forma:

$$\Delta H = K \cdot Q^n \tag{3.29}$$

Como regra geral, uma rede malhada com m anéis ou malhas e n nós gera um total de $m + (n-1)$ equações independentes e, à medida que a complexidade da rede aumenta, cresce proporcionalmente o número de equações. Evidentemente, uma solução algébrica da rede torna-se impraticável e então se lança mão de um método de aproximações sucessivas, com auxílio do computador, prático e muito adequado para o problema, denominado método de Hardy-Cross.

O método de Hardy-Cross destaca-se dentre os métodos de aproximações sucessivas para o cálculo de redes malhadas, por possibilitar o desenvolvimento normal dos cálculos, em sistemas simples, além de ser um método provido de significado físico, que facilita a análise dos resultados intermediários obtidos.

O método de Hardy-Cross é aplicado aos condutos principais (anéis principais) de uma rede malhada, a partir de alguns pressupostos do projeto e traçado da rede.

a) Uma vez lançados os anéis da rede, baseados em critérios urbanísticos de distribuição de demanda, densidade populacional, vetores de crescimento da área a ser abastecida etc., são definidos pontos fictícios convenientemente localizados nas tubulações. Tais pontos, para efeito de cálculo, substituem, do ponto de vista de demanda, certa fração da área a ser abastecida, de modo a transformar vazões por unidade de área em vazões pontuais. Imagina-se que toda a rede seja suprida através dos anéis, em pontos fictícios de descarregamento, que serão os nós da rede, para efeito de aplicação do método.

b) Conhecendo-se a topografia da área, a distância entre dois nós será o comprimento do trecho e , se o diâmetro já for especificado, as variáveis a serem determinadas são a vazão e as pressões nas extremidades.

c) Admite-se que a distribuição em marcha que ocorre nos trechos que formam os anéis seja substituída por uma vazão constante.

d) Supõem-se conhecidos os pontos de entrada e saída de água (reservatórios, adutoras e os nós distribuídos nos anéis) e os valores das respectivas vazões.

e) Atribui-se, partindo dos pontos de alimentação, uma distribuição de vazão hipotética Q_a , pelos trechos dos anéis, obedecendo em cada nó à equação da continuidade $\sum Q_i = 0$.

f) Para cada trecho de cada anel, conhecendo-se o diâmetro (que pode ser pré-determinado pela condição de velocidade limite da Tabela 3), o comprimento e o fator de atrito, calcula-se o somatório das perdas de carga em todos os anéis. Se para todos os anéis tivermos $\sum \Delta H = 0$, a distribuição de vazões estabelecida está correta e a rede é dita equilibrada.

g) Se, em pelo menos um dos anéis, $\sum \Delta H \neq 0$, que é a situação mais comum, a distribuição de vazão admitida será corrigida, somando-se (compensando-

se) algebricamente a cada uma delas um valor ΔQ , de modo que as novas vazões em cada trecho serão:

$$Q = Q_a + \Delta Q \quad (3.30)$$

De modo a se atingir:

$$\sum \Delta H = \sum K \cdot Q^n = \sum K [Q_a + \Delta Q]^n = \sum K \cdot Q_a^n \left[1 + \frac{\Delta Q}{Q_a} \right]^n = 0$$

Expressão que desenvolvida pelo binômio de Newton torna-se:

$$\sum K \cdot Q_a^n \left[1 + n \frac{\Delta Q}{Q_a} + \frac{n(n-1)}{2!} \left(\frac{\Delta Q}{Q_a} \right)^2 + \dots \right] = 0$$

Supondo-se que ΔQ é muito pequeno comparado a Q_a , isto é, que os valores supostos para as vazões são próximos dos valores reais, pode-se desprezar o terceiro termo da série e os seguintes, e daí:

$$\sum K \cdot Q_a^n = -n \sum K \cdot Q_a^{n-1} \cdot \Delta Q$$

E finalmente:

$$\Delta Q = - \frac{\sum K \cdot Q_a^n}{n \sum K \cdot Q_a^n / Q_a} = - \frac{\sum \Delta H_a}{n \sum \frac{\Delta H_a}{Q_a}} \quad (3.31)$$

Com as novas vazões obtidas em cada anel, recalculam-se as perdas de carga, prosseguindo-se com o método até que se obtenham, em todos os anéis, valores de ΔQ pequenos ou nulos.

O número de aproximações sucessivas necessário depende, em grande parte, da margem de erro das estimativas iniciais das vazões e do porte da rede. Não é objetivo de o cálculo chegar a um limite muito afinado, uma vez que os resultados obtidos não podem ser mais precisos que os dados básicos, os quais forçosamente serão, com frequência, algo incerto.

Com a rede equilibrada e conhecidas as cotas geométricas nos pontos de alimentação, resultam imediatamente as cotas piezométricas e as pressões disponíveis nos diversos pontos da rede. Se estas pressões forem inadequadas, modifica-se o sistema, alterando ou a altura do reservatório ou os diâmetros de alguns trechos.

Tanto o problema de verificação quanto, principalmente, o problema de dimensionamento, por se utilizar de um método de aproximações sucessivas, são extremamente laboriosos, exigindo o auxílio de um programa computacional para agilizar a análise de alternativas.

3.10 Análises hidráulicas de rede de abastecimento

Segundo Porto (2006), a análise hidráulica das redes está baseada na utilização da equação da continuidade, que estabelece, na condição de equilíbrio, ser nula a soma algébrica das vazões em cada nó da rede, e na aplicação de uma equação de resistência (na forma $\Delta H = K \cdot Q^n$) aos vários trechos. Como objetivo, deve-se determinar as vazões nos trechos e as cotas piezométricas nos nós, a partir do conhecimento da vazão de distribuição para o sistema. Normalmente, as cargas cinéticas e as perdas de carga localizadas são desprezadas no cálculo da rede.

Dois tipos de problemas podem ser analisados:

- Problema de verificação, que consiste em determinar as vazões nos trechos e as cotas piezométricas nos nós, para uma rede com diâmetros e comprimentos conhecidos. Este problema é determinado e tem solução única.
- Problema de determinação dos diâmetros, vazões nos trechos e cotas piezométricas nos nós, com condicionamentos nas velocidades e pressões. Este problema admite várias soluções, podendo, porém, procurar-se a solução de mínimo custo.

3.11 Programas utilizados

Neste item é feita uma breve descrição dos programas computacionais envolvidos neste trabalho, que são: RedemWeb, UFC-3 e 4 (Otimização por Algoritmo Genético), Epanet e Lenhsnet.

3.11.1 RedemWeb

O programa RedemWeb permite o dimensionamento ou verificação, pelo método de Hardy Cross, de uma rede de distribuição de água com até 100 trechos e um ou mais reservatórios de alimentação com sistema unicamente por gravidade.

O código matemático está em linguagem Quick Basic e a interface inteligente em Visual Basic. O programa aceita as equações de resistência (perda de carga) de Hazen-Williams ou a fórmula universal.

A montagem do arquivo de dados é simples, sendo necessário informar o número de trechos, o número de anéis e o número de nós da rede, a tolerância na perda de carga (erro de fechamento do plano piezométrico), a tolerância da vazão (erro de balanço na equação da continuidade), o número de iterações necessárias, o número do nó escolhido para fixar a carga de pressão (nó de início do cálculo do plano piezométrico), a carga de pressão adotada para este nó e as cotas topográficas de todos os nós.

Em outra tabela de entrada, devem-se informar os números dos trechos de cada anel, com sinal positivo se a vazão inicial daquele trecho estiver no sentido horário, e negativo, caso contrário.

Finalmente, a última tabela é preenchida com os números dos nós de montante e jusante de cada trecho, respeitando o sentido arbitrado da vazão, o valor da vazão em L/s (sem sinal), o comprimento e diâmetro de cada trecho, o coeficiente C de rugosidade da fórmula de Hazen-Williams ou a rugosidade absoluta ε (em mm) do tubo.

Não é necessário informar simultaneamente o valor de C e do ε , somente o correspondente à equação de resistência que se vai usar. Se todos os tubos da rede tiverem a mesma rugosidade, o coeficiente pode ser digitado uma vez na primeira célula da coluna e copiado para todos os outros trechos.

Após a montagem do arquivo de dados, tecla-se no campo calcular e escolhe-se a equação de resistência (universal ou Hazen-Williams). Após o cálculo, se as condições impostas de carga de pressão mínima nos nós e velocidades nos trechos foram respeitadas, tecla-se imprimir ou salvar, para ter a solução do problema.

Se as condições impostas de pressões e velocidades não forem atendidas, tecla-se fechar, voltando para a tela anterior e altera-se algum dado do problema, como o diâmetro de um trecho ou o nó para a pressão mínima.

O programa informa as cargas piezométricas e as cargas de pressão em todos os nós (junções), a distribuição de vazões (com sinal), as velocidades nos trechos, as velocidades máximas de norma, dada pela equação $V_{m\acute{a}x} (m/s) = 0,60 + 1,5.D(m)$ e $V_{m\acute{a}x} \leq 2,0m/s$, e o custo total das tubulações, baseado em função de custo embutida na rotina, somente pelo efeito de comparação entre duas ou mais soluções tecnicamente viáveis. Observar que, se o sinal da vazão em algum trecho for negativa, isso significa que o sentido do escoamento é invertido quando aos nós (montante e jusante) previamente escolhidos.

A figura 19 ilustra a página dos dados de entrada do programa e a figura 20 dos resultados.

RedemWeb [Limpar Dados](#) [Exemplos ▾](#) [Carregar Arquivo ...](#) [Calcular](#) [Salvar Dados](#) Programas computacionais [CoefWeb](#)

Programa para o cálculo de rede de abastecimento com um reservatório.

Número máximo de iterações

Nó escolhido para fixar a pressão inicial

Carga de pressão no nó escolhido
 m. c. a.

Tolerância na vazão
 m³/s

Tolerância na perda de carga (m)
 m

Tubulação
 Metálico PVC

Forma de cálculo
 Hazen Williams Fórmula Universal

Nós [Adicionar Nó](#)

| Nó | Cota Topográfica (m) |
|----|----------------------|
| | |

Características dos trechos [Adicionar Trecho](#)

| Trecho | Nó de montante | Nó de jusante | Comprimento (L) (m) | Diâmetro (D) (m) | Vazão (Q) (l/s) | Coefficiente de rugosidade C | Coefficiente de rugosidade E (mm) |
|--------|----------------|---------------|---------------------|------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------------|
| | | | | | | | |

Anéis [Adicionar Anel](#)

| |
|--|
| |
|--|

Figura 19: Dados de entrada do programa RedemWeb
 Fonte: Programa RedemWeb

Resultados:

Resultado ✕

Pela fórmula de Fórmula Universal para a perda de carga, depois de 1 iterações, temos:

| Trecho | Vazão (l/s) | Velocidade (m/s) | Velocidade Máxima (m/s) | Junção | Cota Piez (m) | Pressão (mca) |
|--------|-------------|------------------|-------------------------|--------|---------------|---------------|
| | | | | | | |

Comprimento total da rede = 0m
Custo das tubulações (PVC) = R\$ 0,00

[Imprimir](#) [Resultado das iterações](#) [Voltar ao início](#)

Figura 20: Visualização dos resultados do programa RedemWeb
 Fonte: Programa RedemWeb

3.11.2 Epanet

O EPANET é um programa de computador específico para redes de condutos forçados, ou seja, redes pressurizadas que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água que gera dados de saída, tais como, pressão nos nós e vazão nos trechos da rede em estudo. Uma rede é constituída por tubulações, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável. O EPANET permite obter os valores da vazão em cada tubulação, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável da rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos intervalos de cálculo.

O EPANET foi concebido para ser uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição, melhorando o conhecimento sobre o transporte e o destino dos constituintes da água para consumo humano. Pode ser utilizado em diversas situações onde seja necessário efetuar simulações de sistemas pressurizados de distribuição. O estabelecimento de cenários de projeto (p.ex., expansão de uma rede existente) e a calibração de modelos hidráulicos são alguns exemplos de aplicação do programa.

O EPANET pode ajudar a analisar estratégias alternativas de gestão, de modo a melhorar a qualidade da água do sistema, através de:

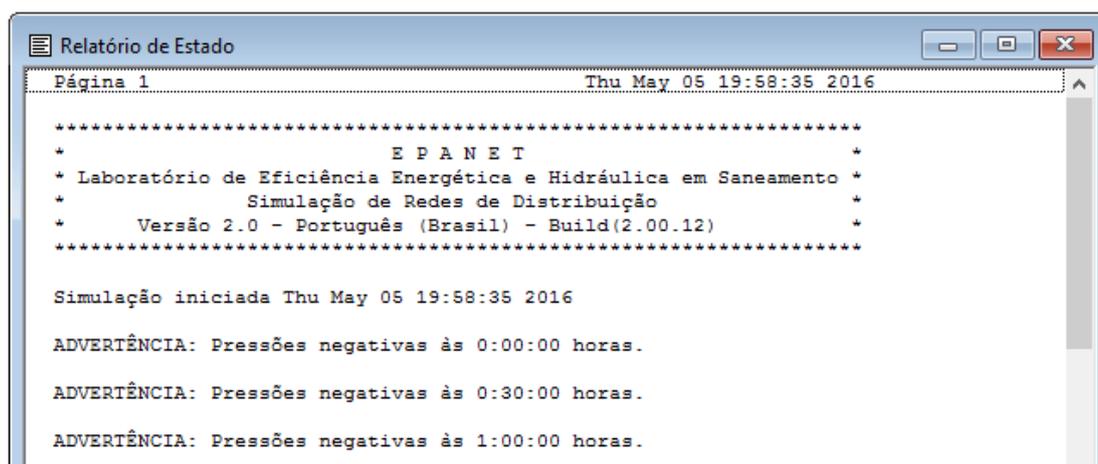
- Alterações na utilização de origens da água num sistema com múltiplas origens
- Alteração de esquema de funcionamento de grupos elevatórios e enchimento/esvaziamento de reservatórios de nível variável

No ambiente Windows, o EPANET fornece uma interface integrada para editar dados de entrada da rede, executar simulações hidráulicas e de qualidade da água e visualizar os resultados em vários formatos.

Ao simular a rede no Epanet, caso haja uma mensagem de advertência (figura 21) indicando que a rede está com pressão negativa, ou seja, o Epanet informa que essa rede não tem condições de fornecer água para a população. Pode-se resolver o problema de duas formas:

- Aumentando o diâmetro das tubulações.
- Aumentando a diferença entre a cota do nível mínimo da água no Reservatório e a cota do terreno no ponto de localização do reservatório (Altura do Fuste).

Caso escolha aumentar os diâmetros dos tubos, você tem a opção de alterar manualmente o diâmetro da rede até conseguir executar a simulação no EPANET.



```
Relatório de Estado
Página 1 Thu May 05 19:58:35 2016
*****
*                               *
*      E P A N E T              *
* Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento *
* Simulação de Redes de Distribuição                               *
* Versão 2.0 - Português (Brasil) - Build(2.00.12)              *
*****

Simulação iniciada Thu May 05 19:58:35 2016

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 0:00:00 horas.

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 0:30:00 horas.

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 1:00:00 horas.
```

Figura 21: Relatório de advertência de pressão negativa
Fonte: Programa Epanet

3.11.2.1 Capacidades de modelagem hidráulica utilizando o Epanet

Uma rede completamente caracterizada (ou seja, incluindo todas as tubulações, sem simplificações) e uma modelagem hidráulica confiável constituem pré-requisitos essenciais para a correta modelagem de qualidade da água. O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, onde se destacam como principais características:

- Dimensão ilimitada do número de componentes da rede analisada;

- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Willians, Darcy-Weissbach ou Chezy-Manning;
- Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc.;
- Modelagem de bombas de velocidade constante ou variável;
- Cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo;
- Modelagem dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão;
- Modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- Modelagem da relação entre pressão e vazão efluente de dispositivos emissores (p.ex. aspersores de irrigação ou consumos dependentes da pressão)
- Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controles simples, dependentes de uma só condição (p.ex., altura de água num reservatório de nível variável, tempo) ou em controles com condições múltiplas.

3.11.2.2 Etapas a seguir na utilização do Epanet

A modelagem de um sistema de distribuição de água através do EPANET utiliza tipicamente os seguintes intervalos:

- a) Desenhar uma representação esquemática do sistema de distribuição;
- b) Editar as propriedades dos objetos que constituem o sistema;
- c) Descrever as condições de operacionalidade do sistema;
- d) Selecionar um conjunto de opções de simulação;
- e) Executar uma simulação hidráulica ou de qualidade da água;
- f) Visualizar os resultados da simulação

3.11.3 Lenhsnet

O modelo Lenhsnet é baseado em um algoritmo iterativo de dimensionamento otimizado de um sistema pressurizado de distribuição de água, composto pela rede de abastecimento com seu dispositivo de impulsão (equipamento capaz de pressurizar uma rede – bombeamento, reservatório, etc.). O método proporciona como resposta ao dimensionamento, os diâmetros de todos os trechos da rede e a cota piezométrica da impulsão, de forma a alcançar o custo mínimo total do sistema, composto pela rede de tubulações e a energia de bombeamento. A metodologia do LENHSNET compreende um processo dinâmico de cálculo, iterativo, associado ao modelo de simulação hidráulica EPANET 2.0.

Quando se deseja dimensionar uma rede no Epanet utilizando o Lenhsnet, primeiramente deve-se fazer o traçado da rede e colocar as informações básicas: para os nós (as cotas e demandas); para os trechos (comprimentos) e um reservatório de nível fixo (nível da água). Os diâmetros nem as rugosidades são obrigatórios inicialmente.

As opções disponíveis para o módulo do Lenhsnet (figura 22) são:

- Dados do projeto, onde se pode limitar as velocidades e as pressões (figura 23);
- Dados dos tubos, onde se adota o seu diâmetro, a sua rugosidade, o seu tipo e o custo por metro (figura 24);
- Executar Dimensionamento;
- Relatório, que mostra as pressões mínimas e máximas, as velocidades mínimas e máximas e o custo final de implantação das tubulações (figura 25);
- Sobre;
- Ajuda.

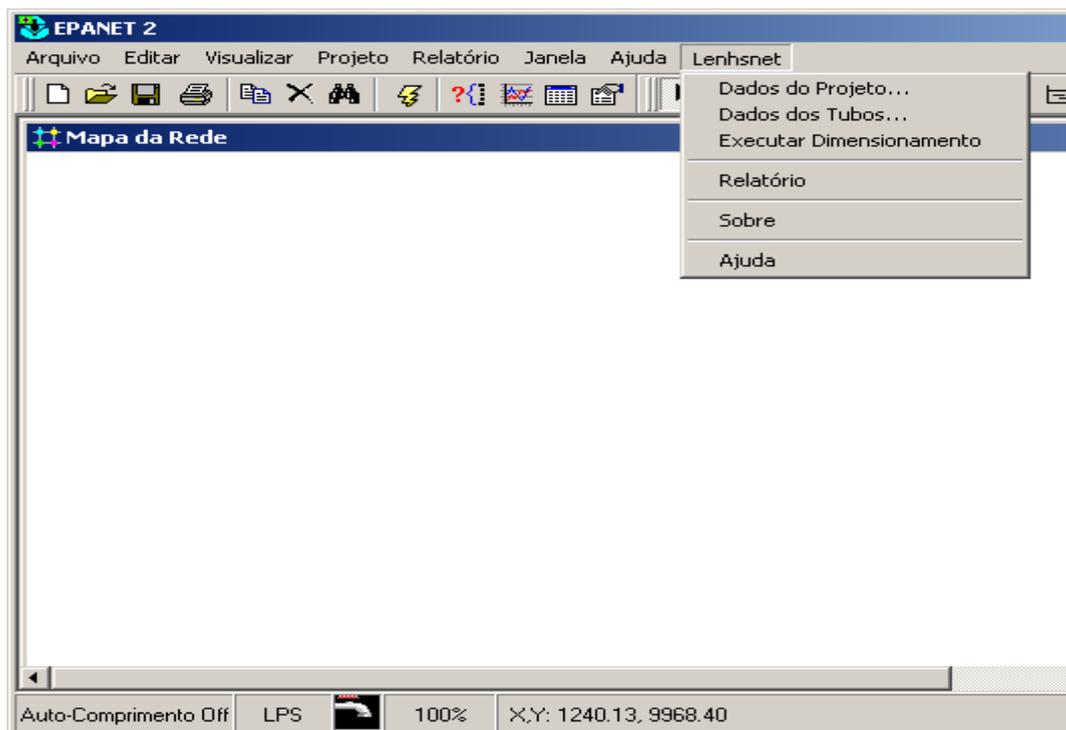


Figura 22: Layout Lenhsnet
 Fonte: Programa Epanet

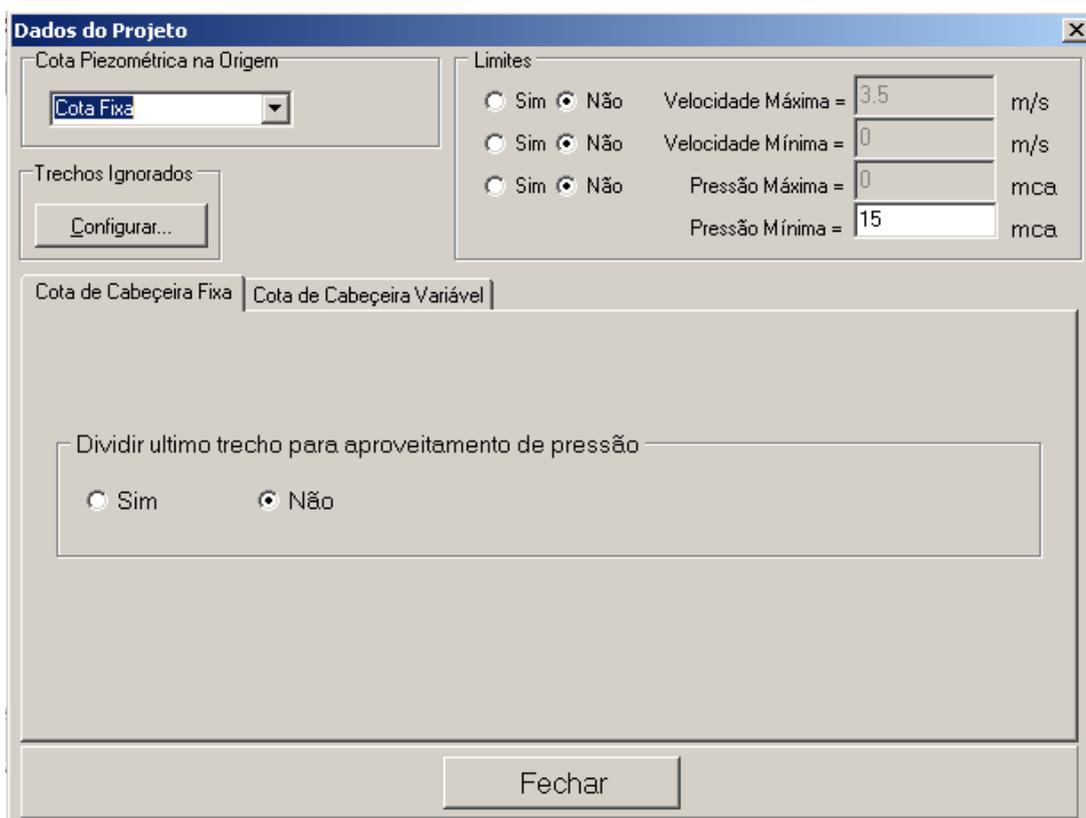


Figura 23: Dados do Projeto
 Fonte: Programa Epanet
 Em dados dos tubos (figura 24) temos:

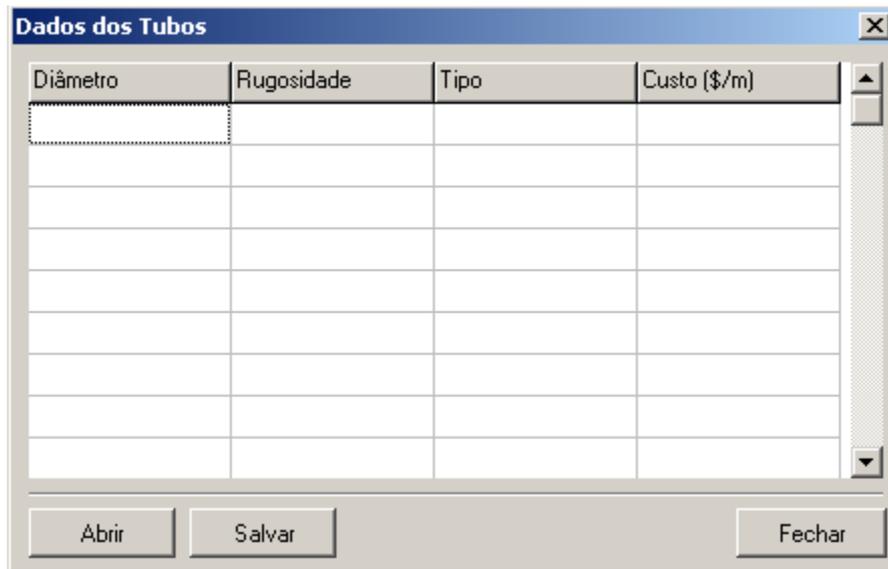


Figura 24: Dados dos tubos
Fonte: Programa Epanet

Depois que executamos o dimensionamento, temos o relatório (figura 25).

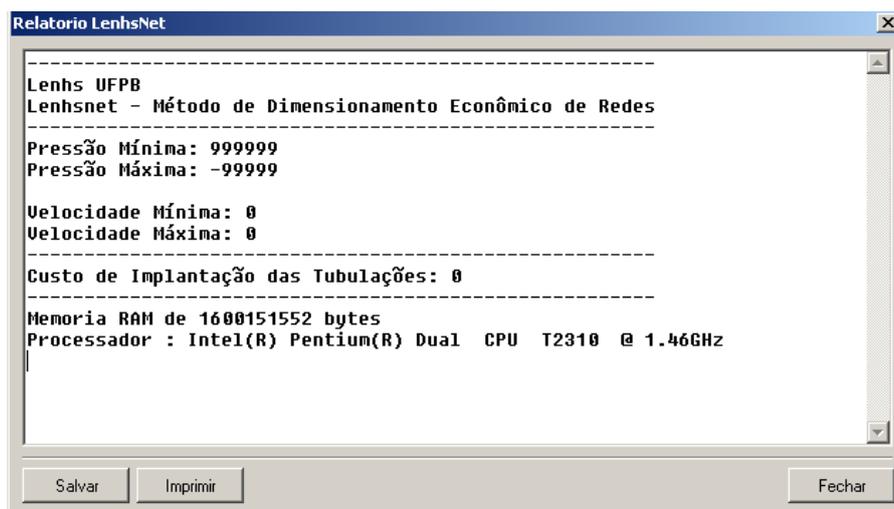


Figura 25: Resultados do Relatório
Fonte: Programa Epanet

3.11.4 UFC

O UFC-2 é um módulo onde se desenha a rede de distribuição no AutoCAD (figura 26), onde define-se os parâmetros hidráulicos (figura 27) e a Interface AutoCAD/EPANET;

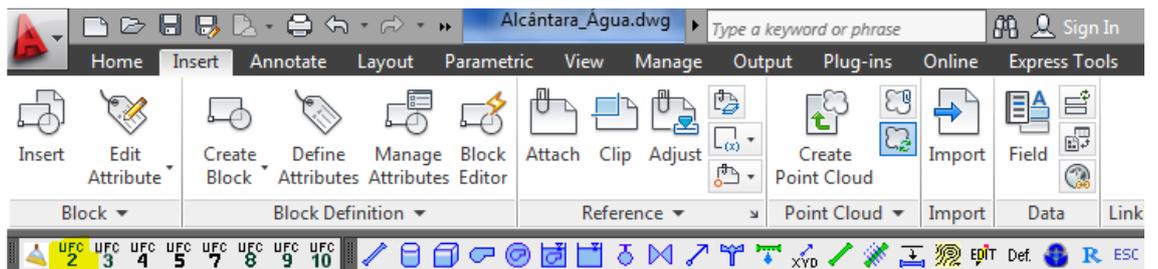


Figura 26: Visualização do AutoCAD com os ícones do Módulo UFC2
Fonte: Manual do UFC

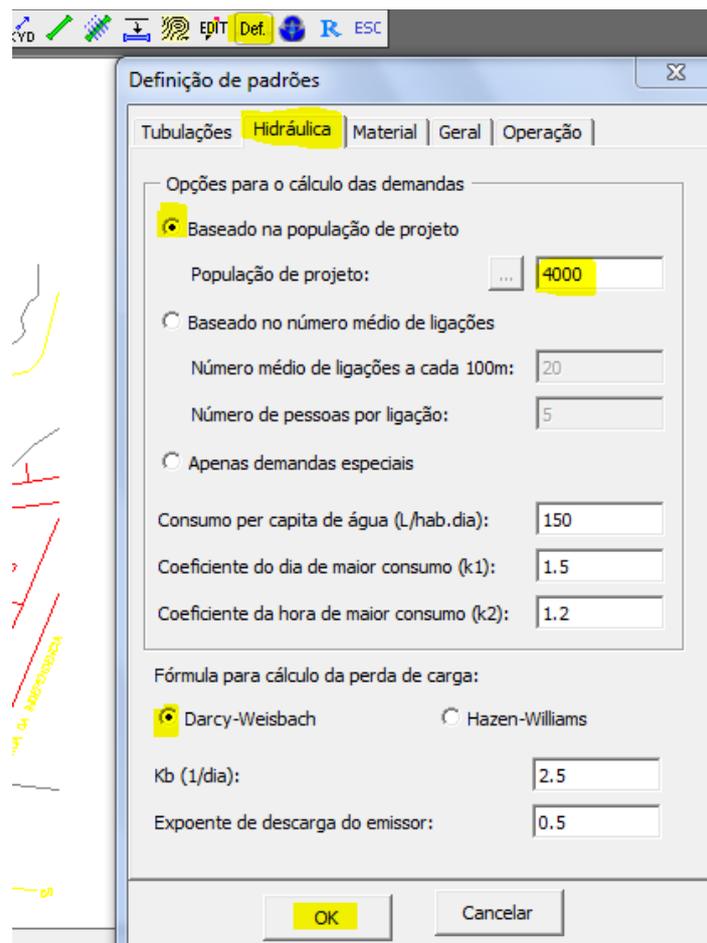


Figura 27: Visualização do AutoCAD com os ícones do Módulo UFC2
Fonte: Manual do UFC

O programa UFC-2 funciona fazendo uma interface do AutoCAD com o EPANET. Essa interface tem como principal objetivo a criação de um arquivo de entrada para um programa de simulação hidráulica. Trata-se de um pacote computacional que cria uma forma dinâmica de exportar arquivos do AutoCAD para o EPANET, utilizando-se da programação AutoLISP.

O UFC-3 é um módulo de inserção de conexões (figuras 28 e 29), numeração dos nós e trechos (figura 30) e elaboração dos quantitativos (figura 31) em redes de distribuição de água.

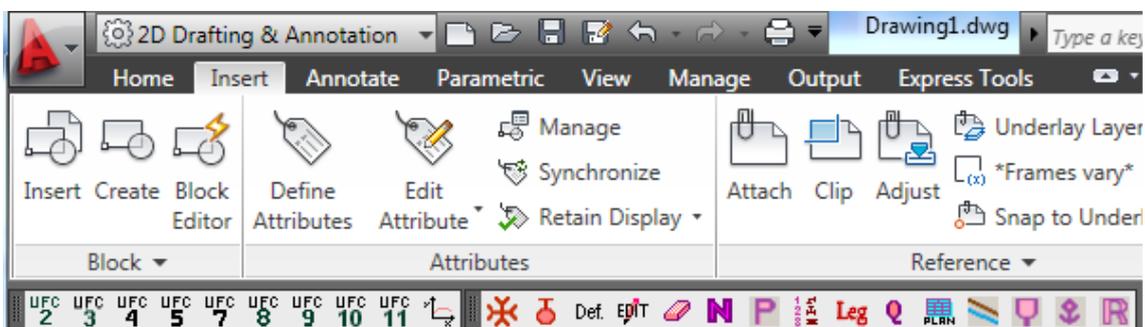


Figura 28: Visualização do AutoCAD com os ícones das propriedades
Fonte: Manual do UFC

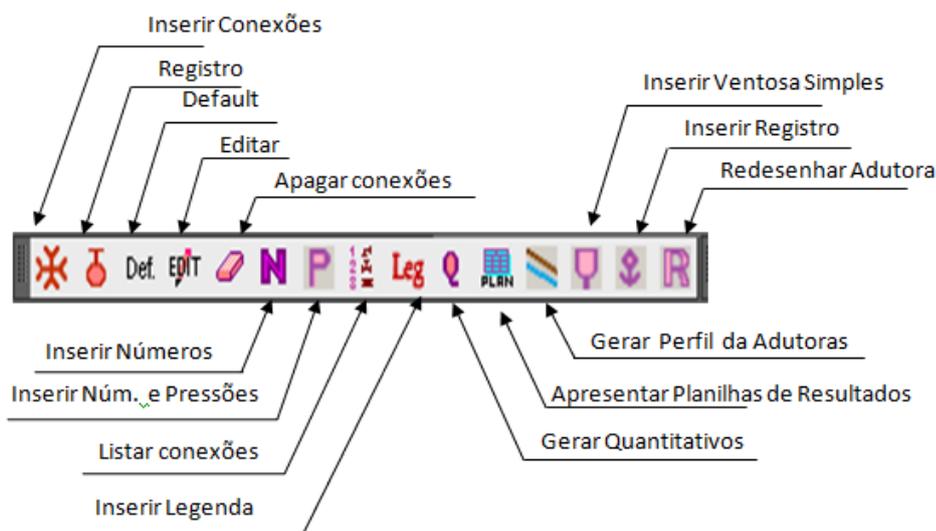


Figura 22: Comandos do UFC-3
Fonte: Manual do UFC

| PLANILHA DE RESULTADOS - NÓS | | | | | PLANILHA DE RESULTADOS - TRECHOS | | | | | | | | |
|------------------------------|---------------|----------|-----------|-------------|----------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|-------------|
| NÓ | CONSUMO (L/s) | COTA (m) | CARGA (m) | PRESSÃO (m) | TRECHO | MATERIAL | NÓ INI | NÓ FIN | L (m) | DN (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | P.C. (m/km) |
| 2 | 2.07 | 50.70 | 61.27 | 10.57 | 1 | PVC DEFOFO | 1 | 2 | 33.81 | 150 | 18.67 | 0.97 | 5.81 |
| 3 | 2.79 | 46.89 | 59.25 | 12.36 | 2 | PVC PBA CLASSE 12 | 2 | 3 | 75.21 | 75 | 6.46 | 1.38 | 26.92 |
| 4 | 2.01 | 47.48 | 59.96 | 12.48 | 3 | PVC PBA CLASSE 12 | 4 | 5 | 54.96 | 75 | 5.57 | 1.19 | 20.37 |
| 5 | 2.95 | 50.08 | 61.08 | 11.00 | 4 | PVC DEFOFO | 5 | 2 | 103.33 | 150 | 10.14 | 0.53 | 1.86 |
| 6 | 1.19 | 29.62 | 59.04 | 29.42 | 5 | PVC PBA CLASSE 12 | 4 | 6 | 141.85 | 50 | 1.19 | 0.51 | 6.48 |
| 7 | 1.77 | 46.07 | 59.07 | 13.00 | 6 | PVC PBA CLASSE 12 | 7 | 8 | 149.14 | 50 | 1.25 | 0.54 | 7.11 |
| 8 | 1.25 | 31.68 | 58.01 | 26.33 | 7 | PVC PBA CLASSE 12 | 7 | 9 | 41.81 | 50 | 0.64 | 0.27 | 2.12 |
| 9 | 1.86 | 47.33 | 58.98 | 11.65 | 8 | PVC PBA CLASSE 12 | 9 | 4 | 42.33 | 50 | 2.37 | 1.01 | 23.14 |
| 10 | 1.15 | 32.47 | 58.14 | 25.67 | 9 | PVC PBA CLASSE 12 | 9 | 10 | 137.12 | 50 | 1.15 | 0.49 | 6.09 |
| 11 | 1.62 | 34.05 | 58.88 | 24.83 | 10 | PVC PBA CLASSE 12 | 5 | 11 | 192.80 | 50 | 1.62 | 0.69 | 11.40 |
| 1 | -18.67 | 61.47 | 61.47 | 0.00 | 11 | PVC PBA CLASSE 12 | 3 | 7 | 19.23 | 75 | 3.66 | 0.78 | 9.27 |

Figura 30: Tabela de nós e trechos
Fonte: Manual do UFC

| DESCRIÇÃO | UNIDADE | QUANTIDADE |
|--|---------|------------|
| REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA | | |
| CONSTRUÇÃO DO CANTEIRO DA OBRA | | |
| Barracão para escritório tipo A1 | un. | 1.00 |
| Cerca c/ estacas de madeira - 6 fios de arame farpado | m | 60.00 |
| Mobilização e desmobilização de equipamentos em caminhão equipado c/ guindaste | km | 300.00 |
| Instalações provisórias de luz, força, telefone e lógica | un. | 1.00 |
| Instalações provisórias de água | un. | 1.00 |
| Fossa sumidouro para barracão | un. | 1.00 |
| Placa padrão de obra | m² | 12.00 |
| CADASTRO | | |
| Cadastro de rede de água (MEIO MAGNÉTICO) | m | 619.94 |
| LOCAÇÃO | | |
| Locação de rede de água | m | 619.94 |
| TRÂNSITO, SEGURANÇA E TRAVESSIA | | |
| Passadiços com pranchas em madeira | m² | 31.00 |
| Sinalização noturna de trânsito com barreiras | m | 309.97 |
| Sinalização de advertência | un. | 3.00 |
| MOVIMENTO DE TERRA | | |
| Escavação com profundidade até 2 metros | m³ | 384.29 |
| Reaterro de valas | m³ | 381.81 |
| Bota-fora | m³ | 2.48 |
| ASSENTAMENTO DE TUBOS E CONEXÕES | | |
| Assentamento de tubos e conexões em PEAD DN 50 mm | m | 435.02 |
| Assentamento de tubos e conexões em PEAD DN 100 mm | m | 104.01 |
| Assentamento de tubos e conexões em PEAD DN 75 mm | m | 46.68 |
| FORNECIMENTO DE MATERIAL | | |
| ADAPTADOR JE PEADxFo 150 | un. | 1.00 |

Figura 31: Planilha de quantitativos
Fonte: Manual do UFC

O UFC-4 é um módulo de Dimensionamento Econômico de Redes de Água (Otimização) e tem como finalidade determinar o conjunto de diâmetros que comporão a rede mais barata. Para tanto é necessário informar o material, os diâmetros disponíveis para dimensionamento e o custo unitário (R\$/m) de cada diâmetro disponível.

Antes de utilizar o UFC-4 dimensiona-se o reservatório. São colocados os seguintes dados no dimensionamento de um reservatório (figuras 32, 33 e 34):

- Diferença do N.A. mínimo e a cota do terreno (m): é a distância entre o nível mínimo de água no reservatório e a cota do terreno.
- Diferença do N.A. máximo e a cota do terreno (m): é a distância entre o nível máximo de água no reservatório e a cota do terreno.
- Diferença entre o nível de entrada e a cota do terreno (m): é a distância entre o nível de água da entrada da adutora e a cota do terreno.
- Diâmetro do tanque (m): é o diâmetro interno do reservatório.
- Altura Inicial (%): é a altura de água inicial, em relação a altura total útil do reservatório, que será usada quando se optar pela simulação da operação do sistema (Adução + Consumo)

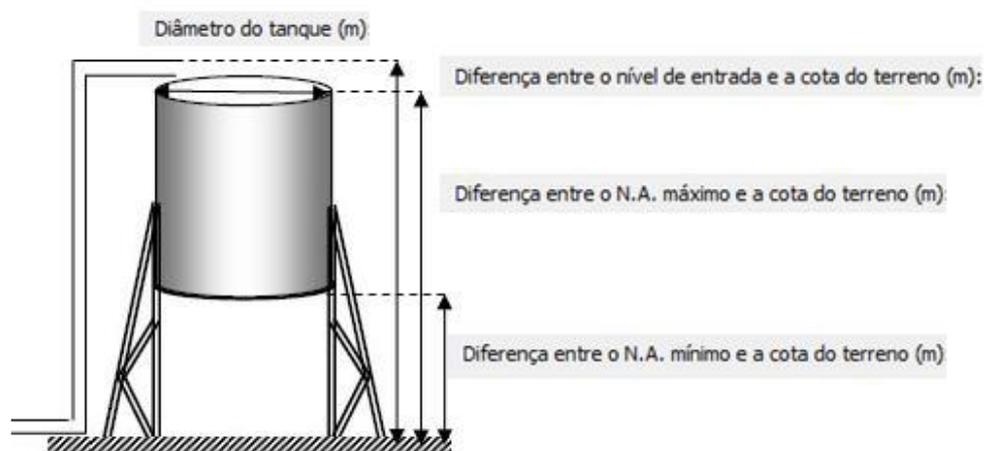


Figura 32: Exemplo de um reservatório

Fonte: Manual UFC

Dados do Reservatório Circular de nível variável

Diferença entre o N.A. mínimo e a cota do terreno (m):

Diferença entre o N.A. máximo e a cota do terreno (m):

Diferença entre o nível de entrada e a cota do terreno (m):

Diâmetro do tanque (m):

Altura Inicial (%):

Nome do tanque:

OK Dimensionar

Figura 33: Dados de entrada de um reservatório
 Fonte: Manual UFC

redimensionar tanque

H

D

Volume reservatório

Volume consumo diário

$\frac{H}{D}$

Diferença entre o N.A. mínimo e a cota do terreno (m):

OK

Figura 34: Dados de entrada de um reservatório
 Fonte: Manual UFC

O UFC-4 (otimizador por Algoritmo genético) foi desenvolvido especificamente para aplicar a técnica dos algoritmos genéticos em redes de abastecimento de água, cujo objetivo é a obtenção da rede de menor custo e que

satisfaz as restrições hidráulicas impostas. Esse modelo foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação DELPHI.

O UFC-4 realiza o dimensionamento de redes por dois métodos distintos (figura 35): o primeiro é o dimensionamento pela pressão mínima e o segundo é a otimização por algoritmo genético, onde se busca um menor diâmetro possível que atenda aos valores de vazão e pressão estabelecidos, garantindo um menor custo. No programa UFC-4 pode-se limitar a velocidade máxima, a perda de carga limite, a pressão mínima e a pressão máxima (figura 35).

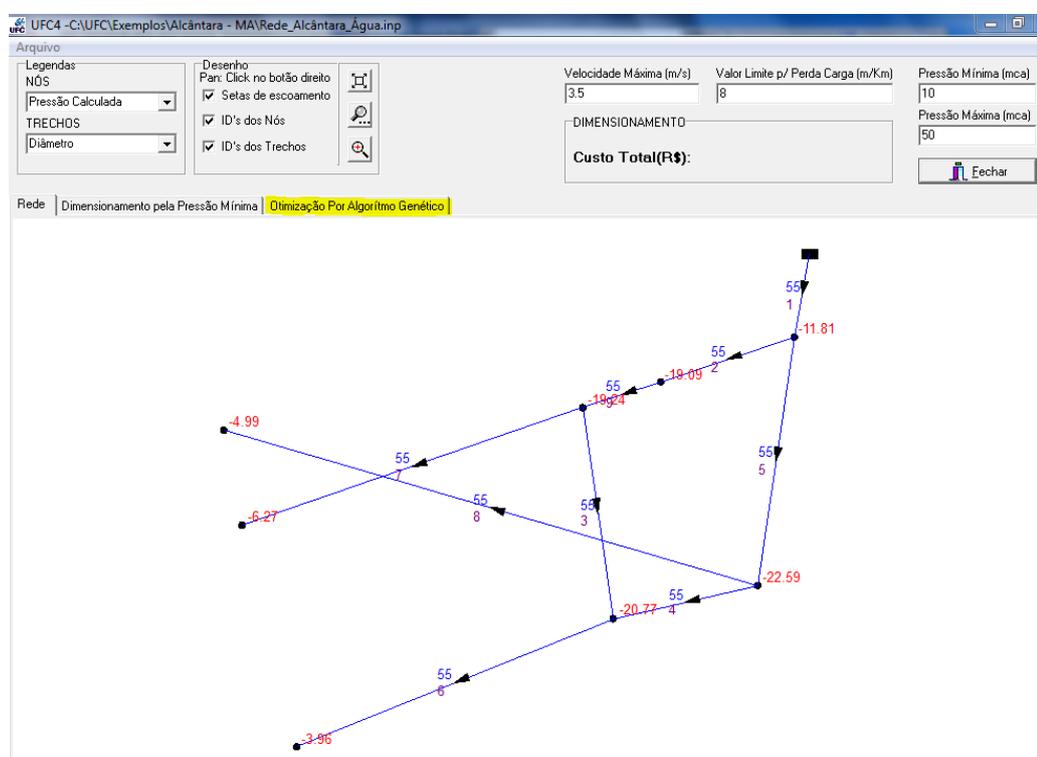


Figura 35: Layout UFC-4 dos dados de entrada de restrição
Fonte: Manual UFC-4

3.11.4.1 Critério de limite para a perda de carga unitária

Apesar de não ser uma restrição hidráulica recomendada pela Norma NBR 12218/1994, é comum projetistas e companhias de Saneamento, no Brasil, adotarem como critério extra de dimensionamento, um valor limite para a perda de carga unitária. É comum estabelecer um valor entre 8 e 10 m/Km (figura 36).

Visando satisfazer esse critério você deve habilitar onde a seta 1 da figura 36 está apontando (considerar o valor limite de perda de carga).

- 1) Considerar valor limite para perda de carga após a otimização;
- 2) Otimizar.

Legendas:
NÓS
Pressão Calculada
TRECHOS
Diâmetro

Desenho
Par: Click no botão direito
 Setas de escoamento
 ID's dos Nós
 ID's dos Trechos

Velocidade Máxima (m/s): 3.5
Valor Limite p/ Perda Carga (m/Km): 8

Otimização por Algoritmo Genético
Custo Total(R\$): 17141.94

Rede | Dimensionamento pela Pressão Mínima | **Otimização Por Algoritmo Genético**

Dados Iniciais | Redes Hidráulicamente Possíveis | Gráfico

Opções:
 População de Diâmetros Inicial: 400
 Tipo de Seleção: Torneio
 Taxa de Crossover(%): 95
 Taxa de Mutação(%): 0.5
 Número de Gerações: 100

Otimizar (seta 2)
 Salvar inp
 Salvar Gráfico
 Relatório

Opções de otimização:
 Desconsiderar valor limite para a perda de carga
 Considerar valor limite para a perda de carga após a otimização (seta 1)

| Trecho | Comprimento(m) | Diâmetro(mm) | Perda de Carga(m/km) | Velocidade(m/s) |
|--------|----------------|--------------|----------------------|-----------------|
| 1 | 34.10 | 100 | 27.74 | 1.85 |
| 2 | 56.31 | 77.2 | 17.04 | 1.18 |
| 3 | 85.81 | 54.6 | 0.33 | 0.10 |
| 4 | 59.23 | 54.6 | 25.89 | 1.18 |
| 5 | 101.01 | 100 | 7.67 | 0.90 |
| 6 | 136.46 | 54.6 | 4.10 | 0.42 |
| 7 | 144.06 | 54.6 | 4.51 | 0.44 |
| 8 | 222.17 | 54.6 | 9.68 | 0.68 |
| 9 | 32.79 | 54.6 | 40.29 | 1.51 |

| Nó | Cota (m) | Pressão Estática (r) |
|----|----------|----------------------|
| 1 | 50.65 | 14.33 |
| 2 | 46.21 | 18.77 |
| 3 | 47.42 | 17.56 |
| 4 | 50.11 | 14.87 |
| 5 | 30.07 | 34.91 |
| 6 | 32.62 | 32.36 |
| 7 | 30.44 | 34.54 |
| 8 | 47.84 | 17.14 |
| 9 | 61.91 | 3.07 |

Custo da Rede (
17141.9

Figura 36: Resultados pelo otimização por algoritmo genérico
 Fonte: Manual UFC

Ao dimensionar a rede considerando o limite de perda de carga (entre 8 a 10 m/km), após a otimização, o programa irá aumentar os diâmetros em comparação quando se desconsidera o valor limite de perda de carga. Isto ocorre pois para se limitar a perda de carga, temos que diminuir a velocidade e consequentemente aumentar o diâmetro. Observa-se que a rede fica mais cara, portanto, o usuário deve decidir se usará ou não o valor limite da perda de carga como critério de dimensionamento, considerando que o critério de limite da perda de carga não está na norma vigente (NBR 12218/1994).

3.11.4.2 Critério de verificação da precisão do dimensionamento

Econômico

O Algoritmo Genético é um método de otimização baseado na geração de uma série de redes de diversos diâmetros e posterior seleção da mais econômica. As variáveis mais importantes a serem estabelecidas é a população de diâmetros inicial e o número de gerações.

A técnica dos algoritmos genéticos (figura 37) permitiu obter, após um número fixo de gerações, além da solução de mínimo custo, um conjunto final de soluções que torna possível ao tomador de decisões escolher entre alternativas com similaridade de preço, considerando na análise outros critérios de avaliação.

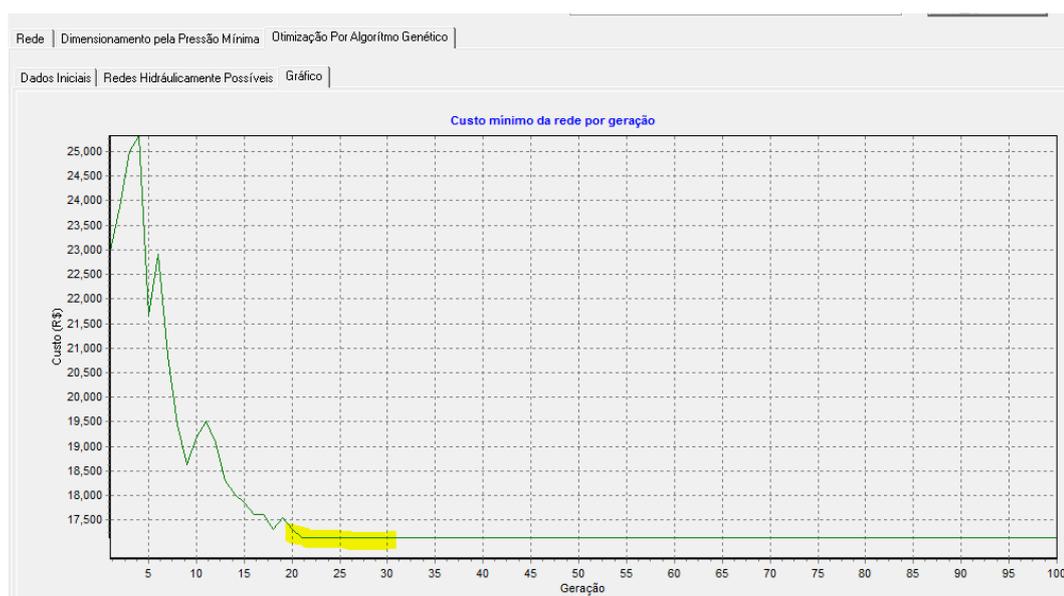


Figura 37: Gráfico de custo mínimo por geração

Fonte: Manual do UFC

Observa-se que tem que ser estabelecido, após um certo número de gerações (no caso acima 22 gerações), um patamar mínimo e inalterado para o usuário ter confiança de que o processo conseguiu determinar uma rede de custo mínimo. Caso este patamar não tenha sido alcançado, o usuário deve aumentar o valor do número de gerações, até estabelecer este patamar.

4 – METODOLOGIA E RESULTADOS

Foram estudadas duas redes de distribuição de água, obtidas da literatura e que são descritas a seguir.

4.1 Rede Setor Secundário

A rede de distribuição de água Setor Secundário¹ (figura 38) e (tabela 5) possui 24 trechos (T1 a T24) e 20 nós (nó 1 a nó 20), sendo abastecida por através de um reservatório de nó fixo na origem, com a cota piezométrica fixa variando um pouco de programa para o outro e uma pressão mínima dinâmica de 15 m.c.a ao ponto mais crítico da rede. A rede foi simulada por quatro programas: RedemWeb, Epanet, Lenhsnet e UFC-4, o que será explicado posteriormente.

Tabela 5: Descrição da rede do Setor Secundário

| Descrição da rede | |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Nº de nós | 20 |
| Nº de reservatórios | 1 |
| Nº de trechos | 24 |
| Nº de anéis | 4 |
| Unidade de vazão | LPS (L/s) |
| Fórmula de perda de carga | Darcy-Weissbach (fórmula universal) |

¹Rede Setor Secundário que tem como base a tese de doutorado de Roberta Macêdo Marques Gouveia, UFP, 2012.

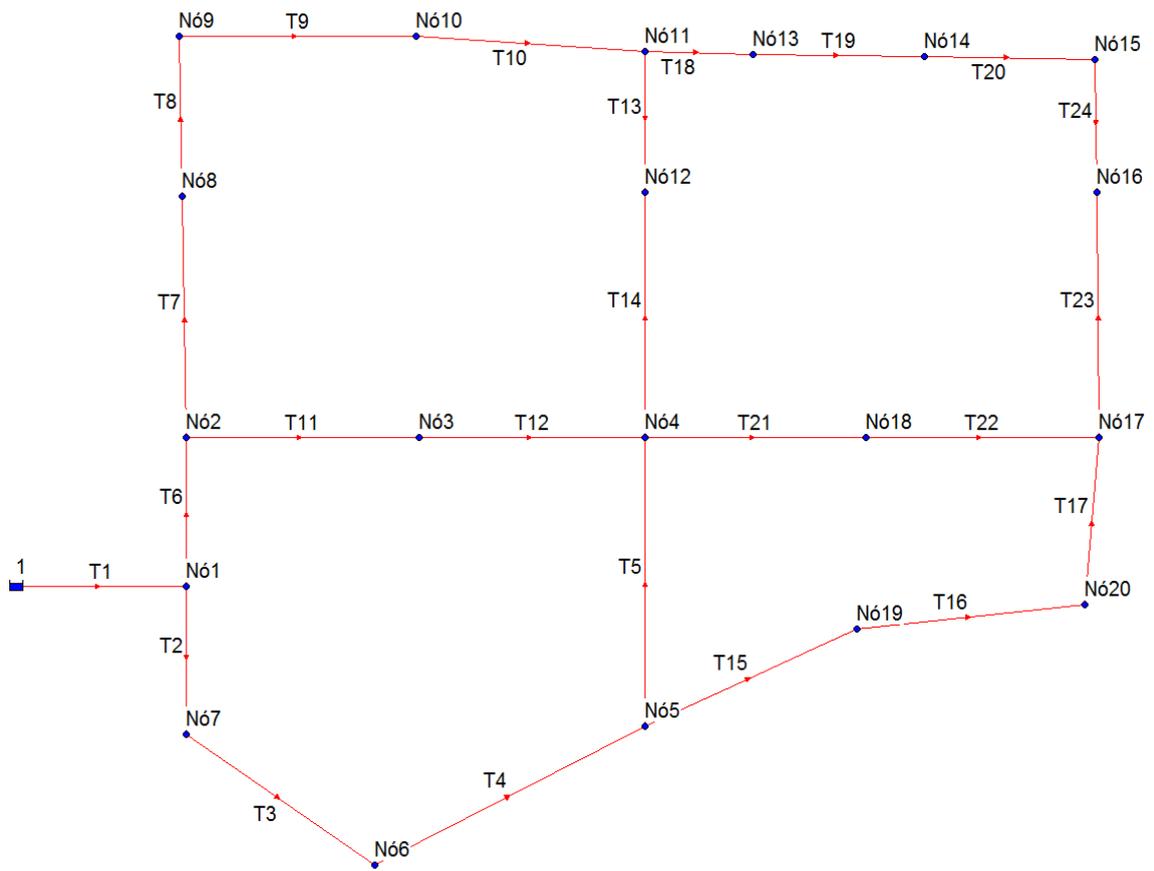


Figura 23: Representação da rede Setor Secundário
 Fonte: Programa Epanet

4.2 Rede Bonito de Minas

A rede de distribuição de água Bonito de Minas² (figura 39) e (tabela 6) possui 57 trechos (T1 a T57) e 44 nós (N1 a N 44), sendo abastecida por gravidade, não havendo a necessidade de instalação de bombas, através de um reservatório de nó fixo na origem, com a cota piezométrica fixa variando um pouco de programa para o outro e uma pressão mínima dinâmica de 15 m.c.a ao ponto mais crítico da rede. A rede foi simulada por quatro programas: RedemWeb, Epanet, Lenhsnet e UFC-4 que será explicado posteriormente.

Tabela 6: Descrição da rede Bonito de Minas

| Descrição da rede | |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Nº de nós | 44 |
| Nº de reservatórios | 1 |
| Nº de trechos | 57 |
| Nº de anéis | 13 |
| Unidade de vazão | LPS (L/s) |
| Fórmula de perda de carga | Darcy-Weissbach (fórmula universal) |

²Rede Bonito de Minas que tem como base a dissertação de mestrado de José Valmir Farias Maia Junior, UFC, 2012.

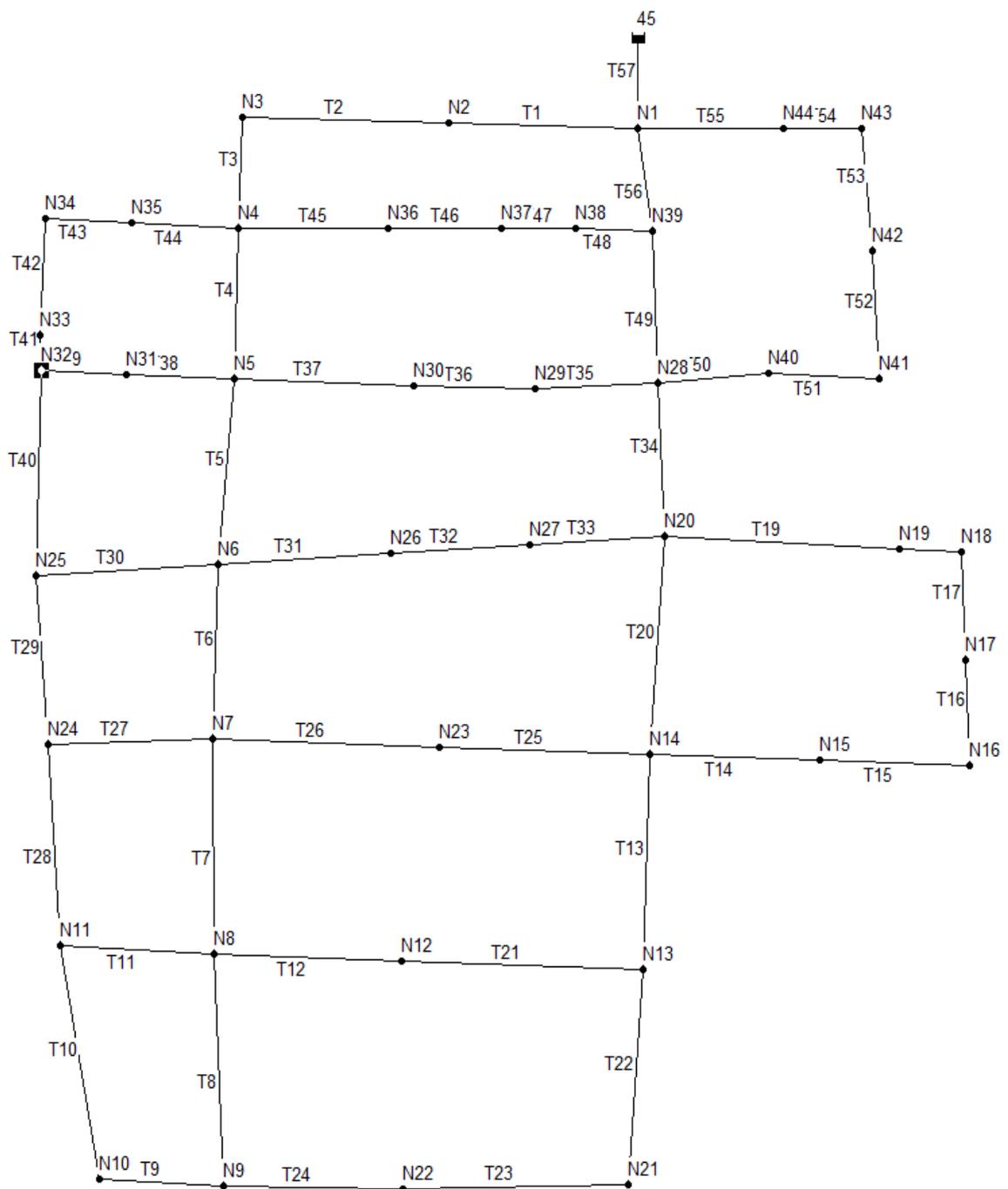


Figura 24: Representação da rede Bonito de Minas
 Fonte: Programa Epanet

4.3 Simulação pelo RedemWeb

Inicialmente para os cálculos somou-se a vazão de cada trecho de chegada em cada nó e dividiu-se a vazão pelo número de trechos de saída de cada nó até o último nó. Verificou-se em todos os nós que a quantidade de entrada é igual a de

saída (princípio da conservação de massa). Após preencher as 4 janelas do programa, onde na janela superior à esquerda pede-se: o número de iterações, nó escolhido para ser a pressão inicial (o nó a ser escolhido é o de menor pressão), carga de pressão no nó escolhido, tolerância de vazão, tolerância de perda de carga, tipo de tubulação, e fórmula de perda de carga a ser escolhida. E na janela superior a direita pede: os nós e as cotas topográficas. E na janela abaixo das descritas acima pede: os trechos, nó de montante, nó de jusante, comprimento, diâmetro, vazão, coeficiente de rugosidade C e a rugosidade absoluta ϵ . E a última janela localizada na parte inferior da tela pede: o número de anéis e o sentido de cada trecho. Feita todas as etapas o programa estará pronto para calcular a rede se todas as etapas forem feitas corretamente. Os cálculos das simulações foram feitas por iterações devidamente explicadas no item 3.9.3.

O dimensionamento da rede foi ajustado pela pressão mínima de 15 m.c.a no ponto (nó) mais crítico em ambas as redes.

O programa RedemWeb é de fácil manuseio, porém ele possui algumas limitações como: a não representação do esquema do desenho, a altura do reservatório, o trecho entre o reservatório e o nó, entrada do preço por metro das tubulações e a perda de carga nas tubulações. O cálculo entre o reservatório e o primeiro nó deverá ser feito manualmente ou com a ajuda de outros programas.

Após as simulações foram ajustados os diâmetros de modo que as velocidades em cada trecho fossem menores que a velocidade limite máxima ($V_{m\acute{a}x}(m/s) = 0,60 + 1,5D(m)$) e que as vazões fossem menores que seus limites para cada diâmetro de acordo com a tabela 3.

O critério usado pelo programa RedemWeb na definição dos diâmetros resulta em baixas velocidades e conseqüentemente em baixas perdas de carga. Porém, esses diâmetros acabam sendo maiores e isso acaba acarretando maiores custos das tubulações.

4.3.1 Rede Setor Secundário

As janelas preenchidas no RedemWeb antes da realização dos cálculos estão apresentadas nas tabelas 7, 8, 9 e 10.

Tabela 7: Descrição do cálculo da rede Setor Secundário no RedemWeb

| Forma de cálculo | Fórmula universal |
|--|-------------------|
| Número de interações | 40 |
| Nó escolhido para ser a pressão inicial | 14 |
| Carga de pressão no nó escolhido (m.c.a) | 15 |
| Tolerância na vazão (L/s) | 0,01 |
| Tolerância na perda de carga (m) | 0,01 |
| Tubulação | PVC |

Tabela 8: Dados dos nós da rede Setor Secundário

| Nó | Cota topográfica (m) | Consumo (L/s) | Nó | Cota topográfica (m) | Consumo (L/s) |
|-----|----------------------|---------------|----|----------------------|---------------|
| RNF | 25,29 | 208,50 | 14 | 6,0 | 4,2 |
| 1 | 4,5 | 0,0 | 15 | 5,0 | 2,6 |
| 2 | 5,0 | 7,4 | 16 | 3,0 | 5,2 |
| 3 | 4,5 | 5,2 | 17 | 3,5 | 61,9 |
| 4 | 5,0 | 4,7 | 18 | 6,0 | 7,9 |
| 5 | 3,5 | 4,2 | 19 | 3,5 | 2,6 |
| 6 | 3,5 | 7,4 | 20 | 3,5 | 58,3 |
| 7 | 3,5 | 10,5 | | | |
| 8 | 5,0 | 5,2 | | | |
| 9 | 6,0 | 5,2 | | | |
| 10 | 6,0 | 6,0 | | | |
| 11 | 6,0 | 2,6 | | | |
| 12 | 6,0 | 3,2 | | | |
| 13 | 6,0 | 4,2 | | | |

Tabela 9: Dados dos parâmetros hidráulicos dos trechos da rede Setor Secundário

| Trecho | Nó de montante | Nó de jusante | L (m) | D (mm) | Q (L/s) | C | ϵ (mm) |
|--------|----------------|---------------|-------|--------|---------|-----|-----------------|
| 1 | R | 1 | 220 | 500 | 208,50 | 130 | 0,0015 |
| 2 | 1 | 7 | 190 | 400 | 104,3 | 130 | 0,25 |
| 3 | 7 | 6 | 295 | 350 | 93,8 | 130 | 0,25 |
| 4 | 6 | 5 | 390 | 350 | 86,4 | 130 | 0,25 |
| 5 | 4 | 5 | 370 | 75 | 25 | 150 | 0,0015 |
| 6 | 1 | 2 | 190 | 350 | 104,2 | 130 | 0,25 |
| 7 | 2 | 8 | 310 | 150 | 48,4 | 130 | 0,25 |
| 8 | 8 | 9 | 205 | 150 | 43,2 | 130 | 0,25 |
| 9 | 9 | 10 | 305 | 100 | 38 | 150 | 0,0015 |
| 10 | 10 | 11 | 295 | 75 | 32 | 150 | 0,0015 |
| 11 | 2 | 3 | 300 | 350 | 48,4 | 130 | 0,25 |
| 12 | 3 | 4 | 290 | 75 | 43,2 | 150 | 0,0015 |
| 13 | 11 | 12 | 180 | 200 | 14,7 | 130 | 0,25 |
| 14 | 4 | 12 | 315 | 250 | 11,5 | 130 | 0,25 |
| 15 | 5 | 19 | 300 | 350 | 107,2 | 130 | 0,25 |
| 16 | 19 | 20 | 295 | 350 | 104,6 | 130 | 0,25 |
| 17 | 20 | 17 | 215 | 300 | 46,3 | 130 | 0,25 |
| 18 | 11 | 13 | 140 | 150 | 14,7 | 130 | 0,25 |
| 19 | 13 | 14 | 220 | 150 | 10,5 | 130 | 0,25 |
| 20 | 14 | 15 | 220 | 100 | 6,3 | 150 | 0,0015 |
| 21 | 4 | 18 | 285 | 250 | 25 | 130 | 0,25 |
| 22 | 18 | 17 | 300 | 300 | 17,1 | 130 | 0,25 |
| 23 | 16 | 17 | 315 | 100 | 1,5 | 150 | 0,0015 |
| 24 | 15 | 16 | 170 | 75 | 3,7 | 150 | 0,0015 |

Onde:

T → Trecho

M → nó montante do trecho

J → nó jusante do trecho

L → Comprimento do trecho

D→ Diâmetro do trecho

Q→ Vazão inicial adotada

C→ Coeficiente de rugosidade de Hazen-Willians

ϵ → Rugosidade absoluta

Tabela 10: Sentido de cada trecho em cada anel da rede Setor Secundário

| Anel 1 | Anel 2 | Anel 3 | Anel 4 |
|--------|--------|--------|--------|
| Trecho | Trecho | Trecho | Trecho |
| -23 | -14 | 12 | 21 |
| 24 | 13 | 11 | 22 |
| 20 | 10 | 6 | 17 |
| 19 | 9 | -2 | -16 |
| 18 | 8 | -3 | -15 |
| -13 | 7 | -4 | -5 |
| 14 | -11 | 5 | |
| -21 | 12 | | |
| -22 | | | |

Obs.: O sentido + ou – de cada trecho está explicado no item 3.9.3 e na figura 18.

Os resultados calculados estão apresentados nas tabelas 11 e 12.

A figura 40 demonstra como os resultados são gerados pelo programa.

| Resultado × | | | | | | |
|---|-------------|------------------|-------------------------|--------|---------------|---------------|
| Pela fórmula de Fórmula Universal para a perda de carga, depois de 26 iterações, temos: | | | | | | |
| Trecho | Vazão (l/s) | Velocidade (m/s) | Velocidade Máxima (m/s) | Junção | Cota Piez (m) | Pressão (mca) |
| 2 | 111.44 | 0.89 | 1.2 | 1 | 24.84 | 20.34 |
| 3 | 100.94 | 1.05 | 1.13 | 2 | 24.3 | 19.3 |
| 4 | 93.54 | 0.97 | 1.13 | 3 | 23.76 | 19.26 |
| 5 | 2.17 | 0.49 | 0.71 | 4 | 23.37 | 18.37 |
| 6 | 97.06 | 1.01 | 1.13 | 5 | 22.53 | 19.03 |
| 7 | 14.07 | 0.8 | 0.83 | 6 | 23.58 | 20.08 |
| 8 | 8.87 | 0.5 | 0.83 | 7 | 24.49 | 20.99 |
| 9 | 3.67 | 0.47 | 0.75 | 8 | 22.01 | 17.01 |
| 10 | -2.33 | 0.53 | 0.71 | 9 | 21.6 | 15.6 |
| 11 | 75.59 | 0.79 | 1.13 | 10 | 21.15 | 15.15 |
| 12 | 1.73 | 0.39 | 0.71 | 11 | 21.89 | 15.89 |
| 13 | -16.92 | 0.54 | 0.9 | 12 | 22.2 | 16.2 |
| 14 | 43.12 | 0.88 | 0.98 | 13 | 21.36 | 15.36 |
| 15 | 91.51 | 0.95 | 1.13 | 14 | 21 | 15 |
| 16 | 88.91 | 0.92 | 1.13 | 15 | 20.56 | 15.56 |
| 17 | 61.99 | 0.88 | 1.05 | 16 | 20.44 | 17.44 |
| 18 | 11.99 | 0.68 | 0.83 | 17 | 19.23 | 15.73 |
| 19 | 7.79 | 0.44 | 0.83 | 18 | 22.38 | 16.38 |
| 20 | 3.59 | 0.46 | 0.75 | 19 | 21.77 | 18.27 |
| 21 | 43.4 | 0.88 | 0.98 | 20 | 19.81 | 16.31 |
| 22 | 35.5 | 0.72 | 0.98 | | | |
| 23 | 4.21 | 0.54 | 0.75 | | | |
| 24 | 0.99 | 0.22 | 0.71 | | | |

Figura 25: Resultados dos parâmetros hidráulicas dos nós e trechos
 Fonte: Programa RedemWeb

Tabela 11: Resultados dos parâmetros hidráulicos dos trechos da rede Setor Secundário pelo RedemWeb

| Trecho | Vazão (L/s) | Velocidade (m/s) | Velocidade máxima (m/s) | Perda de carga (m/km) |
|--------|-------------|------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1 | 208,50 | 1,06 | 1,35 | 2,06 |
| 2 | 111,44 | 0,89 | 1,20 | 1,84 |
| 3 | 100,94 | 1,05 | 1,13 | 3,08 |
| 4 | 93,54 | 0,97 | 1,13 | 2,69 |
| 5 | 2,17 | 0,49 | 0,71 | 2,27 |
| 6 | 97,06 | 1,01 | 1,13 | 2,84 |
| 7 | 14,07 | 0,80 | 0,83 | 7,39 |
| 8 | 8,87 | 0,50 | 0,83 | 2,00 |
| 9 | 3,67 | 0,47 | 0,75 | 1,48 |
| 10 | 2,33 | 0,53 | 0,71 | 2,51 |
| 11 | 75,59 | 0,79 | 1,13 | 1,80 |
| 12 | 1,73 | 0,39 | 0,71 | 1,34 |
| 13 | 16,92 | 0,54 | 0,90 | 1,72 |
| 14 | 43,12 | 0,88 | 0,98 | 3,71 |
| 15 | 91,51 | 0,95 | 1,13 | 2,53 |
| 16 | 88,91 | 0,92 | 1,13 | 6,64 |
| 17 | 61,99 | 0,88 | 1,05 | 2,70 |
| 18 | 11,99 | 0,68 | 0,83 | 3,79 |
| 19 | 7,79 | 0,44 | 0,83 | 1,64 |
| 20 | 3,59 | 0,46 | 0,75 | 2,00 |
| 21 | 43,4 | 0,88 | 0,98 | 3,47 |
| 22 | 35,5 | 0,72 | 0,98 | 10,50 |
| 23 | 4,21 | 0,54 | 0,75 | 3,84 |
| 24 | 0,99 | 0,22 | 0,71 | 0,71 |

Estão destacados na tabela 11 os valores das velocidades que ficaram abaixo de 0,60 m/s (muito comum na prática de dimensionamento de redes de distribuição) imposta pela norma da NBR 12218/1994. Nesses trechos não foi possível atingir a velocidade mínima de norma, sem que outros parâmetros fossem

alterados, como pressão mínima, diâmetro mínimo e perda de carga de até 10 m/km (recomendado, não é critério de norma).

Tabela 12: Resultados dos parâmetros hidráulicos dos nós da rede Setor Secundário pelo RedemWeb

| Junção | Cota Piezométrica (m) | Pressão (m.c.a) |
|--------|-----------------------|-----------------|
| 1 | 24,84 | 20,34 |
| 2 | 24,30 | 19,30 |
| 3 | 23,76 | 19,26 |
| 4 | 23,37 | 18,37 |
| 5 | 22,53 | 19,03 |
| 6 | 23,58 | 20,08 |
| 7 | 24,49 | 20,99 |
| 8 | 22,01 | 17,01 |
| 9 | 21,60 | 15,60 |
| 10 | 21,15 | 15,15 |
| 11 | 21,89 | 15,89 |
| 12 | 22,20 | 16,20 |
| 13 | 21,36 | 15,36 |
| 14 | 21,00 | 15,00 |
| 15 | 20,56 | 15,56 |
| 16 | 20,44 | 17,44 |
| 17 | 19,23 | 15,73 |
| 18 | 22,38 | 16,38 |
| 19 | 21,77 | 18,27 |
| 20 | 19,81 | 16,31 |

O gasto total das tubulações pelo programa RedemWeb foi de R\$ 1.469.251,50. O gasto com cada diâmetro está demonstrado na tabela 13, que se baseia nos dados das tubulações apresentados na tabela 14. O custo por metro das tubulações não leva em conta a mão de obra.

O comprimento total de rede foi de 6.315 metros, subdividido em (tabela 13):

Tabela 13: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Setor Secundário pelo RedemWeb

| D (mm) | L (m) | Custo/m (R\$) | Custo total (R\$) |
|--------|-------|---------------|-------------------|
| 75 | 1125 | 48,57 | 54,641.25 |
| 100 | 840 | 68,19 | 57,279.60 |
| 150 | 875 | 101,81 | 89,083.75 |
| 200 | 180 | 153,22 | 27,579.60 |
| 250 | 600 | 214,34 | 128,604.00 |
| 300 | 515 | 290,36 | 149,535.40 |
| 350 | 1770 | 387,95 | 686,671.50 |
| 400 | 190 | 526,38 | 100,012.20 |
| 500 | 220 | 799,14 | 175,810.80 |

Tabela 14: Dados dos tubos

| Diâmetro (mm) | ϵ (mm) | Tipo | Custo (R\$/m) |
|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| 75 | 0,0015 | PVC | 48,57 |
| 100 | 0,0015 | PVC | 68,19 |
| 150 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 101,81 |
| 200 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 153,22 |
| 250 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 214,34 |
| 300 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 290,36 |
| 350 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 387,95 |
| 400 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 526,38 |
| 500 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 799,14 |

Os dados de custos da tabela 14 se baseiam no programa UFC de Marco Aurélio Holanda, no ano de 2014.

4.3.2 Rede Bonito de Minas

As janelas preenchidas no RedemWeb antes da realização dos cálculos estão apresentadas nas tabelas 15, 16 e 17.

Tabela 15: Descrição do cálculo da rede Bonito de Minas no RedemWeb

| Forma de cálculo | Fórmula universal |
|--|-------------------|
| Número de interações | 50 |
| Nó escolhido para ser a pressão inicial | 43 |
| Carga de pressão no nó escolhido (m.c.a) | 15 |
| Tolerância na vazão (L/s) | 0,01 |
| Tolerância na perda de carga (m) | 0,01 |
| Tubulação | PVC |

Tabela 16: Dados dos nós da rede Bonito de Minas pelo RedemWeb

| Nó | Cota topográfica (m) | Consumo (L/s) |
|-----|----------------------|---------------|
| RNF | 530,35 | 131,10 |
| 1 | 514,37 | 4,76 |
| 2 | 511,67 | 3,01 |
| 3 | 508,94 | 2,38 |
| 4 | 509,01 | 3,86 |
| 5 | 508,96 | 4,80 |
| 6 | 509,18 | 5,46 |
| 7 | 509,00 | 5,74 |
| 8 | 506,95 | 5,78 |
| 9 | 503,32 | 4,00 |
| 10 | 503,29 | 2,65 |
| 11 | 506,72 | 4,28 |
| 12 | 506,32 | 3,26 |

| Nó | Cota topográfica (m) | Consumo (L/s) |
|----|----------------------|---------------|
| 13 | 505,46 | 4,99 |
| 14 | 509,8 | 6,00 |
| 15 | 510,02 | 2,44 |
| 16 | 509,88 | 1,91 |
| 17 | 511,44 | 1,56 |
| 18 | 512,40 | 1,26 |
| 19 | 512,35 | 2,26 |
| 20 | 511,96 | 5,74 |
| 21 | 500,18 | 3,29 |
| 22 | 503,24 | 3,08 |
| 23 | 509,45 | 3,32 |
| 24 | 507,48 | 3,87 |
| 25 | 507,52 | 4,27 |
| 26 | 510,30 | 2,37 |
| 27 | 511,08 | 2,09 |
| 28 | 512,86 | 4,17 |
| 29 | 512,06 | 2,03 |
| 30 | 510,84 | 2,29 |
| 31 | 508,21 | 1,50 |
| 32 | 507,67 | 2,58 |
| 33 | 507,76 | 1,11 |
| 34 | 508,13 | 1,51 |
| 35 | 508,29 | 1,47 |
| 36 | 510,75 | 2,00 |
| 37 | 511,87 | 1,42 |
| 38 | 513,26 | 1,32 |
| 39 | 513,84 | 2,77 |
| 40 | 513,23 | 1,69 |
| 41 | 513,37 | 1,78 |
| 42 | 514,08 | 1,83 |

| Nó | Cota topográfica (m) | Consumo (L/s) |
|----|----------------------|---------------|
| 43 | 514,63 | 1,50 |
| 44 | 514,46 | 1,70 |

Tabela 17: Dados dos trechos da rede Bonito de Minas pelo RedemWeb

| Trecho | Nó de montante | Nó de jusante | L (m) | D (mm) | Q (L/s) | C | ϵ (mm) |
|--------|----------------|---------------|--------|--------|---------|-----|-----------------|
| 1 | 1 | 2 | 92,45 | 250 | 42,00 | 130 | 0,25 |
| 2 | 2 | 3 | 100,54 | 250 | 38,99 | 130 | 0,25 |
| 3 | 3 | 4 | 52,02 | 250 | 36,61 | 130 | 0,25 |
| 4 | 4 | 5 | 70,13 | 250 | 23,58 | 130 | 0,25 |
| 5 | 5 | 6 | 87,09 | 200 | 13,00 | 130 | 0,25 |
| 6 | 6 | 7 | 81,24 | 200 | 4,77 | 130 | 0,25 |
| 7 | 7 | 8 | 100,7 | 150 | 7,00 | 130 | 0,25 |
| 8 | 8 | 9 | 108,39 | 75 | 2,00 | 150 | 0,0015 |
| 9 | 10 | 9 | 60,56 | 75 | 1,37 | 150 | 0,0015 |
| 10 | 11 | 10 | 110,66 | 75 | 4,02 | 150 | 0,0015 |
| 11 | 8 | 11 | 75,05 | 75 | 2,46 | 150 | 0,0015 |
| 12 | 12 | 8 | 90,96 | 75 | 3,24 | 150 | 0,0015 |
| 13 | 14 | 13 | 100,62 | 200 | 18,49 | 130 | 0,25 |
| 14 | 15 | 14 | 83,03 | 100 | 16,99 | 150 | 0,0015 |
| 15 | 16 | 15 | 73,05 | 75 | 19,43 | 150 | 0,0015 |
| 16 | 17 | 16 | 49,35 | 75 | 21,34 | 150 | 0,0015 |
| 17 | 18 | 17 | 50,52 | 100 | 22,9 | 150 | 0,0015 |
| 18 | 19 | 18 | 30,2 | 100 | 24,16 | 150 | 0,0015 |
| 19 | 20 | 19 | 114,51 | 150 | 26,42 | 130 | 0,25 |
| 20 | 20 | 14 | 102,15 | 250 | 26,00 | 130 | 0,25 |
| 21 | 13 | 12 | 117,7 | 100 | 6,50 | 150 | 0,0015 |
| 22 | 13 | 21 | 100,89 | 150 | 7,00 | 130 | 0,25 |
| 23 | 21 | 22 | 109,73 | 100 | 3,71 | 150 | 0,0015 |
| 24 | 22 | 9 | 87,58 | 75 | 0,63 | 150 | 0,0015 |
| 25 | 14 | 23 | 102,33 | 100 | 18,50 | 150 | 0,0015 |

| | | | | | | | |
|----|-----|----|--------|-----|--------|-----|--------|
| 26 | 23 | 7 | 110,46 | 75 | 15,18 | 150 | 0,0015 |
| 27 | 7 | 24 | 80,69 | 100 | 7,21 | 150 | 0,0015 |
| 28 | 24 | 11 | 94,17 | 100 | 5,84 | 150 | 0,0015 |
| 29 | 25 | 24 | 78,78 | 75 | 2,50 | 150 | 0,0015 |
| 30 | 25 | 6 | 89,45 | 75 | 2,23 | 150 | 0,0015 |
| 31 | 6 | 26 | 83,81 | 75 | 5,00 | 150 | 0,0015 |
| 32 | 26 | 27 | 67,80 | 100 | 2,63 | 150 | 0,0015 |
| 33 | 27 | 20 | 65,86 | 100 | 0,54 | 150 | 0,0015 |
| 34 | 28 | 20 | 71,76 | 300 | 57,62 | 130 | 0,25 |
| 35 | 29 | 28 | 59,82 | 100 | 8,29 | 150 | 0,0015 |
| 36 | 30 | 29 | 59,43 | 100 | 10,32 | 150 | 0,0015 |
| 37 | 5 | 30 | 87,10 | 75 | 12,61 | 150 | 0,0015 |
| 38 | 31 | 5 | 52,69 | 100 | 6,83 | 150 | 0,0015 |
| 39 | 32 | 31 | 41,58 | 75 | 8,33 | 150 | 0,0015 |
| 40 | 32 | 25 | 96,52 | 100 | 9,00 | 150 | 0,0015 |
| 41 | 33 | 32 | 16,38 | 100 | 19,91 | 150 | 0,0015 |
| 42 | 34 | 33 | 54,48 | 100 | 21,02 | 150 | 0,0015 |
| 43 | 35 | 42 | 42,17 | 150 | 22,53 | 130 | 0,25 |
| 44 | 4 | 35 | 51,97 | 150 | 24,00 | 130 | 0,25 |
| 45 | 36 | 4 | 73,15 | 100 | 14,83 | 150 | 0,0015 |
| 46 | 37 | 36 | 54,75 | 150 | 16,83 | 130 | 0,25 |
| 47 | 38 | 37 | 36,35 | 150 | 18,25 | 130 | 0,25 |
| 48 | 39 | 38 | 37,66 | 150 | 19,57 | 130 | 0,25 |
| 49 | 39 | 28 | 71,06 | 300 | 20,00 | 130 | 0,25 |
| 50 | 40 | 28 | 53,87 | 75 | 33,50 | 150 | 0,0015 |
| 51 | 41 | 40 | 54,00 | 75 | 35,19 | 150 | 0,0015 |
| 52 | 42 | 41 | 59,79 | 75 | 36,97 | 150 | 0,0015 |
| 53 | 43 | 42 | 57,46 | 75 | 38,80 | 150 | 0,0015 |
| 54 | 44 | 43 | 38,67 | 100 | 40,30 | 150 | 0,0015 |
| 55 | 1 | 44 | 70,42 | 100 | 42,00 | 150 | 0,0015 |
| 56 | 1 | 39 | 42,34 | 350 | 42,03 | 130 | 0,25 |
| 57 | Res | 1 | 42,08 | 400 | 131,10 | 130 | 0,25 |

Após os cálculos, os resultados gerados estão apresentados nas tabelas 18 e 19.

Tabela 18: Resultado dos parâmetros hidráulicos dos trechos da rede Bonito de Minas pelo RedemWeb

| Trecho | Vazão (L/s) | Velocidade (m/s) | Velocidade máxima (m/s) |
|--------|-------------|------------------|-------------------------|
| 1 | 43,06 | 0,88 | 0,98 |
| 2 | 40,05 | 0,82 | 0,98 |
| 3 | 37,67 | 0,77 | 0,98 |
| 4 | 31,27 | 0,64 | 0,98 |
| 5 | 24,07 | 0,77 | 0,9 |
| 6 | 17,65 | 0,56 | 0,9 |
| 7 | 8,82 | 0,50 | 0,83 |
| 8 | 2,52 | 0,57 | 0,71 |
| 9 | 0,84 | 0,19 | 0,71 |
| 10 | 1,81 | 0,41 | 0,71 |
| 11 | 2,43 | 0,55 | 0,71 |
| 12 | 1,91 | 0,43 | 0,71 |
| 13 | 18,85 | 0,60 | 0,9 |
| 14 | 2,86 | 0,36 | 0,75 |
| 15 | 0,42 | 0,10 | 0,71 |
| 16 | 1,49 | 0,34 | 0,71 |
| 17 | 3,05 | 0,39 | 0,75 |
| 18 | 4,31 | 0,55 | 0,75 |
| 19 | 6,57 | 0,37 | 0,83 |
| 20 | 33,33 | 0,68 | 0,98 |
| 21 | 5,17 | 0,66 | 0,75 |
| 22 | 8,69 | 0,49 | 0,83 |
| 23 | 5,40 | 0,69 | 0,75 |
| 24 | 2,32 | 0,52 | 0,71 |
| 25 | 5,62 | 0,72 | 0,75 |
| 26 | 2,30 | 0,52 | 0,71 |

| Trecho | Vazão (L/s) | Velocidade (m/s) | Velocidade máxima (m/s) |
|--------|-------------|------------------|-------------------------|
| 27 | 5,39 | 0,69 | 0,75 |
| 28 | 3,66 | 0,47 | 0,75 |
| 29 | 2,14 | 0,48 | 0,71 |
| 30 | 1,93 | 0,44 | 0,71 |
| 31 | 0,97 | 0,22 | 0,71 |
| 32 | 3,34 | 0,42 | 0,75 |
| 33 | 5,43 | 0,69 | 0,75 |
| 34 | 51,07 | 0,72 | 1,05 |
| 35 | 5,94 | 0,76 | 0,75 |
| 36 | 3,91 | 0,50 | 0,75 |
| 37 | 1,62 | 0,37 | 0,71 |
| 38 | 4,01 | 0,51 | 0,75 |
| 39 | 2,51 | 0,57 | 0,71 |
| 40 | 4,48 | 0,57 | 0,75 |
| 41 | 4,55 | 0,58 | 0,75 |
| 42 | 5,66 | 0,72 | 0,75 |
| 43 | 7,17 | 0,41 | 0,83 |
| 44 | 8,64 | 0,49 | 0,83 |
| 45 | 6,10 | 0,78 | 0,75 |
| 46 | 8,10 | 0,46 | 0,83 |
| 47 | 9,52 | 0,54 | 0,83 |
| 48 | 10,84 | 0,61 | 0,83 |
| 49 | 63,9 | 0,90 | 1,05 |
| 50 | 2,73 | 0,62 | 0,71 |
| 51 | 1,04 | 0,24 | 0,71 |
| 52 | 0,74 | 0,17 | 0,71 |
| 53 | 2,57 | 0,58 | 0,71 |
| 54 | 4,07 | 0,52 | 0,75 |
| 55 | 5,77 | 0,73 | 0,75 |
| 56 | 77,2 | 0,80 | 1,13 |
| 57 | 131,10 | 1,04 | 1,20 |

Em destaque onde a velocidade foi abaixo de 0,60 m/s (muito comum na pratica em rede de distribuição) imposta pela norma da NBR 12218/1994. Nesses trechos não foram possíveis se alcançar a velocidade mínima de norma, para que outros parâmetros fossem alcançados como pressão mínima, diâmetro mínimo e perda de carga de até 10 m/km (recomendado, não é critério de norma).

Tabela 19: Resultados dos parâmetros hidráulicos dos nós da rede Bonito de Minas pelo RedemWeb

| Nó | Cota Piezométrica (m) | Pressão (m.c.a) |
|-----|-----------------------|-----------------|
| RNF | 532,57 | 0,00 |
| 1 | 529,96 | 15,59 |
| 2 | 529,65 | 17,98 |
| 3 | 529,36 | 20,42 |
| 4 | 529,23 | 20,22 |
| 5 | 529,1 | 20,14 |
| 6 | 528,79 | 19,61 |
| 7 | 528,62 | 19,62 |
| 8 | 528,40 | 21,45 |
| 9 | 527,85 | 24,53 |
| 10 | 527,81 | 24,52 |
| 11 | 528,06 | 21,34 |
| 12 | 528,63 | 22,31 |
| 13 | 529,12 | 23,66 |
| 14 | 529,33 | 19,53 |
| 15 | 529,25 | 19,23 |
| 16 | 529,24 | 19,36 |
| 17 | 529,29 | 17,85 |
| 18 | 529,35 | 16,95 |
| 19 | 529,42 | 17,07 |
| 20 | 529,54 | 17,58 |

| Nó | Cota Piezométrica (m) | Pressão (m.c.a) |
|----|-----------------------|-----------------|
| 21 | 528,91 | 28,73 |
| 22 | 528,35 | 25,11 |
| 23 | 528,92 | 19,47 |
| 24 | 528,26 | 20,78 |
| 25 | 528,53 | 21,01 |
| 26 | 528,84 | 18,54 |
| 27 | 528,98 | 17,90 |
| 28 | 529,67 | 16,81 |
| 29 | 529,36 | 17,30 |
| 30 | 529,23 | 18,39 |
| 31 | 528,97 | 20,76 |
| 32 | 528,81 | 21,14 |
| 33 | 528,86 | 21,10 |
| 34 | 529,07 | 20,94 |
| 35 | 529,52 | 21,23 |
| 36 | 529,58 | 18,83 |
| 37 | 529,68 | 17,81 |
| 38 | 529,76 | 16,50 |
| 39 | 529,88 | 16,04 |
| 40 | 529,48 | 16,25 |
| 41 | 529,46 | 16,09 |
| 42 | 529,46 | 15,38 |
| 43 | 529,63 | 15,00 |
| 44 | 529,70 | 15,24 |

O custo total de implantação das tubulações foi de R\$ 424.785,39. O gasto em cada diâmetro está demonstrado na tabela 20 de acordo com a tabela 14. O custo por metro das tubulações não leva em conta a mão de obra.

O comprimento total de rede foi de 4.153,96 m, subdivido conforme mostra a tabela 20.

Tabela 20: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Bonito de Minas pelo RedemWeb

| D (mm) | L (m) | Custo/m (R\$) | Custo total (R\$) |
|-----------|----------|------------------|----------------------|
| 75 | 1.371,90 | 48,57 | 66.633,18 |
| 100 | 1.323,59 | 68,19 | 90.255,60 |
| 150 | 539,00 | 101,81 | 54.875,59 |
| 200 | 268,95 | 153,22 | 41.208,52 |
| 250 | 417,29 | 214,34 | 89.441,94 |
| 300 | 142,82 | 290,36 | 41.469,22 |
| 350 | 48,33 | 387,95 | 18.749,62 |
| 400 | 42,08 | 526,38 | 22.150,07 |

4.4 Simulação pelo Epanet

O Epanet é um programa que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico explicado no item 4.2. Ele é então um programa de simulação e não de otimização. A sua simulação deve ser feita até que as características hidráulicas sejam atendidas pela norma da ABNT 12118/1994.

Após as simulações foram ajustados os diâmetros de modo que as velocidades, pressões máximas e mínimas atendessem os valores estabelecidos pela norma e que a perda de carga ficasse abaixo de 8m/km, que é indicado por alguns autores da área. Portanto, apesar das condições terem sido atendidas, provavelmente o dimensionamento não foi da forma mais otimizada e, conseqüentemente, a rede não será a mais barata possível.

4.4.1 Rede Setor Secundário

A representação da rede Setor Secundário no Epanet está descrita a seguir.

No simulador Epanet colocam-se os dados de entrada nos nós (figura 41): cota e demanda. E nos trechos (figura 42) os dados de entrada são: nó a montante, nó a jusante, comprimento, coeficiente de rugosidade, material e diâmetro. Depois

da simulação, obtêm-se os resultados de pressão e carga hidráulica nos nós (figura 41) e de vazão, velocidade, perda de carga e fator de resistência nos trechos (figura 42).

| Nó N64 x | |
|---|-------|
| Propriedade | Valor |
| *Identificador do Nó | N64 |
| Coordenada X | 0.00 |
| Coordenada Y | 0.00 |
| Descrição | |
| Zona | |
| *Cota | 5 |
| Consumo-Base | 4.7 |
| Padrão de Consumo | |
| Categorias de Consumo | 1 |
| Coef. do Emissor | |
| Qualidade Inicial | |
| Origem de Qualidade | |
| Consumo Corrente | 4.70 |
| Carga Hidráulica Total | 23.17 |
| Pressão | 18.17 |

Figura 26: Layout dos dados de entrada e resultado de um nó
 Fonte: Programa Epanet

| Trecho T14 | |
|-------------------------------|----------------|
| Propriedade | Valor |
| *Identificador do Trecho | T14 |
| *Nó Inicial | Nó4 |
| *Nó Final | Nó12 |
| Descrição | Rede projetada |
| Zona | PVC- |
| *Comprimento | 315 |
| *Diâmetro | 75 |
| *Rugosidade | 0.0015 |
| Coef. Perda de Carga Singular | 0 |
| Estado Inicial | open |
| Coef. Reação no Escoamento | |
| Coef. Reação na Parede | 0 |
| Vazão | 1.97 |
| Velocidade | 0.45 |
| Perda de Carga | 3.10 |
| Fator de Resistência | 0.023 |

Figura 27: Layout dos dados de entrada e resultado de um trecho
Fonte: Programa Epanet

Após ajustes nos diâmetros, de acordo com a norma da NBR 12218/1994 e na altura do reservatório, para que os parâmetros hidráulicos estejam de acordo com esta norma, como velocidade máxima de 3,5 m/s, pressão dinâmica mínima de 10 m.c.a, pressão estática máxima de 50 m.c.a, diâmetro mínimo na rede principal de 75 mm e com perda de carga unitária de até 8 m/km (não está imposto um limite na norma, mas especialistas indicam uma perda de carga máxima entre 8 a 10 m/km). A simulação no Epanet, depois de serem inseridos os dados de cota e demanda nos nós (tabela 21) e os dados de rugosidade, diâmetro e comprimento dos trechos (tabela 22) da rede Setor Secundário, forneceu os resultados de pressão e carga hidráulica nos nós mostrados na tabela 21. Os resultados nos trechos de vazão, velocidade, perda de carga e fator de atrito estão representados na tabela 23.

Tabela 21: Dados e resultados dos parâmetros hidráulicos dos nós da rede Setor Secundários pelo Epanet

| Nó | Cota (m) | Demanda (L/s) | Pressão (m.c.a) | Carga Hidráulica (m.c.a) |
|-----|----------|---------------|-----------------|--------------------------|
| RNF | 29,06 | 208,50 | 0,00 | 29,06 |
| 1 | 4,5 | 0,0 | 23,15 | 27,65 |
| 2 | 5,0 | 7,4 | 21,76 | 26,76 |
| 3 | 4,5 | 5,2 | 20,83 | 25,33 |
| 4 | 5,0 | 4,7 | 19,11 | 24,11 |
| 5 | 3,5 | 4,2 | 21,02 | 24,52 |
| 6 | 3,5 | 7,4 | 22,17 | 25,67 |
| 7 | 3,5 | 10,5 | 23,25 | 26,75 |
| 8 | 5,0 | 5,2 | 19,78 | 24,78 |
| 9 | 6,0 | 5,2 | 17,84 | 23,84 |
| 10 | 6,0 | 6,0 | 16,90 | 22,90 |
| 11 | 6,0 | 2,6 | 16,39 | 22,39 |
| 12 | 6,0 | 3,2 | 16,34 | 22,34 |
| 13 | 6,0 | 4,2 | 15,67 | 21,67 |
| 14 | 6,0 | 4,2 | 15,10 | 21,10 |
| 15 | 5,0 | 2,6 | 15,00 | 20,00 |
| 16 | 3,0 | 5,2 | 16,71 | 19,71 |
| 17 | 3,5 | 61,9 | 17,41 | 20,91 |
| 18 | 6,0 | 7,9 | 17,09 | 23,09 |
| 19 | 3,5 | 2,6 | 19,10 | 22,60 |
| 20 | 3,5 | 58,3 | 17,36 | 20,86 |

Tabela 22: Dados dos parâmetros hidráulicos dos trechos da rede Setor Secundário pelo Epanet

| Trecho | Nó montante | Nó jusante | L(m) | D (mm) | ϵ (mm) |
|--------|-------------|------------|------|--------|-----------------|
| 1 | R | 1 | 220 | 400 | 0,25 |
| 2 | 1 | 7 | 190 | 300 | 0,25 |
| 3 | 7 | 6 | 295 | 300 | 0,25 |
| 4 | 6 | 5 | 390 | 300 | 0,25 |
| 5 | 4 | 5 | 370 | 75 | 0,0015 |
| 6 | 1 | 2 | 190 | 350 | 0,25 |
| 7 | 2 | 8 | 310 | 200 | 0,25 |
| 8 | 8 | 9 | 205 | 200 | 0,25 |
| 9 | 9 | 10 | 305 | 200 | 0,25 |
| 10 | 10 | 11 | 295 | 200 | 0,25 |
| 11 | 2 | 3 | 300 | 300 | 0,25 |
| 12 | 3 | 4 | 290 | 300 | 0,25 |
| 13 | 12 | 11 | 180 | 75 | 0,0015 |
| 14 | 4 | 12 | 315 | 75 | 0,0015 |
| 15 | 5 | 19 | 300 | 250 | 0,25 |
| 16 | 19 | 20 | 295 | 250 | 0,25 |
| 17 | 20 | 17 | 215 | 75 | 0,0015 |
| 18 | 11 | 13 | 140 | 150 | 0,25 |
| 19 | 13 | 14 | 220 | 150 | 0,25 |
| 20 | 14 | 15 | 220 | 100 | 0,0015 |
| 21 | 4 | 18 | 285 | 300 | 0,25 |
| 22 | 18 | 17 | 300 | 250 | 0,25 |
| 23 | 16 | 17 | 315 | 75 | 0,0015 |
| 24 | 15 | 16 | 170 | 100 | 0,0015 |

Tabela 23: Resultados dos parâmetros hidráulicos da rede Setor Secundário pelo Epanet

| Trecho | J(m/km) | V(m/s) | Q(L/s) | f |
|--------|---------|--------|--------|-------|
| 1 | 6,43 | 1,66 | 208,50 | 0,018 |
| 2 | 4,73 | 1,18 | 83,67 | 0,020 |
| 3 | 3,64 | 1,04 | 73,17 | 0,020 |
| 4 | 2,96 | 0,93 | 65,77 | 0,020 |
| 5 | 1,11 | 0,25 | 1,10 | 0,026 |
| 6 | 4,68 | 1,30 | 124,83 | 0,019 |
| 7 | 6,37 | 1,06 | 33,45 | 0,022 |
| 8 | 4,59 | 0,90 | 28,25 | 0,022 |
| 9 | 3,09 | 0,73 | 23,05 | 0,023 |
| 10 | 1,73 | 0,54 | 17,05 | 0,023 |
| 11 | 4,76 | 1,19 | 83,98 | 0,020 |
| 12 | 4,21 | 1,11 | 78,78 | 0,020 |
| 13 | 0,24 | 0,10 | 0,45 | 0,033 |
| 14 | 5,60 | 0,62 | 2,75 | 0,021 |
| 15 | 6,41 | 1,23 | 60,47 | 0,021 |
| 16 | 5,89 | 1,18 | 57,87 | 0,021 |
| 17 | 0,22 | 0,10 | 0,43 | 0,034 |
| 18 | 5,15 | 0,79 | 13,99 | 0,024 |
| 19 | 2,59 | 0,55 | 9,79 | 0,025 |
| 20 | 5,01 | 0,71 | 5,59 | 0,019 |
| 21 | 3,57 | 1,02 | 72,43 | 0,020 |
| 22 | 7,28 | 1,31 | 64,53 | 0,021 |
| 23 | 3,78 | 0,50 | 2,21 | 0,022 |
| 24 | 1,65 | 0,38 | 2,99 | 0,022 |

Ao obter os resultados, observou-se que não foi possível, em todos os trechos, atender todos os parâmetros exigidos pela norma. E o parâmetro muitas vezes não alcançado foi o da velocidade mínima (em destaque na tabela 23). Para obter a velocidade mínima, ter-se-ia que diminuir o diâmetro da tubulação, e que às vezes ficaria menor que o diâmetro mínimo de 75 mm; e diminuindo o diâmetro

também poderia aumentar a perda de carga além do valor máximo recomendado. Então, quando não se consegue satisfazer os limites de todos os parâmetros, o sugerido é não atender o critério da velocidade mínima.

O projeto foi calculado de forma que as perdas de carga fossem menores que 8m/km (a recomendação é que a perda limite esteja entre 8 a 10 m/km).

Na simulação, o nível d'água ideal do reservatório para se obter a pressão de 15 m.c.a no ponto (nó) mais crítico foi de 33,38 m.

O custo total de implantação das tubulações (figura 43) foi de R\$ 1.191.352,93. O custo com cada diâmetro está demonstrado na tabela 24, com base nos preços unitários apresentados na tabela 14 (o custo por metro das tubulações não leva em conta a mão de obra).

Tabela 24: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Setor Secundário pelo Epanet

| D (mm) | L (m) | Custo (R\$/m) | Custo total (R\$) |
|--------|-------|---------------|-------------------|
| 75 | 1395 | 48,57 | 67,755.15 |
| 100 | 390 | 68,19 | 26,594.10 |
| 150 | 360 | 101,81 | 36,651.60 |
| 200 | 1115 | 153,22 | 170,840.30 |
| 250 | 895 | 214,34 | 191,834.30 |
| 300 | 1750 | 290,36 | 508,130.00 |
| 350 | 190 | 387,95 | 73,710.50 |
| 400 | 220 | 526,38 | 115,830.60 |

Tabela 25: Dados e resultados dos parâmetros hidráulicos nos nós da rede Bonito de Minas pelo Epanet

| Nó | Cota (m) | Consumo (L/s) | Pressão (m.c.a) | Carga hidráulica (m.c.a) |
|-----|----------|---------------|-----------------|--------------------------|
| RNF | 530,35 | 131,10 | 0 | 530,35 |
| 1 | 514,37 | 4,76 | 15,76 | 530,13 |
| 2 | 511,67 | 3,01 | 18,23 | 529,90 |
| 3 | 508,94 | 2,38 | 20,27 | 529,21 |
| 4 | 509,01 | 3,86 | 20,03 | 529,04 |
| 5 | 508,96 | 4,80 | 19,75 | 528,70 |
| 6 | 509,18 | 5,46 | 19,18 | 528,35 |
| 7 | 509,00 | 5,74 | 19,00 | 527,99 |
| 8 | 506,95 | 5,78 | 20,83 | 527,77 |
| 9 | 503,32 | 4,00 | 23,95 | 527,27 |
| 10 | 503,29 | 2,65 | 23,87 | 527,16 |
| 11 | 506,72 | 4,28 | 20,58 | 527,30 |
| 12 | 506,32 | 3,26 | 21,82 | 528,14 |
| 13 | 505,46 | 4,99 | 23,26 | 528,72 |
| 14 | 509,80 | 6,00 | 19,15 | 528,95 |
| 15 | 510,02 | 2,44 | 18,29 | 528,30 |
| 16 | 509,88 | 1,91 | 18,37 | 528,25 |
| 17 | 511,44 | 1,56 | 16,86 | 528,30 |
| 18 | 512,40 | 1,26 | 16,16 | 528,55 |
| 19 | 512,35 | 2,26 | 16,28 | 528,63 |
| 20 | 511,96 | 5,74 | 17,34 | 529,30 |
| 21 | 500,18 | 3,29 | 28,29 | 528,48 |
| 22 | 503,24 | 3,08 | 24,60 | 527,84 |
| 23 | 509,45 | 3,32 | 18,93 | 528,37 |
| 24 | 507,48 | 3,87 | 20,26 | 527,74 |
| 25 | 507,52 | 4,27 | 20,48 | 528,00 |
| 26 | 510,30 | 2,37 | 18,31 | 528,61 |
| 27 | 511,08 | 2,09 | 17,83 | 528,91 |

| Nó | Cota (m) | Consumo (L/s) | Pressão (m.c.a) | Carga hidráulica (m.c.a) |
|----|----------|---------------|-----------------|--------------------------|
| 28 | 512,86 | 4,17 | 16,68 | 529,55 |
| 29 | 512,06 | 2,03 | 17,15 | 529,21 |
| 30 | 510,84 | 2,29 | 18,11 | 528,96 |
| 31 | 508,21 | 1,50 | 20,19 | 528,40 |
| 32 | 507,67 | 2,58 | 20,58 | 528,25 |
| 33 | 507,76 | 1,11 | 20,53 | 528,29 |
| 34 | 508,13 | 1,51 | 20,49 | 528,62 |
| 35 | 508,29 | 1,47 | 20,47 | 528,76 |
| 36 | 510,75 | 2,00 | 18,53 | 529,28 |
| 37 | 511,87 | 1,42 | 17,64 | 529,52 |
| 38 | 513,26 | 1,32 | 16,46 | 529,71 |
| 39 | 513,84 | 2,77 | 16,11 | 529,95 |
| 40 | 513,23 | 1,69 | 16,06 | 529,29 |
| 41 | 513,37 | 1,78 | 15,88 | 529,25 |
| 42 | 514,08 | 1,83 | 15,22 | 529,30 |
| 43 | 514,63 | 1,50 | 15,00 | 529,62 |
| 44 | 514,46 | 1,70 | 15,28 | 529,74 |

Tabela 26: Dados e resultados dos parâmetros hidráulicos nos trechos da rede Bonito de Minas pelo Epanet

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | J (m/km) | f |
|--------|--------|--------|-----------------|---------|---------|----------|-------|
| 1 | 92,45 | 150 | 0,25 | 9,70 | 0,55 | 2,54 | 0,025 |
| 2 | 100,54 | 100 | 0,0015 | 6,69 | 0,85 | 6,88 | 0,019 |
| 3 | 52,02 | 100 | 0,0015 | 4,30 | 0,55 | 3,13 | 0,021 |
| 4 | 70,13 | 100 | 0,0015 | 5,48 | 0,70 | 4,83 | 0,019 |
| 5 | 87,09 | 100 | 0,0015 | 4,95 | 0,63 | 4,03 | 0,020 |
| 6 | 81,24 | 100 | 0,0015 | 5,25 | 0,67 | 4,47 | 0,020 |
| 7 | 100,70 | 150 | 0,25 | 8,93 | 0,51 | 2,17 | 0,025 |
| 8 | 108,39 | 75 | 0,0015 | 2,47 | 0,56 | 4,64 | 0,022 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | J (m/km) | f |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|-------------|-------|
| 9 | 60,56 | 75 | 0,0015 | 1,47 | 0,33 | 1,85 | 0,025 |
| 10 | 110,66 | 75 | 0,0015 | 1,18 | 0,27 | 1,26 | 0,026 |
| 11 | 75,05 | 75 | 0,0015 | 2,95 | 0,67 | 6,34 | 0,021 |
| 12 | 90,96 | 75 | 0,0015 | 2,28 | 0,52 | 4,01 | 0,022 |
| 13 | 100,62 | 200 | 0,25 | 19,90 | 0,63 | 2,33 | 0,023 |
| 14 | 83,03 | 75 | 0,0015 | 3,32 | 0,75 | 7,81 | 0,020 |
| 15 | 73,05 | 75 | 0,0015 | 0,88 | 0,20 | 0,75 | 0,028 |
| 16 | 49,35 | 75 | 0,0015 | 1,03 | 0,23 | 1,00 | 0,027 |
| 17 | 50,52 | 75 | 0,0015 | 2,59 | 0,59 | 5,05 | 0,022 |
| 18 | 30,20 | 100 | 0,0015 | 3,85 | 0,49 | 2,58 | 0,021 |
| 19 | 114,51 | 100 | 0,0015 | 6,11 | 0,78 | 5,87 | 0,019 |
| 20 | 102,15 | 250 | 0,25 | 43,91 | 0,89 | 3,44 | 0,021 |
| 21 | 117,70 | 100 | 0,0015 | 5,54 | 0,71 | 4,92 | 0,019 |
| 22 | 100,89 | 150 | 0,25 | 9,37 | 0,53 | 2,38 | 0,025 |
| 23 | 109,73 | 100 | 0,0015 | 6,08 | 0,77 | 5,80 | 0,019 |
| 24 | 87,58 | 75 | 0,0015 | 2,99 | 0,68 | 6,51 | 0,021 |
| 25 | 102,33 | 150 | 0,25 | 14,69 | 0,83 | 5,66 | 0,024 |
| 26 | 110,46 | 150 | 0,25 | 11,37 | 0,64 | 3,45 | 0,025 |
| 27 | 80,69 | 75 | 0,0015 | 1,96 | 0,44 | 3,05 | 0,023 |
| 28 | 94,17 | 75 | 0,0015 | 2,51 | 0,57 | 4,76 | 0,022 |
| 29 | 78,78 | 100 | 0,0015 | 4,42 | 0,56 | 3,29 | 0,020 |
| 30 | 89,45 | 100 | 0,0015 | 4,87 | 0,62 | 3,91 | 0,020 |
| 31 | 83,81 | 150 | 0,25 | 10,62 | 0,60 | 3,03 | 0,025 |
| 32 | 67,80 | 150 | 0,25 | 12,99 | 0,74 | 4,46 | 0,024 |
| 33 | 65,86 | 150 | 0,25 | 15,08 | 0,85 | 5,95 | 0,024 |
| 34 | 71,76 | 300 | 0,25 | 70,84 | 1,00 | 3,42 | 0,020 |
| 35 | 59,82 | 150 | 0,25 | 14,70 | 0,83 | 5,66 | 0,024 |
| 36 | 59,43 | 150 | 0,25 | 12,67 | 0,72 | 4,25 | 0,024 |
| 37 | 87,10 | 150 | 0,25 | 10,38 | 0,59 | 2,89 | 0,025 |
| 38 | 52,69 | 100 | 0,0015 | 6,11 | 0,78 | 5,86 | 0,019 |
| 39 | 41,58 | 100 | 0,0015 | 4,61 | 0,59 | 3,55 | 0,020 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | J (m/km) | f |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|-------------|-------|
| 40 | 96,52 | 100 | 0,0015 | 3,82 | 0,49 | 2,53 | 0,021 |
| 41 | 16,38 | 75 | 0,0015 | 1,78 | 0,40 | 2,59 | 0,023 |
| 42 | 54,48 | 75 | 0,0015 | 2,89 | 0,65 | 6,09 | 0,021 |
| 43 | 42,17 | 100 | 0,0015 | 4,40 | 0,56 | 3,26 | 0,020 |
| 44 | 51,97 | 100 | 0,0015 | 5,87 | 0,75 | 5,45 | 0,019 |
| 45 | 73,15 | 150 | 0,25 | 10,91 | 0,62 | 3,19 | 0,025 |
| 46 | 54,75 | 150 | 0,25 | 12,91 | 0,73 | 4,41 | 0,024 |
| 47 | 36,35 | 150 | 0,25 | 14,33 | 0,81 | 5,39 | 0,024 |
| 48 | 37,66 | 150 | 0,25 | 15,66 | 0,89 | 6,40 | 0,024 |
| 49 | 71,06 | 300 | 0,25 | 92,25 | 1,31 | 5,73 | 0,020 |
| 50 | 53,87 | 75 | 0,0015 | 2,54 | 0,58 | 4,86 | 0,022 |
| 51 | 54,00 | 75 | 0,0015 | 0,86 | 0,19 | 0,72 | 0,028 |
| 52 | 59,79 | 75 | 0,0015 | 0,92 | 0,21 | 0,82 | 0,028 |
| 53 | 57,46 | 75 | 0,0015 | 2,75 | 0,62 | 5,62 | 0,021 |
| 54 | 38,67 | 100 | 0,0015 | 4,26 | 0,54 | 3,08 | 0,021 |
| 55 | 70,42 | 100 | 0,0015 | 5,96 | 0,76 | 5,61 | 0,019 |
| 56 | 48,33 | 350 | 0,25 | 110,68 | 1,15 | 3,70 | 0,019 |
| 57 | 42,08 | 350 | 0,25 | 131,10 | 1,36 | 5,15 | 0,019 |

Onde:

L (m) → comprimento

D (mm) → diâmetro da tubulação

ϵ (mm) → rugosidade absoluta das tubulações

Q (L/s) → vazão

V (m/s) → velocidade

J (m/km) → perda de carga unitária

f → fator de atrito (adimensional)

Ao obter os resultados, verificou-se que não se conseguiu, em todos os trechos, atender a todos os limites exigidos pela norma. E o parâmetro muitas vezes não alcançado foi o da velocidade mínima (em destaque nos trechos na tabela 26).

O projeto foi calculado de forma que as perdas de carga fossem menores que 8m/Km (a recomendação é que a perda limite esteja entre 8 a 10 m/km).

O custo total de implantação das tubulações (figura 44) foi de R\$ 380.740,48

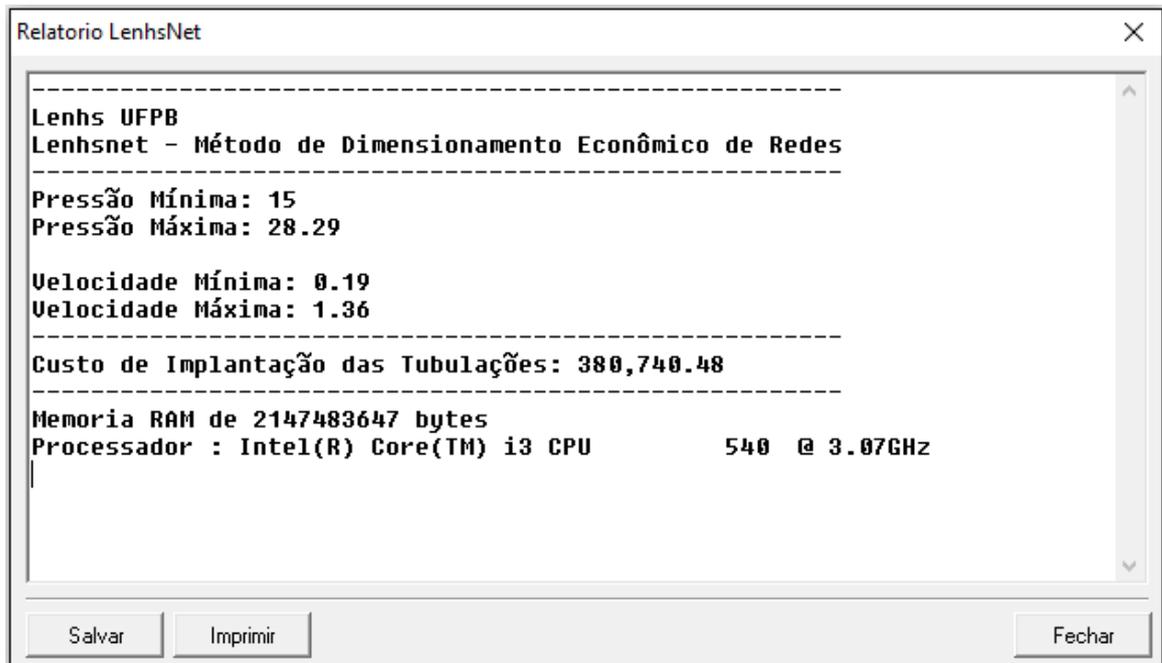


Figura 29: Relatório hidráulico da rede Bonito de Minas pelo Epanet
Fonte: Programa Epanet

O gasto em cada diâmetro está demonstrado na tabela 27, de acordo com os preços unitários apresentados na tabela 14 (o custo por metro das tubulações não leva em conta a mão de obra).

O comprimento total de rede foi de 4.153,96 metros, subdivido (tabela 27) em:

Tabela 27: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Bonito de Minas pelo Epanet

| D (mm) | L (m) | Custo/m (R\$) | Custo total (R\$) |
|-----------|----------|------------------|----------------------|
| 75 | 1.259,99 | 48,57 | 61.197,71 |
| 100 | 1.325,41 | 68,19 | 90.379,71 |

| D (mm) | L (m) | Custo/m (R\$) | Custo total (R\$) |
|--------|----------|---------------|-------------------|
| 150 | 1.132,56 | 101,81 | 115.305,93 |
| 200 | 100,62 | 153,22 | 15.417,00 |
| 250 | 102,15 | 214,34 | 21.894,83 |
| 300 | 142,82 | 290,36 | 41.469,22 |
| 350 | 90,41 | 387,95 | 35.074,56 |

4.5 Simulação pelo Lenhsnet

O Lenhsnet é um programa de otimização que procura dimensionar a rede dentro dos parâmetros propostos de restrição de velocidade mínima e máxima e pressão mínima e máxima (figura 45) com um custo mais baixo possível. Ele é um programa que fica inserido dentro do Epanet. A deficiência do Lenhsnet é que a perda de carga não é considerada como parâmetro para otimização. Logo, na simulação em alguns trechos a perda de carga excede o que é recomendado pelos especialistas (entre 8 a 10m/km). Para corrigir isso, tem-se que mudar os diâmetros nos trechos manualmente. Nos exemplos a seguir, observa-se que em alguns trechos a perda de carga excede ao valor máximo recomendado.

Antes de se executar os cálculos do programa, inserem-se os dados dos tubos (tabela 14, representada abaixo novamente) com os seus diâmetros, rugosidades, tipo de material e respectivos preços por metro.

| Diâmetro (mm) | ϵ (mm) | Tipo | Custo (\$/m) |
|---------------|-----------------|---------------|--------------|
| 75 | 0,0015 | PVC | 48,57 |
| 100 | 0,0015 | PVC | 68,19 |
| 150 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 101,81 |
| 200 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 153,22 |
| 250 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 214,34 |
| 300 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 290,36 |
| 350 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 387,95 |
| 400 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 526,38 |

| Diâmetro (mm) | ϵ (mm) | Tipo | Custo (\$/m) |
|---------------|-----------------|---------------|--------------|
| 500 | 0,25 | FERRO FUNDIDO | 799,14 |

Ao simular a rede pelo Lenhsnet colocam-se os dados do projeto (figura 45). Observou-se a necessidade de diminuir o valor da velocidade mínima, pois com a velocidade mínima de norma não foi possível fazer o dimensionamento da rede.

Figura 30: Dados de projeto do Lenhsnet
Fonte: Programa Epanet

4.5.1 Rede Setor Secundário

Os dados de entrada e os resultados de cada nó obtidos na rede Setor Secundário pelo Lenhsnet estão apresentados na tabela 28.

Tabela 28: Dados dos nós e resultados dos parâmetros hidráulicos nos nós da rede Setor Secundário de Minas pelo Lenhsnet

| Nó | Cota (m) | Demanda (L/s) | Carga Hidráulica (m.c.a) | Pressão (m.c.a) |
|-----|----------|---------------|--------------------------|-----------------|
| RNF | 29,07 | 208,50 | 29,07 | 0,00 |
| 1 | 4,5 | 0,0 | 28,30 | 23,80 |
| 2 | 5,0 | 7,4 | 27,31 | 22,31 |
| 3 | 4,5 | 5,2 | 24,90 | 20,40 |
| 4 | 5,0 | 4,7 | 22,71 | 17,71 |
| 5 | 3,5 | 4,2 | 20,55 | 17,05 |
| 6 | 3,5 | 7,4 | 21,33 | 17,83 |
| 7 | 3,5 | 10,5 | 26,09 | 22,59 |
| 8 | 5,0 | 5,2 | 25,42 | 20,42 |
| 9 | 6,0 | 5,2 | 22,48 | 16,48 |
| 10 | 6,0 | 6,0 | 21,29 | 15,29 |
| 11 | 6,0 | 2,6 | 21,64 | 15,64 |
| 12 | 6,0 | 3,2 | 21,95 | 15,95 |
| 13 | 6,0 | 4,2 | 21,49 | 15,49 |
| 14 | 6,0 | 4,2 | 21,00 | 15,00 |
| 15 | 5,0 | 2,6 | 20,15 | 15,15 |
| 16 | 3,0 | 5,2 | 19,48 | 16,48 |
| 17 | 3,5 | 61,9 | 19,99 | 16,49 |
| 18 | 6,0 | 7,9 | 21,30 | 15,30 |
| 19 | 3,5 | 2,6 | 19,21 | 15,71 |
| 20 | 3,5 | 58,3 | 18,82 | 15,32 |

Os dados de entrada e os resultados de cada trecho (tabela 29) obtidos na rede Setor Secundário pelo Lenhsnet foram os seguintes:

Tabela 29: Características e resultados dos parâmetros hidráulico dos trechos da rede Setor Secundário pelo Lenhsnet

| Trecho | L(m) | D(mm) | ϵ (mm) | J(m/km) | V(m/s) | Q(L/s) | f |
|--------|------|-------|-----------------|---------|--------|--------|-------|
| 1 | 220 | 450 | 0,25 | 3,50 | 1,31 | 208,50 | 0,018 |
| 2 | 190 | 150 | 0,25 | 11,61 | 1,20 | 21,25 | 0,024 |
| 3 | 295 | 100 | 0,0015 | 16,15 | 1,37 | 10,75 | 0,017 |
| 4 | 390 | 100 | 0,0015 | 2,01 | 0,43 | 3,35 | 0,022 |
| 5 | 370 | 100 | 0,0015 | 5,84 | 0,78 | 6,10 | 0,019 |
| 6 | 190 | 400 | 0,25 | 5,20 | 1,49 | 187,25 | 0,018 |
| 7 | 310 | 150 | 0,25 | 6,09 | 0,86 | 15,26 | 0,024 |
| 8 | 205 | 100 | 0,0015 | 14,34 | 1,28 | 10,06 | 0,017 |
| 9 | 305 | 100 | 0,0015 | 3,90 | 0,62 | 4,86 | 0,020 |
| 10 | 295 | 75 | 0,0015 | 1,18 | 0,26 | 1,14 | 0,026 |
| 11 | 300 | 350 | 0,25 | 8,05 | 1,71 | 164,59 | 0,019 |
| 12 | 290 | 350 | 0,25 | 7,55 | 1,66 | 159,39 | 0,019 |
| 13 | 180 | 200 | 0,25 | 1,72 | 0,54 | 16,99 | 0,023 |
| 14 | 315 | 200 | 0,25 | 2,39 | 0,64 | 20,19 | 0,023 |
| 15 | 300 | 100 | 0,0015 | 4,46 | 0,67 | 5,25 | 0,020 |
| 16 | 295 | 100 | 0,0015 | 1,32 | 0,34 | 2,65 | 0,023 |
| 17 | 215 | 250 | 0,25 | 5,45 | 1,13 | 55,65 | 0,021 |
| 18 | 140 | 200 | 0,25 | 1,07 | 0,42 | 13,25 | 0,024 |
| 19 | 220 | 150 | 0,25 | 2,22 | 0,51 | 9,05 | 0,025 |
| 20 | 220 | 100 | 0,0015 | 3,88 | 0,62 | 4,85 | 0,020 |
| 21 | 285 | 350 | 0,25 | 4,94 | 1,33 | 128,40 | 0,019 |
| 22 | 300 | 350 | 0,25 | 4,36 | 1,25 | 120,50 | 0,019 |
| 23 | 315 | 100 | 0,0015 | 1,60 | 0,38 | 2,95 | 0,022 |
| 24 | 170 | 75 | 0,0015 | 3,92 | 0,51 | 2,25 | 0,022 |

Em destaque os trechos de perda de carga que excederam 10 m/Km que é recomendado por autores da área. Para correção das perdas de carga conforme o recomendado, basta aumentar o diâmetro da tubulação até que a perda de carga seja inferior a 8 a 10m/km.

Em destaque também os trechos onde a velocidade mínima de 0,60 m/s não foi alcançada. Isso é comum ocorrer para que os outros parâmetros de projeto impostos pela norma NBR 12218/1994 sejam alcançados como a de pressão mínima e diâmetro mínimo.

Observa-se que os resultados do Lenhsnet são bem diferentes em relação ao Epanet (programa simulador). Isso acontece porque o Lenhsnet é um programa otimizador e com isso soube distribuir através de várias iterações as vazões de acordo com as demandas em cada nó e pressão mínima na rede de modo que os diâmetros fossem os menores possíveis e conseqüentemente o custo das instalações os menores possíveis.

Os diâmetros e o custo da rede dos 6315 metros ficaram distribuídos da seguinte forma (tabela 30):

Tabela 30: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Setor Secundário pelo Lenhsnet

| D(mm) | L(m) | Custo/m (R\$) | Custo total (R\$) |
|-------|------|---------------|-------------------|
| 75 | 465 | 48,57 | 22.585,05 |
| 100 | 2695 | 68,19 | 183.772,05 |
| 150 | 720 | 101,81 | 73.303,20 |
| 200 | 635 | 153,22 | 97.294,70 |
| 250 | 215 | 214,34 | 46.083,10 |
| 350 | 1175 | 387,95 | 455.841,25 |
| 400 | 190 | 526,38 | 100.012,20 |
| 450 | 220 | 629,62 | 138.516,40 |

O custo total de implantação das tubulações (figura 46) foi de R\$ 1.117.453,01. O custo por metro das tubulações não leva em conta a mão de obra.

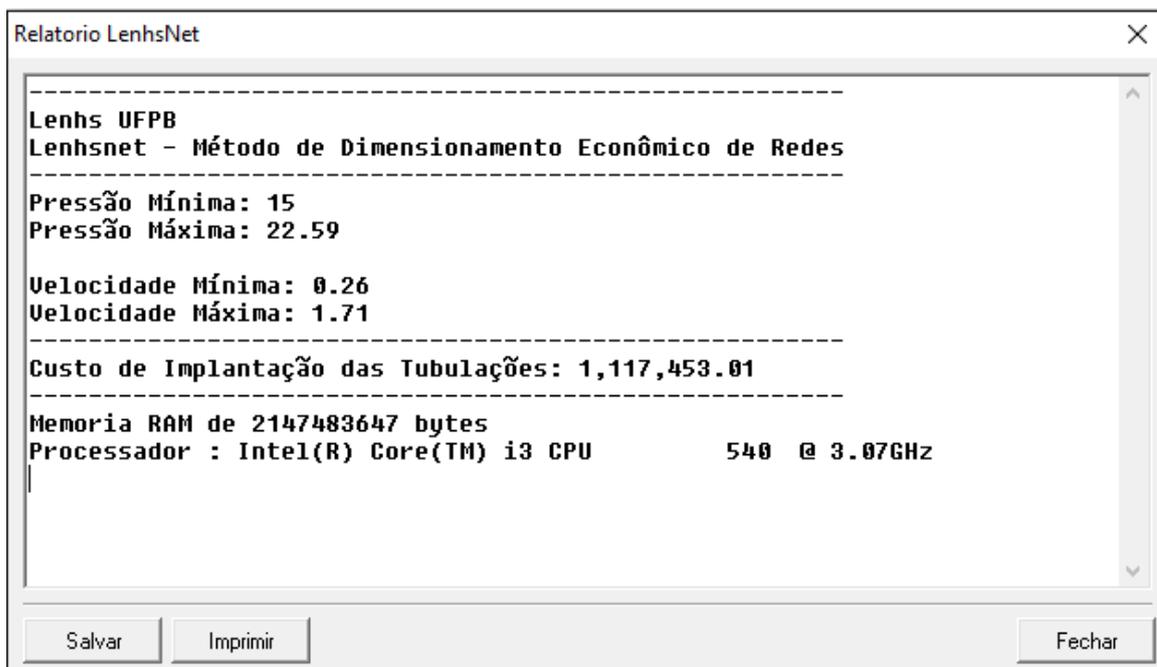


Figura 31: Relatório hidráulico da rede Setor Secundário pelo Lenhsnet
 Fonte: Programa Epanet

4.5.2 Rede Bonito de Minas

Os dados de entrada e os resultados de cada nó (tabela 31) obtidos na rede Bonito de Minas pelo Lenhsnet foram os seguintes:

Tabela 31: Dados e resultados dos parâmetros hidráulicos dos nós da rede Bonito de Minas pelo Lenhsnet

| Nó | Cota (m) | Consumo (L/s) | Carga hidráulica (m.c.a) | Pressão (m.c.a) |
|-----|----------|---------------|--------------------------|-----------------|
| RNF | 530,32 | 131,10 | 530,32 | 0,00 |
| 1 | 514,37 | 4,76 | 529,84 | 15,47 |
| 2 | 511,67 | 3,01 | 528,53 | 16,86 |
| 3 | 508,94 | 2,38 | 525,56 | 16,62 |
| 4 | 509,01 | 3,86 | 524,84 | 15,83 |
| 5 | 508,96 | 4,80 | 524,80 | 15,85 |
| 6 | 509,18 | 5,46 | 524,42 | 15,24 |
| 7 | 509,00 | 5,74 | 524,28 | 15,28 |
| 8 | 506,95 | 5,78 | 522,71 | 15,76 |
| 9 | 503,32 | 4,00 | 522,30 | 18,99 |

| Nó | Cota (m) | Consumo (L/s) | Carga hidráulica (m.c.a) | Pressão (m.c.a) |
|----|----------|---------------|--------------------------|-----------------|
| 10 | 503,29 | 2,65 | 522,20 | 18,92 |
| 11 | 506,72 | 4,28 | 522,36 | 15,64 |
| 12 | 506,32 | 3,26 | 523,14 | 16,82 |
| 13 | 505,46 | 4,99 | 525,60 | 20,14 |
| 14 | 509,80 | 6,00 | 526,42 | 16,62 |
| 15 | 510,02 | 2,44 | 526,29 | 16,28 |
| 16 | 509,88 | 1,91 | 526,38 | 16,50 |
| 17 | 511,44 | 1,56 | 526,71 | 15,28 |
| 18 | 512,40 | 1,26 | 527,42 | 15,02 |
| 19 | 512,35 | 2,26 | 527,45 | 15,10 |
| 20 | 511,96 | 5,74 | 527,66 | 15,69 |
| 21 | 500,18 | 3,29 | 522,60 | 22,42 |
| 22 | 503,23 | 3,08 | 522,34 | 19,10 |
| 23 | 509,45 | 3,32 | 525,21 | 15,77 |
| 24 | 507,48 | 3,87 | 523,00 | 15,52 |
| 25 | 507,52 | 4,27 | 523,25 | 15,73 |
| 26 | 510,29 | 2,37 | 525,74 | 15,44 |
| 27 | 511,08 | 2,09 | 527,27 | 16,18 |
| 28 | 512,86 | 4,17 | 528,37 | 15,50 |
| 29 | 512,06 | 2,03 | 527,97 | 15,91 |
| 30 | 510,84 | 2,29 | 526,43 | 15,59 |
| 31 | 508,21 | 1,50 | 523,90 | 15,69 |
| 32 | 507,67 | 2,58 | 523,52 | 15,85 |
| 33 | 507,76 | 1,11 | 523,53 | 15,77 |
| 34 | 508,13 | 1,51 | 523,69 | 15,56 |
| 35 | 508,29 | 1,47 | 524,03 | 15,75 |
| 36 | 510,74 | 2,00 | 525,96 | 15,21 |
| 37 | 511,87 | 1,42 | 527,52 | 15,64 |
| 38 | 513,26 | 1,32 | 528,97 | 15,72 |
| 39 | 513,84 | 2,77 | 529,47 | 15,63 |

| Nó | Cota (m) | Consumo (L/s) | Carga hidráulica (m.c.a) | Pressão (m.c.a) |
|----|----------|---------------|--------------------------|-----------------|
| 40 | 513,23 | 1,69 | 528,39 | 15,16 |
| 41 | 513,37 | 1,78 | 528,62 | 15,25 |
| 42 | 514,08 | 1,83 | 529,30 | 15,22 |
| 43 | 514,62 | 1,50 | 529,62 | 15,00 |
| 44 | 514,46 | 1,70 | 529,68 | 15,22 |

Os dados de entrada e os resultados de cada trecho (tabela 32) obtidos na rede Bonito de Minas pelo Lenhsnet foram os seguintes:

Tabela 32: Dados e resultados dos parâmetros hidráulicos dos trechos da rede Bonito de Minas pelo Lenhsnet

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | J(m/km) | f |
|--------|--------|--------|-----------------|---------|---------|---------|-------|
| 1 | 92,45 | 100 | 0,0015 | 9,99 | 1,27 | 14,15 | 0,017 |
| 2 | 100,54 | 75 | 0,0015 | 6,97 | 1,58 | 29,53 | 0,017 |
| 3 | 52,02 | 75 | 0,0015 | 4,59 | 1,04 | 13,93 | 0,019 |
| 4 | 70,13 | 75 | 0,0015 | 0,69 | 0,16 | 0,49 | 0,030 |
| 5 | 87,09 | 75 | 0,0015 | 2,40 | 0,54 | 4,41 | 0,022 |
| 6 | 81,24 | 100 | 0,0015 | 3,10 | 0,40 | 1,76 | 0,022 |
| 7 | 100,70 | 100 | 0,0015 | 10,53 | 1,34 | 15,56 | 0,017 |
| 8 | 108,39 | 100 | 0,0015 | 4,76 | 0,61 | 3,75 | 0,020 |
| 9 | 60,56 | 75 | 0,0015 | 1,38 | 0,31 | 1,66 | 0,025 |
| 10 | 110,66 | 75 | 0,0015 | 1,27 | 0,29 | 1,42 | 0,025 |
| 11 | 75,05 | 75 | 0,0015 | 2,48 | 0,56 | 4,66 | 0,022 |
| 12 | 90,96 | 75 | 0,0015 | 2,49 | 0,56 | 4,70 | 0,022 |
| 13 | 100,62 | 150 | 0,25 | 17,73 | 1,00 | 8,16 | 0,024 |
| 14 | 83,03 | 75 | 0,0015 | 1,31 | 0,30 | 1,50 | 0,025 |
| 15 | 73,05 | 75 | 0,0015 | 1,13 | 0,26 | 1,18 | 0,026 |
| 16 | 49,35 | 75 | 0,0015 | 3,04 | 0,69 | 6,71 | 0,021 |
| 17 | 50,52 | 75 | 0,0015 | 4,60 | 1,04 | 14,03 | 0,019 |
| 18 | 30,20 | 150 | 0,25 | 5,86 | 0,33 | 0,97 | 0,026 |
| 19 | 114,51 | 150 | 0,25 | 8,13 | 0,46 | 1,81 | 0,025 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | J(m/km) | f |
|--------|--------|--------|-----------------|---------|---------|---------|-------|
| 20 | 102,15 | 200 | 0,25 | 46,46 | 1,48 | 12,12 | 0,022 |
| 21 | 117,70 | 75 | 0,0015 | 5,75 | 1,30 | 20,91 | 0,018 |
| 22 | 100,89 | 75 | 0,0015 | 6,99 | 1,58 | 29,70 | 0,017 |
| 23 | 109,73 | 100 | 0,0015 | 3,70 | 0,47 | 2,40 | 0,021 |
| 24 | 87,58 | 75 | 0,0015 | 0,62 | 0,14 | 0,41 | 0,031 |
| 25 | 102,33 | 150 | 0,25 | 21,41 | 1,21 | 11,78 | 0,024 |
| 26 | 110,46 | 150 | 0,25 | 18,09 | 1,02 | 8,48 | 0,024 |
| 27 | 80,69 | 75 | 0,0015 | 4,93 | 1,12 | 15,83 | 0,019 |
| 28 | 94,17 | 75 | 0,0015 | 3,07 | 0,69 | 6,79 | 0,021 |
| 29 | 78,78 | 75 | 0,0015 | 2,01 | 0,45 | 3,21 | 0,023 |
| 30 | 89,45 | 75 | 0,0015 | 4,42 | 1,00 | 13,05 | 0,019 |
| 31 | 83,81 | 100 | 0,0015 | 10,58 | 1,35 | 15,70 | 0,017 |
| 32 | 67,80 | 100 | 0,0015 | 12,95 | 1,65 | 22,60 | 0,016 |
| 33 | 65,86 | 150 | 0,25 | 15,04 | 0,85 | 5,92 | 0,024 |
| 34 | 71,76 | 250 | 0,25 | 75,36 | 1,54 | 9,87 | 0,021 |
| 35 | 59,82 | 150 | 0,25 | 15,97 | 0,90 | 6,66 | 0,024 |
| 36 | 59,43 | 100 | 0,0015 | 13,95 | 1,78 | 25,84 | 0,016 |
| 37 | 87,10 | 100 | 0,0015 | 11,66 | 1,48 | 18,69 | 0,017 |
| 38 | 52,69 | 75 | 0,0015 | 5,14 | 1,16 | 17,08 | 0,019 |
| 39 | 41,58 | 75 | 0,0015 | 3,64 | 0,82 | 9,23 | 0,020 |
| 40 | 96,52 | 75 | 0,0015 | 1,85 | 0,42 | 2,78 | 0,023 |
| 41 | 16,38 | 75 | 0,0015 | 0,78 | 0,18 | 0,62 | 0,029 |
| 42 | 54,48 | 75 | 0,0015 | 1,89 | 0,43 | 2,88 | 0,023 |
| 43 | 42,17 | 75 | 0,0015 | 3,40 | 0,77 | 8,16 | 0,020 |
| 44 | 51,97 | 75 | 0,0015 | 4,87 | 1,10 | 15,52 | 0,019 |
| 45 | 73,15 | 75 | 0,0015 | 4,84 | 1,09 | 15,31 | 0,019 |
| 46 | 54,75 | 75 | 0,0015 | 6,83 | 1,55 | 28,49 | 0,018 |
| 47 | 36,35 | 75 | 0,0015 | 8,26 | 1,87 | 40,06 | 0,017 |
| 48 | 37,66 | 100 | 0,0015 | 9,58 | 1,22 | 13,13 | 0,017 |
| 49 | 71,06 | 250 | 0,25 | 94,86 | 1,93 | 15,52 | 0,020 |
| 50 | 53,87 | 75 | 0,0015 | 0,65 | 0,15 | 0,44 | 0,030 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | J(m/km) | f |
|--------|-------|--------|-----------------|---------|---------|---------|-------|
| 51 | 54,00 | 75 | 0,0015 | 2,33 | 0,53 | 4,18 | 0,022 |
| 52 | 59,79 | 75 | 0,0015 | 4,11 | 0,93 | 11,45 | 0,019 |
| 53 | 57,46 | 100 | 0,0015 | 5,94 | 0,76 | 5,58 | 0,019 |
| 54 | 38,67 | 150 | 0,25 | 7,44 | 0,42 | 1,53 | 0,025 |
| 55 | 70,42 | 150 | 0,25 | 9,15 | 0,52 | 2,27 | 0,025 |
| 56 | 48,33 | 300 | 0,25 | 107,20 | 1,52 | 7,69 | 0,020 |
| 57 | 42,08 | 300 | 0,25 | 131,10 | 1,85 | 11,41 | 0,020 |

Em destaque os trechos de perda de carga que excederam 10m/Km que é o limite recomendado por autores da área (recomenda-se entre 8 a 10 m/Km a perda de carga máxima). No Lenhsnet não houve limite para perdas de carga pelo motivo do programa não fornecer essa opção.

Em destaque também onde a velocidade mínima de 0,60 m/s não foi alcançada. Isso é comum ocorrer para que os outros parâmetros de projeto impostos pela norma NBR 12218/1994 sejam alcançados como a de pressão mínima e diâmetro mínimo (75mm).

O custo total de implantação das tubulações (figura 47) é de R\$ 312.253,05. O comprimento total de rede foi de 4.153,96 m. O gasto em cada diâmetro está demonstrado na tabela 33, com base na tabela 14. O custo por metro das tubulações não leva em conta a mão de obra.

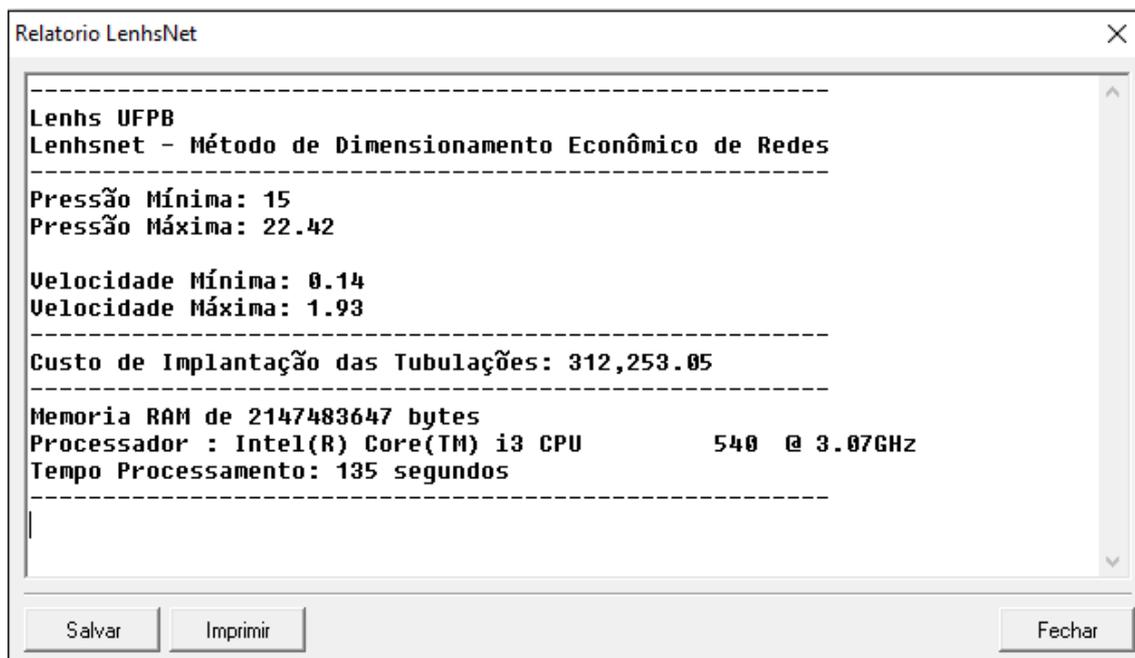


Figura 32: Relatório hidráulico da rede Setor Secundário pelo Lenhsnet
 Fonte: Programa Epanet

Tabela 33: Custo de cada diâmetro na instalação dos tubos da rede Bonito de Minas pelo Lenhsnet

| D(mm) | L(m) | Custo/m (R\$) | Custo total (R\$) |
|-------|----------|---------------|-------------------|
| 75 | 2.239,92 | 48,57 | 108.792,91 |
| 100 | 885,77 | 68,19 | 60.400,66 |
| 150 | 692,89 | 101,81 | 70.543,13 |
| 200 | 102,15 | 153,22 | 15.651,42 |
| 250 | 142,82 | 214,34 | 30.612,04 |
| 300 | 90,41 | 290,36 | 26.251,45 |

4.6 Simulação pelo UFC-4

Na simulação pelo UFC-4 a rede foi modelada pelo AutoCAD, onde uma parte do programa UFC-4 foi inserido. Porém, ao se transportar a rede para o programa UFC-4, a rede não foi carregada. Por falta de auxílio técnico em tempo hábil, não foi possível executar a rede.

4.7 Comparações dos resultados

4.7.1 Rede Setor Secundário

A tabela 34 e a figura 48 mostram a comparação dos resultados obtidos pelos programas para a pressão nos nós.

Tabela 34: Tabela de comparação dos resultados das pressões em cada nó aplicado por cada programa da rede Setor Secundário

| Nó | Pressão (m.c.a) RedemWeb | Pressão (m.c.a) Epanet | Pressão (m.c.a) Lenhsnet | Pressão (m.c.a) UFC-4 |
|----|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 20,34 | 23,15 | 23,80 | - |
| 2 | 19,30 | 21,76 | 22,31 | - |
| 3 | 19,26 | 20,83 | 20,40 | - |
| 4 | 18,37 | 19,11 | 17,71 | - |
| 5 | 19,03 | 21,02 | 17,05 | - |
| 6 | 20,08 | 22,17 | 17,83 | - |
| 7 | 20,99 | 23,25 | 22,59 | - |
| 8 | 17,01 | 19,78 | 20,42 | - |
| 9 | 15,60 | 17,84 | 16,48 | - |
| 10 | 15,15 | 16,90 | 15,29 | - |
| 11 | 15,89 | 16,39 | 15,64 | - |
| 12 | 16,20 | 16,34 | 15,95 | - |
| 13 | 15,36 | 15,67 | 15,49 | - |
| 14 | 15,00 | 15,10 | 15,00 | - |
| 15 | 15,56 | 15,00 | 15,15 | - |
| 16 | 17,44 | 16,71 | 16,48 | - |
| 17 | 15,73 | 17,41 | 16,49 | - |
| 18 | 16,38 | 17,09 | 15,30 | - |
| 19 | 18,27 | 19,10 | 15,71 | - |
| 20 | 16,31 | 17,36 | 15,32 | - |

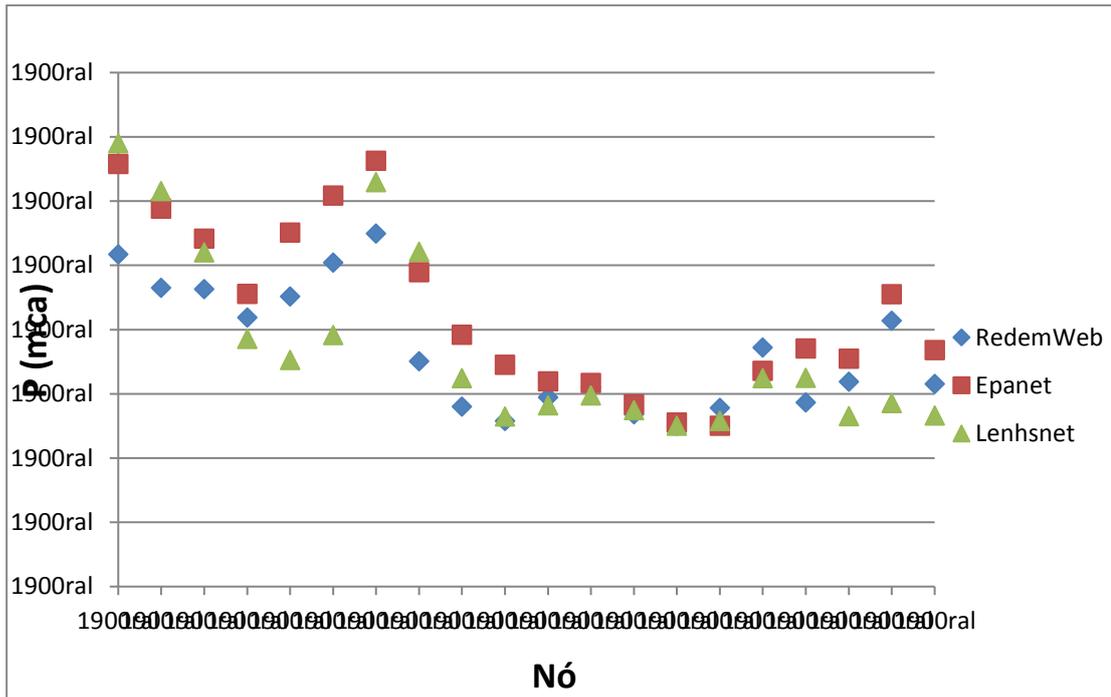


Figura 33: Gráfico de comparação dos resultados das pressões em cada nó aplicado por cada programa da rede Setor Secundário

As pressões máximas e mínimas e as pressões em cada nó divergem pelo fato dos diâmetros e das características hidráulicas das tubulações serem diferentes.

A tabela 35 apresenta a comparação dos resultados da cota do nível d'água do reservatório aplicado por cada programa.

Tabela 35: Cota do nível d'água do reservatório da rede Setor Secundário aplicado em cada programa

| Programa | Cota (m) |
|----------|----------|
| RedemWeb | 25,29 |
| Epanet | 29,06 |
| Lenhsnet | 29,07 |
| UFC-4 | - |

No programa RedemWeb, o cálculo da cota do nível d'água do reservatório tem que ser feito manualmente ou por auxílio de outro programa. Soma-se a carga hidráulica do nó posterior ao reservatório mais a perda do trecho do reservatório a esse nó.

Ex: cota do nível d'água do reservatório RedemWeb = Cota Piezométrica (nó 1) + perdas do trecho 1 (J.L) = $24,84 + (2,06 \times 10^{-3} \times 220) = 25,29$ metros.

A cota do nível de água do reservatório do programa RedemWeb é menor pelo fato dos diâmetros serem maiores e conseqüentemente menores perdas. Logo, a pressão mínima exigida é atingida com uma altura de nível de água menor. Em todos os programas, a pressão mínima atingida foi de 15 m.c.a.

A tabela 36 faz a comparação dos resultados dos custos das tubulações aplicados por cada programa.

Tabela 36: Custo das tubulações da rede Setor Secundário aplicado em cada programa

| Programa | Custo das tubulações (R\$) |
|----------|----------------------------|
| RedemWeb | 1.469.251,50 |
| Epanet | 1.191.352,93 |
| Lenhsnet | 1.117.453,01 |
| UFC-4 | - |

Nos custos da implantação das tubulações, não estão inclusos os gastos com a implantação dos reservatórios. Obviamente, quanto mais elevado o nível de água no reservatório, maior será o reservatório e conseqüentemente maior serão os gastos.

Observa-se que o custo da instalação da RedemWeb tem um valor bem maior quando comparado ao Epanet e Lenhsnet. Isto se deve ao fato do programa RedemWeb seguir a tabela 3 de velocidade limite, o que acarreta em pequenas perdas de carga. Já o Lenhsnet possui o custo mais baixo pelo fato de ser otimizado, de acordo com os limites da norma, e possuir maiores perdas de carga.

A tabela 37 e a figura 49 mostram a comparação dos resultados da perda de carga em cada trecho aplicado por cada programa.

Tabela 37: Tabela de comparação dos resultados das perdas de carga em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário

| Trecho | J(m/km) RedemWeb | J(m/km) Epanet | J(m/km) Lenhsnet | J(m/km) UFC-4 |
|--------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| 1 | 2,06 | 6,43 | 3,50 | - |
| 2 | 1,84 | 4,73 | 11,61 | - |
| 3 | 3,08 | 3,64 | 16,15 | - |
| 4 | 2,69 | 2,96 | 2,01 | - |
| 5 | 2,27 | 1,11 | 5,84 | - |
| 6 | 2,84 | 4,68 | 5,20 | - |
| 7 | 7,39 | 6,37 | 6,09 | - |
| 8 | 2,00 | 4,59 | 14,34 | - |
| 9 | 1,48 | 3,09 | 3,90 | - |
| 10 | 2,51 | 1,73 | 1,18 | - |
| 11 | 1,80 | 4,76 | 8,05 | - |
| 12 | 1,34 | 4,21 | 7,55 | - |
| 13 | 1,72 | 0,24 | 1,72 | - |
| 14 | 3,71 | 5,60 | 2,39 | - |
| 15 | 2,53 | 6,41 | 4,46 | - |
| 16 | 6,64 | 5,89 | 1,32 | - |
| 17 | 2,70 | 0,22 | 5,45 | - |
| 18 | 3,79 | 5,15 | 1,07 | - |
| 19 | 1,64 | 2,59 | 2,22 | - |
| 20 | 2,00 | 5,01 | 3,88 | - |
| 21 | 3,47 | 3,57 | 4,94 | - |
| 22 | 10,50 | 7,28 | 4,36 | - |
| 23 | 3,84 | 3,78 | 1,60 | - |
| 24 | 0,71 | 1,65 | 3,92 | - |

A perda de carga do trecho 1 foi calculado pela fórmula Universal:

$$J(m/km) = 1000 \times \frac{f}{D} \times \frac{V^2}{2g} = 1000 \times \frac{0.018}{0.500} \times \frac{1.06^2}{2 * 9.81} = 2.06$$

Também pode ser calculado pela fórmula de Hazen-Willians:

$$J(m/km) = 1.000 \cdot \frac{10,65}{D^{4,87}} \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,85} = 1.000 \cdot \frac{10,65}{0,5^{4,87}} \left(\frac{0,209}{130}\right)^{1,85} = 2,08$$

Repara-se que por ambas as fórmulas os valores são bem próximos.

A perda de carga nos demais trechos no RedemWeb foi calculada manualmente pela diferença da carga hidráulica (cota piezométrica) de cada trecho dividido pelo comprimento do trecho.

$$\text{Ex: } J(m/km) \text{ trecho 2} = \frac{\text{cotaPiez 1} - \text{cotaPiez 7}}{L(\text{km})\text{trecho 2}} = \frac{24,84 - 24,49}{0,190} = 1,84$$

No Epanet, a perda de carga foi limitada em até 8m/km. Foram realizadas diversas simulações, até que a perda de carga ficasse abaixo de 8 m/km. Já no Lenhsnet não houve restrição na perda de carga em sua otimização, pois o programa não tem esta restrição. Em destaque os trechos de perda de carga que excederam 10m/Km que é recomendado por autores da área (recomenda-se até 8 a 10 m/Km a perda de carga).

A diferença das perdas de carga se deve pelas diferenças dos diâmetros, rugosidade e vazão de cada trecho. Lembrando que pela fórmula de Hazen-Willians

o cálculo de perda de carga é: $J = \frac{10,65}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,85}$.

E pela fórmula universal é: $J = \frac{8 \cdot f}{\pi^2 \cdot g} \cdot \frac{Q^2}{D^5}$ ou $J = f \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$.

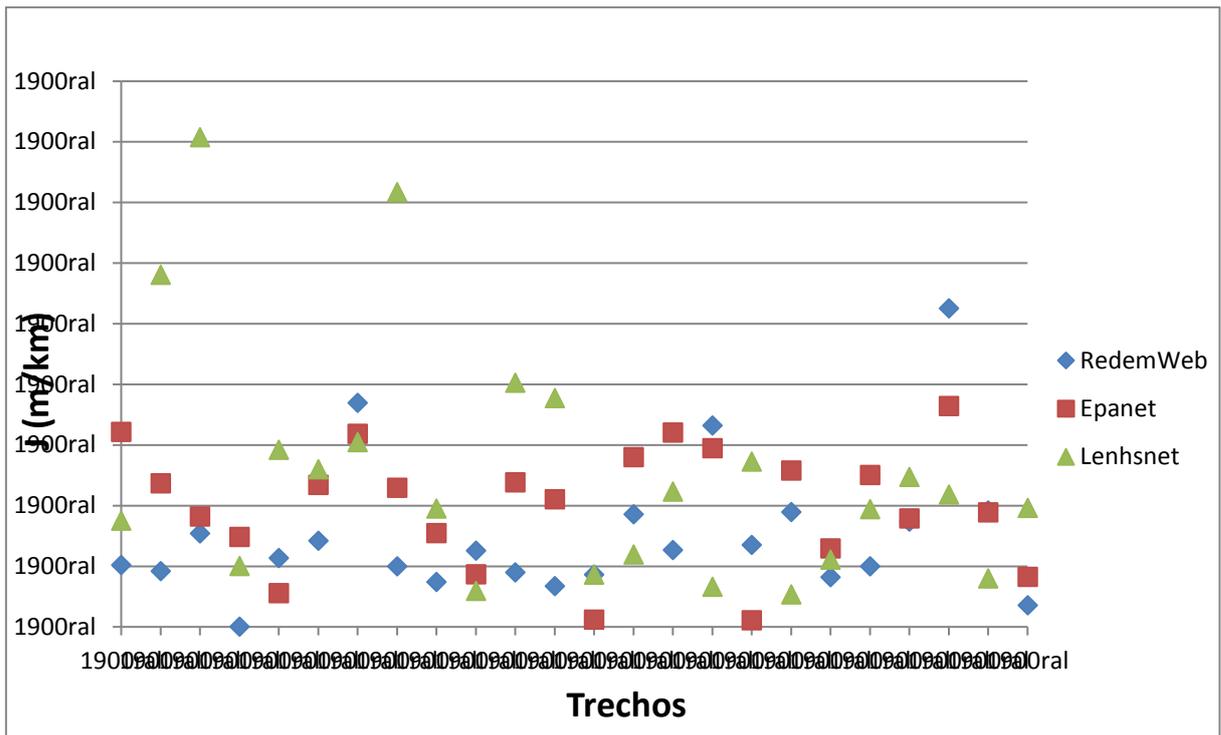


Figura 34: Gráfico de comparação dos resultados das perdas de carga em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário

A tabela 38 e a figura 50 apresentam a comparação dos resultados dos diâmetros em cada trecho aplicado por cada programa.

Tabela 38: Tabela de comparação dos resultados dos diâmetros em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário

| Trecho | D(mm) RedemWeb | D(mm) Epanet | D(mm) Lenhsnet | D(mm) UFC-4 |
|--------|----------------|--------------|----------------|-------------|
| 1 | 500 | 400 | 450 | - |
| 2 | 400 | 300 | 150 | - |
| 3 | 350 | 300 | 100 | - |
| 4 | 350 | 300 | 100 | - |
| 5 | 75 | 75 | 100 | - |
| 6 | 350 | 350 | 400 | - |
| 7 | 150 | 200 | 150 | - |
| 8 | 150 | 200 | 100 | - |
| 9 | 100 | 200 | 100 | - |
| 10 | 75 | 200 | 75 | - |
| 11 | 350 | 300 | 350 | - |

| Trecho | D(mm) RedemWeb | D(mm) Epanet | D(mm) Lenhsnet | D(mm) UFC-4 |
|--------|-------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| 12 | 75 | 300 | 350 | - |
| 13 | 200 | 75 | 200 | - |
| 14 | 250 | 75 | 200 | - |
| 15 | 350 | 250 | 100 | - |
| 16 | 350 | 250 | 100 | - |
| 17 | 300 | 75 | 250 | - |
| 18 | 150 | 150 | 200 | - |
| 19 | 150 | 150 | 150 | - |
| 20 | 100 | 100 | 100 | - |
| 21 | 250 | 300 | 350 | - |
| 22 | 250 | 250 | 350 | - |
| 23 | 100 | 75 | 100 | - |
| 24 | 75 | 100 | 75 | - |

A diferença dos diâmetros se deve principalmente pela forma que as vazões são distribuídas, pelo material dos tubos e pelas perdas de carga. Lembrando que pela fórmula de Hazen-Willians o cálculo do diâmetro é: $D = \left(\frac{3,587Q}{J^{0,54}C} \right)^{0,38}$.

E pela fórmula universal é: $D = \sqrt[5]{\frac{8.f.Q^2}{J.\pi^2.g}}$

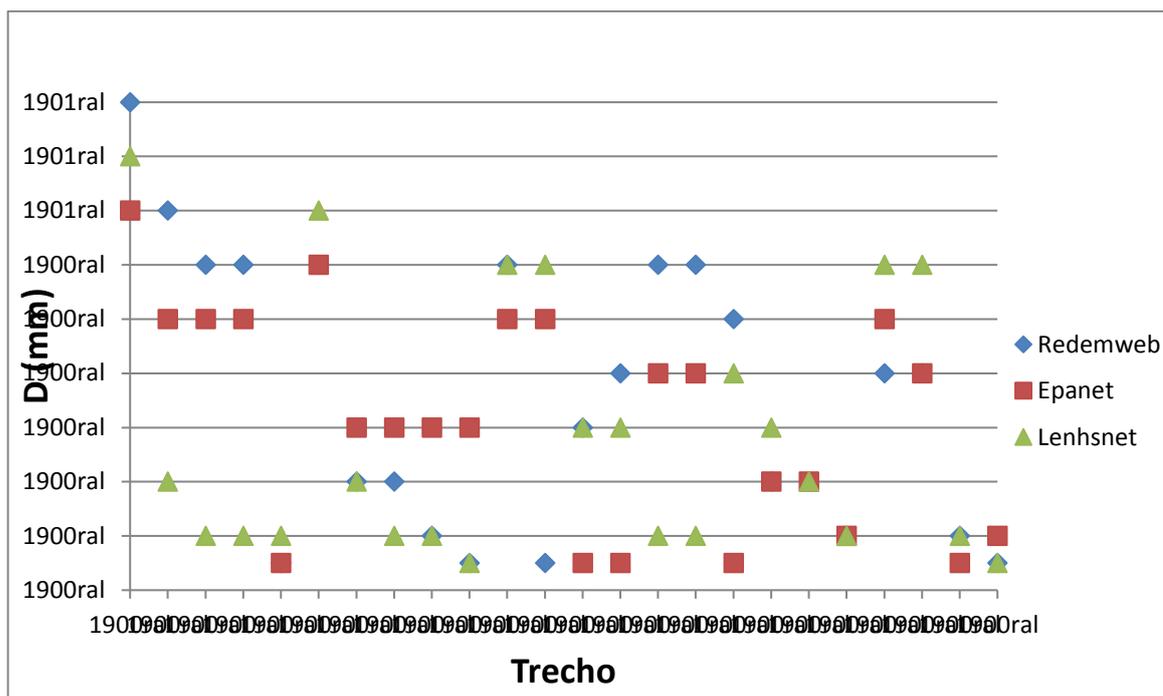


Figura 35: Gráfico de comparação dos resultados dos diâmetros em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário

A seguir a tabela 39 e a figura 51 mostram a comparação dos resultados das velocidades em cada trecho aplicado por cada programa.

Tabela 39: Tabela de comparação dos resultados das velocidades em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário

| Trecho | V(m/s) RedemWeb | V(m/s) Epanet | V(m/s) Lenhsnet | V(m/s) UFC-4 |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| 1 | 1,06 | 1,66 | 1,31 | - |
| 2 | 0,89 | 1,18 | 1,20 | - |
| 3 | 1,05 | 1,04 | 1,37 | - |
| 4 | 0,97 | 0,93 | 0,43 | - |
| 5 | 0,49 | 0,25 | 0,78 | - |
| 6 | 1,01 | 1,30 | 1,49 | - |
| 7 | 0,80 | 1,06 | 0,86 | - |
| 8 | 0,50 | 0,90 | 1,28 | - |
| 9 | 0,47 | 0,73 | 0,62 | - |
| 10 | 0,53 | 0,54 | 0,26 | - |
| 11 | 0,79 | 1,19 | 1,71 | - |
| 12 | 0,39 | 1,11 | 1,66 | - |
| 13 | 0,54 | 0,10 | 0,54 | - |

| Trecho | V(m/s) RedemWeb | V(m/s) Epanet | V(m/s) Lenhsnet | V(m/s) UFC-4 |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| 14 | 0,88 | 0,62 | 0,64 | - |
| 15 | 0,95 | 1,23 | 0,67 | - |
| 16 | 0,92 | 1,18 | 0,34 | - |
| 17 | 0,88 | 0,10 | 1,13 | - |
| 18 | 0,68 | 0,79 | 0,42 | - |
| 19 | 0,44 | 0,55 | 0,51 | - |
| 20 | 0,46 | 0,71 | 0,62 | - |
| 21 | 0,88 | 1,02 | 1,33 | - |
| 22 | 0,72 | 1,31 | 1,25 | - |
| 23 | 0,54 | 0,50 | 0,38 | - |
| 24 | 0,22 | 0,38 | 0,51 | - |

A diferença das velocidades se deve pela diferença dos coeficientes de rugosidade, diâmetro e perda de carga. Lembrando que em condutos sob pressão pela fórmula de Hazen-Willians a fórmula de velocidade é: $V = 0,355 \cdot C \cdot D^{0,63} J^{0,54}$.

E pela fórmula universal é:
$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot J \cdot g \cdot D}{f}}$$

Observa-se que em vários trechos (em destaque) a velocidade ficou abaixo da velocidade mínima de norma (0,6 m/s). Muitas vezes não é possível se adequar todas as condições de norma e a velocidade mínima acaba não sendo atendida para que as outras condições, tais como pressão mínima, diâmetro mínimo e a perda de carga fiquem dentro dos limites.

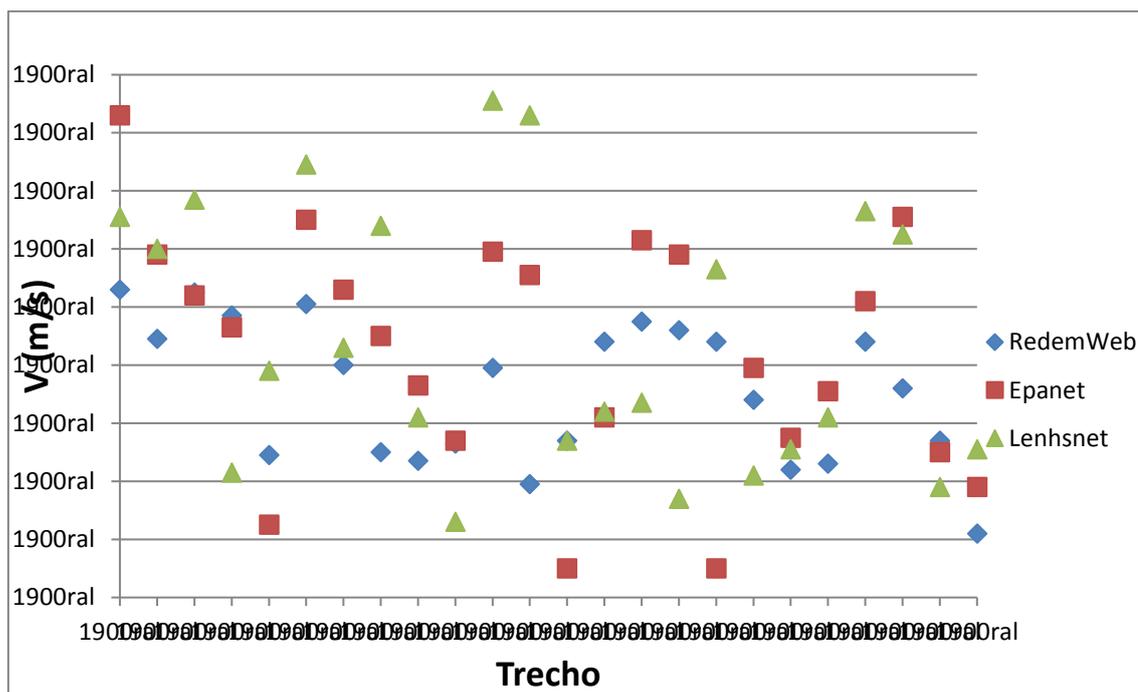


Figura 36: Gráfico de comparação dos resultados das velocidades em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário

A seguir a tabela 40 e a figura 52 apresentam a comparação dos resultados das vazões em cada trecho aplicado por cada programa.

Tabela 40: Tabela de comparação dos resultados das vazões em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário

| Trecho | RedemWeb Q(L/s) | Epanet Q(L/s) | Lenhsnet Q(L/s) | UFC-4 Q(L/s) |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| 1 | 208,50 | 208,50 | 208,50 | - |
| 2 | 111,44 | 83,67 | 21,25 | - |
| 3 | 100,94 | 73,17 | 10,75 | - |
| 4 | 93,54 | 65,77 | 3,35 | - |
| 5 | 2,17 | 1,10 | 6,10 | - |
| 6 | 97,06 | 124,83 | 187,25 | - |
| 7 | 14,07 | 33,45 | 15,26 | - |
| 8 | 8,87 | 28,25 | 10,06 | - |
| 9 | 3,67 | 23,05 | 4,86 | - |
| 10 | 2,33 | 17,05 | 1,14 | - |
| 11 | 75,59 | 83,98 | 164,59 | - |
| 12 | 1,73 | 78,78 | 159,39 | - |

| Trecho | RedemWeb Q(L/s) | Epanet Q(L/s) | Lenhsnet Q(L/s) | UFC-4 Q(L/s) |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| 13 | 16,92 | 0,45 | 16,99 | - |
| 14 | 43,12 | 2,75 | 20,19 | - |
| 15 | 91,51 | 60,47 | 5,25 | - |
| 16 | 88,91 | 57,87 | 2,65 | - |
| 17 | 61,99 | 0,43 | 55,65 | - |
| 18 | 11,99 | 13,99 | 13,25 | - |
| 19 | 7,79 | 9,79 | 9,05 | - |
| 20 | 3,59 | 5,59 | 4,85 | - |
| 21 | 43,40 | 72,43 | 128,40 | - |
| 22 | 35,50 | 64,53 | 120,50 | - |
| 23 | 4,21 | 2,21 | 2,95 | - |
| 24 | 0,99 | 2,99 | 2,25 | - |

A diferença das vazões se deve pelas diferenças do coeficiente de rugosidade, pelo diâmetro e pela perda de carga de cada trecho. Ela também é influenciada pela demanda do nó a montante e jusante de cada trecho. Lembrando que pela fórmula de Hazen-Williams o cálculo da vazão é: $Q = 0,2785 \cdot C \cdot D^{2,63} J^{0,54}$.

E pela fórmula universal é:
$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot J \cdot g \cdot D}{f}}$$

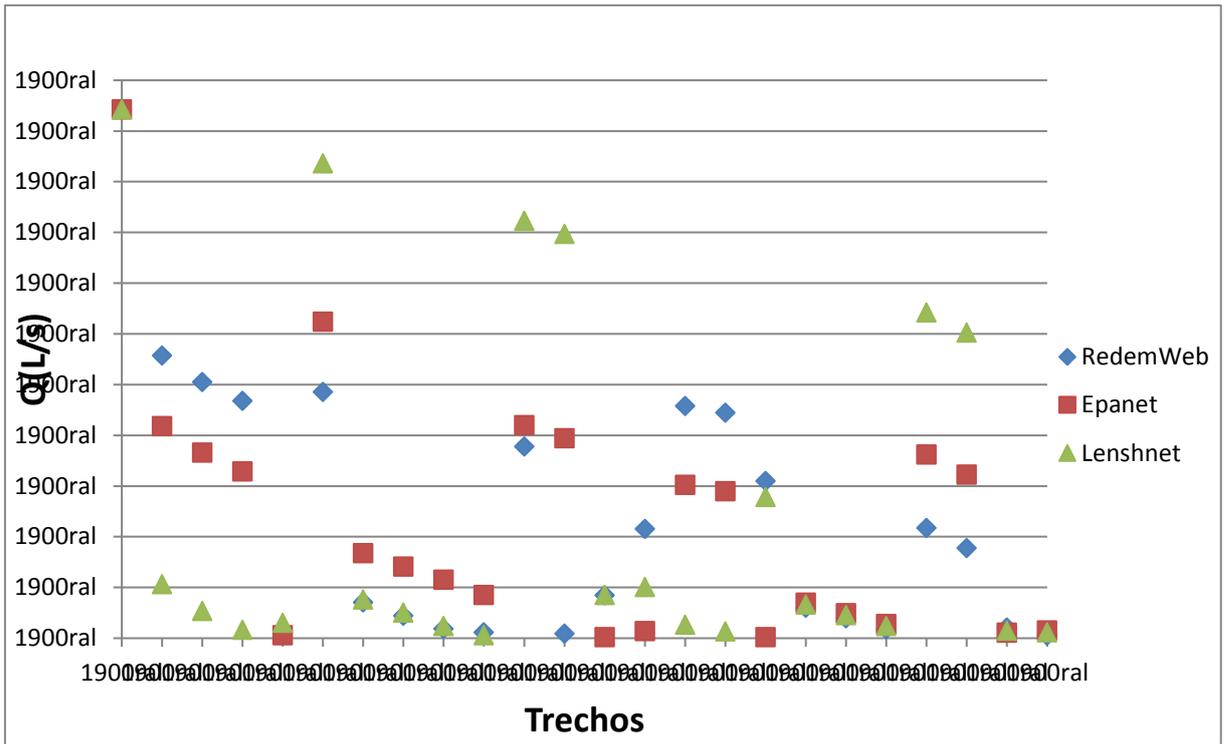


Figura 37: Gráfico de comparação dos resultados das vazões em cada trecho aplicado por cada programa da rede Setor Secundário

4.7.2 Rede Bonito de Minas

A tabela 41 e a figura 53 mostram a comparação dos resultados da pressão em cada nó aplicado por cada programa.

Tabela 41: Tabela de comparação dos resultados das pressões em cada nó aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas

| Nó | Pressão (m.c.a) RedemWeb | Pressão (m.c.a) Epanet | Pressão (m.c.a) Lenhsnet | Pressão (m.c.a) UFC-4 |
|----|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 15,59 | 15,76 | 15,47 | - |
| 2 | 17,98 | 18,23 | 16,86 | - |
| 3 | 20,42 | 20,27 | 16,62 | - |
| 4 | 20,22 | 20,03 | 15,83 | - |
| 5 | 20,14 | 19,75 | 15,85 | - |
| 6 | 19,61 | 19,18 | 15,24 | - |
| 7 | 19,62 | 19,00 | 15,28 | - |
| 8 | 21,45 | 20,83 | 15,76 | - |
| 9 | 24,53 | 23,95 | 18,99 | - |
| 10 | 24,52 | 23,87 | 18,92 | - |
| 11 | 21,34 | 20,58 | 15,64 | - |
| 12 | 22,31 | 21,82 | 16,82 | - |
| 13 | 23,66 | 23,26 | 20,14 | - |
| 14 | 19,53 | 19,15 | 16,62 | - |
| 15 | 19,23 | 18,29 | 16,28 | - |
| 16 | 19,36 | 18,37 | 16,50 | - |
| 17 | 17,85 | 16,86 | 15,28 | - |
| 18 | 16,95 | 16,16 | 15,02 | - |
| 19 | 17,07 | 16,28 | 15,10 | - |
| 20 | 17,58 | 17,34 | 15,69 | - |
| 21 | 28,73 | 28,29 | 22,42 | - |
| 22 | 25,11 | 24,60 | 19,10 | - |
| 23 | 19,47 | 18,93 | 15,77 | - |
| 24 | 20,78 | 20,26 | 15,52 | - |

| Nó | Pressão (m.c.a) RedemWeb | Pressão (m.c.a) Epanet | Pressão (m.c.a) Lenhsnet | Pressão (m.c.a) UFC-4 |
|----|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 25 | 21,01 | 20,48 | 15,73 | - |
| 26 | 18,54 | 18,31 | 15,44 | - |
| 27 | 17,90 | 17,83 | 16,18 | - |
| 28 | 16,81 | 16,68 | 15,50 | - |
| 29 | 17,30 | 17,15 | 15,91 | - |
| 30 | 18,39 | 18,11 | 15,59 | - |
| 31 | 20,76 | 20,19 | 15,69 | - |
| 32 | 21,14 | 20,58 | 15,85 | - |
| 33 | 21,10 | 20,53 | 15,77 | - |
| 34 | 20,94 | 20,49 | 15,56 | - |
| 35 | 21,23 | 20,47 | 15,75 | - |
| 36 | 18,83 | 18,53 | 15,21 | - |
| 37 | 17,81 | 17,64 | 15,64 | - |
| 38 | 16,50 | 16,46 | 15,72 | - |
| 39 | 16,04 | 16,11 | 15,63 | - |
| 40 | 16,25 | 16,06 | 15,16 | - |
| 41 | 16,09 | 15,88 | 15,25 | - |
| 42 | 15,38 | 15,22 | 15,22 | - |
| 43 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | - |
| 44 | 15,24 | 15,28 | 15,22 | - |

As pressões máximas e mínimas e as pressões em cada nó foram diferentes pelo fato dos diâmetros e das características hidráulicas das tubulações serem diferentes.

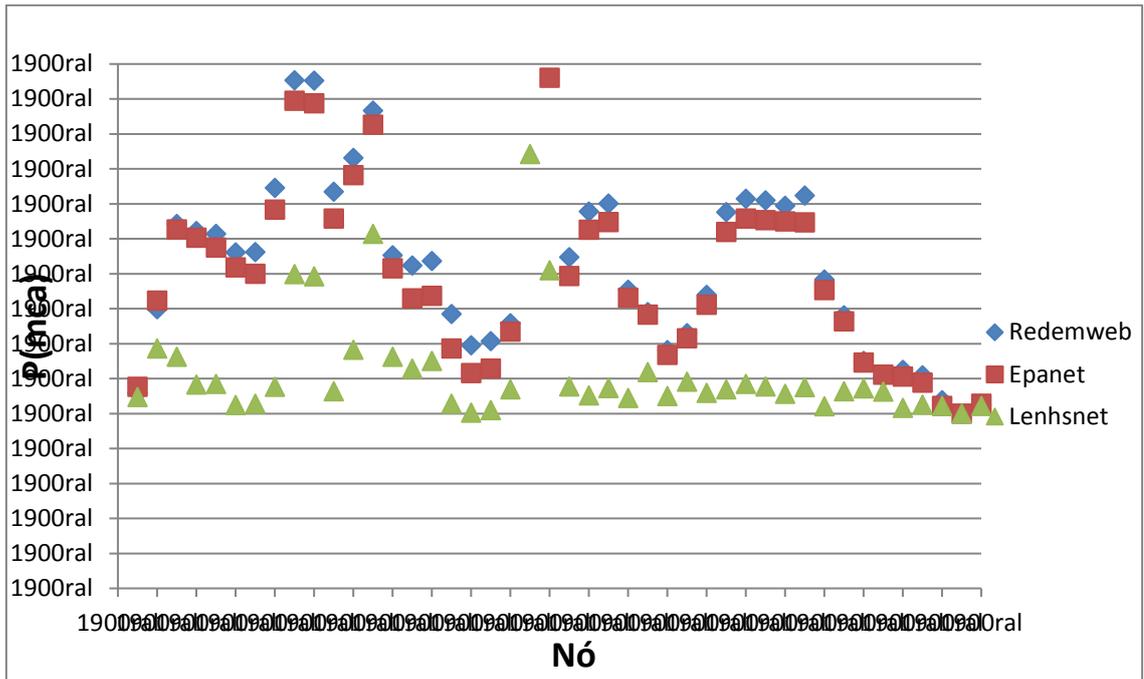


Figura 38: Gráfico de comparação dos resultados das pressões em cada nó aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas

A tabela 42 apresenta a comparação dos resultados da cota do nível d'água do reservatório aplicado por cada programa.

Tabela 42: Cota do nível d'água do reservatório da rede Bonito de Minas aplicado em cada programa

| Programa | Altura do reservatório (m) |
|----------|----------------------------|
| RedemWeb | 530,07 |
| Epanet | 530,35 |
| Lenhsnet | 530,32 |
| UFC-4 | - |

No programa RedemWeb, o cálculo da cota do nível d'água do reservatório tem que ser feito manualmente ou por auxílio de outro programa. Soma-se a carga hidráulica do nó posterior ao reservatório mais a perda do trecho do reservatório a esse nó.

Ex: cota do nível d'água do reservatório RedemWeb = Cota Piezométrica (nó 1) + perdas do trecho 57(J.L) = $529,96 + (2,62 \times 10^{-3} \times 42.08) = 530,07$

A cota do nível de água do reservatório do programa RedemWeb é menor pelo fato dos diâmetros serem maiores e conseqüentemente menores perdas. Logo, a pressão mínima exigida é atingida com uma altura de nível de água menor. Em todos os programas a pressão mínima atingida foi de 15 m.c.a.

A tabela 43 faz a comparação dos resultados dos custos das tubulações aplicados por cada programa.

Tabela 43: Custo das tubulações da rede Bonito de Minas aplicado em cada programa

| Programa | Custo das tubulações (R\$) |
|----------|----------------------------|
| RedemWeb | 424.785,39 |
| Epanet | 345.995,08 |
| Lenhsnet | 312.253,05 |
| UFC-4 | - |

Observa-se que o custo da instalação da RedemWeb teve um valor bem maior que o do Epanet e Lenhsnet. Isto se deve pelo fato do programa RedemWeb seguir a tabela 3 de velocidade limite de Rodrigo Porto, o que acarreta em pequenas perdas de carga. Já o Lenhsnet possui o custo mais barato pelo fato de ser otimizado conforme os limites da norma e possuir maiores perdas de carga.

A tabela 44 e a figura 54 mostram a comparação dos resultados da perda de carga em cada trecho aplicado por cada programa.

Tabela 44: Tabela de comparação dos resultados das perdas de carga em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas

| Trecho | J(m/km) RedemWeb | J(m/km) Epanet | J(m/km) Lenhsnet | J(m/km) UFC-4 |
|--------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| 1 | 3,35 | 2,54 | 14,15 | - |
| 2 | 2,88 | 6,88 | 29,53 | - |
| 3 | 2,50 | 3,13 | 13,93 | - |
| 4 | 1,85 | 4,83 | 0,49 | - |
| 5 | 3,56 | 4,03 | 4,41 | - |
| 6 | 2,09 | 4,47 | 1,76 | - |

| Trecho | J(m/km) RedemWeb | J(m/km) Epanet | J(m/km) Lenhsnet | J(m/km) UFC-4 |
|--------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| 7 | 2,18 | 2,17 | 15,56 | - |
| 8 | 5,07 | 4,64 | 3,75 | - |
| 9 | 0,66 | 1,85 | 1,66 | - |
| 10 | 2,26 | 1,26 | 1,42 | - |
| 11 | 4,53 | 6,34 | 4,66 | - |
| 12 | 2,53 | 4,01 | 4,70 | - |
| 13 | 2,09 | 2,33 | 8,16 | - |
| 14 | 0,96 | 7,81 | 1,50 | - |
| 15 | 0,14 | 0,75 | 1,18 | - |
| 16 | 1,01 | 1,00 | 6,71 | - |
| 17 | 1,19 | 5,05 | 14,03 | - |
| 18 | 2,32 | 2,58 | 0,97 | - |
| 19 | 1,17 | 5,87 | 1,81 | - |
| 20 | 2,06 | 3,44 | 12,12 | - |
| 21 | 4,16 | 4,92 | 20,91 | - |
| 22 | 2,08 | 2,38 | 29,70 | - |
| 23 | 5,10 | 5,80 | 2,40 | - |
| 24 | 5,71 | 6,51 | 0,41 | - |
| 25 | 4,01 | 5,66 | 11,78 | - |
| 26 | 2,72 | 3,45 | 8,48 | - |
| 27 | 4,46 | 3,05 | 15,83 | - |
| 28 | 2,12 | 4,76 | 6,79 | - |
| 29 | 3,43 | 3,29 | 3,21 | - |
| 30 | 2,91 | 3,91 | 13,05 | - |
| 31 | 0,60 | 3,03 | 15,70 | - |
| 32 | 2,06 | 4,46 | 22,60 | - |
| 33 | 8,50 | 5,95 | 5,92 | - |
| 34 | 1,81 | 3,42 | 9,87 | - |
| 35 | 5,18 | 5,66 | 6,66 | - |
| 36 | 2,19 | 4,25 | 25,84 | - |

| Trecho | J(m/km) RedemWeb | J(m/km) Epanet | J(m/km) Lenhsnet | J(m/km) UFC-4 |
|--------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| 37 | 1,49 | 2,89 | 18,69 | - |
| 38 | 2,47 | 5,86 | 17,08 | - |
| 39 | 3,85 | 3,55 | 9,23 | - |
| 40 | 2,90 | 2,53 | 2,78 | - |
| 41 | 3,05 | 2,59 | 0,62 | - |
| 42 | 3,85 | 6,09 | 2,88 | - |
| 43 | 1,42 | 3,26 | 8,16 | - |
| 44 | 5,58 | 5,45 | 15,52 | - |
| 45 | 4,78 | 3,19 | 15,31 | - |
| 46 | 1,83 | 4,41 | 28,49 | - |
| 47 | 2,20 | 5,39 | 40,06 | - |
| 48 | 3,19 | 6,40 | 13,13 | - |
| 49 | 2,96 | 5,73 | 15,52 | - |
| 50 | 3,53 | 4,86 | 0,44 | - |
| 51 | 0,37 | 0,72 | 4,18 | - |
| 52 | 0,48 | 0,82 | 11,45 | - |
| 53 | 2,96 | 5,62 | 5,58 | - |
| 54 | 1,81 | 3,08 | 1,53 | - |
| 55 | 3,69 | 5,61 | 2,27 | - |
| 56 | 1,89 | 3,70 | 7,69 | - |
| 57 | 2,62 | 5,15 | 11,41 | - |

A perda de carga do trecho 57 foi calculada pela fórmula Universal:

$$J\left(\frac{m}{km}\right) = 1000 \cdot \frac{f}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 1000 \cdot \frac{0,019}{0,400} \times \frac{1,04^2}{2 \cdot 9,8} = 2,62$$

Também pode ser calculada pela fórmula de Hazen-Williams:

$$J\left(\frac{m}{km}\right) = 1000 \cdot \frac{10,65}{D^{4,87}} \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,85} = 1000 \cdot \frac{10,65}{0,40^{4,87}} \times \left(\frac{0,1311}{130}\right)^{1,85} = 2,61$$

Verifica-se que por ambas as fórmulas os valores são bem próximos.

A perda de carga nos demais trechos no RedemWeb foi calculada manualmente, pela diferença da carga hidráulica (cota piezométrica) dos nós de cada trecho, dividida pelo comprimento do trecho.

Ex: para o trecho 1:

$$J(\text{m/km}) = \left(\frac{\text{cotaPiez 1} - \text{cotaPiez 2}}{L(\text{m})\text{trecho 1}} \right) \cdot 1000 = \left(\frac{529,96 - 529,65}{92,45} \right) \cdot 1000 = 3,35$$

A perda de carga do trecho 52 foi calculada por Hazen-Willians pelo fato da diferença da carga hidráulica (cota piezométrica) dos nós do trecho 52 ser zero. E isso fisicamente significaria que a água estaria parada. Fato que não ocorre.

Em destaque os trechos que tiveram altas perdas de carga (acima de 10 m/km) pelo simulador (otimizador) do Lenhsnet.

A diferença das perdas de carga se deve pelas diferenças dos diâmetros, rugosidade e vazão de cada trecho. Lembrando que pela fórmula de Hazen-Willians

o cálculo de perda de carga é: $J = \frac{10,65}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,85}$.

E pela fórmula universal é: $J = \frac{8 \cdot f}{\pi^2 \cdot g} \cdot \frac{Q^2}{D^5}$ ou $J = \frac{f}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$

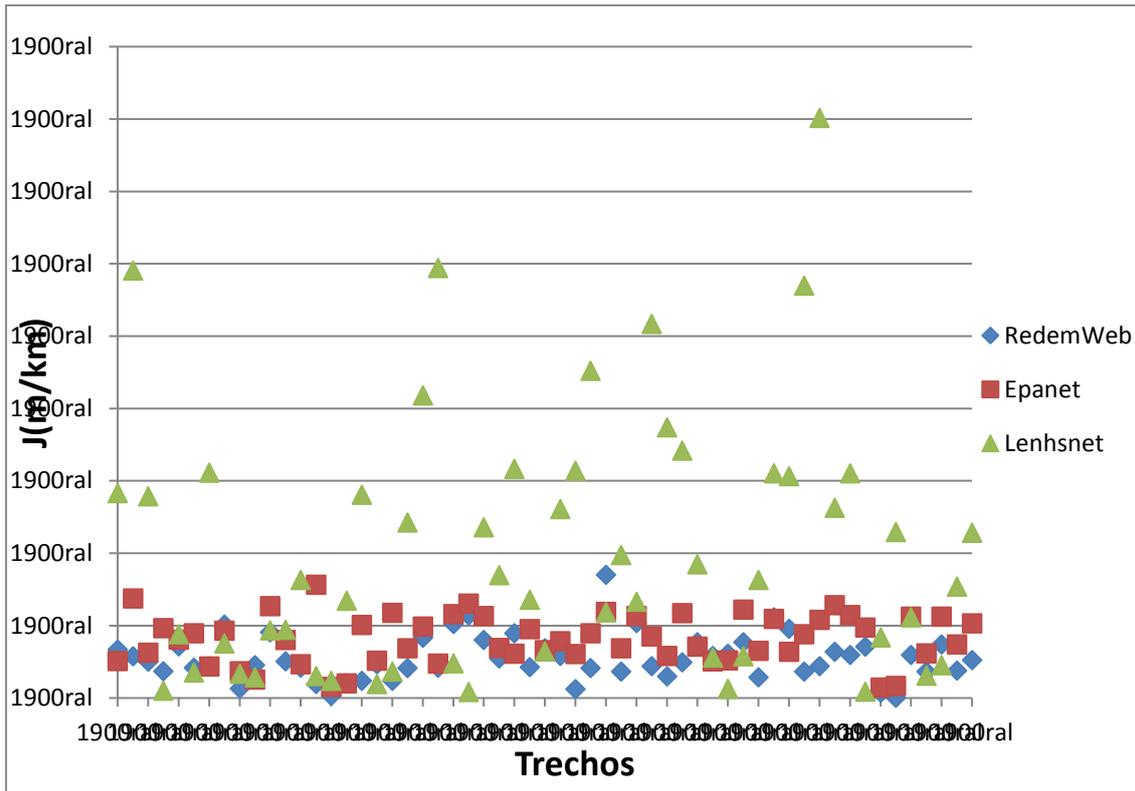


Figura 39: Gráfico de comparação dos resultados das perdas de carga em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas

A tabela 45 e a figura 55 mostram a comparação dos resultados dos diâmetros em cada trecho aplicado por cada programa.

Tabela 45: Tabela de comparação dos resultados dos diâmetros em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas

| Trecho | D(mm) RedemWeb | D(mm) Epanet | D(mm) Lenhsnet | D(mm) UFC-4 |
|--------|----------------|--------------|----------------|-------------|
| 1 | 250 | 150 | 100 | - |
| 2 | 250 | 100 | 75 | - |
| 3 | 250 | 100 | 75 | - |
| 4 | 250 | 100 | 75 | - |
| 5 | 200 | 100 | 75 | - |
| 6 | 200 | 100 | 100 | - |
| 7 | 150 | 150 | 100 | - |
| 8 | 75 | 75 | 100 | - |
| 9 | 75 | 75 | 75 | - |

| Trecho | D(mm) RedemWeb | D(mm) Epanet | D(mm) Lenhsnet | D(mm) UFC-4 |
|--------|-------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| 10 | 75 | 75 | 75 | - |
| 11 | 75 | 75 | 75 | - |
| 12 | 75 | 75 | 75 | - |
| 13 | 200 | 200 | 150 | - |
| 14 | 100 | 75 | 75 | - |
| 15 | 75 | 75 | 75 | - |
| 16 | 75 | 75 | 75 | - |
| 17 | 100 | 75 | 75 | - |
| 18 | 100 | 100 | 150 | - |
| 19 | 150 | 100 | 150 | - |
| 20 | 250 | 250 | 200 | - |
| 21 | 100 | 100 | 75 | - |
| 22 | 150 | 150 | 75 | - |
| 23 | 100 | 100 | 100 | - |
| 24 | 75 | 75 | 75 | - |
| 25 | 100 | 150 | 150 | - |
| 26 | 75 | 150 | 150 | - |
| 27 | 100 | 75 | 75 | - |
| 28 | 100 | 75 | 75 | - |
| 29 | 75 | 100 | 75 | - |
| 30 | 75 | 100 | 75 | - |
| 31 | 75 | 150 | 100 | - |
| 32 | 100 | 150 | 100 | - |
| 33 | 100 | 150 | 150 | - |
| 34 | 300 | 300 | 250 | - |
| 35 | 100 | 150 | 150 | - |
| 36 | 100 | 150 | 100 | - |
| 37 | 75 | 150 | 100 | - |
| 38 | 100 | 100 | 75 | - |
| 39 | 75 | 100 | 75 | - |
| 40 | 100 | 100 | 75 | - |

| Trecho | D(mm) RedemWeb | D(mm) Epanet | D(mm) Lenhsnet | D(mm) UFC-4 |
|--------|-------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| 41 | 100 | 75 | 75 | - |
| 42 | 100 | 75 | 75 | - |
| 43 | 150 | 100 | 75 | - |
| 44 | 150 | 100 | 75 | - |
| 45 | 100 | 150 | 75 | - |
| 46 | 150 | 150 | 75 | - |
| 47 | 150 | 150 | 75 | - |
| 48 | 150 | 150 | 100 | - |
| 49 | 300 | 300 | 250 | - |
| 50 | 75 | 75 | 75 | - |
| 51 | 75 | 75 | 75 | - |
| 52 | 75 | 75 | 75 | - |
| 53 | 75 | 75 | 100 | - |
| 54 | 100 | 100 | 150 | - |
| 55 | 100 | 100 | 150 | - |
| 56 | 350 | 350 | 300 | - |
| 57 | 400 | 350 | 300 | - |

A diferença dos diâmetros se deve principalmente pela forma que as vazões são distribuídas, pelo material dos tubos e pelas perdas de carga. Lembrando que pela fórmula de Hazen-Willians o cálculo do diâmetro é: $D = \left(\frac{3,587Q}{J^{0,54}C} \right)^{0,38}$.

E pela fórmula universal é: $D = \sqrt[5]{\frac{8.f.Q^2}{J.\pi^2.g}}$

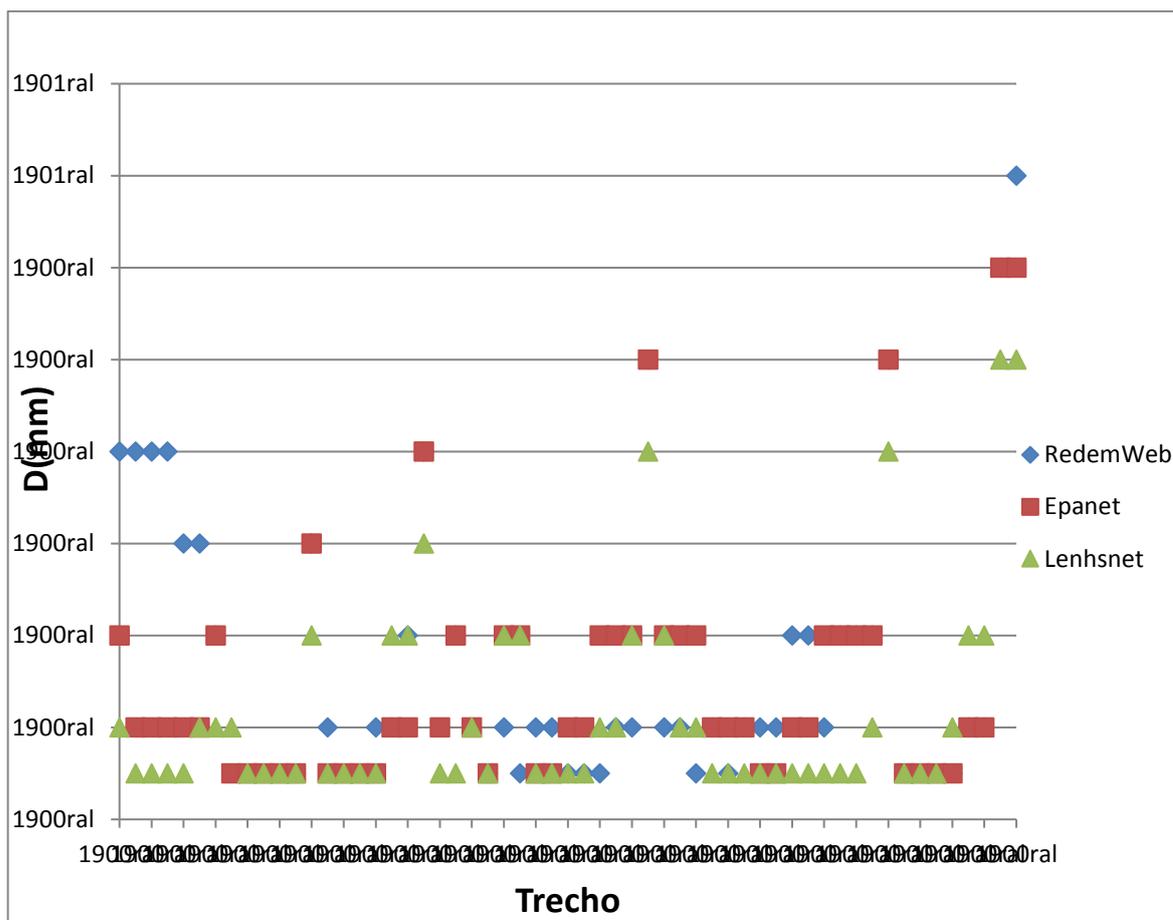


Figura 40: Gráfico de comparação dos resultados dos diâmetros em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas

A tabela 46 e a figura 56 apresentam a comparação dos resultados das velocidades em cada trecho aplicado por cada programa.

Tabela 46: Tabela de comparação dos resultados das velocidades em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas

| Trecho | V(m/s) RedemWeb | V(m/s) Epanet | V(m/s) Lenhsnet | V(m/s) UFC-4 |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| 1 | 0,88 | 0,55 | 1,27 | - |
| 2 | 0,82 | 0,85 | 1,58 | - |
| 3 | 0,77 | 0,55 | 1,04 | - |
| 4 | 0,64 | 0,70 | 0,16 | - |
| 5 | 0,77 | 0,63 | 0,54 | - |
| 6 | 0,56 | 0,67 | 0,40 | - |
| 7 | 0,50 | 0,51 | 1,34 | - |

| Trecho | V(m/s) RedemWeb | V(m/s) Epanet | V(m/s) Lenhsnet | V(m/s) UFC-4 |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| 8 | 0,57 | 0,56 | 0,61 | - |
| 9 | 0,19 | 0,33 | 0,31 | - |
| 10 | 0,41 | 0,27 | 0,29 | - |
| 11 | 0,55 | 0,67 | 0,56 | - |
| 12 | 0,43 | 0,52 | 0,56 | - |
| 13 | 0,60 | 0,63 | 1,00 | - |
| 14 | 0,36 | 0,75 | 0,30 | - |
| 15 | 0,10 | 0,20 | 0,26 | - |
| 16 | 0,34 | 0,23 | 0,69 | - |
| 17 | 0,39 | 0,59 | 1,04 | - |
| 18 | 0,55 | 0,49 | 0,33 | - |
| 19 | 0,37 | 0,78 | 0,46 | - |
| 20 | 0,68 | 0,89 | 1,48 | - |
| 21 | 0,66 | 0,71 | 1,30 | - |
| 22 | 0,49 | 0,53 | 1,58 | - |
| 23 | 0,69 | 0,77 | 0,47 | - |
| 24 | 0,52 | 0,68 | 0,14 | - |
| 25 | 0,72 | 0,83 | 1,21 | - |
| 26 | 0,52 | 0,64 | 1,02 | - |
| 27 | 0,69 | 0,44 | 1,12 | - |
| 28 | 0,47 | 0,57 | 0,69 | - |
| 29 | 0,48 | 0,56 | 0,45 | - |
| 30 | 0,44 | 0,62 | 1,00 | - |
| 31 | 0,22 | 0,60 | 1,35 | - |
| 32 | 0,42 | 0,74 | 1,65 | - |
| 33 | 0,69 | 0,85 | 0,85 | - |
| 34 | 0,72 | 1,00 | 1,54 | - |
| 35 | 0,76 | 0,83 | 0,90 | - |
| 36 | 0,50 | 0,72 | 1,78 | - |
| 37 | 0,37 | 0,59 | 1,48 | - |
| 38 | 0,51 | 0,78 | 1,16 | - |

| Trecho | V(m/s) RedemWeb | V(m/s) Epanet | V(m/s) Lenhsnet | V(m/s) UFC-4 |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| 39 | 0,57 | 0,59 | 0,82 | - |
| 40 | 0,57 | 0,49 | 0,42 | - |
| 41 | 0,58 | 0,40 | 0,18 | - |
| 42 | 0,72 | 0,65 | 0,43 | - |
| 43 | 0,41 | 0,56 | 0,77 | - |
| 44 | 0,49 | 0,75 | 1,10 | - |
| 45 | 0,78 | 0,62 | 1,09 | - |
| 46 | 0,46 | 0,73 | 1,55 | - |
| 47 | 0,54 | 0,81 | 1,87 | - |
| 48 | 0,61 | 0,89 | 1,22 | - |
| 49 | 0,90 | 1,31 | 1,93 | - |
| 50 | 0,62 | 0,58 | 0,15 | - |
| 51 | 0,24 | 0,19 | 0,53 | - |
| 52 | 0,17 | 0,21 | 0,93 | - |
| 53 | 0,58 | 0,62 | 0,76 | - |
| 54 | 0,52 | 0,54 | 0,42 | - |
| 55 | 0,73 | 0,76 | 0,52 | - |
| 56 | 0,80 | 1,15 | 1,52 | - |
| 57 | 1,04 | 1,36 | 1,85 | - |

A diferença das velocidades se deve pela diferença dos coeficientes de rugosidade, diâmetro e perda de carga. Lembrando que em condutos sob pressão pela fórmula de Hazen-Willians a fórmula de velocidade é: $V = 0,355 \cdot C \cdot D^{0,63} J^{0,54}$.

E pela fórmula universal é:
$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot J \cdot g \cdot D}{f}}$$

Observa-se que em vários trechos (em destaque) a velocidade ficou abaixo da velocidade mínima de norma (0,6m/s). Muitas vezes não é possível se adequar todas as condições de norma e a velocidade mínima acaba não sendo atendida para

que as outras condições o sejam como pressão mínima, diâmetro mínimo e a perda de carga.

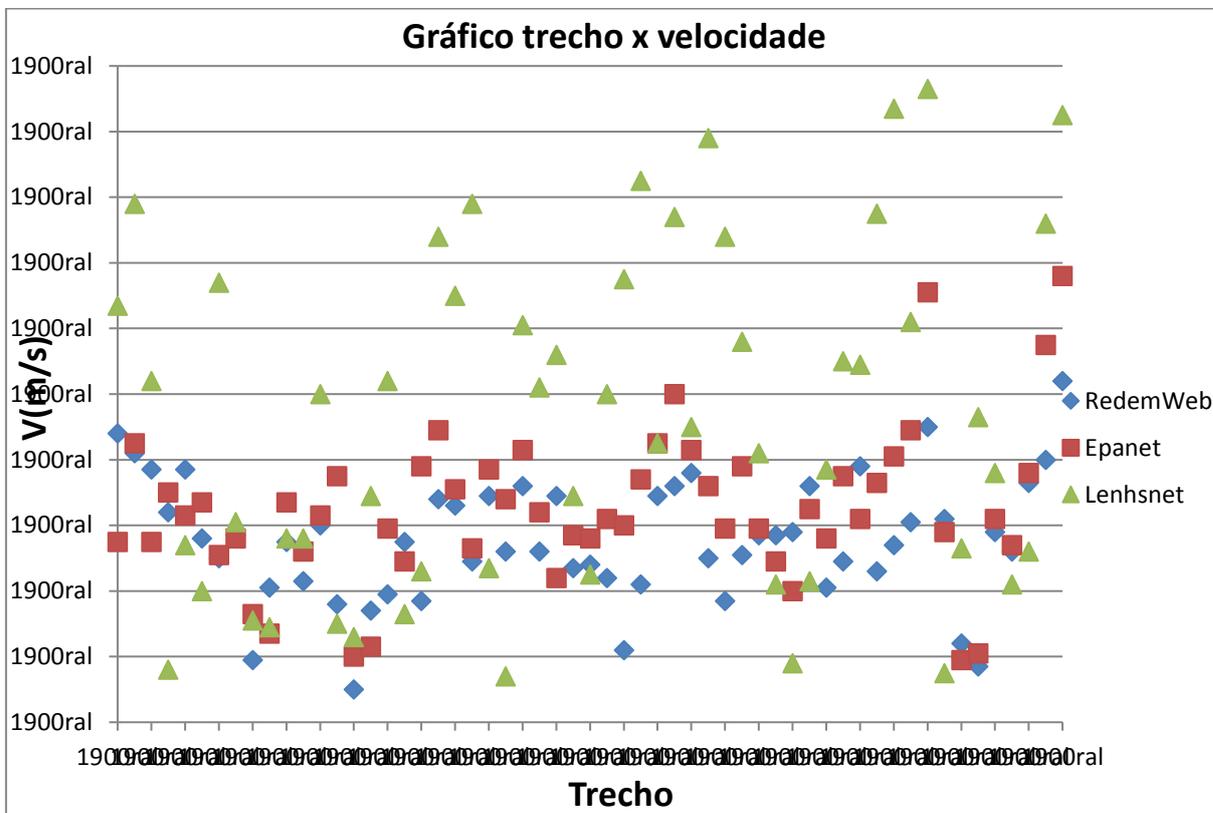


Figura 41: Gráfico de comparação dos resultados das velocidades em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas

A tabela 47 e a figura 57 apresentam a comparação dos resultados das vazões em cada trecho aplicado por cada programa.

Tabela 47: Tabela de comparação dos resultados das vazões em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas

| Trecho | Q(L/s) RedemWeb | Q(L/s) Epanet | Q(L/s) Lenhsnet | Q(L/s) UFC-4 |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| 1 | 43,06 | 9,70 | 9,99 | - |
| 2 | 40,05 | 6,69 | 6,97 | - |
| 3 | 37,67 | 4,30 | 4,59 | - |
| 4 | 31,27 | 5,48 | 0,69 | - |
| 5 | 24,07 | 4,95 | 2,40 | - |
| 6 | 17,65 | 5,25 | 3,10 | - |

| Trecho | Q(L/s) RedemWeb | Q(L/s) Epanet | Q(L/s) Lenhsnet | Q(L/s) UFC-4 |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| 7 | 8,82 | 8,93 | 10,53 | - |
| 8 | 2,52 | 2,47 | 4,76 | - |
| 9 | 0,84 | 1,47 | 1,38 | - |
| 10 | 1,81 | 1,18 | 1,27 | - |
| 11 | 2,43 | 2,95 | 2,48 | - |
| 12 | 1,91 | 2,28 | 2,49 | - |
| 13 | 18,85 | 19,90 | 17,73 | - |
| 14 | 2,86 | 3,32 | 1,31 | - |
| 15 | 0,42 | 0,88 | 1,13 | - |
| 16 | 1,49 | 1,03 | 3,04 | - |
| 17 | 3,05 | 2,59 | 4,60 | - |
| 18 | 4,31 | 3,85 | 5,86 | - |
| 19 | 6,57 | 6,11 | 8,13 | - |
| 20 | 33,33 | 43,91 | 46,46 | - |
| 21 | 5,17 | 5,54 | 5,75 | - |
| 22 | 8,69 | 9,37 | 6,99 | - |
| 23 | 5,40 | 6,08 | 3,70 | - |
| 24 | 2,32 | 2,99 | 0,62 | - |
| 25 | 5,62 | 14,69 | 21,41 | - |
| 26 | 2,30 | 11,37 | 18,09 | - |
| 27 | 5,39 | 1,96 | 4,93 | - |
| 28 | 3,66 | 2,51 | 3,07 | - |
| 29 | 2,14 | 4,42 | 2,01 | - |
| 30 | 1,93 | 4,87 | 4,42 | - |
| 31 | 0,97 | 10,62 | 10,58 | - |
| 32 | 3,34 | 12,99 | 12,95 | - |
| 33 | 5,43 | 15,08 | 15,04 | - |
| 34 | 51,07 | 70,84 | 75,36 | - |
| 35 | 5,94 | 14,70 | 15,97 | - |
| 36 | 3,91 | 12,67 | 13,95 | - |
| 37 | 1,62 | 10,38 | 11,66 | - |

| Trecho | Q(L/s) RedemWeb | Q(L/s) Epanet | Q(L/s) Lenhsnet | Q(L/s) UFC-4 |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| 38 | 4,01 | 6,11 | 5,14 | - |
| 39 | 2,51 | 4,61 | 3,64 | - |
| 40 | 4,48 | 3,82 | 1,85 | - |
| 41 | 4,55 | 1,78 | 0,78 | - |
| 42 | 5,66 | 2,89 | 1,89 | - |
| 43 | 7,17 | 4,40 | 3,40 | - |
| 44 | 8,64 | 5,87 | 4,87 | - |
| 45 | 6,10 | 10,91 | 4,84 | - |
| 46 | 8,10 | 12,91 | 6,83 | - |
| 47 | 9,52 | 14,33 | 8,26 | - |
| 48 | 10,84 | 15,66 | 9,58 | - |
| 49 | 63,9 | 92,25 | 94,86 | - |
| 50 | 2,73 | 2,54 | 0,65 | - |
| 51 | 1,04 | 0,86 | 2,33 | - |
| 52 | 0,74 | 0,92 | 4,11 | - |
| 53 | 2,57 | 2,75 | 5,94 | - |
| 54 | 4,07 | 4,26 | 7,44 | - |
| 55 | 5,77 | 5,96 | 9,15 | - |
| 56 | 77,2 | 110,68 | 107,20 | - |
| 57 | 131,10 | 131,10 | 131,10 | - |

A diferença das vazões se deve pelas diferenças do coeficiente de rugosidade, pelo diâmetro e pela perda de carga de cada trecho. Ela também é influenciada pela demanda do nó a montante e jusante de cada trecho. Lembrando que pela fórmula de Hazen-Willians o cálculo da vazão é: $Q = 0,2785 \cdot C \cdot D^{2,63} J^{0,54}$.

E pela fórmula universal é: $Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot J \cdot g \cdot D}{f}}$.

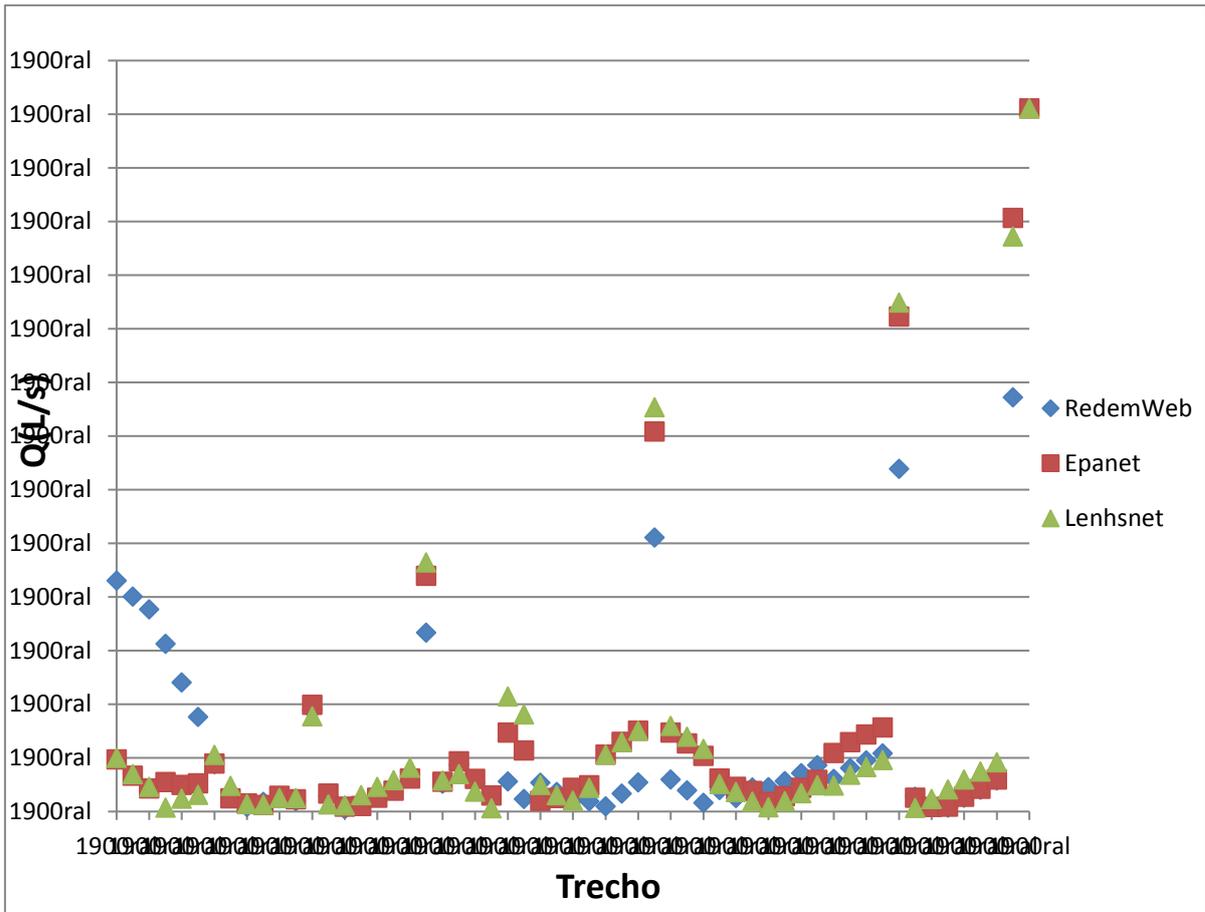


Figura 42: Gráfico de comparação dos resultados das vazões em cada trecho aplicado por cada programa da rede Bonito de Minas

5 – CONCLUSÕES

Os modelos testados foram capazes de dimensionar as duas redes de distribuição de água aqui estudadas, uns otimizando (Lenhsnet) e outros apenas simulando sem otimizar (Epanet e RedemWeb).

A respeito do programa RedemWeb, viu-se que ele é o que possui menos recursos, já que não se pode ver a representação da rede, não calcula as perdas de carga, não calcula nada entre o reservatório e o primeiro nó. Os parâmetros de velocidade nos resultados são baseados na tabela 3, no que resulta em perdas de cargas bem abaixo do limite. Conseqüentemente, os diâmetros são maiores sem necessidade, resultando em maiores custos em comparação com outros programas que simularam a mesma rede.

O programa Epanet é apenas um programa simulador e não otimizador. Então, ao simular uma rede deve-se ficar atento ao limite dos parâmetros hidráulicos de velocidade, pressão e diâmetro impostos pela norma da NBR 12218/1994. A perda de carga também deve ser limitada. Observou-se que a rede, na simulação feita pelo Epanet, sempre fica mais cara quando comparada a um programa otimizador, justamente pelo fato dele apenas simular e não otimizar.

O modelo Lenhsnet mostrou-se menos apropriado para a otimização de redes de distribuição de água, pois nele não há como limitar as perdas de carga. Sendo assim, ao otimizar, foram notados que alguns trechos tinham a perda de carga bem acima do limite recomendado pelos especialistas, que é de 8m/km. Porém, o seu custo foi sempre o mais baixo.

6 – RECOMENDAÇÕES

Para uma melhor simulação dentro do programa Epanet, onde a distribuição fique de forma otimizada, ou seja, a rede mais barata e dentro dos parâmetros da norma da NBR 12218/1994 e perdas de carga de até 10 m/km, que apesar de não estar na norma, é recomendada por vários autores, sugere-se simular pelo Lenshnet e para os trechos que apresentarem perdas elevadas, se aumentem os diâmetros para que as perdas de carga fiquem dentro do limite recomendado. Sendo assim, a rede estará a mais ideal possível e com menores gastos dentro dos parâmetros impostos pelo projetista.

Já o programa UFC-4 é provavelmente o melhor programa otimizador, por possuir maiores recursos, como o limite de perda de carga e por poder otimizar por dois critérios: dimensionamento pelo algorítmico genético e o dimensionamento pela pressão mínima. O programa é o único capaz de listar todos os acessórios necessários à rede. Porém, por problemas técnicos do programa que ainda está em desenvolvimento, não foi possível realizar as simulações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água**, NBR 12211/1989.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**, NBR 12218/1994.

AZEVEDO NETTO, J.M.; ALVAREZ, G.A. **Manual de Hidráulica, Vol. I**. 7ª ed. São Paulo, Edgard Blucher Ltda, 1988.

BARBOSA, P. S. F.; COSTA, A. A. e SANTOS Jr, J. B. S. **Um algoritmo de programação linear para análise de redes hidráulicas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 4, n. 4, p. 75-84, 1999.

BAPTISTA, M.B, Fundamentos de engenharia hidráulica / Márcio Baptista, Márcia Maria Lara Pinto Coelho. – 3. Ed. rev. e ampl. – Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 480p.

BRASIL. **Epanet 2.0 Manual do Usuário**. Paraíba: UFPB, 2006.

CASTRO, M.A.H. **Manual UFC Sistema de abastecimento de água Simulação e dimensionamento de redes de água e adutoras**. 2006

GOUVEIA, R.M.M. **Modelo computacional de otimização para dimensionamento de redes de distribuição de água abastecidas por múltiplos bombeamentos**. Tese de doutorado em Engenharia Civil. UFP, João Pessoa 2012.

MAIA JUNIOR, J.V.F. **Comparação de métodos de dimensionamento em redes de distribuição de água**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). UFC, Fortaleza 2012.

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

ROSSMAN, L. A. EPANET2: User's manual. **U.S. Environment Protection Agency**, Cincinnati, Ohio, USA, 2008.

SALVINO, M.M. **Método de dimensionamento e controle operacional otimizado para redes de distribuição de água**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). UFP, João Pessoa 2009.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014**. Brasília, 2016.

TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de água / Milton Tomoyuki Tsutiya – 1ª edição** – São Paulo – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. XIII – 643p.

http://www.aecweb.com.br/prod/e/tubos-e-conexoes-amanco-ductilfort_9126_27474
Acessado em 25/07/2016

<http://www.engenhariacivil.com/dicionario/> Acessado em 28/03/2016

<http://www.fec.unicamp.br/~sishidro/softwarewares/softwarewares.html>.
Acessado em 21/04/2016.

<http://o2engenharia.com.br/o2eng/instalacoes-hidro-sanitarias>
Acessado em 20/04/2016.

<http://www.rfcomercial.com.br/produtos/linha-saneamento-tubos-de-ferro-fundido/>
Acessado em 25/07/2016

<http://www.tigre.com.br>. Acessado em 15/04/2016