



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

**MODELO COMPUTACIONAL DE OTIMIZAÇÃO PARA
DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA ABASTECIDAS POR MÚLTIPLOS BOMBEAMENTOS**

Por

Roberta Macêdo Marques Gouveia

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Doutor.*

ROBERTA MACÊDO MARQUES GOUVEIA

**MODELO COMPUTACIONAL DE OTIMIZAÇÃO PARA
DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA ABASTECIDAS POR MÚLTIPLOS BOMBEAMENTOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor.

Orientador: Professor Dr. Heber Pimentel Gomes

G719m Gouveia, Roberta Macêdo Marques.
Modelo computacional de otimização para
dimensionamento de redes de distribuição de água
abastecidas por múltiplos bombeamentos / Roberta Macêdo
Marques Gouveia - João Pessoa, 2012.
187f.: il.
Orientador: Heber Pimentel Gomes.
Tese (Doutorado) – UFPB/CT/PPGEM
1. Água – distribuição – custos. 2. TDO – Programa de
Dimensionamento Otimizado. 3. Eficiência Energética.
4. Abastecimento de água – condições hidráulicas.

UFPB/BC

CDU: 626(043)

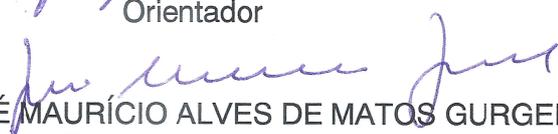
MODELO COMPUTACIONAL DE OTIMIZAÇÃO PARA DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ABASTECIDAS POR MÚLTIPLOS BOMBEAMENTOS

por

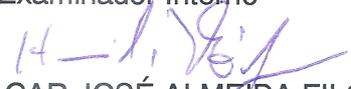
Roberta Macêdo Marques Gouveia

Tese aprovada em 20 de setembro de 2012


Prof. Dr. HEBER PIMENTEL GOMES
Orientador


Prof. Dr. JOSÉ MAURÍCIO ALVES DE MATOS GURGEL
Examinador Interno


Prof. Dr. LUIZ SIMÃO DE ANDRADE FILHO
Examinador Interno


Prof. Dr. HAMILCAR JOSÉ ALMEIDA FILGUEIRA


Prof. Dr. KENNEDY FLÁVIO MEIRA DE LUCENA
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Com amor e reconhecimento pela importância em minha vida, dedico:

Aos meus pais, Isaira Macedo Marques Gouveia e Severino Marques Gouveia.

Ao meu esposo, Alexandre Magno Gurgel Fialho.

Aos meus irmãos, Bruno e Rafael Macêdo Marques Gouveia.

AGRADECIMENTOS

Ao meu bom Deus, pelo dom da vida e pelas oportunidades concedidas, permitindo-me enveredar pelo caminho da ciência e do saber, e dando-me o alento necessário para prosseguir.

À Nossa Senhora, pelo seu grande exemplo de vida, mostrando-me o sentido da fé, superação, esperança, tolerância, doação e, principalmente, seu exemplo de amor.

Aos meus pais que tanto amo, Severino Marques Gouveia e Ilsaira Macêdo Marques Gouveia, pelo exemplo de dedicação, amizade e amor incondicional.

Ao meu amado esposo, Alexandre Magno Gurgel Fialho, pelo amor, dedicação, apoio, carinho e compreensão em todos os momentos.

Aos meus queridos irmãos Bruno Macêdo Marques Gouveia e Rafael Macêdo Marques Gouveia, pela amizade e harmônica convivência.

Ao meu orientador Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes, um agradecimento muito especial pelas preciosas orientações e pela amizade conquistada ao longo desses cinco anos juntos ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS/UFPB. Seus ensinamentos e motivações foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas da graduação e pós-graduação, em especial a toda equipe do LENHS – dentre eles, Moisés Menezes, Paulo Sérgio Oliveira, Magno José Gomes, Saulo de Tarso, Wil Lavor, Gênnisson Batista, Nicolle de Belmont, Flávia Lima, Renato de Sousa, Allan Santos e Wesley Imperiano – pelo auxílio, incentivo e companheirismo.

Ao Governo do Brasil, pelo apoio financeiro concedido por meio das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

À UFPB, instituição que, através de seus docentes e funcionários, foi responsável pela minha formação acadêmica. E a todos aqueles que contribuíram de algum modo para a realização deste trabalho. **Muito Obrigada!**

MODELO COMPUTACIONAL DE OTIMIZAÇÃO PARA DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ABASTECIDAS POR MÚLTIPLOS BOMBEAMENTOS

RESUMO

Os altos custos envolvidos nos sistemas de distribuição de água, particularmente no que diz respeito aos projetos e operação dos mesmos, refletem a importância de se estudar meios de minimizar os desperdícios de água e energia elétrica, a fim de elevar a eficiência desses sistemas. Na tentativa de minimizar e evitar tais desperdícios, este trabalho empenha-se em investigar e propor um modelo de dimensionamento otimizado de redes, com ênfase na eficiência hidráulica, energética e econômica. O principal objetivo é minimizar os custos do sistema, compreendido pelos custos das tubulações da rede, da energia do bombeamento principal (sistema principal de impulsão) e da energia dos bombeamentos secundários, representados por *boosters*. A metodologia proposta para o dimensionamento considera os custos energéticos dos múltiplos bombeamentos, além do custo de implantação das tubulações. Com o emprego desta metodologia pode-se alcançar um dimensionamento com pressões menores e mais adequadas, com a consequente diminuição das perdas de água e energia em todo o sistema. A fim de alcançar os objetivos propostos, a metodologia empregada neste trabalho compreende um algoritmo iterativo e dinâmico de otimização. O referido algoritmo deu origem ao programa *Toolkit de Dimensionamento Otimizado* (TDO), tendo sido implementado utilizando o *toolkit* de programação do simulador hidráulico EPANET 2.0. Para validar o trabalho, realizaram-se alguns estudos de casos com três redes de distribuição de água: *rede Grande Setor Expandida*, *rede R9 Adaptada* e *rede Hanoi*. Os resultados alcançados, pelo TDO, demonstram que os dimensionamentos mais adequados para operação das redes estudadas foram obtidos com a setorização, por meio da inclusão dos bombeamentos secundários.

Palavras chaves – Dimensionamento, Otimização, Setorização e Eficiência Energética.

COMPUTATIONAL MODEL OF OPTIMIZATION FOR SIZING OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS SUPPLIED BY MULTIPLE PUMPING

ABSTRACT

The high costs involved in water distribution systems, particularly with regard to the design and operation thereof, reflect the importance of studying ways to minimize the loss of water and electricity, in order to increase the efficiency of these systems. In an attempt to minimize and avoid such loss, This study commit to investigate and propose a model optimized sizing of networks, with emphasis on hydraulic efficiency, energy and economic. The main objective is to minimize system costs, understood by the network pipe costs, the energy of pumping main (main system of impulsion) and the energy of pumping secondary, represented by boosters. The proposed methodology for the sizing considers the energy costs of multiple pumping, plus the cost of implantation of the pipes. Using this methodology it is possible to achieve a design with lower pressures and longer appropriate, with consequent reduction in energy and water losses throughout the system. To achieve the proposed objectives, the methodology used in this study comprehend an iterative algorithm and dynamic of optimization. The said algorithm originated the program Toolkit of Sizing Optimized (TDO), that have been implemented using the EPANET Programmer's Toolkit. To validate the theory, case studies were conducted with three water distribution networks: network Grande Setor Expanded , network R9 Adapted and network Hanoi The results obtained, using the TDO, demonstrate that the sizing most suitable for operation of the networks studied were obtained using sectorization, through the inclusion of secondary pumping.

Keywords - Sizing, Optimization, Sectorization and Energy Efficiency.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 – ABORDAGEM INICIAL | 16 |
| 1.1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA | 19 |
| 1.3 OBJETIVO GERAL | 20 |
| 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 21 |
| 1.5 ESTRUTURA DA TESE | 22 |
| CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 23 |
| 2.1 INTRODUÇÃO | 23 |
| 2.2 PANORAMA HÍDRICO | 23 |
| 2.3 PANORAMA ENERGÉTICO | 27 |
| 2.4 ESQUEMA TÍPICO DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA | 30 |
| 2.4.1 Condições Hidráulicas | 32 |
| 2.5 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO | 34 |
| 2.5.1 Redução da Altura Manométrica de Bombeamento | 35 |
| 2.5.2 Curvas Características da Bomba e do Sistema | 36 |
| 2.6 BOOSTER EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA | 38 |
| 2.7 SETORIZAÇÃO E CONTROLE DE PRESSÃO | 40 |
| 2.8 DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA | 43 |
| 2.9 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA DIMENSIONAMENTO DE REDES | 49 |
| 2.9.1 Simuladores Hidráulicos | 50 |
| 2.9.2 Métodos de Otimização Determinísticos e Heurísticos | 52 |
| 2.9.2.1. Exemplos de Métodos Determinísticos de Otimização | 54 |
| 2.10 O ESTADO DA ARTE EM OTIMIZAÇÃO | 56 |
| CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DO TRABALHO | 78 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 78 |

| | |
|---|------------|
| 3.2 ALGORITMO DO TOOLKIT DE DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO (TDO)--- | 81 |
| 3.2.1 Cálculo do Gradiente de Custo----- | 84 |
| 3.2.2 Cálculo do Gradiente Energético ----- | 85 |
| 3.2.3 Condições de Parada do Processo Iterativo de Otimização do TDO----- | 87 |
| 3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO TOOLKIT DE DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO---- | 92 |
| 3.4 INTERFACE DO PROGRAMA TDO----- | 94 |
| CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES----- | 99 |
| 4.1 INTRODUÇÃO ----- | 99 |
| 4.2 ANÁLISES PRELIMINARES – VALIDAÇÃO DO TDO ----- | 100 |
| 4.2.1 Rede com Único Bombeamento ----- | 100 |
| 4.2.1.1. Dimensionamento da rede Grande Setor utilizando o TDO e LenhsNet----- | 102 |
| 4.2.2 Redes sem Bombeamentos----- | 106 |
| 4.2.2.1. Rede Setor Secundário----- | 106 |
| 4.2.2.2. Rede Itororó----- | 110 |
| 4.3 ESTUDOS DE CASOS----- | 114 |
| 4.3.1 Estudo de Caso – Rede Grande Setor Expandida----- | 114 |
| 4.3.2 Estudo de Caso – Rede R9 adaptada ----- | 125 |
| 4.3.2.1. Análise de Sensibilidade para Setores com Cotas Uniformes ----- | 134 |
| 4.3.2.2. Análise de Sensibilidade para Setores com Cotas Não Uniformes----- | 138 |
| 4.3.3 Estudo de Caso – Rede Hanoi ----- | 151 |
| CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES ----- | 160 |
| 5.1 CONCLUSÕES----- | 160 |
| 5.2 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS ----- | 162 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ----- | 163 |
| APÊNDICE A - Fluxograma do TDO para redes com bombeamento ----- | 174 |
| APÊNDICE B - Fluxograma do TDO para redes sem bombeamento ----- | 177 |
| APÊNDICE C – Cotas, demandas e comprimentos da rede R9 ----- | 179 |
| APÊNDICE D – Relatórios dos dimensionamentos da rede R9 com boosters ----- | 182 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Índices de Perdas nos Sistema de Abastecimento de Água do Brasil | 24 |
| Figura 2.2 - Volume de água diário necessário por habitante (L/hab.dia) | 26 |
| Figura 2.3 - Consumo energético nos sistemas de abastecimento de água do Brasil..... | 27 |
| Figura 2.4 - Índices energéticos nos sistemas de abastecimento de água do Brasil | 28 |
| Figura 2.5 - Consumo final energético por setor em TWh no Brasil | 29 |
| Figura 2.6 - Evolução da oferta de energia e do PIB | 30 |
| Figura 2.7 - Esquema típico de um sistema de abastecimento de água..... | 31 |
| Figura 2.8 - Representação das curvas características da bomba..... | 37 |
| Figura 2.9 - Curva característica do sistema | 37 |
| Figura 2.10 - Determinação do ponto de trabalho de bombas hidráulicas | 37 |
| Figura 2.11 - Booster para recalque da água proveniente de um reservatório | 39 |
| Figura 2.12 - Booster para reforço no bombeamento..... | 39 |
| Figura 2.13 - Exemplo de expansão de rede com booster..... | 40 |
| Figura 2.14 - Esquema típico de um sistema de distribuição de água setorizado | 42 |
| Figura 2.15 - Princípio de conservação da massa - equação da continuidade..... | 44 |
| Figura 2.16 - Princípio de Bernoulli em tubulação com escoamento permanente | 46 |
| Figura 2.17 – Relações entre as variáveis envolvidas no dimensionamento..... | 49 |
| Figura 2.18 - Otimização por meio de métodos determinísticos e heurísticos..... | 52 |
| Figura 3.1 - Cenário 1: rede de distribuição apenas com bombeamento na origem..... | 79 |
| Figura 3.2 - Cenário 2: rede de distribuição de água com múltiplos bombeamentos..... | 79 |
| Figura 3.3 - Fluxograma simplificado do algoritmo do programa TDO | 83 |
| Figura 3.4 - Relação Custo/Benefício do algoritmo de dimensionamento proposto..... | 83 |
| Figura 3.5 - Condições de parada do algoritmo de dimensionamento otimizado | 87 |
| Figura 3.6 - Sequência do algoritmo de dimensionamento proposto | 88 |
| Figura 3.7 - Página inicial do arquivo de ajuda do EPANET Programmer's Toolkit..... | 93 |
| Figura 3.8 - Interface principal do programa TDO | 94 |
| Figura 3.9 - Tabela de tubos e arquivo “inp” necessários para o dimensionamento..... | 95 |
| Figura 3.10 - Barra de status do dimensionamento do programa TDO..... | 96 |
| Figura 3.11 - Confirmação de inclusão do booster na rede | 96 |
| Figura 3.12 - Localização do booster na rede | 97 |
| Figura 3.13 - Melhor solução para redes de distribuição com múltiplos bombeamentos | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.14 - Interface do programa TDO para redes sem bombeamento | 98 |
| Figura 4.1 - Esquema da rede Grande Setor..... | 101 |
| Figura 4.2 - Rede Grande Setor modelada no EPANET | 101 |
| Figura 4.3 - Vazões demandadas dos nós da rede Grande Setor..... | 101 |
| Figura 4.4 - Dados da tabela de tubos (perda de carga H-W) | 102 |
| Figura 4.5 - Resultado do dimensionamento da rede Grande Setor - programa TDO | 103 |
| Figura 4.6 - Diâmetros e pressões da rede Grande Setor após dimensionamento..... | 104 |
| Figura 4.7 - Resultado do dimensionamento da rede Grande Setor pelo LenhsNet..... | 105 |
| Figura 4.8 - Rede Setor Secundário modelada no EPANET..... | 107 |
| Figura 4.9 - Dimensionamento da rede Setor Secundário pelo programa TDO..... | 108 |
| Figura 4.10 - Diâmetros e pressões da rede Setor Secundário após dimensionamento..... | 108 |
| Figura 4.11 - Dimensionamento da rede Setor Secundário pelo LenhsNet | 109 |
| Figura 4.12 - Rede Itororó modelada no EPANET | 110 |
| Figura 4.13 - Dados da tabela de tubos (perda de carga D-W). | 112 |
| Figura 4.14 - Dimensionamento da rede Itororó pelo programa TDO..... | 112 |
| Figura 4.15 - Dimensionamento da rede Itororó pelo LenhsNet..... | 112 |
| Figura 4.16 - Diâmetros e pressões da rede Itororó após dimensionamento..... | 113 |
| Figura 4.17 - Esquema da rede Grande Setor Expandida..... | 114 |
| Figura 4.18 - Rede Grande Setor Expandida modelada no EPANET | 115 |
| Figura 4.19 - Vazões demandadas dos nós da rede Grande Setor Expandida..... | 115 |
| Figura 4.20 - Dados da tabela de tubos (perda de carga H-W) | 116 |
| Figura 4.21 - Localização do booster na rede Grande Setor Expandida | 116 |
| Figura 4.22 - Resultado do dimensionamento da rede Grande Setor Expandida | 117 |
| Figura 4.23 - Diâmetros e pressões da rede Grande Setor Expandida sem booster | 120 |
| Figura 4.24 - Diâmetros e pressões da rede Grande Setor Expandida com booster..... | 120 |
| Figura 4.25 - Curva do booster inserido a montante do trecho 9 na rede Grande Setor | 121 |
| Figura 4.26 - Gráfico de isolinhas da rede Grande Setor Expandida sem booster | 123 |
| Figura 4.27 - Gráfico de isolinhas da rede Grande Setor Expandida com booster..... | 123 |
| Figura 4.28 - Rede Grande Setor particionada..... | 123 |
| Figura 4.29 - Resultado do dimensionamento da rede Grande Setor (parte 1) | 124 |
| Figura 4.30 - Resultado do dimensionamento da rede Grande Setor (parte 2) | 124 |
| Figura 4.31 - Traçado da rede R9 adaptada e identificadores dos nós e trechos..... | 125 |
| Figura 4.32 - Esquema da rede R9 com cotas dos nós e os comprimentos dos trechos..... | 126 |
| Figura 4.33 - Dados da tabela de tubos (perda de carga D-W). | 127 |
| Figura 4.34 - Resultado do dimensionamento da rede R9 com setores A, B e C..... | 128 |
| Figura 4.35 - Rede R9 dimensionada com três boosters | 130 |
| Figura 4.36 - Curva dos boosters 1, 2 e 3 inseridos na rede R9 | 133 |
| Figura 4.37 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 com boosters | 134 |
| Figura 4.38 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 sem boosters | 134 |
| Figura 4.39 - Economia versus aumento das cotas dos setores A, B e C da rede R9..... | 135 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.40 - Esquema da rede R9 com zona alta no Setor A..... | 138 |
| Figura 4.41 - Resultado do dimensionamento da rede R9 com zona alta no Setor A | 139 |
| Figura 4.42 - Rede dimensionada com booster na zona alta (setor A)..... | 139 |
| Figura 4.43 - Curva do booster inserido a montante do Setor A..... | 140 |
| Figura 4.44 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 com booster (setor A) | 140 |
| Figura 4.45 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 sem booster (setor A)..... | 140 |
| Figura 4.46 - Economia versus aumento das cotas do setor A da rede R9..... | 141 |
| Figura 4.47 - Esquema da rede R9 com zona alta no Setor B..... | 142 |
| Figura 4.48 - Resultado do dimensionamento da rede R9 com zona alta no Setor B | 142 |
| Figura 4.49 - Rede dimensionada com booster na zona alta (setor B)..... | 143 |
| Figura 4.50 - Curva do booster inserido a montante do Setor B..... | 143 |
| Figura 4.51 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 com booster (setor B) | 144 |
| Figura 4.52 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 sem booster (setor B)..... | 144 |
| Figura 4.53 - Economia versus aumento das cotas do setor B da rede R9..... | 145 |
| Figura 4.54 - Esquema da rede R9 com zona alta no Setor C..... | 145 |
| Figura 4.55 - Resultado do dimensionamento da rede R9 com zona alta no Setor C | 146 |
| Figura 4.56 - Rede dimensionada com booster na zona alta (setor C)..... | 146 |
| Figura 4.57 - Curva do booster inserido a montante do Setor C..... | 147 |
| Figura 4.58 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 com booster (setor C) | 147 |
| Figura 4.59 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 sem booster (setor C)..... | 147 |
| Figura 4.60 - Economia versus aumento das cotas do setor C da rede R9..... | 148 |
| Figura 4.61 - Economia versus aumento das cotas dos setores A e B rede R9..... | 149 |
| Figura 4.62 - Economia versus aumento das cotas dos setores B e C rede R9 | 150 |
| Figura 4.63 - Economia versus aumento das cotas dos setores A e C rede R9..... | 150 |
| Figura 4.64 - Economia versus aumento das cotas dos setores da rede R9..... | 151 |
| Figura 4.65 - Esquema da rede Hanoi com cotas dos nós e comprimentos dos trechos | 152 |
| Figura 4.66 - Tabela de tubos para dimensionamento da rede Hanoi | 153 |
| Figura 4.67 - Resultado do dimensionamento da rede Hanoi | 153 |
| Figura 4.68 - Rede Hanoi dimensionada com cota de cabeceira fixa | 154 |
| Figura 4.69 - Rede Hanoi dimensionada com bombeamento na origem | 154 |
| Figura 4.70 - Esquema da rede Hanoi dimensionada com bombeamento na origem | 155 |
| Figura 4.71 - Esquema da rede Hanoi setorizada..... | 155 |
| Figura 4.72 - Economia versus aumento do comprimento..... | 156 |
| Figura 4.73 - Resultado do dimensionamento da rede Hanoi com booster..... | 157 |
| Figura 4.74 - Esquema da rede dimensionada com booster no setor superior | 158 |
| Figura 4.75 - Curva do booster inserido a montante do setor superior | 158 |
| Figura 4.76 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede Hanoi com booster | 159 |
| Figura 4.77 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede Hanoi sem booster..... | 159 |
| Figura 5.1 - Conclusões sobre o dimensionamento com múltiplos bombeamentos..... | 162 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 - Índices de perdas de faturamento e na distribuição por região do Brasil..... | 25 |
| Tabela 2.2 - Demandas hídricas médias para o abastecimento urbano no Brasil..... | 26 |
| Tabela 2.3 - Panorama de abrangência regional para os indicadores energéticos..... | 29 |
| Tabela 2.4 – Síntese do estado da arte em otimização de sistemas de abastecimento | 57 |
| Tabela 3.1 – Exemplo de algumas das funções do Toolkit do EPANET | 93 |
| Tabela 4.1 - Comparação do dimensionamento da rede Grande Setor | 105 |
| Tabela 4.2 - Diâmetros e pressões da rede Grande Setor entre TDO e LenhsNet..... | 106 |
| Tabela 4.3 - Cotas, vazões e comprimentos da rede Setor Secundário | 107 |
| Tabela 4.4 - Resultado do dimensionamento da rede Setor Secundário | 109 |
| Tabela 4.5 - Diâmetros da rede Setor Secundário após dimensionamento | 109 |
| Tabela 4.6 - Cotas, vazões e comprimentos da rede Itororó | 111 |
| Tabela 4.7 - Relatório do dimensionamento da rede Grande Setor Expandida..... | 118 |
| Tabela 4.8 - Diâmetros e pressões da rede Grande Setor sem booster e com booster | 121 |
| Tabela 4.9 - Relatório do dimensionamento da rede R9 sem e com boosters..... | 129 |
| Tabela 4.10 - Diâmetros otimizados da rede R9 sem booster e com boosters | 131 |
| Tabela 4.11 - Pressões da rede R9 sem booster e com boosters | 132 |
| Tabela 4.12 - Economia ao aumentar as cotas dos setores A, B e C da Rede R9 | 135 |
| Tabela 4.13 - Parâmetros dos dimensionamentos da rede R9 sem booster | 136 |
| Tabela 4.14 - Parâmetros da rede R9 sem booster que sofreram alterações | 136 |
| Tabela 4.15 - Parâmetros dos dimensionamentos da rede R9 com boosters..... | 136 |
| Tabela 4.16 - Parâmetros da rede R9 com booster que sofreram alterações..... | 137 |
| Tabela 4.17 - Economia ao aumentar as cotas do setor A da rede R9 | 141 |
| Tabela 4.18 - Economia ao aumentar as cotas do setor B da rede R9..... | 144 |
| Tabela 4.19 - Economia ao aumentar as cotas do setor C da rede R9..... | 148 |
| Tabela 4.20 - Economia ao aumentar as cotas dos setores A e B da rede R9 | 149 |
| Tabela 4.21 - Economia ao aumentar as cotas dos setores B e C da rede R9 | 149 |
| Tabela 4.22 - Economia ao aumentar as cotas dos setores A e C da rede R9 | 150 |
| Tabela 4.23 - Vazões demandadas dos nós da rede Hanoi..... | 152 |
| Tabela 4.24 - Economia ao aumentar a distância entre o setor principal e superior | 156 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|--|
| ACO | Ant Colony Optimization |
| AE | Algoritmos Evolucionários |
| AG | Algoritmos Genéticos |
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| AWWA | American Water Works Association |
| BEN | Balanco Energético Nacional |
| CMB | Conjuntos Motor-Bomba |
| DLL | Dynamic Link Library |
| DN | Diâmetro Nominal (ou Comercial) |
| D-W | Darcy-Weisbach |
| EE | Estação Elevatória |
| ELETRORAS | Centrais Elétricas Brasileiras S. A. |
| EPA | U.S. Environmental Protection Agency |
| EPANET | Software de simulação hidráulica de redes disponibilizado pela EPA |
| ETA | Estação de Tratamento de Água |
| FINEP | Financiadora de Estudos e Projetos |
| FN013 | Despesa com energia elétrica |
| FoFo | Ferro fundido dúctil |
| G_e | Gradiente Energético |
| GGA | Global Gradient Algorithm |
| G_c | Gradiente de Custo |
| GRG | Gradiente Reduzido Generalizado |

| | |
|------------------|--|
| HBMO | Honey-Bee Mating Optimization |
| H-W | Hazen-Williams |
| IDE | Integrated Development Environment |
| IN003 | Despesa média por m ³ faturado |
| IN004 | Tarifa média praticada |
| IN013 | Índice de perdas de faturamento |
| IN049 | Índice de perdas na distribuição |
| IN058 | Índice de consumo de energia elétrica |
| IN060 | Índice de despesas por consumo de energia nos sistemas de água/esgotos |
| IWA | International Water Association |
| LENHS | Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento |
| LPS | Litros por segundo (l/s) |
| MCA | Metro de Coluna de Água (mH ₂ O) |
| NBR ABNT | Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| PD | Programação Dinâmica |
| PL | Programação Linear |
| PMSS | Programa de Modernização do Setor de Saneamento |
| PNL | Programação Não Linear |
| PROCEL SANEAR | Programa Nacional de Conservação de Energia para o Setor de Saneamento |
| PVC | Policloreto de Vinila (plástico utilizado na fabricação de tubulações) |
| RECESA | Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental |
| RNF | Reservatório de Nível Fixo |
| SNIS | Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento |
| TDO | Toolkit de Dimensionamento Otimizado |
| U.M. | Unidades Monetárias (cuja representação é \$) |
| VRP | Válvulas Redutoras de Pressão |

CAPÍTULO I

ABORDAGEM INICIAL

1.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo introdutório sintetiza o panorama hídrico e energético dos sistemas de abastecimento de água, em seguida, descreve as principais motivações e justificativa para realização da pesquisa; apresenta os objetivos gerais e específicos do trabalho e; finaliza, expondo a estrutura e organização da tese.

Com o aumento da demanda de água, vem se tornando cada vez mais necessária a otimização dos sistemas de abastecimento de água, particularmente no que diz respeito ao projeto, implantação e operação dos mesmos. Os altos custos envolvidos refletem a importância de se buscar meios de minimizar os desperdícios de água e energia.

A ideia de abundância de água ainda é muito forte, principalmente no Brasil, um dos países que mais dispõem desse recurso. Diante desta falsa ideia, alguns acreditam ser desnecessário preocupar-se com uma possível escassez de água.

O Brasil dispõe de, aproximadamente, 13% da água doce do planeta terra, ainda assim enfrenta desafios constantes em busca de uma gestão e distribuição cada vez mais eficiente de seus recursos hídricos. De acordo com a Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental (RECESA, 2008), as perdas de água totais em sistemas de abastecimento de água no Brasil têm uma média de 40,5%, valor considerado muito elevado, sendo necessário uma redução de pelo menos 30% desta perda em curto prazo e de 50% em médio prazo.

No que se refere aos dados do relatório do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2011), no Brasil o índice médio atual de perdas na distribuição para

todo o conjunto de prestadores de serviços é de 41,6%. Por outro lado, o índice médio atual das perdas de faturamento é de 37,1%. Apesar de ainda alto, este índice foi o menor valor de toda a série histórica de 15 anos do SNIS, iniciada em 1995. Convém salientar que índices de perdas elevados são consequências de uma infraestrutura física de má qualidade e de uma deficiente gestão e operação dos sistemas, alerta o SNIS (2011).

A maioria dos sistemas de bombeamento existentes no Brasil, responsáveis pelas elevatórias de água bruta, potável e residual, foram projetados e construídos sem a preocupação com o custo da energia elétrica, já que este era fortemente subsidiado pelo governo e não onerava muito no custo operacional das estações de bombeamento.

Nos últimos vinte anos houve uma considerável diminuição dos subsídios de energia elétrica nos sistemas de saneamento no Brasil, com isso tem-se acentuado as discussões sobre o alto custo energético desses sistemas. Atualmente, diante do diagnóstico energético da maioria das empresas prestadoras de serviço de abastecimento de água, pode-se observar que o custo da energia elétrica já se constitui no segundo item de despesa.

Segundo Gomes e Carvalho (2012), os sistemas de abastecimento e esgotamento sanitário são responsáveis por, aproximadamente, 3% da energia consumida no mundo. No Brasil a situação não é diferente, e de acordo com dados do Programa Nacional de Conservação de Energia para o setor de saneamento (PROCEL SANEAR), entre 2 e 3% do consumo total de energia elétrica no nosso país, o equivalente a cerca de 10 bilhões de kWh/ano, são consumidos por prestadoras de serviços de água e esgotamento sanitário. Os sistemas de bombeamentos são responsáveis por 90% da energia consumida para o abastecimento de água e esgotamento sanitário de residências urbanas, estabelecimentos comerciais e industriais.

Os sistemas de bombeamento consomem aproximadamente 20% da energia gasta pelos motores elétricos no mundo, sendo que 75% dos bombeamentos estão superdimensionados (HYDRAULIC INSTITUTE AND EUROPUMP, 2001). Segundo o relatório da Alliance (JAMES *et al.*, 2002), o consumo de energia poderia ser reduzido em pelo menos 25%, por meio da implantação de ações de eficiência energética e hidráulica. Parte significativa da energia consumida nos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário se deve à sua ineficiência.

Segundo Gomes e Carvalho (2012), a ineficiência energética ocorre devido ao emprego de equipamentos de bombeamento de baixo rendimento (obsoletos, antigos ou mal dimensionados), do excesso de perda de carga hidráulica nas linhas adutoras e nas

tubulações das redes de abastecimento, da ausência de manutenção, das perdas reais de água e de procedimentos operacionais inadequados.

De acordo com o Programa de Modernização do Setor de Saneamento – PMSS – SNIS (2011), os gastos com energia elétrica representam 12% das despesas dos prestadores de serviços e em alguns casos, essa despesa chega a ser a segunda maior, ficando atrás somente da folha de pagamento. O consumo total de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água brasileiros é de aproximadamente 7,2 bilhões de kWh/ano. E as despesas totais com energia elétrica são de, aproximadamente, R\$ 2 bilhões por ano.

Segundo o RECESA (2008), estima-se que o consumo de energia elétrica possa ser reduzido em pelo menos 25%, na maioria dos sistemas de abastecimento de água do Brasil. As perdas de água têm relação direta com o consumo de energia elétrica, pois é necessário cerca de 0,6 kWh para produzir 1 m³ de água potável. Esta relação mostra que eficiência hidráulica e energética é fundamental para o bom gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água.

Com base nos índices e indicadores sobre água e energia expostos anteriormente, constata-se que vale a pena se aprofundar nos estudos acerca dos sistemas de abastecimento através de critérios de otimização econômica. Os panoramas (hídrico e energético) detalhados dos sistemas de abastecimento de água do Brasil estão expostos no capítulo 2, seções 2.2 e 2.3, respectivamente.

O problema de otimização em sistema de distribuição de água pode ser descrito da seguinte forma: minimizar os custos de investimentos (tubulações, reservatórios, válvulas, bombas etc.) e custos energéticos das estações elevatórias, atendendo às demandas de água, com pressões adequadas, obedecendo às restrições hidráulicas do sistema de distribuição de água.

Desta forma, os projetos de otimização em sistemas de abastecimento de água têm como finalidade a minimização dos custos de investimento e de energia, o controle e a redução de pressões na rede, tendo como meta o fornecimento satisfatório da água. Para isso, é essencial que a rede opere com pressão mínima suficiente para atender todos os pontos de consumo, incluindo àqueles mais desfavoráveis. A pressão dinâmica mínima e a pressão estática máxima são importantes para o dimensionamento da rede. De acordo com Tsutiya (2004), no Brasil estabelecem-se pressões mínimas para que a água alcance os reservatórios domiciliares, e recomenda-se que, obedecidas as condições de pressões mínimas, as pressões máximas sejam as menores possíveis.

A maioria dos modelos de otimização desenvolvidos para dimensionamento de sistemas de distribuição de água considera apenas um objetivo, o menor custo de investimento e operação. Isso acontece pela complexidade computacional envolvida quando são considerados outros objetivos como confiabilidade hidráulica e mecânica, flexibilidade e qualidade de água. A otimização nas operações de bombeamento pode gerar economias significativas para as empresas, uma vez que a energia elétrica é um insumo que custa caro, por isso deve ser bem utilizado.

É importante reduzir as perdas de água e energia elétrica para elevar a eficiência do sistema de abastecimento de água. Na tentativa de minimizar e evitar tais desperdícios, este trabalho empenha-se em investigar e propor um modelo de dimensionamento otimizado de redes, com ênfase na eficiência hidráulica e energética.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O presente trabalho buscou o embasamento científico necessário para propor soluções que visem minimizar os problemas de um dos segmentos relacionados à operação e distribuição de água: o dimensionamento de redes. As ações que direcionam para o controle e redução de perdas de água delineiam-se na melhoria da qualidade da operação e gestão dos sistemas de abastecimento e, conseqüentemente, inserem-se no contexto do uso racional da água.

Diante dos panoramas hídrico e energético em que se encontram os sistemas de abastecimento de água, confirma-se a necessidade de pesquisas e investimentos no setor, haja vista o elevado índice de perdas de água de 40,5% e 41,6%, apontados pela RECESA (2008) e SNIS (2011), respectivamente.

O elevado consumo energético dos sistemas de abastecimento de água brasileiros é outro aspecto que necessita de atenção especial, visto que tal consumo pode ser reduzido consideravelmente, caso as ações de eficiência hidráulica e energética sejam implementadas.

A motivação deste trabalho surgiu do interesse em se investigar e buscar meios de melhorar a eficiência hidráulica e energética das redes de distribuição de água, propondo para isto, projetos otimizados de dimensionamento. Como as perdas de água têm relação direta com o consumo de energia elétrica, é fundamental que as ações de eficiência

hidráulica e energética sejam adotadas para o bom funcionamento e gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água.

No Brasil é projetado um aumento demográfico de aproximadamente 45 milhões de habitantes até o ano de 2025. Este acréscimo populacional implica no aumento de aproximadamente 28% das demandas hídricas para abastecimento da população. Diante deste cenário, se as referidas ações não forem implementadas, 55% dos municípios brasileiros poderão ter abastecimento deficitário (ANA, 2010).

Dentre as situações que provocam perdas de água e energia nas redes de distribuição de água, têm-se os vazamentos, erros de medição, fraudes nos hidrômetros, ligações clandestinas e dimensionamentos inadequados. O presente trabalho optou por explorar cientificamente o dimensionamento de redes, sendo sua principal contribuição o acréscimo dos bombeamentos secundários, na fase de projeto, a fim de apresentar o dimensionamento e o custo total do sistema de forma conjunta.

Assim sendo, esta tese propõe o dimensionamento de redes por meio da programação iterativa e dinâmica, levando-se em conta a otimização energética e visando à minimização do custo total, este que é formado pelo custo de implantação das tubulações acrescido do custo energético do bombeamento primário (sistema principal de impulsão) em conjunto com os bombeamentos secundários (*boosters*).

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo computacional de dimensionamento otimizado de redes, com ênfase na eficiência econômica, hidráulica e energética.

Os benefícios hidráulicos e energéticos são obtidos através do dimensionamento otimizado, haja vista que ele proporciona a uniformidade da pressão na rede e a diminuição dos vazamentos, e como consequência, minimiza as perdas de água e energia elétrica. Deste modo, o trabalho proposto visa fornecer projetos mais adequados no contexto do uso racional e eficiente dos recursos hídricos e, principalmente, visa um menor custo de implantação e uma melhor operação das redes de distribuição de água.

A solução ótima a ser obtida pelo modelo de dimensionamento proposto é a que minimiza o custo de investimento (implantação das tubulações) e o custo operacional (despesas com energia elétrica das múltiplas fontes de impulsão); e maximiza a eficiência

hidráulica e energética da rede. O custo total do sistema é a soma do custo de investimento com o custo operacional.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho pretende provocar o interesse de pesquisadores e profissionais da área de saneamento empenhados em explorar projetos de otimização, mais especificamente, contribuir com o dimensionamento eficiente de redes de distribuição de água. De acordo com as peculiaridades desta tese, os objetivos específicos são:

- Realizar a pesquisa científica e aprimorar os conhecimentos acerca dos métodos de otimização, a fim de propor novas funcionalidades, autenticidade e maior aplicabilidade ao dimensionamento de redes reais de distribuição de água.
- Implementação de um novo algoritmo iterativo e dinâmico de dimensionamento otimizado de redes, dando origem ao programa *Toolkit de Dimensionamento Otimizado* (TDO).
- Utilização do *EPANET Programmer's Toolkit* (ROSSMAN, 2008) para implementação computacional do programa *Toolkit de Dimensionamento Otimizado*.
- Apresentação de forma clara e intuitiva dos resultados do modelo de dimensionamento otimizado de redes proposto, tendo em vista que o programa dispõe de um relatório completo contendo todas as informações da solução ótima encontrada.
- Disponibilização dos dois arquivos da rede após o dimensionamento otimizado pelo programa TDO, um correspondente à rede sem *boosters* e o outro correspondente à rede com *boosters*.
- Validação e aplicabilidade do novo modelo de dimensionamento otimizado utilizando três redes: *Grande Setor Expandida*, *R9 Adaptada* e *Hanoi*.
- Realizar análises de sensibilidade, a fim de constatar que a setorização da rede, por meio da inclusão dos bombeamentos secundários, proporciona dimensionamentos mais econômicos e eficientes para operação da rede, em termos hidráulicos e energéticos.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está organizada em 5 capítulos, além das referências bibliográficas e apêndices. Neste primeiro capítulo introdutório são expostos, de forma sintetizada, os panoramas hídrico e energético dos sistemas de abastecimento de água do Brasil. Em seguida é apresentada a motivação e justificativa da pesquisa e por fim os objetivos do trabalho.

O capítulo 2 configura a fundamentação teórica e o estado da arte da pesquisa, tendo como propósito descrever os principais conceitos envolvidos com a temática do trabalho, sob a forma de uma revisão bibliográfica. Uma atenção especial é dada a última seção (2.10), por se tratar dos trabalhos relacionados, que configuram o estado da arte em otimização de sistemas de abastecimento de água.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada na elaboração do modelo de dimensionamento otimizado, sendo relatado o desenvolvimento do programa *Toolkit de Dimensionamento Otimizado* (TDO). A metodologia é aplicada sob a forma de três estudos de casos reais, utilizando as redes *Grande Setor Expandida*, *R9 Adaptada* e *Hanoi*. O capítulo 4 expõe os resultados e discussões dos estudos de casos, envolvendo algumas análises de sensibilidade, expostas nas seções 4.3.2.1 e 4.3.2.2.

O capítulo 5 retoma as discussões gerais do trabalho de forma conclusiva, finalizando a tese com os resultados e contribuições mais relevantes, dificuldades encontradas e as indicações para trabalhos futuros. Após o último capítulo, são expostas as referências bibliográficas consultadas e utilizadas ao longo do texto, e por fim, são apresentados quatro apêndices (A até D).

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo inicia-se com a apresentação, detalhada e atual, do panorama hídrico (seção 2.2) e panorama energético (seção 2.3) dos sistemas de abastecimento de água do Brasil. As seções 2.4 a 2.9 configuram-se como o referencial teórico do trabalho, tendo a finalidade de apresentar o comportamento hidráulico dos sistemas de abastecimento, o funcionamento dos sistemas de bombeamentos, a setorização, o controle de pressão, e os métodos de otimização para o dimensionamento de redes de distribuição de água. Uma atenção especial é dada à seção 2.10, que se empenha em discutir os trabalhos relacionados, que configura o estado da arte da tese.

2.2 PANORAMA HÍDRICO

As perdas de água em sistema de abastecimento de água correspondem aos volumes de água retirados dos mananciais subtraído dos volumes medidos nos hidrômetros, e englobam as perdas reais e aparentes. De acordo com o SNIS (2011), de toda a água captada dos mananciais para abastecer os municípios brasileiros, quase a metade se perde antes de chegar às casas e atender à população.

De acordo com Gonçalves (2009), existem dois indicadores operacionais muito utilizados no setor de saneamento: o índice de perdas de faturamento (IN013)¹ e o índice

¹ IN013 (%) = [(Volume disponibilizado – Volume faturado)/Volume disponibilizado]x100

de perdas na distribuição (IN049)². O IN013 relaciona os volumes disponibilizados (produzidos) e faturados, enquanto que o IN049 relaciona os volumes disponibilizados e consumidos (micromedidos).

Os dois indicadores, IN013 e IN049, são ferramentas úteis para o controle e acompanhamento das perdas, visto que são por meio deles que se obtém a tendência e evolução das perdas nos sistemas de abastecimento de água do Brasil, afirma o SNIS (2011). Os volumes disponibilizados, consumidos e faturados, que são utilizados na fórmula do IN013 e IN049, são de referências anuais.

De acordo com Bezerra (2009a), índices superiores a 40%, em ambos os indicadores, representam más condições do sistema quanto às perdas. Numa condição intermediária estariam os sistemas com índices de perda entre 40% e 25% e valores abaixo de 25% indicam os sistemas que possuem um bom gerenciamento de perdas.

Segundo Marques e Sousa (2011), as perdas de águas nos sistemas de abastecimento de água podem ser geradas, principalmente, por vazamentos, erros de medição, fraudes nos hidrômetros, ligações clandestinas e dimensionamentos inadequados na rede.

A Figura 2.1 apresenta os indicadores operacionais de perdas (IN013 e IN049) publicados no último relatório do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2011). Dos 27 estados brasileiros, apenas o estado do Mato Grosso (MT) não teve seus dados enviados ao SNIS.

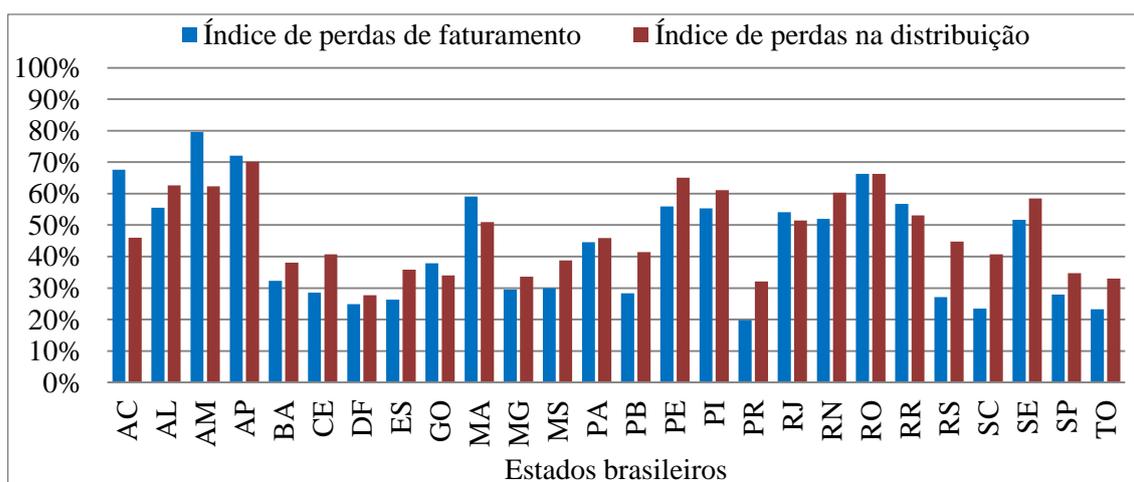


Figura 2.1 - Índices de Perdas nos Sistema de Abastecimento de Água do Brasil
Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2011)

² IN049 (%) = [(Volume disponibilizado – Volume utilizado)/Volume disponibilizado]x100

Ao observar na Tabela 2.1, verifica-se que a perda de faturamento no Brasil (37,1%) foi menor do que a perda na distribuição (41,6%). Segundo o SNIS (2011), isto ocorre uma vez que parte significativa da água que a companhia computa como perdida, na verdade não foi perdida, pois ela chegou ao consumidor final através de ligações clandestinas e falhas/fraudes nos medidores (submedição dos hidrômetros), desta forma, a água foi consumida, embora não tenha sido contabilizada e faturada pela companhia.

Tabela 2.1 - Índices de perdas de faturamento e na distribuição por região do Brasil

| Regiões | Índice de Perdas de Faturamento (%) (IN013) | Índice de Perdas na Distribuição (%) (IN049) | Despesa Média (R\$/m ³) (IN003) | Tarifa Média (R\$/m ³) (IN004) |
|--------------|---|--|---|--|
| Norte | 51,80 | 51,60 | 2,72 | 2,02 |
| Nordeste | 44,60 | 51,50 | 2,17 | 1,88 |
| Sudeste | 36,40 | 39,90 | 1,84 | 2,03 |
| Sul | 23,20 | 38,30 | 2,03 | 2,02 |
| Centro-Oeste | 32,30 | 32,50 | 2,43 | 2,38 |
| Brasil | 37,10 | 41,60 | 1,98 | 2,03 |

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2011)

Para esclarecer e justificar esses altos índices, o SNIS (2011) destaca algumas hipóteses que estão relacionadas com as perdas, são elas: falhas na detecção de vazamentos; redes de distribuição funcionando com pressões muito elevadas; grandes problemas na qualidade da operação dos sistemas; dificuldade no controle das ligações clandestinas e na aferição/calibração dos hidrômetros; e ausência de programa de monitoramento de perdas.

De acordo com a Tabela 2.1, a despesa média por m³ faturado (IN003) pelas companhias de abastecimento de água do Brasil foi de R\$ 1,98/m³. Já a tarifa média praticada (IN004) pelas companhias foi de R\$ 2,03/m³. A comparação entre despesa e tarifa por m³ para as cinco regiões do Brasil mostra algumas situações que merecem destaque. Por exemplo, a região Norte, mesmo sendo a que possui maior despesa, é uma das que cobra a menor tarifa, atrás apenas da tarifa do Nordeste. Situações como do Norte, Nordeste e Centro-Oeste sugerem a existência de *déficit*, visto que a despesa é maior que a tarifa praticada. Já a região Sul possui despesas praticamente iguais às tarifas, enquanto que na região Sudeste a despesa é menor que a tarifa.

Segundo o Atlas desenvolvido pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2010), estima-se que, do ano 2005 ao ano 2025, as demandas hídricas para abastecimento da

população urbana brasileira deverão ter um crescimento em torno de 28%. Segundo as projeções indicadas na Tabela 2.2, as demandas hídricas alcançarão no ano de 2025 valores totais de 630 m³/s, com destaque para as regiões Sudeste (298 m³/s) e Nordeste (151 m³/s), seguidas pelas regiões Sul (83 m³/s), Norte (54 m³/s) e Centro-Oeste (44 m³/s).

Tabela 2.2 - Demandas hídricas médias para o abastecimento urbano no Brasil

| Ano | Demanda por Região Geográfica (m ³ /s) | | | | | Total Brasil (m ³ /s) |
|------|---|----------|--------------|---------|-----|----------------------------------|
| | Norte | Nordeste | Centro-Oeste | Sudeste | Sul | |
| 2005 | 34 | 115 | 33 | 247 | 65 | 494 |
| 2015 | 45 | 136 | 39 | 275 | 75 | 570 |
| 2025 | 54 | 151 | 44 | 298 | 83 | 630 |

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA, 2010)

Ainda de acordo com ANA (2010), do ano de 2005 até 2025 é projetado para o Brasil um incremento demográfico de, aproximadamente, 45 milhões de habitantes, implicando no aumento das demandas de abastecimento urbano e exigindo, nesses próximos 20 anos, aportes adicionais de 137 m³/s. Entretanto, a capacidade total dos sistemas de abastecimento de água instalados e em operação no Brasil é de, aproximadamente, 587 m³/s, bastante próxima às demandas máximas atuais (em torno de 543 m³/s), demonstrando que grande parte dos sistemas de abastecimento está no limite de sua capacidade operacional.

A Figura 2.2 ilustra os volumes diários de água bruta, a serem captados dos mananciais, para suprir as necessidades por habitante (L/hab.dia).

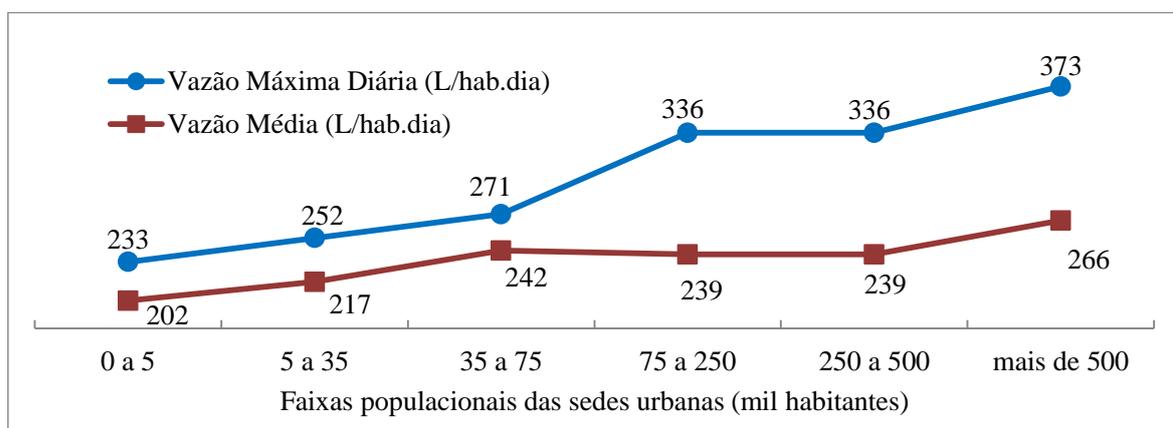


Figura 2.2 - Volume de água diário necessário por habitante (L/hab.dia)

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA, 2010)

Estes valores per capita admissíveis para captação de água foram determinados com base no padrão de consumo de água dos municípios estudados pela ANA (2010), e

foram agregados de acordo com seis faixas populacionais. Por exemplo, para uma cidade com mais de 500 mil habitantes, a demanda diária média de água por habitante é de 266 litros.

A avaliação de oferta e demanda realizada pela ANA (2010) indicou que 45% dos municípios brasileiros possuem abastecimento satisfatório, o que equivale a dizer que 52 milhões de habitantes terão garantia de oferta de água para o abastecimento urbano até o ano de 2015. Entretanto, os resultados da avaliação apontam que 55% dos municípios poderão ter abastecimento deficitário até o ano de 2015, sendo equivalente a 73% da demanda de água do País. Desse universo, 84% das sedes urbanas necessitam de investimentos para adequação de seus sistemas de abastecimento e 16% apresentam déficits decorrentes dos mananciais utilizados.

2.3 PANORAMA ENERGÉTICO

O panorama geral do consumo energético nos sistemas de abastecimento de água do Brasil está representado na Figura 2.3. Nele estão indicados o consumo total de energia elétrica (AG028), em kWh/ano, e a despesa com energia elétrica (FN013), em R\$/ano, de 26 companhias³ de abastecimento de água do Brasil.

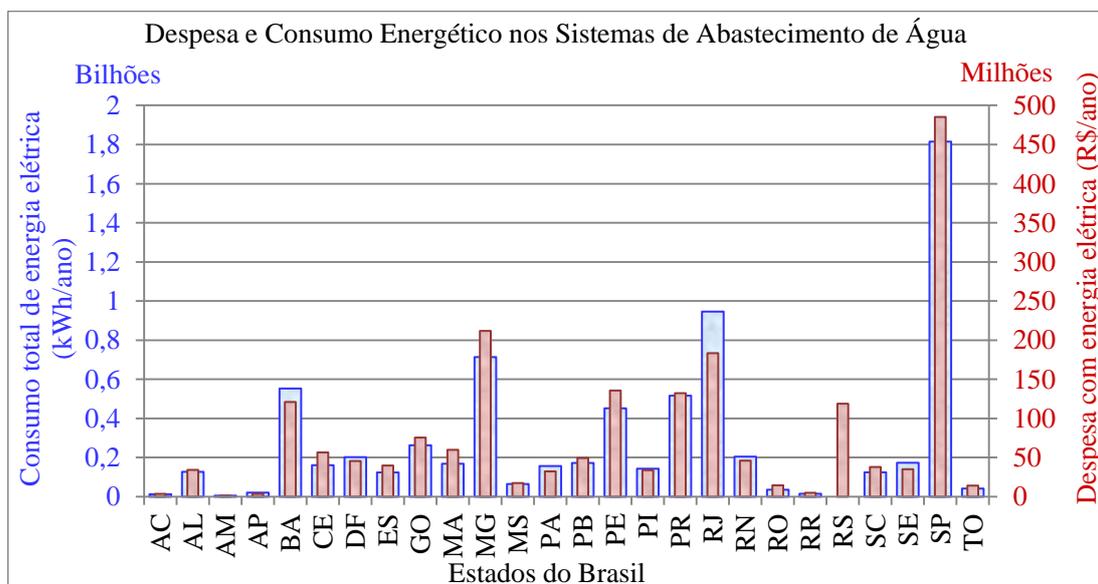


Figura 2.3 - Consumo energético nos sistemas de abastecimento de água do Brasil
Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2011)

³ O consumo total de energia elétrica da companhia de abastecimento de água do Rio Grande do Sul não consta no último relatório disponibilizado pelo SNIS (2011).

A Figura 2.4 apresenta o índice de consumo de energia elétrica (IN058), em kWh/m³ e o índice de despesas por consumo de energia elétrica nos sistemas de água e esgotos (IN060), em R\$/kWh, de 26 companhias⁴ de abastecimento de água do Brasil. Quanto menor o IN058 e o IN060, mais eficiente e econômico, respectivamente, é o sistema. A média de consumo de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água do Brasil é de aproximadamente 0,74 kWh/m³, e a média das despesas por consumo de energia elétrica é de aproximadamente 0,24 R\$/kWh.

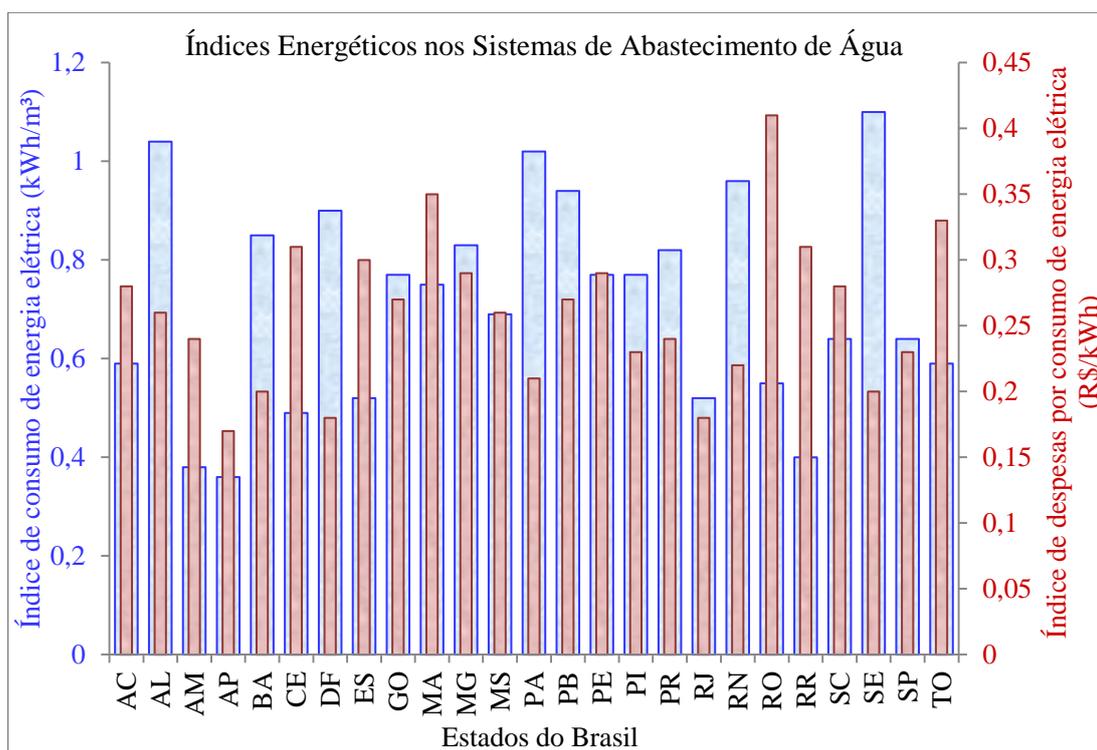


Figura 2.4 - Índices energéticos nos sistemas de abastecimento de água do Brasil
Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2011)

A Tabela 2.3 apresenta os quatro indicadores energéticos dos sistemas de abastecimento de água agrupados por regiões do Brasil.

A conservação de energia leva à exploração racional dos recursos naturais. Entretanto, a busca por consumo eficiente de energia não é uma tarefa fácil, pois não se limita apenas à necessidade de gerar cada vez mais energia, mas, primeiramente, eliminar desperdícios, buscando o máximo de desempenho com o mínimo de consumo, avalia ELETROBRAS (2005).

⁴ O índice de consumo e despesa de energia elétrica da companhia de abastecimento de água do Rio Grande do Sul (RS) não consta no último relatório disponibilizado pelo SNIS (2011).

Tabela 2.3 - Panorama de abrangência regional para os indicadores energéticos

| Regiões | Despesa com Energia Elétrica (R\$/ano) | Índice de Despesa por Consumo de Energia Elétrica (R\$/kWh) | Consumo de Energia Elétrica (MWh/ano) | Índice de Consumo de Energia Elétrica (kWh/m ³) |
|---------------|--|---|---------------------------------------|---|
| Norte | 75.093.495 | 0,26 | 289.881 | 0,68 |
| Nordeste | 572.850.885 | 0,25 | 2.158.429 | 0,81 |
| Sudeste | 921.493.601 | 0,23 | 3.602.207 | 0,63 |
| Sul | 289.413.753 | 0,25 | 641.752 | 0,78 |
| Centro-Oeste | 138.867.397 | 0,23 | 531.121 | 0,81 |
| Brasil | 1.997.719.131 | 0,244 | 7.223.390 | 0,74 |

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2011)

Um dos estudos mais importantes e detalhados do setor energético brasileiro é o relatório do Balanço Energético Nacional (BEN, 2012), onde se divulga toda a contabilidade relativa à oferta e ao consumo de energia no Brasil. A Figura 2.5 ilustra o consumo de energia elétrica por setor com base no ano de 2011. Dos 2.659,3 TWh de energia elétrica consumidas, o setor industrial é o maior consumidor (38,7%) e o setor residencial é o que concentra a menor parcela de consumo (10,3%).

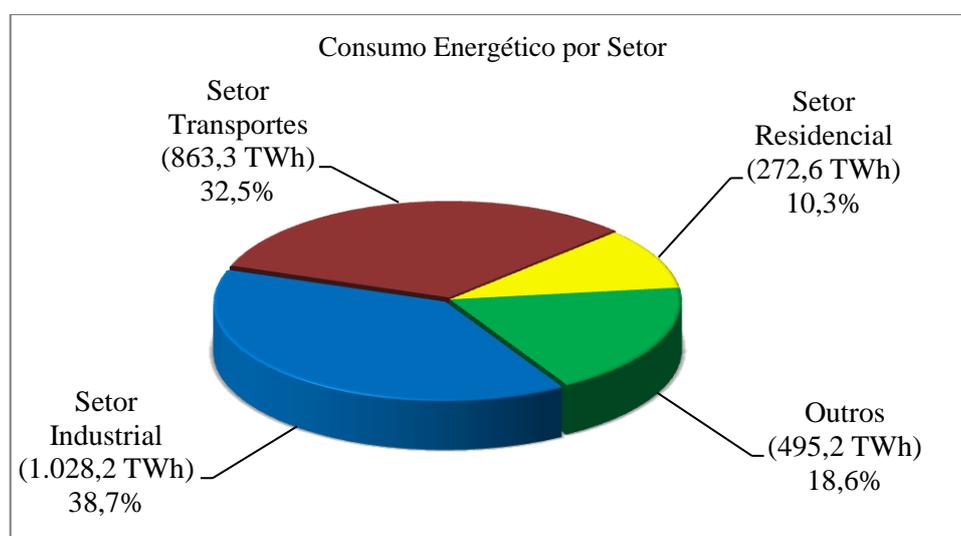


Figura 2.5 - Consumo final energético por setor em TWh no Brasil

Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN, 2012)

De acordo com BEN (2012), a oferta interna de energia no Brasil cresceu 1,3% em 2011 em comparação com 2010, atingindo 3.166,8 TWh. Já o consumo final de energia cresceu 2,6%, mais do que a oferta interna, alcançando 2.659,8 TWh⁵. O crescimento do

⁵ A diferença entre a oferta interna e o consumo final de energia é o que se gasta nos processos de transformação da energia primária (por exemplo, a energia gasta para gerar energia elétrica ou para produzir os derivados de petróleo).

consumo energético sendo superior ao crescimento da oferta de energia implica em redução das perdas e, portanto, no aumento da eficiência energética. Ou seja, o menor crescimento da demanda em comparação ao consumo significa que a economia brasileira gastou menos energia para produzir a mesma quantidade de bens e serviços.

A Figura 2.6 ilustra a evolução do crescimento da oferta de energia e do PIB tendo como referência o ano de 1970.

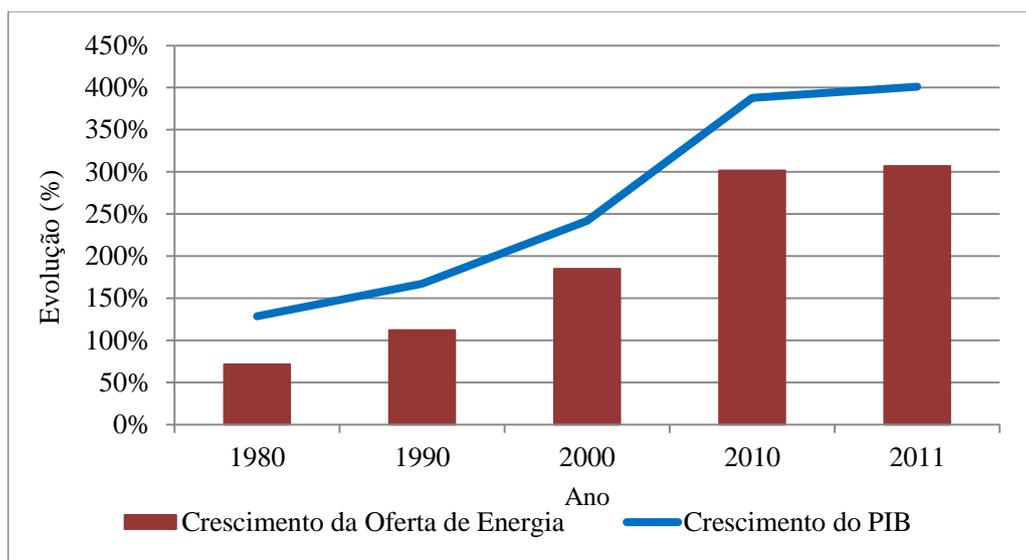


Figura 2.6 - Evolução da oferta de energia e do PIB
Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN, 2012)

O crescimento da oferta interna de energia no Brasil tem crescido continuamente a taxas inferiores às do crescimento do PIB, o que implica em aumento da eficiência da economia brasileira, afirma BEN (2012).

2.4 ESQUEMA TÍPICO DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O caminho da água até chegar aos locais de consumo é longo, passando por vários metros, muitas vezes quilômetros, de tubulações. A Figura 2.7 esquematiza os componentes básicos e essenciais presentes em um sistema de abastecimento de água.

O percurso da água inicia-se com a sua captação em um manancial, seguindo pelas adutoras, que consistem de canalizações (tubulações) para transportar água da captação para a estação de tratamento de água (ETA), onde a mesma será purificada. Da ETA segue para o reservatório ou para a rede de distribuição, podendo funcionar por gravidade, recalque ou ambos (ALVES *et al.*, 2004).

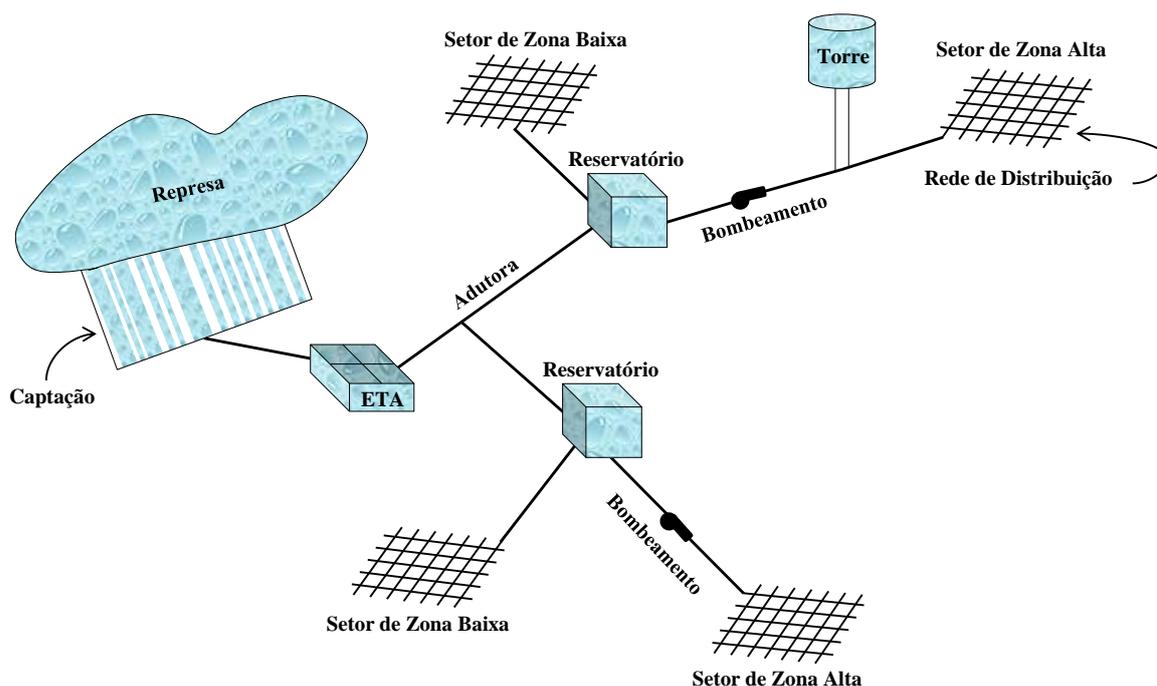


Figura 2.7 - Esquema típico de um sistema de abastecimento de água

Caso o setor de abastecimento esteja localizado em uma zona baixa, a água que chega aos reservatórios pode ir diretamente, por gravidade, para a malha de distribuição. Porém, se o setor de abastecimento estiver em uma zona alta há duas possibilidades a serem analisadas. A primeira consiste em bombear a água para as torres de captação, através da Estação Elevatória⁶, para então serem distribuídas por gravidade aos consumidores. A segunda possibilidade consiste em bombear a água diretamente à rede de distribuição, sendo esta a que se enquadra na metodologia de dimensionamento otimizado desenvolvido nesta tese.

Segundo Gomes *et al.* (2007), as perdas físicas de água, também chamadas de perdas reais, ocorrem em todo o sistema de abastecimento, desde o ponto de captação até os pontos de consumo, passando pela estação de tratamento, de bombeamento, reservatórios, rede de distribuição e ligações prediais. Elas representam a água que efetivamente não chega ao consumidor em decorrência de vazamentos nas redes de distribuição e seus ramais, tais perdas são provocadas por deficiência nos equipamentos, envelhecimento das tubulações e conexões, operação ineficiente e manutenção inadequada em todo o sistema.

⁶ A Estação Elevatória é formada por um conjunto de equipamentos (motor-bomba) destinado a energizar água, com a finalidade de efetuar a sua elevação de nível e compensar as perdas de carga.

Metade dos problemas no segmento do saneamento está ligada às perdas físicas, e a outra metade é decorrente de falhas na medição, ou seja, perdas aparentes⁷, afirma James *et al.* (2002).

2.4.1 Condições Hidráulicas

As redes de distribuição devem ser projetadas para abastecer, de forma eficiente, todos os pontos de consumo, até o mais desfavoráveis, com uma pressão mínima suficiente, proporcionando economia de água e, como consequência, economia da energia elétrica.

Quando a pressão mínima na rede está abaixo do valor satisfatório, os sistemas ficam comprometidos, pois não dispõe de vazão suficiente para abastecer todos os pontos de consumo. Por outro lado, quando o sistema está sendo operado com pressão excessiva, a rede estará mais propensa a vazamentos e ao desperdício de água, e conseqüentemente, será maior o gasto de energia elétrica para disponibilizar a quantidade excedente de água no sistema.

De acordo com Gomes (2009), os limites das pressões hidráulicas são fundamentais no projeto de abastecimento urbano de água, tendo um papel significativo no custo de implantação e operação do sistema, assim como na qualidade do serviço prestado.

A fim de garantir que a água chegue aos pontos de consumo com vazão adequada e com uma carga suficiente para vencer as perdas de carga das instalações, é necessário que as pressões da rede atendam a um limite inferior e superior, ou seja, a rede deve operar com um valor adequado para a pressão mínima e máxima, afirma Tsutiya (2001).

No Brasil o valor sugerido para pressão mínima e máxima na rede segue a norma NBR12218 (1994), onde a mesma estabelece que a pressão dinâmica mínima em qualquer ponto nas tubulações distribuidoras deve ser de aproximadamente 10 mca. Já a pressão máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de aproximadamente 50 mca.

Pressões excessivas podem acarretar grandes problemas nas redes, dentre eles: aumento nos custos energéticos do bombeamento; tubulações mais caras; possibilidades de rupturas (vazamentos) em virtude do aumento das pressões estáticas e dinâmicas; aumento

⁷ Corresponde a água que é consumida, porém não é faturada pela companhia, nem gera arrecadação correspondente. De acordo com Marcka *et al.* (2004), estão relacionadas às perdas aparentes as ligações clandestinas e irregulares, fraudes nos hidrômetros, erros de micro e macromedição, política tarifária, erro e desatualização cadastral etc.

das perdas físicas em virtude do aumento das vazões nas fissuras e juntas dos tubos; e maior consumo de água, muitas vezes desnecessário, em virtude do aumento da vazão.

Há também limites mínimo e máximo para as velocidades da rede. A velocidade da água que passa por um conduto é proporcional à vazão e inversamente proporcional a área do tubo, conforme Equação 2.1.

$$Q = \frac{\forall}{t} = \frac{A \times l}{t} \Rightarrow Q = AV \quad (2.1)$$

$$V = \frac{Q}{A}, \text{ onde } A = \pi \times \frac{D^2}{4} \Rightarrow V = \frac{4 \times Q}{\pi \times D^2}$$

Onde:

Q: vazão volumétrica (m³/s);

∇: volume escoado (m³);

t: tempo decorrido(s);

A: área da seção transversal da tubulação (m²);

l: comprimento da tubulação (m);

V: velocidade média do fluxo (m/s);

D: diâmetro interno do tubo (m).

Considerando apenas a fórmula da velocidade da água no conduto (Equação 2.1), verifica-se que para uma determinada vazão, quanto maior a velocidade de circulação da água, menor o diâmetro do tubo e, conseqüentemente, menor o custo da tubulação. Entretanto, não se deve considerar apenas este aspecto para seleção das tubulações, afinal ao escolher um diâmetro para tubulação é importante verificar também a perda de carga, visto que quanto menor o diâmetro, maior é a perda de carga, e esta pode acarretar danos e desgastes às tubulações. Portanto, para atingir o equilíbrio entre a escolha do diâmetro e uma perda de carga admissível, a velocidade deve ter um limite superior.

A norma NBR12218 (1994) estabelece a velocidade máxima nas tubulações de 3,5 m/s e a mínima de 0,6 m/s. A norma NBR12218 (1994) também recomenda adotar um diâmetro mínimo de 50 mm para as tubulações, visando evitar as perdas de carga excessivas no sistema, que por sua vez, comprometem as pressões e vazões disponíveis para os consumidores. Seguindo as recomendações da norma, para garantir a velocidade

mínima de 0,6 m/s em trechos com diâmetros mínimos (50 mm), a vazão deve ser superior a 1,18 l/s, conforme os cálculos apresentados na Equação 2.2.

$$Q_{\text{mínima}} = \frac{V \times \pi \times D^2}{4} = \frac{0,6 \times \pi \times (0,05)^2}{4} \cong 0,00118 \text{ m}^3/\text{s} \cong 1,18 \text{ l/s} \quad (2.2)$$

As situações extremas de pressão (estática e dinâmica) em que a rede está submetida devem ser observadas, visando o bom funcionamento do sistema de distribuição de água, alerta Gomes (2009).

Na operação das redes de abastecimento, as tubulações estão sujeitas a esforços hidráulicos internos, produzidos pelas pressões estáticas e dinâmicas, e por efeitos transitórios, que ocorrem por conta das perturbações na rede. A pressão estática corresponde à situação em que a rede está em repouso, ou seja, quando a vazão transportada é nula, sendo mais comum acontecer nos períodos noturnos, quando o consumo de água é muito baixo. Outra situação extrema se refere à pressão dinâmica, que se apresenta quando a rede está em plena carga, durante os horários de pico de consumo. Portanto, é necessário conhecer a atuação dos esforços hidráulicos máximos nas tubulações, visando à correta seleção dos tubos e o melhor dimensionamento da rede.

2.5 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

As bombas hidráulicas são máquinas que se destinam a mover fluidos através de tubulações pressurizadas. Para isto, convertem a energia mecânica, recebida de um motor, em energia hidráulica, na forma de pressão e energia cinética. Em geral, os sistemas de distribuição de água possuem vários conjuntos motor-bomba (CMB), seja para recalcar a água de mananciais, ou para recalcar a água a áreas elevadas e distantes.

Segundo Bezerra *et al.* (2010) a bomba centrífuga é o equipamento mais utilizado para transportar líquidos no saneamento, na irrigação, nos edifícios residenciais e na indústria. A bomba centrífuga movimenta o líquido, criando a força centrífuga, que se transforma em energia de pressão e cinética.

A energia cedida pela bomba ao líquido, na forma de energia por unidade de peso de fluido bombeado, denomina-se altura manométrica (H_{man}). Ou seja, a diferença de pressão na sucção e no recalque da bomba é conhecida como altura manométrica e esta

determina a capacidade da bomba em transferir o líquido. A fórmula da altura manométrica está definida na Equação 2.3, sendo sua unidade dada em metros.

$$H_{\text{man}} = \pm H_{g_a} + H_{g_r} + H_{f_a} + H_{f_r} + \frac{V^2}{2g} \quad (2.3)$$

Opção 1 \Rightarrow Sendo: $H_a = \pm H_{g_a} + H_{f_a}$ e $H_r = H_{g_r} + H_{f_r}$, tem-se:

$$H_{\text{man}} = H_a + H_r + \frac{V^2}{2g}$$

Opção 2 \Rightarrow Sendo: $H_g = \pm H_{g_a} + H_{g_r}$ e $H_f = H_{f_a} + H_{f_r}$

$$H_{\text{man}} = H_g + H_f + \frac{V^2}{2g}$$

Onde:

H_{man} : altura manométrica (m)

H_{g_a} : altura geométrica de aspiração/sucção (m).

Observação: para bombas não afogadas o sinal é positivo (+), e para bombas afogadas o sinal é negativo (-);

H_{g_r} : altura geométrica de recalque (m);

H_{f_a} : perdas de carga na aspiração/sucção (m);

H_{f_r} : perdas de carga no recalque (m);

H_a : altura manométrica de aspiração/sucção (m);

H_r : altura manométrica de recalque (m);

H_g : altura geométrica total (m);

H_f : perda de carga total (m);

g : aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);

V : velocidade na saída do recalque (m/s).

2.5.1 Redução da Altura Manométrica de Bombeamento

De acordo com Gomes *et al.* (2009a), a altura manométrica, assim como a vazão, são grandezas que impactam de forma diretamente proporcional na potência demandada pelo sistema de bombeamento. Deste modo, a redução da altura manométrica torna-se uma questão bastante relevante, haja vista que grande parte dos bombeamentos existentes nos

sistemas de abastecimento de água do Brasil foi projetada e construída sem que os gastos com energia fossem considerados fundamentais, já que este custo era subsidiado e a energia era mais barata e abundante que nos dias atuais. Muitas vezes, para se baratear o investimento inicial, reduzia-se o diâmetro, sem levar em conta o impacto futuro das perdas de carga.

Diante destas considerações, para reduzir as perdas de carga nos sistemas de bombeamento, Gomes *et al.* (2009a) sugerem algumas medidas que podem se tornar factíveis, tecnicamente e economicamente, dentre elas, tem-se: reforço ou troca das tubulações de recalque, por outras de menor aspereza e/ou maior diâmetro; limpeza ou revestimento de tubulações; eliminação de ar do sistema; substituição de peças e válvulas de controle por outras mais eficientes; redução da vazão bombeada pelo sistema, acarretando menor custo energético específico, seja devido à incorporação de suprimentos alternativos de água mais econômicos ou redução das perdas reais de água; e automação, para assegurar a confiabilidade e a racionalidade da operação.

2.5.2 Curvas Características da Bomba e do Sistema

As curvas características da bomba são representações gráficas das funções que relacionam os diversos parâmetros do funcionamento da bomba. Essas curvas são obtidas experimentalmente através de ensaios.

De acordo com Macintyre (1987), as curvas características da bomba permitem relacionar a vazão de recalque (Q) com a altura manométrica (H_{man}), a potência absorvida (P) e o rendimento (η). As informações contidas nas curvas características traçadas pelos fabricantes são essenciais para o projetista escolher a bomba mais apropriada para o sistema, assim como, fazer um diagnóstico das condições de funcionamento e modo de operação da instalação elevatória.

A curva do sistema representa graficamente a altura manométrica solicitada pelo sistema de tubulação para que a água seja conduzida do ponto de sucção ao final da linha de recalque. A importância da curva do sistema é que ela permite determinar a condição de operação da bomba. Já a curva característica da bomba descreve a altura manométrica fornecida pela bomba para diferentes valores de vazão, mantendo-se a rotação da bomba constante.

A Figura 2.8 ilustra as curvas características da bomba e a Figura 2.9 ilustra a curva característica do sistema.

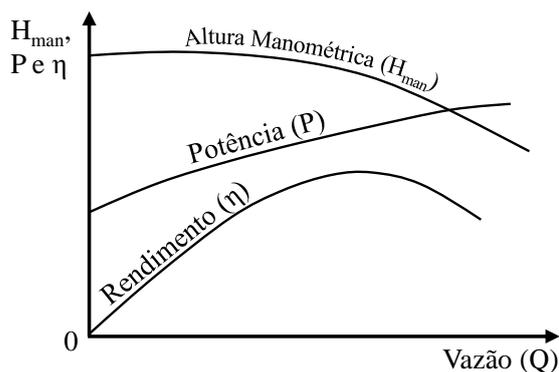


Figura 2.8 - Representação das curvas características da bomba

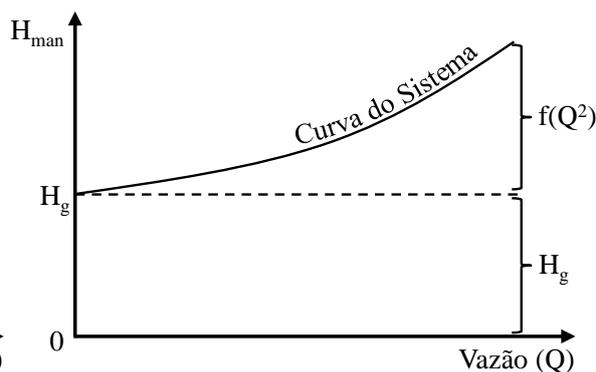


Figura 2.9 - Curva característica do sistema

Sobre a curva o sistema, Gonçalves (2009) destaca que a altura manométrica é composta pela soma de duas componentes: a altura estática e altura dinâmica. A altura estática refere-se à diferença de cota entre o ponto de sucção e de recalque, sendo, portanto, uma altura geométrica. No caso da altura dinâmica, essa é composta pelo somatório das perdas de carga dos sistemas de tubulações e acessórios, tendo uma variação com o quadrado da vazão bombeada. Segundo Andrade Filho (2012), a curva do sistema é a representação gráfica da Equação 2.3, podendo ser considerada $H_{\text{man}} = H_g + f(V^2) = H_g + f(Q^2)$, o que indica que a altura manométrica é uma função quadrática da vazão.

De acordo com Gonçalves (2009), o ponto de trabalho de um sistema de bombeamento é definido por suas curvas características, que por sua vez descrevem a relação entre as variáveis “altura manométrica” e “vazão bombeada”. Uma vez conhecidas as curvas características do sistema e da bomba, ao ajustá-las em um mesmo gráfico “altura manométrica *versus* vazão”, o ponto de intersecção entre as duas curvas indica o ponto de trabalho, isto é, as condições de pressão e vazão com as quais a bomba irá operar. Na Figura 2.10 é apresentada a curva da bomba e do sistema, assim como o ponto de trabalho.

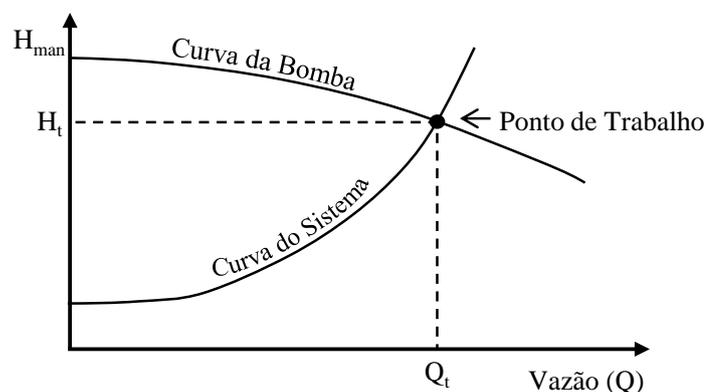


Figura 2.10 - Determinação do ponto de trabalho de bombas hidráulicas

Os valores H_t e Q_t caracterizam o ponto de trabalho da bomba, que é a condição de equilíbrio natural do conjunto sistema-bomba. Só é possível operar em outro ponto de trabalho por meio de modificações em uma ou ambas as curvas. Caso uma mesma bomba seja instalada em sistemas diferentes de tubulações, o ponto de trabalho da bomba não será o mesmo.

2.6 BOOSTER EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

As estações elevatórias são formadas por equipamentos destinados a recalcar água para outros pontos do sistema de abastecimento de água, vencendo os desníveis encontrados no terreno. De acordo com Tsutiya (2004), existem as estações elevatórias do tipo *booster*, também conhecidas como estações pressurizadoras, cuja finalidade é aumentar e reforçar a pressão e, conseqüentemente, a vazão da água em adutoras ou redes de distribuição.

Os *boosters* são utilizados nas redes hidráulicas para atender áreas elevadas ou distantes de um ponto de impulsão. As situações propícias à utilização do *booster* dar-se quando há diferenças significativas de cotas e/ou quando for grande o comprimento do trecho entre zonas de consumo.

A inclusão de *booster* tornar-se viável pelos seguintes aspectos: assegura uma altura manométrica adequada, para uma dada vazão requerida, possibilitando a operação do sistema em todos os pontos de consumo da rede; eleva a linha piezométrica a jusante de seu ponto de localização; e garante pressões mínimas apropriada em pontos críticos da rede, sem a necessidade de elevação de reservatórios ou substituição de tubulações.

De acordo com ELETROBRAS (2005), os *boosters* são instalações de bombeamento em que não há poço de sucção a montante da bomba, desta forma, a pressão na sucção é a pressão do sistema a montante da bomba. O *booster* utilizado na adução de água é conhecido como *booster* em linha, visto que o conjunto motor-bomba fica intercalado na tubulação, de modo que recebe água do lado de montante, com uma determinada pressão, e impulsiona-a no lado de jusante, com uma pressão mais elevada.

As Figuras abaixo ilustram o uso de *booster* em duas situações distintas: recalcar água proveniente de um reservatório (Figura 2.11) e reforçar o bombeamento (Figura 2.12).

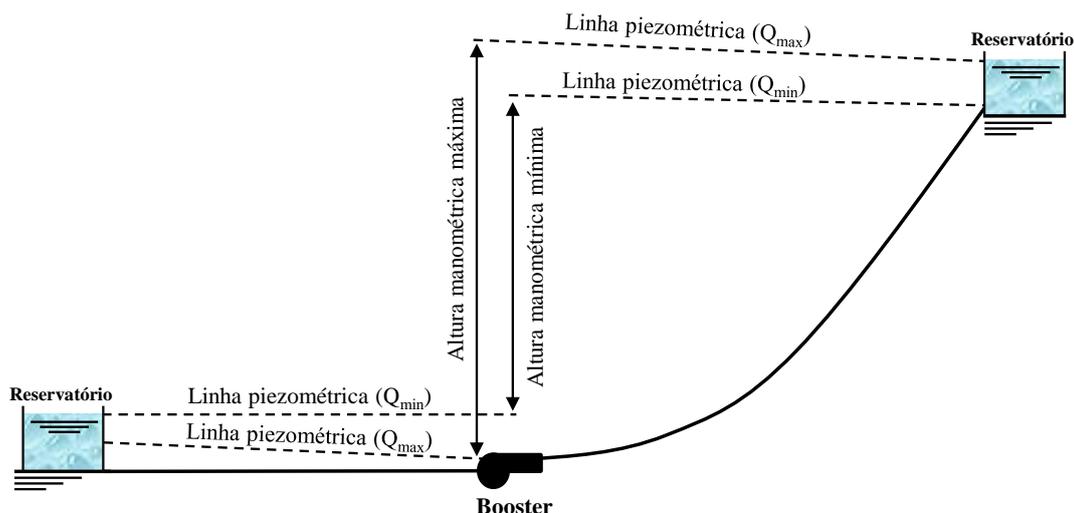


Figura 2.11 - Booster para recalque da água proveniente de um reservatório
 Fonte: adaptado de Tsutiya (2004)

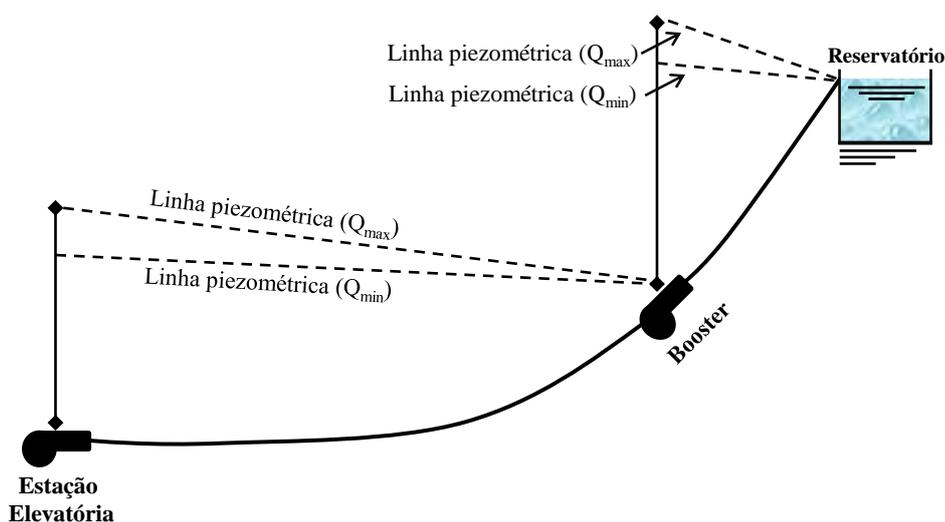


Figura 2.12 - Booster para reforço no bombeamento
 Fonte: adaptado de Tsutiya (2004)

Os *boosters* também são utilizados quando se pretende expandir uma rede pressurizada de distribuição de água, a partir de um nó existente. Em geral, a pressão disponível da água no nó existente não é suficiente para suprir a demanda do novo ponto de consumo, principalmente nos horários de maiores demandas hídricas. Por isso é necessário inserir um *booster* entre os dois nós com o intuito de elevar a pressão, a jusante do *booster*, a fim de bombear água para pontos mais elevados e garantir a vazão desejada nas linhas adutoras.

A Figura 2.13 ilustra um exemplo de expansão de rede a partir do nó 4. Neste caso, o nó 7 está situado em uma cota significativamente superior a cota do nó 4, e sem a presença do *booster*, a pressão disponível não é suficiente para atender o nó 7. Por isso, é

necessário dispor de um *booster* a jusante do nó 4 para pressurizar a água adequadamente para todos os pontos de consumo da rede expandida.

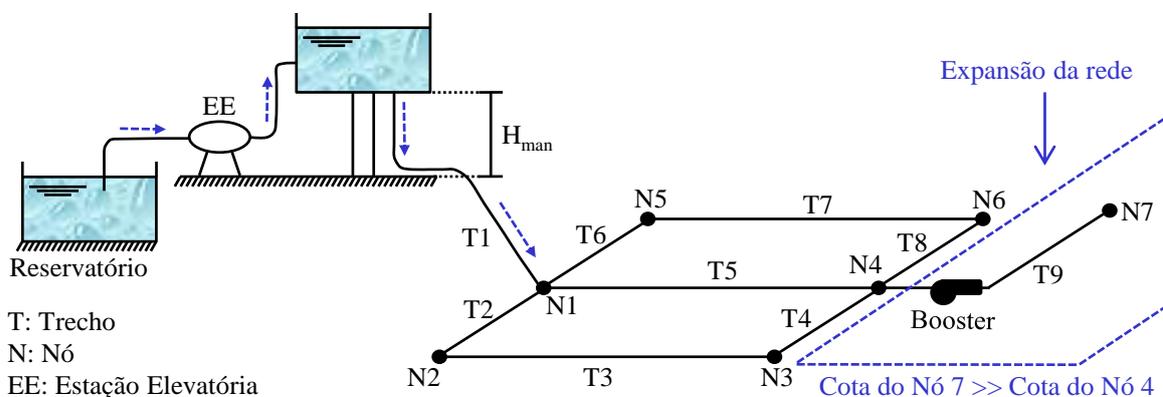


Figura 2.13 - Exemplo de expansão de rede com booster

O presente trabalho auxilia na eficiência energética e hidráulica dos sistemas de distribuição de água, por meio do diagnóstico de situações favoráveis à utilização de *booster(s)*. Desta forma, o trabalho também atua na área da sustentabilidade, pois consiste em otimizar o uso da água e energia elétrica, evitando os desperdícios, minimizando os custos operacionais e melhorando a qualidade dos serviços prestados à população.

2.7 SETORIZAÇÃO E CONTROLE DE PRESSÃO

A redução e estabilização de pressão nos sistemas de distribuição de água são essenciais para conservação de água e controle das perdas, haja vista que o controle de pressão proporciona redução dos vazamentos e aumento da vida útil de operação do sistema.

De acordo com Bezerra *et al.* (2010), uma das soluções para o problema de pressões excessivas nos sistemas de distribuição de água é o zoneamento piezométrico, ou seja, a setorização do sistema em zonas com comportamento homogêneo dos planos de pressão. A setorização proporciona a divisão da área de abastecimento em áreas menores, denominadas setores.

A *International Water Association* (IWA) publicou um manual⁸ de melhores práticas para avaliação de desempenho de sistemas de abastecimento de água (ALEGRE *et*

⁸ O projeto que deu origem ao manual (*International Best Practice Water Balance and Performance Indicators for Water Supply Services*) teve início em 1997, sendo discutido em cerca de 20 encontros técnico-científicos em diversos países (Alemanha, Argentina, Brasil, Bulgária, Espanha, França, Itália, Marrocos, Portugal, República Tcheca e Uganda). O manual foi publicado no ano 2000.

al., 2006). Este manual possui uma seção importante dedicada aos indicadores de perdas de água e é recomendado pela *American Water Works Association* (AWWA). O objetivo do manual foi definir uma metodologia de avaliação da qualidade do serviço prestado por meio de um conjunto de indicadores de desempenho.

Segundo Pena (2010), o manual foi proposto para que seus resultados fossem aplicáveis às entidades de diferentes dimensões, níveis de desenvolvimento, clima, demografia e características socioculturais. A abordagem foi abrangente, visando cobrir às necessidades dos prestadores de serviço de água, entidades reguladoras, financiadoras, organizações ambientais e de defesa do consumidor.

De acordo com Miranda (2002), o trabalho recebeu uma forte aceitação no setor de saneamento mundial. Este cenário aponta para o emprego da metodologia proposta pela IWA como uma referência mundial, para a avaliação de desempenho, no campo das perdas de água.

A aplicação de metodologias modernas de conservação de água, como a que foi proposta pela IWA, já é utilizada em países europeus, afirma Evangelista (2004). Tais metodologias também podem ser adaptadas às condições brasileiras, mais especificamente no controle de perdas, através da redução e estabilização inteligente de pressão, e do monitoramento e redução do tempo de vida dos vazamentos na rede de distribuição de água.

Diferentemente de países europeus, a configuração dos sistemas de distribuição de água no Brasil é dividida em setores relativamente extensos, alimentados por um reservatório, o que dificulta o controle de pressão e vazamentos. Em função de condições topográficas, as pressões podem variar de 10 a 70 mca. Existe um número relativamente pequeno de válvulas de manobra e cada ligação domiciliar possui seu próprio reservatório, afirma Evangelista (2004).

Na maioria dos países europeus, os sistemas de distribuição operam com pressões entre 40 e 70 mca e as ligações domiciliares não possuem reservatórios, exigindo que a regularidade do abastecimento seja alcançada através de fontes redundantes de suprimento, isto é, vários pontos de alimentação, grande quantidade de elementos de controle de pressão, tais como válvulas redutoras de pressão (VRP), estações elevatórias (*boosters*) e grande densidade de válvulas de manobra para manutenção da rede, alerta Evangelista (2004).

Como nos países europeus a área de influência de cada órgão de controle é relativamente pequena (setorizada), torna-se mais fácil o estudo do comportamento da rede e de suas perdas, por meio de medições de vazão. Enquanto que em grande parte do Brasil não existem setores de medição, o que torna muito difícil realizar o diagnóstico do nível de vazamentos por meio da análise da vazão mínima noturna.

Em redes de distribuição de água de grande extensão, a setorização constitui uma solução eficiente para o gerenciamento do sistema, haja vista que ajuda na identificação das áreas sujeitas à maior incidência de vazamentos. Para atender os limites de pressão, evitando-se perdas de água e energia, a rede pode ser subdividida em três zonas de pressão, são elas: alta, média e baixa. A Figura 2.14 exemplifica um sistema de distribuição de água setorizado.

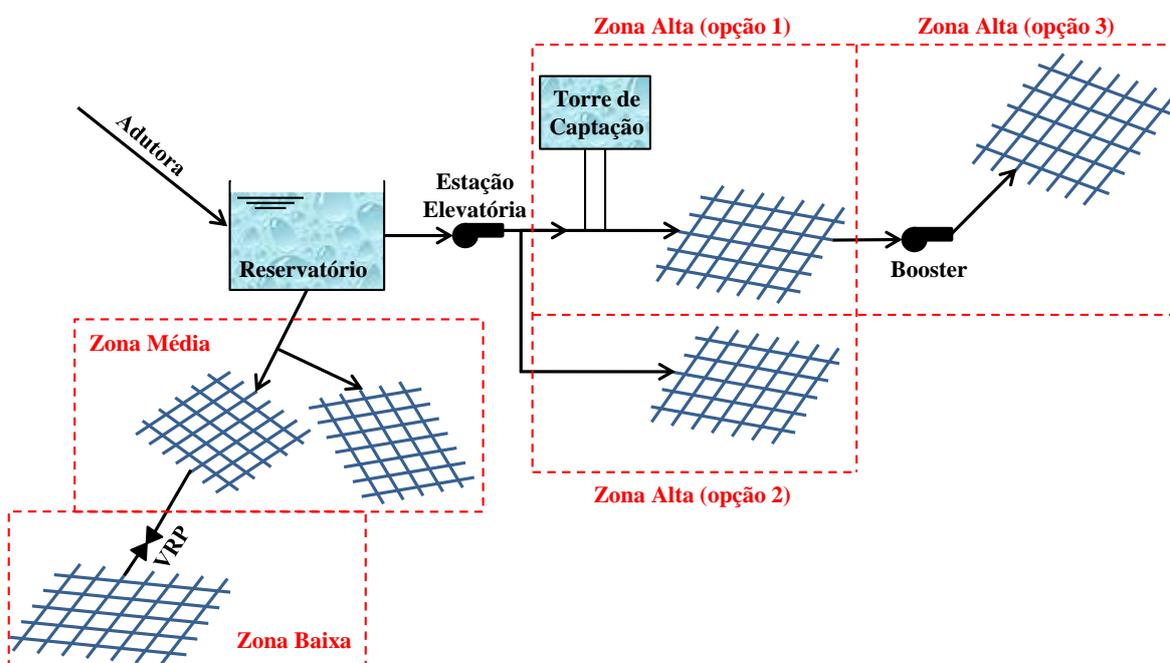


Figura 2.14 - Esquema típico de um sistema de distribuição de água setorizado

Para atender a zona alta existem três opções, conforme ilustra a Figura 2.14. A primeira opção consiste em bombear a água para uma torre de captação (reservatório elevado) e este abastecer, por gravidade, a rede de distribuição. A segunda opção consiste em bombear a água diretamente à rede de distribuição. E a terceira opção para abastecimento de zona alta consiste em reforçar o bombeamento, por meio da inclusão de *booster*, haja vista que esta zona possui cotas mais altas e mais distantes da origem da rede. Para atender a zona média, utiliza-se um reservatório apoiado, semienterrado ou enterrado. E para os setores de zona baixa utilizam-se válvulas redutoras de pressão.

2.8 DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A mecânica dos fluidos é uma ciência voltada para análise do comportamento físico dos fluidos, com base nas leis da mecânica e da termodinâmica. Para explorar a área científica referente ao dimensionamento de redes pressurizadas de distribuição de água, faz-se necessário o conhecimento dos fundamentos da hidráulica, esta que é uma subárea da mecânica dos fluidos, e que trata apenas dos líquidos, particularmente da água.

O problema do dimensionamento de redes pressurizadas consiste em solucionar duas equações da hidráulica, são elas: Equação da Continuidade (princípio da conservação de massa) e Equação da Perda de Carga (princípio da conservação de energia), apresentadas nas Equações 2.4 e 2.5, respectivamente. O balanceamento hidráulico da rede é realizado durante o processo de dimensionamento, de forma a atender às condições impostas pelas referidas equações.

$$\sum_{\text{nó}=1}^n \left[\sum_{i=1}^{t_e} (Q_{\text{entra}})_i - \sum_{j=1}^{t_s} (Q_{\text{sai}})_j - D_{\text{nó}} \right] = 0 \quad (2.4)$$

Onde:

$(Q_{\text{entra}})_i$: vazão do trecho i que chega ao nó (m^3/s);

$(Q_{\text{sai}})_j$: vazão do trecho j que sai do nó (m^3/s);

$D_{\text{nó}}$: demanda concentrada no nó (m^3/s);

n : número total de nós da rede;

t_e : número total de trechos com vazões que chegam ao nó;

t_s : número total de trechos com vazões que saem do nó.

$$\sum_{\text{anel}=1}^{t_a} \left[\left(\sum_{\text{trecho}=1}^t (H_f)_{\text{trecho}} \right) - \left(\sum_{\text{energia}=1}^{t_e} E_p \right) \right] = 0 \quad (2.5)$$

Onde:

H_f : perda de carga no trecho (mca);

E_p : energia de impulsão aplicada ao anel (Joule/Newton = Nm/N = m);

t_a : número total de anéis (malhas) da rede;

t : número total de trechos pertencentes ao anel;

t_e : número total de fontes de energia de impulsão aplicadas ao anel.

Para a conservação de massa, a soma algébrica das vazões nos nós deve ser igual à zero, ou seja, as vazões que entram no nó devem ser iguais às vazões que saem do mesmo nó, conforme apresentado na Equação 2.4. O princípio de conservação da massa garante que, em regime de escoamento permanente, a massa que atravessa a área A_1 por unidade de tempo é igual a que atravessa A_2 , conforme ilustra a Figura 2.15 e os cálculos apresentados na Equação 2.6.

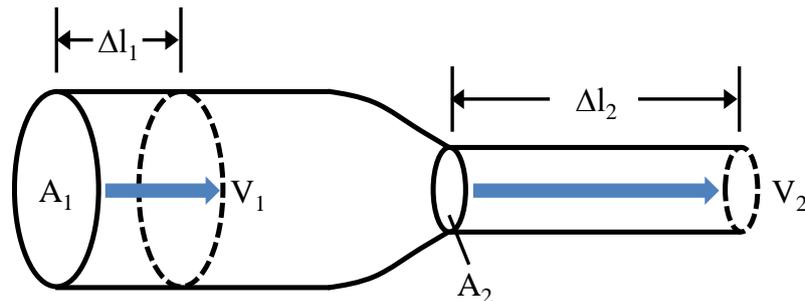


Figura 2.15 - Princípio de conservação da massa - equação da continuidade
Fonte: adaptado de Andrade Filho (2012)

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\Delta m_2}{\Delta t} \Leftrightarrow \frac{\rho_1 \nabla_1}{\Delta t} = \frac{\rho_2 \nabla_2}{\Delta t} \Leftrightarrow \frac{\rho_1 A_1 \Delta l_1}{\Delta t} = \frac{\rho_2 A_2 \Delta l_2}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Como $V = \frac{\Delta l}{\Delta t}$, então: $\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$

Considerando a água como fluido incompressível (densidade constante), tem-se:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \therefore Q_1 = Q_2 = Q = \text{constante}$$

Onde:

Δm : variação da massa do fluido contida em uma seção (kg);

∇ : volume escoado (m^3);

ρ = densidade do fluido (kg/m^3);

A : área da seção transversal (m^2);

Δl : variação do comprimento (m);

Δt : variação de tempo (s);

V : velocidade média do fluxo (m/s);

Q : vazão (m^3/s).

Para a conservação de energia nos anéis da rede, a soma das perdas de carga dos trechos de cada anel deve ser nula, conforme apresentado na Equação 2.5. A perda de energia, também conhecida como Perda de Carga (H_f), é parte da energia dissipada pelos

fluidos, e ocorre devido a sua viscosidade, atrito entre as partículas do fluido, atrito do fluido contra as paredes internas da tubulação, estando também relacionadas com o tipo de escoamento.

O princípio de Bernoulli estabelece que nos escoamentos dos fluidos⁹, em regime permanente, a soma das energias de pressão, cinética e potencial é igual a uma constante. Isto significa que se uma parcela de energia cresce, a outra decresce, de modo que a soma das três sempre resulta em um mesmo valor (constante de Bernoulli).

A Equação 2.7 apresenta a equação de Bernoulli, também conhecida como equação da energia.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \text{constante} \quad (2.7)$$

Sendo $\gamma = \frac{mg}{V}$ e $\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow \gamma = \rho g$, portanto:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \text{constante}$$

Onde:

P: pressão (N/m²);

ρ : densidade (kg/m³);

g: aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

V: velocidade média (m/s);

Z: cota (altura) em relação ao nível de referência (m);

γ : peso específico do líquido (N/m³);

m: massa do fluido contida em uma seção (kg).

A Figura 2.16 ilustra o sentido físico, na prática, da equação de Bernoulli. Nos escoamentos reais, haverá presença do atrito viscoso no trajeto do fluido entre as seções 1 e 2, dando origem às perdas de carga. Desta forma, a energia na seção final (seção 2) sempre será inferior à energia da seção inicial (seção 1). Assim, para manter a igualdade da relação apresentada na Equação 2.7, faz-se necessário computar a parcela de perda de carga.

⁹ Neste caso, considera-se um fluido perfeito, ou seja, sem atrito, incompressível (densidade constante) e não viscoso (viscosidade desprezada – igual à zero). Se fosse considerar um fluido compressível, seria necessário adicionar a variação de energia interna.

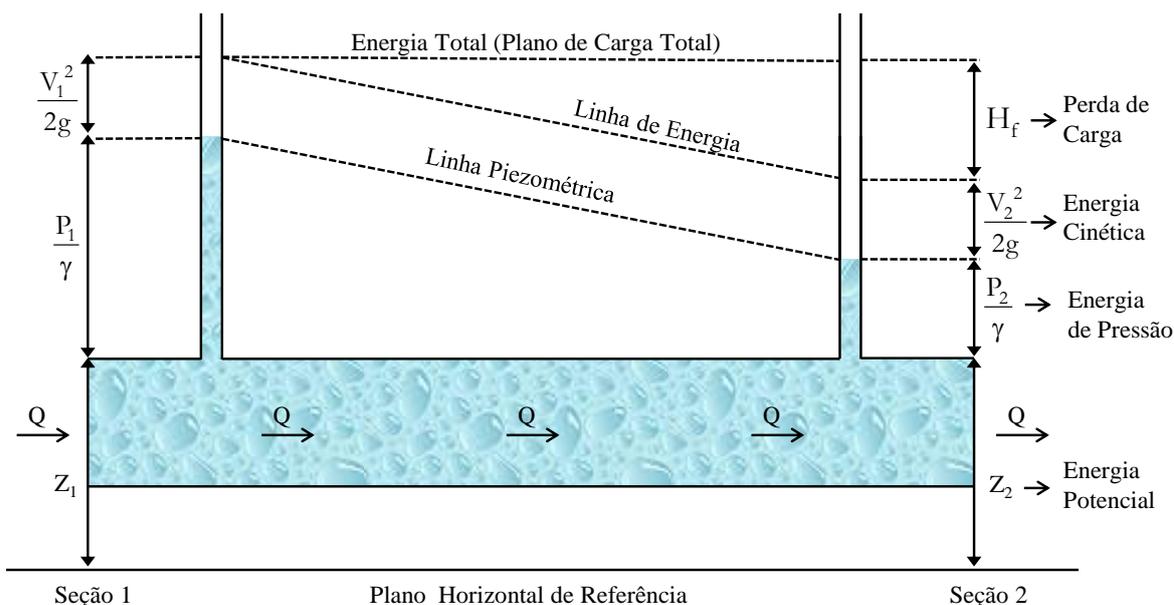


Figura 2.16 - Princípio de Bernoulli em tubulação com escoamento permanente

Na Figura 2.16 as três parcelas de energia podem ser observadas em duas seções de escoamento distintas. Cada uma das parcelas possui dimensão linear e são denominadas de carga (energia por unidade de peso). A soma da energia de pressão com a energia potencial dá origem à *Linha Piezométrica*. A soma das três parcelas de energia forma a *Linha de Energia* que representa a constante de Bernoulli. O *Plano de Carga Total* traduz o escoamento ideal, caso não houvesse as perdas.

A Equação 2.8 apresenta a equação de Bernoulli considerando as perdas de carga.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_f \quad (2.8)$$

Portanto:

$$H_f = \left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right)$$

Onde:

P: pressão (N/m²);

g: aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

V: velocidade média (m/s);

Z: cota (altura) em relação ao nível de referência (m);

γ: peso específico do líquido (kgf/m³);

H_f: perda de carga entre as seções 1 e 2.

A perda de carga em uma tubulação, definida na Equação 2.8, pode ser dividida em duas parcelas: as perdas de carga lineares ou distribuídas (H_{fl}), que resultam do atrito do fluido nas paredes internas das tubulações; e as perdas de carga singulares ou localizadas (H_{fs}), que ocorrem pela turbulência provocada pelo desvio de peças e instrumentos disposto ao longo da rede. Desta forma, a perda de carga é $H_f = H_{fl} + H_{fs}$.

As perdas de carga lineares são determinadas por meio de fórmulas empíricas, que foram desenvolvidas para condições experimentais distintas. Existem várias fórmulas para calcular a perda de carga linear, e de acordo com Gomes (2009), as duas fórmulas mais utilizadas por especialistas da área, e que também são abordadas nos estudos de casos deste trabalho, são: *Darcy-Weisbach* e *Hazen-Williams*. As referidas fórmulas são apresentadas nas Equações 2.11 e 2.12, respectivamente.

Segundo Gomes (2009), a fórmula de Darcy-Weisbach (Equação 2.9) é a que possui maior aceitação, sendo conhecida como a Fórmula Universal da Perda de Carga e recomendada pela NBR12218 (1994). Ela é a mais abrangente, já que pode ser utilizada para qualquer líquido e tubulação. Esta fórmula foi desenvolvida em 1850, pelo engenheiro francês Henry Darcy e pelo professor de matemática Julius Weisbach. A fórmula utiliza todos os parâmetros básicos dos quais depende a perda de carga.

$$H_f = f \left(\frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \right) \Rightarrow \text{Em função da velocidade} \quad (2.9)$$

$$\text{Sendo } V = \frac{Q}{\pi D^2}, \text{ então: } H_f = \frac{8f}{\pi^2 g} L \frac{Q^2}{D^5} \Rightarrow \text{Em função da vazão}$$

Onde:

H_f : perda de carga linear desenvolvida por Darcy-Weisbach (mca);

L: comprimento do tubo (m);

V: velocidade média (m/s);

D: diâmetro interno do tubo (m);

g: aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

Q: vazão volumétrica (m³/s);

f: fator de atrito¹⁰ (adimensional).

¹⁰ O fator de atrito (f) é adimensional e depende do regime de escoamento. Ou seja, é expresso através do número de Reynolds (Re) e da rugosidade relativa do tubo (ϵ/D). Onde $Re = VD/\nu$, sendo “ ν ” a viscosidade cinemática da água.

A equação de Hazen-Williams, apresentada na Equação 2.10, é outra fórmula para perda de carga linear. Ela foi desenvolvida pelo Engenheiro Civil Allen Hazen e pelo Professor de Hidráulica Garden Williams, no início do século XX, sendo bastante utilizada no cálculo de dimensionamento de tubulações. O uso desta fórmula é aconselhável para instalações de água com diâmetros superiores a 100 mm, normalmente utilizadas em projetos de adutoras.

$$H_f = \alpha \frac{L}{D^{4,871}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (2.10)$$

Onde:

H_f : perda de carga linear desenvolvida por Hazen-Williams (mca);

α : igual a 10,6792, que é o valor *default* (pré-definido) utilizado pelo EPANET;

L: comprimento do tubo (m);

D: diâmetro interno do tubo (m);

Q: vazão volumétrica (m³/s);

C: coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams¹¹ (adimensional).

A equação da continuidade depende das variáveis Q, V e D. Já a equação da perda de carga depende das variáveis H_f , Q e D. Como a vazão, normalmente, é um parâmetro de projeto conhecido a priori, restam determinar três variáveis (V, D, H_f), entretanto só há duas equações. Diante deste cenário, verifica-se que o problema de dimensionamento hidráulico é indeterminado, pois possui mais incógnitas do que equações, e por isso admite inúmeras soluções.

Muitos métodos clássicos voltados a solucionar problemas de dimensionamento de redes de distribuição de água empregam valores tabelados de velocidade para os trechos da rede (GOMES, 2009). Desta forma, o problema deixa de ser indeterminado, pois restam duas variáveis (D e H_f) para duas equações. Embora seja mais simples, esta não é a solução mais adequada e econômica de dimensionamento, pois os valores das velocidades dos trechos não devem ser tabelados, e sim determinados em função da solução que minimiza o custo total de investimento e operação do sistema de distribuição de água, e para isso é necessário a aplicação de métodos de otimização.

¹¹ Os valores do coeficiente C de Hazen-Williams, para diversos materiais e estado da tubulação, estão indicados em uma tabela da obra “Manual de Hidráulica” de Azevedo Netto *et al.* (1998).

Os custos de implantação e de operação de um sistema de distribuição de água são antagônicos, ou seja, quando um aumenta o outro diminui, e vice-versa. Um bom dimensionamento consiste em determinar a cota piezométrica de alimentação ótima. A Figura 2.17 ilustra as relações entre as variáveis (altura manométrica do bombeamento, diâmetros e perdas de carga das tubulações) envolvidas em um problema de dimensionamento de redes de distribuição de água.

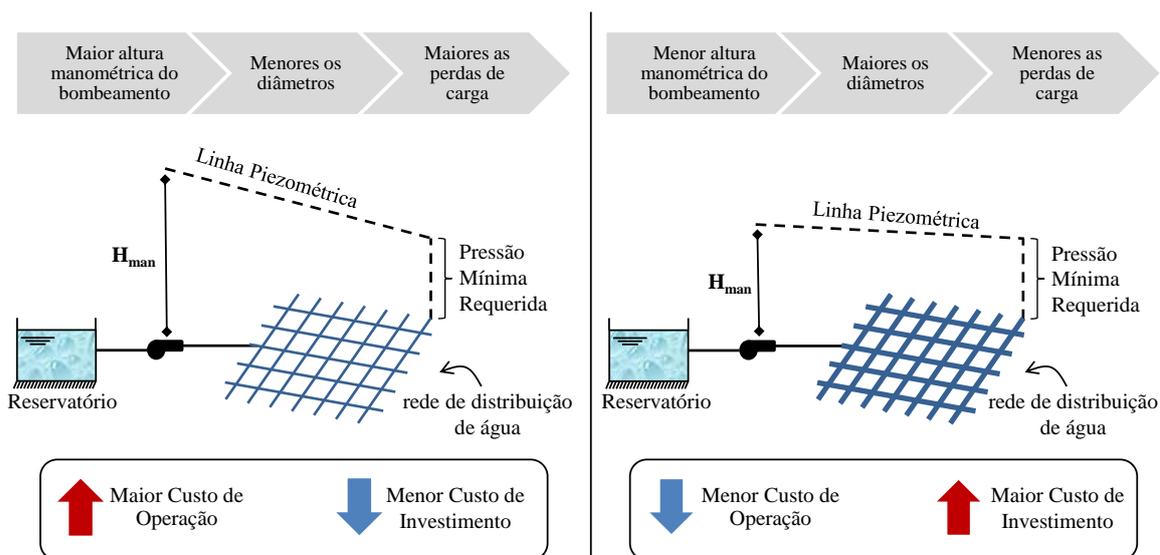


Figura 2.17 – Relações entre as variáveis envolvidas no dimensionamento

Gomes (2009, p. 127) descreve as relações das variáveis envolvidas no dimensionamento de redes de distribuição de água:

Quanto maior a cota piezométrica, menor será o custo de implantação da rede, pois poderão ser selecionados tubos de menores diâmetros, já que existirão cargas suficientes para superar as perdas de carga. Em contrapartida, o custo de operação crescerá, pois os custos da energia aumentam diretamente com a altura de impulsão do bombeamento. De forma oposta, uma menor cota piezométrica proporcionará um menor custo de operação e um maior custo de implantação da rede, uma vez que esta será composta de tubos de maiores diâmetros que provocam menores perdas de carga.

2.9 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA DIMENSIONAMENTO DE REDES

A aplicação de métodos de otimização em sistemas de distribuição de água se torna complexo em virtude da dinâmica e quantidades de parâmetros envolvidos em uma rede pressurizada. Na maioria dos casos, tais sistemas já se encontram implantados e em pleno funcionamento por anos, até mesmo décadas. Diante deste cenário, vários

pesquisadores optam por desenvolver métodos de otimização para setores ou componentes específicos e isolados do sistema. Contudo, quando a rede ainda está em fase de projeto, há especialistas que optam por relacionar os componentes conjuntamente, tornando mais real e eficaz o processo de otimização.

Na maioria dos casos, a função objetivo utilizada no processo de otimização de redes de distribuição de água consiste em minimizar o custo de implantação e o custo energético de operação, considerando as restrições hidráulicas; os limites de pressões, vazões e velocidades; e a relação demanda *versus* oferta d'água.

De acordo com Mays e Tung (2002), os modelos de otimização são capazes de determinar o ótimo funcionamento ou os custos mínimos de operação, por meio da função objetivo. Entretanto, vale ressaltar que os modelos de otimização necessitam dos simuladores hidráulicos, que são ferramentas computacionais cuja finalidade é determinar o comportamento estático/dinâmico, de qualidade, transporte e distribuição de água, para fins de planejamento, projeto e diagnóstico dos sistemas.

2.9.1 Simuladores Hidráulicos

Os simuladores hidráulicos são ferramentas computacionais utilizadas para resolver as equações hidráulicas que definem o fenômeno do escoamento do fluxo d'água. Segundo ELETROBRAS (2005), o funcionamento dos simuladores hidráulicos baseia-se nos conceitos de conservação de massa e de conservação de energia, da mesma forma como ocorre nos problemas clássicos de hidráulica. Assim, para cada nó, a soma das vazões afluentes deve ser igual à soma das vazões efluentes, e para cada trecho, deve ser verificada a equação da energia.

Os simuladores hidráulicos fornecem o equilíbrio hidráulico do sistema, satisfazendo o conjunto de restrições. A função principal dos simuladores hidráulicos é oferecer respostas às alterações realizadas no sistema, apresentando os valores das variáveis de estado, tais como: pressões nos nós, vazões, velocidades, perdas de carga dos trechos, níveis dos reservatórios etc. Tais simuladores são utilizados para fins de planejamento, projeto e diagnóstico do funcionamento dos sistemas de distribuição de água.

Costa (2010a) enumera algumas das tarefas executadas pelos simuladores hidráulicos com foco na operação de sistemas de abastecimento de água, são elas:

- Análises hidráulicas para identificação de problemas de pressões insuficientes ou excedentes na rede;
- Poderosa ferramenta para identificação das perdas nos sistemas;
- Análises hidráulicas para identificação de problemas de qualidade da água;
- Treinamento de técnicos das unidades operacionais;
- Estudos dos sistemas de bombeamento, tanto na produção quanto na distribuição, com a finalidade de otimização energética;
- Diagnóstico dos efeitos da operação de válvulas para intervenções de rotina (manutenções, interligações, reparos etc.).

Um dos simuladores hidráulicos mais utilizados por entidades gestoras e pesquisadores de sistemas de abastecimento de água é o EPANET 2.0¹² (ROSSMAN, 2000). Existem outros simuladores, como é o caso do CWSNet, desenvolvido por Guidolin *et al.* (2010), que é um toolkit orientado a objetos para simulação de redes de distribuição de água. O simulador hidráulico selecionado para dar suporte ao modelo de dimensionamento proposto neste trabalho é o EPANET.

A entidade responsável pelo desenvolvimento do EPANET é a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (*U.S. Environmental Protection Agency - EPA*). A EPA disponibiliza o programa livremente, com o seu código fonte aberto (ROSSMAN e VAN ZYL, 2010), de forma que este possa ser adaptado e/ou traduzido, por programadores, de acordo com suas necessidades.

Dentre as funcionalidades do EPANET tem-se: cálculo das perdas de carga por atrito empregando as equações de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning; modelagem de bombas com velocidade de rotação constante ou variável; possibilidade de múltiplas categorias de consumo nos nós, cálculo da energia de bombeamento e o seu respectivo custo, modelagem dos principais tipos de válvulas e reservatórios de nível fixo ou variável; programação das condições de operação do sistema em controles com regras simples ou controles com regras múltiplas, dentre outras.

O programa EPANET 2.0 permite simulações hidráulicas estáticas e dinâmicas. As simulações hidráulicas estáticas reproduzem as características do sistema simulado para

¹² O Epanet 2.0 foi traduzido para o português do Brasil, em 2009, pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS, da Universidade Federal da Paraíba – Brasil. O arquivo de instalação da versão brasileira do Epanet e o seu respectivo manual estão disponibilizados para *download* no endereço www.lenhs.ct.ufpb.br.

um dado cenário de consumos. Enquanto que simulações hidráulicas dinâmicas reproduzem a evolução do sistema ao longo do tempo, através de uma sequência de soluções de equilíbrio hidráulico obtidas para sucessivos instantes.

2.9.2 Métodos de Otimização Determinísticos e Heurísticos

Até os anos 80, os problemas de otimização eram resolvidos usando apenas métodos determinísticos, tais como programação linear (PL), programação não linear (PNL) e programação dinâmica (PD). Os métodos determinísticos são rápidos e possuem boa precisão na busca pela solução, entretanto, os autores Wu e Simpson (2001) destacaram alguns pontos negativos desses algoritmos: dificuldade de adaptação a projetos com variáveis discretas; necessidade de cálculo de derivadas; e complexidade de implementação nos trabalhos práticos de engenharia.

Em virtude de algumas impossibilidades na resolução de problemas utilizando métodos determinísticos, surgiram os métodos heurísticos, onde os mesmos buscam a solução a partir de regras de probabilidades. Assim, a busca não é feita somente na vizinhança e, com isso, aumenta a chance de se encontrar a solução ótima global, porém, o número de avaliações da função objetivo, necessárias para se chegar à solução ótima, é normalmente superior ao número requerido pelos métodos determinísticos.

A Figura 2.18 ilustra alguns dos principais métodos utilizados em processos de otimização de sistemas de distribuição de água.

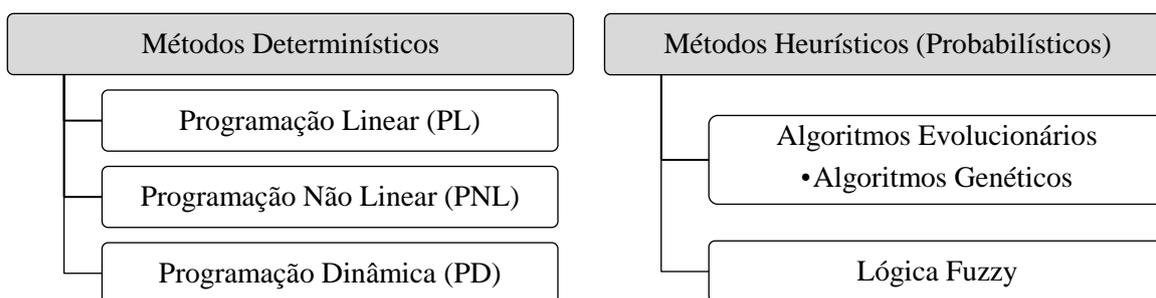


Figura 2.18 - Otimização por meio de métodos determinísticos e heurísticos

A programação linear (PL) é um método de otimização operacional útil para resolução de problemas onde a função objetivo e as restrições são lineares. A programação não linear (PNL) oferece uma formulação matemática mais completa se comparada a outros métodos de programação matemática, entretanto, ela não tem sido muito utilizada

em otimização de sistemas de distribuição de água, devido o processo de otimização ser usualmente lento, necessitando de grande esforço e tempo computacional.

A programação dinâmica (PD) é utilizada para otimização de processos que possuem vários estágios de decisão. O sucesso e popularidade da PD deve-se ao fato dela permitir a formulação das características não lineares e estatísticas dos sistemas reais. A aplicação da PD na otimização de sistemas de distribuição de água inicia-se pela decomposição do problema em um número determinado de estágios, sendo cada estágio analisado sequencialmente. Em cada estágio devem-se considerar todos os estados operacionais das variáveis, pois o processo de otimização irá finalizar quando encontrar o estado que proporcionou a solução mais econômica e viável.

Os métodos heurísticos, também chamados de métodos de aproximações, probabilísticos ou exploratórios, correspondem a um conjunto de passos, bem definidos, para identificar rapidamente uma solução para um problema. Contudo, por meio dos métodos heurísticos não se pode provar, formalmente, ou seja, utilizando formulações matemáticas, que se encontrou o ótimo global. Desta forma, estes métodos costumam encontrar as melhores soluções possíveis para os problemas, e não as soluções exatas.

Dentre a gama de aplicações na engenharia que abordam os métodos heurísticos, os Algoritmos Evolucionários (AE) são os mais utilizados, com destaque para os Algoritmos Genéticos (AG). Os AE são métodos computacionais de otimização, baseados na evolução natural, que surgiram para resolver problemas que apresentam descontinuidade de funções ou características altamente não lineares.

Como a maioria dos métodos de otimização falham na busca pela solução ótima, devido ao elevado tempo computacional, o AG foi desenvolvido justamente para suprir esta deficiência. Os AG foram idealizados pela analogia que há entre o processo de otimização e os mecanismos da genética, e os princípios da evolução natural das espécies. Os AG utilizam conceitos de adaptação seletiva, gerações, troca de material genético, sobrevivência dos indivíduos mais adaptados, entre outros.

De acordo com Goldberg e Kuo (1987), o AG é uma método de otimização eficiente e robusto, haja vista seu bom desempenho em encontrar a solução global dos problemas; analisar a solução em uma população de pontos e não em um único ponto; utilizar apenas a função objetivo, não necessitando de derivadas ou de outras informações; empregar regras de transição probabilísticas e não determinísticas na identificação de soluções, entre outras qualidades.

A Lógica *Fuzzy*, também chamada de lógica nebulosa ou lógica difusa, é amplamente utilizada como sistema de apoio à decisão em todas as áreas que lidam com imprecisões. A lógica *fuzzy* pode ser definida como uma tentativa de aproximar a precisão característica da matemática à inerente imprecisão do mundo real. Os sistemas *fuzzy* surgiram fortemente como alternativa para o controle automático de sistemas não lineares que possuem várias entradas e saídas.

Bezerra (2009b) desenvolveu um sistema *fuzzy*, utilizando o ambiente *Labview*TM, para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água por meio do uso simultâneo de válvulas de controle e conversores de frequência acoplados a conjuntos motor-bomba, visando à economia de água e energia elétrica.

Na seção seguinte (2.9.2.1) são apresentados, de forma geral, três métodos determinísticos de dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água, são eles: método Pimentel Gomes, PNL2000 e LenhsNet. Uma atenção especial é dada aos métodos determinísticos em virtude do modelo desenvolvido neste trabalho utilizar a PD, e esta pertencer à classe dos métodos determinísticos.

2.9.2.1. Exemplos de Métodos Determinísticos de Otimização

O método determinístico Pimentel Gomes realiza o dimensionamento de redes de distribuição de água malhadas e/ou ramificadas, fornecendo como resposta os diâmetros dos trechos, as pressões disponíveis nos nós e a altura manométrica na alimentação do sistema. Contudo, não aborda a minimização do custo total do sistema. A ideia do algoritmo baseou-se na metodologia de Cross (1936), onde a rede pode ser dimensionada a partir do equilíbrio hidráulico do fluxo de água nos anéis da rede. Toda a metodologia e fórmulas utilizadas no método Pimentel Gomes encontram-se em Gomes (2009, p. 103).

O método Programação Não Linear 2000, conhecido como PNL2000, é um aprimoramento do método Pimentel Gomes, trazendo como contribuição a determinação da solução de custo mínimo de investimento acrescido do custo de operação. O PNL2000 é bastante estudado e difundido entre os alunos e especialistas de engenharia hidráulica. A metodologia do PNL2000 foi baseada no método do gradiente reduzido generalizado (GRG2), publicado por Lasdon e Waren (1997). O método GRG2 está implantado no suplemento do software *Microsoft Excel*, conhecido como *Solver*. Este método aplica-se a redes malhadas com cota piezométrica de cabeceira fixa ou variável.

A metodologia do método PNL2000 é composta por duas etapas. Na primeira etapa, faz-se um pré-dimensionamento do sistema, no qual os diâmetros e as vazões dos trechos, e a altura manométrica de alimentação, são variáveis a serem determinadas no processo de otimização. Em seguida, com os resultados obtidos no pré-dimensionamento, executa-se uma segunda etapa, na qual se realiza um ajuste da solução inicialmente obtida. O ajuste é feito substituindo, em cada trecho, o diâmetro calculado inicialmente pelo comercial mais próximo. A descrição detalhada da metodologia e as fórmulas utilizadas no método PNL2000 encontram-se publicadas em Formiga (1999) e Gomes (2009, p. 127).

As pesquisas e trabalhos de Bezerra (2005), Carvalho (2007), Salvino (2009) e Gomes (2009) deram origem ao método LenhsNet, que atualmente se encontra acoplado ao simulador hidráulico EPANET 2.0, versão 2.00.12 português¹³. O método LenhsNet é um algoritmo iterativo de dimensionamento otimizado de redes de distribuição pressurizada de água, composto pela rede de abastecimento com seu conjunto de impulsão na origem. 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.

O LenhsNet também proporciona a reabilitação de redes existentes, haja vista que a ferramenta permite selecionar alguns trechos, com seus respectivos diâmetros, para permanecerem fixos e inalterados no processo de otimização.

Antes de iniciar o processo de dimensionamento otimizado, se faz necessário criar a rede no software EPANET 2.0, contendo os trechos, nós e o reservatório de nível fixo. Para que a rede seja simulada com sucesso é necessário informar os dados básicos dos nós¹⁴ e trechos¹⁵. O primeiro passo para realizar o dimensionamento otimizado através do método LenhsNet é configurar os “Dados do Projeto”, selecionando a natureza da cota piezométrica na origem da rede, que pode ser fixa ou variável.

No caso da cota piezométrica fixa, o processo de otimização independe da energia do bombeamento, sendo necessário informar apenas a pressão mínima desejada, a unidade de vazão (l/s ou m³/h) e a velocidade máxima admitida. Quando o dimensionamento econômico envolve, também, a otimização do custo energético do sistema de bombeamento, a cota piezométrica na origem do sistema será variável. Neste caso, é

¹³ O manual e programa do Epanet Brasil 2.0 incluindo o LenhsNet encontram-se hospedados na página do LENHS UFPB. Disponível em <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=34>.

¹⁴ Os dados essenciais dos nós são: cota topográfica e o consumo base do dia e da hora de máximo consumo.

¹⁵ Os dados essenciais dos trechos são: comprimento, diâmetro mínimo e rugosidade do tubo.

necessário informar a vazão total do sistema; rendimento esperado do conjunto motor-bomba; número de anos da vida útil do projeto; taxa de juros anual; taxa de aumento anual da energia do bombeamento; custo unitário médio da tarifa de energia elétrica; número médio de horas diárias de bombeamento e cota do nível de água na origem. Em seguida o *software* calcula o gradiente energético (G_e) e o fator de atualização do custo energético (F_a), e os apresenta na tela principal.

O segundo passo consiste em configurar os “Dados dos Tubos”. A tabela de tubos deve ser preenchida com o diâmetro interno, rugosidade, descrição do material adotado e custo unitário de implantação da tubulação.

Após a inserção dos “Dados do Projeto” e “Dados dos Tubos”, a ferramenta está pronta para executar o dimensionamento. Se todos os dados de entrada estiverem sido inseridos corretamente, o LenhsNet gera o relatório final do dimensionamento, onde são apresentados os valores da pressão mínima e máxima nos nós, velocidade mínima e máxima nos trechos, altura manométrica e cota piezométrica do bombeamento, custo de implantação das tubulações, custo energético atualizado e custo total do sistema de abastecimento. O relatório também informa o tempo de execução e os dados sobre o processador do computador que efetuou o dimensionamento.

2.10 O ESTADO DA ARTE EM OTIMIZAÇÃO

Nesta seção são apresentados alguns dos trabalhos relacionados e que são de relevância ao estado da arte em otimização e dimensionamento de sistemas de abastecimento de água (SAA), tanto no cenário brasileiro, quanto no cenário internacional.

Os estudos de vazão, pressão, velocidade e comportamentos hidráulicos em redes malhadas de distribuição de água começaram a serem difundidos e aperfeiçoados em meados dos anos 30 com os estudos de Cross (1936). Os primeiros métodos de otimização aplicados em redes de distribuição de água surgiram no final da década de 60. O trabalho de Karmeli *et al.* (1968) foi um dos precursores, utilizando a Programação Linear (PL) para encontrar o menor custo de redes ramificadas. Este trabalho foi aprimorado para redes malhadas por Alperovits e Shamir (1977).

A Tabela 2.4 apresenta uma síntese histórica dos métodos, técnicas e algoritmos de otimização aplicados em SAA. Em seguida, os trabalhos são discutidos de forma mais detalhada.

Tabela 2.4 – Síntese do estado da arte em otimização de sistemas de abastecimento

| Autores e Ano de Publicação | Método/Técnica/Algoritmo de Otimização |
|---|--|
| Karmeli <i>et al.</i> (1968); Alperovits e Shamir (1977) | Surgimento dos primeiros métodos de otimização. Utilização da PL em redes ramificadas e malhadas. |
| Gessler e Walsky (1985) | Enumeração exaustiva. |
| Granados (1990); Leal (1995); Leal e Gomes (2000); Bezerra (2005); Carvalho (2007); Salvino (2009); Costa (2010b) | PD em redes ramificadas e malhadas. |
| Formiga (1999); Melo (2000); Almeida (2001); Silva (2003); Kadar e Bariudin (2004); Gomes <i>et al.</i> (2006) | PNL em redes malhadas. |
| Cunha e Sousa (1999) | <i>Algorithm Simulated Annealing</i> (baseado na técnica do recozimento simulado de metais). |
| Colombo e Karney (2002); Araque e Saldarriaga (2005); Gumier e Luvizotto Jr. (2007); Toledo <i>et al.</i> (2008); Vinciguera (2009); Morais <i>et al.</i> (2010); Pena (2010) Jun e Guoping (2012); | Otimização por meio da análise energética; Uniformidade de pressão; Influência da pressão nos vazamentos; e controle de perdas d'água e energia nos SAA. |
| Maier <i>et al.</i> (2003); López-Ibáñez <i>et al.</i> (2008) | <i>Ant Colony Optimization (ACO)</i> , algoritmo de otimização por colônia de formigas, baseado no forrageamento das formigas. |
| Saldarriaga <i>et al.</i> (2005); Pedrosa Filho (2006); Tebcharani (2007); Viana (2007); Mota (2007); Krapivka e Ostfeld (2009); Cunha (2009); Prasad (2010); Costa <i>et al.</i> (2010); Costa (2010a) | Algoritmos Genéticos. |
| Haddad <i>et al.</i> (2006); Mohan e Babu (2010) | <i>Honey-Bee Mating Optimization (HBMO)</i> , algoritmo baseado no acasalamento de abelhas. |
| Lansley (2006) | Linha do tempo contemplando os principais métodos e avanços alcançados em otimização de SAA. |
| Nardo e Natale (2010) | Áreas de medição setorizadas (estudo avançado sobre setorização). |
| Vasan e Simonovic (2010) | Evolução Diferencial |
| Cunha e Sousa (2010); Kang e Lansley (2012) | Otimização Robusta (utiliza o conceito de cenário). |
| Giustolisi <i>et al.</i> (2011) | <i>Enhanced Global Gradient Algorithm (EGGA)</i> , algoritmo do gradiente global reforçado. |
| Suribabu (2012) | Algoritmo de busca estocástica. |
| Giacomello <i>et al.</i> (2012) | Algoritmo de otimização guloso. |
| Bezerra (2005); Carvalho (2007); Salvino (2009); Gomes (2009) | Trabalhos que serviram como base e inspiração para o desenvolvimento desta tese. |

O dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água também pode ser resolvido por enumeração exaustiva, já que é um problema combinatório. Os especialistas Gessler e Walsky (1985) programaram em *Fortran* o método *Wadiso*, baseado na enumeração exaustiva. Este método simula e compara todas as combinações para os diâmetros das tubulações, selecionando a melhor solução entre todas as soluções possíveis, àquela de menor custo e que satisfaz as restrições hidráulicas. Entretanto, este método possui algumas desvantagens, entre elas tem-se: o enorme poder computacional e tempo de processamento necessários para resolver a grande quantidade de cálculos envolvidos, podendo até mesmo inviabilizar o resultado na prática, no caso de redes de médio e grande porte. Por exemplo, para o dimensionamento de uma pequena rede, contendo apenas 10 trechos e tendo a disponibilidade de 6 diâmetros comerciais para cada tubulação, seriam necessárias 6^{10} combinações, isto é, 60.466.176 possibilidades de dimensionamento, sendo uma delas a solução ótima global de custo mínimo.

Os trabalhos de Leal (1995); Leal e Gomes (2000), realizaram um estudo comparativo entre dois métodos de dimensionamento econômico de redes pressurizadas: o método *Wadiso* (GESSLER e WALSKY, 1985; WALSKY, *et al.*, 1990) e o método *Granados* (GRANADOS, 1990). O método *Granados* utiliza a PD para dimensionamento otimizado de redes ramificadas. Uma das contribuições dos autores Leal e Gomes foi estender o método *Granados* para redes malhadas, visto que o mesmo foi originalmente planejado apenas para o dimensionamento econômico de redes ramificadas. Tal adaptação foi feita usando a metodologia dos anéis de Hardy Cross.

O trabalho de Formiga (1999) foi responsável pelo desenvolvimento de um método de dimensionamento econômico de redes malhadas, utilizando técnicas de programação não linear, conhecido como PNL2000. A metodologia do referido método foi discutida anteriormente na seção 2.9.2.1 desta tese. Este trabalho foi publicado em periódico pelos autores Gomes e Formiga (2001), dando origem à planilha PNL2000.

O trabalho “Otimização de Redes Malhadas Abastecidas com Múltiplos Reservatórios, Bombas e Boosters através da Programação Não Linear” de autoria de MELO (2000) utilizou técnicas de programação não linear para o dimensionamento de redes malhadas abastecidas por múltiplas fontes, ou seja, múltiplos reservatórios, bombas e *boosters*. A fim de dimensionar a rede com a obtenção do custo mínimo, Melo (2000) utilizou o algoritmo GRG2, baseado na técnica dos gradientes reduzidos generalizados, desenvolvido por Lasdon e Waren (1997).

Em Almeida (2001) foi proposto um modelo hidráulico de otimização, estruturado na forma clássica dos problemas de otimização determinística. Este modelo foi composto por duas partes: a função objetivo, que descreve o critério de performance do sistema; e o conjunto de restrições composto por equações e/ou inequações matemáticas que definem a operação do sistema e de seus elementos (válvulas, bombas e reservatórios). Devido à presença de variáveis binárias utilizadas para representar as condições operacionais das bombas, o modelo hidráulico de otimização foi formulado como um problema de programação não linear inteira mista. Para a solução do modelo proposto, foram utilizados dois algoritmos de programação não linear e um algoritmo de programação inteira, associados a interface do software *General Algebraic Modelling System* – GAMS (BROOKE *et al.*, 1992). O modelo foi avaliado em dois sistemas de abastecimento de água, um deles hipotético e que foi estudado, inicialmente, por Venturini (1997), e um real, o subsistema adutor “Alça Leste” da cidade de São Paulo. De acordo com o autor, os resultados obtidos evidenciaram a viabilidade da utilização de tal metodologia como uma ferramenta valiosa de suporte para as tomadas de decisões operacionais em sistema de abastecimento de água, permitindo um melhor entendimento das interações dos elementos que compõem o sistema e indicando a possibilidade de implementação para operações em tempo real.

Em Colombo e Karney (2002) é apresentado um panorama abrangente sobre os custos energéticos em redes de distribuição com vazamentos. A fim de avaliar os impactos dos vazamentos, várias simulações de estado estacionário foram realizadas através do programa EPANET. Quatro redes hipotéticas malhadas foram utilizadas neste trabalho: rede *System 10-loop*, duas configurações modificadas da rede *Anytown* (WALSKI *et al.*, 1987) e a rede *System 2-loop* (ROSSMAN, 2000). Por meio dessas redes, foram analisadas a influência da demanda total, complexidade topológica e localização de vazamento, a fim de encontrar a relação de interdependência entre os vazamentos, custos energéticos e complexidade do sistema. Como resultado, este trabalho constatou que os vazamentos aumentam substancialmente os custos energéticos do sistema de distribuição de água. Em geral, o aumento percentual do custo de energia pode ser associado a uma função polinomial de segunda ordem do vazamento, embora não exista uma relação simples, pois são diversos fatores externos associados com os vazamentos.

O trabalho de Silva (2003) levou em consideração as variações das condições de contorno do projeto e o efeito dos custos do reservatório elevado, incorporando-os no

processo de dimensionamento econômico de redes de distribuição de água. As variações abordadas pelo autor consistem nas mudanças que podem ocorrer na população, na rugosidade das paredes internas das tubulações, no consumo diário de água, na vazão média de projeto, no número de horas de bombeamento e nos fatores econômicos, desde o instante de implantação até o final do período de exploração do projeto. O autor desenvolveu um programa computacional com base no modelo matemático da programação não linear e aplicou o seu método de otimização de redes para realizar o dimensionamento econômico das redes do bairro do Bessa (João Pessoa-PB) e da cidade de Itororó (Bahia).

O trabalho desenvolvido por Kadar e Bariudin (2004) descreve um modelo de otimização inovador para projetos econômicos de engenharia em sistemas de abastecimento de água. O modelo baseia-se no GAMS (BROOKE *et al.*, 1992), que é um pacote robusto de programação linear e não linear, e é através dele que a modelagem hidráulica e os parâmetros econômicos são incorporados. A metodologia empregada visa à minimização do custo total anual composto de investimento, manutenção, operação e energia. O trabalho tem sido utilizado para estudos de viabilidade e planejamento de projetos de abastecimento de água em Israel. O custo efetivo desses projetos é obtido através da determinação ótima da capacidade das bombas, dos diâmetros dos tubos e da capacidade de água nos reservatórios. De acordo com os autores, o problema torna-se complexo, pois a tarifa de energia elétrica da hora do dia é considerada em todo o horizonte de tempo (tempo de vida) da rede.

O trabalho de Bezerra (2005) apresentou um método de otimização econômica para reabilitação de redes de distribuição de água que se encontram com deficiência de vazão e pressão nos pontos de consumo. A metodologia foi baseada no método de dimensionamento econômico de redes pressurizadas *Granados* (GRANADOS, 1990). Foram realizados dois estudos de casos visando à validação da metodologia proposta, e para isso foram analisadas uma rede malhada fictícia e uma rede ramificada real (Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho em Juazeiro/BA). Como resultado da pesquisa, o autor constatou que o método mostrou-se uma ferramenta eficiente e capaz de fornecer subsídios para a tomada de decisão em redes pressurizadas de distribuição de água.

O trabalho de Araque e Saldarriaga (2005) abordou a otimização operacional de rede de distribuição de água através da maximização da uniformidade de pressão nos nós

de serviço. A intenção do trabalho, considerando o ponto de vista hidráulico, foi a obtenção de um nível de pressão uniforme na rede, visando minimizar as perdas de água e energia. A uniformidade de pressão proporciona um maior grau de confiabilidade e melhora a qualidade do serviço prestado, pois maximiza a conservação de energia do sistema. Os autores utilizaram como estudo de caso um setor do sistema de distribuição de água da cidade de Bogotá, na Colômbia, que possui 1.289 tubos e 1.190 nós. A metodologia utilizada por Araque e Saldarriaga (2005) fez uso do Índice de Resiliência, definido por Todini (2000). Este índice foi proposto com base no conceito de que a potência de entrada fornecida para o sistema através do(s) reservatório(s) e/ou bomba(s) é internamente semelhante à potência dissipada pelo sistema, causada pelo efeito do atrito nas paredes dos tubos, acrescido da energia dissipada pelos nós de demanda. O índice relaciona a potência dissipada e a potência disponível para dissipar, e serve como instrumento para determinar a substituição dos tubos na rede de distribuição de água. Dentre as conclusões obtidas, os autores constataram a estreita relação existente entre a conservação da energia e os indicadores de desempenho, isto é, ao reduzir o trabalho do nível de energia de uma rede de distribuição de água, torna-se possível melhorar a qualidade do serviço e evitar a presença de falhas futuras.

Em Saldarriaga *et al.* (2005) foi apresentada uma metodologia baseada em um algoritmo que inclui à determinação da zona de pressão ideal, programação por restrições e algoritmos genéticos. O objetivo do trabalho foi à obtenção do menor custo em projetos de rede de distribuição de água, satisfazendo as restrições de pressão. Para a simulação hidráulica utilizaram o programa EPANET. A fim de exemplificar a metodologia, foi utilizada a rede *Hanoi* por ser bastante conhecida na literatura. Como resultado, os autores constataram que a metodologia proposta foi computacionalmente mais rápida e que melhores soluções foram encontradas quando comparadas a outros algoritmos usados para resolver o mesmo problema.

O trabalho de Pedrosa Filho (2006) desenvolveu um modelo computacional de apoio à tomada de decisão para obtenção da eficiência energética diária dos estados das bombas e válvulas de um sistema adutor, de forma que o mesmo resultasse na minimização dos gastos com energia elétrica. A metodologia para encontrar o ótimo operacional ao longo de 24 horas, utilizou a técnica estocástica dos Algoritmos Genéticos Simples, acoplando-a ao simulador hidráulico EPANET 2.0, responsável pela avaliação hidráulica das soluções propostas. A metodologia foi avaliada por meio de simulações do sistema

adutor Marés, este que é responsável pelo abastecimento de parte da cidade de João Pessoa/PB, Santa Rita e Bayeux. De acordo com o autor, o trabalho apresentou resultados satisfatórios que comprovam a eficácia do modelo proposto, visto que houve redução do consumo elétrico na adutora.

O trabalho de Lansey (2006) intitulado “*The Evolution of Optimizing Water Distribution System Applications*” aborda os desafios da otimização em sistemas de distribuição de água. O autor apresenta uma linha do tempo contemplando os tipos de problemas, os métodos utilizados e os avanços alcançados nas aplicações envolvendo otimização em sistema de distribuição de água. Como as restrições e os objetivos dos problemas podem ser lineares ou não lineares, as interações e decisões são complexas e nem sempre facilmente entendidas ou esperadas. Desta forma, nesta linha do tempo é apresentada a Era da programação linear, programação dinâmica, programação não linear e busca estocástica.

O artigo desenvolvido por Gomes e Silva (2006) abordou um método de otimização econômica de sistemas de abastecimento de água, baseado no modelo matemático da programação não linear, usando o algoritmo dos gradientes reduzidos generalizados (GRG2). O método levou em consideração a rede de distribuição, sua estação de bombeamento e a variação das condições de operação ao longo do alcance do projeto. Foram consideradas as variações das vazões, da rugosidade das paredes internas das tubulações e da tarifa de energia elétrica. O método tem como objetivo minimizar o custo total do sistema rede/estação de bombeamento, levando-se em conta a variação dos parâmetros de operação ao longo do período de exploração do projeto. O método foi aplicado para o dimensionamento ótimo do sistema de abastecimento de água da cidade de Itororó, no estado da Bahia, Brasil, sendo todas as restrições hidráulicas atendidas. De acordo com os autores, os resultados do dimensionamento otimizado, através do método proposto, podem ser considerados mais aceitáveis do que os calculados com base em outras metodologias que não consideram as variações dos parâmetros das condições de operação do projeto, tendo em vista que estas variações têm influência significativa nos resultados dos dimensionamentos.

Em Carvalho (2007) foi desenvolvido um método de dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água, chamado EficientE. O método utilizou a programação dinâmica, aliada a conceitos econômicos, com o objetivo de alcançar a solução de custo mínimo para redes malhadas, ramificadas e ampliações de redes já

existentes. O trabalho implementou um algoritmo matemático iterativo de convergência, associado ao software de simulação hidráulica EPANET. O programa foi testado e validado em cinco redes com características distintas. O primeiro teste realizado pelo o método EficientE foi com a *Rede Dois Anéis*. Segundo constatou o autor houve uma redução de 9,13% no custo do dimensionamento da referida rede, através do método EficientE, em comparação com o método proposto por Alperovits e Shamir (1977). O estudo de caso prosseguiu com o dimensionamento da *Rede Bessa*, onde o resultado foi comparado com os trabalhos de Leal (1995), Formiga (1999) e Lopes (2002). O método EficientE obteve um custo menor se comparado ao método utilizado por LEAL (1995), mas se comparado ao métodos utilizados por Formiga (1999) e Lopes (2002), o método EficientE obteve um custo maior. A terceira rede dimensionada pelo método EficientE foi a *Rede Apucarana*. A mesma também foi utilizada nos trabalhos de Vieira (1980), Koide (1984) e Lopes (2002). Ao comparar os resultados obtidos pelo método EficientE, o autor conclui que o custo da rede foi menor apenas no trabalho de LOPES (2002), nos outros dois trabalhos o método EficientE foi mais econômico. A quarta rede dimensionada pelo método EficientE foi a *Rede Grande Setor*. Esta rede já havia sido dimensionada anteriormente pelo método PNL2000 de autoria de Gomes (2009, p. 133). Ao comparar os resultados obtidos entre os dois métodos, verificou-se que o método EficientE foi 16,54% mais econômico, tanto no que diz respeito ao custo de implantação das tubulações quanto ao custo energético. Para finalizar o estudo de caso, foi realizado o dimensionamento da *Rede Setor Secundário*, pelo método EficientE. A mesma já havia sido dimensionada anteriormente por Gomes (2009, p. 145), usando o método PNL2000. Comparando os resultados obtidos pelo método EficientE, em relação ao método PNL2000 conclui-se que o custo das tubulações foi 1,73% inferior ao custo encontrado pelo método PNL2000.

O artigo de Gumier e Luvizotto (2007) apresentou um modelo matemático-computacional de localização de fugas para sistemas de abastecimento de água, visando a otimização dos programas de controle de perda d'água e redução de custos. O modelo proposto foi fundamentado no acoplamento de um simulador hidráulico, baseado no *Time Marching Approach* (TMA), com o algoritmo otimizador de *Nelder-Mead*. O estudo de caso foi aplicado a uma rede de distribuição de água da cidade de Jundiaí/SP, sendo a rede foi modelada no software EPANET. De acordo com os autores, é fundamental que o modelo seja devidamente calibrado antes de iniciar a simulação. Os principais parâmetros

adotados, tais como topologia, rugosidade da tubulação e consumos nodais, conduziram a resultados esperados, já que as fugas simuladas foram detectadas.

O trabalho de Tebcharani (2007) abordou a confiabilidade em redes de distribuição de água, que diz respeito à avaliação da qualidade do serviço, buscando atender as vazões e pressões requeridas. De acordo com o autor, nos últimos anos a maximização da confiabilidade tem sido considerada como segundo objetivo em projeto ótimo de redes de distribuição de água, sendo a minimização de custos o primeiro objetivo. A relação de custo e confiabilidade é antagônica, pois ao minimizar custos, ocorre a diminuição de diâmetros, prejudicando a confiabilidade da rede. Diante deste impasse, o presente trabalho desenvolveu um modelo, utilizando algoritmos genéticos multiobjetivos, para a otimização de redes, considerando como objetivos a minimização de custos e a maximização da confiabilidade. A fim de testar a eficácia do modelo foram utilizadas duas redes exemplo: *Two-Loop*, apresentada, inicialmente, por Alperovits e Shamir (1977); e a rede *Main-Loop*, estudada inicialmente por Todini (2000). O autor observou que embora nos últimos anos as soluções tenham melhorado, em termos de custo ótimo, os pesquisadores utilizaram restrições diferentes para a pressão nos nós, em alguns casos menores do que a pressão mínima admissível por Alperovits e Shamir (1977).

O trabalho de Viana (2007) apresentou um modelo de otimização para o dimensionamento de rede de distribuição de água utilizando a técnica dos algoritmos genéticos. A metodologia foi aplicada em a rede *Two-Loop*, apresentada inicialmente por Alperovits e Shamir (1977), entretanto, foram introduzidos em diversas formulações desta rede alguns componentes hidráulicos tais como válvulas de retenção, válvulas redutoras de pressão e bombas. A implantação de componentes hidráulicos é utilizada para corrigir problemas de ordem topográfica ou melhorar a operacionalização da rede, entretanto, eles aumentam, consideravelmente, o número de iterações e, conseqüentemente, o tempo computacional para a obtenção da solução final. Os resultados obtidos em cada formulação foram comparados tendo como parâmetro o custo de implantação do projeto. O modelo proposto demonstrou-se apropriado e a técnica dos algoritmos genéticos mostrou-se uma ferramenta eficaz na obtenção do projeto otimizado.

Em Mota (2007) foi desenvolvido um modelo computacional *SOSNET – Sistema Otimizador Simulador de Redes* - para o dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, sendo concebido em dois módulos, a simulação hidráulica através do EPANET e a otimização multiobjetivo através do Algoritmo Genético. Foram realizadas

simulações de análises de sensibilidade variando individualmente cada parâmetro para encontrar seus valores que fizeram o desempenho do algoritmo melhorar em termos de convergência, qualidade final das soluções e esforço computacional. Inicialmente foi realizada a calibração dos parâmetros, depois foram processadas as simulações em busca da melhor solução para a primeira função objetivo, com enfoque na eficiência das seções da tubulação. O resultado foi comparado ao obtido para a mesma rede com uso da Programação Não Linear (PNL), apresentando uma rede mais eficiente hidraulicamente, superioridade do desempenho em relação à convergência ou proximidade da melhor solução e conseqüentemente mais econômica do que esta última. Mensurando os resultados obtidos pelos dois métodos em termos de custos de implantação empregando a equação da curva ajustada “Preço *versus* Diâmetro” concluiu-se que a solução do método AG custou R\$ 430.656,00, sendo mais econômico R\$ 57.030,68 (11,69%) que a rede do método PNL, cujo valor foi R\$ 487.686,68. Em seguida, foi implementada uma segunda função objetivo, visando minimizar o custo total de implantação mais bombeamento. Apesar de não se poder garantir que a melhor solução encontrada é a ótima global, a utilização do AG no dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água mostrou-se de plena viabilidade frente às técnicas convencionais de otimização, devendo a hibridização destas técnicas propiciar aumento na velocidade de convergência e refino de resultados.

O trabalho de Albuquerque (2007) analisou métodos de otimização visando à eficiência energética de estações elevatórias. Nos estudos de casos foram realizados diferentes testes ao problema de acionamento dos conjuntos motor-bomba do sistema principal de abastecimento de água da cidade de Campina Grande/PB. Numa primeira análise de desempenho fez-se uso da programação linear (PL), não linear (PNL) e algoritmos genéticos (AG). Numa segunda análise, voltada à apreciação de métodos que gerassem variáveis de decisão inteiras e binárias, utilizou-se da combinação de técnicas de PL e PL Inteira e o seu desempenho foi comparado com uma regra de simulação padrão. Nesta análise observou-se uma economia financeira de 20,27% e uma economia de consumo energético de 16,86%. Na avaliação do autor, quanto à utilização de diferentes modelos, foi verificado que a PL requer o menor tempo de processamento quando comparado a PNL e AG. A PL e PNL são mais eficazes, nesta situação, do que o AG, já que a função objetivo é linear. O AG pode fornecer uma solução próxima a um valor ótimo global, mas requer um alto tempo de processamento.

O artigo de Toledo *et al.* (2008) propõe um modelo de otimização para operação de bombas hidráulicas no abastecimento de água em redes urbanas, visando minimizar o custo de energia elétrica, que varia ao longo do dia. O estudo de caso foi realizado em alguns bairros da cidade de São Carlos/SP, sendo as bombas utilizadas para levar água de poços artesianos a reservatórios distribuídos pelos bairros, de onde a população é atendida por força gravitacional. Foram propostos dois modelos para representar as características do problema. O primeiro é um modelo de otimização inteiro-misto, em que é considerado o custo de partida das bombas hidráulicas, e visa evitar a ligação intermitente. No segundo modelo não são considerados os custos de partida das bombas, portanto, o modelo é linear. As soluções obtidas pelos dois modelos para o estudo de caso foram equivalentes, porém, o modelo inteiro-misto levou a um programa de operação das bombas mais conciso, onde as bombas são ligadas um menor número de vezes, sendo esta solução mais viável na prática. De acordo com os autores, embora o modelo inteiro-misto seja o mais adequado, ele pertence à classe de problemas combinatórios e para casos em que o número de períodos, de bairros e de reservatórios é muito grande, pode-se não conseguir obter a solução ótima do problema em tempo computacional razoável, o que tornaria necessário o desenvolvimento de heurísticas para sua resolução.

Em López-Ibáñez *et al.* (2008) foi proposto o controle ótimo de bombas em redes de distribuição de água, visando reduzir o consumo de energia elétrica. Para isso foi utilizado o algoritmo *Ant Colony Optimization* (ACO) – otimização por colônia de formigas. O trabalho de Maier *et al.* (2003) também utilizou o algoritmo ACO para otimizar projetos de sistemas de distribuição de água. O ACO é um algoritmo evolucionário de otimização combinatória inspirado no comportamento forrageiro das formigas. Muitas espécies de formigas são quase cegas e a comunicação entre elas é feita através de uma substância química denominada feromônio. Ao caminhar, as formigas depositam no chão o feromônio, formando uma trilha de feromônios. As formigas sentem o cheiro da substância e quando elas têm que escolher um caminho, elas optam pelo caminho com maior quantidade de feromônio. A trilha ajuda a formiga a achar o caminho de volta e as outras formigas a encontrar a fonte de alimentos. Portanto, baseado na dinâmica natural da colônia de formigas, o algoritmo ACO utiliza heurística construtiva, ou seja, constrói soluções de forma probabilística utilizando duas informações: a trilha de feromônio que muda dinamicamente durante a execução do programa de modo a refletir a experiência já adquirida durante o espaço de busca; e a informação heurística específica do

problema a ser resolvido. A fim de minimizar os custos energéticos nos sistemas de bombeamento se faz necessário uma programação eficiente para operação ideal das bombas. Diante deste contexto, o artigo de López-Ibáñez *et al.* (2008) apresentou um novo modelo para programação de bombas, onde o número máximo de intervenções e o intervalo de tempo em que a bomba ficará ligada/desligada são controlados e especificados previamente. O modelo proposto foi testado em uma rede de pequeno porte – *rede Van Zyl*, estudada inicialmente por Van Zyl *et al.* (2004) – e em uma rede real de grande porte, *rede Richmond*, que faz parte de uma área do sistema de abastecimento de água de Yorkshire no Reino Unido e que foi estudada inicialmente por Atkinson *et al.* (2000). Os resultados mostraram que o desempenho do modelo proposto com o algoritmo ACO é superior em termos de custo energético, número de intervenções na bomba, e tempo computacional, se comparado a outros modelos que utilizam os algoritmos genéticos.

O trabalho de Salvino (2009), “Método de Dimensionamento e Controle Operacional Otimizado para Redes de Distribuição de Água”, teve como principal objetivo o desenvolvimento de um método de dimensionamento econômico (custo mínimo) e controle operacional em sistemas de distribuição de água, conhecido como LenhsNet. Para o desenvolvimento da metodologia de otimização foi implementado um algoritmo dinâmico iterativo de convergência e controle das variáveis de pressão e velocidade da água no interior das tubulações. Uma vez dimensionada a rede, foi proposto um controle operacional a fim de minimizar as pressões e demandas necessárias para atender a população, sendo seu aumento gradativo ao longo do tempo de projeto, tornando uma modelagem mais real para os dimensionamentos existentes. O programa que é incorporado ao software de simulação hidráulica (EPANET) foi testado com quatro redes, com diversas condições de contorno, e de acordo com Salvino (2009), apresentou desempenho satisfatório.

Segundo Krapivka e Ostfeld (2009), o dimensionamento de sistemas de distribuição de água visando o menor custo da tubulação é um dos problemas mais explorados na área de otimização de redes. Ao longo das últimas quatro décadas duas abordagens principais foram bastante utilizadas: *decomposição*, que é limitada a convergir para soluções ótimas locais, permitindo resultados parciais para os diâmetros dos tubos; e as *otimizações evolutivas*, que são métodos robustos, mas computacionalmente dispendiosos, resultando em soluções com apenas um diâmetro do tubo entre dois nós, entretanto, sem garantir matematicamente a solução ótima. Foi então que os autores

Loganathan *et al.* (1995) propuseram acoplar ambas as abordagens, superando assim as limitações de cada uma. Desta forma, o artigo de Krapivka e Ostfeld (2009) foi uma análise e extensão do trabalho de Loganathan *et al.* (1995). A metodologia baseada no acoplamento do algoritmo genético com a programação linear foi aplicada na rede *Two-Loop*, estudada inicialmente por Alperovits e Shamir (1977), visando à obtenção do menor custo no dimensionamento das tubulações. Os resultados obtidos foram semelhantes aos de Loganathan *et al.* (1995).

O trabalho de Cunha (2009) apresentou um modelo computacional para otimização energética de sistemas de abastecimento em tempo real. Tal modelo é composto por três módulos principais: um módulo de simulação hidráulica, que descreve o comportamento do sistema, através do EPANET; um módulo de previsão de demandas¹⁶, que realiza a previsão das demandas futuras; e um módulo otimizador, cuja implementação utilizou a biblioteca de algoritmos genéticos *Galib*, criada pelo MIT – *Massachusetts Institute of Technology*. O módulo otimizador permite determinar as rotinas operacionais (acionamento de válvulas e bombas) de forma a minimizar o custo de energia elétrica no sistema. O processo de otimização desenvolvido por Cunha (2009) foi dividido em duas rotinas: Nível Estratégico e Tempo Real. A primeira rotina determina o conjunto de controles que minimizam os custos de energia elétrica, respeitando as restrições hidráulicas do sistema. Para cada conjunto de controles têm-se os níveis que os reservatórios irão atingir ao final de cada hora durante o horizonte de planejamento considerado. A segunda rotina inicia-se com o recebimento dos dados sobre as condições atuais do sistema: níveis dos reservatórios e demandas da última hora. A partir das demandas informadas, o segundo módulo, Previsão de Demandas, gera todas as demandas para o horizonte de planejamento. Em seguida o Otimizador em Tempo Real obtém o conjunto de regras operacionais ótimas para o horizonte de planejamento, mas apenas as regras para a hora atual são implementadas. Este processo é repetido a cada hora. Esse modelo foi aplicado a um sistema de abastecimento de água estudado inicialmente por Pedrosa Filho (2006). As estratégias operacionais produzidas pelo modelo proposto indicaram uma redução de custos da ordem de 8,5% em relação aos custos diários de energia elétrica obtidos por Pedrosa Filho (2006) para o mesmo sistema. Portanto, de acordo com a autora, os

¹⁶ O módulo de previsão de demandas para sistemas de abastecimento de água é fruto do trabalho de ODAN, iniciado em 2008 e publicado em definitivo em 2010.

resultados obtidos demonstraram a eficiência do modelo em achar soluções factíveis de serem implementadas e com redução dos custos com energia elétrica.

Em Vinciguera (2009) foi analisado a influência da pressão nas perdas reais de água, e também a influência dessas perdas no consumo de energia elétrica pelo sistema de bombeamento. O trabalho correlacionou os valores de perdas em dois cenários distintos: um sistema real; e o mesmo sistema, mas com pressão mínima de abastecimento através da utilização de válvulas de controle de pressão (VRP) e inversores de frequência. Esses cenários foram simulados através do software EPANET e calibrado através do EPANET Calibrator. Foram sugeridas duas hipóteses para redução de pressão no sistema, sendo a primeira delas somente a regulagem da VRP já existente e a segunda hipótese a colocação de mais uma VRP na saída do reservatório. Concluiu-se que a segunda hipótese foi a mais eficaz, pois conseguiu reduzir as perdas no sistema em 29,40%, o que representa 198,42 m³/dia, enquanto que a primeira reduziu as perdas em apenas 19,90%, o que representa 128,83 m³/dia. Já na parte de eficiência energética, foram analisadas três concepções de abastecimento do sistema, uma com apenas a VRP já instalada e com o uso do reservatório elevado; outra com o uso de duas VRPs e do reservatório; e a terceira com o bombeamento direto na rede com o uso de inversor de frequência. A segunda concepção foi a resultou em maior economia de energia elétrica, apresentando uma economia de 0,81 kW/h comparado com o sistema atual. Portanto, o autor concluiu que a utilização de válvulas redutoras de pressão e conversor de frequência, se bem aplicados, são alternativas eficazes no combate às perdas em sistemas de abastecimento de água, pois representam um investimento inicial relativamente pequeno com uma redução imediata nas perdas físicas do sistema.

O artigo de Cunha e Sousa (2010) propôs o gerenciamento de riscos para projetos otimizados de redes de distribuição de água. De acordo com os autores, nas últimas décadas têm se intensificado os estudos sobre projetos otimizados de sistemas de distribuição de água, entretanto muitos são baseados em condições pré-definidas, podendo direcionar para soluções diferentes da realidade, apesar de ideal para a condição imposta. As situações normais de funcionamento de uma rede podem ser interrompidas por diversos fatores, tais como rupturas das tubulações e/ou reservatórios, falhas técnicas, mudanças da demanda etc. Diante deste contexto, o artigo apresentou um método baseado na *otimização robusta*, que utiliza o conceito de *cenário*, para concepção de uma rede de distribuição de água proativa, que consegue lidar com as incertezas das suas condições de funcionamento. A metodologia proposta utilizou o algoritmo *simulated annealing* – recozimento simulado

(CUNHA e SOUSA, 1999) – e um simulador hidráulico para resolver as restrições hidráulicas do problema. O método foi aplicado à rede *Anytown*, estudada inicialmente por Walski *et al.* (1987). De acordo com os resultados, o método foi capaz de proporcionar a análise e gestão de risco na fase de projeto, embora seja de competência do projetista tomar a decisão de eliminar as vulnerabilidades do sistema, mesmo que isto implique em aumento dos custos do projeto.

Em Nardo e Natale (2010) foi abordada a técnica *Water District Metering* (WDM) – Medição Setorizada de Água – que consiste em particionar a rede de distribuição de água em subsistemas hidráulicamente independentes, chamados de *District Meter Areas* (DMA) – Áreas de Medição Setorizada. De acordo com os autores, a técnica WDM é baseada nos princípios da teoria dos grafos, sendo eficiente para detecção de perdas de água e gestão de pressão. A metodologia proposta permite escolher a posição de medidores de vazão e de válvulas de controle necessárias para definir as áreas de medição setorizadas. Foram realizados dois estudos de casos utilizando as redes Villaricca e Parete. Os resultados permitiram a obtenção de bons layouts de DMA, compatíveis com o nível e a confiabilidade dos serviços das redes de distribuição de água. Portanto, essa metodologia de apoio à decisão forneceu uma técnica válida para concessionárias de água superando abordagens empíricas, sendo uma ferramenta flexível e aplicável a outras redes de qualquer tamanho.

Em Prasad (2010) foi desenvolvido um método para projeto de redes de distribuição de água considerando vários elementos, tais como tubos, bombas e reservatórios. Para resolver o modelo proposto utilizou-se o algoritmo genético com a seleção dos melhores cromossomos do tipo Estado Estacionário. O trabalho propõe uma nova abordagem para dimensionamento de reservatório, que não necessita de algumas limitações operacionais, tais como os limites dos níveis mínimo e máximo do reservatório. O objetivo é minimizar o custo total, que inclui o custo de investimento e custo de energia. Para demonstrar a eficácia do modelo, foi realizado um exemplo com uma rede de distribuição de água conhecida como *Anytown* (WALSKI *et al.*, 1987). De acordo com o autor, os resultados obtidos foram mais econômicos e ao compará-los com os publicados por outros pesquisadores verificou-se a vantagem de utilizar este modelo para obtenção de soluções ótimas.

O artigo de Mohan e Babu (2010) demonstrou a aplicabilidade do algoritmo *Honey-Bee Mating Optimization* (HBMO) – otimização baseada no acasalamento de

abelhas – para redes de distribuição de água. A ideia inicial para utilização deste algoritmo na otimização dos recursos hídricos foi proposta por Haddad *et al.* (2006). O algoritmo evolucionário HBMO foi inspirado nos mecanismos de tomada de decisão coletiva por sociedades de insetos, neste caso, as colônias de abelhas. O HBMO procura simular o comportamento biológico de acasalamento de abelhas. Uma colônia de abelhas é composta de uma estrutura física (colmeia), uma abelha rainha, uma média de dez zangões (pais da colmeia) e várias abelhas operárias. O processo reprodutivo das abelhas consiste no cruzamento da rainha com os zangões, e se dá por meio de uma dança (o voo de acasalamento). Durante este voo a rainha seleciona os machos que irão cruzar. Uma rainha cruza diversas vezes durante sua vida, já o zangão morre após o cruzamento com a rainha. Dessa forma, exposta à seleção natural, a colmeia evolui de maneira que os seus indivíduos fiquem mais aptos e adaptados ao ambiente. A fim de validar o referido algoritmo, duas redes de distribuição de água foram utilizadas como estudos de casos: a rede *Two-Loop*, estudada inicialmente por Alperovits e Shamir (1977); e a rede *Hanoi*, estudada inicialmente Fujiwara e Khang (1990). Usando o algoritmo HBMO foi possível encontrar a combinação ótima dos diâmetros dos tubos que satisfazem os requisitos das cargas hidráulicas com o menor custo. A partir dos resultados, os autores observaram que o algoritmo proposto identificou a solução ótima com um número relativamente menor de avaliações em comparação com outros consagrados algoritmos de otimização estocástica.

O trabalho de Vasan e Simonovic (2010) utilizou a técnica da *evolução diferencial* para o desenvolvimento de um modelo de otimização de projetos de redes de distribuição de água, cuja função objetivo é a minimização dos custos. A *evolução diferencial* procura por melhores soluções para problemas complexos de diversas áreas, utilizando-se procedimentos de seleção, baseados na aptidão dos indivíduos, e operadores de cruzamento e mutação. Esse artigo descreveu o modelo de otimização computacional, nomeado *Differential Evolution Network* (DENET), sendo o mesmo associado ao EPANET para execução das simulações hidráulicas. O modelo foi aplicado em duas redes que são referências na área de otimização: rede Nova Iorque e *Hanoi*. De acordo com os autores, o modelo proposto produziu resultados promissores quando comparados a estudos anteriores, demonstrando que o DENET pode ser considerado uma ferramenta alternativa para o planejamento econômico e gestão confiável de redes de distribuição de água.

O trabalho de Morais *et al.* (2010) buscou a melhor eficiência no controle operacional dos sistemas de abastecimento de água, a fim de reduzir as perdas. Para isso,

foi utilizado um modelo multicritério de suporte à decisão baseado no método *Preference Ranking Organization Method for Envrichment Evaluation* (PROMETHEE I). Esse método emprega a Matriz de Avaliações, que consiste na avaliação de um conjunto de alternativas, levando em consideração critérios de avaliação. Para aplicação do modelo proposto foi utilizada uma pequena rede real que possui altos índices de perdas. Inicialmente foram levados em consideração alguns aspectos característicos dessa rede, tais quais: volumes entregues e micromedidos; informações sobre vida útil dos equipamentos; informações sobre o nível de automação do sistema; levantamento das pressões e diâmetros dos tubos; identificação da setorização do sistema; área de influência (uso doméstico, comercial ou industrial), dentre outros. Em seguida a rede de distribuição foi dividida em trechos de acordo com suas características. Os trechos foram priorizados, a fim de que ações específicas para a minimização das perdas fossem utilizadas em função de quão crítico fosse o trecho, sob o ponto de vista de todos os critérios e das preferências estabelecidas. Os resultados apontaram para execução prioritária de ações de conservação e manutenção preventiva para duas áreas, identificadas no trabalho como áreas 1 e 4, pois elas foram apontadas como sendo as mais críticas e que sofreriam um maior impacto negativo em termos de perdas quanto a vazamentos.

O artigo de Costa *et al.* (2010) e a tese de Costa (2010a) apresentaram um modelo computacional de apoio à tomada de decisão com vistas à minimização dos gastos com energia elétrica. Eles desenvolveram um algoritmo genético híbrido (AGH) e utilizaram o simulador hidráulico EPANET visando determinar as melhores estratégias de operações dos sistemas de abastecimento de água. O objetivo principal do modelo proposto foi encontrar o status de funcionamento de bombas que resulte no menor custo energético possível no horizonte operacional. A função objetivo representa o custo da energia consumida pelas N bombas durante os T intervalos de tempo em que o horizonte de planejamento diário foi subdividido. A análise do modelo foi feita em um estudo de caso real localizado na cidade de Ourém, Portugal. O modelo AGH-EPANET convergiu cinco vezes mais rápido quando comparado ao algoritmo genético simples, AGS-EPANET. Segundo os autores, quanto mais complexa a rede, mais vantajosa será a utilização do modelo proposto, pois ele reduz consideravelmente o tempo computacional em comparação com outros modelos utilizados na literatura.

Em Costa (2010b) foi desenvolvido uma rotina computacional, utilizando a linguagem programação Avenue, que realiza, de forma automatizada, diversas simulações

de implementação de diâmetros, analisando suas perdas de carga e a pressão resultante nos nós, a fim de contribuir para uma rede de abastecimento de água otimizada. Essa rotina foi baseada numa adaptação do método de otimização de Granados (GRANADOS, 1990), dentro do software de geoprocessamento ArcView GIS, integrado ao EPANET por meio do software DC Water. Foram utilizadas duas redes para os testes da aplicação. A primeira foi a rede teórica, Dois Anéis (*Two-Loop*), e a segunda foi a rede real do bairro do Bessa, localizada na cidade de João Pessoa/Paraíba. De acordo com o autor, embora a metodologia aplicada não tenha produzido a rede mais econômica, ela produziu uma rede econômica, e os resultados obtidos permitiram uma análise detalhada das redes, facilitando a tomada de decisões e dando uma visão transparente da situação do projeto.

O trabalho desenvolvido por Pena (2010) analisou a viabilidade técnica, econômica e financeira de um programa de controle e redução de perdas no sistema de distribuição de água de um município do Rio de Janeiro. Para isso, realizou-se a simulação de seis cenários hipotéticos de eficiência na redução de perdas, e na identificação de tempo de retorno do investimento (*payback*). No estudo foram aplicadas as premissas da metodologia da *International Water Association* (IWA), com ações e intervenções ao longo de um período de cinco anos. Os seis cenários contemplaram valores recuperáveis em volumes de reduções de perdas, reais e aparentes, de 20%, 30%, 40%, 50%, 60% e 70%, respectivamente. Tomando como exemplo o Cenário 04, o estudo detectou que 50% das perdas reais e aparentes são recuperáveis, indicando uma economia anual de R\$ 32.652.549,00. E de acordo com o autor, o estudo sugere que os investimentos para a metodologia proposta venham a ser pagos com a economia proveniente da redução do desperdício da água. Desta forma, o *payback* anual do Cenário 04 foi de 4 meses no primeiro e segundo anos e de 3 meses no terceiro, quarto e quinto anos.

O trabalho de Melato (2010) propôs o diagnóstico e ações para redução de perdas de água, auxiliando na determinação do perfil das perdas, permitindo uma melhor priorização das ações de combate e redução de perdas reais/físicas e perdas aparentes/comerciais. A metodologia consistiu na avaliação das perdas através do balanço hídrico, utilizando o *software* gratuito desenvolvido pelo Banco Mundial (*W-B Easy Calc*). Como estudo de caso, a metodologia foi aplicada em três setores de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Foram levantados os dados de controle do sistema e realizados ensaios de campo, com medições de pressão e ensaios para

determinação das perdas aparentes. Os resultados apontaram para estratégias específicas para a redução de perdas em cada setor estudado.

A tese desenvolvida por Fonseca (2011) emprega a técnica de setorização, onde a mesma consiste na separação do sistema de abastecimento hídrico urbano em distritos denominados zonas pitométricas, com o objetivo geral de estabelecer um controle mais efetivo das pressões e das vazões de água nessas zonas. Para isso foi realizado um estudo de caso nas dependências da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Por meio deste estudo foram apresentadas soluções orientadas à utilização de recursos do protocolo digital *Foundation Fieldbus*, visando agregar mais autonomia e disponibilidade às instalações do sistema de abastecimento hídrico da superintendência do litoral da SABESP, e incorporando a este sistema características diferenciais como interoperabilidade, flexibilidade e redundância dos elementos críticos que o compõem.

O trabalho de Furusawa (2011) propôs o dimensionamento otimizado de redes pressurizadas de distribuição de água para áreas de topografia relativamente plana. Por meio da metodologia desenvolvida nesse trabalho obtiveram-se soluções de custo mínimo global, ou seja, a soma dos custos de implantação e de operação foi o menor entre todas as soluções. As equações da perda de carga nas tubulações e as vazões nos nós foram solucionadas através da programação não linear, com emprego de métodos matriciais. Os resultados obtidos mostraram-se viáveis e demonstraram que as principais variáveis em relação ao custo referencial unitário foram o custo da pressurização inicial, custo da tubulação, além do custo de remoção e recomposição de viário em pavimento asfáltico.

No trabalho de Giustolisi *et al.* (2011) foi desenvolvido um método, computacionalmente eficiente, para análise de redes de distribuição de água de grandes dimensões. Como as aplicações de análise da rede exigem a execução de inúmeras simulações hidráulicas, tornou-se necessário o desenvolvimento de um método que fosse capaz de reduzir a carga computacional da análise da rede, sem perder a precisão do modelo hidráulico. De acordo com os autores, atualmente é viável a análise de redes extensas, tendo em vista o amplo poder computacional e metodologias eficientes, como o *Global Gradient Algorithm* (GGA) – algoritmo do gradiente global. Partindo dessas considerações, esse artigo apresentou uma abordagem para converter o GGA clássico, que é implementado dentro do software EPANET, no *Enhanced Global Gradient Algorithm* (EGGA) – algoritmo do gradiente global reforçado. A metodologia do EGGA consiste em reduzir o tamanho do problema matemático por meio da simplificação topológica da rede

original. Os nós e seções dos tubos dispostos em série são removidos, mas as equações de conservação de massa e energia desses elementos são preservadas. A eficácia do EGGA foi comprovada em quatro redes reais: *Apulian_2*, *Exnet*, *BWSN* e *Town_C*. De acordo com os autores, quanto maior o tamanho da rede e/ou número de ligações, maior foi a eficiência computacional obtida pelo EGGA, sem prejudicar a precisão da análise hidráulica da rede. Dentre as quatro redes testadas, a carga computacional do EGGA foi inferior, aproximadamente 10%, em comparação com o GGA.

O trabalho intitulado “*Heuristic based pipe dimensioning model for water distribution networks*” (SURIBABU, 2012) – Modelo de dimensionamento de tubo baseado na heurística para redes de distribuição de água – propõe uma nova abordagem para dimensionamento de tubos com custo mínimo, utilizando um algoritmo de busca estocástica. A eficácia do algoritmo depende de diversos fatores como tamanho da população, grau de aleatoriedade envolvida, função de penalidade, operadores e tamanho do espaço de busca. Segundo o autor, não foi necessário um grande número de interações para chegar à combinação de menor custo dos diâmetros dos tubos, por isso este modelo é considerado promissor para projeto ótimo de redes de distribuição de água, embora não garanta a solução ótima global. A metodologia do trabalho considera uma propriedade hidráulica inerente da tubulação, que é a velocidade do fluido, para escolha do tubo e fornecimento da solução de menor custo do dimensionamento. A fim de demonstrar a aplicabilidade do modelo, foram realizados os dimensionamentos de três redes de referência (*Two-Loop*, *Hanoi* e *Two-Source*). Os resultados obtidos revelaram dimensionamentos mais econômicos com um esforço computacional mínimo.

O trabalho de Jun e Guoping (2012) apresentou uma metodologia para análise da pressão deficiente em rede de distribuição de água. As simulações tradicionais de distribuição de água, que são referidas como *demand-driven analysis* (DDA) - análise orientada pela demanda - são normalmente realizadas sob o pressuposto de que as demandas nos nós são conhecidas e satisfeitas, isto é, o DDA é válido em condições normais da rede e na exigência do projeto. Entretanto, em muitas situações, tais como estouro da tubulação ou interrupção da bomba, as vazões nos nós afetados por baixas pressões diminuem. Portanto, o objetivo desse trabalho foi analisar e simular, de forma mais realista, o desempenho de uma rede deficiente, verificando o volume orientado por demanda, a pressão dependente da demanda e os vazamentos. Para isso, foi desenvolvido um módulo associado ao EPANET, chamado EPANET MNO, onde foram aplicados três

exemplos: uma rede ramificada simples; uma rede malhada com dois reservatórios; e uma rede real. De acordo com os autores, o EPANET MNO demonstrou um bom desempenho e convergência na simulação de redes deficientes, sendo feitas comparações entre os desempenhos da pressão dependente da demanda com a pressão necessária e pressão mínima designada.

O artigo de Giacomello *et al.* (2012) apresentou um método híbrido de otimização para operação eficiente de bombas em sistemas de distribuição de água. Como o preço da energia elétrica vem crescendo significativamente nos últimos anos, o bombeamento d'água representa a maior parcela dos custos operacionais. A fim de reduzir os custos energéticos, o problema da programação/operação de bombas é resolvido por Giacomello *et al.* (2012) por meio de um novo método de otimização híbrida, LPG, que faz uso da programação linear (PL) e do algoritmo de otimização guloso. A nova metodologia foi aplicada em dois estudos de casos, o primeiro utilizou a rede hipotética *Anytown* (WALSKI *et al.*, 1987), e o segundo utilizou a rede real Richmond - do Reino Unido. Os resultados obtidos pelo método LPG demonstraram que ele foi capaz de resolver, em tempo real, as aplicações envolvendo a programação/operação de bombas, de uma maneira computacionalmente eficiente e preservando a precisão da solução ótima.

De acordo com Kang e Lansey (2012), os projetistas de sistemas de distribuição de água precisam saber como enfrentar as incertezas que surgem nos projetos, como por exemplo, as mudanças na demanda, que ocorrem pelo crescimento populacional (temporal e espacial), uso per-capita da água, percepções públicas, regulamentos vigentes etc. Para minimizar as incertezas, os autores constataram que a utilização de *cenários* é uma forma poderosa e intuitiva de representar essas incertezas na fase de planejamento. Desta forma, esse trabalho propôs um modelo de otimização robusta multi-objetivo baseado em *cenário* para projeto ótimo de infraestrutura de água e esgoto. Os modelos de cenário compõem um repositório de conhecimento reutilizável por gerentes de projeto, que podem utilizar os cenários para determinar o impacto de suas incertezas sobre seus projetos. Essa metodologia foi aplicada no planejamento sustentável de um sistema descentralizado de abastecimento e reuso de água de uma área da região metropolitana de Tucson (EUA). Foram gerados cinco cenários e as incertezas consideradas foram as demandas de água potável e recuperada do sistema. Os resultados da otimização mostraram que a descentralização no reaproveitamento d'água foi rentável em todos os cenários, uma vez

que eliminou o longo transporte da água de reuso à instalação central, proporcionando economias no custo energético do bombeamento e na construção das tubulações.

Dentre os trabalhos abordados nesta seção, dois deles serviram como base para o desenvolvimento desta tese, haja vista que eles consideram em suas metodologias de cálculo a maioria dos fatores que influem no dimensionamento das redes. Os trabalhos inspiradores foram o de Formiga (1999) e Salvino (2009). Ambos os modelos se destacam dos demais, tanto pela quantidade de variáveis admitidas em seus cálculos, quanto pela correta solução obtida nos dimensionamentos.

Ao comparar o dimensionamento de várias redes modelos utilizado o método PNL2000 (FORMIGA, 1999) e LenhsNet (SALVINO, 2009), verificou-se que o método LenhsNet foi mais eficiente hidráulica e economicamente em relação ao PNL2000, além de ser um método automatizado e que dispõe de uma interface gráfica prática e de fácil utilização. Assim sendo, esse estudo comparativo mostrou que o método LenhsNet apresentou-se de forma mais adequada para dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água, e por isso foi selecionado como objeto de estudo e aprimoramento.

A presente tese se diferencia dos trabalhos encontrados na literatura, em especial dos trabalhos apresentados nesta seção 2.10, visto que o modelo de dimensionamento otimizado proposto considera as redes abastecidas por múltiplas fontes de impulsão, e não apenas as redes abastecidas por uma única fonte de impulsão. Deste modo, este modelo acrescenta mais uma característica que influencia no dimensionamento de redes, os bombeamentos secundários, e assim fornece projetos de dimensionamentos mais adaptados à realidade, com ênfase na operação eficiente, assentada nos três pilares: econômico, hidráulico e energético.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA DO TRABALHO

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve a metodologia do trabalho, proveniente da implementação de um novo algoritmo iterativo e dinâmico de dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água, onde o mesmo deu origem ao programa *Toolkit de Dimensionamento Otimizado* (TDO). O capítulo prossegue com a apresentação detalhada do programa TDO, que foi implementado utilizando o *EPANET Programmer's Toolkit* – Conjunto de Ferramentas do Programador EPANET (ROSSMAN, 1999, 2008). Os fluxogramas do algoritmo também são comentados neste capítulo.

Neste trabalho é proposta a pressurização setorizada, por meio da inclusão de *boosters*, em pontos estratégicos da rede de distribuição, com o propósito de reduzir a pressurização inicial, na origem da rede. Diante deste contexto, são apresentados dois cenários de funcionamento de redes de distribuição de água que sintetizam a problemática abordada nesta tese.

A Figura 3.1 ilustra o primeiro cenário, que consiste de uma rede de distribuição de água abastecida por um único bombeamento, isto é, o sistema principal de impulsão na origem. Nesta abordagem, não há setorização na rede, por isso se faz necessário uma elevada altura manométrica do bombeamento na origem, para que a água chegue com pressão requerida em todos os pontos de consumo, até o mais desfavorável. Neste tipo de configuração de rede, as áreas próximas à cabeceira, ou seja, próximas ao bombeamento na origem, ficarão com pressões excessivas, o que poderá proporcionar vazamentos, conseqüentemente perdas de água e energia.

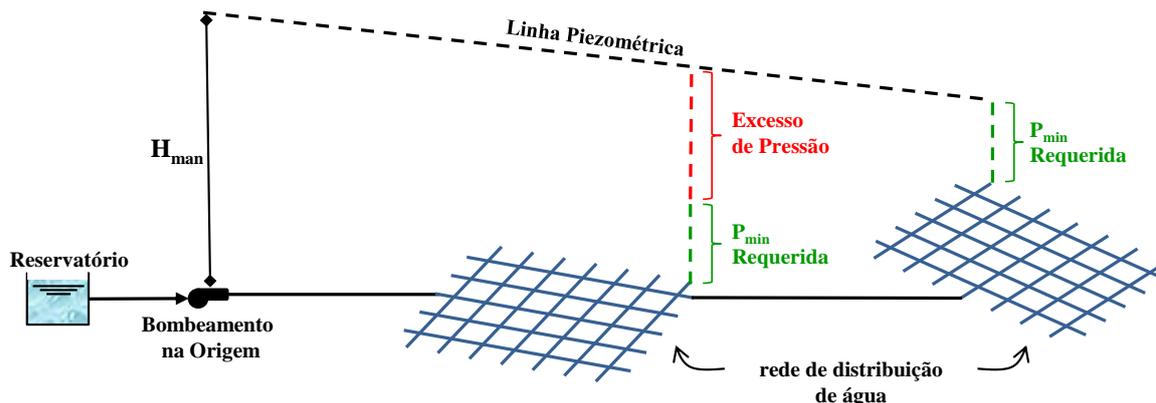


Figura 3.1 - Cenário 1: rede de distribuição apenas com bombeamento na origem

A Figura 3.2 ilustra o segundo cenário, que consiste de uma rede de distribuição de água abastecida por múltiplos bombeamentos, neste caso, o bombeamento do sistema principal de impulsão na origem e um *booster* a montante do setor 2. Nesta abordagem a rede encontra-se setorizada (setor 1 e 2), por isso não há necessidade de uma elevada altura manométrica do bombeamento na origem, haja vista que só será necessário pressurizar água para o setor 1. A altura manométrica do cenário 2 é menor que no cenário 1, com isso o custo de operação (custo energético) do bombeamento na origem também será menor no cenário 2. Com a setorização por meio da inclusão do *booster*, o excesso de pressão no setor 1 é eliminado, minimizando o surgimento de vazamentos. Entretanto, fez-se necessário a inclusão de mais um bombeamento (o *booster*) para que a água seja pressurizada adequadamente para o setor 2, o que implica, teoricamente, em aumento do custo energético da rede do cenário 2.

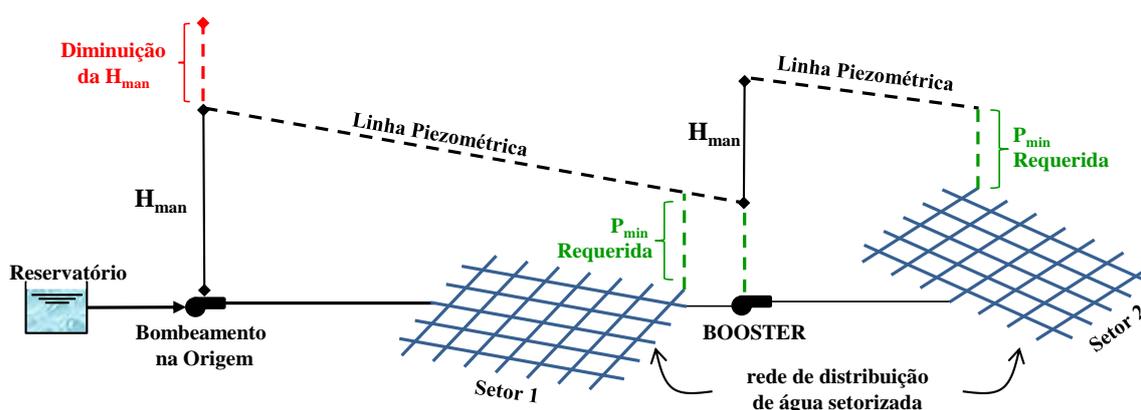


Figura 3.2 - Cenário 2: rede de distribuição de água com múltiplos bombeamentos

Diante dos dois cenários apresentados acima (Figura 3.1 e Figura 3.2), este trabalho tem como característica principal realizar o dimensionamento otimizado de redes pressurizadas de distribuição de água abastecidas por um único bombeamento e redes

abastecidas por múltiplos bombeamentos, a fim de comparar em qual das situações a rede obteve a melhor eficiência energética, hidráulica e econômica. O foco do trabalho é na minimização dos custos de operação, sendo estes, predominantemente, relacionados aos custos energéticos, além da uniformização das pressões em todos os pontos da rede.

A metodologia do modelo de dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água proposto considera o bombeamento primário e os bombeamentos secundários para o cálculo do custo energético. O bombeamento primário representa o sistema principal de impulsão na origem da rede, já os bombeamentos secundários representam os *boosters* dispostos pela rede. A contribuição deste trabalho consiste em acrescentar os bombeamentos secundários na fase de projeto, e assim, apresentar o dimensionamento e o custo total do sistema de forma conjunta.

O novo programa de dimensionamento otimizado que foi implementado neste trabalho, nomeado *Toolkit de Dimensionamento Otimizado (TDO)*, é uma extensão e aprimoramento do programa LenhsNet, dispondo de mais variáveis e proporcionando novos recursos, o que torna o dimensionamento de redes mais amplo, conforme será visto nos estudos de casos apresentados na seção 4.3 do Capítulo 4.

Em síntese, a metodologia de dimensionamento do programa LenhsNet dispõe de duas opções para configuração da cota piezométrica na origem: fixa ou variável. Na primeira opção (cota piezométrica fixa) não há bombeamento na rede. Já na segunda opção (cota piezométrica variável) a rede é abastecida por uma única fonte de impulsão, representada pelo bombeamento na origem. A metodologia completa do LenhsNet encontra-se publicada em Gomes *et al.* (2009b) e Gomes (2009).

O programa TDO, além de considerar as duas opções do LenhsNet para cota piezométrica na origem, também executa o dimensionamento das redes abastecidas por múltiplas fontes de impulsão, representados pelos bombeamentos na origem e secundários (*boosters*). O dimensionamento de redes com múltiplas fontes de impulsão torna o resultado aplicável na prática, tendo em vista que esses tipos de redes representam o funcionamento das grandes redes reais. Os sistemas a serem dimensionados pelo TDO podem ser formados por redes malhadas, ramificadas ou expansões de redes preexistentes.

No caso de redes de distribuição de água que não dispõem de bombeamentos, ou seja, redes que não possuem estações elevatórias, o programa TDO dimensionará apenas os diâmetros das tubulações dos trechos. Nesta opção de dimensionamento não há custo de operação (custo energético dos bombeamentos), existe apenas o custo de implantação das

tubulações. Esta é a forma mais simples de dimensionar uma rede, embora o resultado não seja ideal para ser aplicado na prática, haja vista que as redes reais de distribuições de água possuem, normalmente, múltiplas fontes de impulsão.

No caso de redes de distribuição de água que dispõem de bombeamentos, o programa TDO dimensionará todos os diâmetros das tubulações dos trechos e encontrará a altura manométrica ótima do bombeamento na origem, e caso existam os bombeamentos secundários (*boosters*), o programa também encontrará as cargas hidráulicas (alturas manométricas) ótimas dos *boosters* dispersos pela rede. Nesta forma de dimensionamento o custo total é o custo de implantação das tubulações acrescido de dois custos energéticos. Sendo o primeiro correspondente ao custo energético do bombeamento primário (sistema principal de impulsão), e o segundo correspondente ao custo energético do(s) bombeamento(s) secundário(s). Esta é a forma mais completa de dimensionar uma rede, sendo ideal para ser aplicado na prática, pois o resultado do dimensionamento considera as redes de distribuições de água com múltiplas fontes de impulsão, sendo esta a configuração das redes reais.

Um aspecto bastante positivo do programa TDO consiste no fato dele ser desacoplado e independente do simulador hidráulico EPANET (ROSSMAN, 2000), dispondo de uma interface gráfica de fácil utilização. Ao contrário do LenhsNet, o programa TDO pode ser executado em qualquer computador, mesmo que o EPANET não esteja em execução ou instalado no computador. Outro aspecto importante do TDO é a rápida velocidade de processamento e resposta, haja vista que as redes foram dimensionadas em poucos segundos.

A metodologia do TDO leva em consideração a otimização energética e a minimização do custo total do sistema. Desta forma, o trabalho propõe projetos adaptados à realidade, com pressões melhores distribuídas e uma melhor operação das redes de distribuição, com a diminuição das perdas de água e de energia.

3.2 ALGORITMO DO TOOLKIT DE DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO (TDO)

O método de otimização utilizado na implementação do algoritmo que deu origem ao programa *Toolkit de Dimensionamento Otimizado* (TDO) foi Programação Dinâmica (PD). Este tipo de programação utiliza funções recursivas para o armazenamento dos resultados anteriores, evitando cálculos repetitivos, e melhorando o desempenho e

execução do programa. A PD, que mesmo não garantindo a solução ótima global, favoreceu o rápido processamento das iterações, apresentando uma solução ótima de custo mínimo.

Existem alguns modelos de dimensionamento de redes de distribuição de água publicados na literatura, conforme discutidos na seção 2.10 (O Estado da Arte em Otimização), contudo não foi encontrado um modelo que contemplasse concomitantemente o bombeamento primário e os bombeamentos secundários para o cálculo do custo energético. Tendo em vista suprir esta lacuna, a proposta deste trabalho se baseia justamente em considerar todos os bombeamentos no dimensionamento, sejam eles primário e/ou secundários, e assim apresentar o custo total do sistema de forma conjunta.

Com intuito de alcançar os objetivos propostos (discutidos nas seções 1.3 e 1.4), a metodologia empregada neste trabalho compreende um novo algoritmo iterativo e dinâmico de otimização de redes de distribuição de água. O algoritmo inicia-se pela condição de contorno, que é a solução inicial, atribuindo a todos os trechos da rede o diâmetro mínimo comercial. As iterações (repetições) subsequentes visam à solução ótima e esta dependerá do gradiente de custo (responsável pela função recursiva do algoritmo) e do gradiente energético, ambos definidos nas seções 3.2.1 e 3.2.2, respectivamente.

A solução final do dimensionamento obtém os diâmetros ótimos de todos os trechos da rede; a altura manométrica ótima de bombeamento do sistema principal de impulsão; as cargas hidráulicas ótimas do(s) *booster(s)*; e os custos otimizados das energias do bombeamento primário e secundário(s). A explicação detalhada de como o algoritmo obtém todos os valores destes parâmetros da solução final, encontra-se na seção 3.2.3. A Figura 3.3 ilustra o fluxograma simplificado do algoritmo do programa TDO.

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.3, as soluções parciais estão diretamente relacionadas ao incremento do gradiente de custo (G_c), este por vez, está diretamente relacionado à relação Custo/Benefício, ilustrada na Figura 3.4. O custo significa o aumento no preço de implantação da tubulação de um determinado trecho em virtude do aumento do diâmetro da tubulação neste mesmo trecho. Enquanto o benefício corresponde à conseqüente diminuição de perda de carga no sistema de abastecimento em virtude da utilização de um diâmetro maior. O algoritmo de otimização busca o custo mínimo do sistema, compreendido pelo custo de implantação das tubulações, acrescido dos custos da energia do bombeamento primário e das energias do(s) bombeamento(s) secundário(s).

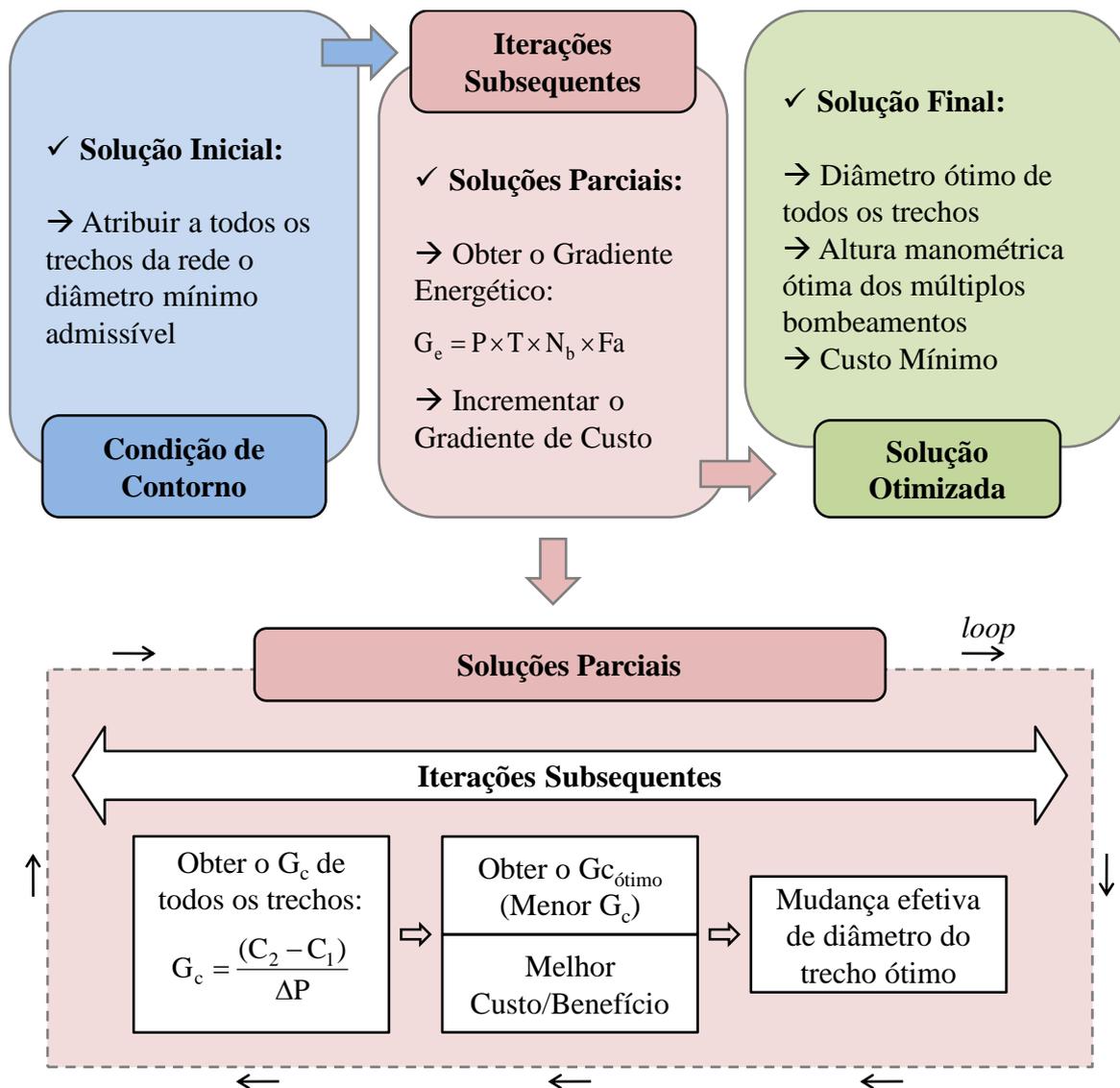


Figura 3.3 - Fluxograma simplificado do algoritmo do programa TDO

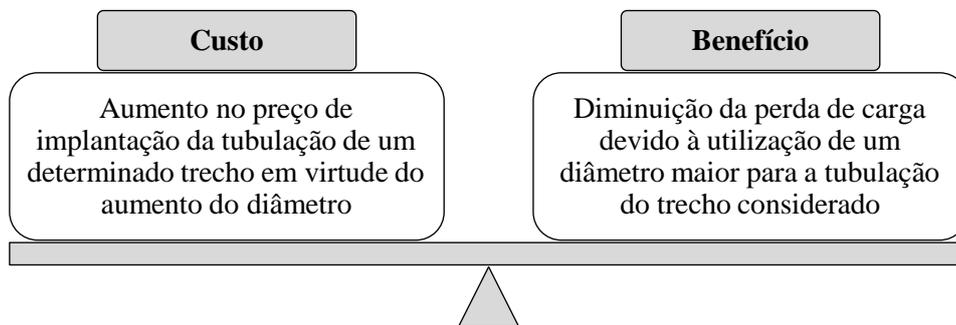


Figura 3.4 - Relação Custo/Benefício do algoritmo de dimensionamento proposto

Em cada iteração do algoritmo todas as tubulações dos trechos da rede são testadas e seus diâmetros são aumentados para seu subsequente. Entretanto, apenas um trecho é selecionado para mudança efetiva de diâmetro, àquele que obteve o menor gradiente de custo, ou seja, o trecho que proporcionou o melhor Custo/Benefício. A

escolha do menor gradiente de custo significa que a rede terá um ganho de pressão no nó mais desfavorável com o menor custo possível de investimento.

A solução ótima está relacionada com a obtenção do menor custo total do sistema, que é composto pelo custo de implantação da rede de tubulações mais os custos energéticos dos múltiplos bombeamentos. Outro aspecto a ser alcançado com a solução final do dimensionamento é a obtenção de pressões mais adequadas, ou seja, próxima da mínima especificada, em todos os pontos da rede. As pressões próximas da mínima requerida pelo projetista implicam na minimização dos vazamentos e das perdas de água e energia elétrica, assim como implica na maximização dos benefícios hidráulicos e energéticos da rede de distribuição e água.

O fluxograma completo do algoritmo de dimensionamento otimizado de redes com múltiplos bombeamentos, que deu origem ao TDO, está esquematizado no APÊNDICE A. Já o fluxograma do algoritmo de dimensionamento otimizado de redes sem bombeamento está esquematizado no APÊNDICE B.

3.2.1 Cálculo do Gradiente de Custo

O gradiente de custo (G_c) é uma adaptação do gradiente de câmbio (C), proposto inicialmente por Granados (1990). O gradiente de câmbio de Granados representa o acréscimo de custo de um determinado trecho, produzido pela mudança de seu diâmetro pelo diâmetro nominal consecutivo superior, relacionado com a diminuição da perda de carga correspondente, define Gomes (1999). A diferença entre os dois é que o gradiente de custo relaciona o custo com o ganho de pressão no nó mais desfavorável (GOMES, 2009, p. 242), enquanto que o gradiente de câmbio relaciona o custo com a diminuição da perda de carga.

Para calcular o gradiente de custo (G_c) é necessário conhecer inicialmente o nó mais desfavorável, isto é, o nó com a menor pressão da rede. Para isso, atribui-se a todos os trechos da rede o diâmetro mínimo admissível da tabela de tubos e executa-se a primeira iteração para identificar o nó mais desfavorável. Nas iterações seguintes é atribuído o diâmetro subsequente a cada trecho e encontrada a nova pressão no nó inicialmente mais desfavorável.

O G_c é apresentado na Equação 3.1 e sua unidade é \$/m, onde \$ é a representação de custo em unidades monetárias (u.m.). O G_c corresponde ao custo da tubulação do trecho com o seu diâmetro imediatamente superior ao atual (C_2), subtraído do custo da tubulação

do trecho com o seu diâmetro atual (C_1), dividido pelo ganho de pressão (ΔP) no nó mais desfavorável, proporcionado pela diminuição da perda de carga, em razão da troca do diâmetro do trecho pelo seu superior. O ΔP de cada trecho corresponde ao valor da pressão no nó mais desfavorável subtraído do valor da pressão neste mesmo nó quando a rede se encontra com o diâmetro superior ocupando o trecho em questão.

$$G_c = \frac{(C_2 - C_1)}{\Delta P} \quad (3.1)$$

Onde:

G_c : gradiente de custo (\$/m);

C_1 : custo da tubulação do trecho com diâmetro original/atual (\$);

C_2 : custo da tubulação do trecho com diâmetro superior ao original/atual (\$);

ΔP : variação de pressão no nó mais desfavorável da iteração (mca).

Em cada iteração serão calculados “n” gradientes de custo, correspondentes às mudanças de diâmetros das tubulações de “n” trechos da rede. O gradiente de custo ótimo ($G_{c\text{ótimo}}$) será o menor entre os G_c calculados (ver Equação 3.2). Por exemplo, em uma rede com dez trechos, serão calculados, em cada iteração, dez G_c , sendo um deles o $G_{c\text{ótimo}}$. O trecho correspondente ao gradiente de custo ótimo ($G_{c\text{ótimo}}$) é chamado de trecho ótimo, ou seja, é o trecho que, de fato, terá sua tubulação substituída pelo seu diâmetro subsequente.

$$G_{c\text{ótimo}} = \text{Menor } G_c \text{ de cada iteração} \quad (3.2)$$

Encontrado o $G_{c\text{ótimo}}$, a rede assumirá uma nova configuração, onde o trecho ótimo passará a ser ocupado pelo diâmetro imediatamente superior ao anterior. Este último estado da rede será a configuração de partida para a iteração seguinte. O número de iterações só é conhecido no final do algoritmo, e este depende da condição de parada, cujo assunto é abordado na seção 3.2.3.

3.2.2 Cálculo do Gradiente Energético

O custo energético do sistema principal de impulsão (na origem da rede) depende da fórmula do gradiente energético (G_e), apresentado na Equação 3.3. O G_e representa o custo anual, atualizado, de pressurização da água, por metro de elevação.

O G_e depende da potência requerida por metro de elevação pelo conjunto motor-bomba (P); da tarifa de energia elétrica (T); do número de horas de bombeamento (N_b) e do fator de atualização (Fa). A fórmula da potência requerida, apresentada na Equação 3.4, depende da vazão requerida (Q) e do rendimento global do conjunto elevatório (η). A fórmula do fator de atualização, apresentada na Equação 3.5, depende da vida útil do projeto (n), da taxa de juros anual (i) e da taxa de aumento anual de energia elétrica (e). A tarifa de energia elétrica (T) e o número de horas de bombeamento (N_b) são dados do projeto.

$$G_{e_origem} = P_{total} \times T \times N_b \times Fa \quad (3.3)$$

Onde:

G_e : gradiente energético atualizado (\$/m);

P_{total} : potência total requerida pelo conjunto elevatório, conforme Equação 3.4;

T : tarifa de energia elétrica (\$/kWh);

N_b : número de horas de bombeamento (h/dia);

Fa : fator de atualização, ou fator de valor presente, conforme Equação 3.5.

$$P_{total} = \frac{9,81 \times Q_{total}}{\eta} \quad (3.4)$$

Onde:

P_{total} : potência total requerida pelo conjunto elevatório, por metro de elevação de água, (kW/m);

Q_{total} : vazão total demandada pelo sistema (m³/s);

η : rendimento esperado do conjunto motor-bomba (%);

$$Fa = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \times \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (3.5)$$

Onde:

Fa : fator de atualização, ou fator de valor presente (adimensional);

i : taxa de juro anual (% a.a.);

e : taxa de aumento anual do custo da energia (% a.a.);

n : vida útil das instalações ou alcance do projeto (ano).

3.2.3 Condições de Parada do Processo Iterativo de Otimização do TDO

O algoritmo do TDO necessita de uma condição de parada para que o processo iterativo de otimização encontre a solução final de custo ótimo. Três configurações de rede que foram contempladas e implementadas nesta tese para que a condição de parada seja satisfeita, conforme ilustra a Figura 3.5. Os itens “a”, “b” e “c”, a seguir, explicam o funcionamento das condições da parada do modelo de dimensionamento otimizado proposto.

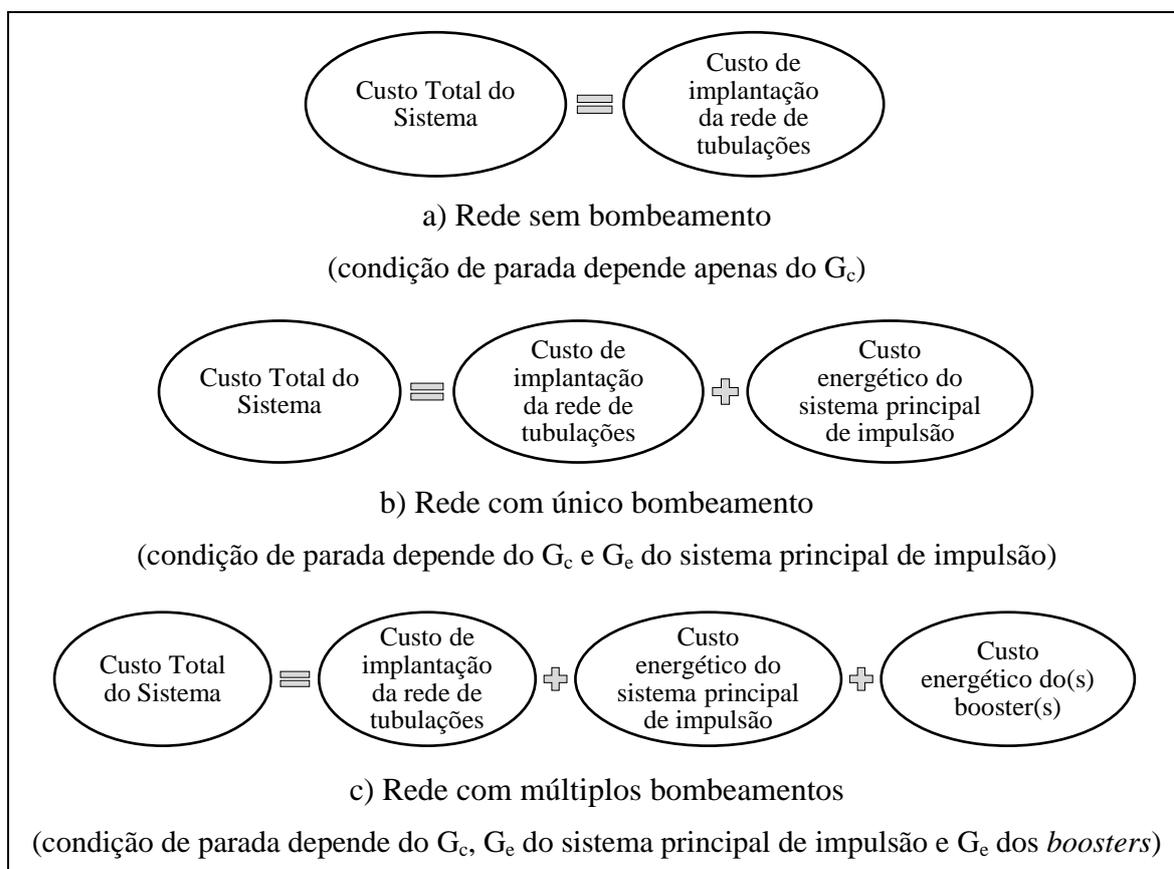


Figura 3.5 - Condições de parada do algoritmo de dimensionamento otimizado

Para o dimensionamento de redes sem bombeamento, as iterações só param quando a pressão mínima da rede supera ou iguala a pressão requerida no projeto. Já para o dimensionamento de redes com bombeamento(s), as iterações só param quando o gradiente de custo (definido na Equação 3.1) supera ou iguala o gradiente energético (definido na Equação 3.3). O processo iterativo de otimização segue a metodologia mencionada acima até atingir a solução final, que será a solução definitiva, de custo mínimo, do sistema de distribuição de água, conforme resume a Figura 3.6.

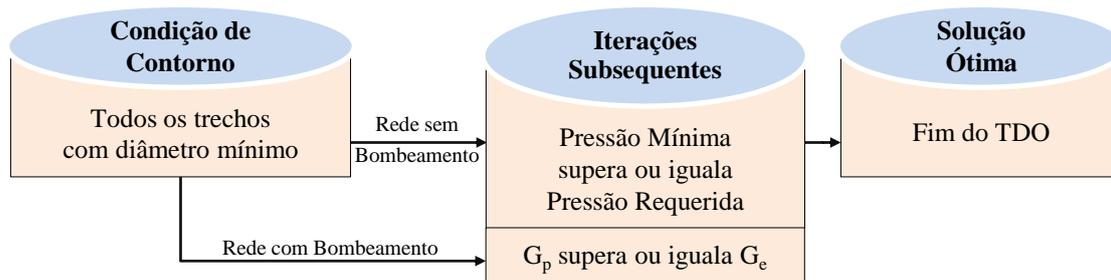


Figura 3.6 - Sequência do algoritmo de dimensionamento proposto

a) Rede sem bombeamento

A primeira configuração consiste em uma rede sem bombeamento, abastecida por gravidade por meio de um reservatório elevado com sua cota piezométrica na origem fixa e conhecida antes do dimensionamento. Neste primeiro caso, como não há bombeamento na rede, não haverá custo energético. Desta forma, o custo total do sistema depende apenas do custo de implantação da rede de tubulações, que é determinado com base nos diâmetros dos trechos da última iteração e cuja fórmula é apresentada pela Equação 3.6.

$$\text{Custo}_i = \sum_{t=1}^n (\text{Custo do diâmetro do trecho}_t \times \text{Comprimento do trecho}_t) \quad (3.6)$$

Onde:

Custo_i: custo de implantação da rede de tubulações, dado em u.m. (\$);

t: representa o trecho da rede;

n: número total de trechos pertencentes à rede.

A condição de parada do processo iterativo de otimização representado pela Figura 3.5(a) só depende do gradiente de custo (Equação 3.1). As iterações subsequentes param de ser executadas quando a pressão mínima da rede for ligeiramente maior que a pressão desejada pelo projetista.

b) Rede com único bombeamento

A segunda configuração consiste em impulsionar a água para a rede de distribuição através do bombeamento primário; conseqüentemente, o custo total do sistema será composto pelo custo da rede de tubulações mais o custo energético do sistema principal de impulsão. Neste segundo caso, a altura manométrica do bombeamento na

origem será uma variável de decisão a mais no processo de otimização, por isso, o programa TDO obtém seu valor automaticamente durante execução do dimensionamento.

A condição de parada do processo iterativo de otimização representado pela Figura 3.5(b) depende de dois gradientes: G_c (Equação 3.1) e G_e do sistema principal de impulsão (Equação 3.3). A cada iteração compara-se o G_e com o $G_{c\text{ótimo}}$ (Equação 3.2), enquanto o G_e for maior que o $G_{c\text{ótimo}}$, as iterações subseqüentes continuam sendo executadas, pois o custo de investimento para aumentar o diâmetro do trecho (e conseqüentemente diminuir as perdas de carga e aumentar a pressão no nó) é mais econômico do que aumentar o custo energético com o aumento da carga na rede (que também aumentaria a pressão no nó, mas seria menos vantajoso). O custo energético reflete-se durante todos os anos de operação da rede, já o custo de investimento é fixo e reflete-se apenas na implantação da rede.

O processo de otimização prossegue aumentando os diâmetros dos trechos até que o valor do $G_{c\text{ótimo}}$ iguale ou supere o valor do G_e . Quando isto ocorrer, o processo iterativo alcança sua condição de parada e a rede encontra-se dimensionada de forma otimizada. Neste ponto do algoritmo, todos os trechos da rede possuem os seus diâmetros ótimos, restando determinar altura manométrica do bombeamento na origem; altura piezométrica do bombeamento na origem; custo de implantação das tubulações; custo energético atualizado; e custo total.

A altura manométrica do bombeamento na origem (H_{man}), corresponde, em módulo, à pressão requerida pelo projetista menos a pressão no nó mais desfavorável (pressão mínima), conforme Equação 3.7. Enquanto que a altura piezométrica do bombeamento na origem (H_{piezo}) é a soma da cota do nível d'água na origem (dado do projeto) com a altura manométrica do bombeamento na origem, conforme Equação 3.8. A H_{piezo} será configurada na rede, como sendo o nível de água do reservatório. Ao elevar o nível do reservatório com o valor da H_{piezo} , a pressão no nó mais desfavorável aumenta, passando a ser o valor determinado no projeto.

$$H_{\text{man}}(\text{mca}) = |P_{\text{requerida}} - P_{\text{mínima}}| \quad (3.7)$$

$$H_{\text{piezo}}(\text{mca}) = \text{Cota do nível d'água na origem} + H_{\text{man}} \quad (3.8)$$

O custo de implantação das tubulações é determinado com base nos diâmetros dos trechos da última iteração, cuja fórmula é dada pela Equação 3.6. O cálculo do custo

energético do bombeamento na origem, dado pela Equação 3.9, é a multiplicação do G_e (Equação 3.3) com a H_{man} (Equação 3.7). O custo total do sistema, dado pela Equação 3.10, é a soma do custo de implantação das tubulações com o custo atualizado da energia do bombeamento na origem.

$$\text{Custo}_{e_origem} (\$) = G_{e_origem} \times H_{man} \quad (3.9)$$

$$\text{Custo}_{total} (\$) = \text{Custo}_i + \text{Custo}_{e_origem} \quad (3.10)$$

c) Rede com múltiplos bombeamentos

A terceira configuração consiste em impulsionar a água para a rede de distribuição através de múltiplos bombeamentos: o bombeamento primário (sistema principal de impulsão) e os bombeamentos secundários (*boosters*). Neste caso, o custo total do sistema, ver Equação 3.11, será composto pelo custo de implantação da rede de tubulações (Equação 3.6) acrescido de dois custos energéticos, o custo energético do sistema principal de impulsão (Equação 3.9) e o custo energético dos *boosters* (Equação 3.12).

$$\text{Custo}_{total} (\$) = \text{Custo}_i + \text{Custo}_{e_origem} + \text{Custo}_{e_booster} \quad (3.11)$$

$$\text{Custo}_{e_booster} = \sum_{b=1}^n \left(G_{e_booster(b)} \times H_{man_{booster(b)}} \right) \quad (3.12)$$

Onde:

$\text{Custo}_{e_booster}$: custo energético dos *boosters*, dado em u.m. (\$);

b : representa o *booster* da rede;

n : número total de *boosters*;

$G_{e_booster}$: gradiente energético do *booster* (\$/m), definido na Equação 3.13;

$H_{man_{booster}}$: altura manométrica do *booster* (ou carga hidráulica do *booster*), definido na Equação 3.15.

A fórmula do gradiente energético do *booster* ($G_{e_booster}$) é similar à fórmula do G_{e_origem} , a única diferença é na potência, que neste caso não utiliza a vazão total (Q_{total}) da rede, e sim a vazão demandada pelo setor a jusante do *booster* (Q_{setor}). A Equação 3.13

apresenta a fórmula do gradiente energético do *booster* e a Equação 3.14 apresenta a fórmula da potência do *booster*.

$$G_{e_booster} = P_{booster} \times T \times N_b \times Fa \quad (3.13)$$

Onde:

$G_{e_booster}$: gradiente energético atualizado do *booster* (\$/m);

$P_{booster}$: potência requerida pelo *booster*, conforme Equação 3.14;

T: tarifa de energia elétrica (\$/kWh);

N_b : número de horas de bombeamento (h/dia);

Fa: fator de atualização, ou fator de valor presente, conforme Equação 3.5.

$$P_{booster} = \frac{9,81 \times Q_{setor}}{\eta} \quad (3.14)$$

Onde:

$P_{booster}$: potência requerida pelo *booster*, por metro de elevação de água, (kW/m);

Q_{setor} : vazão demandada pelo setor a jusante do *booster* (m³/s);

η : rendimento esperado do *booster* (%).

A altura manométrica do *booster*, também chamada de carga hidráulica do *booster*, é a diferença, em módulo, da pressão requerida com a pressão no nó mais desfavorável do setor atendido pelo *booster* (ver Equação 3.15).

$$H_{man_booster} \text{ ou Carga Hidráulica}_{booster} \text{ (mca)} = |P_{requerida} - P_{mínima}|_{setor} \quad (3.15)$$

Mediante os dados da vazão requerida pelo setor atendido (Q_{setor}) e da altura manométrica do *booster* (carga hidráulica do *booster*), tem-se o ponto nominal para traçar a curva característica do *booster*.

Nesta terceira configuração, a altura manométrica do bombeamento na origem e as cargas hidráulicas dos *boosters* serão variáveis de decisão a mais no processo de otimização, por isso elas só serão conhecidas após o dimensionamento. A condição de parada do processo iterativo de otimização representado pela Figura 3.5(c) depende de “n” gradientes: o G_c (Equação 3.1); o G_e do sistema principal de impulsão (Equação 3.3) e os “n” G_e dos bombeamentos secundários. Por exemplo, se uma rede possui 3 *boosters*, então ela dependerá de 5 gradientes: o G_c , o G_e do sistema principal de impulsão e os 3 G_e

dos *boosters*. Enquanto os G_e dos múltiplos bombeamentos forem maiores que o $G_{c\acute{o}timo}$, as iterações subseqüentes continuam sendo executadas. O processo de otimização prossegue aumentando os diâmetros dos trechos até que o valor do $G_{c\acute{o}timo}$ iguale ou supere os valores dos G_e dos múltiplos bombeamentos. Quando isto ocorrer, o processo iterativo alcança sua condição de parada e a rede encontra-se dimensionada de forma otimizada.

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO TOOLKIT DE DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO

O código do programa *Toolkit de Dimensionamento Otimizado* (TDO) foi implementado utilizando o *EPANET Programmer's Toolkit* (ROSSMAN, 2008) e a IDE¹⁷ *Borland Delphi 7.0 Enterprise (Build 8.1)*. Optou-se por utilizar o Delphi em virtude de sua total compatibilidade com o simulador hidráulico EPANET, versão 2.0 (*Build 2.00.12*).

O programa TDO é desacoplado e independente do EPANET (ROSSMAN, 2000), dispondo de uma *interface* gráfica de fácil utilização, podendo ser executado em qualquer computador *Windows*. A seção 3.4 apresenta detalhadamente a *interface* do programa *Toolkit de Dimensionamento Otimizado* (TDO).

O toolkit do EPANET consiste de um conjunto de mais de 50 funções pré-definidas e integradas em uma *Dynamic Link Library* (DLL) – arquivo *epanet2.dll* – para serem utilizadas por programadores no desenvolvimento de novas aplicações, de acordo com as necessidades específicas de cada projeto. Dentre a gama de aplicações possíveis de serem desenvolvidas, utilizando o Toolkit do EPANET, tem-se: dimensionamento, automação, controle, calibração, reabilitação e a otimização de sistemas de abastecimento de água.

O toolkit do programador EPANET está bem documentado em um sistema de *help*, onde o mesmo detalha as funções quanto à sua declaração, descrição, argumentos e retorno, além de apresentar exemplos de programação, facilitando sua utilização pelos programadores. Dentre as funções mais utilizadas na programação do TDO tem-se: abrir arquivo de rede; obter e/ou definir parâmetros dos nós e trechos; executar análise e simulação hidráulica; salvar e/ou usar os arquivos dos resultados da análise hidráulica; e gerar relatório de saída. A listagem de todas as funções disponível no *EPANET Programmer's Toolkit* consta no sistema de *help*, cuja tela inicial é ilustrada na Figura 3.7.

¹⁷ *Integrated Development Environment* (IDE) – *Ambiente Integrado de Desenvolvimento* – que incorpora um compilador e a linguagem de programação Pascal e Object Pascal.

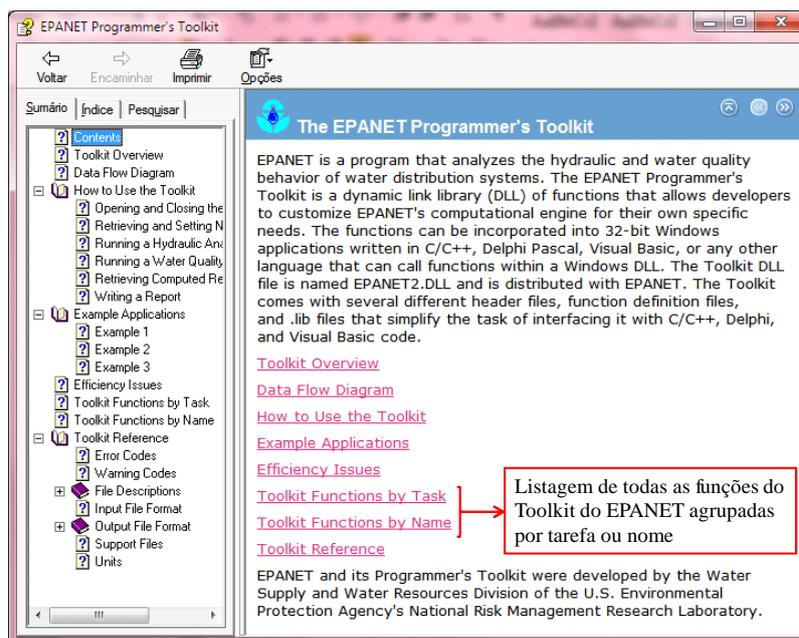


Figura 3.7 - Página inicial do arquivo de ajuda do EPANET Programmer's Toolkit

Na Tabela 3.1 estão indicadas e exemplificadas algumas das funções utilizadas na programação do TDO.

Tabela 3.1 – Exemplo de algumas das funções do Toolkit do EPANET

| Função | Exemplo de utilização no código do programa TDO |
|----------------|--|
| ENopen | ENopen (PChar(OpenDialog_CV.Files[0]), pchar (relatorio.txt'), PChar ('C:\Temp_Toolkit\output.tmp')); |
| ENsetlinkvalue | ENsetlinkvalue(j, EN_DIAMETER, v_trecho[j]); ENsetlinkvalue(j, EN_ROUGHNESS, rugosidade); |
| ENsetnodevalue | ENsetnodevalue(num_reserv, EN_ELEVATION, nivel_agua); |
| ENgetcount | ENgetcount(EN_LINKCOUNT, t); ENgetcount(EN_NODECOUNT, n); |
| ENgetlinkvalue | ENgetlinkvalue(j, EN_DIAMETER, v_trecho[j]); ENgetlinkvalue(j, EN_LENGTH, comprimento); |
| ENgetlinkid | ENgetlinkid(index, v_id); // retorna um char |
| ENgetlinkindex | ENgetlinkindex(v_id, index); // retorna um int |
| ENgetnodevalue | ENgetnodevalue(i, EN_PRESSURE, v_pressao[i]); ENgetnodevalue(num_reserv, EN_ELEVATION, nivel_agua); |
| ENgetnodetype | ENgetnodetype(i, tipo_no); //O tipo do nó pode ser: EN_JUNCTION, EN_RESERVOIR e EN_TANK |
| ENsaveinpfile | ENsaveinpfile('Rede_Dimensionada_Com_Booster.inp'); |

As funções ENset__ servem para alterar os valores dos parâmetros da rede. A parte final da função, indicada por “__”, corresponde ao parâmetro a ser alterado, podendo ser: *control*, *linkvalue*, *nodevalue*, *option*, *pattern*, *patternvalue*, *qualtype*, *report*, *statusreport* e *timeparam*. Já as funções Enget__ servem para obter os valores dos parâmetros da rede. A parte final da função, indicada por “__”, corresponde ao parâmetro a

ser obtido, podendo ser: *control*, *count*, *error*, *flowunits*, *linkid*, *linkindex*, *linknodes*, *linktype*, *linkvalue*, *nodeid*, *nodeindex*, *nodetype*, *nodevalue*, *option*, *patterned*, *patternindex*, *patternlen*, *patternvalue*, *qualtype* e *timeparam*.

A função ENopen é responsável por abrir um arquivo de rede, cuja extensão é “*inp*” (*input file*). A função EnsolveH analisa a rede e executa a simulação hidráulica. A função ENcloseH encerra todo o processo, liberando a memória utilizada nas simulações e cálculos hidráulicos. A função Ensaveinpfile é responsável por gravar todos os dados da rede simulada em um arquivo “*inp*”.

3.4 INTERFACE DO PROGRAMA TDO

Os passos para execução do dimensionamento de redes de distribuição abastecidas por múltiplos bombeamentos estão identificados pelos itens [1 a 8], na interface do programa *Toolkit de Dimensionamento Otimizado* (TDO), conforme ilustra a Figura 3.8.

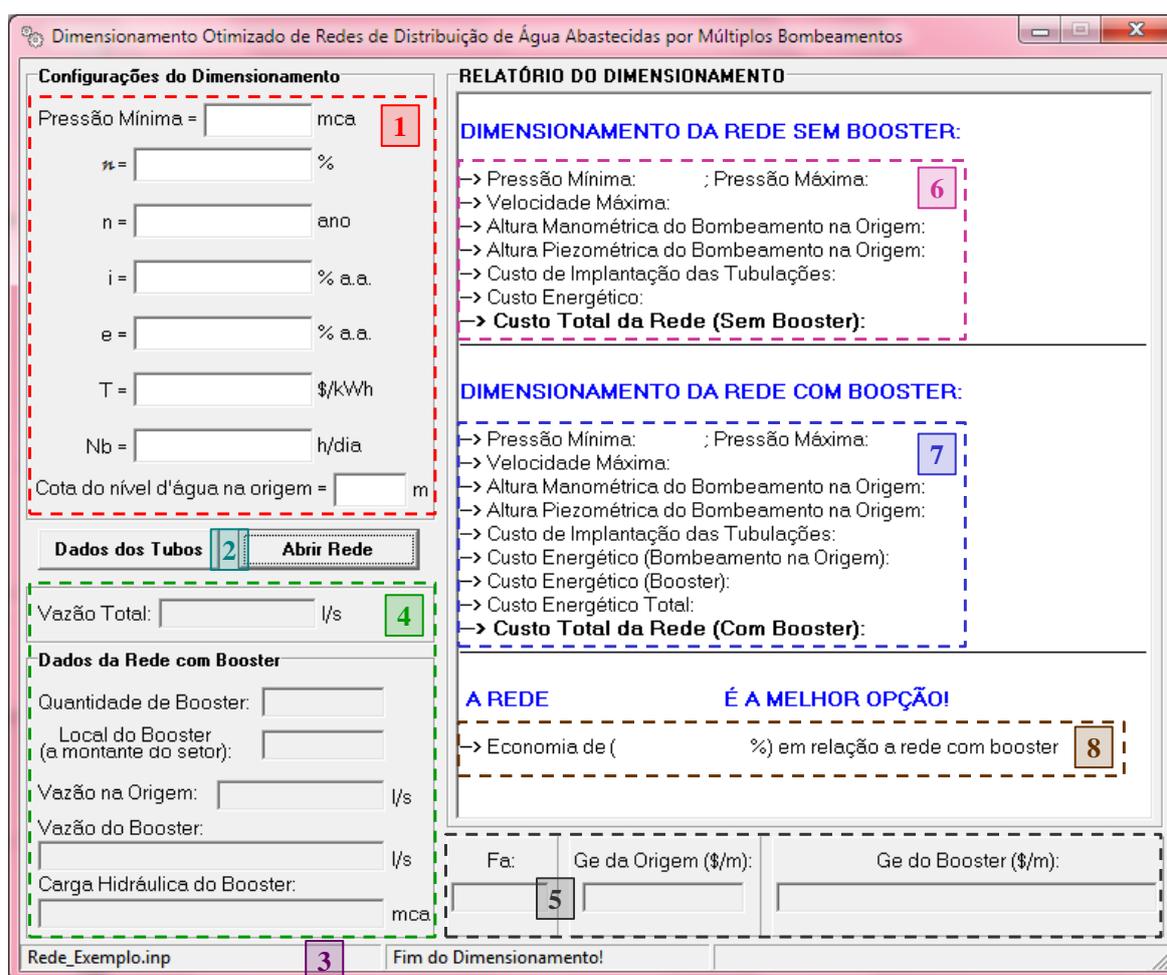


Figura 3.8 - Interface principal do programa TDO

A aplicação do programa TDO inicia-se com o preenchimento das configurações do dimensionamento, dispostas do lado esquerdo da *interface* e identificadas pelo item 1 na Figura 3.8. O primeiro dado a ser atribuído pelo projetista de redes de distribuição de água é a pressão mínima. Esta restrição refere-se ao controle de pressão à que todos os pontos da rede estarão sujeitos ao final do dimensionamento. Em seguida são inseridas as informações para o cálculo do custo energético dos bombeamentos (sistema principal de impulsão e *boosters*). São elas: rendimento esperado do conjunto motor-bomba (%); vida útil, ou alcance, do projeto (anos); taxa de juros anual (% ao ano); taxa de aumento anual da energia elétrica (% ao ano); custo unitário médio da tarifa de energia elétrica (\$/kWh); número de horas diárias de bombeamento (h/dia) e cota do nível d'água na origem (m).

No local identificado pelo item 2 na Figura 3.8, deve-se selecionar os dados dos tubos e o arquivo de rede “*inp*” modelado no EPANET. Na Figura 3.9 estão exemplificadas duas tabelas de tubos, cada uma contendo o conjunto de diâmetros, rugosidades e custos por metro de tubulação, a serem utilizadas pelo programa TDO.

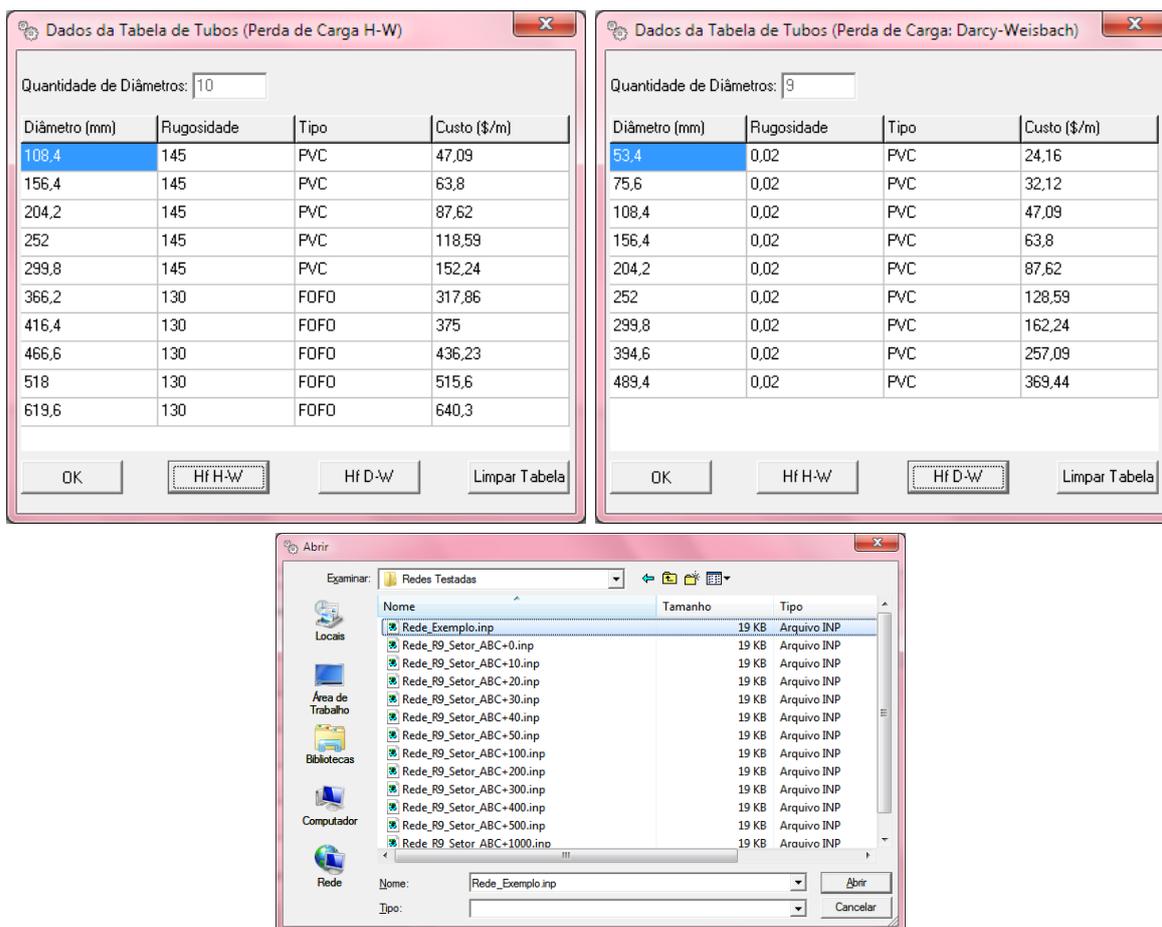


Figura 3.9 - Tabela de tubos e arquivo “*inp*” necessários para o dimensionamento

A barra de *status*, para acompanhamento do dimensionamento do programa TDO, possui três partes (colunas) e está identificada pelo item 3 na Figura 3.8. A primeira coluna é reservada para o nome da rede *inp* a ser dimensionada. A segunda coluna apresenta o status atual do dimensionamento. E a terceira coluna apresenta a barra de progresso/porcentagem do dimensionamento. Na Figura 3.10 estão dois exemplos da barra de status do programa TDO.

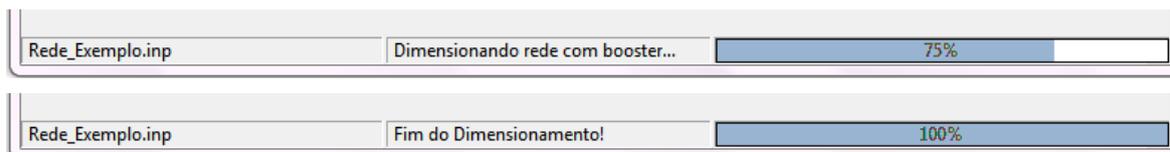


Figura 3.10 - Barra de status do dimensionamento do programa TDO

Após escolha do arquivo de rede “*inp*”, o programa TDO questiona se o usuário pretende inserir um ou mais *boosters* na rede (Figura 3.11).

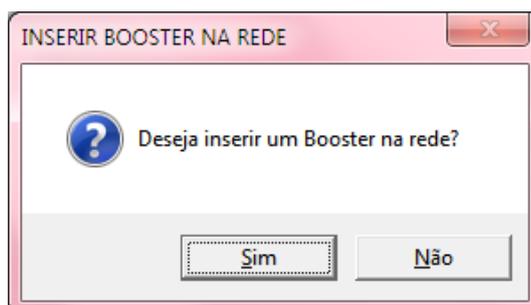


Figura 3.11 - Confirmação de inclusão do booster na rede

Caso não se deseje inserir *booster* na rede, haverá apenas um bombeamento, o sistema principal de impulsão na origem. Esta configuração de rede foi apresentada na seção 3.2.3.b. O programa irá exibir a vazão total da rede (item 4 na Figura 3.8), e em seguida calcular e exibir o F_a (Equação 3.5) e G_e da origem (Equação 3.3), conforme ilustra o item 5 na Figura 3.8. O programa TDO executa automaticamente o dimensionamento, gera o arquivo nomeado “Rede_Dimensionada_Sem_Booster.inp” e apresenta o relatório final do dimensionamento, conforme está identificado pelo item 6 na Figura 3.8.

Porém, caso se deseje inserir *boosters* na rede, uma nova tela é aberta para que seja digitado o trecho e setor onde eles serão inseridos, conforme mostra a Figura 3.12. Este tipo de configuração de rede dispõe de múltiplos bombeamentos e foi apresentada na seção 3.2.3.c. O programa gera um novo arquivo, nomeado “Rede_Com_Booster.inp”, e

em seguida é exibida a vazão total, a quantidade de *boosters*, a vazão na origem, a vazão dos *boosters* e as cargas hidráulicas dos *boosters* (Equação 3.15), conforme ilustra o item 4 na Figura 3.8. Depois é calculado e exibido o F_a (Equação 3.5), G_e da origem (Equação 3.3) e G_e do *boosters* (Equação 3.13), conforme mostra o item 5 na Figura 3.8.

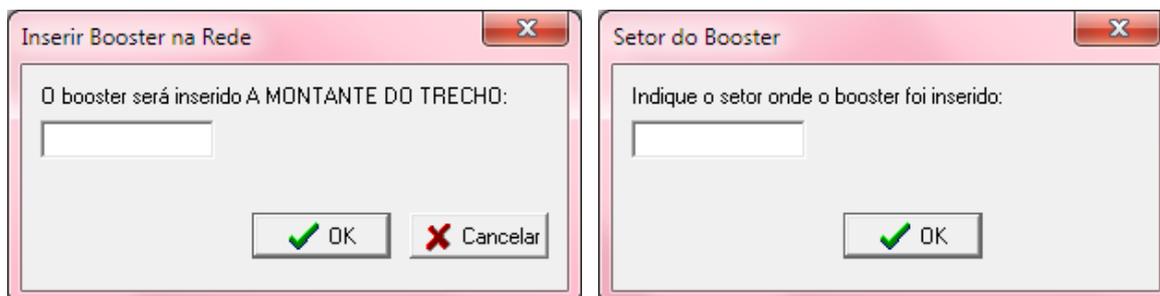


Figura 3.12 - Localização do booster na rede

Dando continuidade, o programa executa os dois dimensionamentos (sem e com *booster*), gerando os arquivos finais “Rede_Dimensionada_Sem_Booster.inp” e “Rede_Dimensionada_Com_Booster.inp”, respectivamente. Por fim, é apresentado o relatório do dimensionamento otimizado, identificado pelos itens 6 e 7 na Figura 3.8. Neste relatório constam as informações de pressão mínima e máxima; velocidade máxima¹⁸; altura manométrica (Equação 3.7) e piezométrica do bombeamento na origem (Equação 3.8); custo de implantação das tubulações (Equação 3.6); custo energético do bombeamento na origem (Equação 3.9); custo energético dos *boosters* (Equação 3.12) e custo total da rede (Equação 3.11).

Os resultados dos dois dimensionamentos (sem e com *booster*) são comparados entre si, a fim de verificar a melhor solução entre os dimensionamentos (Figura 3.13).

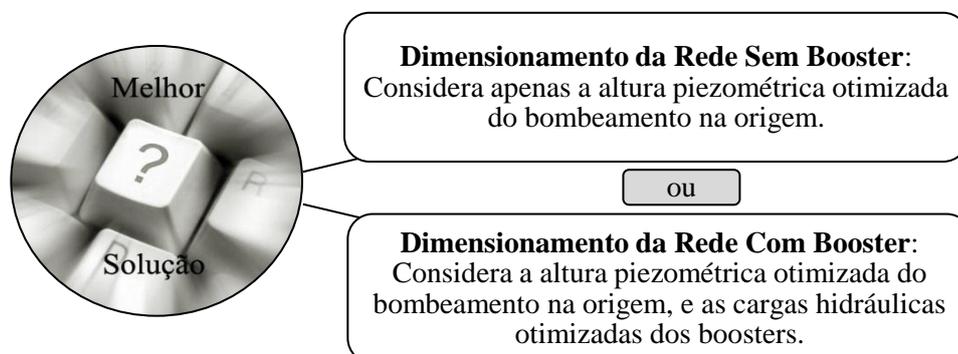


Figura 3.13 - Melhor solução para redes de distribuição com múltiplos bombeamentos

¹⁸ A velocidade mínima não é apresentada no relatório final do TDO, pois de acordo com SILVESTRE (1979), não é recomendável estabelecer limites mínimos para as velocidades nos sistemas de distribuição.

Desta forma, o programa identifica a melhor opção do dimensionamento e quanto de economia esta opção proporcionará ao projeto, conforme mostra o item 8 na Figura 3.8.

Por meio dos arquivos finais “Rede_Dimensionada_Sem_Booster.inp” e “Rede_Dimensionada_Com_Booster.inp” é possível simular a rede dimensionada no EPANET, e assim verificar os diâmetros ótimos de todos os trechos, as pressões nos pontos de consumo (nós da rede), as curvas dos *boosters*, entre outros parâmetros.

A *interface* do programa TDO para redes de distribuição de água que não possuem bombeamentos é bem simples, conforme ilustra a Figura 3.14. As redes que possuem este tipo de configuração são abastecidas por gravidade através de um reservatório elevado, com sua cota piezométrica na origem fixa, conforme discutido na seção 3.2.3.a.

Como não existe custo energético, conseqüentemente não há G_e , e o custo total do sistema depende apenas do custo de implantação da rede de tubulações. Inicialmente deve-se preencher a pressão mínima requerida, identificada pelo item 1 na Figura 3.14.

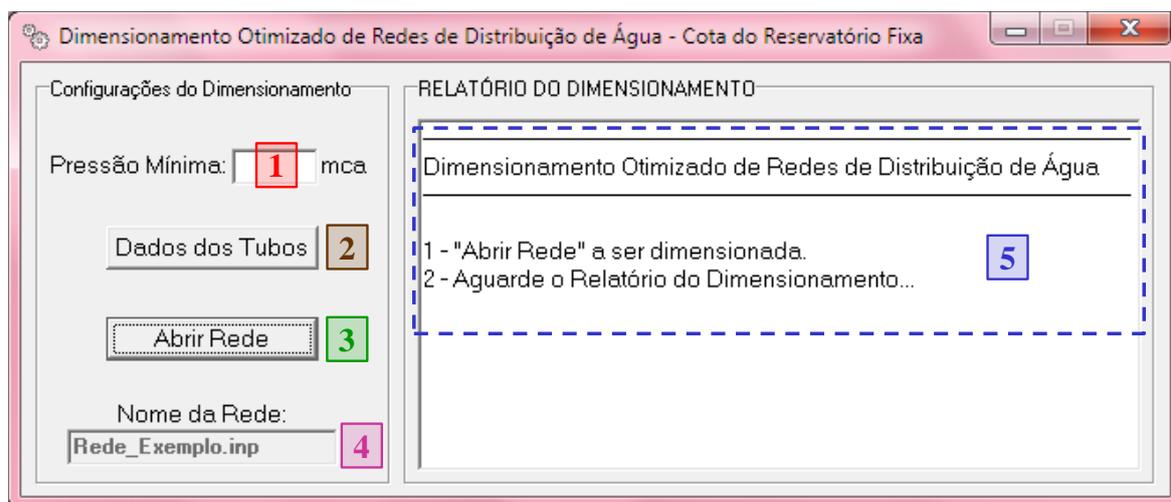


Figura 3.14 - Interface do programa TDO para redes sem bombeamento

No local identificado pelos itens 2 e 3 na Figura 3.14, deve-se selecionar os dados dos tubos e o arquivo de rede “*inp*” modelado no EPANET, respectivamente. No local identificado pelo item 4 consta o nome da rede escolhida para ser dimensionada. O programa TDO executa automaticamente o dimensionamento da rede “*inp*”, gera o arquivo final nomeado “Rede_Dimensionada_Sem_Bombeamento.inp” e apresenta o relatório final do dimensionamento no local identificado pelo item 5 na Figura 3.14. Neste relatório constam apenas as informações de pressão mínima e máxima; velocidade máxima e custo total da rede, que é igual ao custo de implantação das tubulações.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo relata a aplicabilidade do modelo de dimensionamento otimizado desenvolvido neste trabalho. Três estudos de casos foram realizados e estão apresentados na seção 4.3. Os referidos estudos de casos visam avaliar em qual situação a inclusão dos múltiplos bombeamentos (bombeamento na origem e *boosters*) torna o dimensionamento de redes de distribuição de água mais adequado, proporcionando benefícios hidráulicos, energéticos e econômicos.

O programa *Toolkit de Dimensionamento Otimizado* (TDO), desenvolvido neste trabalho, foi utilizado para fazer o comparativo entre o dimensionamento otimizado de redes com único bombeamento (sem *booster*) e com múltiplos bombeamentos (com *boosters*). Este capítulo é finalizado com a exposição dos principais resultados obtidos através dos estudos de casos.

Antes de iniciar as discussões acerca dos estudos de casos, propriamente ditos, foram realizadas análises preliminares, a fim de validar o programa TDO, sendo apresentadas na próxima seção (4.2). Estas análises consistem nos dimensionamentos de algumas redes conhecidas na literatura, usando os programas TDO e LenhsNet (GOMES *et al.*, 2009b), a fim de determinar a compatibilidade entre eles, comparando os resultados dos dimensionamentos.

O primeiro estudo de caso consiste em analisar o dimensionamento da rede de distribuição de água *Grande Setor Expandida com e sem booster*, conforme é discutido na seção 4.3.1. O objetivo é verificar se a operação com múltiplos bombeamentos é mais

adequada – em termos econômico, hidráulico e energético – do que a operação com apenas um bombeamento na origem da rede.

O segundo estudo de caso consiste em aumentar gradativamente, de maneira uniforme, as cotas dos nós de um ou mais setores, visando comparar os resultados dos dimensionamentos. Para isso realizaram-se análises de sensibilidade na rede *R9 Adaptada*, conforme discutido na seção 4.3.2.

O terceiro estudo de caso consiste em aumentar gradativamente o comprimento do trecho que faz ligação entre o setor principal e o subsetor, fazendo com que o subsetor vá se distanciando do setor principal. Para isso foram realizadas análises de sensibilidade na rede *Hanoi*, conforme é discutido na seção 4.3.3.

4.2 ANÁLISES PRELIMINARES – VALIDAÇÃO DO TDO

O modelo desenvolvido nesta tese pode ser aplicado a qualquer rede de distribuição de água, desde que a mesma tenha sido modelada no EPANET e exportada utilizando a extensão *inp*. As redes podem ser abastecidas por uma única fonte de impulsão (bombeamento na origem) ou por múltiplas fontes de impulsão (bombeamento na origem e os *boosters*).

Duas análises preliminares foram realizadas no dimensionamento de rede com único bombeamento (ver seção 4.2.1) e sem bombeamento (ver seção 4.2.2). Na primeira análise utilizou-se a rede *Grande Setor*, e na segunda análise foram utilizadas as redes *Setor Secundário* e *Itororó*. Os resultados dos dimensionamentos dessas três redes foram comparados através dos programas TDO e LenhsNet, visando validar o programa TDO.

4.2.1 Rede com Único Bombeamento

O sistema de distribuição de água *Grande Setor*¹⁹ possui dois anéis, oito trechos e seis nós, além do bombeamento na origem para abastecer o reservatório elevado, e este à rede. A cota do nível d'água na origem é de 30 m, conforme ilustra a Figura 4.1.

¹⁹ Dentre alguns dos trabalhos que utilizaram a rede Grande Setor, tem-se: Silva (2003), Carvalho (2007), Gomes (2009) e Salvino (2009)

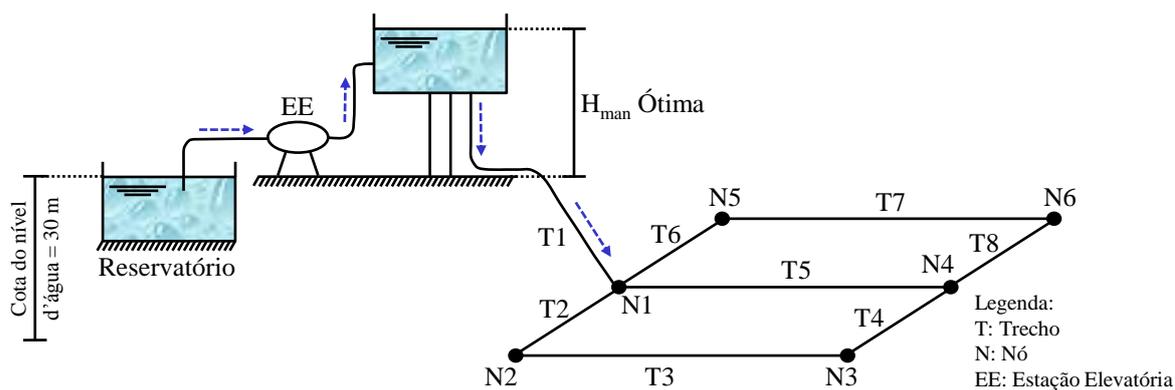


Figura 4.1 - Esquema da rede Grande Setor

A Figura 4.2 ilustra a rede *Grande Setor* modelada no EPANET. Os valores das seis cotas dos nós variam de 4 a 6 m e estão indicados de vermelho. Já os comprimentos dos oito trechos estão indicados de azul e variam de 1.190 a 2.540 m. A Figura 4.3 apresenta as vazões demandadas por cada nó da rede.

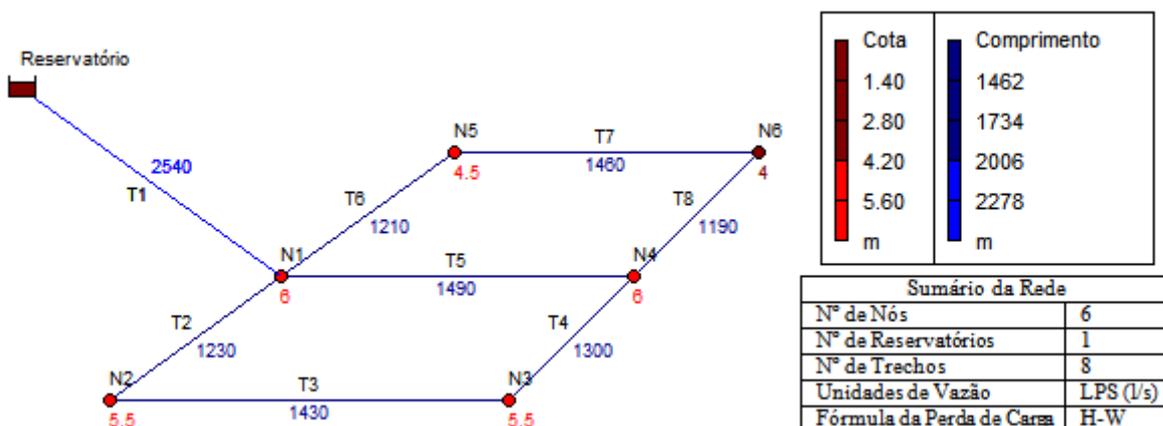


Figura 4.2 - Rede Grande Setor modelada no EPANET

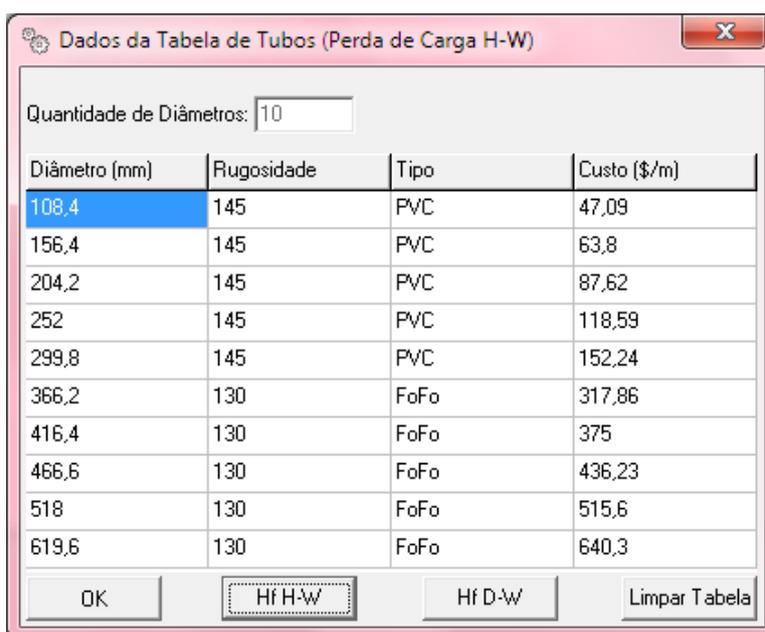
| Tabela da Rede - Nós | |
|----------------------|------------------|
| Identificador do Nó | Consumo-Base LPS |
| Nó N1 | 0 |
| Nó N2 | 47.78 |
| Nó N3 | 80.32 |
| Nó N4 | 208.60 |
| Nó N5 | 43.44 |
| Nó N6 | 40.29 |

Figura 4.3 - Vazões demandadas dos nós da rede Grande Setor

4.2.1.1. Dimensionamento da rede Grande Setor utilizando o TDO e LenhsNet

O processo de dimensionamento do programa TDO inicia-se com o preenchimento dos parâmetros dispostos do lado esquerdo da *interface*. O primeiro parâmetro a ser atribuído é a pressão mínima, que neste caso foi 25 mca. Os demais parâmetros a serem inseridos são necessários para o cálculo do custo energético do sistema principal de impulsão (bombeamento na origem). Foram eles: rendimento esperado do conjunto motor-bomba (75 %); vida útil, ou alcance, do projeto (20 anos); taxa de juros anual (12% ao ano); taxa de aumento anual da energia elétrica (6% ao ano); custo unitário médio da tarifa de energia elétrica (0,20 \$/kWh); número de horas diárias de bombeamento (20 h/dia) e cota do nível d'água na origem (30 m).

Em seguida, deve-se criar a tabela de tubos. Para o dimensionamento da rede *Grande Setor* utilizou-se a tabela de tubos apresentada na Figura 4.4. Para tubos de diâmetros superiores a DN 300, a tubulação é de ferro dúctil (FoFo); e para diâmetros até o DN 300, a tubulação é de PVC. A Tabela abaixo fornece 10 tipos de diâmetros internos, com suas respectivas rugosidades e custos por metro de tubulação. Os valores da rugosidade estão relacionados ao coeficiente de rugosidade “C” da fórmula utilizada para perda de carga, que neste caso é a de Hazen-Williams (H-W), conforme apresentada na Equação 2.12 no Capítulo 2. Neste caso, o coeficiente de rugosidade para tubulação do tipo PVC é 145 e para tubulação do tipo FoFo é 130.



Quantidade de Diâmetros: 10

| Diâmetro (mm) | Rugosidade | Tipo | Custo (\$/m) |
|---------------|------------|------|--------------|
| 108,4 | 145 | PVC | 47,09 |
| 156,4 | 145 | PVC | 63,8 |
| 204,2 | 145 | PVC | 87,62 |
| 252 | 145 | PVC | 118,59 |
| 299,8 | 145 | PVC | 152,24 |
| 366,2 | 130 | FoFo | 317,86 |
| 416,4 | 130 | FoFo | 375 |
| 466,6 | 130 | FoFo | 436,23 |
| 518 | 130 | FoFo | 515,6 |
| 619,6 | 130 | FoFo | 640,3 |

OK Hf H-W Hf D-W Limpar Tabela

Figura 4.4 - Dados da tabela de tubos (perda de carga H-W)

Posterior à criação da tabela de tubos, deve-se selecionar o arquivo de rede “inp” modelado no EPANET, que neste caso foi “Grande Setor.inp”. Após escolha do arquivo de rede “inp”, o programa TDO questiona se o usuário pretende inserir um ou mais *boosters* na rede. Como o programa LenhsNet não dimensiona redes com múltiplos bombeamentos (com *boosters*), apenas o TDO dispõe desta funcionalidade, e nesta seção (4.2 - Análises Preliminares) o objetivo é comparar os dois programas, então a resposta é “Não”. Os dimensionamentos de redes com múltiplos bombeamentos são apresentados nos Estudos de Casos (seção 4.3).

Por fim, o programa TDO executa automaticamente o dimensionamento da rede. Ao término do processamento, a *interface* principal do TDO exhibe a vazão total da rede (soma de todas as demandas dos nós N1 a N6), cujo valor é 420,43 l/s; o Fa (obtido de acordo com a Equação 3.5), cujo valor é 11,13; e o Ge da origem (obtido de acordo com a Equação 3.3), cujo valor é \$89.324,72 por metro. Na *interface* principal do TDO também é disponibilizado o relatório detalhado do dimensionamento, que fica disposto do lado direito da tela, conforme ilustra a Figura 4.5.

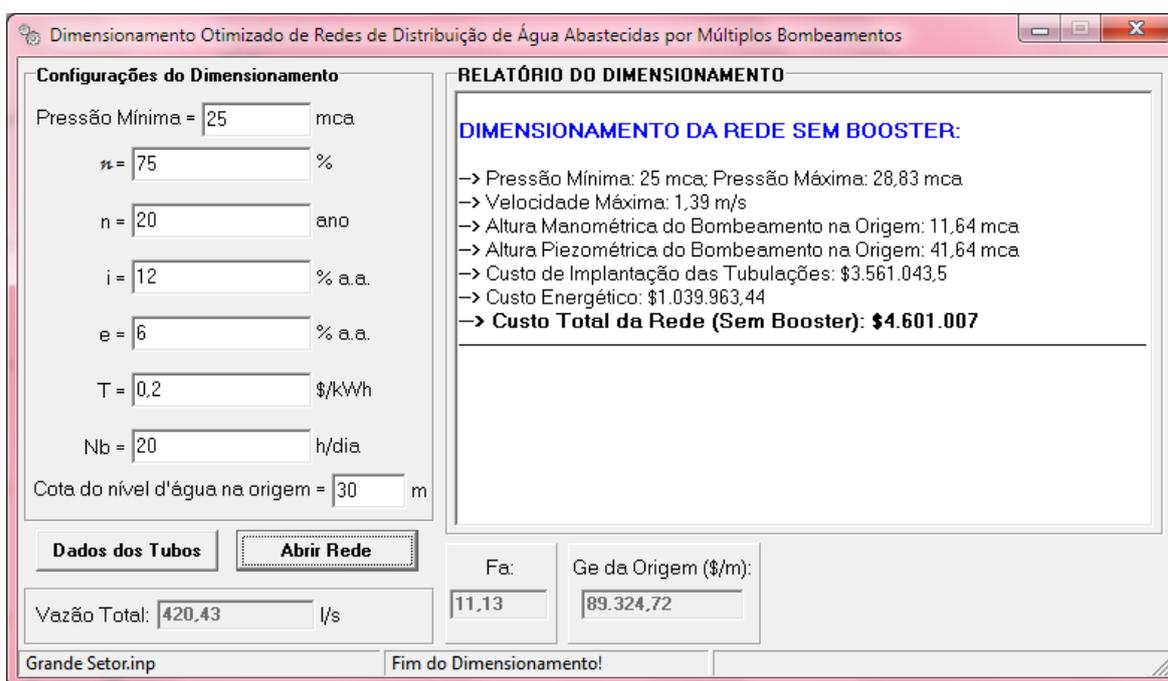


Figura 4.5 - Resultado do dimensionamento da rede Grande Setor - programa TDO

No relatório do dimensionamento da rede *Grande Setor*, realizado pelo TDO, constam as seguintes informações:

- Pressão mínima (25 mca), máxima (28,83 mca), velocidade máxima (1,39 m/s);

- Altura manométrica do bombeamento na origem (11,64 mca), cujo valor é obtido pela Equação 3.7;
- Altura piezométrica do bombeamento na origem (41,64 mca), cujo valor é obtido pela Equação 3.8;
- Custo de implantação das tubulações (\$3.561.043,5), cujo valor é obtido pela Equação 3.6;
- Custo energético do bombeamento na origem (\$1.039.963,44) cujo valor é obtido pela Equação 3.9;
- Custo total da rede (\$4.601.007), cujo valor é obtido pela Equação 3.10, ou seja, soma do custo de implantação das tubulações com o custo energético do bombeamento na origem.

A Figura 4.6 ilustra os diâmetros ótimos dos oito trechos e as pressões dos seis nós da rede da rede *Grande Setor* após o dimensionamento realizado pelo programa TDO.

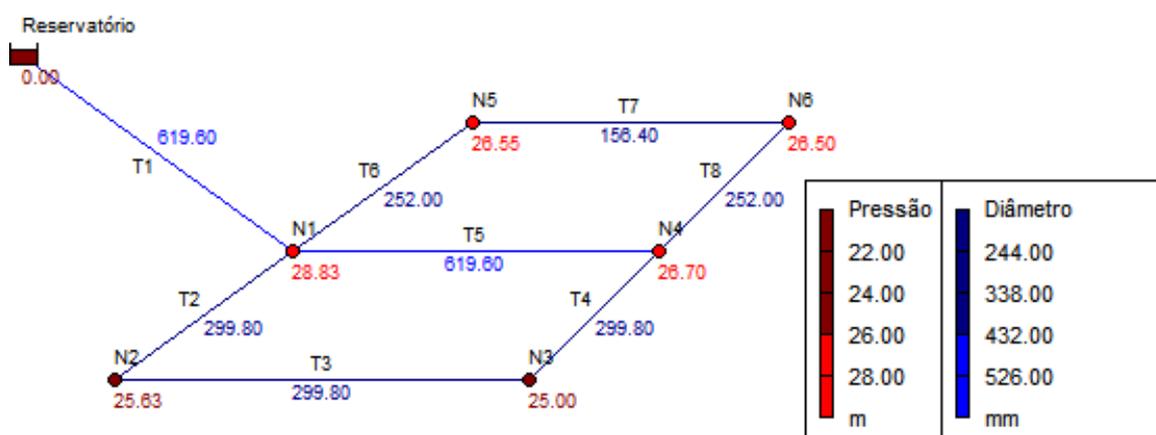


Figura 4.6 - Diâmetros e pressões da rede Grande Setor após dimensionamento

Com o fim do dimensionamento, o programa TDO gera automaticamente um arquivo “inp”, nomeado “Rede_Dimensionada.inp”. Por meio deste arquivo e utilizando o simulador hidráulico EPANET, podem ser verificados os valores das variáveis de estado (pressões em todos os nós, cargas hidráulicas, vazões, velocidades, perdas de carga etc.); assim como os diâmetros ótimos de todas as tubulações dos trechos. Também é possível simular a rede dimensionada e analisar os resultados utilizando diferentes gráficos e tabelas que são disponíveis pelo EPANET.

A Figura 4.7 apresenta o relatório da rede *Grande Setor* dimensionada pelo programa LenhsNet.

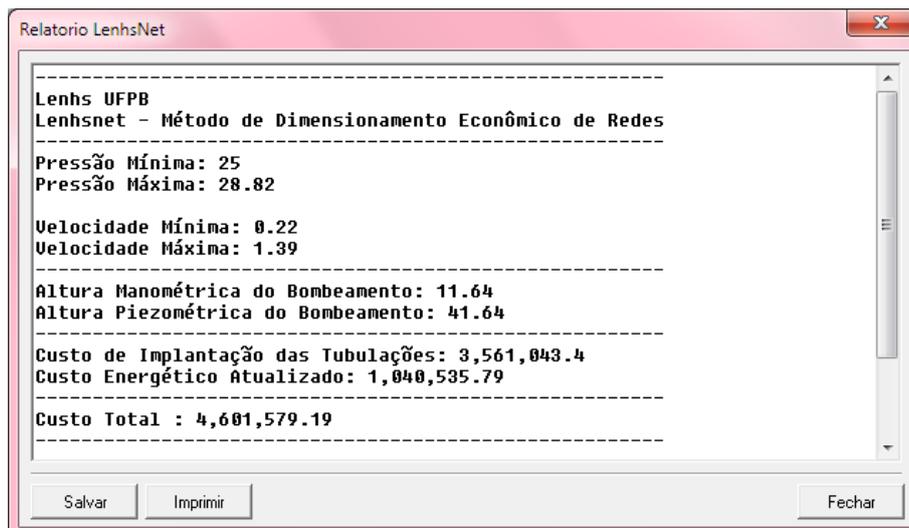


Figura 4.7 - Resultado do dimensionamento da rede Grande Setor pelo LenhsNet

A Tabela 4.1 compara os resultados obtidos pelo dimensionamento da rede *Grande Setor* usando os programas TDO e LenhsNet.

Tabela 4.1 - Comparação do dimensionamento da rede Grande Setor

| | TDO | LenhsNet |
|--|--------------|--------------|
| Pressão Máxima (mca) | 28,83 | 28,82 |
| Velocidade máxima (m/s) | 1,39 | 1,39 |
| Altura Manométrica do Bombeamento (mca) | 11,64 | 11,64 |
| Altura Piezométrica do Bombeamento (mca) | 41,64 | 41,64 |
| Custo de Implantação das Tubulações (\$) | 3.561.043,50 | 3.561.043,40 |
| Custo Energético (\$) | 1.039.963,44 | 1.040.535,79 |
| Custo Total (\$) | 4.601.007,00 | 4.601.579,19 |

A Tabela 4.2 compara os diâmetros das tubulações dos trechos e as pressões nos nós da rede *Grande Setor* entre os dimensionamentos realizados pelos programas TDO e LenhsNet. Todos os diâmetros das tubulações dos trechos foram iguais entre os dois programas. O custo de implantação das tubulações obtido pelo programa TDO foi 0,01% menor (\$4.601.007,00) se comparado ao obtido pelo LenhsNet, cujo valor foi de \$4.601.579,19. Esta pequena diferença (0,01%) pode ser desprezada, pois se deve aos arredondamentos e aos tipos de variáveis utilizadas nos cálculos do gradiente de custo e gradiente energético de cada programa.

A equivalência dos resultados era esperada entre os programas TDO e LenhsNet para o dimensionamento de redes com único bombeamento, por se tratar do mesmo algoritmo, embora ele tenha sido implementado/programado de forma distinta em cada programa. Em virtude da similaridade de resultados nos dimensionamentos da rede *Grande*

Setor entre os dois programas, pode-se dizer que o TDO está validado para o dimensionamento de redes com único bombeamento.

Tabela 4.2 - Diâmetros e pressões da rede Grande Setor entre TDO e LenhsNet

| Diâmetros dos Trechos (mm) | TDO | LenhsNet | Pressões nos Nós (mca) | TDO | LenhsNet |
|----------------------------|-------|----------|------------------------|-------|----------|
| T1 | 619,6 | 619,6 | N1 | 28,83 | 28,82 |
| T2 | 299,8 | 299,8 | N2 | 25,63 | 25,62 |
| T3 | 299,8 | 299,8 | N3 | 25 | 25 |
| T4 | 299,8 | 299,8 | N4 | 26,7 | 26,7 |
| T5 | 619,6 | 619,6 | N5 | 26,6 | 26,55 |
| T6 | 252 | 252 | N6 | 26,5 | 26,5 |
| T7 | 156,4 | 156,4 | | | |
| T8 | 252 | 252 | | | |

4.2.2 Redes sem Bombeamentos

Nesta seção das análises preliminares serão utilizadas duas redes de distribuição de água: *rede Setor Secundário* e *rede Itororó*. Estas redes foram dimensionadas pelos programas TDO e LenhsNet e tiveram seus resultados comparados, a fim de validar o modelo de dimensionamento otimizado para redes sem bombeamento desenvolvido neste trabalho.

4.2.2.1. Rede Setor Secundário

A rede de distribuição de água *Setor Secundário*²⁰ possui 24 trechos (T1 a T24) e 20 nós (N1 a N20), sendo abastecida por gravidade através de uma única fonte (o reservatório RNF na origem), com sua cota piezométrica fixa, cujo valor é 32,70 m. A Figura 4.2 ilustra a rede *Setor Secundário* modelada no EPANET.

A Tabela 4.3 apresenta as cotas e as vazões demandadas (consumo base) dos 20 nós; e os comprimentos dos 24 trechos da rede *Setor Secundário*. Para dar início ao dimensionamento de rede sem bombeamento utilizando o programa TDO, deve-se inserir a pressão mínima requerida e criar a tabela de tubos. A pressão mínima adotada foi de 20

²⁰ Dentre alguns dos trabalhos que utilizaram a rede Setor Secundário, tem-se: Silva (2003), Carvalho (2007), Gomes (2009) e Salvino (2009).

mca. A tabela de tubos utilizada no dimensionamento da rede *Setor Secundário* foi a mesma utilizada pela rede *Grande Setor*, sendo apresentada anteriormente na Figura 4.4.

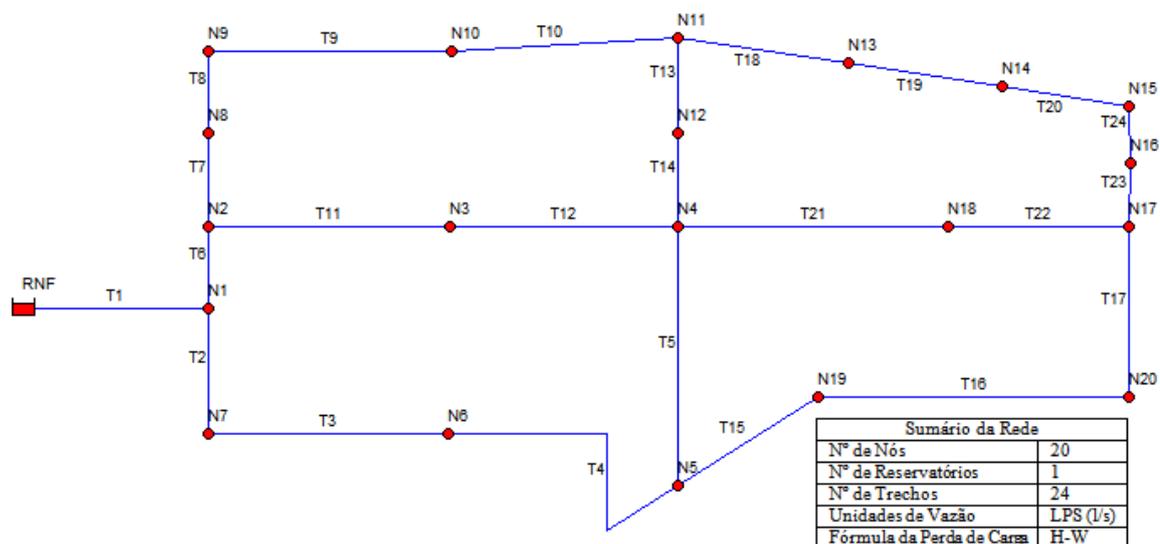


Figura 4.8 - Rede Setor Secundário modelada no EPANET

Tabela 4.3 - Cotas, vazões e comprimentos da rede Setor Secundário

| Identificador do Nó | Cota m | Consumo-Base LPS | Trechos | Comprimento (m) |
|---------------------|--------|------------------|---------|-----------------|
| Nó N1 | 4.5 | 0 | T1 | 220 |
| Nó N2 | 5 | 7.4 | T2 | 190 |
| Nó N3 | 4.5 | 5.2 | T3 | 295 |
| Nó N4 | 5 | 4.7 | T4 | 390 |
| Nó N5 | 3.5 | 4.2 | T5 | 370 |
| Nó N6 | 3.5 | 7.4 | T6 | 190 |
| Nó N7 | 3.5 | 10.5 | T7 | 310 |
| Nó N8 | 5 | 5.2 | T8 | 205 |
| Nó N9 | 6 | 5.2 | T9 | 305 |
| Nó N10 | 6 | 6 | T10 | 295 |
| Nó N11 | 6 | 2.6 | T11 | 300 |
| Nó N12 | 6 | 3.2 | T12 | 290 |
| Nó N13 | 6 | 4.2 | T13 | 180 |
| Nó N14 | 6 | 4.2 | T14 | 315 |
| Nó N15 | 5 | 2.6 | T15 | 300 |
| Nó N16 | 3 | 5.2 | T16 | 295 |
| Nó N17 | 3.5 | 61.9 | T17 | 215 |
| Nó N18 | 6 | 7.9 | T18 | 140 |
| Nó N19 | 3.5 | 2.6 | T19 | 220 |
| Nó N20 | 3.5 | 58.3 | T20 | 220 |
| | | | T21 | 285 |
| | | | T22 | 300 |
| | | | T23 | 315 |
| | | | T24 | 170 |

Após escolha do arquivo “Setor_Secundario.inp”, o programa TDO executa automaticamente o dimensionamento e apresenta o relatório final, conforme pode ser observado na Figura 4.9.

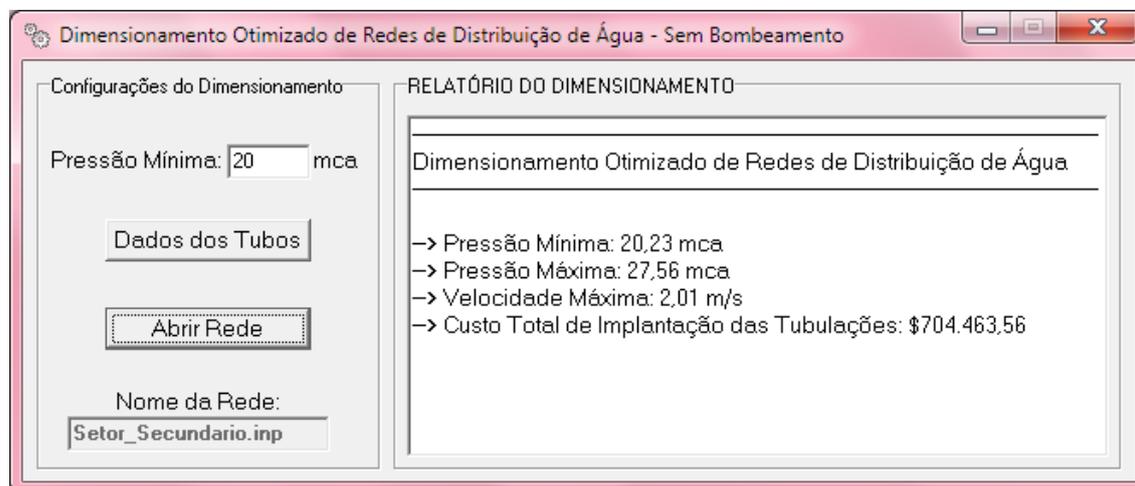


Figura 4.9 - Dimensionamento da rede Setor Secundário pelo programa TDO

A Figura 4.10 apresenta as pressões dos nós e os diâmetros ótimos das tubulações dos trechos da rede *Setor Secundário* após o dimensionamento realizado pelo TDO.

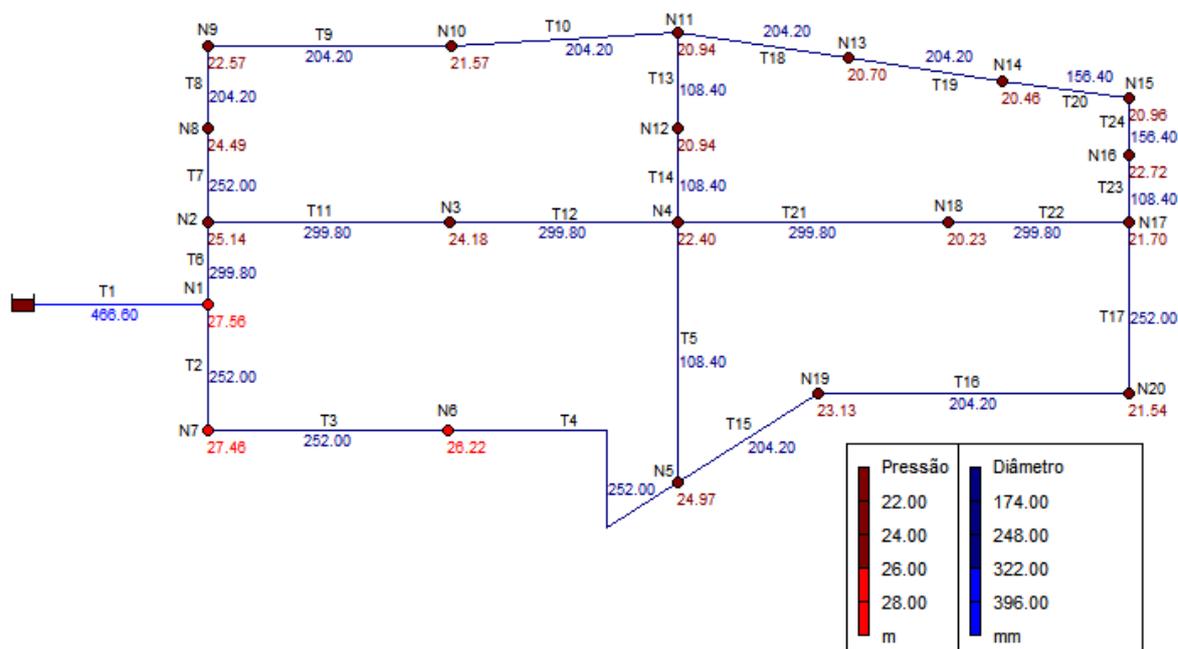


Figura 4.10 - Diâmetros e pressões da rede Setor Secundário após dimensionamento

A Figura 4.11 apresenta o relatório do dimensionamento obtido pelo programa LenhsNet. A Tabela 4.4 compara os resultados dos dimensionamentos da rede *Setor Secundário* pelos programas TDO e LenhsNet.

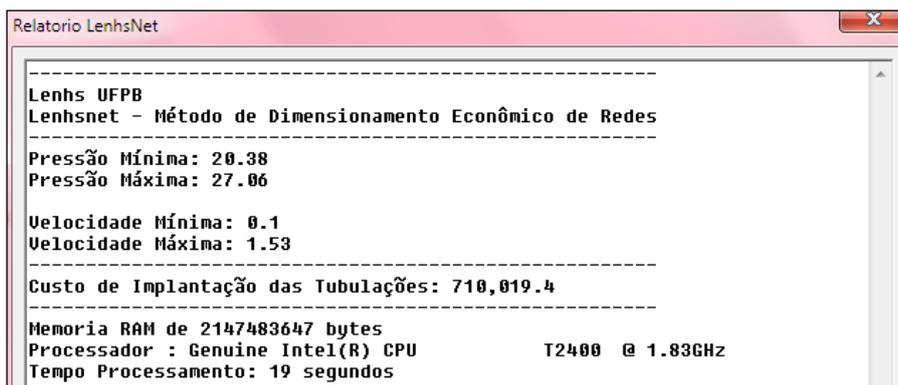


Figura 4.11 - Dimensionamento da rede Setor Secundário pelo LenhsNet

Tabela 4.4 - Resultado do dimensionamento da rede Setor Secundário

| | TDO | LenhsNet |
|--|------------|------------|
| Pressão Mínima (mca) | 20,23 | 20,38 |
| Pressão Máxima (mca) | 27,56 | 27,06 |
| Velocidade máxima (m/s) | 2,01 | 1,53 |
| Custo de Implantação das Tubulações (\$) | 704.463,56 | 710.019,40 |
| Custo Energético (\$) | ---- | ---- |
| Custo Total (\$) | 704.463,56 | 710.019,40 |

A Tabela 4.5 compara os diâmetros das tubulações dos trechos da rede *Setor Secundário* após o dimensionamento realizado pelos programas TDO e LenhsNet.

Tabela 4.5 - Diâmetros da rede Setor Secundário após dimensionamento

| | TDO | LenhsNet | | TDO | LenhsNet | | TDO | LenhsNet |
|----|-------|----------|-----|-------|----------|-----|-------|----------|
| T1 | 466,6 | 416,4 | T9 | 204,2 | 204,2 | T17 | 252,0 | 252,0 |
| T2 | 252,0 | 252,0 | T10 | 204,2 | 204,2 | T18 | 204,2 | 204,2 |
| T3 | 252,0 | 252,0 | T11 | 299,8 | 299,8 | T19 | 204,2 | 204,2 |
| T4 | 252,0 | 252,0 | T12 | 299,8 | 299,8 | T20 | 156,4 | 156,4 |
| T5 | 108,4 | 108,4 | T13 | 108,4 | 108,4 | T21 | 299,8 | 299,8 |
| T6 | 299,8 | 366,2 | T14 | 108,4 | 108,4 | T22 | 299,8 | 299,8 |
| T7 | 252,0 | 204,2 | T15 | 204,2 | 204,2 | T23 | 108,4 | 108,4 |
| T8 | 204,2 | 204,2 | T16 | 204,2 | 204,2 | T24 | 156,4 | 108,4 |

Os programas TDO e LenhsNet obtiveram valores diferentes para os diâmetros das tubulações dos trechos T1, T6, T7 e T24, com isso, os valores do custo de implantação das tubulações foram distintos, embora eles tenham sido bem próximos. Apesar dos algoritmos do TDO e LenhsNet serem iguais para o dimensionamento de redes sem bombeamento, o que justifica os diferentes diâmetros encontrados pelos respectivos programas são os arredondamentos e os tipos de variáveis utilizadas nos cálculos do

gradiente de custo de cada programa. O custo de implantação das tubulações obtido pelo programa TDO foi 0,78% menor (\$704.463,56) se comparado ao obtido pelo LenhsNet, que foi de \$710.019,40.

Portanto, esta pequena diferença (0,78%) no valor do custo entre os programas TDO e LenhsNet pode ser desprezada. Com isto, considera-se o TDO validado para o dimensionamento otimizado de redes sem bombeamento, visto que os resultados foram compatíveis entre os dois programas.

4.2.2.2. Rede Itororó

A rede de distribuição de água *Itororó*²¹ possui 20 trechos e 17 nós, sendo abastecida por gravidade através de uma única fonte (o reservatório na origem), sem bombeamento, com sua cota piezométrica fixa, cujo valor é 248 m. Esta é uma rede real localizada na cidade de Itororó, no estado da Bahia. A Figura 4.12 ilustra a rede *Itororó* modelada no EPANET.

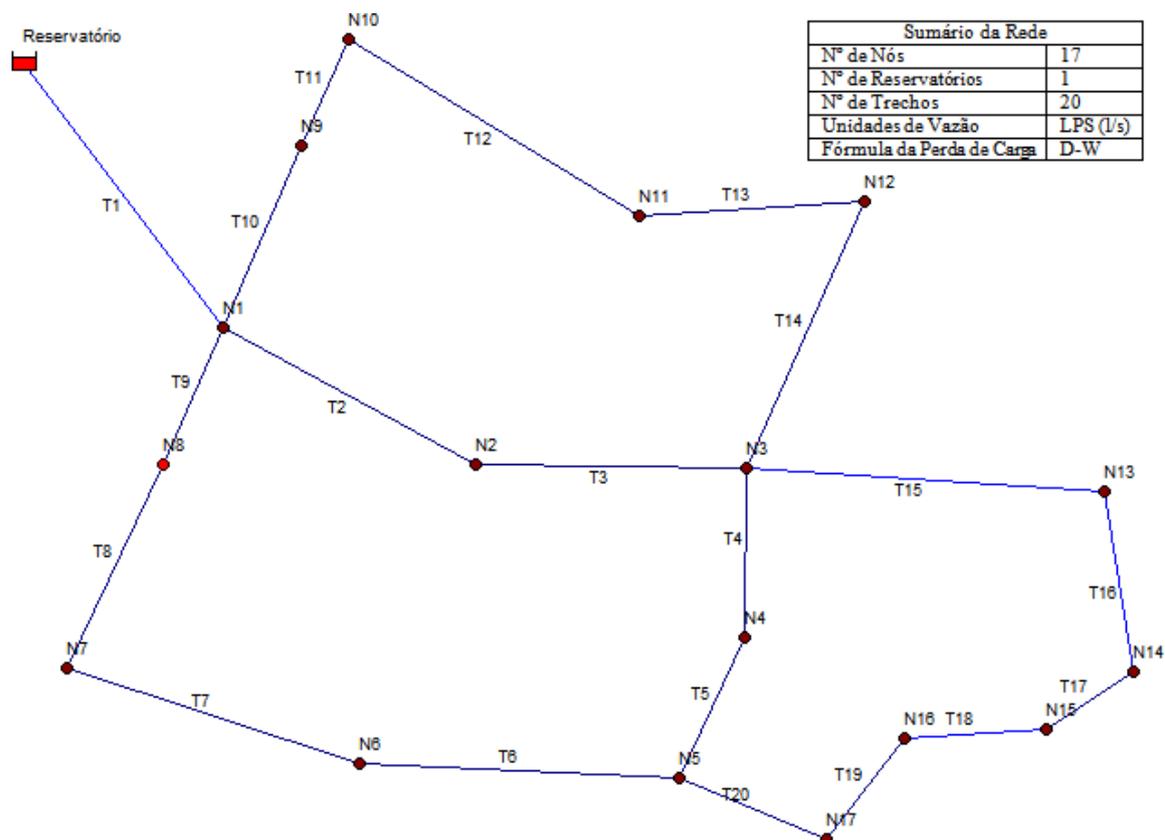


Figura 4.12 - Rede Itororó modelada no EPANET

²¹ Dentre alguns dos trabalhos que utilizaram a rede Itororó, tem-se: Silva (2003), Gomes e Silva (2006) e Gomes (2009).

A Tabela 4.6 apresenta as cotas e as vazões demandadas (consumo base) dos 17 nós; e os comprimentos dos 20 trechos da rede *Itororó*. Os valores das cotas dos nós (N1 a N17) variam entre 205,5 e 230,7 m e os comprimentos dos 20 trechos (T1 a T20) variam entre 103 e 324 m.

Tabela 4.6 - Cotas, vazões e comprimentos da rede *Itororó*

| Identificador do Nó | Cota m | Consumo-Base LPS |
|---------------------|--------|------------------|
| Nó N1 | 220.5 | 5.05 |
| Nó N2 | 215.6 | 1.91 |
| Nó N3 | 210.4 | 3.81 |
| Nó N4 | 210.5 | 1.4 |
| Nó N5 | 209.5 | 4.35 |
| Nó N6 | 213.2 | 3.51 |
| Nó N7 | 218.5 | 3.44 |
| Nó N8 | 230.7 | 2.48 |
| Nó N9 | 211.5 | 3.06 |
| Nó N10 | 213.5 | 1.85 |
| Nó N11 | 205.5 | 2.86 |
| Nó N12 | 208.8 | 6.11 |
| Nó N13 | 215.5 | 5.09 |
| Nó N14 | 212.6 | 4.06 |
| Nó N15 | 207.5 | 8.05 |
| Nó N16 | 219.4 | 4.26 |
| Nó N17 | 220.5 | 1.21 |

| Identificador do Trecho | Comprimento m |
|-------------------------|---------------|
| Tubulação T1 | 324 |
| Tubulação T2 | 124 |
| Tubulação T3 | 184 |
| Tubulação T4 | 206 |
| Tubulação T5 | 103 |
| Tubulação T6 | 202 |
| Tubulação T7 | 134 |
| Tubulação T8 | 227 |
| Tubulação T9 | 167 |
| Tubulação T10 | 166 |
| Tubulação T11 | 152 |
| Tubulação T12 | 168 |
| Tubulação T13 | 177 |
| Tubulação T14 | 225 |
| Tubulação T15 | 254 |
| Tubulação T16 | 263 |
| Tubulação T17 | 133 |
| Tubulação T18 | 321 |
| Tubulação T19 | 105 |
| Tubulação T20 | 169 |

Dando início ao dimensionamento da rede *Itororó* pelo programa TDO, é necessário atribuir a pressão mínima requerida (17 mca) e criar a tabela de tubos. A tabela de tubos utilizada para este dimensionamento é apresentada na Figura 4.13.

A tabela de tubos utilizada nos dimensionamentos das redes *Grande Setor* e *Setor Secundário* (apresentada na Figura 4.4) não pode ser utilizada neste caso, visto que a rede *Itororó* está configurada para perda de carga de Darcy-Weisbach (D-W), sendo os valores da rugosidade diferentes na fórmula da perda de carga de Hazen-Williams (H-W).

Dados da Tabela de Tubos (Perda de Carga: Darcy-Weisbach)

Quantidade de Diâmetros: 9

| Diâmetro | Rugosidade | Tipo | Custo (\$/m) |
|----------|------------|------|--------------|
| 53,4 | 0,02 | PVC | 24,16 |
| 75,6 | 0,02 | PVC | 32,12 |
| 108,4 | 0,02 | PVC | 47,09 |
| 156,4 | 0,02 | PVC | 63,8 |
| 204,2 | 0,02 | PVC | 87,62 |
| 252 | 0,02 | PVC | 128,59 |
| 299,8 | 0,02 | PVC | 162,24 |
| 394,6 | 0,02 | PVC | 257,09 |
| 489,4 | 0,02 | PVC | 369,44 |

Buttons: OK, Hf H-W, Hf D-W, Limpar Tabela

Figura 4.13 - Dados da tabela de tubos (perda de carga D-W).

Os resultados do dimensionamento da rede *Itororó* pelos programas TDO e LenhsNet estão ilustrados na Figura 4.14 e Figura 4.15, respectivamente.

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água - Sem Bombeamento

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima: 17 mca

Dados dos Tubos

Abrir Rede

Nome da Rede: Itororo.inp

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água

- Pressão Mínima: 17,05 mca
- Pressão Máxima: 31,56 mca
- Velocidade Máxima: 2,14 m/s
- Custo Total de Implantação das Tubulações: \$225.890,73

Figura 4.14 - Dimensionamento da rede Itororó pelo programa TDO

Relatorio LenhsNet

Lenhs UFPB
Lenhsnet - Método de Dimensionamento Econômico de Redes

Pressão Mínima: 17.05
Pressão Máxima: 31.56

Velocidade Mínima: 0.1
Velocidade Máxima: 2.14

Custo de Implantação das Tubulações: 225,890.76

Figura 4.15 - Dimensionamento da rede Itororó pelo LenhsNet

A Figura 4.16 apresenta as pressões dos 17 nós e os diâmetros otimizados das tubulações dos 20 trechos da rede *Setor Secundário* após o dimensionamento realizado pelo programa TDO.

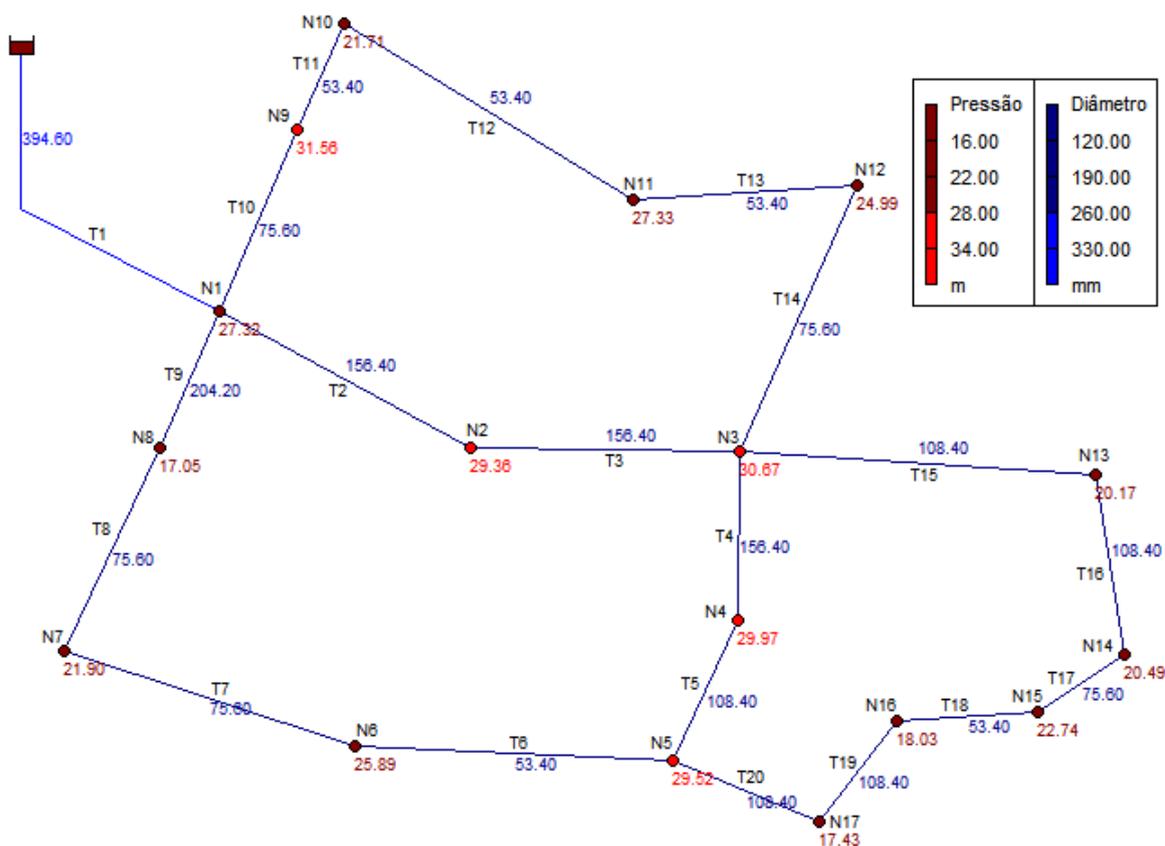


Figura 4.16 - Diâmetros e pressões da rede Itororó após dimensionamento

No dimensionamento da rede *Itororó* realizado pelo LenhsNet, os diâmetros otimizados dos 20 trechos e as pressões dos 17 nós foram iguais aos valores obtidos pelo programa TDO. As igualdades nos valores dos diâmetros justifica o mesmo custo total da rede (\$225.890,70) obtido pelos dois programas. Isto mostra que o programa TDO está coerente e compatível em relação ao LenhsNet, por isso pode-se dizer que o mesmo está validado para o dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água sem bombeamento.

Ao final das duas análises preliminares, discutidas nas seções 4.2.1 e 4.2.2, conclui-se que os dimensionamentos de redes de distribuição de água pelo programa TDO estão de acordo com outros programas apresentados na literatura, especialmente com o LenhsNet. O programa TDO apresentou resultados similares ou melhores tanto no dimensionamento de rede com único bombeamento, quanto no dimensionamento de redes sem bombeamento. Já para o dimensionamento de redes com múltiplos bombeamentos,

não foi possível fazer comparações, pois o LenhsNet não dimensiona redes desta natureza, ao contrário do TDO, sendo esta uma das principais contribuições deste trabalho.

4.3 ESTUDOS DE CASOS

A fim de validar a metodologia deste trabalho, foram propostos estudos de casos, que consistem em dimensionar e realizar análises de sensibilidade em três redes de distribuição de água. Inicialmente as redes foram modeladas no EPANET, e em seguida foram simuladas no programa de dimensionamento otimizado desenvolvido nesta tese, TDO. As redes utilizadas nos estudos de casos são: *Grande Setor Expandida*, *R9 Adaptada* e *Hanoi*. Cada rede será discutida nas seções 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3, respectivamente.

Por meio dos estudos de casos, pretende-se constatar se a setorização da rede, com a inclusão dos múltiplos bombeamentos, é, ou não, responsável pela solução ótima, àquela que proporciona o menor custo e melhor funcionamento hidráulico e energético da rede.

4.3.1 Estudo de Caso – Rede Grande Setor Expandida

A rede de distribuição de água *Grande Setor* original possui oito trechos e seis nós, além do bombeamento na origem para abastecer o reservatório elevado, conforme foi apresentada na Figura 4.1. Entretanto, para simular o dimensionamento desta rede com múltiplos bombeamentos (bombeamento na origem e *booster*), a mesma foi expandida a partir do nó quatro (N4), acrescentando o trecho nove (T9) e o nó sete (N7), conforme ilustra a Figura 4.17.

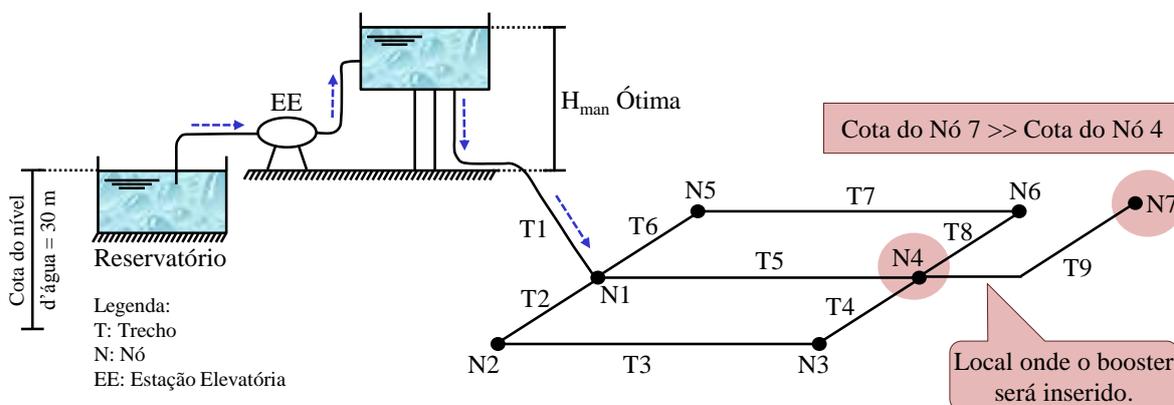


Figura 4.17 - Esquema da rede Grande Setor Expandida

A Figura 4.18 ilustra a rede *Grande Setor Expandida* modelada no EPANET. Os valores das sete cotas dos nós (N1 a N7) variam de 4 a 70 m e estão indicados de vermelho. Já os comprimentos dos nove trechos (T1 a T9) estão indicados de azul e variam de 1.000 a 2.540 m. A Figura 4.19 apresenta as vazões demandadas por cada nó da rede.

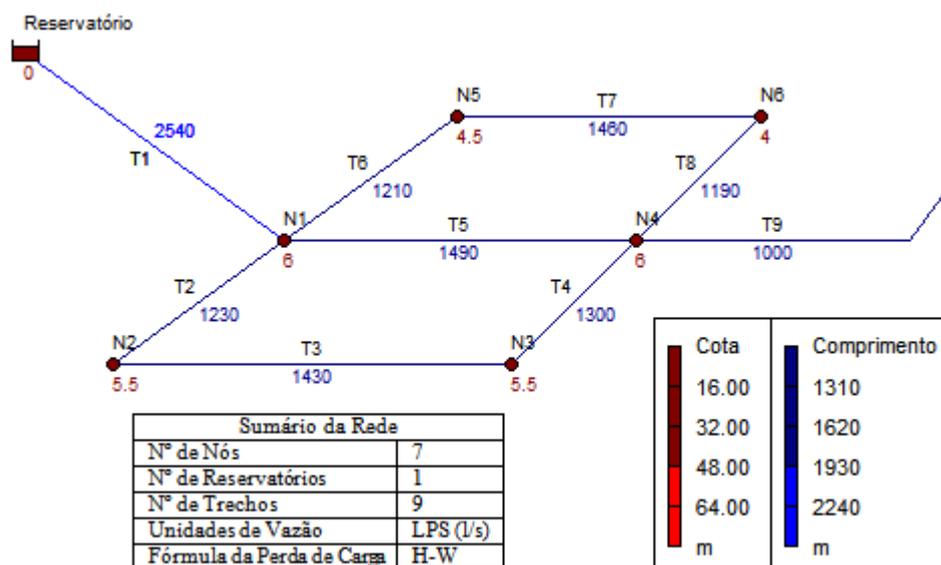


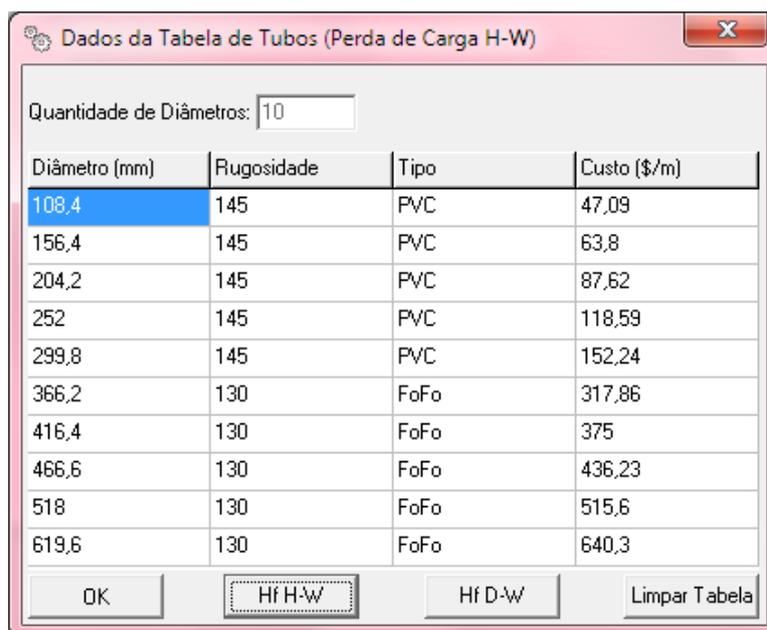
Figura 4.18 - Rede Grande Setor Expandida modelada no EPANET

| Identificador do Nó | Consumo-Base LPS |
|---------------------|------------------|
| Nó N1 | 0 |
| Nó N2 | 47.78 |
| Nó N3 | 80.32 |
| Nó N4 | 208.60 |
| Nó N5 | 43.44 |
| Nó N6 | 40.29 |
| Nó N7 | 80 |

Figura 4.19 - Vazões demandadas dos nós da rede Grande Setor Expandida

O processo de dimensionamento de redes com múltiplos bombeamentos, pelo programa TDO, inicia-se com o preenchimento dos parâmetros disposto do lado esquerdo da *interface*. Os parâmetros atribuídos são: pressão mínima (25 mca); rendimento esperado do conjunto motor-bomba (75 %); vida útil, ou alcance, do projeto (20 anos); taxa de juros anual (12% ao ano); taxa de aumento anual da energia elétrica (6% ao ano); custo unitário médio da tarifa de energia elétrica (0,20 \$/kWh); número de horas diárias de bombeamento (20 h/dia) e cota do nível d'água na origem (30 m).

Em seguida, determina-se a tabela de tubos que se deseja utilizar no processo de dimensionamento. Para a rede *Grande Setor Expandida* utilizou-se a tabela de tubos apresentada na Figura 4.20, onde a mesma contém 10 valores de diâmetros variando de 108,4 até 619,6 mm, com suas respectivas rugosidades e custos por metro de tubulação. Os valores da rugosidade estão relacionados à fórmula utilizada para perda de carga, que neste caso é a de Hazen-Williams (apresentada no capítulo 2 – Equação 2.10).



| Diâmetro (mm) | Rugosidade | Tipo | Custo (\$/m) |
|---------------|------------|------|--------------|
| 108,4 | 145 | PVC | 47,09 |
| 156,4 | 145 | PVC | 63,8 |
| 204,2 | 145 | PVC | 87,62 |
| 252 | 145 | PVC | 118,59 |
| 299,8 | 145 | PVC | 152,24 |
| 366,2 | 130 | FoFo | 317,86 |
| 416,4 | 130 | FoFo | 375 |
| 466,6 | 130 | FoFo | 436,23 |
| 518 | 130 | FoFo | 515,6 |
| 619,6 | 130 | FoFo | 640,3 |

Figura 4.20 - Dados da tabela de tubos (perda de carga H-W)

Após criação da tabela de tubos, deve-se selecionar o arquivo da rede modelada no EPANET, que neste caso é “Grande_Setor_Expandida.inp”. Dando continuidade, o programa TDO questiona se o usuário deseja inserir um ou mais *boosters* na rede. Como neste estudo de caso pretende-se dimensionar a rede com múltiplos bombeamentos, então a resposta é “Sim” (ver Figura 4.21.a). Uma nova tela é aberta para que seja digitado o trecho onde o *booster* será inserido, que neste caso é o trecho T9 (ver Figura 4.21.b), onde se percebe uma diferença significativa entre as cotas dos nós N4 (6 m) e N7 (70 m).

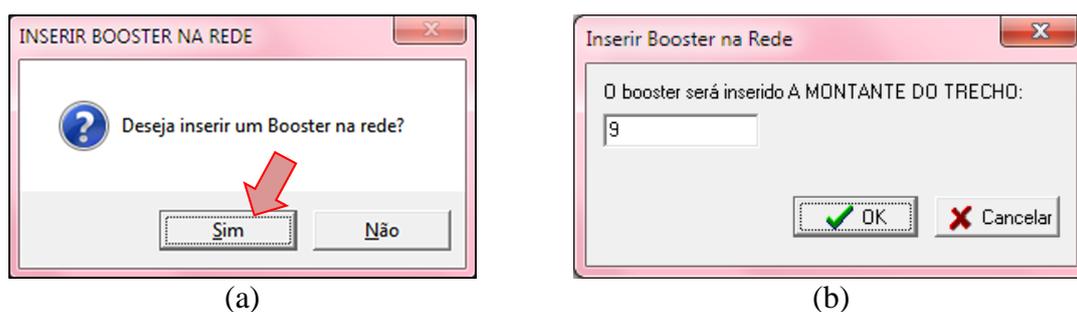


Figura 4.21 - Localização do booster na rede Grande Setor Expandida

Por fim, o programa TDO executa automaticamente o dimensionamento da rede *Grande Setor Expandida*, e ao término do processamento, apresenta o relatório final do dimensionamento, conforme ilustra a Figura 4.22.

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 α = 75 %
 n = 20 ano
 i = 12 % a.a.
 e = 6 % a.a.
 T = 0,2 \$/kWh
 Nb = 20 h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 500,43 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 1
 Local do Booster (a montante do setor): Trecho 9
 Vazão na Origem: 420,43 l/s
 Vazão do Booster: (1) 80 l/s
 Carga Hidráulica do Booster: (1) 65,01 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 93,52 mca
 → Velocidade Máxima: 2,24 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 78,93 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 108,93 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$3.466.297,75
 → Custo Energético: \$8.391.603
 → **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$11.857.901**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 28,58 mca
 → Velocidade Máxima: 1,66 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 13,99 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 43,99 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.117.393,25
 → Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$1.487.338,13
 → Custo Energético (Booster): \$1.104.882,5
 → Custo Energético Total: \$2.592.220,63
 → **Custo Total da Rede (Com Booster): \$6.709.614**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$5.148.287 (43,42%) em relação a rede sem booster

Fa: 11,13 Ge da Origem (\$/m): 106.321,55 Ge do Booster (\$/m): (1) 16.996,83

Grande Setor_Expandida.inp Fim do Dimensionamento!

Figura 4.22 - Resultado do dimensionamento da rede Grande Setor Expandida

A interface principal do TDO (ver Figura 4.22) exhibe as seguintes informações:

- Vazão total da rede, que corresponde à soma de todas as demandas dos nós N1 a N7, cujo valor é 500,43 l/s;
- Quantidade de *boosters* inseridos na rede, que neste foi apenas um;
- Local onde o *booster* foi inserido, ou seja, trecho T9 (entre os nós N4 e N7);
- Vazão na origem da rede, que corresponde à soma das demandas dos nós que estão localizados a montante do *booster* (N1 a N6), cujo valor é 420,43 l/s;
- Vazão do *booster*, que corresponde à soma das demandas dos nós que estão localizados a jusante do *booster* (apenas N7), cujo valor é 80 l/s;

- Carga hidráulica do *booster*, que é sinônimo de “altura manométrica do *booster*”, corresponde à diferença da pressão requerida com a pressão no nó mais desfavorável do setor atendido pelo *booster* (conforme Equação 3.15). O valor da carga hidráulica do *booster* é 65,01 mca;
- Fator de atualização (Fa) é obtido pela Equação 3.5, cujo valor é 11,13;
- Gradiente energético do bombeamento na origem (G_e da Origem) é obtido pela Equação 3.3, cujo valor é 106.321,55 \$/m;
- Gradiente energético do *booster* (G_e do *Booster*) é obtido pela Equação 3.13, cujo valor é 16.996,83 \$/m.

A interface principal do TDO também disponibiliza o relatório detalhado do dimensionamento, que fica disposto do lado direito da tela, conforme ilustra a Figura 4.22. A Tabela 4.7 apresenta os resultados do relatório final do dimensionamento da rede *Grande Setor Expandida sem booster e com booster*.

Tabela 4.7 - Relatório do dimensionamento da rede Grande Setor Expandida

| | Sem <i>booster</i> | Com <i>booster</i> |
|---|--------------------|--------------------|
| Pressão mínima (mca) | 25 | 25 |
| Pressão máxima (mca) | 93,52 | 28,58 |
| Velocidade máxima (m/s) | 2,24 | 1,66 |
| ⁽¹⁾ Altura manométrica do bombeamento na origem (mca) | 78,93 | 13,99 |
| ⁽²⁾ Altura piezométrica do bombeamento na origem (mca) | 108,93 | 43,99 |
| ⁽³⁾ Custo de implantação das tubulações (\$) | 3.466.297,75 | 4.117.393,25 |
| ⁽⁴⁾ Custo energético do bombeamento na origem (\$) | 8.391.603,00 | 1.487.338,13 |
| ⁽⁵⁾ Custo energético do <i>booster</i> (\$) | --- | 1.104.882,50 |
| ⁽⁶⁾ Custo energético total (\$) | 8.391.603,00 | 2.592.220,63 |
| ⁽⁷⁾ Custo total da rede (\$) | 11.857.901,00 | 6.709.614,00 |

Onde:

- ⁽¹⁾ A altura manométrica do bombeamento na origem é obtida pela Equação 3.7;
- ⁽²⁾ A altura piezométrica do bombeamento na origem é obtida pela Equação 3.8;
- ⁽³⁾ O custo de implantação das tubulações é obtido pela Equação 3.6;
- ⁽⁴⁾ O custo energético do bombeamento na origem é obtido pela Equação 3.9, ou seja, “ G_e da Origem \times Altura manométrica do bombeamento na origem”;
- ⁽⁵⁾ O custo energético do *booster* é obtido pela Equação 3.12, ou seja, “ G_e do *Booster* \times Altura manométrica do *booster*”;
- ⁽⁶⁾ O custo energético total é a soma do custo energético do bombeamento na origem com o custo energético do *booster*;
- ⁽⁷⁾ O custo total da rede sem *booster* é obtido pela Equação 3.10; e o custo total da rede com *booster* é obtido pela Equação 3.11.

Ao confrontar os resultados dos dimensionamentos da rede *Grande Setor Expandida sem booster, e com booster*, observa-se que a altura piezométrica do bombeamento na origem baixou de 78,93 mca para 13,99 mca, o que implicou no aumento do custo de implantação das tubulações de \$3.466.297,75 na rede sem *booster* para \$4.117.393,25 na rede com *booster*, ou seja, houve um aumento de 18,78% no custo de implantação das tubulações da rede com *booster* em relação à rede sem *booster*.

O custo de implantação das tubulações é diretamente proporcional aos diâmetros obtidos para as tubulações dos trechos, e estes estão diretamente relacionados às perdas de carga²² nos trechos, que por vez estão relacionadas à altura manométrica do bombeamento. Ou seja, quanto menores os diâmetros das tubulações dos trechos, maiores serão as perdas de carga, e conseqüentemente, maior será a altura manométrica do bombeamento, a fim de vencer as perdas de carga. E quanto maiores os diâmetros das tubulações dos trechos, menores serão as perdas de carga, e conseqüentemente, menor será a altura manométrica do bombeamento.

Em contra partida, o custo energético atualizado do bombeamento na origem diminuiu 82,28% na rede com *booster* em relação à rede sem *booster*, passando de \$8.391.603,00 na rede sem *booster* para \$1.487.338,13 na rede com *booster*. Isto ocorreu em virtude da setorização da rede, visto que ao incluir um *booster*, a montante do trecho T9, houve uma considerável diminuição no peso da pressurização na origem da rede (de 78,93 para 13,99 mca). Na comparação final, a rede *Grande Setor Expandida com booster* foi a melhor opção do dimensionamento, pois proporcionou uma economia de \$5.148.287,00 (43,42%) em relação à mesma rede sem o *booster*.

A diferença de 43,42% encontrada nos custos do sistema *Grande Setor Expandida com e sem booster* ocorreu em virtude do cenário criado, em que a cota na extremidade da rede é muito superior em relação às cotas médias do sistema. Caso a cota do nó N7 fosse menor, a diferença nos custos da referida rede *com e sem booster* também seria menor.

Após os dimensionamentos realizados pelo programa TDO, foram obtidos os diâmetros ótimos dos nove trechos e as pressões dos sete nós (pontos de consumo) da rede *Grande Setor Expandida sem booster e com booster*, conforme ilustra a Figura 4.23 e Figura 4.24, respectivamente.

²² As perdas de carga são inversamente proporcionais aos diâmetros das tubulações ($H_f \propto LQ^2/D^5$), conforme Equação 2.11 (Darcy-Weisbach), definida no Capítulo 2 desta tese.

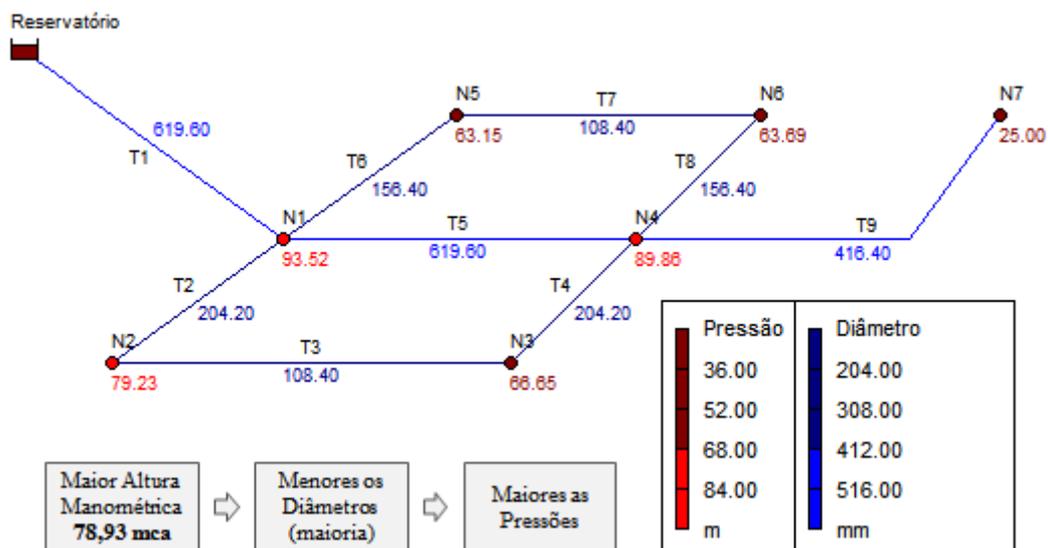


Figura 4.23 - Diâmetros e pressões da rede Grande Setor Expandida sem booster

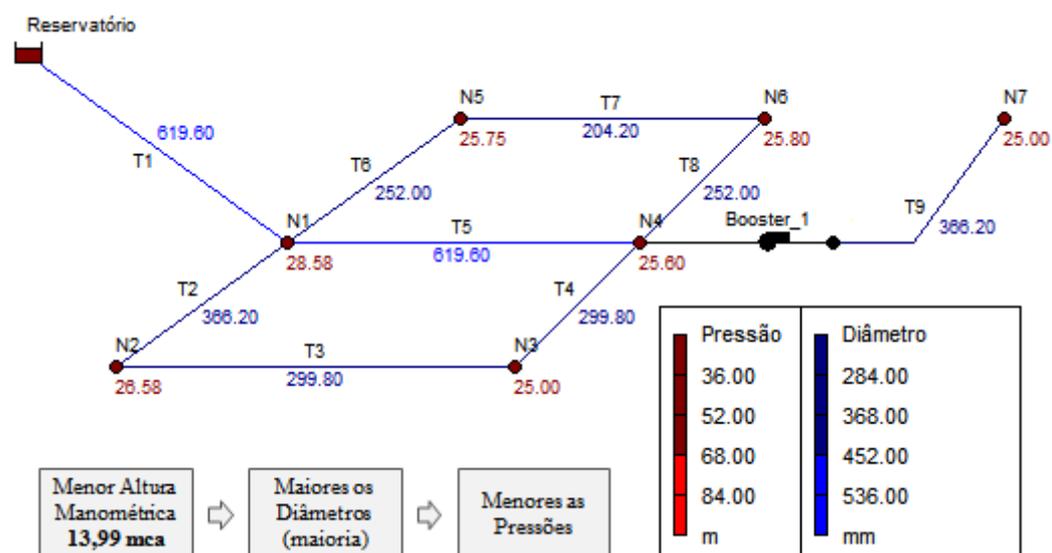


Figura 4.24 - Diâmetros e pressões da rede Grande Setor Expandida com booster

Para que a rede seja simulada corretamente no EPANET, faz-se necessário incluir a curva do *booster*. O programa TDO gera automaticamente a curva do *booster* mediante os dados da vazão requerida pelo setor atendido (Q_{setor}) e da altura manométrica do *booster* (carga hidráulica do *booster*).

O valor da carga hidráulica do *booster* na rede dimensionada *Grande Setor Expandida* é 65,01 mca, já a vazão do *booster* é 80 l/s. Segue na Figura 4.25 a curva do *booster*, este que foi inserido a montante do trecho T9.

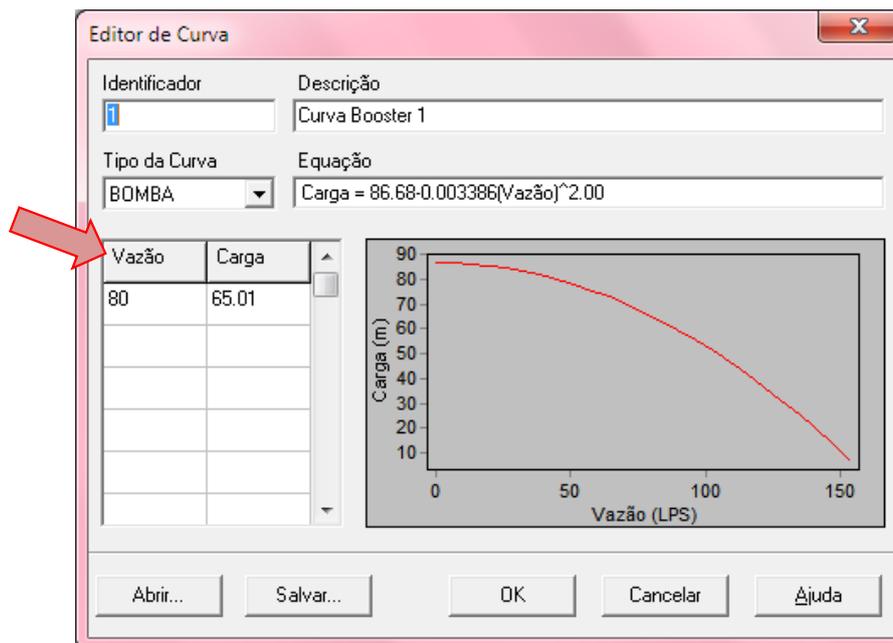


Figura 4.25 - Curva do booster inserido a montante do trecho 9 na rede Grande Setor

A Tabela 4.8 apresenta os diâmetros ótimos dos nove trechos e as pressões dos sete nós da rede *Grande Setor Expandida sem booster* e da rede *Grande Setor Expandida com booster*, obtidos após o dimensionamento realizado pelo programa TDO. Como se pode observar na Tabela 4.8, apenas os diâmetros dos trechos T1 e T5 coincidiram; o diâmetro do trecho T9 foi menor na rede com *booster*; e os demais diâmetros foram superiores na rede com *booster*.

No que se refere às pressões, na rede com *booster* todas as pressões ficaram próximas da mínima (25 mca) e todas elas foram menores que na rede sem *booster*.

Tabela 4.8 - Diâmetros e pressões da rede Grande Setor sem booster e com booster

| Diâmetros dos Trechos (mm) | Rede sem <i>booster</i> | Rede com <i>booster</i> | Pressões nos Nós (mca) | Rede sem <i>booster</i> | Rede com <i>booster</i> |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| T1 | 619,6 | 619,6 | N1 | 93,52 | 28,58 |
| T2 | 204,2 | 366,2 | N2 | 79,23 | 26,58 |
| T3 | 108,4 | 299,8 | N3 | 66,65 | 25,00 |
| T4 | 204,2 | 299,8 | N4 | 89,86 | 25,60 |
| T5 | 619,6 | 619,6 | N5 | 63,15 | 25,75 |
| T6 | 156,4 | 252,0 | N6 | 63,69 | 25,80 |
| T7 | 108,4 | 204,2 | N7 | 25,00 | 25,00 |
| T8 | 156,4 | 252,0 | Média | 68,73 | 26,04 |
| T9 | 416,4 | 366,2 | | | |

Como a altura manométrica do bombeamento na origem foi menor na rede *Grande Setor Expandida com booster* (13,99 mca), justifica-se a necessidade de diâmetros maiores para as tubulações dos trechos. Já na rede *Grande Setor Expandida sem booster* a altura manométrica do bombeamento na origem foi maior (78,93 mca), o que justifica os menores diâmetros nas tubulações dos trechos.

Embora a maioria dos diâmetros das tubulações dos trechos da rede com *booster* tenha sido maior que na rede sem *booster*, o que implicou em um maior custo de implantação das tubulações, o grande benefício da rede com *booster* foi que ela proporcionou pressões próximas das mínimas em todos os nós da rede. Enquanto que na rede sem *booster* as pressões ficaram em torno de 68,73 mca, na rede com *booster* a média das pressões foi de 26,04 mca. Portanto, os benefícios hidráulicos e energéticos para uma melhor operação da rede foram observados no dimensionamento otimizado da rede *Grande Setor Expandida com booster*, haja vista que este dimensionamento proporcionou a diminuição da pressão na rede, o que implica na diminuição de vazamentos, e conseqüentemente, das perdas de água e energia elétrica. Deste modo, a rede *Grande Setor Expandida com booster* forneceu um projeto mais adequado no contexto do uso racional e eficiente dos recursos hídricos.

Ao verificar os arquivos finais do dimensionamento gerados pelo programa TDO, “Rede_Dimensionada_Sem_Booster.inp” e “Rede_Dimensionada_Com_Booster.inp”, é possível analisar os resultados da simulação utilizando diferentes gráficos e tabelas através do EPANET. A fim de visualizar a rede segundo zonas de pressão, foram gerados gráficos de isolinhas para a rede *Grande Setor Expandida sem booster* e para a rede *Grande Setor Expandida com booster*, conforme ilustra a Figura 4.26 e Figura 4.27, respectivamente.

Ao analisar o gráfico de isolinhas utilizando o parâmetro “pressão”, verificou-se que a rede *Grande Setor Expandida sem booster* (Figura 4.26) possui zonas de alta pressão, indicadas pelas cores verde, amarela e vermelha²³. Enquanto que na rede *Grande Setor Expandida com booster* (Figura 4.27), só existe uma zona de pressão, que está indicada pela cor azul escuro, e esta possui pressões uniformes e próximas da mínima especificada no projeto, ou seja, 25 mca. Ao comparar os dois gráficos de isolinhas, fica evidenciado que a inclusão do *booster* na rede *Grande Setor Expandida* tornou a operação desta rede mais eficiente, além de ser a opção de dimensionamento mais econômica.

²³ A zona verde indica pressões entre 52 e 68 mca. A zona amarela indica pressões entre 68 e 84 mca. E a zona vermelha indica pressões acima de 84 mca.

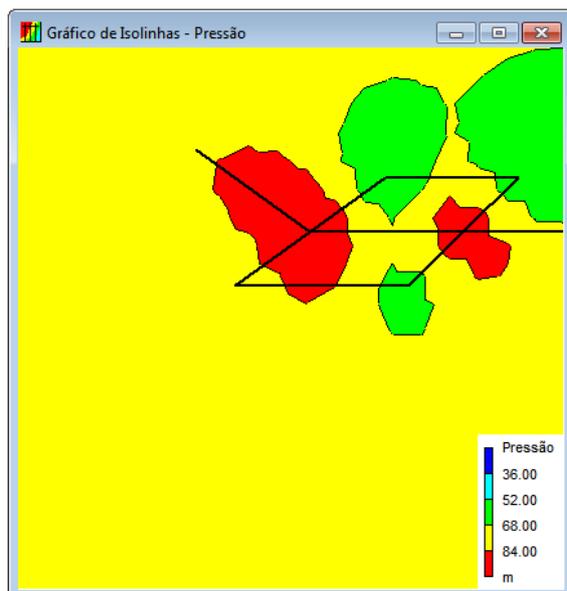


Figura 4.26 - Gráfico de isolinhas da rede Grande Setor Expandida sem booster

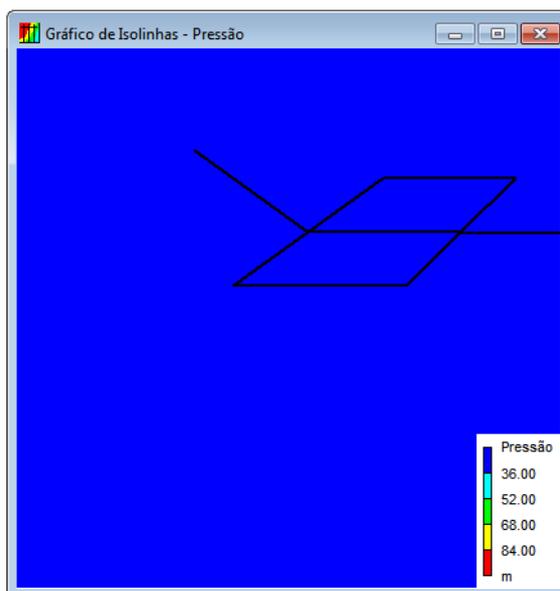


Figura 4.27 - Gráfico de isolinhas da rede Grande Setor Expandida com booster

Um teste foi realizado com a rede Grande Setor, a fim de constatar que o resultado do dimensionamento da rede de forma conjunta, ou seja, com a presença do *booster* (apresentado anteriormente, na Figura 4.24), é similar ao resultado do dimensionamento da rede particionada. A Figura 4.28 ilustra a rede Grande Setor particionada, representada pela parte 1 (trechos de 1 a 8; nós de 1 a 6) e parte 2 (trecho 9 e nó 7).

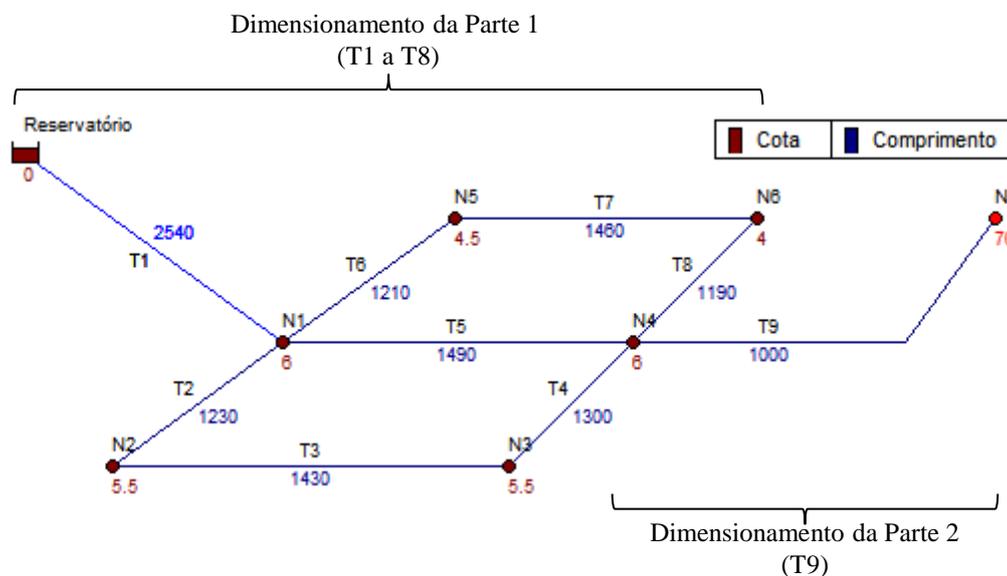


Figura 4.28 - Rede Grande Setor particionada

Na Figura 4.29 e Figura 4.30 são apresentados os relatórios dos dimensionamentos da rede Grande Setor Parte 1 e Parte 2, respectivamente. Ambos os dimensionamentos foram obtidos pelo programa TDO.

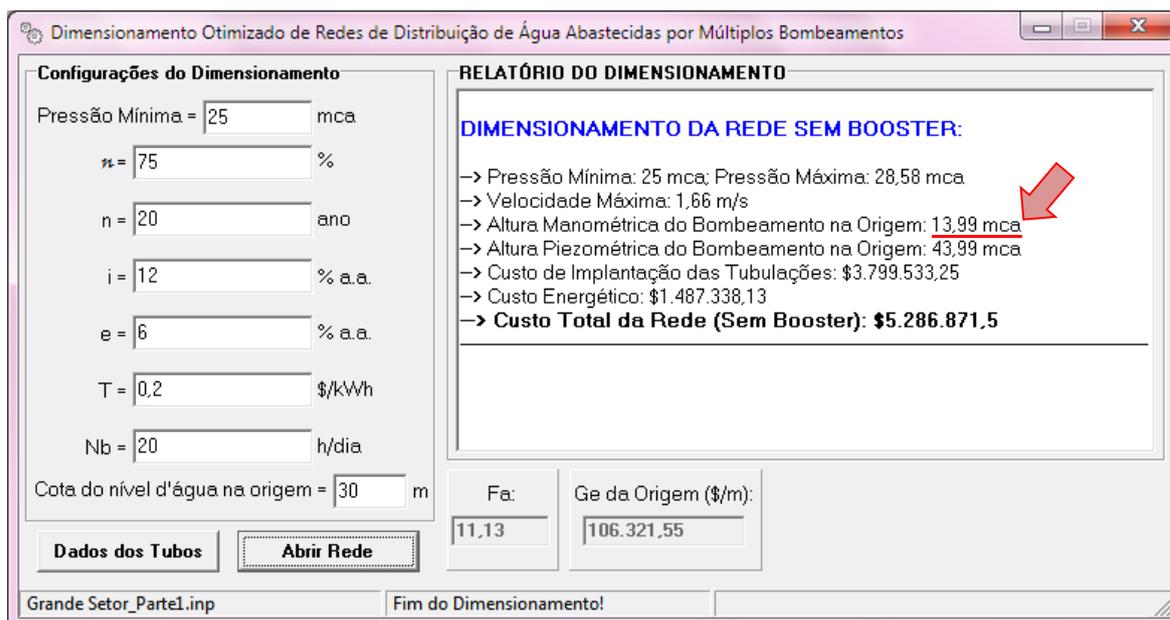


Figura 4.29 - Resultado do dimensionamento da rede Grande Setor (parte 1)

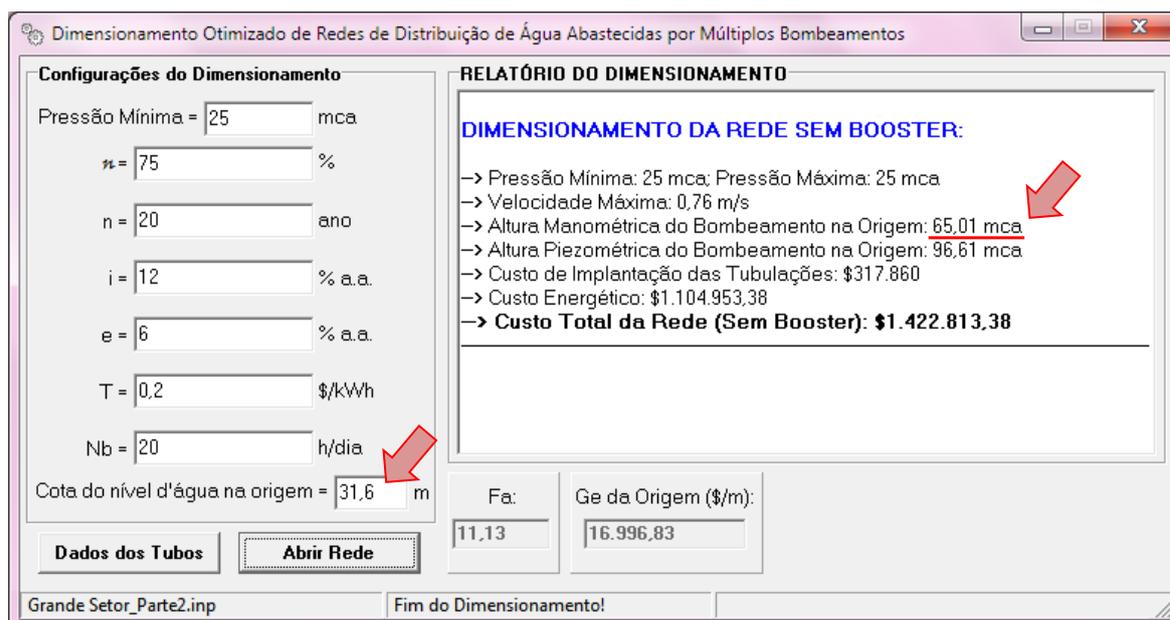


Figura 4.30 - Resultado do dimensionamento da rede Grande Setor (parte 2)

O valor 31,6 m, referente ao parâmetro “Cota do nível d’água na origem”, neste caso corresponde ao valor da Carga Hidráulica do nó de junção (nó 4), que foi obtido após o dimensionamento da rede Grande Setor Parte 1. Todas as variáveis e parâmetros adquiridos foram iguais, tanto no dimensionamento da rede Grande Setor de forma conjunta, quanto no dimensionamento de forma particionada. Este resultado era esperado, caso contrário a metodologia do TDO estaria incoerente.

4.3.2 Estudo de Caso – Rede R9 adaptada

A rede R9²⁴ faz parte do bairro do Bessa, localizado na cidade de João Pessoa/Paraíba, Brasil, e foi projetada em 1982 pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA). Para este estudo de caso, a rede R9 sofreu uma adaptação, passando a ser setorizada. A rede *R9 Adaptada* possui 63 nós (N1 a N63) e 74 trechos (T1 a T74), além do reservatório na origem, conforme ilustre a Figura 4.31.

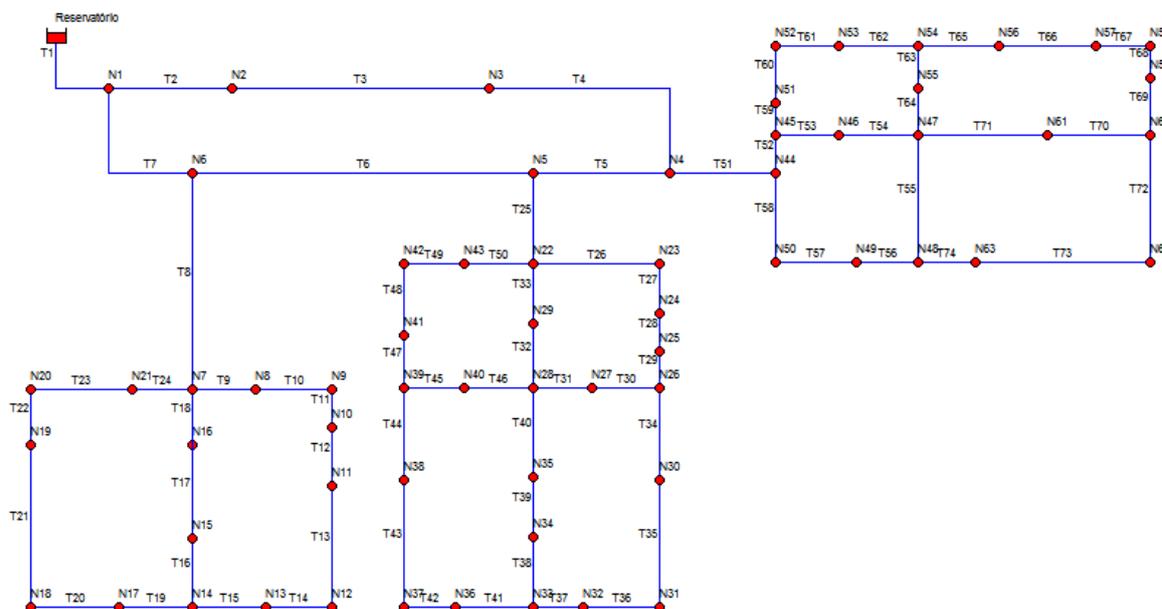


Figura 4.31 - Traçado da rede R9 adaptada e identificadores dos nós e trechos

Deste ponto em diante, a rede *R9 adaptada* será identificada nesta tese apenas por rede R9. A referida rede possui um setor principal e três setores secundários (A, B e C), conforme ilustra a Figura 4.32. Os valores das 63 cotas dos nós variam de 2,5 a 6 m e estão indicados de vermelho, já os comprimentos dos 74 trechos variam de 110 a 2.540 m e estão indicados pela cor azul.

Na Figura 4.32 os identificadores dos nós (N1 a N63) e dos trechos (T1 a T74) foram ocultados para facilitar a visualização dos valores das cotas dos nós e comprimento dos trechos.

No APÊNDICE C consta a tabela completa com todos os valores das cotas e demandas (consumo base) dos nós e comprimentos dos trechos da rede R9.

²⁴ Dentre alguns dos trabalhos que utilizaram a rede completa do Bessa (R9), ou parte dela, tem-se: Leal (1995), Formiga (1999), Lopes (2002), Silva (2003), Carvalho (2007) e Costa (2010b).

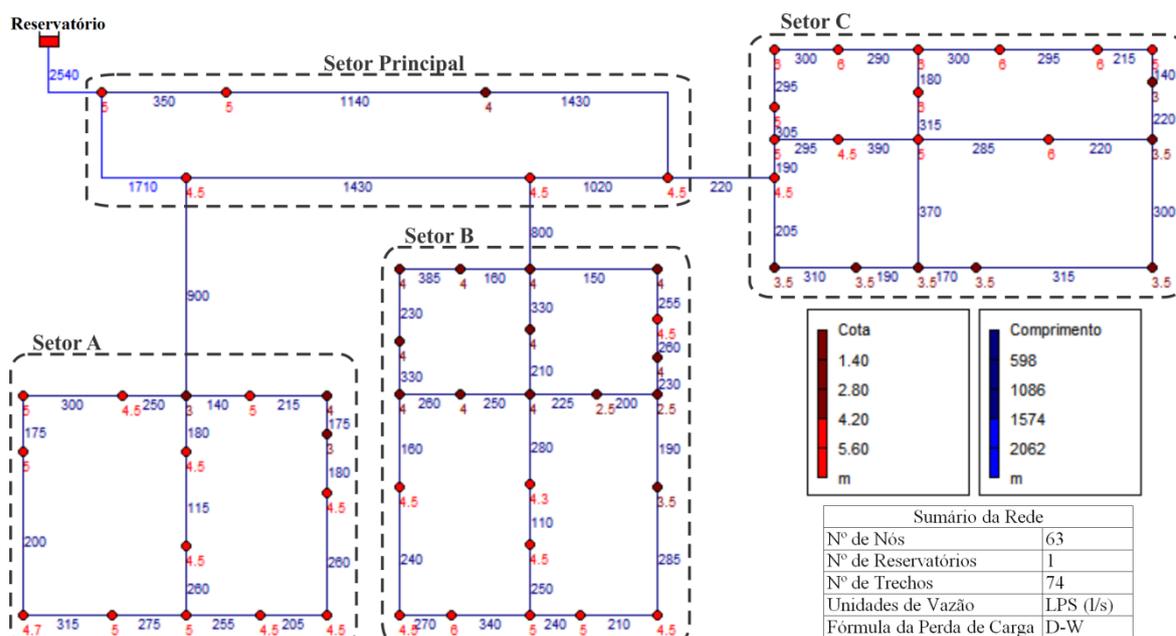


Figura 4.32 - Esquema da rede R9 com cotas dos nós e os comprimentos dos trechos

A unidade de vazão adotada pela rede R9 é LPS (l/s) e a perda de carga nos trechos é calculada pela fórmula de Darcy-Weisbach, conforme foi apresentada no Capítulo 2, na Equação 2.9.

A rede R9 foi dimensionada utilizando o programa TDO, sendo realizados dois dimensionamentos que visam comparar os resultados e o comportamento da rede. No primeiro dimensionamento a rede dispõe de um único bombeamento, o sistema principal de impulsão na origem para alimentar toda a rede, e não há bombeamentos secundários (*boosters*). No segundo dimensionamento, a rede dispõe de múltiplos bombeamentos, ou seja, o bombeamento na origem e três bombeamentos secundários, que são três *boosters* a montante dos setores A, B e C.

O processo de dimensionamento de sistemas com múltiplos bombeamentos, usando o programa TDO, inicia-se com o preenchimento dos parâmetros disposto do lado esquerdo da *interface*.

Os parâmetros atribuídos para o dimensionamento da rede R9 são: pressão mínima (25 mca); rendimento esperado do conjunto motor-bomba (75 %); vida útil, ou alcance, do projeto (20 anos); taxa de juros anual (12% ao ano); taxa de aumento anual da energia elétrica (6% ao ano); custo unitário médio da tarifa de energia elétrica (0,20 \$/kWh); número de horas diárias de bombeamento (20 h/dia) e cota do nível d'água na origem (30 m).

Em seguida, determina-se a tabela de tubos que se deseja utilizar no processo de dimensionamento. Para a rede R9 utilizou-se a tabela de tubos apresentada na Figura 4.33, onde a mesma contém nove valores de diâmetros, variando de 53,4 até 489,4 mm, com suas respectivas rugosidades e custos por metro de tubulação. Os valores da rugosidade estão relacionados à fórmula utilizada para perda de carga, que neste caso é a de Darcy-Weisbach (apresentada no capítulo 2 – Equação 2.11).

| Diâmetro | Rugosidade | Tipo | Custo (\$/m) |
|----------|------------|------|--------------|
| 53,4 | 0,02 | PVC | 24,16 |
| 75,6 | 0,02 | PVC | 32,12 |
| 108,4 | 0,02 | PVC | 47,09 |
| 156,4 | 0,02 | PVC | 63,8 |
| 204,2 | 0,02 | PVC | 87,62 |
| 252 | 0,02 | PVC | 128,59 |
| 299,8 | 0,02 | PVC | 162,24 |
| 394,6 | 0,02 | PVC | 257,09 |
| 489,4 | 0,02 | PVC | 369,44 |

Figura 4.33 - Dados da tabela de tubos (perda de carga D-W).

Após criação da tabela de tubos, deve-se selecionar o arquivo da rede modelada no EPANET, que neste caso é “Rede_R9_Setorizada.inp”.

Em seguida, o programa TDO questiona se o usuário deseja inserir um ou mais *boosters* na rede. Como neste estudo de caso pretende-se dimensionar a rede R9 com múltiplos bombeamentos, então a resposta é “Sim”. Foram inseridos três *boosters* na rede R9, a montante dos setores A, B e C.

Por fim, o programa TDO executa automaticamente o dimensionamento da rede R9, e ao término do processamento, apresenta o relatório final do dimensionamento, conforme ilustra a Figura 4.34.

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 $n = 75$ %
 $n = 20$ cm
 $i = 12$ % a.a.
 $e = 6$ % a.a.
 $T = 0,2$ \$/kWh
 $N_b = 20$ h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 458,38 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 3
 Local do Booster (a montante do setor): A, B e C
 Vazão na Origem: 91,04 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 55,39; (2) 89,78; (3) 222,17 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 3; (2) 6,21; (3) 5,81 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 36,3 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 30,6 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 60,6 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.700.612,5
 → Custo Energético: \$2.980.502,5
 → **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$7.681.115**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 31,54 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 25,84 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 55,84 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.450.663
 → Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$2.516.545,5
 → Custo Energético (Booster): \$428.081,28
 → Custo Energético Total: \$2.944.626,78
 → **Custo Total da Rede (Com Booster): \$7.395.290**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$285.825 (3,72%) em relação a rede sem booster

| Fa: | Ge da Origem (\$/m): | Ge do Booster (\$/m): |
|-------|----------------------|---|
| 11,13 | 97.388,23 | (1) 11.767,33; (2) 19.075,54; (3) 47.203,18 |

Rede_R9_Setorizada.inp Fim do Dimensionamento!

Figura 4.34 - Resultado do dimensionamento da rede R9 com setores A, B e C

A interface principal do TDO exibe as seguintes informações:

- Vazão total da rede, que corresponde à soma de todas as demandas dos nós N1 a N63, cujo valor é 458,38 l/s;
- Quantidade de *boosters* inseridos na rede: três *boosters*;
- Local onde os *boosters* foram inseridos: a montante dos setores A, B e C;
- Vazão na origem da rede, que corresponde à soma das demandas dos nós que estão localizados no Setor Principal (N1 a N6), cujo valor é 91,04 l/s;
- Vazão do booster_1, que corresponde à soma das demandas dos nós que estão localizados no setor A (N7 a N21), cujo valor é 55,39 l/s;
- Vazão do booster_2, que corresponde à soma das demandas dos nós que estão localizados no setor B (N22 a N43), cujo valor é 89,78 l/s;
- Vazão do booster_3, que corresponde à soma das demandas dos nós que estão localizados no setor C (N44 a N63), cujo valor é 222,17 l/s;

- Carga hidráulica do *booster* (sinônimo de “altura manométrica do *booster*”), que corresponde à diferença da pressão requerida com a pressão no nó mais desfavorável do setor atendido pelo *booster* (Equação 3.15). O valor da carga hidráulica do *booster_1* é 3 mca; *booster_2* é 6,21 mca; e *booster_3* é 5,81 mca.
- Fator de atualização (Fa) é obtido pela Equação 3.5, cujo valor é 11,13;
- Gradiente energético do bombeamento na origem (G_e da Origem) é obtido pela Equação 3.3, cujo valor é 97.388,23 \$/m;
- Gradiente energético do *booster* (G_e do *Booster*) é obtido pela Equação 3.13. Para o *booster_1* o G_e é 11.767,33 \$/m; para o *booster_2* é 19.075,54 \$/m; e para o *booster_3* é 47.203,18 \$/m.

A interface principal do TDO também disponibiliza o relatório detalhado do dimensionamento, que fica disposto do lado direito da tela (Figura 4.34). A Tabela 4.9 apresenta os resultados do relatório final do dimensionamento da rede *R9 sem booster e com boosters*.

Tabela 4.9 - Relatório do dimensionamento da rede R9 sem e com boosters

| | Sem <i>booster</i> | Com <i>boosters</i> |
|---|--------------------|---------------------|
| Pressão mínima (mca) | 25 | 25 |
| Pressão máxima (mca) | 36,30 | 31,54 |
| Velocidade máxima (m/s) | 2,44 | 2,44 |
| ⁽¹⁾ Altura manométrica do bombeamento na origem (mca) | 30,60 | 25,84 |
| ⁽²⁾ Altura piezométrica do bombeamento na origem (mca) | 60,60 | 55,84 |
| ⁽³⁾ Custo de implantação das tubulações (\$) | 4.700.612,50 | 4.450.663,00 |
| ⁽⁴⁾ Custo energético do bombeamento na origem (\$) | 2.980.502,50 | 2.516.545,50 |
| ⁽⁵⁾ Custo energético dos <i>boosters</i> (\$) | ---- | 428.081,28 |
| ⁽⁶⁾ Custo energético total (\$) | 2.980.502,50 | 2.944.626,78 |
| ⁽⁷⁾ Custo total da rede (\$) | 7.681.115,00 | 7.395.290,00 |

Onde:

- ⁽¹⁾ A altura manométrica do bombeamento na origem é obtida pela Equação 3.7;
- ⁽²⁾ A altura piezométrica do bombeamento na origem é obtida pela Equação 3.8;
- ⁽³⁾ O custo de implantação das tubulações é obtido pela Equação 3.6;
- ⁽⁴⁾ O custo energético do bombeamento na origem é obtido pela Equação 3.9, ou seja, “ G_e da Origem \times Altura manométrica do bombeamento na origem”;
- ⁽⁵⁾ O custo energético de cada *boosters* é obtido pela Equação 3.12, ou seja, “ G_e do *Booster* \times Altura manométrica do *booster*”;
- ⁽⁶⁾ O custo energético total é a soma do custo energético do bombeamento na origem com o custo energético dos *boosters*;
- ⁽⁷⁾ O custo total da rede sem *booster* é obtido pela Equação 3.10; e o custo total da rede com *booster* é obtido pela Equação 3.11.

A altura otimizada do reservatório é determinada pelo programa TDO, e seu valor é indicado no relatório do dimensionamento, através da variável “Altura Manométrica do Bombeamento na Origem”. Soma-se o valor da cota do terreno (também chamada de cota do nível d’água na origem) com o valor da altura manométrica, resultando na altura final otimizada do reservatório, ou seja, na altura piezométrica do bombeamento na origem (60,6 mca para rede *R9 sem booster*; e 55,84 mca para rede *R9 com boosters*).

Ao confrontar os resultados dos dimensionamentos da rede *R9 sem booster e com booster*, observa-se que todos os parâmetros (pressão, H_{man} , H_{piezo} , custo de implantação, custo energético e custo total da rede) foram menores na rede *R9 com booster*, proporcionando melhores resultados (custos) e tornando a operação da rede R9 mais adequada com relação às condições hidráulicas e energéticas. Entretanto, a diferença foi pequena entre os valores dos parâmetros da rede *R9 sem e com booster*. Desta forma, a rede R9 dimensionada com três *boosters* obteve uma economia no custo total de \$285.825,00 (3,72%) em comparação com a rede R9 *sem boosters*, sendo considerada a melhor opção do dimensionamento.

A Figura 4.35 ilustra o esquema da rede R9 com três *boosters*, esta que foi a melhor opção do dimensionamento apontada pelo TDO. Os valores dos diâmetros otimizados das tubulações de cada trecho estão indicados de azul; e os valores das pressões em cada nó estão indicados de vermelho. Os identificadores dos nós (N1 a N63) foram ocultados para facilitar a visualização dos dados.

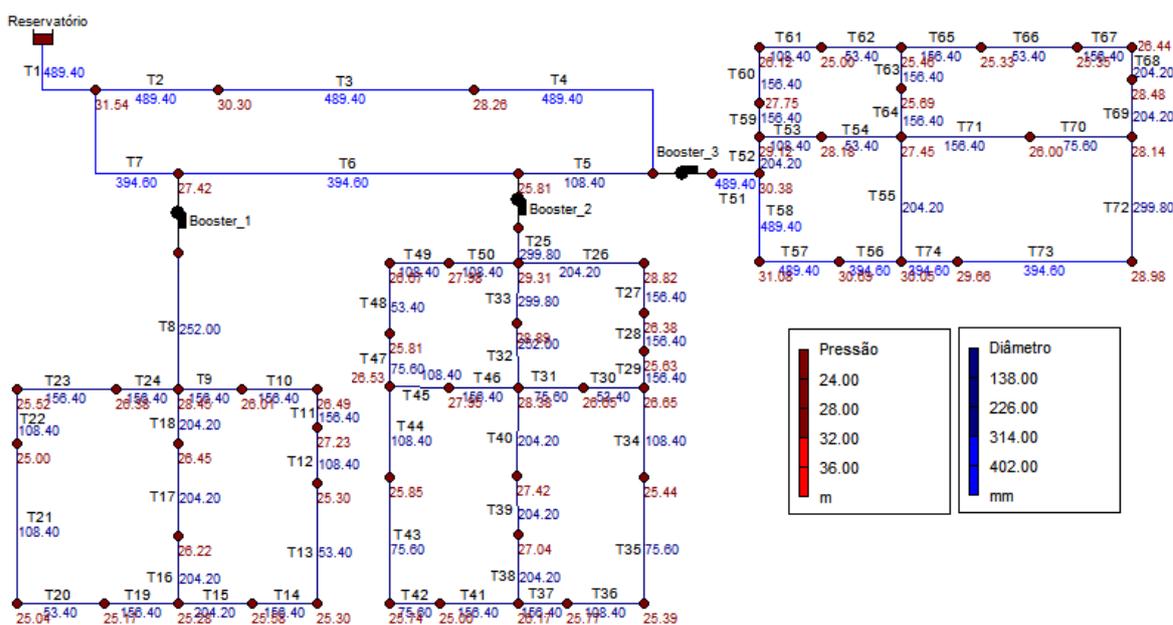


Figura 4.35 - Rede R9 dimensionada com três boosters

A Tabela 4.10 apresenta os diâmetros ótimos das tubulações dos 74 trechos da rede *R9 sem booster e com booster*, obtidos após os dimensionamentos realizados pelo programa TDO.

Tabela 4.10 - Diâmetros otimizados da rede R9 sem booster e com boosters

| Identificador do Trecho | Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> | Identificador do Trecho | Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> |
|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| T1 | 489,40 | 489,40 | T38 | 252,00 | 204,20 |
| T2 | 489,40 | 489,40 | T39 | 252,00 | 204,20 |
| T3 | 489,40 | 489,40 | T40 | 252,00 | 204,20 |
| T4 | 489,40 | 489,40 | T41 | 156,40 | 156,40 |
| T5 | 299,80 | 108,40 | T42 | 108,40 | 75,60 |
| T6 | 299,80 | 394,60 | T43 | 75,60 | 75,60 |
| T7 | 394,60 | 394,60 | T44 | 108,40 | 108,40 |
| T8 | 252,00 | 252,00 | T45 | 156,40 | 108,40 |
| T9 | 156,40 | 156,40 | T46 | 156,40 | 156,40 |
| T10 | 156,40 | 156,40 | T47 | 75,60 | 75,60 |
| T11 | 156,40 | 156,40 | T48 | 53,40 | 53,40 |
| T12 | 108,40 | 108,40 | T49 | 108,40 | 108,40 |
| T13 | 53,40 | 53,40 | T50 | 108,40 | 108,40 |
| T14 | 156,40 | 156,40 | T51 | 489,40 | 489,40 |
| T15 | 204,20 | 204,20 | T52 | 204,20 | 204,20 |
| T16 | 204,20 | 204,20 | T53 | 108,40 | 108,40 |
| T17 | 204,20 | 204,20 | T54 | 53,40 | 53,40 |
| T18 | 204,20 | 204,20 | T55 | 252,00 | 204,20 |
| T19 | 156,40 | 156,40 | T56 | 489,40 | 394,60 |
| T20 | 53,40 | 53,40 | T57 | 489,40 | 489,40 |
| T21 | 108,40 | 108,40 | T58 | 489,40 | 489,40 |
| T22 | 156,40 | 108,40 | T59 | 204,20 | 156,40 |
| T23 | 156,40 | 156,40 | T60 | 156,40 | 156,40 |
| T24 | 156,40 | 156,40 | T61 | 156,40 | 108,40 |
| T25 | 394,60 | 299,80 | T62 | 53,40 | 53,40 |
| T26 | 204,20 | 204,20 | T63 | 156,40 | 156,40 |
| T27 | 204,20 | 156,40 | T64 | 204,20 | 156,40 |
| T28 | 156,40 | 156,40 | T65 | 156,40 | 156,40 |
| T29 | 156,40 | 156,40 | T66 | 75,60 | 53,40 |
| T30 | 53,40 | 53,40 | T67 | 156,40 | 156,40 |
| T31 | 75,60 | 75,60 | T68 | 204,20 | 204,20 |
| T32 | 299,80 | 252,00 | T69 | 204,20 | 204,20 |
| T33 | 299,80 | 299,80 | T70 | 75,60 | 75,60 |
| T34 | 108,40 | 108,40 | T71 | 156,40 | 156,40 |
| T35 | 75,60 | 75,60 | T72 | 394,60 | 299,80 |
| T36 | 108,40 | 108,40 | T73 | 489,40 | 394,60 |
| T37 | 156,40 | 156,40 | T74 | 489,40 | 394,60 |

Como se pode observar na Tabela 4.10, os diâmetros das tubulações de vinte trechos (T5, T6, T22, T25, T27, T32, T38, T39, T40, T42, T45, T55, T56, T59, T61, T64, T66, T72, T73 e T74) foram diferentes nos dimensionamentos da rede com e sem *booster*. Isto ocorre em virtude do funcionamento hidráulico ser diferente na rede com e sem *booster*, conseqüentemente seus dimensionamentos também serão distintos.

A Tabela 4.11 apresenta as pressões dos 63 nós (pontos de consumo) da rede R9 sem *booster* e com *booster*, obtidos após os dimensionamentos pelo programa TDO.

Tabela 4.11 - Pressões da rede R9 sem booster e com boosters

| Identificador do Nó | Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> | Identificador do Nó | Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> |
|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| N1 | 36,30 | 31,54 | N33 | 26,33 | 26,17 |
| N2 | 34,93 | 30,30 | N34 | 26,97 | 27,04 |
| N3 | 32,54 | 28,26 | N35 | 27,24 | 27,42 |
| N4 | 28,89 | 25,00 | N36 | 25,13 | 25,00 |
| N5 | 28,75 | 25,81 | N37 | 26,44 | 25,74 |
| N6 | 33,07 | 27,42 | N38 | 26,46 | 25,85 |
| N7 | 31,10 | 28,45 | N39 | 27,10 | 26,53 |
| N8 | 28,67 | 26,01 | N40 | 27,35 | 27,95 |
| N9 | 29,14 | 26,49 | N41 | 25,94 | 25,81 |
| N10 | 29,89 | 27,23 | N42 | 26,12 | 26,67 |
| N11 | 27,96 | 25,30 | N43 | 27,22 | 27,98 |
| N12 | 27,97 | 25,30 | N44 | 28,46 | 30,38 |
| N13 | 28,25 | 25,58 | N45 | 27,23 | 29,12 |
| N14 | 27,95 | 25,28 | N46 | 26,59 | 28,18 |
| N15 | 28,89 | 26,22 | N47 | 26,68 | 27,45 |
| N16 | 29,10 | 26,45 | N48 | 28,54 | 30,05 |
| N17 | 27,85 | 25,17 | N49 | 28,76 | 30,69 |
| N18 | 28,03 | 25,04 | N50 | 29,16 | 31,08 |
| N19 | 28,03 | 25,00 | N51 | 26,85 | 27,75 |
| N20 | 28,13 | 25,52 | N52 | 25,20 | 26,12 |
| N21 | 29,01 | 26,38 | N53 | 25,00 | 25,00 |
| N22 | 28,41 | 29,31 | N54 | 25,25 | 25,46 |
| N23 | 27,90 | 28,82 | N55 | 25,47 | 25,69 |
| N24 | 26,85 | 26,38 | N56 | 25,12 | 25,33 |
| N25 | 26,01 | 25,63 | N57 | 25,13 | 25,35 |
| N26 | 26,97 | 26,65 | N58 | 26,22 | 26,44 |
| N27 | 26,70 | 26,65 | N59 | 28,26 | 28,48 |
| N28 | 27,78 | 28,38 | N60 | 27,92 | 28,14 |
| N29 | 28,00 | 28,89 | N61 | 25,37 | 26,00 |
| N30 | 25,75 | 25,44 | N62 | 28,15 | 28,98 |
| N31 | 25,60 | 25,39 | N63 | 28,40 | 29,66 |
| N32 | 25,94 | 25,77 | | | |

No que se refere às pressões nos nós, tanto no dimensionamento da rede R9 com *booster*, quanto no dimensionado da rede R9 sem *booster*, as pressões ficaram na média de 27 mca, bem próximas da mínima requerida (25 mca).

Para que a rede seja simulada corretamente no EPANET, faz-se necessário associar a cada *booster* a sua referida curva. O programa TDO gera automaticamente a curva do *booster* mediante os dados da vazão requerida pelo setor atendido (Q_{setor}) e da altura manométrica do *booster* (carga hidráulica do *booster*). O valor da carga hidráulica do booster_1 na rede dimensionada R9 é 3 mca, já a vazão do booster_1 é 55,39 l/s; para o booster_2 o valor da carga hidráulica é 6,21 mca e da vazão é 89,78 l/s; para o booster_3 o valor da carga hidráulica é 5,81 mca e da vazão é 222,17 l/s. Segue na Figura 4.36 as curvas dos três *boosters* inseridos a montante dos setores A, B e C da rede R9.

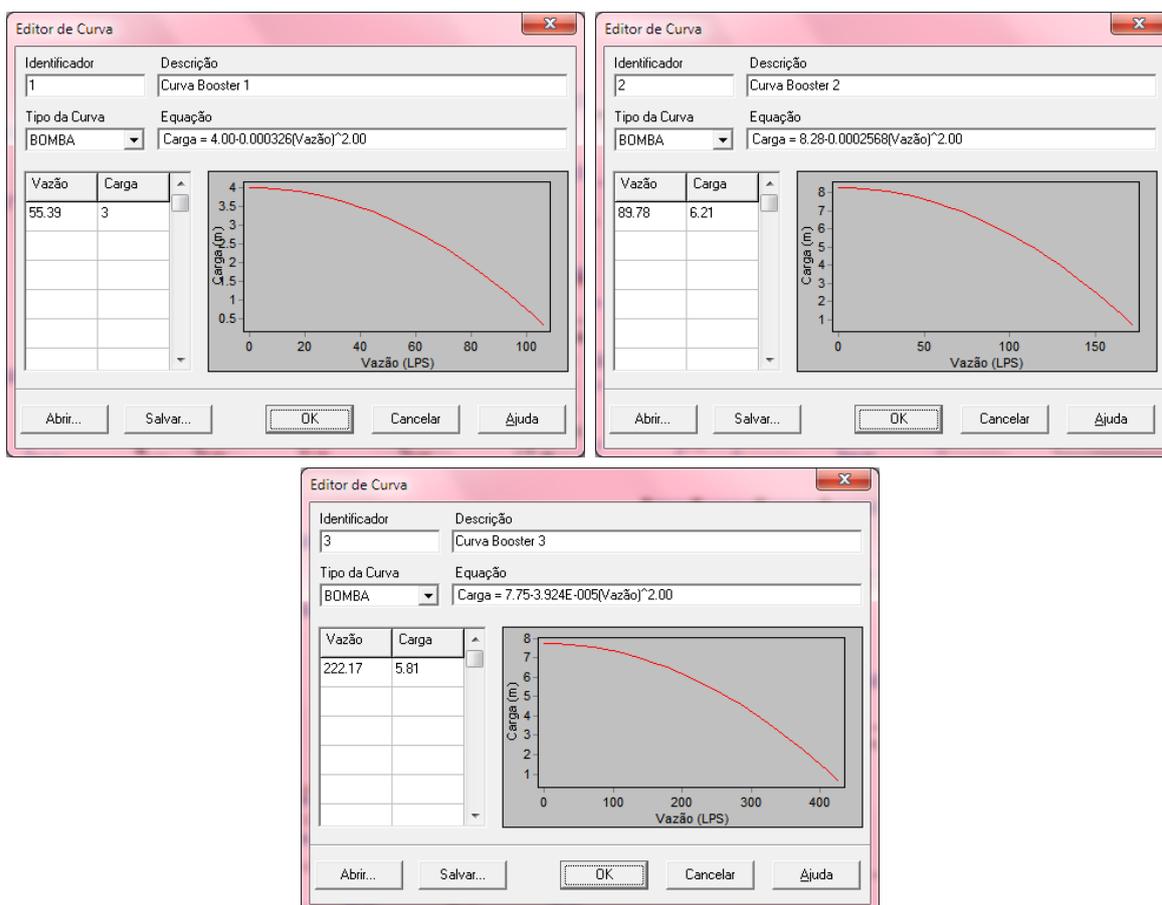


Figura 4.36 - Curva dos boosters 1, 2 e 3 inseridos na rede R9

O simulador hidráulico EPANET permite, por meio do arquivo *inp* gerado após os dimensionamentos realizados pelo programa TDO, a visualização dos parâmetros da rede

em vários formatos, incluindo mapas com codificações coloridas, tabelas de dados, gráficos de séries temporais, perfis, frequência e gráficos de isolinhas.

O gráfico de isolinhas mostra o mapa segundo zonas onde os valores de um parâmetro se inserem em intervalos específicos. A Figura 4.37 apresenta o gráfico de isolinhas referente ao parâmetro pressão da rede R9 com três *boosters* a montante dos setores A, B e C. Conforme pode ser observado na Figura 4.37, a rede R9 dimensionada com três *booster* encontra-se em duas zonas de pressão (pressões inferiores a 32 mca). Já a rede R9 dimensionada sem *boosters* encontra-se em quatro zonas de pressão, conforme ilustra a Figura 4.38. Neste caso, a rede R9 dimensionada com *booster* se comportou melhor, ou seja, com maior uniformidade de pressão.

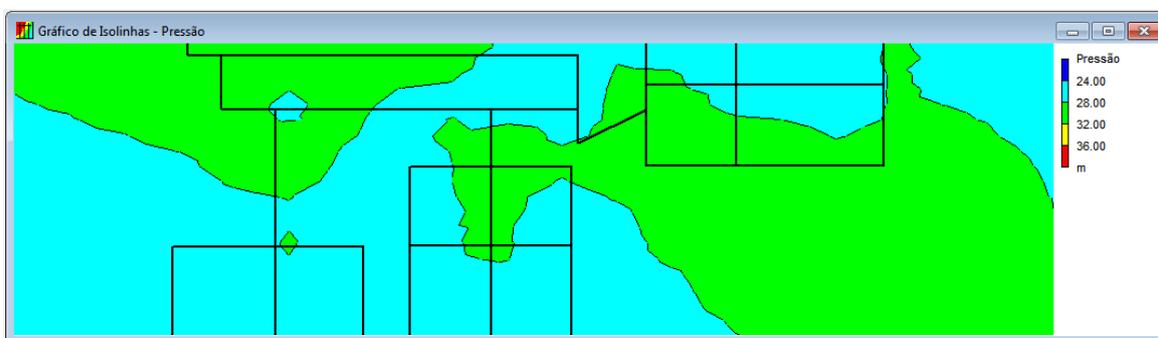


Figura 4.37 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 com boosters

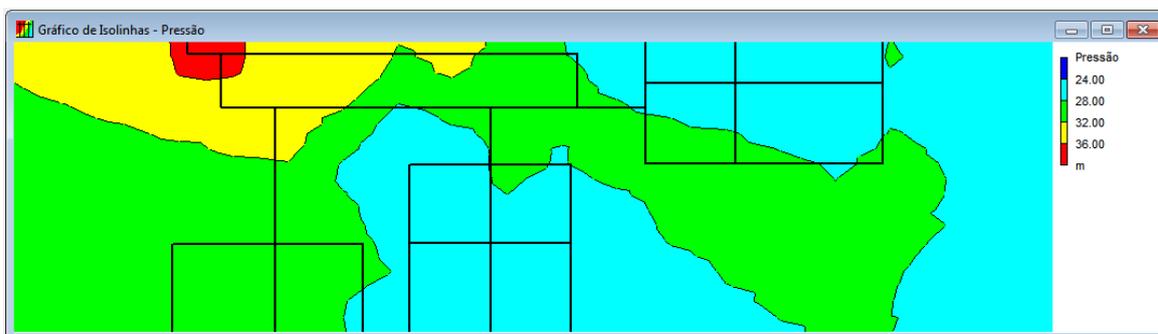


Figura 4.38 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 sem boosters

4.3.2.1. Análise de Sensibilidade para Setores com Cotas Uniformes

A fim de avaliar em qual situação a inclusão de *booster* na rede torna o dimensionamento mais otimizado, foi feita uma análise de sensibilidade, que consiste em aumentar gradativamente, de maneira uniforme, as cotas dos nós dos três setores (A, B e C), visando comparar os resultados dos dimensionamentos. Todos os relatórios dos dimensionamentos da rede R9 utilizados nesta análise de sensibilidade encontram-se no

APÊNDICE D. Este estudo permite constatar que à medida que as cotas são elevadas, a utilização de *boosters* tende-se a ser mais vantajoso.

A primeira coluna da Tabela 4.12 apresenta os valores que foram adicionados às cotas dos 63 nós pertencentes aos setores A, B e C. Foram realizados nove dimensionamentos (ver APÊNDICE D), sendo o primeiro sem acréscimo (0 m) no valor das cotas dos nós e o último, com acréscimo de 300 m em cada cota do nó dos setores A, B e C. Na segunda coluna são apresentadas as médias das cotas desses 63 nós. A terceira coluna mostra os valores das economias obtidas pela rede com múltiplos bombeamentos, na origem e secundários (*boosters*), ao compará-la à rede com único bombeamento, apenas na origem. A economia é dada em unidade monetária (\$). A última coluna expõe os valores das economias, em porcentagem.

Após análises dos dados, pode-se constatar que ao aumentar as cotas dos três setores, a vantagem em incluir os *boosters* na rede também aumenta, conforme mostram a Tabela 4.12 e Figura 4.39.

Tabela 4.12 - Economia ao aumentar as cotas dos setores A, B e C da Rede R9

| Acréscimo das cotas dos setores A, B e C (m) | Média das cotas dos setores A, B e C (m) | Economia (rede com <i>boosters</i>) | Porcentagem |
|--|--|--------------------------------------|-------------|
| 0 | 4,44 | \$285.825,00 | 3,72% |
| 10 | 14,44 | \$479.247,00 | 5,54% |
| 20 | 24,44 | \$672.669,00 | 6,99% |
| 30 | 34,44 | \$866.091,00 | 8,17% |
| 40 | 44,44 | \$1.059.512,00 | 9,15% |
| 50 | 54,44 | \$1.252.934,00 | 9,98% |
| 100 | 104,44 | \$2.220.042,00 | 12,74% |
| 200 | 204,44 | \$4.154.256,00 | 15,30% |
| 300 | 304,44 | \$6.088.476,00 | 16,50% |

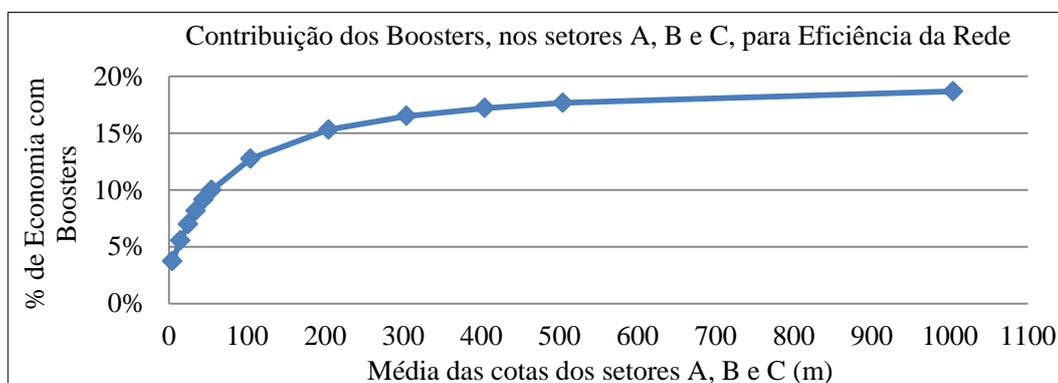


Figura 4.39 - Economia versus aumento das cotas dos setores A, B e C da rede R9

Ao analisar os relatórios dos nove dimensionamentos da rede *R9 sem booster* (ver APÊNDICE D), verificou-se que apenas três parâmetros não sofreram alterações, enquanto que os demais parâmetros do relatório sofreram alterações ao logo dos dimensionamentos, ver Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Parâmetros dos dimensionamentos da rede R9 sem booster

| Não sofreram alterações | Sofreram alterações |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Pressão Mínima (25 mca) - Velocidade Máxima (2,44 m/s) - Custo de Implantação das Tubulações (\$4.700.612,50) | <ul style="list-style-type: none"> - Pressão Máxima* - H_{man} do Bombeamento na Origem* - H_{piezo} do Bombeamento na Origem* - Custo Energético* - Custo Total da Rede* <p>*Valores apresentados na Tabela 4.14</p> |

Tabela 4.14 - Parâmetros da rede R9 sem booster que sofreram alterações

| Acréscimo das cotas dos setores A, B e C (m) | Pressão Máxima (mca) | H_{man} na origem (mca) | H_{piezo} na origem (mca) | Custo Energético | Custo Total |
|--|----------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------|--------------|
| 0 | 36,3 | 30,6 | 60,6 | \$2.980.502,5 | \$7.681.115 |
| 10 | 46,3 | 40,6 | 70,6 | \$3.954.384,75 | \$8.654.997 |
| 20 | 56,3 | 50,6 | 80,6 | \$4.928.267 | \$9.628.880 |
| 30 | 66,3 | 60,6 | 90,6 | \$5.902.149 | \$10.602.762 |
| 40 | 76,3 | 70,6 | 100,6 | \$6.876.031 | \$11.576.644 |
| 50 | 86,3 | 80,6 | 110,6 | \$7.849.913 | \$12.550.526 |
| 100 | 136,3 | 130,6 | 160,6 | \$12.719.323 | \$17.419.936 |
| 200 | 236,3 | 230,6 | 260,6 | \$22.458.144 | \$27.158.756 |
| 300 | 336,3 | 330,6 | 360,6 | \$32.196.966 | \$36.897.580 |

Enquanto que ao analisar os relatórios dos nove dimensionamentos da rede R9 com *booster* nos setores A, B e C (ver APÊNDICE D), verificou-se que seis parâmetros não sofreram alterações em seus valores, enquanto três parâmetros sofreram alterações ao logo dos dimensionamentos, conforme mostra a Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Parâmetros dos dimensionamentos da rede R9 com boosters

| Não sofreram alterações | Sofreram alterações |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Pressão Mínima (25 mca) - Pressão Máxima (31,54 mca) - Velocidade Máxima (2,44 m/s) - Altura Manométrica do Bombeamento na Origem (25,84 mca) - Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem (55,84 mca) - Custo de Implantação das Tubulações (\$4.450.663,00) | <ul style="list-style-type: none"> - Carga Hidráulica do <i>Booster</i>* - Custo Energético* - Custo Total da Rede* <p>*Valores apresentados na Tabela 4.16</p> |

Tabela 4.16 - Parâmetros da rede R9 com booster que sofreram alterações

| Acréscimo das cotas dos setores A, B e C (m) | Carga Hidráulica do <i>Booster</i> Setor A (mca) | Carga Hidráulica do <i>Booster</i> Setor B (mca) | Carga Hidráulica do <i>Booster</i> Setor C (mca) | Custo Energético | Custo Total |
|--|--|--|--|------------------|-----------------|
| 0 | 3 | 6,21 | 5,81 | \$2.944.626,78 | \$7.395.290,00 |
| 10 | 13 | 16,21 | 15,81 | \$3.725.087,25 | \$8.175.750,00 |
| 20 | 23 | 26,21 | 25,81 | \$4.505.547,75 | \$8.956.211,00 |
| 30 | 33 | 36,21 | 35,81 | \$5.286.008,25 | \$9.736.671,00 |
| 40 | 43 | 46,21 | 45,81 | \$6.066.468,75 | \$10.517.132,00 |
| 50 | 53 | 56,21 | 55,81 | \$6.846.929,00 | \$11.297.592,00 |
| 100 | 103 | 106,21 | 105,81 | \$10.749.231,50 | \$15.199.894,00 |
| 200 | 203 | 206,21 | 205,81 | \$18.553.836,50 | \$23.004.500,00 |
| 300 | 303 | 306,21 | 305,81 | \$26.358.441,50 | \$30.809.104,00 |

A vantagem em se utilizar os *boosters*, na fase de dimensionamento, foi comprovada no estudo acima, por meio da análise de sensibilidade. Verificou-se que ao utilizar os *boosters*, a rede se comportou de maneira mais satisfatória nos nove dimensionamentos (ver APÊNDICE D), haja vista que a pressão máxima não ultrapassou 31,54 mca; a altura piezométrica do bombeamento na origem não ultrapassou 55,84 mca; e o custo de implantação (\$4.450.663,00) se manteve inalterado. Já para o dimensionamento da rede sem *booster*, a pressão máxima iniciou-se em 36,3 mca e à medida que as cotas aumentavam, a pressão máxima também aumentava, atingindo valores impraticáveis em redes reais. O mesmo aconteceu com a altura piezométrica do bombeamento na origem, que iniciou com 60,6 mca, e à medida que as cotas aumentavam, a H_{piezo} também aumentava, atingindo valores impraticáveis em redes reais.

Quando os três setores (A, B e C) possuem cotas aproximadas, ou seja, sem muita discrepância de valores entre elas, a vantagem em se utilizar os *boosters* nos três setores não é tão significativa. Por exemplo, quando as cotas dos 3 setores são elevadas em 50 m, o benefício em se utilizar os *boosters* é de 9,98%, como se pode observar na Tabela 4.12. Entretanto, quando há grandes discrepâncias de valores entre as cotas de setores distintos, o uso do *booster* se torna bastante apropriado no setor onde as cotas são, significativamente, mais elevadas, proporcionando grandes benefícios energéticos, econômicos e funcionamento otimizado da rede. Estas considerações são abordadas na próxima seção (4.3.2.2), por meio da análise de sensibilidade para setores com discrepâncias de valores nas cotas dos nós.

4.3.2.2. Análise de Sensibilidade para Setores com Cotas Não Uniformes

Os resultados com maiores economias nos dimensionamentos, entre a rede sem *booster* e com *booster*, foram alcançados quando o *booster* foi inserido apenas no setor de zona alta. A Figura 4.40 ilustra o esquema da rede R9 contendo uma zona alta, representada pelo Setor A (N7 a N21). Todas as cotas dos nós pertencentes ao Setor A foram elevadas em 50 m, desta forma, a média das cotas deste setor passou de 4,44 m para 54,45 m.

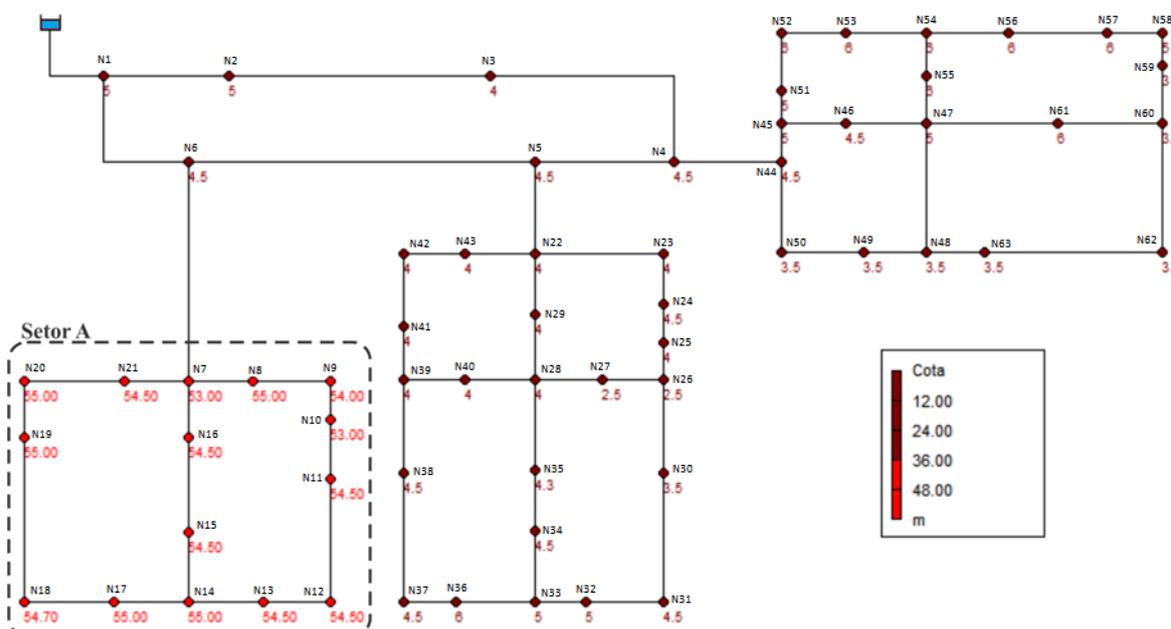


Figura 4.40 - Esquema da rede R9 com zona alta no Setor A

A Figura 4.41 apresenta o resultado do dimensionamento da rede R9 com zona alta no Setor A. A rede R9 com *booster* a montante do setor A foi 23,1% mais eficiente se comparada à mesma rede sem *booster*, proporcionando uma economia de \$2.509.207,50. Na rede sem *booster*, o custo de implantação das tubulações da rede foi menor, entretanto, o custo energético foi 45,72% menor na rede com *booster*, o que justifica a economia de 23,1% no custo total.

A Figura 4.42 ilustra o esquema da rede R9 dimensionada com *booster* a montante do Setor A. Em cada trecho está indicado de azul o valor do diâmetro ótimo, que varia de 53,4 a 489,4 m; e em cada nó está indicado de vermelho o valor da pressão. Os identificadores dos nós (N1 a N63) e dos trechos (T1 a T74) foram ocultados para facilitar a visualização dos valores dos diâmetros das tubulações dos trechos e das pressões nos nós. A Figura 4.31 (pág. 125) ilustra a rede R9 com os identificadores dos 74 trechos e 64 nós.

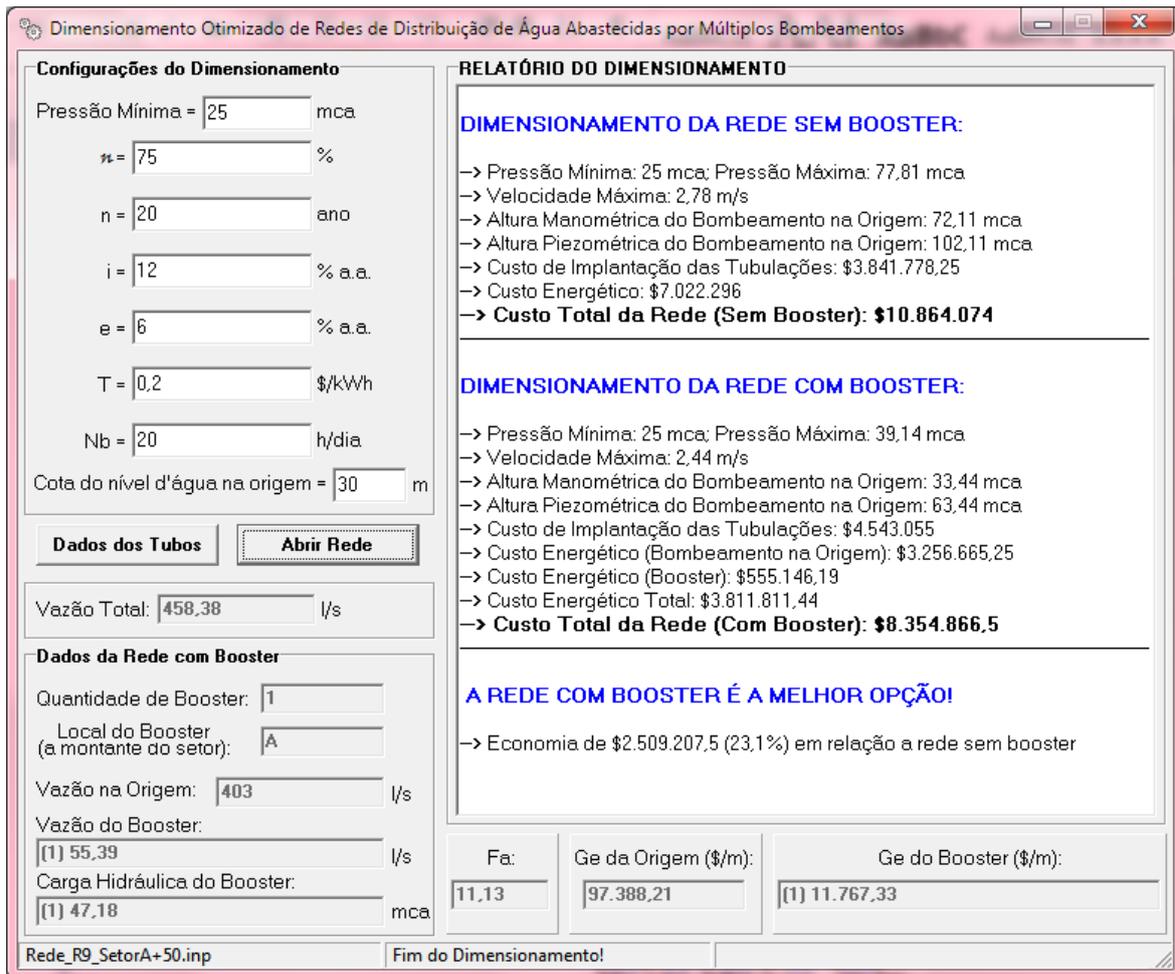


Figura 4.41 - Resultado do dimensionamento da rede R9 com zona alta no Setor A

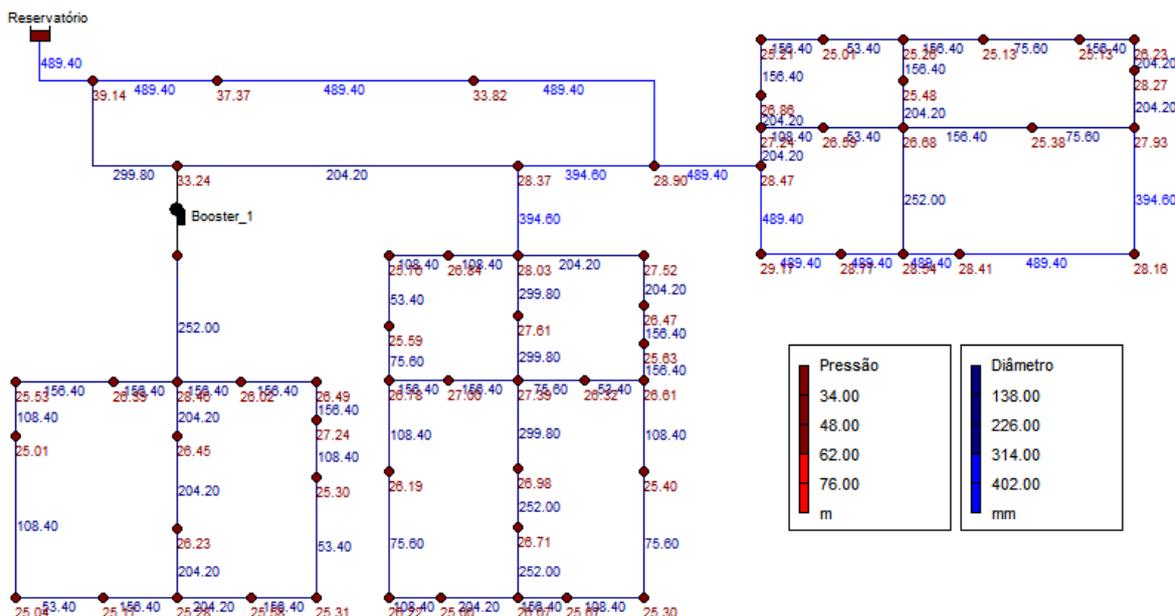


Figura 4.42 - Rede dimensionada com booster na zona alta (setor A)

O programa TDO gera automaticamente a curva do *booster* mediante os dados da vazão requerida pelo setor A (55,39 l/s) e da carga hidráulica do *booster* (47,18 mca). A Figura 4.43 apresenta a curva do *booster* inserido a montante do Setor A da rede R9.

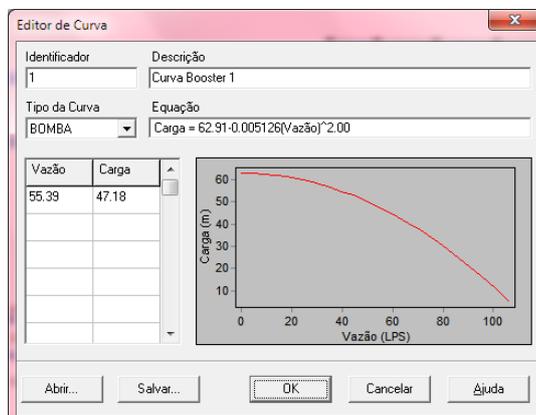


Figura 4.43 - Curva do booster inserido a montante do Setor A

A Figura 4.44 apresenta o gráfico de isolinhas referente ao parâmetro pressão da rede R9 com um *booster* a montante do setor A. Conforme pode ser observado no gráfico de isolinhas, a rede R9 dimensionada com *booster* encontra-se em duas zonas de pressão, com predominância de pressões de até 34 mca. O mesmo não ocorre com a rede R9 sem *booster*, conforme ilustra a Figura 4.45. No segundo caso (rede sem *booster*), a rede encontra-se nas cinco zonas de pressão, com predominância de pressões elevadas.

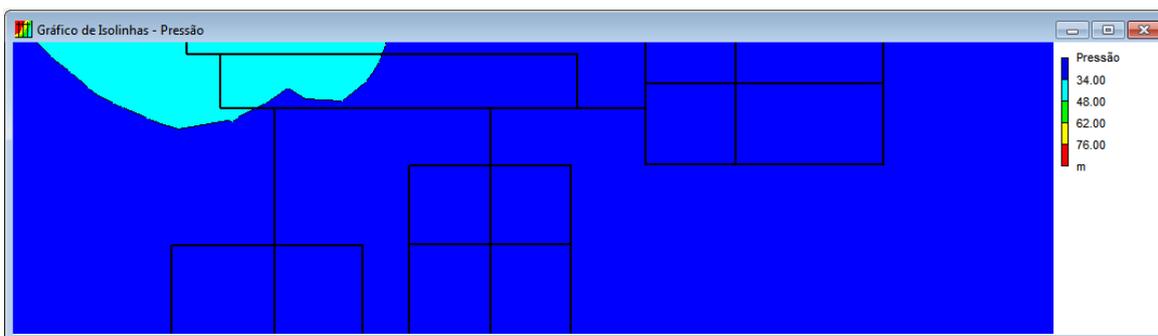


Figura 4.44 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 com booster (setor A)

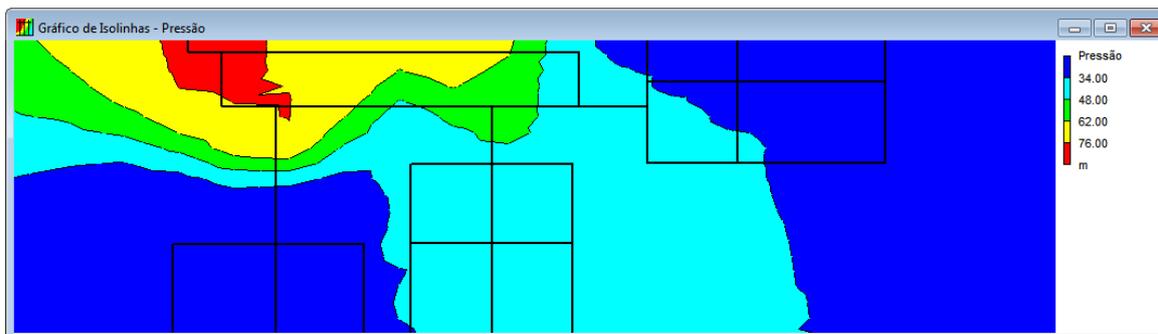


Figura 4.45 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 sem booster (setor A)

Ao comparar os gráficos isolinhas, referente ao parâmetro pressão, pode-se concluir que a rede R9 com *booster* a montante do setor A se comportou melhor em relação à mesma rede sem o *booster*, ou seja, com maior uniformidade de pressão em todos os pontos de consumo.

A Tabela 4.17 e Figura 4.46 permitem constatar que à medida que as cotas do setor A são elevadas, iniciando em 0 até 300 m, a inclusão do *booster* na rede torna o dimensionamento mais vantajoso (econômico).

Tabela 4.17 - Economia ao aumentar as cotas do setor A da rede R9

| Acréscimo das cotas do setor A (m) | Média das cotas do setor A (m) | Economia (rede com <i>booster</i>) | Porcentagem |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| 0 | 4,44 | \$118.618,00 | 1,54% |
| 50 | 54,44 | \$2.509.207,50 | 23,10% |
| 100 | 104,44 | \$6.709.717,00 | 42,87% |
| 200 | 204,44 | \$15.117.826 ,00 | 59,90% |
| 300 | 304,44 | \$23.332.376,00 | 67,38% |

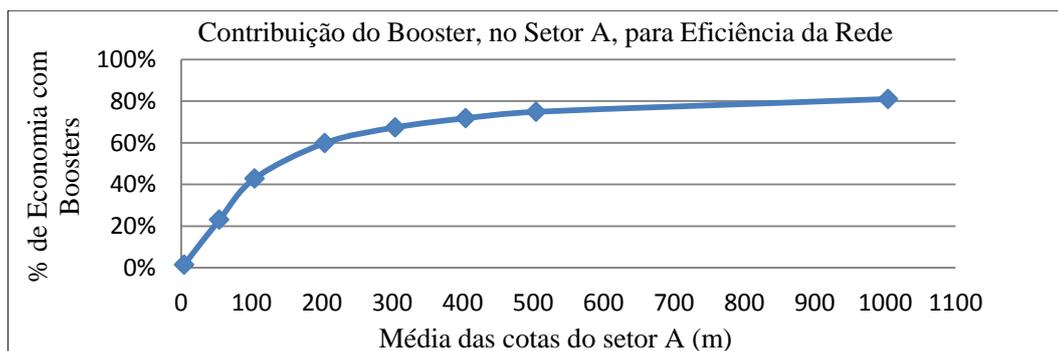


Figura 4.46 - Economia versus aumento das cotas do setor A da rede R9

Assim como foi realizado o dimensionamento da rede R9 com *booster* a montante do Setor A, o mesmo foi feito para rede R9 com *booster* a montante do Setor B, e em seguida, com *booster* a montante do Setor C. A Figura 4.47 ilustra o esquema da rede R9 com zona alta no Setor B (N22 a N43). Todas as cotas dos nós pertencentes ao Setor B foram elevadas em 50 m, desta forma, a média das cotas deste setor passou a ser 54,15 m.

Na Figura 4.48 encontra-se o relatório do dimensionamento da rede R9 com zona alta no setor B. A Figura 4.49 ilustra o esquema da rede R9 dimensionada com um *booster* a montante do setor B, onde os valores dos diâmetros ótimos estão indicado de azul; e os valores das pressões estão indicados de vermelho. Os identificadores dos nós (N1 a N63) e dos trechos (T1 a T74) foram ocultados na Figura 4.49 para facilitar a visualização dos diâmetros e das pressões. A Figura 4.31 (pág. 125) ilustra a rede R9 com os identificadores dos 74 trechos e 64 nós.

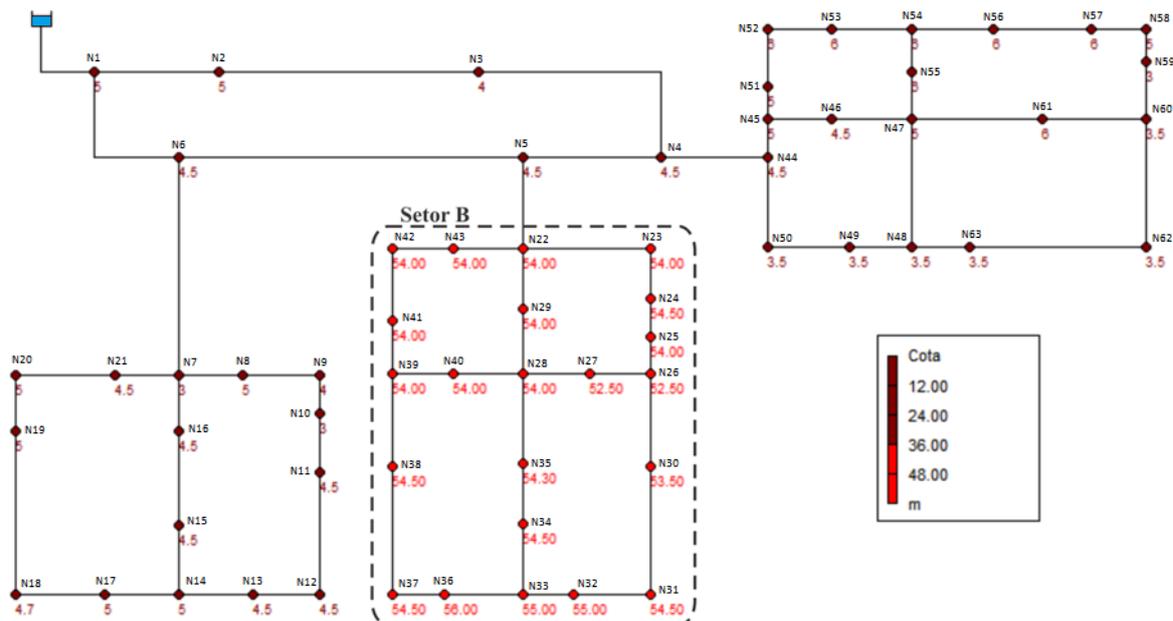


Figura 4.47 - Esquema da rede R9 com zona alta no Setor B

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Múltiplos Bombeamentos

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 % = 75 %
 n = 20 ano
 i = 12 % a.a.
 e = 6 % a.a.
 T = 0,2 \$/kWh
 Nb = 20 h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 458,38 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 1
 Local do Booster (a montante do setor): B
 Vazão na Origem: 368,6 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 89,78 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 56,78 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

- Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 84,21 mca
- Velocidade Máxima: 3,15 m/s
- Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 78,51 mca
- Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 108,51 mca
- Custo de Implantação das Tubulações: \$4.372.258,5
- Custo Energético: \$7.645.598,5
- **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$12.017.857**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

- Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 38,94 mca
- Velocidade Máxima: 2,44 m/s
- Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 33,24 mca
- Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 63,24 mca
- Custo de Implantação das Tubulações: \$4.246.036,5
- Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$3.237.055,25
- Custo Energético (Booster): \$1.083.196,5
- Custo Energético Total: \$4.320.251,75
- **Custo Total da Rede (Com Booster): \$8.566.288**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

- Economia de \$3.451.569 (28,72%) em relação a rede sem booster

Fa: 11,13 Ge da Origem (\$/m): 97.388,23 Ge do Booster (\$/m): (1) 19.075,54

Rede_R9_SetorB+50.inp Fim do Dimensionamento!

Figura 4.48 - Resultado do dimensionamento da rede R9 com zona alta no Setor B

Conforme pode ser observado no relatório do dimensionamento da rede R9 com zona alta no setor B (ver Figura 4.48), o custo de implantação das tubulações e o custo energético foram menores na rede com *booster*. Por isso, a rede R9 com *booster* a montante do setor B foi 28,72% mais eficiente se comparada à mesma rede sem *booster*, proporcionando uma economia de \$3.451.569,00.

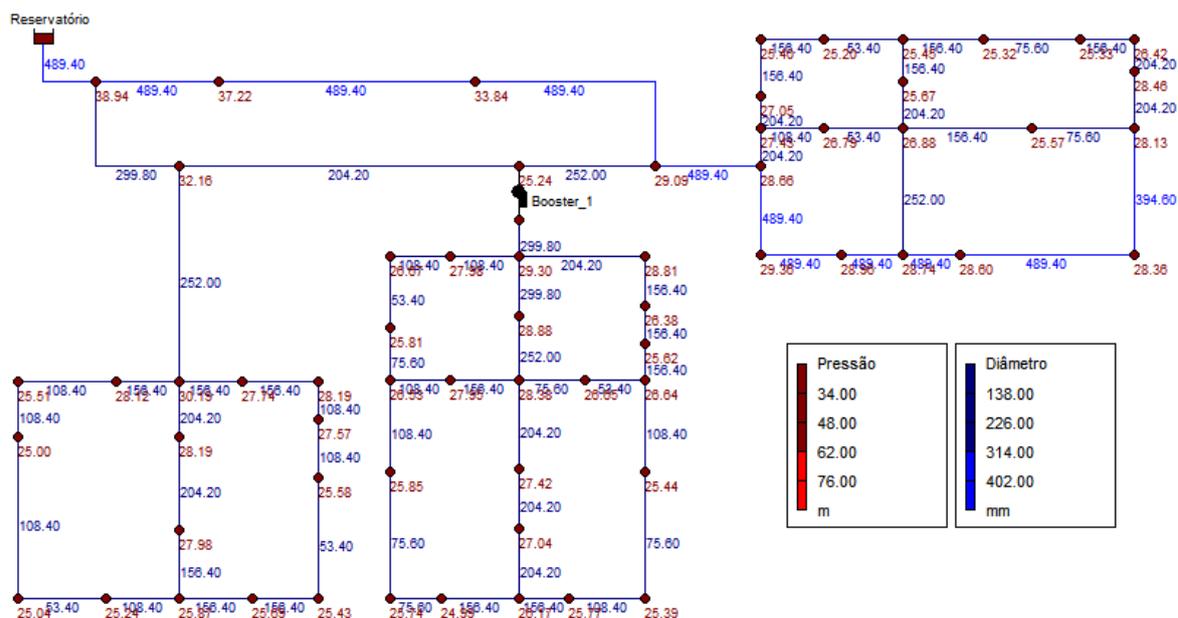


Figura 4.49 - Rede dimensionada com booster na zona alta (setor B)

O programa TDO gera automaticamente a curva do *booster* mediante os dados da vazão requerida pelo setor B (89,78 l/s) e da carga hidráulica do *booster* (56,78 mca). A Figura 4.50 apresenta a curva do *booster* inserido a montante do Setor B da rede R9.

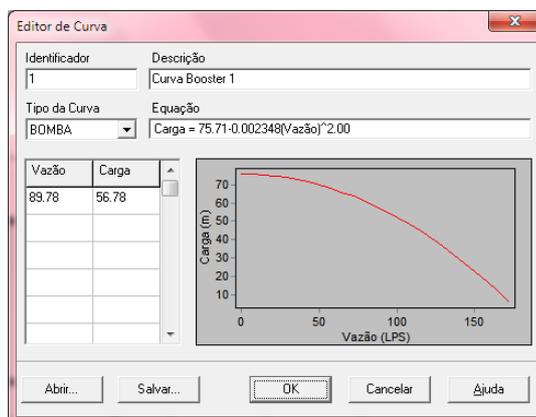


Figura 4.50 - Curva do booster inserido a montante do Setor B

A Figura 4.51 apresenta o gráfico de isolinhas referente ao parâmetro pressão da rede R9 com um *booster* a montante do setor B. Conforme pode ser observado no gráfico

de isolinhas, a rede R9 dimensionada com *booster* encontra-se em duas zonas de pressão, com predominância da primeira zona de pressão – até 34 mca. O mesmo não ocorre com a rede R9 sem *booster*, conforme ilustra a Figura 4.52. No segundo caso (rede sem *booster*), a rede encontra-se nas cinco zonas de pressão (com predominância de pressões elevadas).

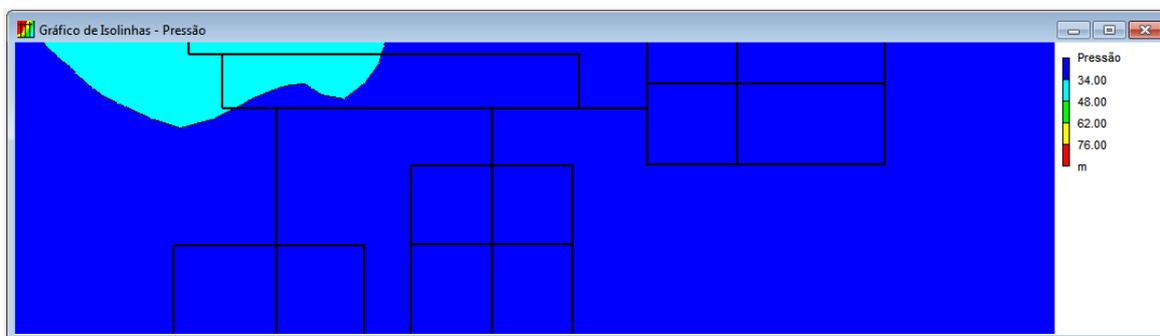


Figura 4.51 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 com booster (setor B)

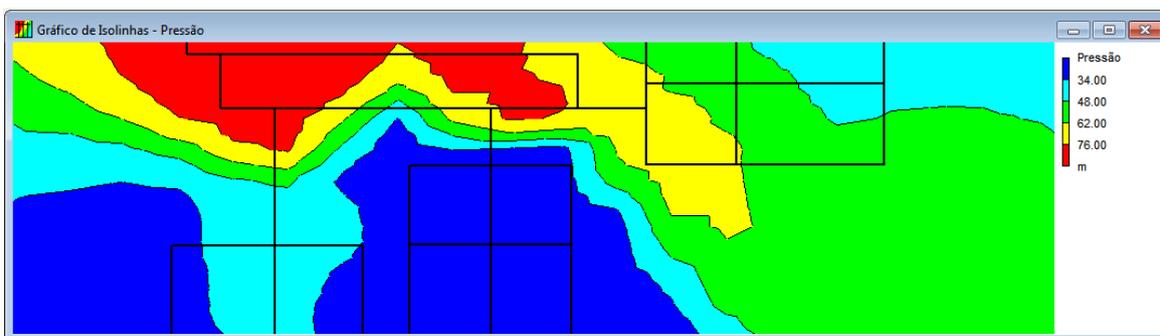


Figura 4.52 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 sem booster (setor B)

Ao comparar os gráficos isolinhas, referente ao parâmetro pressão, pode-se concluir que a rede R9 com *booster* a montante do setor B se comportou melhor em relação à mesma rede sem o *booster*, ou seja, com maior uniformidade de pressão em todos os pontos de consumo.

A Tabela 4.18 e Figura 4.53 permitem constatar que à medida que as cotas do setor B são elevadas, iniciando em 0 até 300 m, a inclusão do *booster* na rede torna o dimensionamento mais vantajoso (econômico).

Tabela 4.18 - Economia ao aumentar as cotas do setor B da rede R9

| Acréscimo das cotas do setor B (m) | Média das cotas do setor B (m) | Economia (rede com <i>booster</i>) | Porcentagem |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| 0 | 4,44 | \$68.603,50 | 0,89% |
| 50 | 54,44 | \$3.451.569,00 | 28,72% |
| 100 | 104,44 | \$7.257.471,00 | 43,26% |
| 200 | 204,44 | \$15.026.500,00 | 56,80% |
| 300 | 304,44 | \$22.731.906,00 | 63,03% |

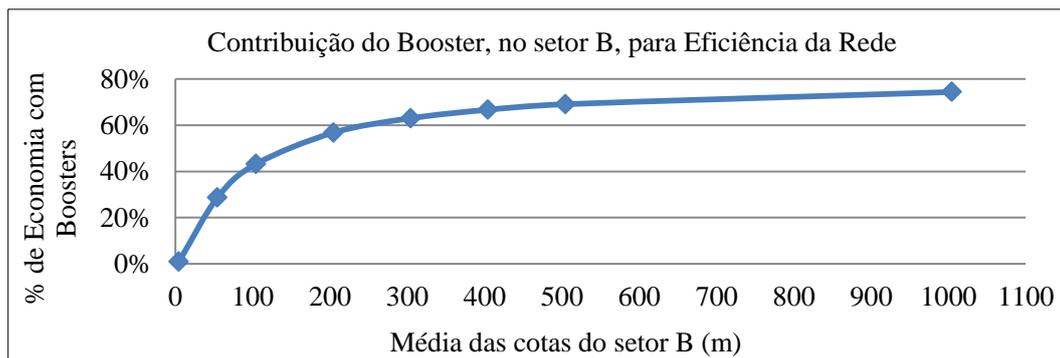


Figura 4.53 - Economia versus aumento das cotas do setor B da rede R9

A Figura 4.54 ilustra o esquema da rede R9 com zona alta no Setor C (N44 a N63). Todas as cotas dos nós pertencentes ao Setor C foram elevadas em 50 m, desta forma, a média das cotas deste setor passou a ser 54,75 m.

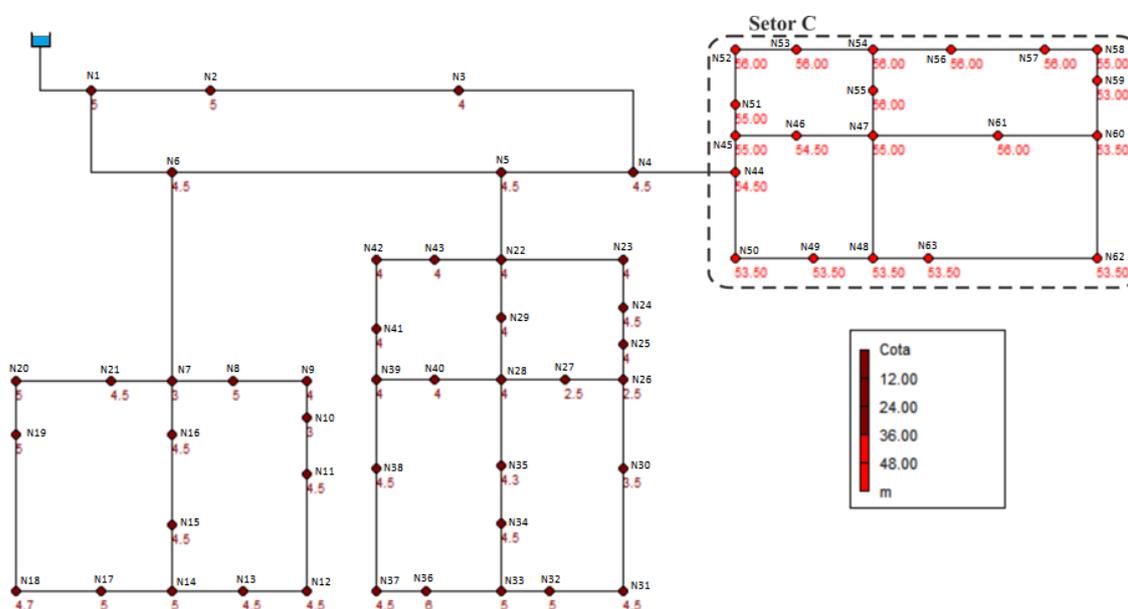


Figura 4.54 - Esquema da rede R9 com zona alta no Setor C

Na Figura 4.55 encontra-se o resultado do dimensionamento da rede R9 com zona alta no Setor C. A rede com *booster* a montante do setor C foi 16,28% mais eficiente se comparada à mesma rede sem *booster*, proporcionando uma economia de \$1.973.737,00. Na rede com *booster*, o custo de implantação das tubulações da rede sem *booster* foi um pouco maior, entretanto, o custo energético foi 34,21% menor na rede com *booster*, o que justifica a economia de 16,28% no custo total.

A Figura 4.56 ilustra o esquema da rede R9 dimensionada com um *booster* a montante do Setor C, sendo apresentados os diâmetros ótimos e as pressões. Os identificadores dos nós (N1 a N63) e dos trechos (T1 a T74) foram ocultados para facilitar a visualização dos valores dos diâmetros das tubulações dos trechos e das pressões nos nós.

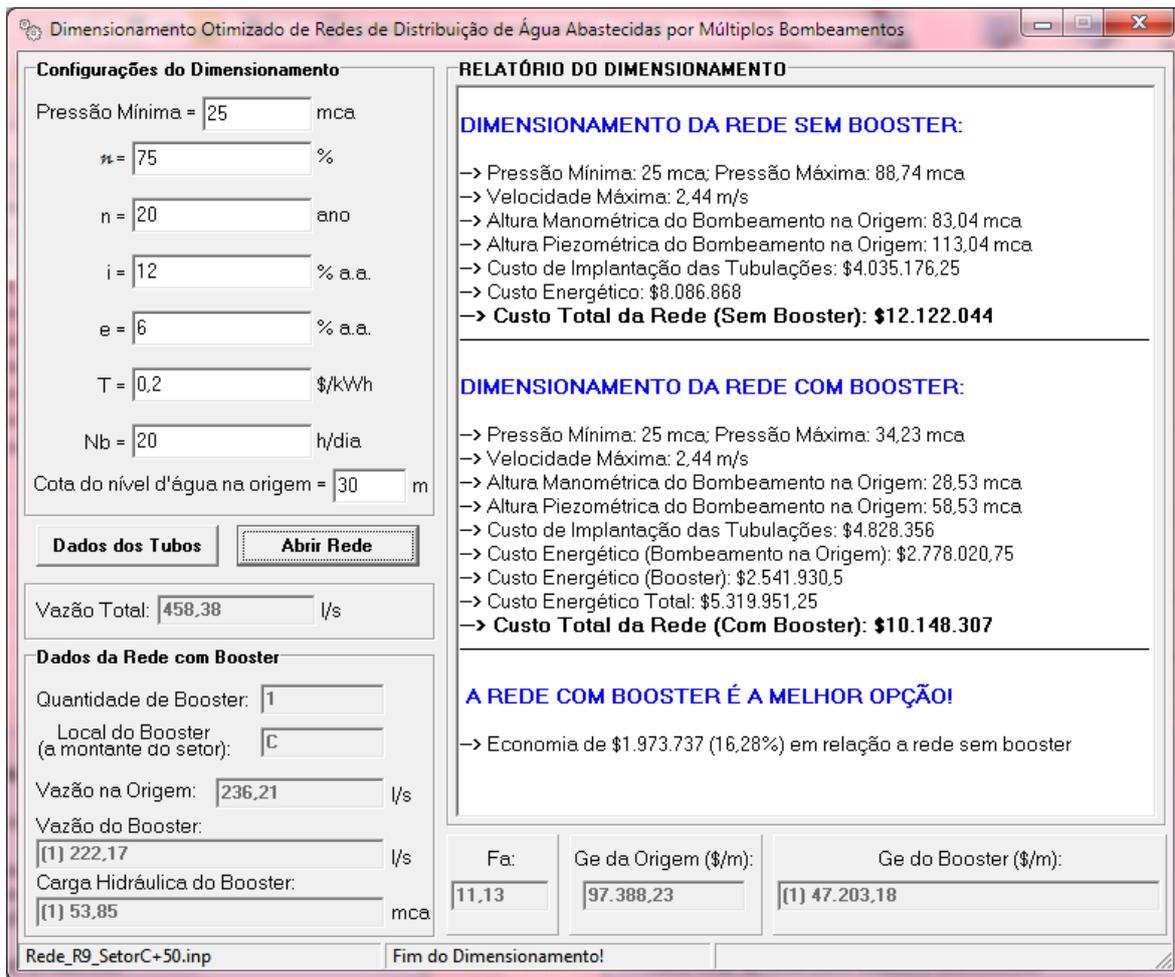


Figura 4.55 - Resultado do dimensionamento da rede R9 com zona alta no Setor C

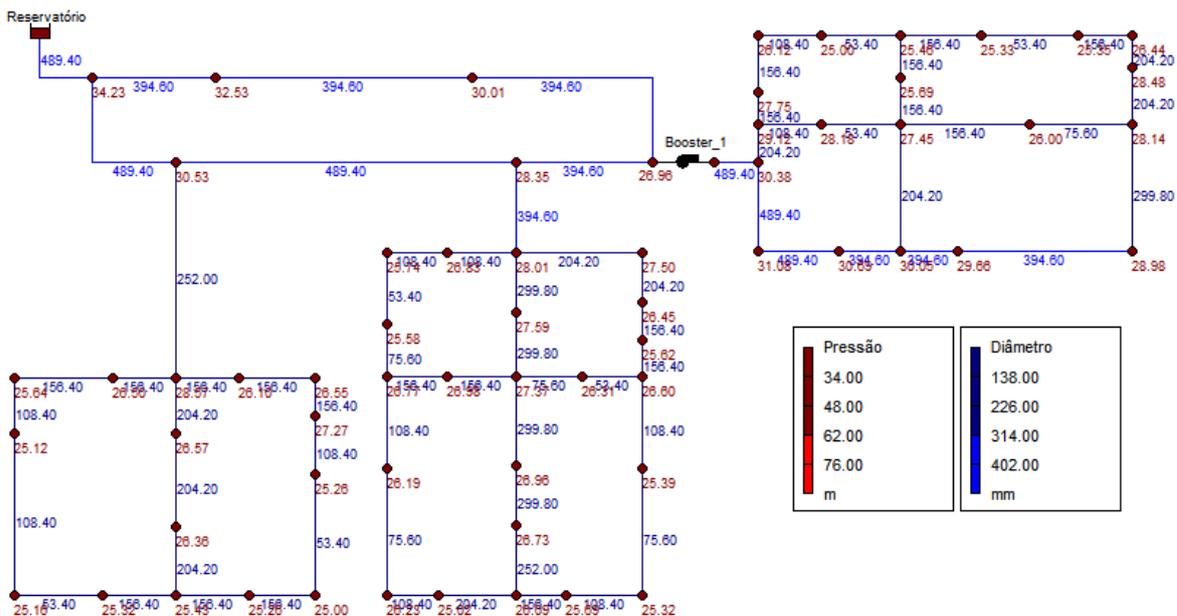


Figura 4.56 - Rede dimensionada com booster na zona alta (setor C)

O programa TDO gera automaticamente a curva do *booster* mediante os dados da vazão requerida pelo setor C (222,17 l/s) e da carga hidráulica do *booster* (53,85 mca). A Figura 4.57 apresenta a curva do *boosters* inserido a montante do Setor C da rede R9.

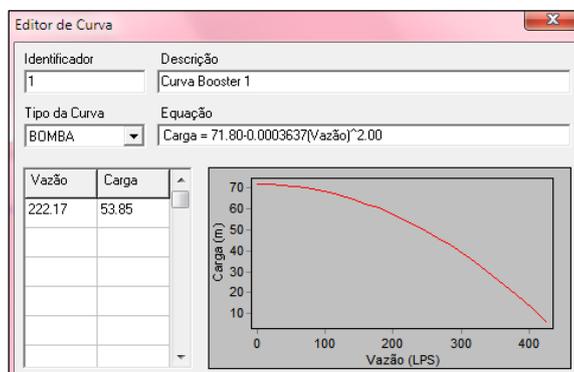


Figura 4.57 - Curva do booster inserido a montante do Setor C

A Figura 4.58 apresenta o gráfico de isolinhas referente ao parâmetro pressão da rede R9 com um *booster* a montante do setor C. Conforme observado no gráfico de isolinhas, a rede R9 dimensionada com *booster* encontra-se em apenas duas zonas de pressão, com predominância da primeira zona – até 34 mca. O mesmo não ocorre com a rede R9 sem *booster*, conforme ilustra a Figura 4.59. No segundo caso (sem *booster*), a rede encontra-se nas cinco zonas de pressão, com predominância de pressões elevadas.

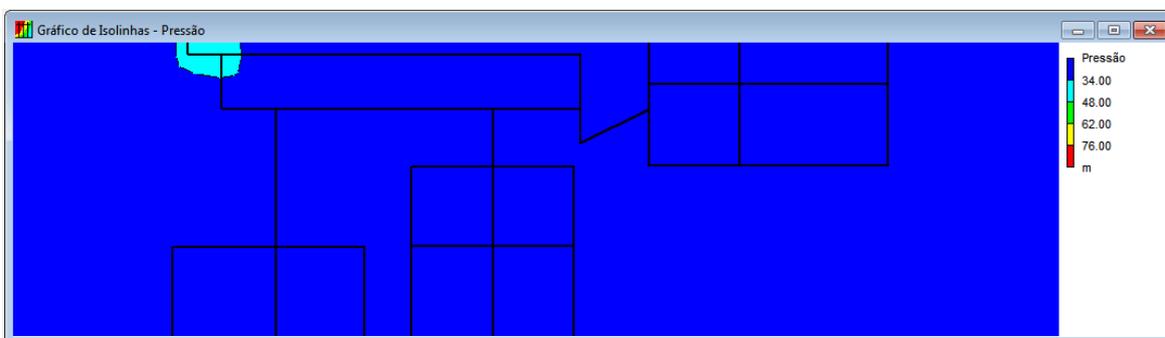


Figura 4.58 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 com booster (setor C)

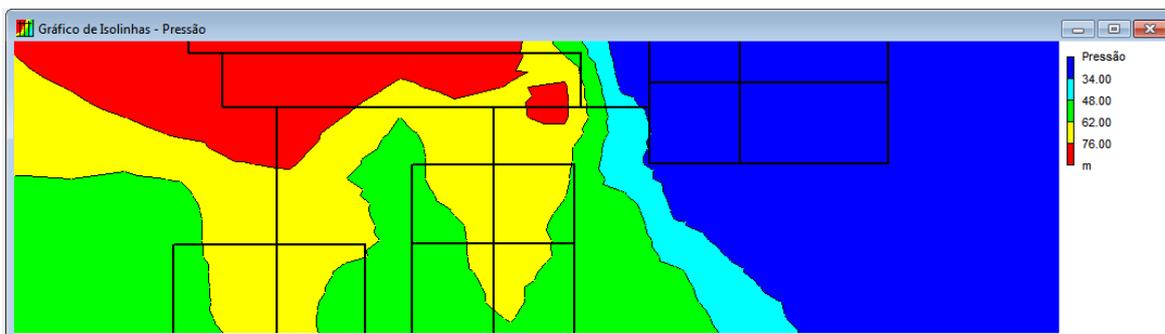


Figura 4.59 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede R9 sem booster (setor C)

Ao comparar os gráficos isolinhas, referente ao parâmetro pressão, pode-se concluir que a rede R9 com *booster* a montante do setor C se comportou melhor em relação à mesma rede sem o *booster*, ou seja, com maior uniformidade de pressão em todos os pontos de consumo.

A Tabela 4.19 e Figura 4.60 permitem constatar que à medida que as cotas do setor C são elevadas, iniciando em 0 até 300 m, a inclusão do *booster* na rede torna o dimensionamento mais vantajoso (econômico).

Tabela 4.19 - Economia ao aumentar as cotas do setor C da rede R9

| Acréscimo das cotas do setor C (m) | Média das cotas do setor C (m) | Economia (rede com <i>booster</i>) | Porcentagem |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| 0 | 4,44 | \$107.033,50 | 1,39% |
| 50 | 54,44 | \$1.973.737,00 | 16,28% |
| 100 | 104,44 | \$4.358.710,00 | 25,84% |
| 200 | 204,44 | \$9.316.980,00 | 35,10% |
| 300 | 304,44 | \$14.317.100,00 | 39,48% |

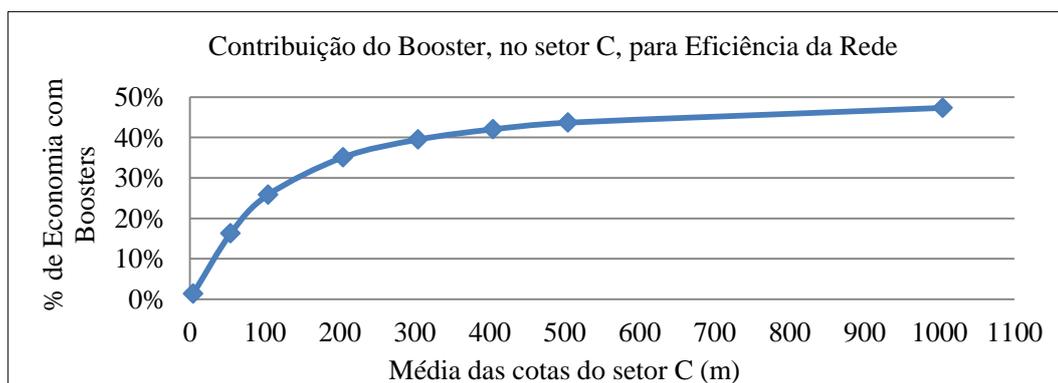


Figura 4.60 - Economia versus aumento das cotas do setor C da rede R9

Ao realizar a análise de sensibilidade para setores com discrepâncias de valores entre as cotas, constatou-se o grande benefício ao inserir o *booster*. Por isso, quando as cotas dos 3 setores foram elevadas em 50 m, o benefício em se utilizar os *boosters* foi de 9,98%, como se pode observar na Tabela 4.12 (página 135). Entretanto, quando apenas o setor B foi elevado em 50 m, o benefício em se utilizar o *booster* a montante deste setor foi de 28,72%. Este comparativo mostra que quando os setores possuem uniformidade nos valores de suas cotas, a vantagem em utilizar os *boosters* é pequena. Entretanto, quando os setores não possuem uniformidade nas cotas, a vantagem é bastante significativa.

Dando continuidade às análises de sensibilidade, foram realizadas também simulações para rede R9 com dois setores de zona alta, a fim de avaliar se, aumentando

gradativamente as cotas dos nós dos dois setores, a inclusão de *booster* na rede tornaria o dimensionamento mais otimizado.

Na Tabela 4.20 constam os valores das economias dos dimensionamentos da rede R9 com *boosters* nas zonas altas (setores A e B). E a Figura 4.61 apresenta a curva que representa a economia do dimensionamento com booster *versus* o aumento das cotas dos setores A e B.

O mesmo foi feito para os setores B e C, conforme ilustra a Tabela 4.21 e Figura 4.62. Assim como foi feito para os setores A e C, conforme ilustra a Tabela 4.22 e Figura 4.63.

Tabela 4.20 - Economia ao aumentar as cotas dos setores A e B da rede R9

| Acréscimo das cotas dos setores A e B (m) | Média das cotas dos setores A e B (m) | Economia (rede com <i>booster</i>) | Porcentagem |
|---|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| 0 | 4,44 | \$40.729,50 | 0,53% |
| 50 | 54,44 | \$2.989.903,00 | 24,62% |
| 100 | 104,44 | \$6.233.488,00 | 36,82% |
| 200 | 204,44 | \$12.842.132,00 | 48,24% |
| 300 | 304,44 | \$19.468.184,00 | 53,58% |

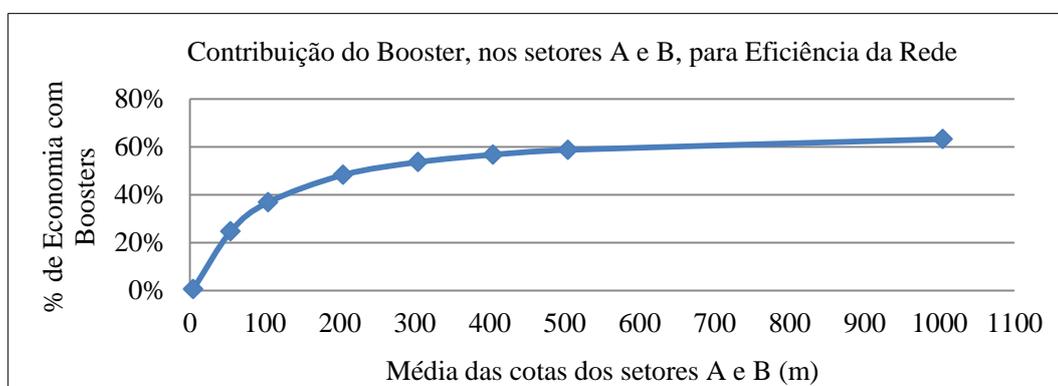


Figura 4.61 - Economia versus aumento das cotas dos setores A e B rede R9

Tabela 4.21 - Economia ao aumentar as cotas dos setores B e C da rede R9

| Acréscimo das cotas dos setores B e C (m) | Média das cotas dos setores B e C (m) | Economia (rede com <i>booster</i>) | Porcentagem |
|---|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| 0 | 4,44 | \$243.139,50 | 3,17% |
| 50 | 54,44 | \$1.663.875,00 | 13,40% |
| 100 | 104,44 | \$3.193.302,00 | 18,50% |
| 200 | 204,44 | \$6.287.904,00 | 23,30% |
| 300 | 304,44 | \$9.416.372,00 | 25,63% |

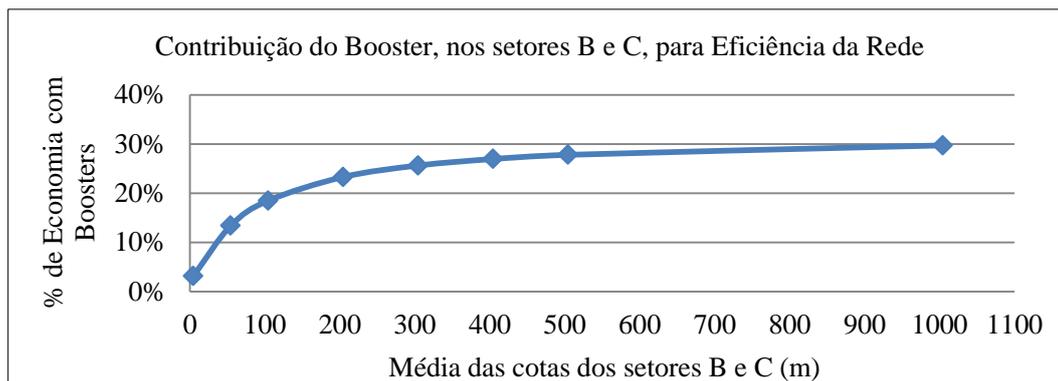


Figura 4.62 - Economia versus aumento das cotas dos setores B e C rede R9

Tabela 4.22 - Economia ao aumentar as cotas dos setores A e C da rede R9

| Acréscimo das cotas dos setores A e C (m) | Média das cotas dos setores A e C (m) | Economia (rede com <i>booster</i>) | Porcentagem |
|---|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| 0 | 4,44 | \$112.183,50 | 1,46% |
| 50 | 54,44 | \$1.433.411,00 | 11,77% |
| 100 | 104,44 | \$3.314.205,00 | 19,49% |
| 200 | 204,44 | \$7.148.766,00 | 26,74% |
| 300 | 304,44 | \$10.954.920,00 | 30,06% |

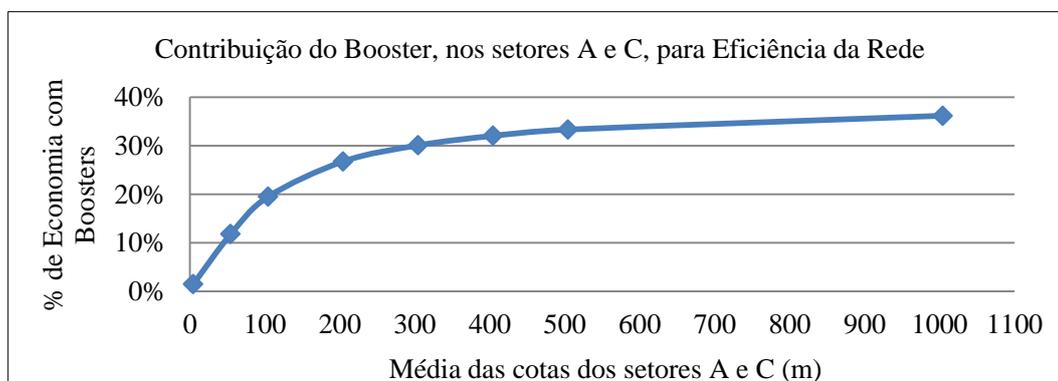


Figura 4.63 - Economia versus aumento das cotas dos setores A e C rede R9

Na Figura 4.64 são apresentadas as sete curvas das simulações realizadas neste estudo de caso, através da rede R9 com *booster* no Setor A; Setor B; Setor C; Setor A e B; Setor B e C; Setor A e C; e Setor A, B e C.

Ao verificar as várias análises de sensibilidade, ficou comprovada que a inclusão do *booster* é a solução mais econômica, isto é, a solução que proporciona o dimensionamento otimizado da rede. Nos casos onde houve discrepâncias nos valores das cotas entre setores distintos, a inclusão do *booster* tornou o dimensionamento ainda mais econômico, conforme pode ser observado na curva do Setor A e Setor B, representadas na Figura 4.64 pelas cores vermelha e verde, respectivamente.

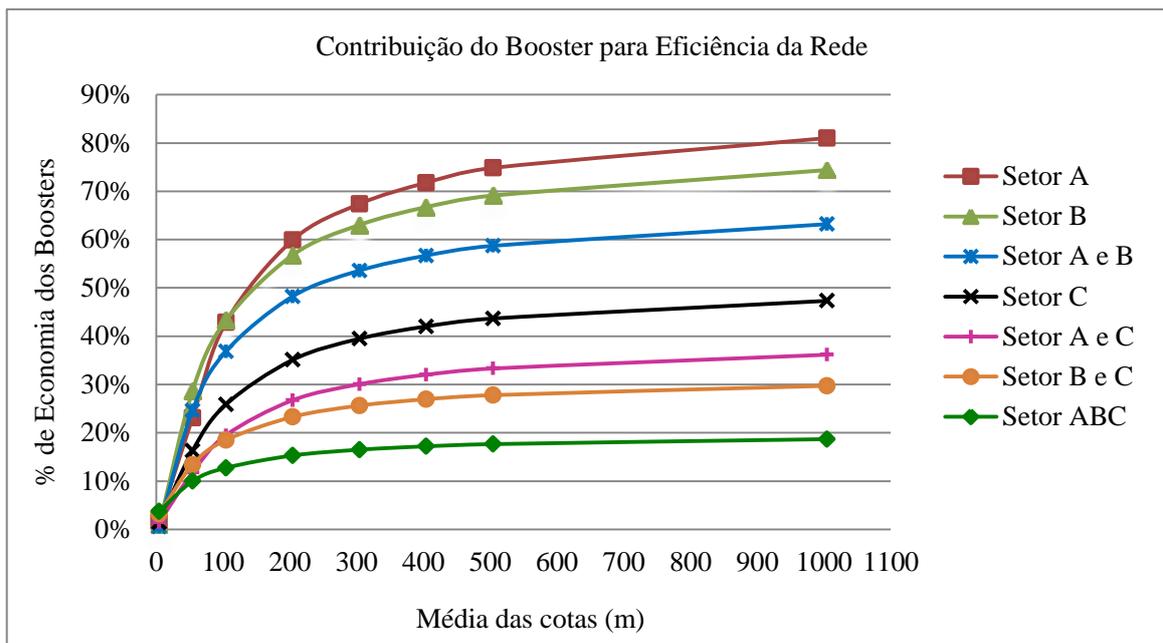


Figura 4.64 - Economia versus aumento das cotas dos setores da rede R9

Na rede com *booster*, nos setores de zona alta, as pressões ficaram próximas das mínimas, proporcionando com isso, a redução de vazamentos decorrentes de pressões elevadas; e proporcionando benefícios hidráulicos. Outro fato observado neste estudo de caso foi que o valor da altura manométrica na origem sofreu grande alteração entre o dimensionamento da rede sem *booster* e com *booster*, sendo os menores valores da H_{man} obtidos pela rede com *booster*, o que proporcionou custos de operação menores, favorecendo a eficiência energética da rede.

4.3.3 Estudo de Caso – Rede Hanoi

A rede de distribuição de água *Hanoi*²⁵ possui 31 nós (N1 a N31) e 34 trechos (T1 a T34), organizados em 3 anéis (malhas). A cota do nível d'água no reservatório de origem é fixa, cujo valor é 100 m. A Figura 4.65 ilustra o esquema da rede *Hanoi*, onde todas as 31 cotas dos nós estão indicadas de vermelho e possuem o mesmo nível (0 m). Já os comprimentos dos 34 trechos estão indicados de azul e variam de 100 a 3.500 m. A pressão mínima requerida é de 30 mca.

A unidade de vazão adotada pela rede *Hanoi* é m^3/h , mas foi transformada para l/s , pois o programa desenvolvido nesta tese utiliza a unidade de vazão em l/s para os

²⁵ Dentre alguns dos trabalhos que utilizaram a rede Hanoi, tem-se: Fujiwara e Khang (1990), Saldarriaga *et al.* (2005), Salvino (2009), Vasan e Simonovic (2010) e (Suribabu, 2012).

cálculos do dimensionamento. A Tabela 4.23 apresenta as vazões demandadas por cada nó da rede *Hanoi*.

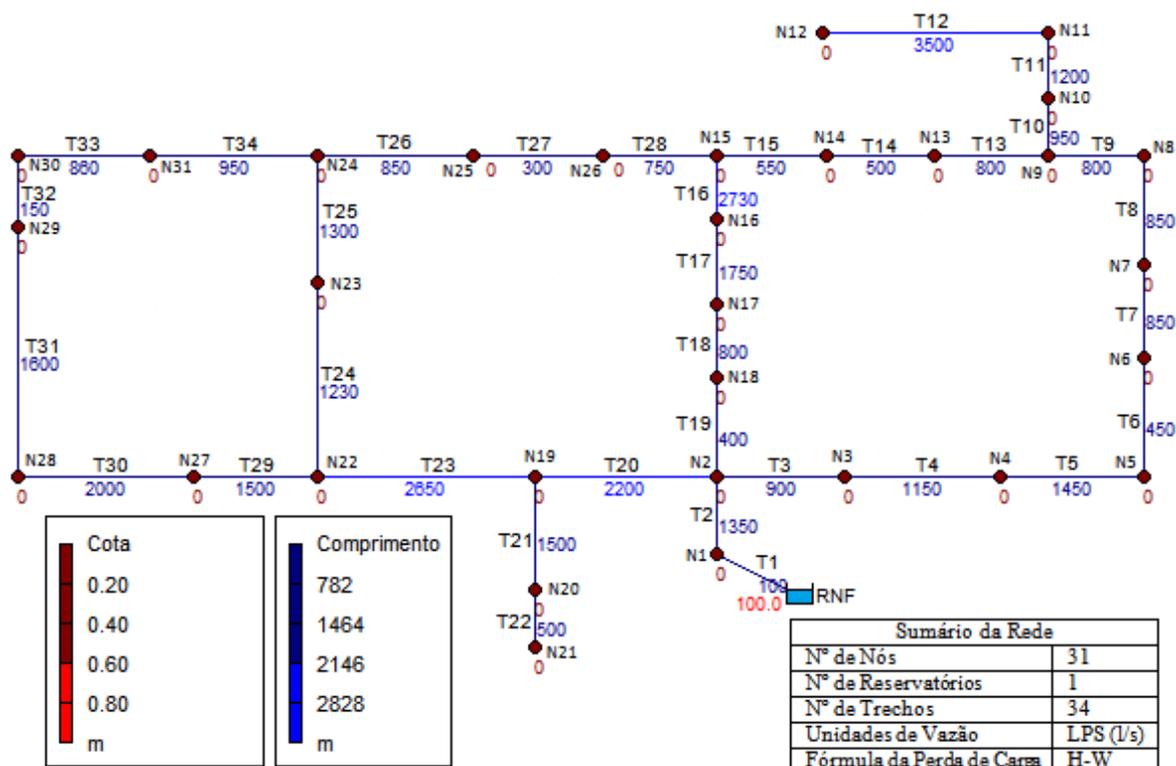
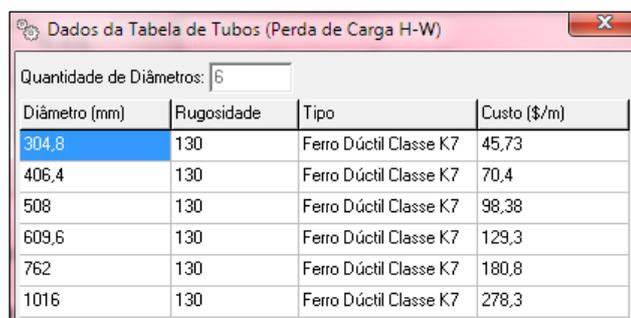


Figura 4.65 - Esquema da rede Hanoi com cotas dos nós e comprimentos dos trechos

Tabela 4.23 - Vazões demandadas dos nós da rede Hanoi

| Identificador do nó | Consumo-Base (l/s) | Identificador do nó | Consumo-Base (l/s) |
|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| N1 | 247,22 | N17 | 373,61 |
| N2 | 236,11 | N18 | 16,67 |
| N3 | 36,11 | N19 | 354,17 |
| N4 | 201,39 | N20 | 258,33 |
| N5 | 279,17 | N21 | 134,72 |
| N6 | 375,00 | N22 | 290,28 |
| N7 | 152,78 | N23 | 227,78 |
| N8 | 145,83 | N24 | 47,22 |
| N9 | 145,83 | N25 | 250,00 |
| N10 | 138,89 | N26 | 102,78 |
| N11 | 155,56 | N27 | 80,56 |
| N12 | 261,11 | N28 | 100,00 |
| N13 | 170,83 | N29 | 100,00 |
| N14 | 77,78 | N30 | 29,17 |
| N15 | 86,11 | N31 | 223,61 |
| N16 | 240,28 | | |

A perda de carga nos trechos da rede *Hanoi* é obtida pela fórmula de Hazen-William, conforme apresentada no capítulo 2, Equação 2.10. O conjunto dos seis diâmetros, rugosidades e custos por metro de tubulação, utilizados nos dimensionamentos da rede *Hanoi*, está indicado na Figura 4.66.



| Diâmetro (mm) | Rugosidade | Tipo | Custo (\$/m) |
|---------------|------------|------------------------|--------------|
| 304,8 | 130 | Ferro Dúctil Classe K7 | 45,73 |
| 406,4 | 130 | Ferro Dúctil Classe K7 | 70,4 |
| 508 | 130 | Ferro Dúctil Classe K7 | 98,38 |
| 609,6 | 130 | Ferro Dúctil Classe K7 | 129,3 |
| 762 | 130 | Ferro Dúctil Classe K7 | 180,8 |
| 1016 | 130 | Ferro Dúctil Classe K7 | 278,3 |

Figura 4.66 - Tabela de tubos para dimensionamento da rede Hanoi

Da maneira como está configurada a rede *Hanoi*, seu funcionamento é por gravidade, não havendo bombeamento na origem. Desta forma, ao dimensionar a rede *Hanoi* não haverá altura manométrica na origem e, portanto não haverá custo energético, apenas custo de implantação. O valor da cota piezométrica na origem é conhecido antes do dimensionamento e seu valor é invariável, ou seja, 100 m. Como a altura do reservatório é fixa, este parâmetro não pode ser otimizado pelo programa.

A Figura 4.67 apresenta o relatório do dimensionamento otimizado da rede *Hanoi* para cota de cabeceira fixa.

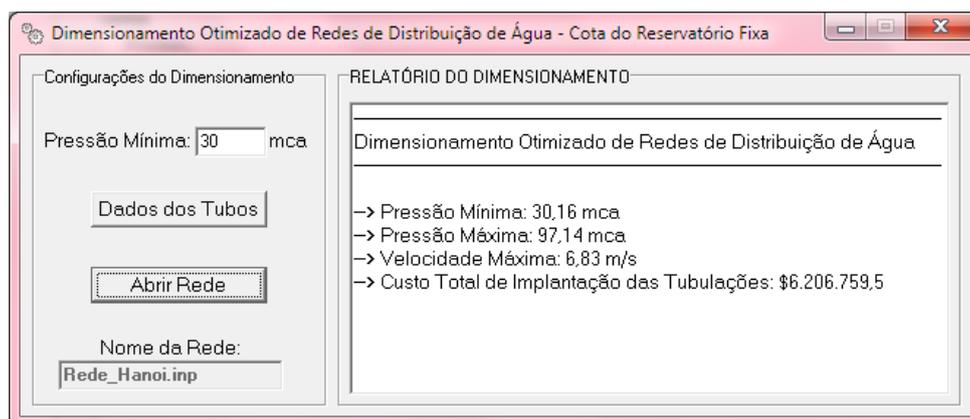


Figura 4.67 - Resultado do dimensionamento da rede Hanoi

A Figura 4.68 ilustra o esquema da rede *Hanoi* dimensionada, onde são apresentados, na cor azul, os diâmetros ótimos das tubulações de todos os trechos e, na cor vermelha, as pressões em cada nó. Os identificadores dos nós (N1 a N31) e dos trechos (T1 a T34) foram ocultados para facilitar a visualização dos valores dos diâmetros e pressões. A Figura 4.65 ilustra a rede *Hanoi* com os identificadores dos 34 trechos e 31 nós.

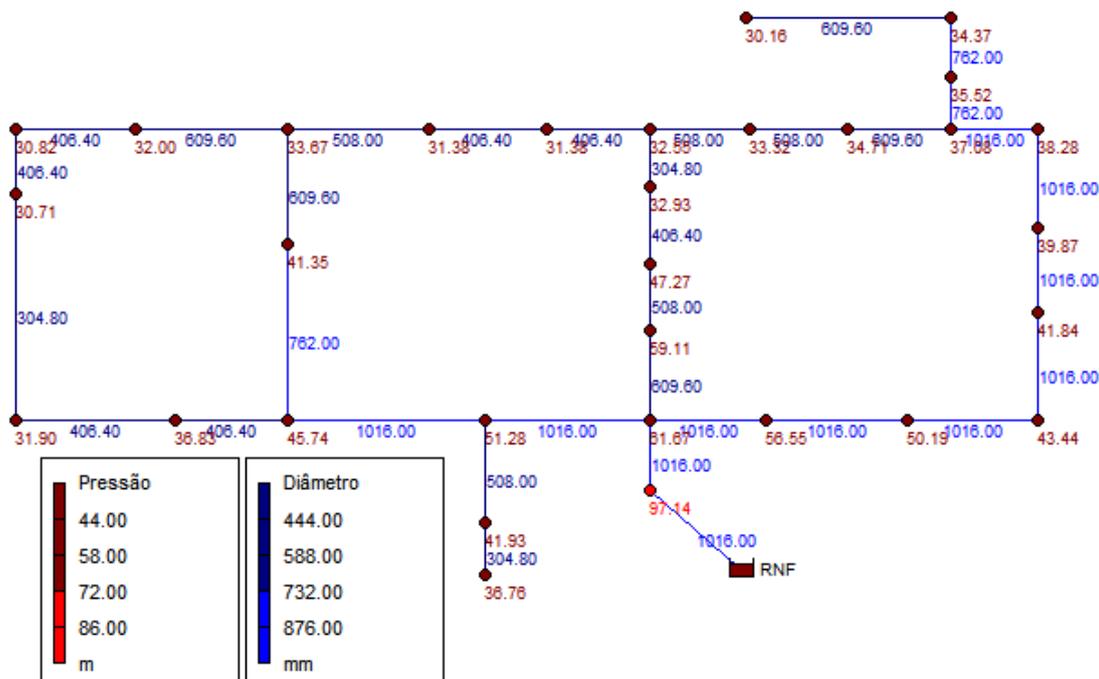


Figura 4.68 - Rede Hanoi dimensionada com cota de cabeceira fixa

A fim de simular o funcionamento pressurizado da rede *Hanoi*, o nível d'água na origem foi alterado de 100 m para 75 m. A partir desta alteração na cota do reservatório, pode-se verificar como a rede se comporta com a inclusão do bombeamento na origem.

A Figura 4.69 apresenta o relatório do dimensionamento otimizado da rede *Hanoi*, onde a altura final do reservatório (80,47 mca) foi otimizada pelo programa. O valor da altura final do reservatório é obtido através da cota do nível d'água na origem (75 m) com a altura manométrica do bombeamento na origem (5,47 mca).



Figura 4.69 - Rede Hanoi dimensionada com bombeamento na origem

Ao comparar os resultados dos dimensionamentos, este estudo permitiu constatar que ao aumentar o comprimento do trecho, a inclusão do *booster*, a montante do setor superior, proporcionou o dimensionamento mais econômico e otimizado da rede.

A primeira coluna da Tabela 4.24 apresenta os valores que foram adicionados ao comprimento do trecho que faz ligação entre o setor principal e superior. Foram realizados 7 dimensionamentos na rede *Hanoi*, sendo o primeiro deles sem acréscimo no valor do comprimento do trecho (950 m), e o último dimensionamento foi realizado com acréscimo de 10.000 m no comprimento do trecho que faz ligação entre o setor principal e superior (10.950 m). Na segunda coluna são apresentados os valores das economias obtidas pela rede com múltiplos bombeamentos (na origem e a montante do setor superior) em comparação com a rede de um único bombeamento (apenas na origem). A última coluna expõe os valores, em porcentagem, dessas economias.

Após análises dos dados, pode-se constatar que ao aumentar o trecho entre o setor principal e superior, a vantagem em incluir o *booster* na rede também aumenta, conforme mostram a Tabela 4.24 e Figura 4.72.

Tabela 4.24 - Economia ao aumentar a distância entre o setor principal e superior

| Acréscimo no comprimento do Setor Superior (m) | Economia (rede com <i>boosters</i>) | Porcentagem |
|--|--------------------------------------|-------------|
| 0 | \$923.522,00 | 5,78% |
| 1000 | \$1.231.940,00 | 7,41% |
| 2000 | \$1.659.964,00 | 9,55% |
| 3000 | \$1.987.394,00 | 11,02% |
| 4000 | \$2.381.769,00 | 12,70% |
| 5000 | \$2.732.097,00 | 14,06% |
| 10000 | \$4.918.638,00 | 21,16% |

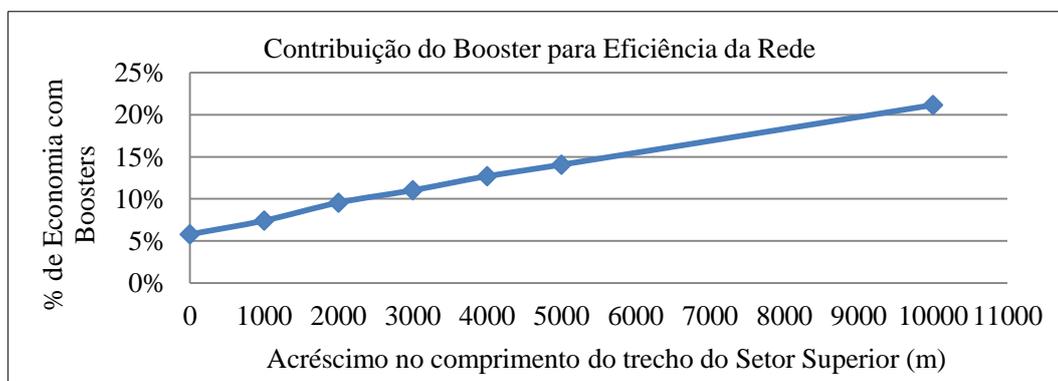


Figura 4.72 - Economia versus aumento do comprimento

Na Figura 4.73 encontra-se o resultado do dimensionamento da rede *Hanoi* com uma distância entre o setor principal e superior de 10.950 m. A rede *Hanoi com booster* foi 21,16% mais eficiente se comparada à mesma rede sem *booster*, proporcionando uma economia de \$4.918.638,00, conforme é apresentado no relatório do dimensionamento na Figura 4.73.

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 30 mca
 $k = 75$ %
 $n = 20$ ano
 $i = 12$ % a.a.
 $e = 6$ % a.a.
 $T = 0,2$ \$/kWh
 $N_b = 20$ h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 75 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 5.538,9 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 1
 Local do Booster (a montante do setor): Superior
 Vazão na Origem: 4.983,34 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 555,56 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 5,92 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

- Pressão Mínima: 30 mca; Pressão Máxima: 81,67 mca
- Velocidade Máxima: 6,83 m/s
- Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 9,53 mca
- Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 84,53 mca
- Custo de Implantação das Tubulações: \$12.027.847
- Custo Energético: \$11.214.989
- **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$23.242.836**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

- Pressão Mínima: 30 mca; Pressão Máxima: 76,77 mca
- Velocidade Máxima: 6,83 m/s
- Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 4,63 mca
- Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 79,63 mca
- Custo de Implantação das Tubulações: \$12.178.413
- Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$5.446.714
- Custo Energético (Booster): \$699.070,31
- Custo Energético Total: \$6.145.784,31
- **Custo Total da Rede (Com Booster): \$18.324.198**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

- Economia de \$4.918.638 (21,16%) em relação a rede sem booster

Fa: 11,13 Ge da Origem (\$/m): 1.176.796,75 Ge do Booster (\$/m): (1) 118.034,48

Rede_Hanoi_Setor_Superior+10000.inp Fim do Dimensionamento!

Figura 4.73 - Resultado do dimensionamento da rede Hanoi com booster

Na rede *Hanoi com booster*, o custo de implantação das tubulações foi um pouco maior, entretanto, o custo energético foi 45,20% menor na rede com *booster*, o que justifica a economia de 21,16% no custo total. A Figura 4.74 ilustra o esquema da rede *Hanoi* dimensionada com um *booster* a montante do Setor Superior, sendo apresentados na cor azul, os diâmetros ótimos de todos os trechos e, na cor vermelha, as pressões em cada nó. A Figura 4.75 apresenta a curva do referido *booster*.

Como neste estudo de caso a rede *Hanoi* possui dois setores, sendo o setor principal bastante extenso, esta setorização gerou um dimensionamento com pressão

elevada na cabeceira da rede, de 76,77 mca no primeiro nó a jusante do reservatório. Nos demais nós as pressões ficaram na média de 32,4 mca, próximas da pressão mínima requerida. Para diminuir a pressão na cabeceira da rede é necessário setorizar ainda mais a rede, a fim de reduzir a pressurização na origem.

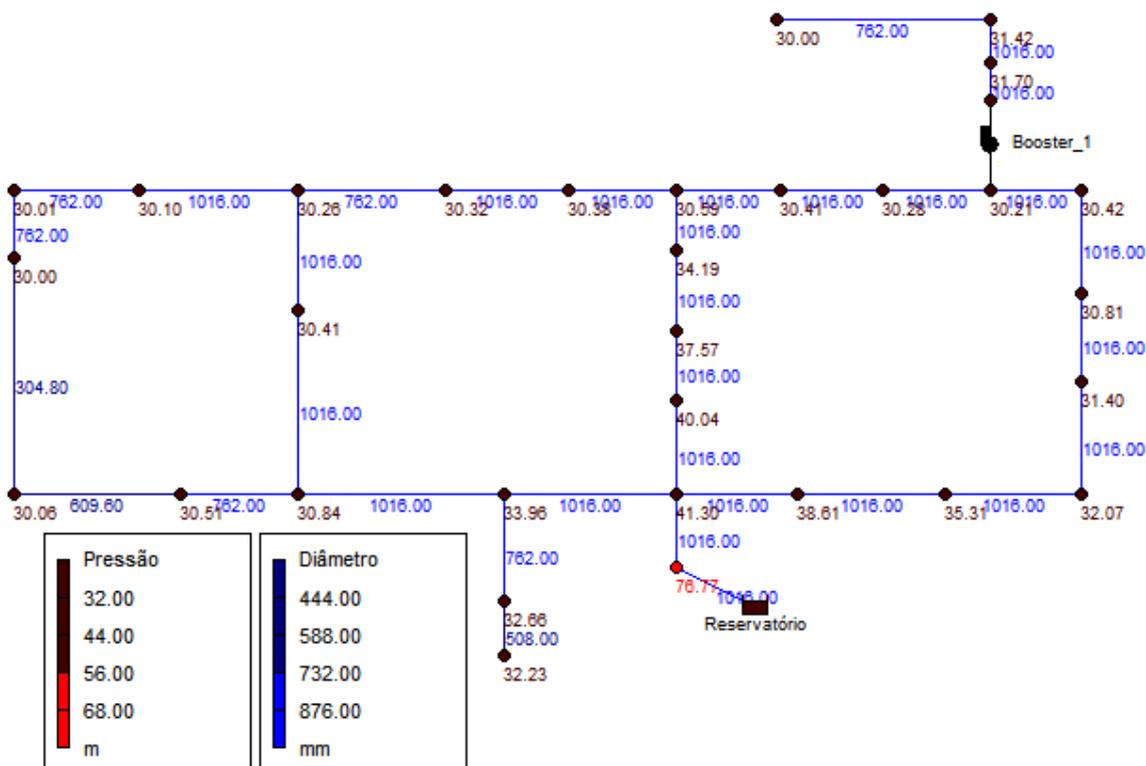


Figura 4.74 - Esquema da rede dimensionada com booster no setor superior

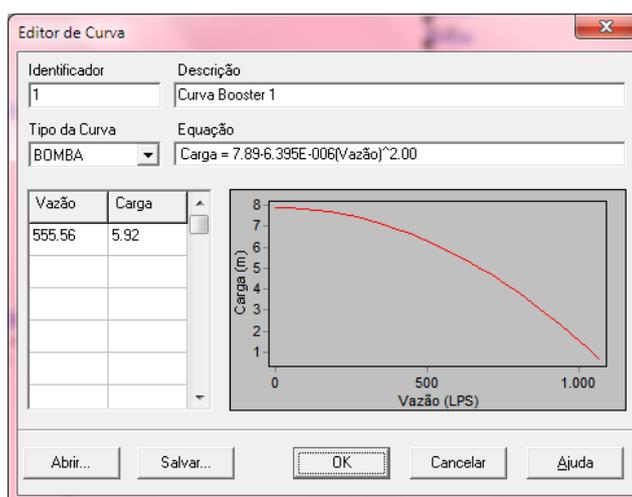


Figura 4.75 - Curva do booster inserido a montante do setor superior

A Figura 4.76 apresenta o gráfico de isolinhas, referente ao parâmetro pressão, da rede *Hanoi* com um *booster* a montante do setor superior. Conforme pode ser observado

no gráfico de isolinhas, a rede *Hanoi* dimensionada com *booster* encontra-se, em grande parte, na primeira zona de pressão – até 42 mca.

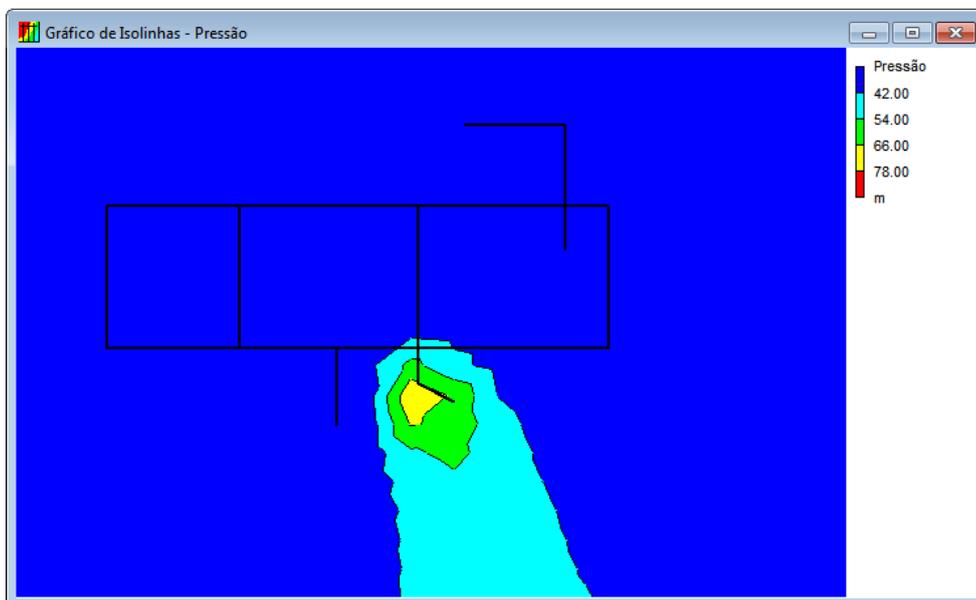


Figura 4.76 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede Hanoi com booster

Já na rede *Hanoi sem booster*, verifica-se pressões elevadas próximas à origem da rede, embora a predominância também seja da primeira zona de pressão (até 42 mca), conforme ilustra a Figura 4.77. Neste caso, o dimensionamento da rede *Hanoi com booster* apresentou melhores resultados, em termos de uniformidade de pressão e custo total (21,16% mais econômico).

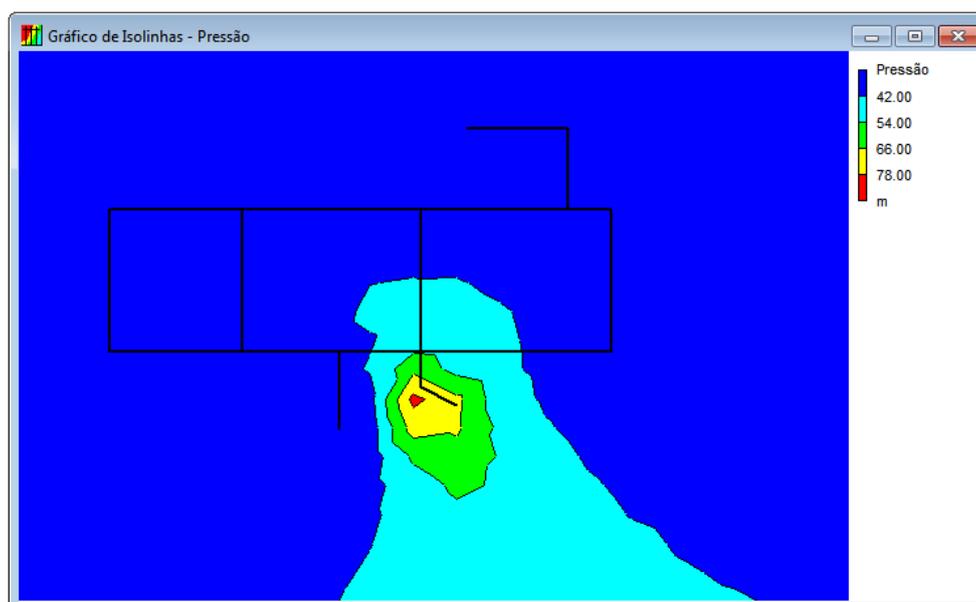


Figura 4.77 - Gráfico de isolinhas (pressão) da rede Hanoi sem booster

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

A maior ou menor eficiência do sistema está diretamente relacionada à qualidade do abastecimento, em termos de pressões e vazões disponíveis para os usuários; dos vazamentos e perdas físicas de água existentes na rede; e dos custos de investimento e operação envolvidos. Essas características supracitadas foram consideradas na formulação do modelo desenvolvido nesta tese, e foram implementadas por meio da programação dinâmica.

As simulações realizadas e apresentadas no Capítulo 4 (Resultados e Discussões), pelo programa desenvolvido neste trabalho, denominado *Toolkit de Dimensionamento Otimizado* (TDO), demonstra a viabilidade de sua aplicação. O algoritmo do TDO mostra-se eficiente como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão, haja vista que realiza adequadamente o dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água, procurando a uniformidade de pressão em todos os pontos de consumo, de maneira que a solução encontrada proporciona o menor custo de investimento e operação.

Após o dimensionamento otimizado, as simulações do comportamento hidráulico da rede podem ser analisadas pelo EPANET, por meio de gráficos e relatórios, tais como os gráficos isolinhas de pressão, facilitando a compreensão do comportamento da rede. A partir do diagnóstico do relatório final do dimensionamento, podem ser tomadas decisões sobre possíveis intervenções físicas ou operacionais, visando melhorar ainda mais a eficiência do sistema de distribuição de água.

Por meio dos resultados obtidos, conclui-se que o modelo de projeto de rede de distribuição de água com múltiplos bombeamentos proporciona a solução de mínimo custo, em comparação com o dimensionamento que não considera os bombeamentos secundários (*boosters*). Além disto, verificou-se que a inclusão do(s) *booster(s)* proporcionou a uniformidade de pressão nas tubulações, o que implica em menores perdas reais de água no sistema de abastecimento, e conseqüentemente, menores custos energéticos dos bombeamentos.

Mesmo com a inclusão do bombeamento secundário, o que implica, teoricamente, em aumento do custo energético (operacional), verificou-se neste trabalho que o custo energético atualizado da rede com *booster* não foi superior ao da rede sem *booster*, pelo contrário, foi menor. O que justifica tal resultado, é que ao setorizar a rede, obteve-se uma redução significativa no peso da pressurização inicial, ou seja, houve diminuição da altura manométrica no bombeamento do sistema principal de impulsão. Com isto, o custo energético no setor principal diminui consideravelmente, haja vista que quanto menor a altura manométrica do bombeamento, menor será o custo energético.

Os estudos de casos (seção 4.3) aplicados comprovam que a setorização, se bem aplicada, torna-se uma ótima aliada na otimização de redes de distribuição de água, gerando economias e melhorando o funcionamento hidráulico e energético do sistema. Os resultados alcançados demonstram que o dimensionamento mais vantajoso foi obtido por meio das redes com *boosters*.

As análises de sensibilidade (seções 4.3.2.1 e 4.3.2.2) realizadas demonstram que a inclusão dos *boosters*, nos setores de zona alta, proporciona pressões próximas das mínimas requeridas no projeto. Desta forma, há redução dos riscos de vazamentos na rede decorrentes de pressões elevadas. A partir das referidas análises de sensibilidade, comprova-se ainda que a setorização, com a inclusão do *booster*, é a solução mais econômica, que proporciona o dimensionamento otimizado da rede. Este estudo permite constatar que à medida que as cotas são elevadas, a utilização de *boosters* na rede tende a ser cada vez mais vantajoso.

Outra consideração relevante refere-se às alturas manométricas obtidas pelo TDO, sendo estas menores nas redes com *boosters*, o que evidentemente proporcionou menores custos de operação, favorecendo a eficiência hidráulica e energética da rede.

A Figura 5.1 sintetiza os benefícios obtidos com o dimensionamento otimizado da rede com múltiplos bombeamentos (primário e *boosters*).



Figura 5.1 - Conclusões sobre o dimensionamento com múltiplos bombeamentos

5.2 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de expandir a aplicabilidade e conhecimentos adquiridos no trabalho desenvolvido nesta tese, recomendam-se algumas sugestões, que parecem relevantes, no prosseguimento do tema estudado:

- Verificar o comportamento do modelo de dimensionamento, desenvolvido neste trabalho, utilizando redes reais de maior extensão, com a inclusão de um número maior de bombeamentos secundários.
- Implementar a metodologia deste trabalho em uma linguagem de programação orientada a objeto, utilizando outro método de programação, que não a programação dinâmica, a fim de comparar o poder computacional e de resposta de ambos os métodos.
- Automatizar a busca por melhores locais de inclusão dos bombeamentos secundários, para que o modelo encontre os trechos mais apropriados para inserção dos *boosters*, sem que seja necessária a interferência do projetista.
- Incorporar no modelo de dimensionamento, desenvolvido neste trabalho, os custos de investimento dos equipamentos de bombeamento, e não apenas o custo de implantação das tubulações e o custo operacional. E apresentar o tempo de retorno de investimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas Brasil - Abastecimento urbano de água**: Panorama nacional. Ministério do Meio Ambiente. ed. Brasília: Engecorps/Cobrape, v. 1, 2010.

ALBUQUERQUE, A. A. **Análises e Métodos de Otimização para Eficiência Energética de Estações Elevatórias em Sistemas de Abastecimento de Água**. 98 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB. 2007.

ALEGRE, H. et al. **Performance Indicators for Water Supply Services**. 2^a edition. ed. London/England: International Water Association Publishing (IWA), 2006.

ALMEIDA, R. **Operação de sistemas urbanos de abastecimento de água com base em modelos de otimização não-lineares**. 280 p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Recursos Hídricos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) - Faculdade de Engenharia Civil, Campinas/SP. 2001.

ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. Design of optimal water distribution systems. **Journal of Water Resources Research**, New York - USA, v. 13, n. 6, p. 885-900, 1977.

ALVES, W. C. et al. **Macromedição - DTA D2**. DTA D2 - Documento Técnico de Apoio nº D2, Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água - PNCDA DTA D2, [S.l.]. 2004.

ANDRADE FILHO, L. S. Bombas e Instalações Elevatórias. In: GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. **Manual de sistemas de bombeamento - Eficiência energética**. João Pessoa/PB: Editora Universitária – UFPB, 2012. Cap. 1, p. 11-52.

ARAQUE, D.; SALDARRIAGA, J. G. **Water Distribution Network Operational Optimization by Maximizing the Pressure Uniformity at Service Nodes**. Environmental and Water Resources Institute – EWRI. Reston - Virginia - USA: American Society of Civil Engineers – ASCE. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro/RJ. 1994.

ATKINSON, R. et al. **Genetic algorithm optimisation of level-controlled pumping station operation**. Water network modelling for optimal design and management. Exeter, U.K: Centre for Water Systems. 2000. p. 79–90.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Manual de Hidráulica**. 8ª edição. ed. São Paulo/SP: Edgard Blucher Ltda., 1998. 680 p.

BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Resultados Preliminares Ano base 2011**. Relatório Técnico, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro/RJ. 2012.

BEZERRA, S. T. M. **Método de Otimização para a Reabilitação de Redes de Distribuição de Água**. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, Campina Grande/PB. 2005.

BEZERRA, S. T. M. **Documento Técnico de Apoio - DTA D2 - Macromedição (Revisão e Ampliação)**. 3ª edição. ed. João Pessoa/PB: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - LENHS UFPB, 2009a. 200 p.

BEZERRA, S. T. M. **Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia**. 142 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UFPB, João Pessoa/PB. 2009b.

BEZERRA, S. T. M.; SILVA, S. A. S.; GOMES, H. P. Controle automático de pressão em sistemas de distribuição de água. In: GOMES, H. P. **Sistemas de Saneamento - Eficiência Energética**. João Pessoa/PB: Editora Universitária - Universidade Federal da Paraíba, 2010. Cap. 1, p. 9-28.

BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A. **GAMS - The General Algebraic Modeling System - Release 2.25 - A User's Guide**. Washington - DC - USA: Scientific Press Inc., 1992. 290 p.

CARVALHO, P. S. O. **“EficientE” – Um método de dimensionamento econômico para redes de distribuição de água**. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Centro de Tecnologia, UFPB, João Pessoa. 2007.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S. A. (ELETROBRAS). **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Consórcio Efficientia; Fundação de Pesquisa

e Assessoramento à Indústria (FUPAI). ed. Rio de Janeiro/RJ: Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) - Ministério de Minas e Energia (MME), 2005. 272 p.

COLOMBO, A. F.; KARNEY, B. W. Energy and costs of leaky pipes: toward comprehensive picture. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, v. 128, n. 6, 01 november 2002.

COSTA, K. E. **Otimização econômica de redes de distribuição de água em ambiente SIG**. 148 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO. 2010b.

COSTA, L. H. M. **Utilização de um algoritmo genético híbrido na operação de sistemas de abastecimento de água com ênfase na eficiência energética**. 146 p. Tese (Doutorado), Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2010a.

COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 187-196, Abril/Junho 2010.

CROSS, H. **Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors**. Illinois/USA: Bulletin (University of Illinois. Engineering Experimental Station), v. 286, 1936.

CUNHA, A. A. R. **Otimização Energética em Tempo Real da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água**. 179 p. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

CUNHA, M. C.; SOUSA, J. Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, v. 125, n. 4, p. 215–221, July/August 1999.

CUNHA, M. C.; SOUSA, J. J. O. Robust design of water distribution networks for a proactive risk management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, v. 136, n. 2, p. 227–236, 01 March 2010.

EVANGELISTA, R. M. **Implantação de programa de redução de perdas em sistemas de distribuição de água**. 146 p. Dissertação (mestrado), Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas/SP. 2004.

FONSECA, F. R. **Modelo de sistema de automação aplicado à setorização de redes de abastecimento hídrico**. 155 p. Tese (Doutorado em Sistemas de Potência), Departamento de Engenharia de Energia e Automação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

FORMIGA, K. T. M. **Metodologia da Otimização de Redes Malhadas Através da Programação Não Linear**. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Ciências e Tecnologia - Campus II, UFPB, Campina Grande/PB. 1999.

FUJIWARA, O.; KHANG, D. B. A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. **Journal of Water Resources Research**, Washington, DC, USA, v. 26, n. 4, p. 539–549, 1990.

FURUSAWA, R. T. **Contribuição ao dimensionamento de rede de distribuição de água por critério de custo global**. 207 p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

GESSLER, J.; WALSKY, T. M. Water distribution system optimization. **Technical Report EL-85-11**, Washington, USA, 1985.

GIACOMELLO, C.; KAPELAN, Z.; NICOLINI, M. Fast hybrid optimisation method for effective pump scheduling. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, p. 34, 3 March 2012.

GIUSTOLISI, O. et al. A computationally efficient modeling method for large size water network analysis. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston - Virginia - USA, p. 36, 28 September 2011.

GOLDBERG, D. E.; KUO, C. H. Genetic Algorithms in Pipeline Optimization. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 1, n. 2, p. 128-141, April 1987.

GOMES, A. S.; OTERO, O. L. C.; COURA, S. P. Ações de Eficiência Energética. In: GOMES, H. P. **Sistemas de Bombeamento - Eficiência Energética**. João Pessoa/PB: Editora Universitária/UFPB, 2009a. Cap. 7, p. 297-334.

GOMES, H. P. **Engenharia de Irrigação - Hidráulica dos Sistemas Pressurizados - Aspersão e Gotejamento**. 3ª edição. ed. Campina Grande/PB: Universidade Federal da Paraíba, v. 1, 1999. 412 p.

GOMES, H. P. **Sistema de Abastecimento de Água - Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias**. 3ª edição (Revisada e Ampliada). ed. João Pessoa: Editora Universitária, 2009. 277 p.

GOMES, H. P. et al. Optimal Dimensioning Model of Water Distribution Systems. **Journal Water SA**, Gezina - South Africa, v. 35, p. 421-432, 4 July 2009b.

GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. **Manual de sistemas de bombeamento - Eficiência energética**. João Pessoa/PB: Editora Universitária – UFPB, 2012. 189 p.

GOMES, H. P.; FORMIGA, K. T. M. PNL2000 - Método prático de dimensionamento econômico de redes malhadas de abastecimento de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, Porto Alegre/RS, v. 6, n. 4, p. 91-108, 2001.

GOMES, H. P.; GARCÍA, R. P.; REY, P. L. I. **Abastecimento de Água - O estado da arte e técnicas avançadas**. João Pessoa/PB: Editora Universitária, 2007. 386 p.

GOMES, H. P.; PEDROSA, L. A. F.; CASTRO, F. T. Dimensionamento de redes malhadas de abastecimento de água – Método Pimentel Gomes. **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Aracajú, 2001.

GOMES, H. P.; SILVA, J. G. Dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água, considerando variáveis as condições de contorno do projeto. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre/RS, v. 11, n. 2, p. 99-110, Abril/Junho 2006.

GONÇALVES, R. F. **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Rio de Janeiro: Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) e Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 2009. 352 p.

GRANADOS, A. **Infraestructuras de Regadíos - Redes Colectivas de Riego a Presión**. 2ª edição. ed. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Universidad Politécnica de Madrid, 1990.

GUIDOLIN, M. et al. **CWSNET - An object-oriented toolkit for water distribution system simulations**. Water Distribution System Analysis. Tucson, Arizona, USA: American Society of Civil Engineers – ASCE. 2010. p. 13.

GUMIER, C. C.; LUVIZOTTO JR., E. Aplicação de modelo de simulação-otimização na gestão de perda de água em sistemas de abastecimento. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro/RJ, v. 12, n. 1, p. 32-41, Janeiro/Março 2007.

HADDAD, O. B.; AFSHAR, A.; MARIÑO, M. A. Honey-Bees Mating Optimization (HBMO) Algorithm: A New Heuristic Approach for Water Resources Optimization. **Journal Water Resources Management**, Athens - Greece, v. 20, p. 661-680, 2006.

HYDRAULIC INSTITUTE AND EUROPUMP. **Pump Life Cycle Costs - A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems**. Parsippany (New Jersey); Brussels (Belgium); Washington, D.C (USA): U.S. Department of Energy, 2001. 194 p.

JAMES, K.; CAMPBELL, S. L.; GODLOVE, C. **Água e Energia: energia usada em sistemas de água**. [S.l.]. 2002.

JUN, L.; GUOPING, Y. Iterative methodology of pressure-dependent demand based on EPANET for pressure-deficient water distribution analysis. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, p. 52, 7 January 2012.

KADAR, Y.; BARIUDIN, V. **Optimization Model for the Design of Water Supply Network**. World Water and Environmental Resources Congress (2001). Reston - Virginia - USA: American Society of Civil Engineers – ASCE. 2004.

KANG, D.; LANSEY, K. Scenario-based Robust Optimization of Regional Water/Wastewater Infrastructure. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, p. 45, 2 February 2012.

KARMELI, D.; GADISH, Y.; MEYERS, S. Design of optimal water distribution networks. **Journal of Pipeline Division**, New York, v. 94, n. 10, 1968.

KOIDE, S. **Otimização de redes de distribuição de água – estudo de dois modelos**. 92 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro/RJ. 1984.

KRAPIVKA, A.; OSTFELD, A. Coupled Genetic Algorithm - Linear Programming Scheme for Least-Cost Pipe Sizing of Water-Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, v. 135, n. 5, 01 July 2009.

LANSEY, K. E. **The Evolution of Optimizing Water Distribution System Applications**. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. Cincinnati - Ohio - USA: American Society of Civil Engineers - ASCE. 2006.

LASDON, L. S.; WARREN, A. D. **Grg2 User's Guide**. 54 p. Department of Management Science and Information Systems, University of Texas at Austin, Texas. 1997.

LEAL, A. F. **Estudo Comparativo de Métodos de Otimização de Redes Malhadas Pressurizadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Ciências e Tecnologia, UFPB, Campina Grande/PB. 1995.

LEAL, A. F.; GOMES, H. P. **Dimensionamento de redes urbanas de abastecimento d'água a partir do método Granados**. Memórias de XIX Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba/Argentina: Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA); International Association for Hydraulic Research (IAHR). 2000. p. 183-192.

LOGANATHAN, G. V.; GREENE, J. J.; AHN, T. J. Design heuristic for globally minimum cost water-distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, USA, v. 121, n. 2, p. 182–192, 1995.

LOPES, A. V. **Otimização do dimensionamento e análise de confiabilidade de redes de distribuição de água**. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2002.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; PRASAD, T. D.; PAECHTER, B. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, v. 134, n. 4, p. 10, 01 July 2008.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro/RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1987.

MAIER, H. R. et al. Ant Colony Optimization for Design of Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 3, p. 200-209, May/June 2003.

MARCKA, E.; SILVA, R. T.; CONEJO, J. G. L. **Indicadores de Perdas nos Sistemas de Abastecimento de Água**. DTA A2 - Documento Técnico de Apoio, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, PNCDA - Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água, Brasília/DF. 2004.

MARQUES, J. A. A. S.; SOUSA, J. J. O. **Hidráulica Urbana – Sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais**. 3ª edição. ed. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2011. 485 p.

MAYS, L. W.; TUNG, Y. K. **Hydrosystems Engineering And Management**. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, LLC, 2002. 550 p.

MELATO, D. S. **Discussão de uma metodologia para o diagnóstico e ações para redução de perdas de água - Aplicação no sistema de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo**. 133 p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

MELO, D. P. **Otimização de Redes Malhadas Abastecidas com Múltiplos Reservatórios, Bombas e Boosters através da Programação Não Linear**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Ciências e Tecnologia, UFPB, Campina Grande/PB. 2000.

MIRANDA, E. C. **Avaliação de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água – Indicadores de Perdas e Metodologias para Análise de Confiabilidade**. 200 p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília (UNB), Brasília/DF. 2002.

MOHAN, S.; BABU, K. S. J. Optimal water distribution network design with honey-bee mating optimization. **Journal of Computing in Civil Engineering**, Reston - Virginia - USA, v. 24, n. 1, p. 117-126, 01 January 2010.

MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água. **Revista Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p. 15-32, Janeiro a Abril 2010.

MOTA, H. J. S. **Dimensionamento Econômico de Redes de Distribuição de Águas Aplicando Algoritmo Genético**. 267 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza. 2007.

NARDO, A.; NATALE, M. **A Design Support Methodology for District Metering of Water Supply Networks**. Water Distribution System Analysis - WDSA. Tucson, Arizona, USA: ASCE - American Society of Civil Engineers. 2010. p. 18.

ODAN, F. K. **Previsão de Demanda para Sistemas de Abastecimento de Água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Hidráulica), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo/SP. 2010.

PEDROSA FILHO, L. A. **Um Modelo de Operação de Sistemas Adutores de Abastecimento de Água com Vistas a Minimização dos Custos Energéticos**. 160 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande/PB. 2006.

PENA, M. M. **Aplicação e Análise da Metodologia da IWA para o Controle de Perdas no Sistema de Abastecimento de Água da Baixada de Jacarepaguá/RJ**. 342 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro. 2010.

PRASAD, T. D. Design of Pumped Water Distribution Networks with Storage. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, January/February 2010.

REDE DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL (RECESA). **Abastecimento de água - Gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento - Guia do profissional em treinamento, nível 2**. Salvador/BA: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA), 2008. 139 p.

ROSSMAN, L. A. **The EPANET programmer's toolkit for analysis of water distribution systems**. 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference - WRPMD'99: Preparing for the 21st Century. Tempe, Arizona, USA: [s.n.], 1999.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 - User's Manual**. Tradução de H. P. GOMES e M. M. SALVINO. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory - United States Environmental Protection Agency (EPA), 2000. 200 p. Traduzido pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) - Brasil - 2009.

ROSSMAN, L. A. **EPANET Programmer's Toolkit**. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency's (EPA) - National Risk Management Research Laboratory, 2008.

ROSSMAN, L.; VAN ZYL, J. E. **The open sourcing of EPANET**. 12th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference - WDSA2010. Tucson, Arizona, USA: American Society of Civil Engineers – ASCE. 2010. p. 19-28.

SAKARYA, A. B. A.; MAYS, L. W. Optimal Operation of Water Distribution Pumps considering Water Quality. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 126, p. 210-220, July/ August 2000.

SALDARRIAGA, J. G.; VILLALBA, ; TAKAHASHI,. **Algorithms of Combinatorial Optimization Applied to Water Distribution Networks Design**. Environmental and Water Resources Institute - EWRI. Reston - Virginia - USA: American Society of Civil Engineers - ASCE. 2005.

SALVINO, M. M. **Método de Dimensionamento e Controle Operacional Otimizado para Redes de Distribuição de Água**. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Tecnologia, UFPB, João Pessoa/PB. 2009.

SILVA, J. G. **Otimização de Sistemas de Abastecimento de Água Considerando Variáveis as Condições de Contorno do Projeto**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Centro de Ciências e Tecnologia, UFPB, Campina Grande/PB. 2003.

SILVESTRE, P. **Hidráulica Geral**. Rio de Janeiro/RJ: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 316 p.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - Ano de referência 2009**. 616 p. Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília/DF. 2011.

SURIBABU, C. R. Heuristic based pipe dimensioning model for water distribution networks. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, Reston - Virginia - USA, p. 45, 17 February 2012.

TEBCHARANI, G. J. **Projeto ótimo de redes de distribuição de água via algoritmos genéticos multiobjetivos**. 116 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande/MS. 2007.

TODINI, E. Looped water distribution networks design using a resilience index. **Journal Urban Water**, Maryland Heights, MO, USA, p. 115-122, 2000.

TOLEDO, F. M. B.; SANTOS, M. O.; ARENALES, M. N. Logística de distribuição de água em redes urbanas – Racionalização energética. **Revista Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro/RJ, v. 28, n. 1, p. 75-91, Janeiro a Abril 2008.

TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. São Paulo/SP: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, v. 1, 2001. 185 p.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, v. 1, 2004. 643 p.

VAN ZYL, J. E.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, v. 130, n. 2, p. 160-170, March/April 2004.

VASAN, A.; SIMONOVIC, S. P. Optimization of water distribution network design using differential evolution. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, p. 9, 1 March 2010.

VENTURINI, M. A. A. G. **Contribuição ao estudo de otimização de redes hidráulicas através de um modelo de programação linear.** 97 p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas/SP. 1997.

VIANA, S. **Dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos utilizando algoritmos genéticos.** 114 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande. 2007.

VIEIRA, A. M. **Métodos iterativos de análise hidráulica e dimensionamento ótimo por programação linear de redes de distribuição de água.** 226 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro/RJ. 1980.

VINCIGUERA, V. **Avaliação do impacto da redução de pressão nas perdas reais em setor de distribuição de água do município de Campo Grande - MS.** 81 p. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande. 2009.

WALSKI, T. M. et al. Battle of the Network Models - Epilogue. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston - Virginia - USA, v. 113, n. 2, p. 13, March 1987.

WALSKI, T. M. et al. **Advanced Water Distribution Modeling and Management.** Waterbury, CT, USA: Hasted Press, 2003. 800 p.

WALSKI, T. M.; GESSLER, J.; SJOSTROM, J. W. **Water distribution systems - Simulation and sizing.** Michigan: Lewis Publishers, 1990.

WU, Y. Z.; SIMPSON, A. R. Competent Genetic-Evolutionary Optimization of Water Distribution Systems. **Journal of Computing in Civil Engineering**, 2001, v. 15, n. 2, p. 89-101, 2001.

APÊNDICE A

Fluxograma do Algoritmo do Programa TDO para
Redes com Múltiplos Bombeamentos

INÍCIO DO ALGORITMO
Múltiplos Bombeamentos

Atribuir

| | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Pressão Mínima Desejada | Rendimento (η) | Alcance do Projeto (n) | Taxa de Juros (i) | Taxa de Energia (e) | Tarifa de Energia (T) | Horas de Bombeamento (N_b) | Cota do Nível d'Água na Origem |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|

Abrir Rede INP → Obter quantidade de trechos (t) e nós (n) da rede → Obter Dados dos Tubos (Diâmetros, Rugosidades e Custos) → Obter Vazão Total da Rede

For (trecho := 1 to t) do
 Atribuir diâmetro mínimo ao trecho (Condição Inicial de Contorno)
 fim do for

$G_e (\$/m) = P (kW/m) * T (\$/kWh) * N_b (\text{anual}) * F_a$

P = Potência do conjunto motor-bomba
 T = Tarifa de energia elétrica
 N_b = Número de horas de bombeamento
 F_a = Fator de atualização ou fator de valor presente

Calcular Gradiente Energético (G_e)
 Gradiente de Custo Ótimo ($G_{c\acute{o}t\text{im}o}$) = -999999999

$P(kW/m) = \frac{9,81 \times Q_{total} (m^3/s)}{\eta (\text{decimais})}$

$F_a = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \times \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right]$

WHILE ($G_e > G_{c\acute{o}t\text{im}o}$) do

ITERAÇÕES SUBSEQUENTES

For (no := 1 to n) do
 Pmin Global = 999999999
 Obter Pressão Mínima Atual (Pmin Atual)
 SE (Pmin Atual < Pmin Global)
 Verdadeiro → Pmin Global := Pmin Atual
 Falso → Pmin Global não é alterada
 fim do for

$G_{c\acute{o}t\text{im}o} = 999999999$

For (trecho := 1 to t) do

Atribuir diâmetro subsequente

Obter o custo devido ao aumento do diâmetro do trecho
 Custo = [Comprimento * (Custo do Diâmetro Inicial - Custo do Diâmetro Subsequente)]

Calcular o gradiente de custo atual ($G_{c\acute{a}t\text{u}a}l$)
 $G_{c\acute{a}t\text{u}a}l = \text{Custo} / |\text{Pressão Mínima Global} - \text{Pressão Mínima Final}|$

SE ($G_{c\acute{a}t\text{u}a}l < G_{c\acute{o}t\text{im}o}$)
 Verdadeiro → $G_{c\acute{o}t\text{im}o} := G_{c\acute{a}t\text{u}a}l$
 Falso → $G_{c\acute{o}t\text{im}o}$ não é alterado

For (trecho := 1 to t) do
 Voltar trecho para o diâmetro inicial

Atribuir diâmetro subsequente ao trecho que proporcionou o $G_{c\acute{o}t\text{im}o}$

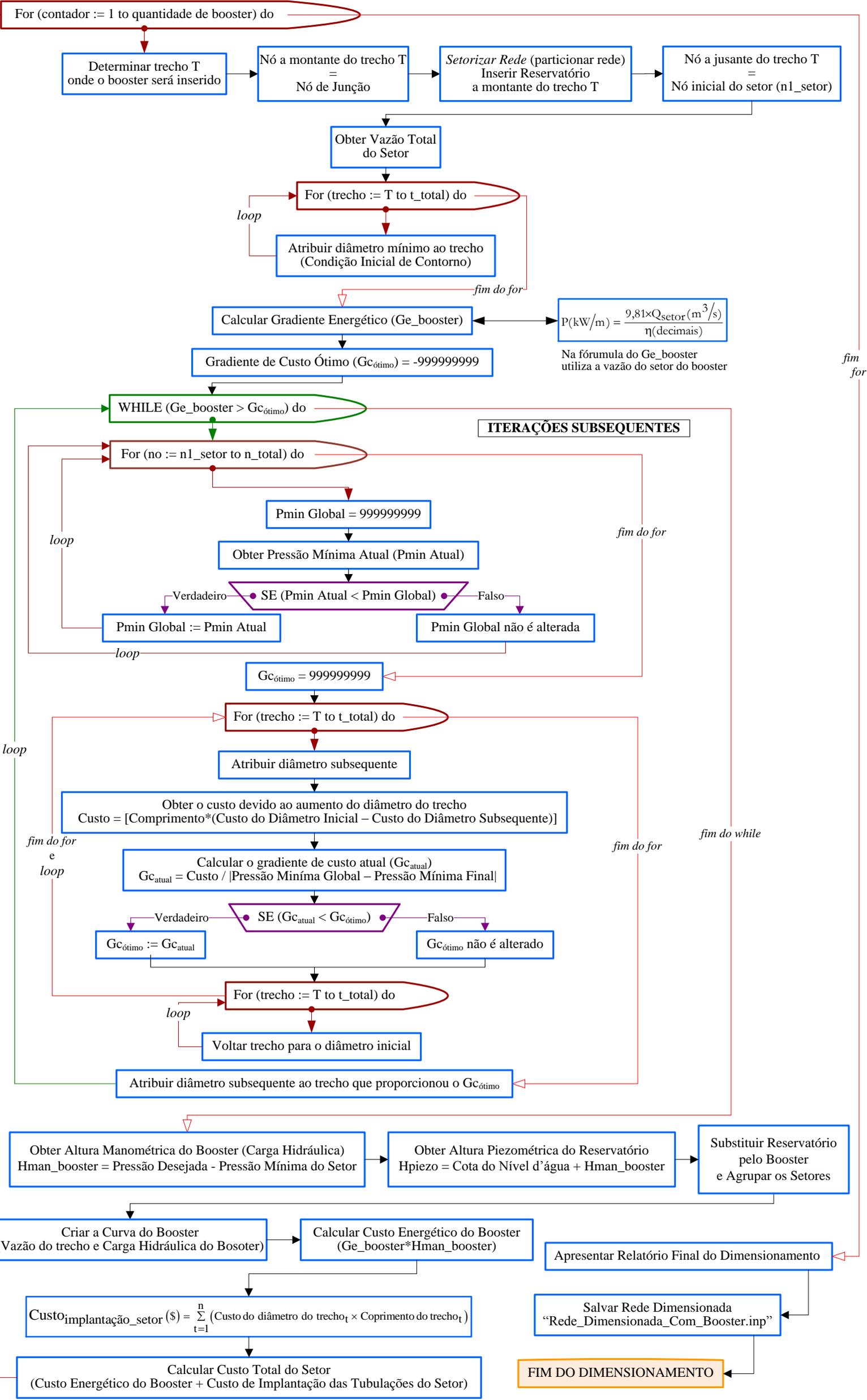
Obter Altura Manométrica (H_{man}) (Pressão Desejada - Pressão Mínima da Rede) → Obter Altura Piezométrica do Reservatório (Cota do Nível d'água na Origem + H_{man})

Calcular Custo Energético Atualizado ($G_e * H_{man}$) → $\text{Custo}_{\text{implantação}} (\$) = \sum_{t=1}^n (\text{Custo do diâmetro do trecho}_t \times \text{Comprimento do trecho}_t)$

Calcular Custo Total (Custo Energético + Custo de Implantação das Tubulações) → Apresentar Relatório Final do Dimensionamento → Salvar Rede Dimensionada "Rede_Dimensionada_Sem_Booster.inp"

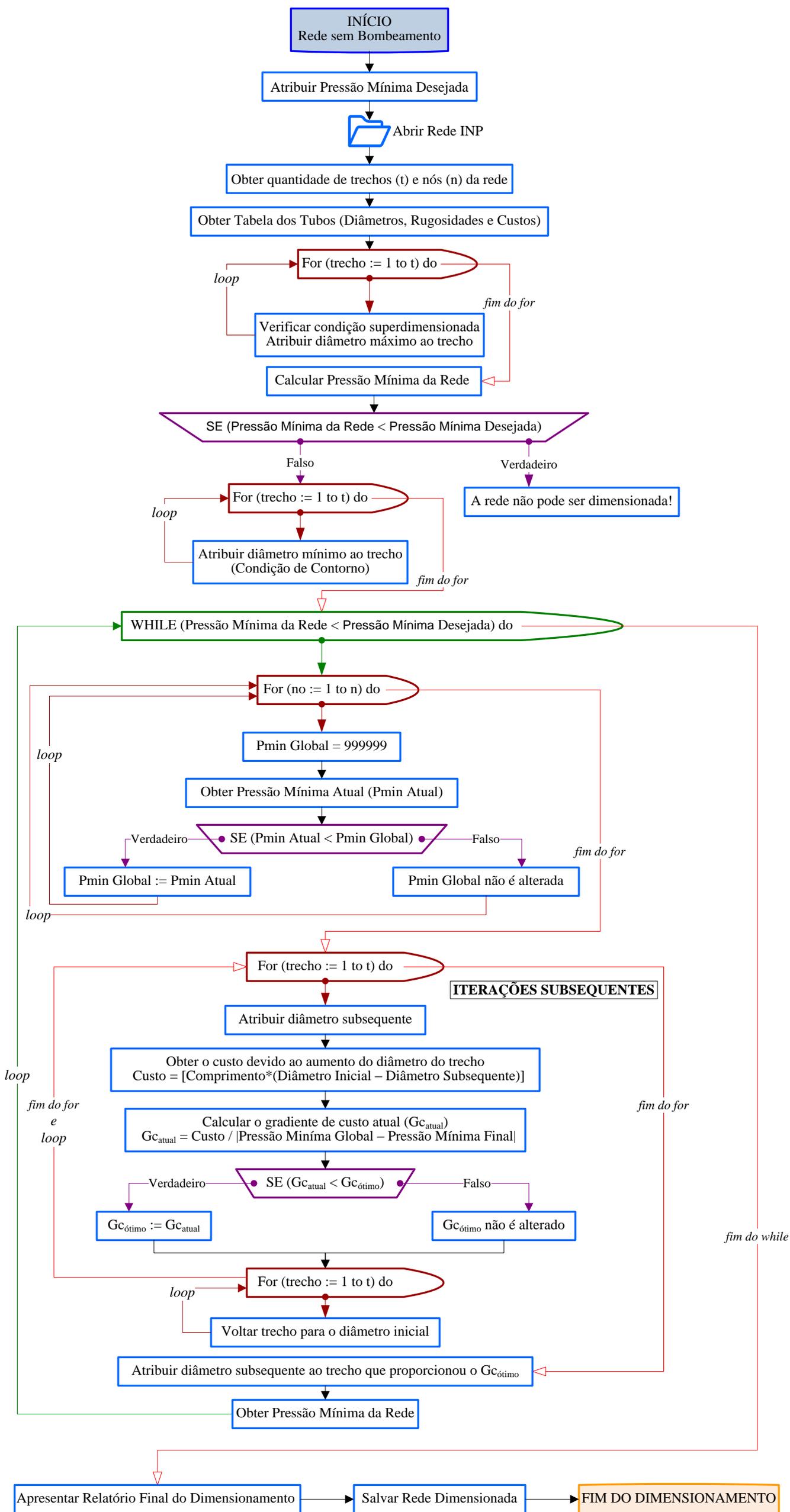
Desaja Inserir Booster na rede?
 Verdadeiro → Dimensionar Rede Com Boosters Próxima Página...
 Falso → FIM DO DIMENSIONAMENTO

**Continuação...
Dimensionamento da Rede com Boosters**



APÊNDICE B

Fluxograma do Algoritmo do Programa TDO para
Redes sem Bombeamento



APÊNDICE C

Cotas e demandas dos 63 nós da rede R9 adaptada

Comprimento dos 74 trechos da rede R9 adaptada

Rede R9 adaptada

| Identificador do nó | Cota (m) | Consumo-Base (l/s) | Identificador do Trecho | Comprimento (m) |
|---------------------|----------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| N1 | 5,00 | 2,51 | T1 | 2.540 |
| N2 | 5,00 | 44,07 | T2 | 350 |
| N3 | 4,00 | 41,24 | T3 | 1.140 |
| N4 | 4,50 | 1,04 | T4 | 1.430 |
| N5 | 4,50 | 0,86 | T5 | 1.020 |
| N6 | 4,50 | 1,32 | T6 | 1.430 |
| N7 | 3,00 | 2,97 | T7 | 1.710 |
| N8 | 5,00 | 1,80 | T8 | 900 |
| N9 | 4,00 | 2,96 | T9 | 140 |
| N10 | 3,00 | 4,66 | T10 | 215 |
| N11 | 4,50 | 4,54 | T11 | 175 |
| N12 | 4,50 | 8,80 | T12 | 180 |
| N13 | 4,50 | 4,26 | T13 | 260 |
| N14 | 5,00 | 2,98 | T14 | 205 |
| N15 | 4,50 | 1,32 | T15 | 255 |
| N16 | 4,50 | 4,97 | T16 | 260 |
| N17 | 5,00 | 3,91 | T17 | 115 |
| N18 | 4,70 | 3,70 | T18 | 180 |
| N19 | 5,00 | 1,87 | T19 | 275 |
| N20 | 5,00 | 3,12 | T20 | 315 |
| N21 | 4,50 | 3,52 | T21 | 200 |
| N22 | 4,00 | 3,61 | T22 | 175 |
| N23 | 4,00 | 6,48 | T23 | 300 |
| N24 | 4,50 | 4,91 | T24 | 250 |
| N25 | 4,00 | 6,50 | T25 | 800 |
| N26 | 2,50 | 8,32 | T26 | 150 |
| N27 | 2,50 | 4,56 | T27 | 255 |
| N28 | 4,00 | 4,25 | T28 | 260 |
| N29 | 4,00 | 5,17 | T29 | 230 |
| N30 | 3,50 | 4,94 | T30 | 200 |
| N31 | 4,50 | 4,09 | T31 | 225 |
| N32 | 5,00 | 3,69 | T32 | 210 |
| N33 | 5,00 | 4,04 | T33 | 330 |
| N34 | 4,50 | 0,86 | T34 | 190 |
| N35 | 4,30 | 4,36 | T35 | 285 |
| N36 | 6,00 | 3,22 | T36 | 210 |
| N37 | 4,50 | 2,53 | T37 | 240 |
| N38 | 4,50 | 2,31 | T38 | 250 |
| N39 | 4,00 | 2,50 | T39 | 110 |
| N40 | 4,00 | 2,89 | T40 | 280 |

Rede R9 adaptada (continuação)

| Identificador do nó | Cota (m) | Consumo-Base (l/s) | Identificador do Trecho | Comprimento (m) |
|---------------------|----------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| N41 | 4,00 | 2,48 | T41 | 340 |
| N42 | 4,00 | 4,61 | T42 | 270 |
| N43 | 4,00 | 3,47 | T43 | 240 |
| N44 | 4,50 | 1,35 | T44 | 160 |
| N45 | 5,00 | 8,59 | T45 | 260 |
| N46 | 4,50 | 6,40 | T46 | 250 |
| N47 | 5,00 | 6,07 | T47 | 330 |
| N48 | 3,50 | 4,95 | T48 | 230 |
| N49 | 3,50 | 8,38 | T49 | 385 |
| N50 | 3,50 | 11,70 | T50 | 160 |
| N51 | 5,00 | 5,64 | T51 | 220 |
| N52 | 6,00 | 5,57 | T52 | 190 |
| N53 | 6,00 | 6,30 | T53 | 295 |
| N54 | 6,00 | 3,26 | T54 | 390 |
| N55 | 6,00 | 3,60 | T55 | 370 |
| N56 | 6,00 | 4,83 | T56 | 190 |
| N57 | 6,00 | 4,50 | T57 | 310 |
| N58 | 5,00 | 2,80 | T58 | 205 |
| N59 | 3,00 | 5,46 | T59 | 305 |
| N60 | 3,50 | 62,45 | T60 | 295 |
| N61 | 6,00 | 8,19 | T61 | 300 |
| N62 | 3,50 | 58,87 | T62 | 290 |
| N63 | 3,50 | 3,26 | T63 | 180 |
| | | | T64 | 315 |
| | | | T65 | 300 |
| | | | T66 | 295 |
| | | | T67 | 215 |
| | | | T68 | 140 |
| | | | T69 | 220 |
| | | | T70 | 220 |
| | | | T71 | 285 |
| | | | T72 | 300 |
| | | | T73 | 315 |
| | | | T74 | 170 |

APÊNDICE D

Relatórios dos Dimensionamentos da rede R9
com Boosters a Montante dos Setores A, B e C

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Múltiplos Bombeamentos

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 n = 75 %
 n = 20 ano
 i = 12 % a.a.
 e = 6 % a.a.
 T = 0,2 \$/kWh
 Nb = 20 h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 458,38 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 3
 Local do Booster (a montante do setor): A, B e C
 Vazão na Origem: 91,04 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 55,39; (2) 89,78; (3) 222,17 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 3; (2) 6,21; (3) 5,81 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 36,3 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 30,6 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 60,6 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.700.612,5
 → Custo Energético: \$2.980.502,5
 → **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$7.681.115**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 31,54 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 25,84 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 55,84 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.450.663
 → Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$2.516.545,5
 → Custo Energético (Booster): \$428.081,28
 → Custo Energético Total: \$2.944.626,78
 → **Custo Total da Rede (Com Booster): \$7.395.290**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$285.825 (3,72%) em relação a rede sem booster

| Fa: | Ge da Origem (\$/m): | Ge do Booster (\$/m): |
|-------|----------------------|---|
| 11,13 | 97.388,23 | (1) 11.767,33; (2) 19.075,54; (3) 47.203,18 |

Rede_R9_Setor_ABC+0.inp Fim do Dimensionamento!

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Múltiplos Bombeamentos

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 n = 75 %
 n = 20 ano
 i = 12 % a.a.
 e = 6 % a.a.
 T = 0,2 \$/kWh
 Nb = 20 h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 458,38 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 3
 Local do Booster (a montante do setor): A, B e C
 Vazão na Origem: 91,04 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 55,39; (2) 89,78; (3) 222,17 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 13; (2) 16,21; (3) 15,81 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 46,3 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 40,6 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 70,6 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.700.612,5
 → Custo Energético: \$3.954.384,75
 → **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$8.654.997**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 31,54 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 25,84 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 55,84 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.450.663
 → Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$2.516.545,5
 → Custo Energético (Booster): \$1.208.541,75
 → Custo Energético Total: \$3.725.087,25
 → **Custo Total da Rede (Com Booster): \$8.175.750**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$479.247 (5,54%) em relação a rede sem booster

| Fa: | Ge da Origem (\$/m): | Ge do Booster (\$/m): |
|-------|----------------------|---|
| 11,13 | 97.388,23 | (1) 11.767,33; (2) 19.075,54; (3) 47.203,18 |

Rede_R9_Setor_ABC+10.inp Fim do Dimensionamento!

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Múltiplos Bombeamentos

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 n = 75 %
 n = 20 ano
 i = 12 % a.a.
 e = 6 % a.a.
 T = 0,2 \$/kWh
 Nb = 20 h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 458,38 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 3
 Local do Booster (a montante do setor): A, B e C
 Vazão na Origem: 91,04 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 55,39; (2) 89,78; (3) 222,17 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 23; (2) 26,21; (3) 25,81 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 56,3 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 50,6 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 80,6 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.700.612,5
 → Custo Energético: \$4.928.267
 → **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$9.628.880**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 31,54 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 25,84 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 55,84 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.450.663
 → Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$2.516.545,5
 → Custo Energético (Booster): \$1.989.002,25
 → Custo Energético Total: \$4.505.547,75
 → **Custo Total da Rede (Com Booster): \$8.956.211**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$672.669 (6,99%) em relação a rede sem booster

| Fa: | Ge da Origem (\$/m): | Ge do Booster (\$/m): |
|-------|----------------------|---|
| 11,13 | 97.388,23 | (1) 11.767,33; (2) 19.075,54; (3) 47.203,18 |

Rede_R9_Setor_ABC+20.inp Fim do Dimensionamento!

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Múltiplos Bombeamentos

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 n = 75 %
 n = 20 ano
 i = 12 % a.a.
 e = 6 % a.a.
 T = 0,2 \$/kWh
 Nb = 20 h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 458,38 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 3
 Local do Booster (a montante do setor): A, B e C
 Vazão na Origem: 91,04 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 55,39; (2) 89,78; (3) 222,17 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 33; (2) 36,21; (3) 35,81 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 66,3 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 60,6 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 90,6 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.700.612,5
 → Custo Energético: \$5.902.149
 → **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$10.602.762**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 31,54 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 25,84 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 55,84 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.450.663
 → Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$2.516.545,5
 → Custo Energético (Booster): \$2.769.462,75
 → Custo Energético Total: \$5.286.008,25
 → **Custo Total da Rede (Com Booster): \$9.736.671**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$866.091 (8,17%) em relação a rede sem booster

| Fa: | Ge da Origem (\$/m): | Ge do Booster (\$/m): |
|-------|----------------------|---|
| 11,13 | 97.388,23 | (1) 11.767,33; (2) 19.075,54; (3) 47.203,18 |

Rede_R9_Setor_ABC+30.inp Fim do Dimensionamento!

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Múltiplos Bombeamentos

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 n = 75 %
 n = 20 ano
 i = 12 % a.a.
 e = 6 % a.a.
 T = 0,2 \$/kWh
 Nb = 20 h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 458,38 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 3
 Local do Booster (a montante do setor): A, B e C
 Vazão na Origem: 91,04 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 55,39; (2) 89,78; (3) 222,17 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 43; (2) 46,21; (3) 45,81 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 76,3 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 70,6 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 100,6 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.700.612,5
 → Custo Energético: \$6.876.031
 → **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$11.576.644**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 31,54 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 25,84 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 55,84 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.450.663
 → Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$2.516.545,5
 → Custo Energético (Booster): \$3.549.923,25
 → Custo Energético Total: \$6.066.468,75
 → **Custo Total da Rede (Com Booster): \$10.517.132**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$1.059.512 (9,15%) em relação a rede sem booster

| Fa: | Ge da Origem (\$/m): | Ge do Booster (\$/m): |
|-------|----------------------|---|
| 11,13 | 97.388,23 | (1) 11.767,33; (2) 19.075,54; (3) 47.203,18 |

Rede_R9_Setor_ABC+40.inp Fim do Dimensionamento!

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Múltiplos Bombeamentos

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 n = 75 %
 n = 20 ano
 i = 12 % a.a.
 e = 6 % a.a.
 T = 0,2 \$/kWh
 Nb = 20 h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 458,38 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 3
 Local do Booster (a montante do setor): A, B e C
 Vazão na Origem: 91,04 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 55,39; (2) 89,78; (3) 222,17 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 53; (2) 56,21; (3) 55,81 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 86,3 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 80,6 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 110,6 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.700.612,5
 → Custo Energético: \$7.849.913
 → **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$12.550.526**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 31,54 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 25,84 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 55,84 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.450.663
 → Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$2.516.545,5
 → Custo Energético (Booster): \$4.330.383,5
 → Custo Energético Total: \$6.846.929
 → **Custo Total da Rede (Com Booster): \$11.297.592**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$1.252.934 (9,98%) em relação a rede sem booster

| Fa: | Ge da Origem (\$/m): | Ge do Booster (\$/m): |
|-------|----------------------|---|
| 11,13 | 97.388,23 | (1) 11.767,33; (2) 19.075,54; (3) 47.203,18 |

Rede_R9_Setor_ABC+50.inp Fim do Dimensionamento!

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Múltiplos Bombeamentos

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 n = 75 %
 n = 20 ano
 i = 12 % a.a.
 e = 6 % a.a.
 T = 0,2 \$/kWh
 Nb = 20 h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 458,38 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 3
 Local do Booster (a montante do setor): A, B e C
 Vazão na Origem: 91,04 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 55,39; (2) 89,78; (3) 222,17 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 103; (2) 106,21; (3) 105,81 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 136,3 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 130,6 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 160,6 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.700.612,5
 → Custo Energético: \$12.719.323
 → **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$17.419.936**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 31,54 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 25,84 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 55,84 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.450.663
 → Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$2.516.545,5
 → Custo Energético (Booster): \$8.232.686
 → Custo Energético Total: \$10.749.231,5
 → **Custo Total da Rede (Com Booster): \$15.199.894**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$2.220.042 (12,74%) em relação a rede sem booster

Fa: 11,13 Ge da Origem (\$/m): 97.388,23 Ge do Booster (\$/m): (1) 11.767,33; (2) 19.075,54; (3) 47.203,18

Rede_R9_Setor_ABC+100.inp Fim do Dimensionamento!

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Múltiplos Bombeamentos

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca
 n = 75 %
 n = 20 ano
 i = 12 % a.a.
 e = 6 % a.a.
 T = 0,2 \$/kWh
 Nb = 20 h/dia
 Cota do nível d'água na origem = 30 m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: 458,38 l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster: 3
 Local do Booster (a montante do setor): A, B e C
 Vazão na Origem: 91,04 l/s
 Vazão do Booster:
 (1) 55,39; (2) 89,78; (3) 222,17 l/s
 Carga Hidráulica do Booster:
 (1) 203; (2) 206,21; (3) 205,81 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 236,3 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 230,6 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 260,6 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.700.612,5
 → Custo Energético: \$22.458.144
 → **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$27.158.756**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 31,54 mca
 → Velocidade Máxima: 2,44 m/s
 → Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 25,84 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 55,84 mca
 → Custo de Implantação das Tubulações: \$4.450.663
 → Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$2.516.545,5
 → Custo Energético (Booster): \$16.037.291
 → Custo Energético Total: \$18.553.836,5
 → **Custo Total da Rede (Com Booster): \$23.004.500**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$4.154.256 (15,3%) em relação a rede sem booster

Fa: 11,13 Ge da Origem (\$/m): 97.388,23 Ge do Booster (\$/m): (1) 11.767,33; (2) 19.075,54; (3) 47.203,18

Rede_R9_Setor_ABC+200.inp Fim do Dimensionamento!

Dimensionamento Otimizado de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Múltiplos Bombeamentos

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = mca

n = %

n = ano

i = % a.a.

e = % a.a.

T = \$/kWh

Nb = h/dia

Cota do nível d'água na origem = m

Dados dos Tubos **Abrir Rede**

Vazão Total: l/s

Dados da Rede com Booster

Quantidade de Booster:

Local do Booster (a montante do setor):

Vazão na Origem: l/s

Vazão do Booster:
 l/s

Carga Hidráulica do Booster:
 mca

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

DIMENSIONAMENTO DA REDE SEM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 336,3 mca
→ Velocidade Máxima: 2,44 m/s
→ Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 330,6 mca
→ Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 360,6 mca
→ Custo de Implantação das Tubulações: \$4.700.612,5
→ Custo Energético: \$32.196.966
→ **Custo Total da Rede (Sem Booster): \$36.897.580**

DIMENSIONAMENTO DA REDE COM BOOSTER:

→ Pressão Mínima: 25 mca; Pressão Máxima: 31,54 mca
→ Velocidade Máxima: 2,44 m/s
→ Altura Manométrica do Bombeamento na Origem: 25,84 mca
→ Altura Piezométrica do Bombeamento na Origem: 55,84 mca
→ Custo de Implantação das Tubulações: \$4.450.663
→ Custo Energético (Bombeamento na Origem): \$2.516.545,5
→ Custo Energético (Booster): \$23.841.896
→ Custo Energético Total: \$26.358.441,5
→ **Custo Total da Rede (Com Booster): \$30.809.104**

A REDE COM BOOSTER É A MELHOR OPÇÃO!

→ Economia de \$6.088.476 (16,5%) em relação a rede sem booster

| Fa: | Ge da Origem (\$/m): | Ge do Booster (\$/m): |
|-------|----------------------|---|
| 11,13 | 97.388,23 | (1) 11.767,33; (2) 19.075,54; (3) 47.203,18 |

Rede_R9_Setor_ABC+300.inp Fim do Dimensionamento!