



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Mestrado – Doutorado

**MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO E CONTROLE
OPERACIONAL OTIMIZADO PARA REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Por

Moisés Menezes Salvino

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Mestre.*

João Pessoa – Paraíba

Março, 2009

MOISÉS MENEZES SALVINO

**MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO E CONTROLE
OPERACIONAL OTIMIZADO PARA REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

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

Orientador: Heber Pimentel Gomes

João Pessoa – Paraíba

Março/2009

S182m Salvino, Moisés Meneses.
Método de Dimensionamento e Controle Operacional Otimizado para Redes de Distribuição de Água / Moisés Meneses Salvino. – João Pessoa, 2009.
62p.
Orientador: Heber Pimentel Gomes.
Dissertação (mestrado) CT/UFPB
1. Água- Distribuição – controle operacional 2. EPANET - Software de simulação de Sistema

UFPB/BC

C.D.U.: 626.824(043)

**MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO E CONTROLE
OPERACIONAL OTIMIZADO PARA REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

por

Moisés Menezes Salvino

Dissertação aprovada em 20 de Março de 2009

Período letivo: 2009.1

Prof. Dr. José Gomes da Silva

Examinador Externo

Prof. Dr. Simplício Arnaud da Silva

Examinador Interno

Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Antonio Salvino Pereira e Maria de Fátima Menezes Salvino.

Dedico também a minha amada e companheira Laís Pereira Regis, pelo carinho e compreensão.

Aos meus irmãos Rivaldini Menezes Salvino, Erica Menezes Salvino e Daniele Menezes Salvino.

Aos meus primos Antonio Poggi, Joalison de Menezes Poggi e Josidete de Menezes Poggi.

A minha sogra Maricélia Pereira Regis.

Ao meu sogro Luiz Regis

Ao meu grande amigo e cunhado Luiz Henrique Pereira Regis

Aos demais familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela presente existência e por me guiar até aqui.

- Aos meus familiares, amigos, colegas de mestrado e professores, e a todos que participaram direta ou indiretamente da minha caminhada.
- Ao professor Heber Pimentel Gomes pela orientação, disponibilidade, paciência e, principalmente, a amizade construída ao longo deste trabalho.
- Ao professor Ângelo Vieira Mendonça pela orientação durante minha graduação, amizade e conselhos.
- Ao professor Clovis Dias pela amizade, conselhos e orientações durante minha vida acadêmica.
- Aos meus queridos amigos do LENHS – Saulo de Tarso Marques Bezerra, Roberta Macêdo Marques Gouveia, Magno José Gomes da Silva, João Silvino Oliveira Paiva da Silva, Leonardo Leite Brasil Montenegro, Wil Lavor Lucena Camboin e Andre Castelo Branco Gomes pelo companheirismo, amizade e préstimos.
- Ao colega e amigo Paulo Sergio Oliveira de Carvalho, pelos conselhos, amizade, desprendimento e ajuda indispensável no desenvolvimento do Lenhsnet.
- Aos amigos Tatiane Cruz de Sousa Honório, Eduardo Paz Serafim e demais amigos do curso de Ciências da Computação pelo apoio e amizade.
- Ao CNPq pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso.

MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO E CONTROLE OPERACIONAL OTIMIZADO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

RESUMO

O presente estudo tem o objetivo de desenvolver um método de dimensionamento econômico e controle operacional em sistemas de distribuição de água, composto pela rede de tubulações com seu sistema de impulsão. O método busca alcançar uma solução de custo mínimo para redes malhadas, ramificadas e para ampliações de redes já existentes e um controle operacional durante o tempo de vida útil de projeto. Para o desenvolvimento da metodologia de otimização, foram utilizadas técnicas de programação dinâmica, aliadas à conceitos econômicos básicos aplicados a engenharia. Esta junção de técnicas e conceitos propiciou o desenvolvimento de um algoritmo dinâmico iterativo de convergência e controle das variáveis de pressão e velocidade da água no interior das tubulações, para a obtenção da solução de custo mínimo. Para a determinação das variáveis de estado do sistema, a cada iteração, foi incorporado um algoritmo a um software de simulação hidráulica (Epanet) do escoamento permanente em redes malhadas de distribuição de água. A metodologia de dimensionamento e controle foi testada em quatro redes com diversas condições de contorno. Em todas as redes estudadas, o método funcionou adequadamente e apresentou desempenho satisfatório. Os resultados alcançados indicam que o método pode ser utilizado em redes de qualquer porte, pois não foram encontradas quaisquer restrições a sua aplicação. Uma vez dimensionada a rede, um controle operacional é proposto a fim de minimizar as pressões e demandas necessárias para atender a população atual, sendo seu aumento gradativo ao longo do tempo de projeto, tornando uma modelagem mais real para os dimensionamento existentes.

Palavras chaves – Dimensionamento, Redes de Distribuição, Controle Operacional, EPANET

METHOD OF SIZING AND CONTROL OPERATION OPTIMAL OF TO THE WATER DISTRIBUTION NETWORKS

ABSTRACT

This present research is intended to develop an method of economical sizing with operational control in water distribution systems, composed by pipes network, including its propulsion system. The method seeks to find a solution of minimum cost for meshes networks, ramified and extensions of existing networks and operational control in lifetime of project. To development of the methodology of optimization, was used techniques of dynamic programming, combined with basic economic concepts applied to engineering. This combination of techniques and concepts is intended to develop a dynamic iterative algorithm of convergence and the control of variables of pressure and velocity of water inside the pipes network to obtain the solution of minimum cost. To determinate the state variables, the each iteration, an algorithm was incorporated in a software of the hydraulic simulation (Epanet) by permanent outlet in networks meshes of the water distribution system. The methodology of economical sizing and control was tested on four networks with different boundary conditions. In all networks studied, the method worked perfectly and showed excellent performance. The results indicate that the method can be used in networks of any size, since there were no restrictions to its application. Once scaled to the network, an operational control is proposed to minimize the pressures and demands to meet the current population, and its gradual increase over time, making a modeling more realistic for the existing sizing.

Keywords - Sizing, Water Distribution Network, Operational Control, Epanet

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral e Objetivos Específicos	2
1.2 Descrição dos Capítulos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Redes de Distribuição de Água	4
2.1.1 Traçado da Rede.....	5
2.1.2 Variáveis de Estado.....	5
2.1.3 Escoamento	7
2.1.4 Tubulações	7
2.2 Métodos de Dimensionamento Econômico.....	8
2.3 Simulador Hidráulico (Epanet 2.0 Brasil).....	13
2.4 Controle Operacional	14
3. DIMENSIONAMENTO ECONOMICO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO	16
3.1 Desenvolvimento Metodológico	16
3.2 Cota Piezométrica de Cabeceira Fixa na Origem.....	18
3.3 Cota Piezométrica de Cabeceira Variável na Origem	20
4. CONTROLE OPERACIONAL OTIMIZADO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO.....	23
4.1 Desenvolvimento Metodológico	23
4.1.1 Quantidade de água requerida	23
4.2 Escalonamento Operacional Durante a Vida Útil do Projeto.....	24
4.3 Estudo de Caso	28
4.3.1 Rede de Distribuição Alimentada por um Reservatório Elevado.....	29
4.3.2 Rede de Distribuição Alimentada por um Conjunto Motor-Bomba.....	29
5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANALISE DOS RESULTADOS	31
5.1 Módulo de Dimensionamento Econômico – Lenhsnet	31
5.2 Aplicação em redes exemplo.....	34

5.2.1	Grande Setor.....	34
5.2.2	Setor Secundário	41
5.2.3	Hanoi	46
5.2.4	Nova York.....	50
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	55
6.1	Recomendações.....	57
	REFERÊNCIAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Configurações para dimensionamento em cota piezométrica fixa na origem	20
Figura 3.2 - Método Lenhsnet - Fluxograma do Algoritmo.....	22
Figura 4.1 - Representação do escalonamento do tempo de projeto na curva do sistema.....	25
Figura 4.2 - Alturas Manométricas do Sistema e de Projeto.....	26
Figura 4.3 - Exemplo de custo energético atualizado	28
Figura 4.4 - Exemplo de custo energético atualizado (escalonado)	28
Figura 5.1 - Modulo Lenhsnet implementado no Epanet 2.0 Brasil	31
Figura 5.2 - Janela de configurações do Lenhsnet	32
Figura 5.3 - Tabela de tubos disponíveis.....	33
Figura 5.4 - Traçado da Rede Grande Setor.....	34
Figura 5.5 - Configurações da rede Grande Setor.....	36
Figura 5.6 - Rede Grande Setor dimensionada.....	37
Figura 5.7 - Relatório Resumo para o Grande Setor.....	37
Figura 5.8 - Traçado da Rede Setor Secundário.....	41
Figura 5.9 - Configurações da rede Setor Secundário.....	43
Figura 5.10 - Rede Setor Secundário dimensionada	43
Figura 5.11 - Relatório Resumo para o Setor Secundário	44
Figura 5.12 - Esquema da Rede de Hanoi.....	46
Figura 5.13 - (a) Rede de Nova York e em (b) proposta de ampliação.....	51
Figura 5.14 - Rede de Nova York Dimensionada (Ampliação)	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Custo das tubulações para a rede Grande Setor.	35
Tabela 5.2 - Dados referentes aos nós e trechos para a rede do Grande Setor.	35
Tabela 5.3 - Soluções da Rede Grande Setor – Diâmetros (mm).	38
Tabela 5.4 - Pressões da Rede Grande Setor.	38
Tabela 5.5 - Variáveis de Estado Referente aos Trechos da Rede	39
Tabela 5.6 - Lenhsnet e Outros Métodos Aplicados ao Grande Setor – Custos.	39
Tabela 5.7 - População e Vazão de Projeto.	40
Tabela 5.8 - Calculo do Custo Energético Atualizado em 2004	40
Tabela 5.9 - Lenhsnet e Outros Métodos Aplicados ao Grande Setor – Custos.	41
Tabela 5.10 - Dados referentes a rede do Setor Secundario.	42
Tabela 5.11 - Pressões da Rede Setor Secundário.	44
Tabela 5.12 - Variáveis de Estado Referente aos Trechos da Rede	45
Tabela 5.13 - Lenhsnet e Outros Métodos Aplicados ao Grande Setor – Custos.	45
Tabela 5.14 - Dados referentes aos nós e trechos para a rede de Hanoi.	47
Tabela 5.15 - Custo das tubulações para a rede Hanoi.	48
Tabela 5.16 - Soluções da Rede Hanoi – Diâmetros (mm).	48
Tabela 5.17 - Pressões e custos do dimensionamento otimizado da Rede Hanoi	49
Tabela 5.18 - Dados referente a rede Nova York.	51
Tabela 5.19 - Custo das tubulações para a rede Nova York.	52
Tabela 5.20 - Resultado das pressões da rede Nova York	53
Tabela 5.21 - Novos trechos da rede de Nova York	54
Tabela 5.22 - Custo da rede Nova York.	54

LISTA DE SÍMBOLOS

$(h_f)_i$ – perda de carga no trecho i

*.LN – extensão de arquivos utilizados pelo módulo Lenhsnet

*.net – extensão de arquivos utilizados pelo software Epanet

AEs – Algoritmos Evolucionários

AGs – Algoritmos Genéticos

C_1 – Custo do trecho em seu diâmetro original

C_2 – Custo do trecho no diâmetro superior ao original

$C_{e,t}$ – Custo energético, atualizado, para um determinado tempo

d_n – demanda concentrada nesse nó

Epanet – Software de simulação hidráulica

E_{p_j} – energia de impulsão aplicada na malha ou anel

F_a – Fator de atualização

G_e – Gradiente energético

G_p – Gradiente de Pressão

G_p^* – Gradiente de pressão ótimo

GPL – Gradiente de Programação Linear

h – horas de funcionamento diário das unidades dos sistemas de abastecimento

H_L – perda de carga através da formula de Hazen-Williams

$H_{man,t}$ – Altura manométrica para um determinado tempo.

k_1 – coeficiente do dia de maior consumo

k_2 – coeficiente da hora de maior consumo

k_n – número de trechos com vazões chegando no nó n

N_b – Número de horas de bombeamento anual

P – Potência requerida pelo conjunto elevatório

p_k – número de fontes de energia de impulsão dentro do anel k

PL – Programação Linear

PNL – Programação Não Linear
Pop – População a ser abastecida
Pop,t – População a ser abastecida em um determinado tempo.
PRFV – Poliéster Revestido com Fibra de Vidro
 P_t – potência requerida em um determinado tempo.
PVC – Policloreto de Vinila
q – Consumo per capita
Q – Vazão demandada pelo sistema
 $Q_{entra(i)}$ – vazão de trecho i que chega no nó n
 q_n – número de trechos com vazões saindo do nó n
 $Q_{sai(j)}$ – vazão de trecho j que sai no nó n
 Q_t – Vazão demandada em um determinado tempo.
RAM – Random Access Memory (Memória de Acesso Aleatório)
T – Tarifa de energia elétrica
 T^* – Trecho ótimo
WDS – Sistema de Distribuição de Água
 z_k – número de trechos no anel k em questão
 Δp – Variação de pressão no nó mais desfavorável
 η – Rendimento do conjunto motor-bomba

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Uma rede de distribuição de água é a parte do sistema de abastecimento que representa a maior parcela de custo, representando de 50% a 75% do custo total e é formada por tubulações, bombas, reservatórios e órgãos acessórios, com a finalidade de distribuir água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade, qualidade, e pressão adequadas.

Nesse contexto, qualquer redução no custo dessa parcela do sistema, provocará uma significativa diminuição financeira em termos percentuais no investimento do sistema como um todo. Surgindo então a necessidade do desenvolvimento de métodos de cálculo que propiciem um dimensionamento com eficiência, considerando não apenas o aspecto técnico, mas a busca do custo mínimo para as redes de distribuição de água.

Segundo Gomes (2004), o dimensionamento hidráulico de sistemas de tubulações é hidraulicamente indeterminado, dependendo de quem os concebe, podendo admitir inúmeras soluções de cálculo, bem como alternativas de projeto. No entanto, existirá apenas uma alternativa de custo mínimo, que corresponde à solução ótima em termos econômicos.

No princípio o dimensionamento se restringia, apenas, ao equilíbrio hidráulico da rede. A inovação do aspecto econômico aplicado ao dimensionamento de redes de abastecimento de água é algo relativamente recente. Entretanto, muitos desses métodos ficaram, apenas, no plano conceitual ou tiveram sua aplicabilidade restrita, devido às limitações tecnológicas da época. Atualmente, com o desenvolvimento e popularização dos sistemas computacionais e ainda o seu poder de processamento, a proposição e utilização de métodos de cálculos complexos são uma realidade corrente.

Diante dos recursos computacionais disponíveis e o estudo econômico e técnico avançado aplicado ao dimensionamento, que envolvem muitas variáveis hidráulicas e econômicas visando à minimização dos custos, o método de cálculo proposto incorporado no simulador hidráulico Epanet utiliza uma programação dinâmica e iterativa na busca de um custo mínimo para o dimensionamento de uma rede de distribuição de água. Durante o dimensionamento, o projetista poderá impor limites a fim de controlar o resultado final do dimensionamento, o sistema a cada iteração analisa os limites interpostos e efetua a substituição de cada trecho de tubulação pelo mais econômico e dentro dos limites estabelecidos. O sistema é então realimentado com as novas variáveis de controle do sistema a fim de convergir para uma solução ótima de dimensionamento e ainda dentro dos limites pré-estabelecidos.

A aplicabilidade da metodologia incorporada ao simulador hidráulico é indiscutível, já que foi desenvolvido para dimensionar não só novas redes, mas também ampliações. Vale ressaltar que o Epanet com o método proposto denominado Lenhsnet já está disponível para download na página do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - UFPb (<http://www.lenhs.ct.ufpb.br>) de forma gratuita para a utilização por toda a sociedade técnica.

Uma vez a rede dimensionada, uma metodologia de operação é proposta a fim de fornecer variáveis operacionais (altura manométrica, demanda, pressão e potência) necessárias para atender durante a vida útil de projeto de forma escalonada. Assim sendo, estas variáveis seriam mais apropriadas para a população atual e iriam gradativamente se aproximando das dimensionadas em projeto quando o tempo se aproximasse do tempo de projeto. Em síntese, essa metodologia daria a população o que ela necessita e não mais que o necessário, economizando de forma considerável água e energia.

1.1 Objetivo Geral e Objetivos Específicos

Desenvolver um modelo de cálculo, programado associado a um simulador hidráulico, capaz de determinar de forma eficiente uma alternativa de custo mínimo para o dimensionamento de redes de distribuição de água, considerando não apenas o custo de implantação das tubulações, mas também o custo operacional da estação elevatória. Associado ao dimensionamento, há uma metodologia operacional prévia a fim de minimizar ainda mais as perdas de água e energia;

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um algoritmo que possibilite além do dimensionamento ótimo o controle das variáveis de estado do sistema em estudo;
- Implementar o algoritmo proposto a um simulador hidráulico, que tenha uma interface amigável ao projetista, um ótimo desempenho, praticidade e flexibilidade, adaptando-se assim as diversas condições de contorno de novas redes e ampliações de redes já existentes;
- Utilizar o Lenhsnet no dimensionamento em redes exemplos publicado na literatura, visando à validação e comprovação da eficácia do método. Aplicar o método de controle operacional otimizado em uma rede já dimensionada para fins comparativos e mostrando as diversas alternativas operacionais para sua execução durante o tempo de projeto.

1.2 Descrição dos Capítulos

A dissertação está estruturada em seis capítulos, sendo este o Capítulo I, incluindo esta Introdução.

O Capítulo II apresenta a revisão bibliográfica onde são abordados conceitos básicos em redes de abastecimento de água. Também neste capítulo são abordados os principais estudos e metodologias desenvolvidas ao longo dos anos, visando o dimensionamento de redes de abastecimento de água e controle operacional otimizado, apresentando o estado da arte.

O Capítulo III é dedicado à apresentação da metodologia para o dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água.

O Capítulo IV apresenta uma metodologia de controle operacional para redes de abastecimento de água, diminuindo o consumo de energia e o desperdício de água através do controle das variáveis principais do sistema de abastecimento ao longo da vida útil de projeto.

O Capítulo V mostra a aplicação das metodologias propostas, analisando e comparando os resultados obtidos com outros estudos realizados.

O Capítulo VI sintetiza as conclusões do presente estudo e apresenta as recomendações do autor, para futuros trabalhos utilizando a metodologia proposta.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Redes de Distribuição de Água

Uma rede de distribuição de água é o conjunto de elementos hidráulicos (tubulações, conexões, bombas, válvulas e reservatórios) interconectados, com a finalidade de conduzir e distribuir a água em quantidade e qualidade aceitável.

Um sistema de abastecimento de água compreende todo o conjunto dos processos de obtenção da água até sua utilização por parte dos consumidores, ou seja, compreende desde a sua captação no manancial ou através de águas profundas, estação elevatória, adutora, estação de tratamento, reservatório, rede de distribuição até as ligações domiciliares. Percebe-se que o foco deste trabalho representa uma parte do sistema de abastecimento de água e a razão por estudá-la é justificada por representar mais de 50% do custo total de investimento.

Para uma melhor uniformização e ordenação das tubulações, bem como facilitar a compreensão dos métodos de dimensionamento das redes de distribuição, todas as tubulações das redes aqui apresentadas, serão designadas por trechos. A seguir será apresentada uma nomenclatura específica, que designa as várias partes componentes de uma rede de distribuição:

- trecho: representa as tubulações que formam os percursos da rede de distribuição;
- nó: é um ponto de conexão entre dois ou mais trechos, pode ser representado como um ponto de consumo associado a uma demanda;

- ramal: conjunto de trechos conectados em série;
- artérias: trechos principais da rede de distribuição;
- traçado da rede: configuração da distribuição das tubulações, com a definição da situação topológica de todos os componentes da rede;
- cabeceira: origem da rede de distribuição, onde se localiza o reservatório de distribuição ou o bombeamento direto.

2.1.1 Traçado da Rede

A tipologia do traçado da rede pode ser classificada de dois tipos: malhada e ramificada. As redes ramificadas são caracterizadas por apresentarem um único sentido de fluxo para o escoamento. As redes malhadas, por sua vez, são caracterizadas por apresentarem os seus trechos interligados em forma de anéis, ou malhas, fazendo com que o sentido do fluxo possa ser alterado dependendo das pressões da rede, uma vez que o sentido do fluxo vai do ponto de maior pressão para o de menor pressão, semelhante a diferença de potencial aplicada a eletricidade. Portanto, o dimensionamento de uma rede malhada é muito mais complexo do que o de uma rede ramificada, já que uma pequena alteração de demanda em um dos nós resulta na alteração de todas as variáveis de estado da rede em estudo.

2.1.2 Variáveis de Estado

O controle das pressões hidráulicas efetivas que vão atuar em uma rede de distribuição de água é um fator fundamental, pois interfere diretamente na qualidade do serviço, nas perdas reais de água e no custo de implantação e operação do sistema. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, através da NBR12218 (1994), que trata do Projeto de Rede de Distribuição de Água para o Abastecimento Público, a pressão dinâmica mínima em qualquer ponto nas tubulações distribuidoras deve ser de 10 mca. A pressão máxima definida pela referida Norma é de 50 mca. Esta mesma norma recomenda, também, que os trechos de condutos principais que não abastecem consumidores ou tubulações secundárias não estejam sujeitos aos limites de pressões máximos e mínimos estabelecidos.

Segundo Gomes (2004), em cidades com topografia acidentada, as redes devem ser divididas por zonas de pressão, de forma a atender aos limites de carga estabelecidos.

O limite de pressão superior nas redes deve ser imposto, pelos seguintes aspectos:

- quanto maiores forem as pressões requeridas, maior será o custo energético de bombeamento, pois este custo é diretamente proporcional à altura manométrica de impulsão;
- para maiores pressões na rede, as tubulações serão mais exigidas por necessitarem de maiores pressões nominais, sendo estas de maior custo;
- as possibilidades de rompimento das tubulações aumentam, com o aumento das pressões dinâmicas e estáticas da rede;
- as perdas físicas de água crescem com o aumento das pressões de serviço, pois a vazão nas fissuras ou juntas dos tubos aumenta com o acréscimo da pressão;
- as vazões nos pontos de consumo crescem com o aumento das pressões disponíveis.

Os limites de velocidades máxima e mínima admissíveis nas tubulações sob pressão em redes de distribuição de água, segundo a norma NBR12218 (1994), estabelece que a velocidade máxima nas tubulações deva ser de 3,5 m/s, e a mínima de 0,6 m/s. No entanto, em pequenas redes, com pequenas vazões nos trechos nem sempre é possível garantir a velocidade mínima de 0,6 m/s. Isto se deve ao fato da mesma norma impor como diâmetro mínimo 50 mm para as tubulações (com a finalidade de evitar que haja perdas excessivas no sistema), não sendo possível garantir uma velocidade de 0,6 m/s caso a vazão no trecho em questão, seja inferior a 1,18 l/s.

A restrição de pressão máxima é aconselhável, uma vez que em elevadas pressões há um aumento das perdas reais de água por vazamentos e a restrição de velocidade mínima é recomendada pela norma, visando manter uma permanente circulação de água na rede, como forma de não prejudicar a qualidade da água tratada.

2.1.3 Escoamento

As redes de distribuição de água possuem um escoamento em condutos forçados, ou seja, pressurizado. Essa classificação deve-se ao fato de que as pressões predominantes, dentro das tubulações, diferem da atmosférica - não uniformes, em decorrência da variação dos diâmetros, topografia e da incompressibilidade da água, uma vez que a massa específica deste fluido não apresenta variações significativas. Além de pressurizado, o escoamento também é classificado como sendo viscoso, provocando uma tensão de cisalhamento nas paredes da tubulação e com comportamento turbulento, pela caracterização de movimentos aleatórios e tridimensionais das partículas do fluido. A tensão de cisalhamento é responsável pela força de atrito que transforma a energia mecânica em energia térmica ao longo da tubulação, de modo irreversível. O decréscimo de energia mecânica é denominado de perda de carga.

2.1.4 Tubulações

A escolha correta das tubulações em sistemas de abastecimento é fundamental, pois reflete diretamente no seu dimensionamento. Fatores como: diâmetros, custo da tubulação, pressões de trabalho, cargas externas que poderão atuar sobre as tubulações, custo de instalação, manutenção, qualidade da água a transportar e características do terreno onde serão instalados os condutos, devem ser observados e considerados.

Para o dimensionamento de uma rede de distribuição, devem ser observadas as situações extremas de pressão que as submetem. A pressão estática, ou seja, situação em que a rede está em repouso, influencia no dimensionamento mecânico das tubulações, sobremaneira em redes permanentemente em carga. Tal estado é característico na maioria dos projetos de rede e é mais comum se apresentar no período noturno, quando o consumo de água é muito baixo. Outra situação extrema se refere à pressão dinâmica e se apresenta quando a rede está em plena carga, durante os horários de pico do consumo.

Combinando estas duas situações extremas como parâmetros máximos e mínimos, qualquer outra situação intermediária possível estará contemplada. Portanto, estes comportamentos deverão ser devidamente estudados em se tratando do dimensionamento de uma rede de distribuição.

Atualmente, os tipos de tubos mais utilizados nas redes de distribuição de água são os de plástico - Policloreto de Vinila (PVC), Polietileno, Poliéster Revestido com Fibra de Vidro (PRFV), e metálicos (ferro fundido e aço), havendo uma larga predominância dos tubos de PVC e de ferro fundido. Embora não sejam mais aplicadas, as tubulações de cimento-amianto foram muito utilizadas no passado nas redes de distribuição de água, mas o seu uso foi descontinuado, pois um dos componentes utilizados no processo de fabricação, o asbesto, pode provocar doenças graves.

2.2 Métodos de Dimensionamento Econômico

Diversos são os métodos de dimensionamento para otimização do custo de implantação de tubulações em redes de distribuição de água, tradicionalmente leva-se em conta apenas o balanceamento hidráulico da rede, de forma a atender às condições impostas pelas equações da conservação de massa nos nós e conservação de energia nos anéis. Portanto estes métodos não possuem critérios de dimensionamento visando à minimização dos custos. Pode-se citar, por exemplo, o método de Hardy-Cross, como método tradicional de dimensionamento.

Com o crescimento populacional e a grande concentração de edificações em centros urbanos, as redes se tornaram mais complexas e conseqüentemente uma preocupação com a economia no dimensionamento de sistemas de abastecimento de água foi intensificada. Preocupação essa que surgiu desde o início do século, entretanto um evento em particular contribuiu e muito para o desenvolvimento de técnicas de otimização, evento esse que foi realizado na cidade de Nova York em 1985, com uma seqüência de conferências denominadas “The Battle of the Networks Models”. Naquele encontro diversos participantes apresentaram soluções para uma rede hipotética. A rede deveria ser ampliada e essa ampliação deveria ser economicamente dimensionada. Essa conferência trouxe muitas modelagens no sentido de simplificar o comportamento do fluido no interior das tubulações (Walski et al., 1987).

Outra contribuição importante na modelagem de sistemas de distribuição veio com (HAMBERG e SAMMIR, 1988) que procurou mostrar que é possível reduzir o tamanho e a complexidade de redes de distribuição e que para as modelagens propostas em seu trabalho o somatório dos elementos da rede poderiam ser reduzidos de 10-50% em sua

modelagem. Observar o sistema como um sistema contínuo colaborou e muito para a sua simplificação e modelagem.

A modernização dos sistemas computacionais possibilitou o desenvolvimento de vários estudos dos mais simples aos mais complexos, modificando desde antigos métodos de dimensionamento até a criação de novos conceitos baseados em técnicas até então consideradas impossíveis. Segundo Santana (1999), as dificuldades para alcançar um modelamento adequado e a excessiva simplificação dos modelos usuais, têm retardado o surgimento de soluções práticas mais adequadas ao dimensionamento e operação de sistemas de distribuição de água. Em seu trabalho um software foi desenvolvido e aplicado a mesma rede hipotética comentada por Walski et al. (1987), o modelo foi aplicado para diferentes regimes de operação inicial dos reservatórios baseados no esvaziamento e enchimento linear.

Fazendo uma análise nos últimos trabalhos publicados, observa-se a grande variedade de modelos e métodos de dimensionamento, desde a enumeração exaustiva até algoritmos mais complexos e robustos. A enumeração exaustiva é uma técnica que simula todas as combinações possíveis, para os diâmetros comerciais de tubos, onde então é feita a seleção do menor custo da rede. A principal desvantagem que esta técnica apresenta é a grande quantidade de cálculos envolvidos. As técnicas que têm como algoritmo a programação linear formam um dos mais importantes grupos na resolução de problemas que têm como foco modelagem e dimensionamento de redes. Entre as diversas técnicas utilizadas, o Gradiente de Programação Linear (GPL), é considerado como a que teve um avanço mais significativo (BHAVE and SONAK, 1992). O método GPL divide o problema, que tem por objetivo a otimização, em duas etapas: na primeira, são fixadas algumas variáveis, enquanto outras sofrem alterações através da Programação Linear (PL); na segunda etapa, o algoritmo altera as variáveis previamente fixadas a fim de melhorar a solução obtida, sendo este um processo iterativo até que não se perceba redução nos custos da rede. O GLP foi proposto por Alperovits e Shamir (1977) e sua utilização foi bem sucedida, na primeira etapa as vazões nas tubulações foram fixadas determinando assim as outras variáveis através de técnicas de programação linear.

Uma outra alternativa de algoritmo aplicado no dimensionamento de redes é a Programação Não Linear (PNL), esta, parte de uma função objetivo e utiliza uma ou mais funções restritivas. Estas últimas podem ser lineares e/ou não lineares.

Silva (1997) utilizou a PNL em otimização de redes ramificadas, para solucionar o problema ele dividiu em duas etapas: na primeira as variáveis de decisão foram a cota de cabeceira e os diâmetros das tubulações e a segunda etapa consistia em corrigir os diâmetros anteriormente arbitrados para diâmetros comerciais disponíveis, as variáveis de decisão foram o comprimento das tubulações juntamente com a cota de cabeceira.

Gomes e Formiga (2001) apresentaram o PNL2000 como uma metodologia de dimensionamento, esta utiliza o modelo matemático da Programação Não Linear e divide-se em duas etapas. Na primeira, faz-se um dimensionamento prévio do sistema, no qual os diâmetros e as vazões dos trechos, e a altura manométrica de cabeceira, são variáveis a serem determinadas. Em seguida, com os resultados obtidos no pré-dimensionamento, realiza-se uma segunda etapa, no objetivo de corrigir os valores dos diâmetros encontrados anteriormente por não coincidirem com as bitolas nominais disponíveis no mercado. O modelo foi formulado e programado através da ferramenta Solver da planilha eletrônica Excel da Microsoft. Este método aplica-se a redes malhadas com cota piezométrica de cabeceira fixa ou variável.

Bezerra (2005) propôs uma metodologia fundamentada no algoritmo de otimização de Granados, esta se divide em duas etapas: a primeira baseia-se na determinação de uma solução inicial, com a qual a rede será composta pelos diâmetros das tubulações existentes submetidos às vazões de projeto de reabilitação. A outra etapa faz parte de um processo iterativo que diminui a cota piezométrica de cabeceira obtendo um novo custo de reabilitação para a rede de distribuição. O processo iterativo termina quando o custo de intervenção superar o custo energético. No seu processo iterativo o método utiliza-se do conceito do Gradiente de Câmbio – “G” (GRANADOS, 1990).

Costa et al. (2006) desenvolveram um software associado ao Epanet2 utilizando uma programação linear (método simplex) para minimizar os custos de uma rede de distribuição de água e obtiveram uma economia de 12% em relação ao dimensionamento apresentado por Gomes (2004) utilizando o método PNL2000. O algoritmo implementado analisa os nós, caso estes tenham uma pressão inferior a mínima ele substitui o trecho ligado ao nó por um diâmetro superior, do contrario em pressões elevadas o diâmetro é reduzido. O algoritmo finaliza quando não são solicitadas mudanças nos trechos.

Carvalho (2007) desenvolveu um software chamado EficientE, o software busca otimizar o dimensionamento de redes através de um algoritmo iterativo, utilizando os conceitos de gradiente energético e gradiente de pressão, a metodologia apresentou ótimos

resultados de dimensionamento, não existia um controle das variáveis de estado (pressão e velocidade da água) durante o processo iterativo.

Os Algoritmos Evolucionários (AEs) são ferramentas de busca estocástica que realiza a seleção natural das espécies, e utilizam mecanismos semelhantes a da evolução das populações, como a reprodução e mutação, para encontrar a melhor solução para diversos tipos de problema. Os Algoritmos Genéticos (AGs) são os mais conhecidos dessa classe e têm sido amplamente utilizados na análise dos diversos problemas inerentes às redes de abastecimento de água.

O Algoritmo Genético funciona da seguinte forma: com as variáveis a decidir há a formação de indivíduos, ou seja, unidades compostas pelas variáveis do sistema. Então no primeiro momento serão arbitrados aleatoriamente valores às variáveis dando origem a um conjunto de indivíduos, as populações. Então aplica-se um valor qualitativo a cada indivíduo e esse valor é obtido através da função-objetivo. Então serão sorteados alguns indivíduos, este sorteio é tendencioso a escolher os indivíduos que obtiveram uma melhor pontuação com a função objetivo, sendo estes mais prováveis de serem escolhidos. Com um conjunto de indivíduos reduzido, faz-se a etapa de mutações em que novos indivíduos são criados a partir da mutação e cruzamento dos indivíduos sorteados e assim novamente é aplicada a função objetivo e um novo sorteio é realizado.

Babayan et al. (2006) Desenvolveram dois novos métodos para resolver um problema de otimização no custo de redes de distribuição de água, a formulação estocástica foi resolvida após substituição por uma formulação determinística utilizando um método numérico de integração. Enquanto que o modelo de otimização foi resolvido através da utilização do algoritmo genético em sua forma padrão. Ambos os métodos tiveram suas vantagens e desvantagens.

Mota (2007) desenvolveu um modelo computacional para dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, sendo este concebido através de dois módulos: de simulação hidráulica através do Epanet 2.0 e de otimização multiobjetivo através da aplicação do Algoritmo Genético. Foram realizadas diversas simulações com a finalidade de melhorar o algoritmo proposto, após uma calibração prévia dos parâmetros simulações longas são processadas com a finalidade da convergência para uma melhor solução. Fez-se uma comparação com métodos de Programação Não-Linear apresentando uma rede mais eficiente hidraulicamente, por fim uma segunda função objetivo minimiza o custo total de implantação mais o de bombeamento.

Alguns pesquisadores têm empregado métodos baseados na organização e/ou evolução de determinadas espécies de seres vivos. Eusuff e Lansley (2003) propuseram o SFLA, um algoritmo meta-heurístico que funciona baseado na transformação dos sapos e informações extras sobre populações. Maier et al. (2003) e Zecchin et al. (2006) utilizaram uma nova técnica chamada *Ant Colony Optimisation* (ACO) para otimização de WDSs, é baseada na analogia do comportamento de uma colônia de formigas, e sua capacidade para determinar a rota mais curta entre o seu ninho e uma fonte alimentar.

Suribabu and Neelakantan (2007) and Montalvo et al. (2008) aplicaram a *Particle Swarm Optimisation* (PSO). PSO é um EA que utiliza a inteligência do enxame para alcançar o objetivo de otimizar uma determinada função objetivo. Este algoritmo utiliza a cognição e comportamento social dos indivíduos no processo de otimização.

Numerosos algoritmos são aplicados em sistemas de distribuição de água por pesquisadores com o propósito de encontrar as melhores soluções, utilizando cada vez mais a tecnologia atual dos computadores e diminuindo o tempo de processamento (Biscos et al., 2003). Os métodos EAs apresentam bons resultados, porém requerem um tempo computacional muito elevado.

Abebe and Solomatine (1998) programaram modelos de otimização global, *Adaptive Cluster Covering with Local Search* (ACCOL) e GA, ativaram a escolha entre precisão e tempo de processamento computacional. Liong and Atiquzzaman (2004) aplicaram um poderoso algoritmo de otimização, *Shuffled Complex Evolution* (SCE), para a busca de soluções com baixo tempo de processamento. Gomes et al. (2008) propõe um método iterativo, com relativamente baixo tempo de processamento, para a otimização do custo total para a expansão e reabilitação de WDSs.

Jiménez (2007) desenvolveu um trabalho utilizando Algoritmos Genéticos com o objetivo de determinar os diâmetros dos trechos da rede de distribuição, de tal maneira que se satisfaçam as restrições de pressão mínima e tendo como resultado uma rede com custo reduzido. A codificação dos diâmetros foi realizada utilizando um sistema binário seguindo a proposta introduzida por Holland, 1975. Para a aplicação da metodologia em redes de distribuição de água, foi utilizado um utilitário do MATLAB® (CHIPPERFIELD et al, 1994).

2.3 Simulador Hidráulico (Epanet 2.0 Brasil)

Simuladores hidráulicos são ferramentas computacionais capazes de simular modelos de sistemas de qualidade, transporte e distribuição de água, são utilizados para fins de planejamento, projeto e diagnóstico do funcionamento dos sistemas de distribuição de água. O desenvolvimento confiável de modelos de simulação são bastante complexo uma vez que são empregadas equações hidráulicas e algoritmos computacionais.

Atualmente, um dos simuladores mais utilizados no mundo por entidades gestoras, investigadores e acadêmicos é o Epanet2 (ROSSMAN, 2008), desenvolvido por Lewis A. Rossman da U. S. Environmental Protection Agency (US EPA), dos Estados Unidos, e traduzido recentemente para o português do Brasil pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS, da Universidade Federal da Paraíba – Brasil (GOMES e SALVINO, 2007). O Epanet2 é um software livre, ele permite a simulação do comportamento hidráulico e da qualidade da água de sistemas de distribuição de água. Ele também permite obter os valores das variáveis de estado, tais como: vazões, pressões, nível da água nos reservatórios, concentração de elementos químicos, perda de carga, etc.

O Epanet2 foi desenvolvido em duas linguagens, uma responsável por implementar uma biblioteca de funções hidráulicas (linguagem C) e outra para facilitar a interação com o usuário, através de janelas, botões, gráficos, tabelas e menus que possibilitam construir uma rede por completo e simular seu comportamento estático e dinâmico (Delphi 7 – linguagem Pascal). O Epanet2 é capaz de calcular as perdas de carga por atrito através das fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning; perdas de cargas localizadas; simulação de bombas, com velocidade de rotação fixa ou variável; calcula a energia de bombeamento e o seu respectivo custo, modela os principais tipos de válvulas, modela reservatórios de nível fixo ou variável; possibilita a simulação com diversas regras de operação do sistema, dentre outras.

Neste trabalho será implementado dentro do simulador hidráulico um módulo de dimensionamento de redes de distribuição de água, foi escolhido o Epanet 2.0 Brasil (versão brasileira do Epanet2) para implementar esse módulo, titulado por Lenhsnet, e representa uma poderosa ferramenta para dimensionamento otimizado, ressaltando o controle das variáveis de estado e a velocidade de processamento do algoritmo proposto, que na maioria dos exemplos as redes foram dimensionadas em segundos.

2.4 Controle Operacional

A energia elétrica é necessária no sentido de tornar a água potável e transportá-la através dos sistemas. Por isto, tão importante quanto as medidas de diminuição do consumo de água, são as ações operacionais no processo de melhoria dos sistemas de distribuição. Os gastos com energia elétrica representam valores significativos no orçamento das empresas de saneamento. No mundo, o setor de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos caracteriza-se como grande consumidor de energia elétrica, segundo o relatório da ALLIANCE (JAMES et al., 2002) representa cerca de 7% do total de consumo de energia global. Nos Estados Unidos, o setor de água e esgoto consome por ano 75 bilhões de KWh, que é igual a 3% do consumo total americano ou o equivalente à energia utilizada pelos setores de papel e petróleo. Os gastos da energia de bombeamento, na grande maioria das vezes, ultrapassam, ao longo da vida útil dos projetos, os custos de investimento das instalações (GOMES, 2005). Segundo (TSUTIYA, 2004) mais de 90% dos gastos com energia elétrica devem-se às elevatórias dos sistemas de abastecimento público de água.

No Brasil, as iniciativas são modestas, com a maior parte das empresas de saneamento tendo pouco, ou quase nenhum controle e/ou procedimento voltado para a diminuição dos custos de energia, pois este fato não foi considerado como um critério em tomadas de decisão técnica, isto é, no planejamento técnico e operacional das empresas (LEAL e BARBOSA, 2003). Na maioria dos projetos de concepção de sistemas de bombeamento, os técnicos ao especificarem os conjuntos motor-bomba analisam superficialmente a questão do consumo de quilowatts. Isso contribui para que o gasto de energia elétrica com as operações de bombeamento represente o item mais significativo no consumo de energia para o orçamento de um sistema de abastecimento, uma vez que a energia elétrica é a segunda maior parcela de custo de uma empresa de saneamento. Nesse contexto, quaisquer esforços no combate do desperdício de energia elétrica e água possibilitarão uma economia não só de custo, mas também de recursos naturais.

É comum realizar o controle operacional em sistemas de abastecimento ao longo do seu funcionamento, atualmente isto é realizado sem nenhum estudo prévio, apenas com a prática e experiência de alguns técnicos, sendo este tipo de otimização prévia um dos objetivos deste trabalho.

Alguns trabalhos procuram otimizar os sistemas de bombeamento com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica, Machado (2005) avaliou a eficácia e a eficiência de um algoritmo genético aplicado no escalonamento das bombas de redes adutoras de água em que a enumeração exaustiva foi previamente aplicada. O algoritmo utilizado incorpora funcionalidades ao algoritmo genético canônico, a fim de reduzir o tempo de busca e guiar a procura para o ótimo global. A função objetivo que se deseja minimizar é o custo de energia elétrica por volume bombeado, e as restrições a serem atendidas são limites de velocidade e pressão nos dutos, atendimento das demandas de água e limites de armazenamento dos reservatórios.

Tsutiya (2007) utilizou inversores de frequência para diminuir o consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento, segundo ele o controle de vazão das bombas através das modificações nas características do sistema de bombeamento pode ser realizada através de manobras de válvulas, enquanto que, com as variações da curva característica da bomba, o controle da vazão pode ser feito através do controle do número de bombas e pela variação da rotação das bombas, sendo este o grande foco deste trabalho. Os inversores de frequência são equipamentos que reduzem a potência dos motores, e em consequência, ocasionam uma economia de energia de cerca de 10 a 50% em uma estação elevatória, além disso, por esses equipamentos mantêm-se pressão constante independente da variação da vazão de consumo, reduzem-se as perdas reais em um sistema de abastecimento de água.

Não foram encontrados trabalhos em que se realizasse um controle operacional prévio em fase de dimensionamento no sentido de otimizar os custos energéticos, atualizados. Sendo esta uma das principais contribuições deste trabalho.

CAPÍTULO III

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO

3.1 Desenvolvimento Metodológico

O método de dimensionamento otimizado e controlado aplicado à redes de distribuição pressurizada de água, composto pela rede de abastecimento, com seu conjunto de impulsão, 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 dentro dos parâmetros máximos e mínimos de pressão e velocidade da água.

O Algoritmo do método utilizado no Lenhsnet compreende um processo dinâmico e iterativo que parte de uma configuração inicial da rede, substituindo os diâmetros da rede pelos diâmetros mínimos fornecidos na tabela de diâmetros disponíveis para o processo de dimensionamento. O algoritmo prevê também a possibilidade de se especificar pressões máximas e mínimas para o dimensionamento, como também, velocidades máximas e mínimas da água no interior das tubulações. Durante todo o processo de dimensionamento, é realizado o balanceamento hidráulico da rede através do simulador hidráulico, de forma a atender às condições impostas pelas equações da conservação de massa nos nós (Equação 3.1) e conservação de energia nos anéis (Equação 3.2).

$$\sum_{i=1}^{k_n} Q_{entra,i} - \sum_{j=1}^{q_n} Q_{sai,j} - d_n = 0 \quad (3.1)$$

onde:

$Q_{entra(i)}$ é a vazão de trecho i que chega no nó n

$Q_{\text{sai}(j)}$ é a vazão de trecho j que sai no nó n

d_n é a demanda concentrada nesse nó

k_n é o número de trechos com vazões chegando no nó n

q_n é o número de trechos com vazões saindo do nó n

$$\sum_{i=1}^{z_k} (h_f)_i - \sum_{j=1}^{p_k} Ep_j = 0 \quad (3.2)$$

onde:

$(h_f)_i$ é a perda de carga no trecho i

Ep_j é a energia de impulsão aplicada na malha ou anel

z_k é o número de trechos no anel k em questão

p_k é o número de fontes de energia de impulsão dentro do anel k

Partindo de uma configuração inicial (diâmetros mínimos) o algoritmo, dinamicamente, substitui o trecho mais econômico pelo diâmetro subsequente da lista de diâmetros para dimensionamento, verificando sempre o controle das variáveis de estado, assim, cada trecho é substituído até que o processo seja finalizado com o dimensionamento otimizado e controlado.

Para que o trecho seja efetivamente substituído, verifica-se o ganho de pressão e o custo necessário para fazê-lo, só então compara todos os resultados e escolhe o que obtiver melhor ganho de pressão com menor custo possível. Para calcular a variação de pressão, o nó mais desfavorável da rede é escolhido para fazer a comparação antes e depois da substituição do trecho. O nó mais desfavorável refere-se ao nó com a menor pressão da rede em estudo. A razão entre a diferença de custo para a substituição do trecho e a variação de pressão resultará no gradiente de pressão (Gp) como mostra a equação (3.3).

$$Gp = \frac{C_2 - C_1}{\Delta p} \quad (3.3)$$

onde:

C_1 é o custo do trecho em seu diâmetro original;

C_2 é o custo do trecho no diâmetro superior ao original;

Δp é a variação de pressão no nó mais desfavorável.

O processo iterativo e dinâmico para dimensionamento funciona substituindo um trecho, pertencente a uma tabela de tubos disponíveis, pelo seu diâmetro imediatamente superior e calcula seu gradiente de pressão, então o trecho analisado retorna a sua configuração inicial de antes da análise e realiza o mesmo procedimento com os demais trechos permitidos da rede, já que existe a possibilidade de ignorar trechos no dimensionamento. Após a análise da substituição de cada trecho será escolhido o menor gradiente de pressão (G_p^*) que corresponderá ao gradiente de pressão ótimo e assim o trecho (T^*) referente ao gradiente de pressão ótimo será efetivamente substituído. Enquanto os parâmetros de controle não forem atingidos o processo continua, lembrando que a escolha do gradiente de pressão ótimo está condicionada as restrições interpostas pelas variáveis de estado, então dependendo das interposições há a possibilidade de não convergir para uma solução, o software informará previamente que é impossível dimensionar, sendo possível para o projetista modificar as variáveis de estado e restrições do processo de otimização e dimensionar novamente.

Existem duas formas de dimensionamento, que implicam na forma de convergência do método. Na primeira alternativa a rede é alimentada por um reservatório elevado, sendo a cota piezométrica de cabeceira na origem fixa e representa um dado de entrada para o algoritmo. Nessa forma de dimensionamento o custo total do sistema corresponderá ao custo de implantação da rede de tubulações. Na segunda alternativa a água é impulsionada diretamente na rede através de bombeamento direto e o custo total do sistema será composto pelo custo de implantação das tubulações adicionado do custo energético, atualizado, da estação elevatória.

Vale ressaltar que o Lenhsnet funciona associado ao Epanet, que deverá sempre manter o equilíbrio hidráulico do sistema e fornecer os valores das variáveis de estado (pressão, vazão, velocidade e perda de carga). Para implementar o método foi utilizado o Epanet 2.0 Brasil em sua versão 2.0.12. Compilado em Delphi 7.0 (interface gráfica) e Dev-C++ (programas na linguagem C)

3.2 Cota Piezométrica de Cabeceira Fixa na Origem

Na primeira alternativa quando a cota piezométrica na cabeceira é fixa na origem, a principal condição para convergência do dimensionamento é a pressão mínima da rede ser igual ou superior a pressão mínima definida para dimensionamento. Com o calculo do

gradiente de pressão ótimo e a substituição sucessiva dos trechos o dimensionamento é finalizado.

Após o dimensionamento da rede de distribuição, pode acontecer da pressão mínima nos nós ser maior que a pressão mínima estabelecida para dimensionamento e assim existe uma folga de pressão que resultará em custo desnecessário para atender o dimensionamento proposto. Como solução desse problema o último trecho substituído poderá ser dividido em dois sub-trechos, um com o diâmetro dimensionado e o outro com diâmetro imediatamente inferior, aumentando as perdas de carga e conseqüentemente diminuindo a pressão mínima da rede. Para que a pressão mínima da rede se iguale a pressão mínima de projeto a divisão do trecho deverá ser exatamente em um ponto em que o somatório das perdas dos sub-trechos possibilite a perda necessária para tal. Um algoritmo clássico, “divida e conquiste”, foi incorporado ao método para que encontre de forma rápida o ponto exato da divisão do trecho.

O nó intermediário que separa os dois sub-trechos terá sua cota do terreno como resultado da interpolação dos nós originais do trecho antes da divisão. Apenas um trecho é dividido dessa forma com a finalidade de absorver a folga de pressão e diminuir o custo de implantação. Lembrando que nem sempre a divisão do trecho resulta em valores práticos aceitáveis, podendo o projetista escolher quanto a divisão do último trecho ou não.

Para essa alternativa de dimensionamento é possível controlar durante o processo de dimensionamento as pressões máximas e mínimas e as velocidades da água no interior das tubulações máximas e mínimas, sendo obrigatória a pressão mínima do sistema, uma vez que a metodologia requer essa variável para convergência da metodologia. Os limites e os parâmetros para essa alternativa de dimensionamento poderão ser observados na Figura 3.1.

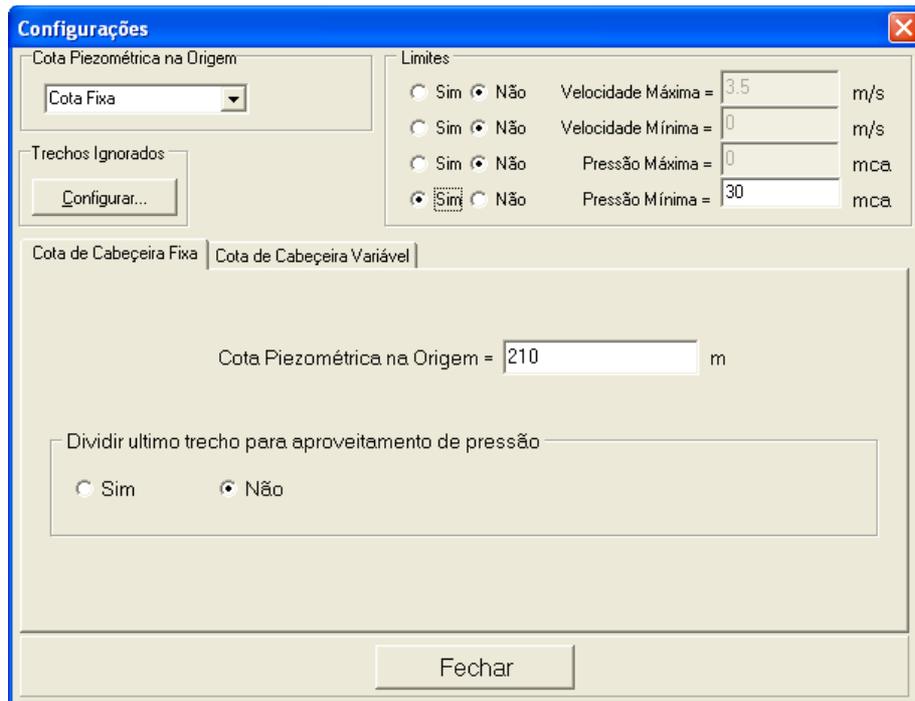


Figura 3.1 - Configurações para dimensionamento em cota piezométrica fixa na origem

Trechos ignorados poderão ser adicionados tendo em vista dimensionamento de ampliações de redes, assim a metodologia poderá ser aplicada em um universo maior de condições de contorno.

3.3 Cota Piezométrica de Cabeceira Variável na Origem

Nessa alternativa de dimensionamento, a rede de distribuição de água é alimentada diretamente através de bombeamento. Portanto a altura manométrica na cabeceira na origem é uma variável a ser determinada, informação essa necessária para a aquisição do conjunto moto-bomba que impulsionará a água na altura encontrada. Para este caso, além do custo de implantação das tubulações será levado em conta o custo energético necessário para manter a altura manométrica durante o tempo de vida útil de projeto. O gradiente energético (Ge) representa o custo, atualizado, de pressurização de água, anual, por metro de elevação como mostra a equação 3.4

$$Ge = P \times T \times Nb \times Fa \quad (3.4)$$

onde:

Ge é o Gradiente energético anual, atualizado, em \$/m;

P é a potência requerida pelo conjunto elevatório, em kW/m;

T é a tarifa de energia elétrica, em \$/kWh

F_a é o fator de atualização;

N_b é o número de horas de bombeamento anual, em horas;

A potência requerida por metro de elevação de água, em kW/m, é dada pela Equação (3.5).

$$P = \frac{9,81 \times Q}{\eta} \quad (3.5)$$

onde:

Q é a vazão demandada pelo sistema, em m³/s;

η é o rendimento do conjunto motor-bomba, em decimal;

Partindo da configuração inicial da rede, o simulador hidráulico fornecerá todas as variáveis de estado necessárias para começar a iteração. O valor inicial da cota de cabeceira será zero, uma vez que a sua altura só será determinada no final do dimensionamento das tubulações. Inicialmente é calculado o gradiente energético, então o gradiente de pressão é calculado para cada modificação de trecho e é escolhido o menor dentre eles como o gradiente de pressão ótimo, e este será efetivamente modificado e o processo de busca reinicia até que o gradiente de pressão ótimo seja maior que o gradiente energético, terminando a iteração e calculando a altura piezométrica de cabeceira na origem para atender o nó mais desfavorável com a pressão mínima fornecida.

Escolher o menor gradiente de pressão significa ter um ganho de pressão no nó mais desfavorável com menor custo possível de investimento (substituição do trecho) para a rede em estudo.

Para calcular a altura piezométrica de cabeceira na origem, o algoritmo soma o módulo da pressão mínima da rede com a pressão mínima fornecida para o sistema. Se pretende-se construir um reservatório para atender a rede em estudo, deve-se subtrair a cota do terreno e assim obter a altura definitiva do reservatório e para o caso de impulsionar diretamente na rede através de um conjunto motor-bomba, a bomba deverá impulsionar a altura calculada.

Para este caso de dimensionamento o custo total do sistema será igual ao custo de implantação das tubulações, mais o custo atualizado da energia necessária para bombeamento. O custo da implantação das tubulações é obtido pela multiplicação do seu comprimento pelo seu custo por metro, nesse custo deverá estar incluindo seu transporte, a escavação e sua implantação. O custo da energia será obtida pela multiplicação da altura manométrica da cabeceira na origem, que é a resultante da subtração da altura piezométrica pela cota do terreno no nó referente a cabeceira, pelo gradiente energético.

A metodologia utilizada pelo Lenhsnet foi resumida a um fluxograma que apresenta, esquematicamente, todo o desenvolvimento do algoritmo (Figura 3.2).

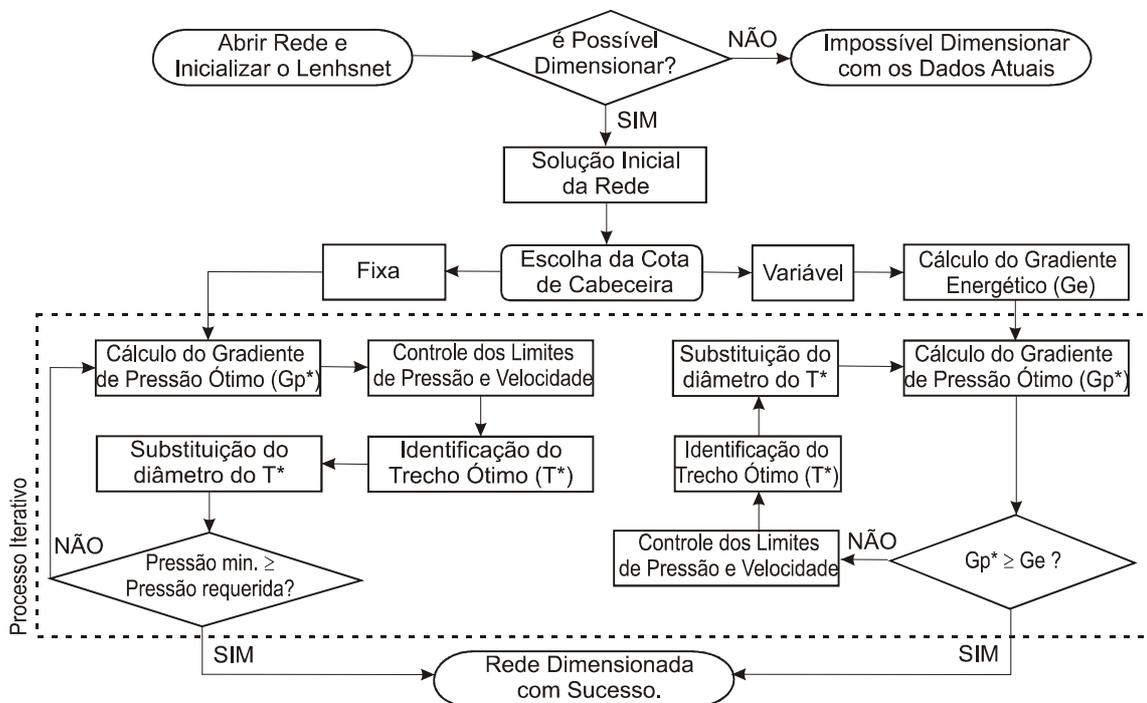


Figura 3.2 - Método Lenhsnet - Fluxograma do Algoritmo.

CAPÍTULO IV

CONTROLE OPERACIONAL OTIMIZADO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

4.1 Desenvolvimento Metodológico

Após o dimensionamento da rede de distribuição, um controle operacional poderá ser utilizado, ao longo do tempo de vida útil do projeto, para reduzir os gastos de energia e ainda reduzir as pressões excessivas na rede, fornecendo uma vazão necessária para atender a população atual. Para atender a população atual de forma otimizada, medidas operacionais serão aqui abordadas a fim de minimizar gastos de energia e recursos naturais.

Para realizar o dimensionamento, normalmente, faz-se uma estimativa populacional para uma determinada localidade a ser atendida e com base na população futura e demanda per capita, calcula-se a demanda necessária para atender a população durante o tempo estimado para o projeto. Neste trabalho o escalonamento do tempo de projeto é abordado e assim para o escalonamento proposto tem-se uma demanda variando de acordo com o crescimento populacional e conseqüentemente tem-se uma altura manométrica necessária para atender, com qualidade e em quantidade, a população local.

4.1.1 Quantidade de água requerida

A necessidade de água requerida ao sistema de abastecimento corresponde a demanda de consumo quantificado ao longo do alcance de projeto. Esta necessidade dependerá da estimativa do consumo per capita, dos consumos industriais, de combate a incêndios e de serviços públicos, levando-se em consideração o crescimento populacional

durante o período do alcance de projeto, e das perdas físicas de água do sistema de distribuição.

O alcance de projeto corresponde ao período de atendimento das estruturas físicas projetadas, tanto equipamentos como obras civis. No Brasil, os sistemas de abastecimento de água, desde a captação até as ligações prediais têm sido projetados com alcances que variam de 10 a 30 anos.

A previsão da população a ser atendida, pelo sistema de abastecimento de água, deve levar em conta a evolução desta população ao longo do alcance do projeto. A previsão da evolução da população de uma localidade depende de vários fatores, que por sua vez dependem de aspectos econômicos, sociais e políticos, o que a torna mais ou menos complexa. De maneira geral, os métodos empregados para estimativa do crescimento populacional de um determinado núcleo urbano são fundamentados em dados estatísticos anteriores à época da elaboração do projeto.

Nos métodos matemáticos, o cálculo da população é feito mediante uma equação matemática definida, cujos parâmetros são obtidos a partir do conhecimento de dados populacionais de anos anteriores.

O consumo de água por parte de uma população muda de região para região, de uma cidade para outra e mesmo dentro de uma cidade pode variar muito de um bairro para outro.

O consumo per capita é a quantidade de água usada por dia, em média, por um habitante, normalmente expresso em litros/habitante/dia (l/hab/dia). Em cidades servidas por sistemas de abastecimento, o consumo per capita (q) é obtido dividindo-se a quantidade de água aduzida durante o ano por 365 e pelo número total de habitantes ou de pessoas abastecidas.

4.2 Escalonamento Operacional Durante a Vida Útil do Projeto

Nos sistemas urbanos de abastecimento, a vazão máxima diária ao longo do ano é superior à vazão média diária, dependendo da oscilação climática ao longo do ano e das atividades comerciais, industriais e turísticas de cada localidade. A relação entre o consumo máximo diário ocorrido em um ano e o consumo médio diário relativo a este ano é definido como coeficiente do dia de maior consumo (k_1). A rede de abastecimento deve ser dimensionada levando-se em conta a demanda máxima horária, já que o sistema deve

atender à situação mais desfavorável de projeto que corresponde à hora de maior consumo ao longo do dia. O coeficiente que relaciona o consumo máximo horário com o consumo médio durante o dia é denominado coeficiente da hora de maior consumo (k_2). A vazão máxima horária requerida para dimensionamento da rede de abastecimento urbano é dada pela Equação 4.1.

$$Q = \frac{Pop \times q}{3600 \times h} \times k_1 \times k_2 \quad (4.1)$$

onde:

Q é a vazão máxima diária, em l/s;

Pop é a população a ser abastecida pelo projeto;

q é o consumo per capta, em l/hab/dia;

h é o número de horas de funcionamento das unidades do sistema de abastecimento;

k_1 é o coeficiente do dia de maior consumo;

k_2 é o coeficiente da hora de maior consumo;

Portanto, a vazão para fins de dimensionamento é fixada tomando por base uma população futura. Para esta pesquisa, pretende-se obter diversas vazões para diversas populações futuras em curto espaço de tempo, de tal forma que a vazão final coincida com a vazão final de projeto. Para cada patamar de demanda será associada uma vazão e altura manométrica, como ilustra a Figura 4.1.

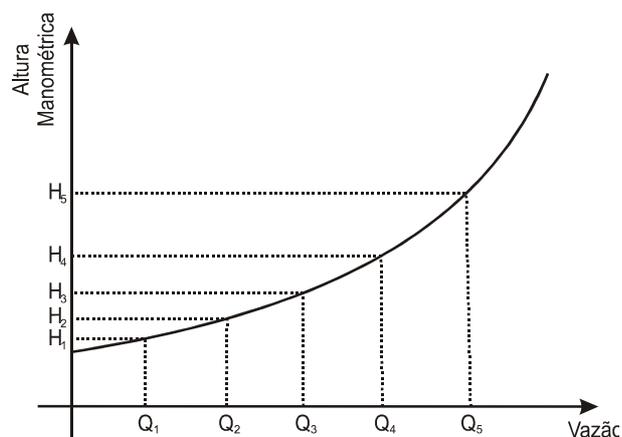


Figura 4.1 - Representação do escalonamento do tempo de projeto na curva do sistema

A Equação 4.2 reformula a Equação 4.1 para a nova idéia de vazão variável durante o tempo de projeto.

$$Q_t = \frac{Pop_t \times q}{3600 \times h} \times k_1 \times k_2 \quad (4.2)$$

onde:

Pop_t é a população em um determinado tempo

Q_t é a vazão de projeto para atender a população em um determinado tempo

q é consumo per capta, em l/hab/dia;

h é número de horas de funcionamento das unidades do sistema de abastecimento;

k_1 é o coeficiente do dia de maior consumo;

k_2 é o coeficiente da hora de maior consumo;

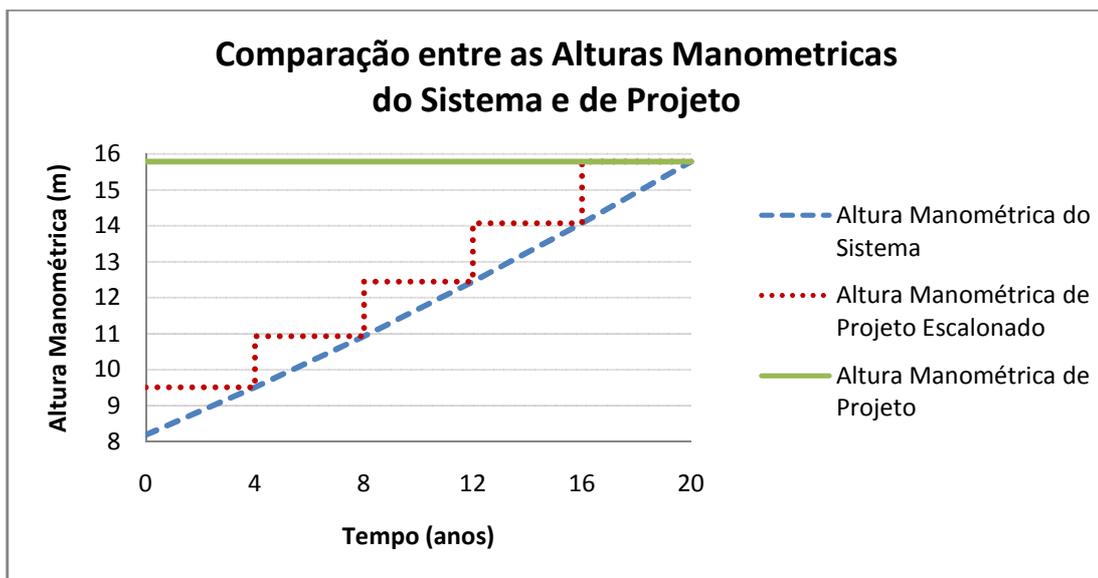


Figura 4.2 - Alturas Manométricas do Sistema e de Projeto

A rede de distribuição é dimensionada levando-se em consideração a vazão final de projeto, portanto a parcela do custo referente as instalações das tubulações não poderá ser alterada utilizando essa metodologia, mas no que se refere a parcela energética, essa metodologia procura otimizar os custos energéticos uma vez que a potência requerida do conjunto motor-bomba é diretamente proporcional à vazão e a altura manométrica, apresentada na Equação 4.3. Como efeito comparativo a Figura 4.2 mostra uma relação entre as alturas manométricas do sistema e de projeto, onde percebe-se que quanto menor o intervalo de anos no escalonamento, a altura manométrica de projeto se aproxima mais da

altura manométrica do sistema. Como o custo energético é diretamente proporcional a altura manométrica, então o sistema terá um custo reduzido.

O custo energético associado à potência requerida deverá ser atualizado para o valor presente para que se possa comparar e avaliar a metodologia de otimização. A Equação 4.4 descreve o custo da parcela energética em função da potência requerida. A redução do custo energético no início deverá ser bem significativa já que para a população atual o sistema estará superdimensionado.

$$P_t = \frac{9,81 \times Q_t \times H_{man,t}}{\eta} \quad (4.3)$$

onde:

P_t é a potência requerida pelo conjunto elevatório para um determinado tempo t , em kW;

Q_t é a vazão demandada pelo sistema em um determinado tempo t , em m^3/s ;

η é o rendimento do conjunto motor-bomba, em decimal;

$H_{man,t}$ é a altura manométrica necessária para um determinado tempo t , em m.

Na análise econômica através do valor presente ou atual, considera-se que as despesas com investimento são fixas e atuais, e a partir de então, as despesas variáveis com a operação da estação de bombeamento (custos anuais) são convertidas para valores presentes, através das equações aritmético-financeiras que levam em conta a taxa de juros, o aumento da energia elétrica e a duração da vida útil esperada.

$$C_{e,t} = P_t \times N_b \times T \times F_a \quad (4.4)$$

onde:

$C_{e,t}$ é o custo energético atualizado para um determinado tempo t .

P_t é a potência requerida pelo conjunto elevatório para um determinado tempo t , em kW;

T é a tarifa de energia elétrica, em $\$/kWh$

F_a é o fator de atualização;

N_b é o número de horas de bombeamento anual, em horas;

Para fins comparativos, o custo energético, atualizado, de uma rede de abastecimento dimensionada com tempo de vida útil de 30 anos é apresentada na Figura

4.3 e o custo energético, atualizado e escalonado, é apresentado na Figura 4.4. Percebe-se que há uma redução significativa energética no início de operação.

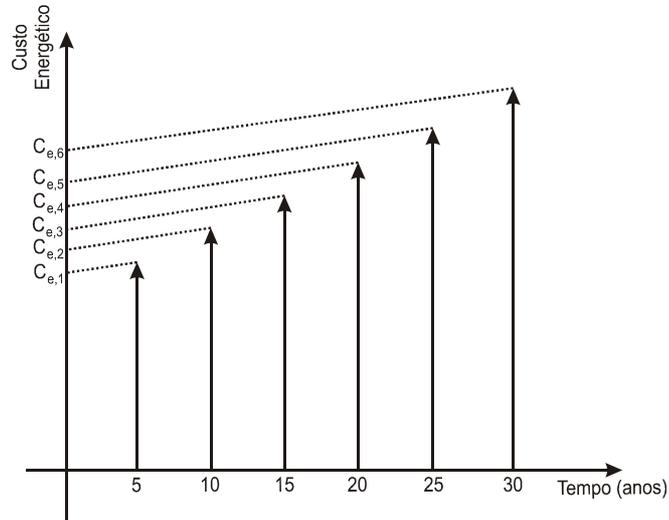


Figura 4.3 - Exemplo de custo energético atualizado

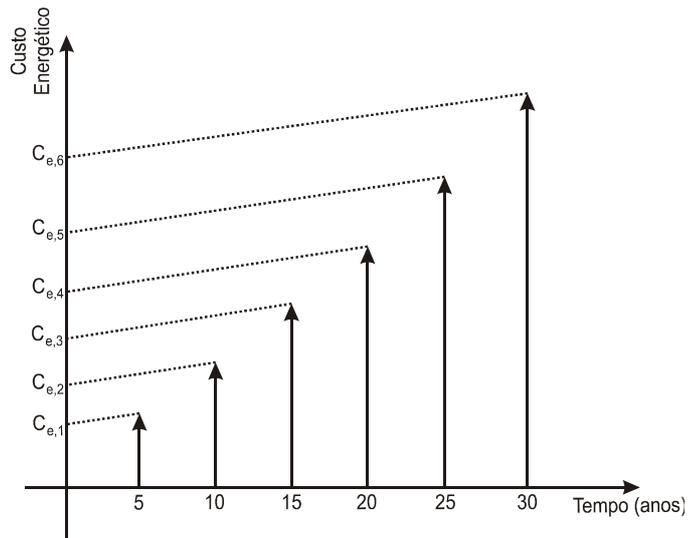


Figura 4.4 - Exemplo de custo energético atualizado (escalonado)

4.3 Estudo de Caso

Uma vez que se têm disponíveis as demandas, vazões e alturas manométricas para cada tempo futuro, pode-se tomar medidas operacionais a fim de disponibilizar a demanda solicitada e assim cumprir com o controle operacional otimizado durante o tempo de projeto.

4.3.1 Rede de Distribuição Alimentada por um Reservatório Elevado

Este caso é bem comum, trata de uma rede de distribuição alimentada por um reservatório elevado e este alimentado por um conjunto motor-bomba. Há algumas considerações a serem colocadas a fim de cumprir com o controle operacional:

- Para o caso do sistema trabalhar, na vazão final de projeto, com bombas em paralelo, o que permite adquirir no início de projeto apenas as bombas necessárias para atender o patamar do escalonamento proposto, adquirindo posteriormente outras bombas, mantendo assim o sistema dentro do dimensionamento e controle operacional proposto. Se adquirir as bombas no início do projeto, pode-se ligar apenas as bombas necessárias para que a altura manométrica proposta seja alcançada.
- Para o caso do sistema possuir apenas uma bomba para alimentar o reservatório, o número de horas de bombeamento será reduzido, se possível nos horários onde a energia elétrica é mais cara, e assim mantendo sempre o reservatório com nível suficiente para abastecer com qualidade e quantidade.
- Como o reservatório será construído para atender a altura final do projeto, no início a rede estará superdimensionada já que a demanda atual difere daquela final projetada e a perda de carga também será menor para a altura do reservatório resultando em pressões excessivas na rede. Então, para aliviar as pressões excessivas na rede uma válvula redutora de pressão poderá ser instalada a jusante do reservatório em uma cota suficiente para aumentar as perdas de carga e assim disponibilizar a água na pressão ideal para a rede dimensionada.

4.3.2 Rede de Distribuição Alimentada por um Conjunto Motor-Bomba

Neste caso a rede é alimentada diretamente pelo conjunto motor-bomba, ou seja, a mesma funcionará durante as 24h do dia. Para esse sistema as considerações são as seguintes:

- Para o caso do sistema possuir bombas em paralelo, então apenas serão ligadas as bombas necessárias para atender a demanda proposta no escalonamento,

sabendo-se previamente a quantidade de bombas que deverão ser acionadas para cada patamar de demanda alvo. As mesmas poderão ser adquiridas ao longo do tempo de projeto, diminuindo assim o custo de investimento inicial do projeto.

→ Para o caso de possuir uma única bomba alimentando diretamente o sistema, a utilização de conversores de frequência é uma solução bem atual, uma vez que este controla a velocidade de rotação do motor fornecendo para a rede apenas a demanda necessária, de acordo com as variáveis de estado já encontradas.

Para ambos os casos de estudo, ainda há a opção de substituir de tempos em tempos o conjunto motor-bomba por um que tenha um melhor rendimento ou um com mais potencia para atender a demanda escalonada, segundo a metodologia proposta.

CAPÍTULO V

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Módulo de Dimensionamento Econômico – Lenhsnet

Com o objetivo da utilização do método de dimensionamento otimizado, foi desenvolvido um módulo denominado Lenhsnet (Figura 5.1), associado ao Epanet 2.0 Brasil que tem sua origem no Epanet2 em sua versão (2.00.12). Todas as telas aplicáveis ao Lenhsnet foram desenvolvidas com o objetivo de facilitar a entrada das informações necessárias para o dimensionamento. O Epanet na sua forma original tem a funcionalidade de simular redes de distribuição de água e tem como resultado o valor das variáveis de estado, agora com o módulo de dimensionamento econômico e controlado, o software tem a funcionalidade de dimensionar redes de distribuição de água.

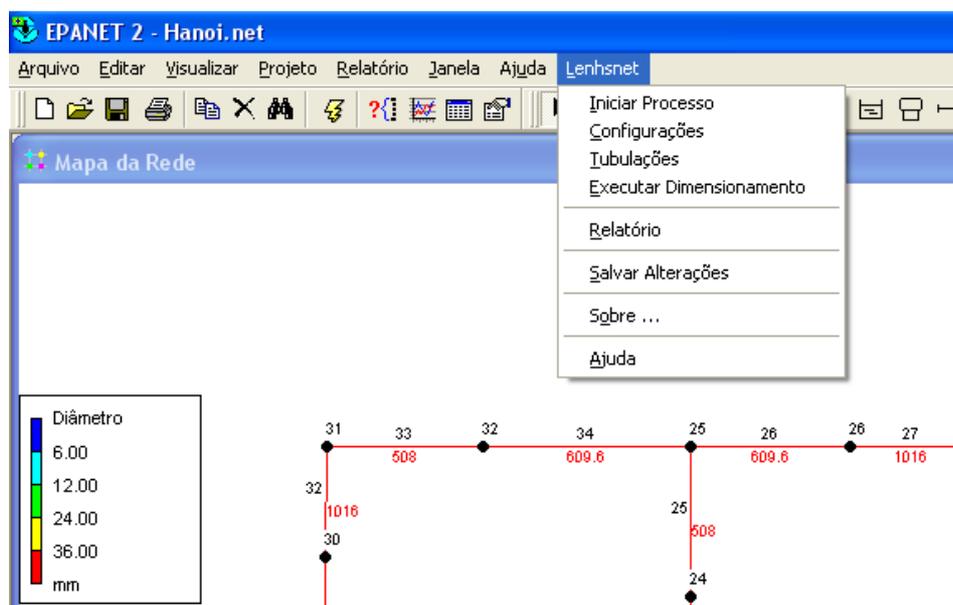


Figura 5.1 - Módulo Lenhsnet implementado no Epanet 2.0 Brasil

Quando se deseja dimensionar uma rede no Epanet utilizando o Lenhsnet, primeiramente deve-se fazer o traçado da rede e colocar as informações básicas: para os nós (cota do terreno e demanda); para os trechos (comprimento) e um reservatório de nível fixo (nível da água). Percebe-se que nem os diâmetros dos trechos nem as suas rugosidades são obrigatórias inicialmente. Em seguida deve-se salvar a rede no menu **Arquivo >> Salvar**, recomenda-se salvar no formato padrão do Epanet (*.net).

A rede uma vez salva, o modulo Lenhsnet poderá ser ativado através da opção **Lenhsnet >> Iniciar Processo**, assim será criado um arquivo com o mesmo nome da rede com a extensão (*.LN) com o conteúdo das configurações referente ao Lenhsnet. Com a ativação do módulo de dimensionamento otimizado o menu **Lenhsnet >> Configurações** estará ativo e ao acioná-lo será exibida uma janela com diversas opções (Figura 5.2).

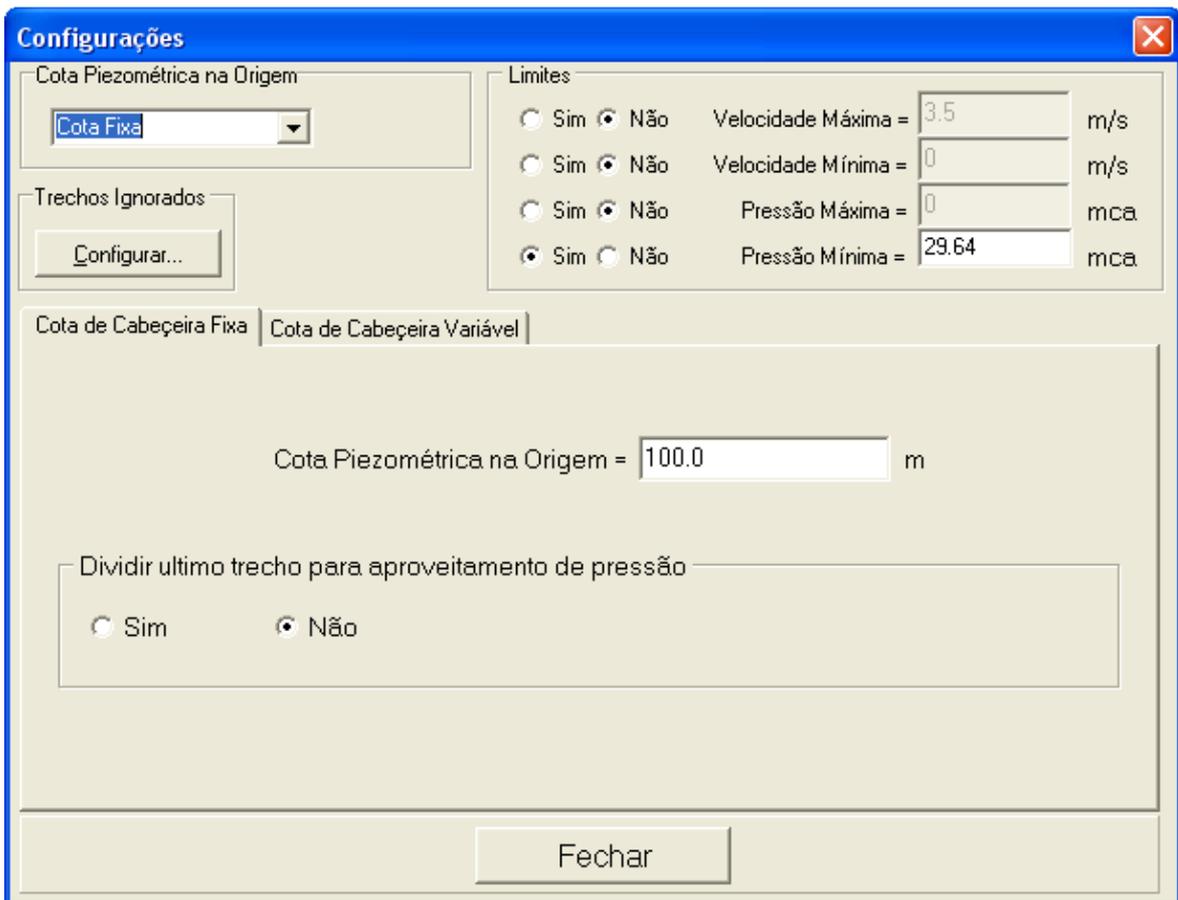
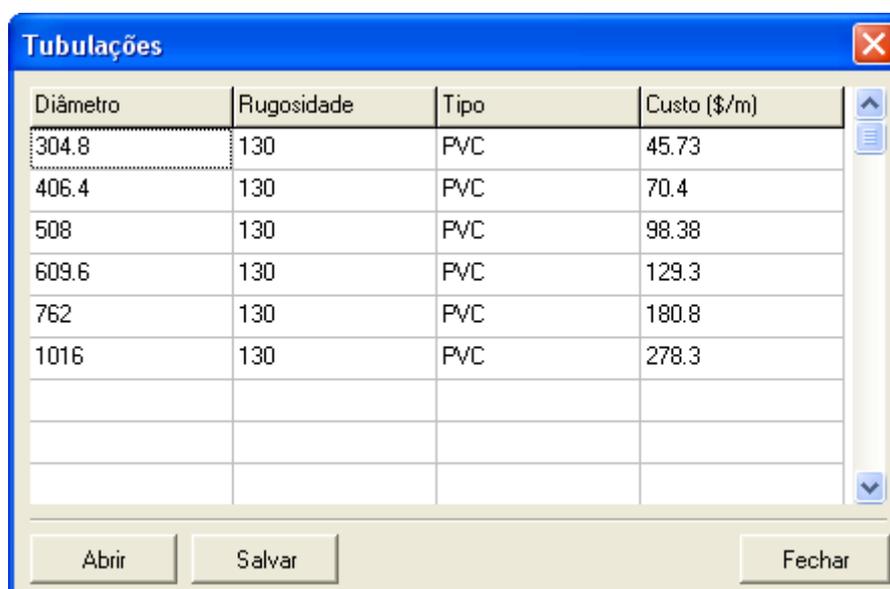


Figura 5.2 - Janela de configurações do Lenhsnet

Nessa janela é possível escolher o tipo de dimensionamento, que poderá ser através da cota piezométrica de cabeceira fixa ou variável na origem. Também é possível impor

limites durante o dimensionamento otimizado de uma rede, sendo este controle das principais variáveis da rede, uma das contribuições deste trabalho. Observa-se a organização e disposição dos botões e caixas de diálogo a fim de facilitar a operação do software.

Uma vez configurada, a tabela de tubos deverá ser preenchida para que o processo de otimização utilize a referida tabela (Figura 5.3) durante o processo iterativo de troca de trechos. Qualquer configuração de tubos poderá ser atribuída à tabela, assim sendo, o projetista poderá colocar apenas os tubos disponíveis comercialmente, ou ainda, aqueles disponíveis em seu almoxarifado, tornando assim o dimensionamento o mais real e prático possível.



The image shows a software dialog box titled "Tubulações" with a close button (X) in the top right corner. It contains a table with four columns: "Diâmetro", "Rugosidade", "Tipo", and "Custo (\$/m)". The table lists six rows of data, with the first row selected. Below the table are three buttons: "Abrir", "Salvar", and "Fechar".

Diâmetro	Rugosidade	Tipo	Custo (\$/m)
304.8	130	PVC	45.73
406.4	130	PVC	70.4
508	130	PVC	98.38
609.6	130	PVC	129.3
762	130	PVC	180.8
1016	130	PVC	278.3

Figura 5.3 - Tabela de tubos disponíveis

Com a tabela de tubos preenchida, a execução do dimensionamento poderá ser realizada. Nas redes utilizadas como exemplo, o tempo de processamento ficou abaixo de 1 minuto. Uma barra de progresso é mostrada no canto inferior a esquerda para dar noção do andamento do algoritmo. Uma vez dimensionada a rede, o Epanet fornecerá como resposta a rede de tubulações com seus diâmetros finais e através das suas opções de relatório, tabelas e gráficos das diversas variáveis de estado que fazem parte do sistema. Para visualizar o resultado do dimensionamento através do Lenhsnet, basta acionar o menu **Lenhsnet >> Relatório**.

5.2 Aplicação em redes exemplo

5.2.1 Grande Setor

Através da metodologia de cota de cabeceira variável na origem a rede titulada como Grande Setor, que trata do dimensionamento de um sistema de abastecimento de água, composto por dois anéis, 6 nós e 8 trechos, que são alimentados por um reservatório elevado e mostrada na Figura 5.4. Esta rede está como Exemplo 5.3.1 do livro de Gomes (2004). O problema resume-se em dimensionar com o menor custo possível, os trechos da rede e a altura do reservatório elevado, considerando-se os preços de implantação das tubulações e o custo de operação (energético) do conjunto motor-bomba.

Após dimensionamento padrão com tempo de projeto fixo, uma otimização do controle operacional é sugerida no sentido de reduzir o custo energético ao longo da vida útil de projeto.

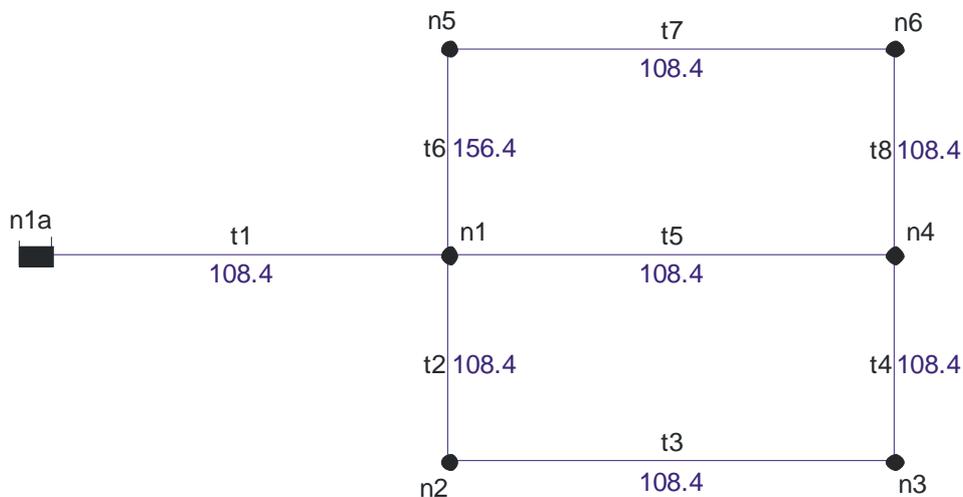


Figura 5.4 - Traçado da Rede Grande Setor

A pressão mínima imposta aos nós do Grande Setor é de 25 mca. As velocidades máximas e mínimas admitidas nos trechos da rede são 3,0 m/s e 0,2 m/s, respectivamente. A cota do terreno no reservatório é de 30 m.

A tubulação será de ferro dúctil, para tubos de diâmetros superiores a DN 300 e de PVC para diâmetros DN 100 até DN 300. Os tubos de PVC são do tipo DEFoFo e os de ferro dúctil são da Classe K-7, cujos coeficientes de rugosidade de Hazen-Williams são

iguais a $Chw = 145$ e $Chw = 130$, respectivamente (Tabela 5.1). A altura manométrica será considerada variável, com o propósito de otimizar. Os demais dados necessários referentes aos nós e trechos da rede estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 - Custo das tubulações para a rede Grande Setor.

Diâmetro (mm)	Rugosidade	Material	Custo (\$/m)
100	145	PVC	47,09
150	145	PVC	63,80
200	145	PVC	87,62
250	145	PVC	118,59
300	145	PVC	152,24
350	130	DEFoFo	317,86
400	130	DEFoFo	375,00
450	130	DEFoFo	436,23
500	130	DEFoFo	515,60
600	130	DEFoFo	640,30

Tabela 5.2 - Dados referentes aos nós e trechos para a rede do Grande Setor.

Nó	Demanda (l/s)	Cota (m)	Trecho	Comprimento (m)
n1	-	6,0	t1	2.540
n2	47,78	5,5	t2	1.230
n3	80,32	5,5	t3	1.430
n4	208,60	6,0	t4	1.300
n5	43,44	4,5	t5	1.490
n6	40,29	4,0	t6	1.210
Total	420,43		t7	1.460
			t8	1.190

Os parâmetros hidráulicos, temporais e de custo para o regime de bombeamento são os seguintes:

- Número de horas de bombeamento diário = 20;
- Rendimento esperado do conjunto motor-bomba = 75%;
- Alcance do projeto = 20 anos;
- Taxa de juros anual = 12%;
- Taxa de aumento anual de energia = 6%;
- Custo do kWh (incluindo a tarifa de demanda) = R\$ 0,20.

Diante dos dados de entrada, a rede em estudo deve ser inicializada e os dados são introduzidos na opção de configurações do Lenhsnet (Figura 5.5). Para esse tipo de dimensionamento a cota de cabeceira na origem é variável.

Figura 5.5 - Configurações da rede Grande Setor.

O Gradiente Energético é calculado durante a entrada dos valores no formulário. Após a construção do traçado da rede com todos os demais dados fornecidos para a realização das configurações necessárias, executa-se o dimensionamento. Após a execução do processo de dimensionamento otimizado, o método determina a cota piezométrica na cabeceira de origem de modo que a pressão no nó mais desfavorável da rede (n6) atinja o valor exato exigido para a pressão mínima da rede que é de 25 mca (ver Figura 5.6).

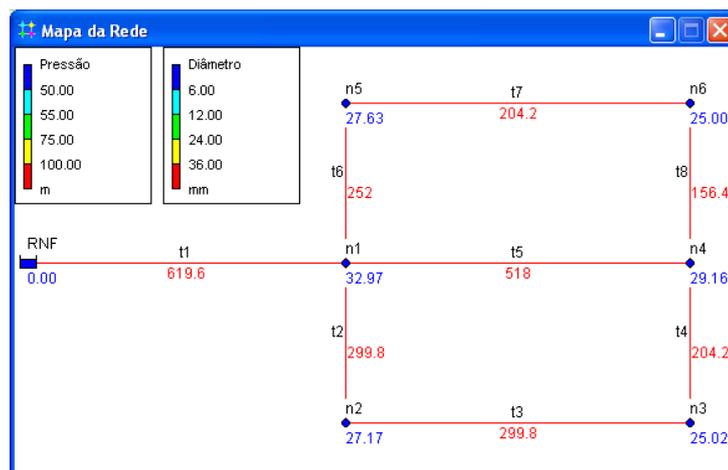


Figura 5.6 - Rede Grande Setor dimensionada

Uma vez concluído o dimensionamento o projetista pode a qualquer momento alterar as configurações e dimensionar novamente até que se obtenham resultados satisfatórios.

O relatório final do custo de implantação e energético para o Grande Setor é mostrado na Figura 5.7. O relatório mostra valores da pressão máxima e mínima, velocidades máxima e mínima, sistema operacional e hardware utilizado no processamento. Para visualizar uma tabela com os diâmetros dos trechos dimensionados como também uma tabela com todos os valores das variáveis de estado de interesse, basta utilizar o menu de **Relatórios >> Tabelas** e escolher as variáveis que deseja mostrar nas colunas da tabela solicitada.

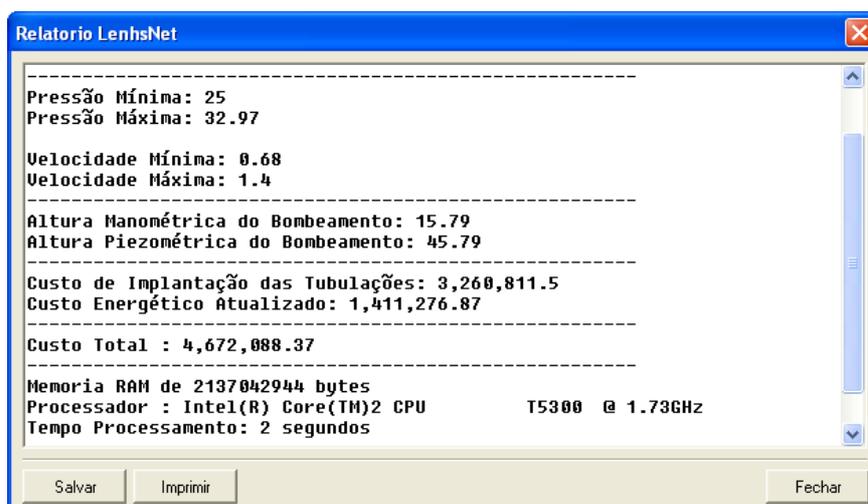


Figura 5.7 - Relatório Resumo para o Grande Setor.

Com o dimensionamento finalizado, através da metodologia de dimensionamento otimizado e controle das variáveis de estado utilizando o Lenhsnet, foram obtidos os resultados, diâmetros das tubulações, observados na Tabela 5.3 para o Lenhsnet e outras soluções citadas na literatura.

Tabela 5.3 - Soluções da Rede Grande Setor – Diâmetros (mm).

Trecho	PNL2000	EficientE	Lenhsnet
t1	619,60	619,60	619,60
t2	416,40	299,80	299,80
t3	416,40	299,80	299,80
t4	299,80	299,80	204,20
t5	299,80	518,00	518,00
t6	416,40	252,00	252,00
t7	299,80	156,40	204,20
t8	299,80	252,00	156,40
Custo Total de Implantação(\$)	3.905.797,60	3.375.240,40	3.260.811,50

A metodologia iterativa, com controle dinâmico das variáveis de estado, apresentou resultados satisfatórios quando comparado aos demais dimensionamentos realizados na literatura para a rede em estudo, assim na comparação com as metodologias de dimensionamento das tubulações o Lenhsnet obteve o menor custo. A Tabela 5.4 mostra o resultado das pressões referente aos nós da rede em estudo comparando com outras soluções citadas na literatura e a Tabela 5.5 referente as variáveis de estado dos trechos da rede.

Tabela 5.4 - Pressões da Rede Grande Setor

Nós	PNL2000	EficientE	Lenhsnet
n1	34,72	30,53	32,97
n2	30,53	26,22	27,17
n3	27,46	25,00	25,02
n4	25,00	25,93	29,16
n5	33,70	27,61	27,63
n6	28,45	26,19	25,00

O Grande Setor alimenta uma sub-rede, menor, através do nó n4 e o Lenhsnet obteve, comparando os resultados com outros da literatura, uma melhor carga hidráulica no referido nó.

Tabela 5.5 - Variáveis de Estado Referente aos Trechos da Rede

Trecho	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)	Perda de Carga (m/km)
t1	420,43	1,39	2,68
t2	98,58	1,40	5,13
t3	50,80	0,72	1,50
t4	29,52	0,90	3,57
t5	256,01	1,21	2,56
t6	65,84	1,32	5,66
t7	22,40	0,68	2,14
t8	17,89	0,93	5,17

Percebe-se que as velocidades no interior das tubulações permaneceram dentro dos limites da norma, sendo este dimensionamento otimizado e prático. A Tabela 5.6 mostra o resumo, comparado a outras metodologias, dos custos de implantação das tubulações e do custo energético para o tempo de projeto proposto.

Tabela 5.6 - Lenhsnet e Outros Métodos Aplicados ao Grande Setor – Custos.

Componente	PNL2000	EficientE	LenhsNet
Tubulações	3.905.797,60	3.375.240,40	3.260.811,50
Energia	1.566.782,30	1.192.399,31	1.411.276,87
Total \$	5.472.579,90	4,567.639,71	4.672.088,37

\$ = Unidades Monetárias

Segundo a metodologia apresentada no capítulo 4, pretende-se escalonar o tempo de projeto da rede em estudo no intuito de reduzir o custo energético, para tal estima-se a curva do crescimento populacional da região onde a rede será implantada. Para fins comparativos e por falta de dados populacionais nos modelos estudados, estima-se a população final através da Equação 4.1, uma vez que se têm dados de vazão final de projeto. O crescimento populacional é representado pela Equação 6.1, obtida através da previsão populacional para a cidade de João Pessoa (IBGE, 2002) e reduzida linearmente tendo como parâmetro a vazão final de projeto.

$$P = 1884t + 13994 \quad (6.1)$$

onde:

P é a população procurada. (hab)

t é o tempo em anos a partir de 2004.

Com o conhecimento da população presente em cada tempo, escalona-se a rede segundo a metodologia proposta. Escolheu-se de quatro em quatro anos pelo fato de ser um número em que seu múltiplo corresponde ao tempo final de projeto. Poderia ter sido escolhido de dois em dois anos, de cinco em cinco anos ou ainda de ano em ano. A Tabela 5.7 mostra a população alvo para cada quatro anos de projeto.

Tabela 5.7 - População e Vazão de Projeto

Anos	População (hab)	Vazão (l/s)
2004	96890	302,7813
2008	104426	326,3313
2012	111962	349,8813
2016	119498	373,4313
2020	127034	396,9813
2024	134570	420,5313

No dimensionamento do grande setor encontrou-se a cota piezométrica na cabeceira de 45,79 m, e portanto a altura manométrica é de 15,79 uma vez que a cota do terreno é de 30,0 m, e que a cota piezométrica é a soma dessas duas parcelas. Utilizando a altura manométrica final e a população final de projeto encontram-se as demais alturas manométricas para cada ano. A potência requerida e o custo energético atualizado também foram calculados como pode ser visto na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Calculo do Custo Energético Atualizado em 2004

Anos	Vazão (l/s)	Altura Manométrica (m)	Potência Requerida (kW)	Custo Energético Atualizado (\$)
2004	302,7813	8,185468414	3,96037875	-
2008	326,3313	9,508300766	4,26841275	195.217,36
2012	349,8813	10,9301701	4,57644675	193.043,78
2016	373,4313	12,45107642	4,88448075	188.311,63
2020	396,9813	14,07101972	5,19251475	181.512,50
2024	420,5313	15,79	5,50054875	173.118,20
Custo Total Energético Atualizado				931.203,47

\$ = Unidades Monetárias

Com o novo custo energético obtido através da metodologia de escalonamento do tempo de projeto, para fins comparativos, os custos finais são mostrados na Tabela 5.9. A metodologia apresentou uma redução significativa de 34,02% nos custos energéticos quando comparada ao custo energético sem a metodologia de escalonamento do tempo de projeto. Vale ressaltar que, com a variação da altura manométrica e da demanda, essa metodologia não pode ser diretamente comparada quando se tem essas variáveis constantes, entretanto esses novos valores são mais reais, quando se trata da modelagem do dimensionamento e operação de redes de distribuição de água.

Tabela 5.9 - Lenhsnet e Outros Métodos Aplicados ao Grande Setor – Custos.

Componente	PNL2000	EficientE	LenhsNet
Tubulações	3.905.797,60	3.375.240,40	3.260.811,50
Energia	1.566.782,30	1.192.399,31	931.203,47
Total \$	5.472.579,90	4,567.639,71	4.192.014,97

\$ = Unidades Monetárias

5.2.2 Setor Secundário

A Rede do Setor Secundário, exemplo 5.3.2 do livro de Gomes (2004), é alimentada pelo nó n4 da Rede Grande Setor já dimensionado posteriormente no item 5.2.1. Portanto a metodologia para dimensionamento é cota de cabeceira fixa na origem. O esquema da rede pode ser visto na Figura 5.8. O nó n4 da Rede Grande Setor será aqui nomeado por Rn4 e sua cota piezométrica é de 29,16 mca (ver Figura 5.6)

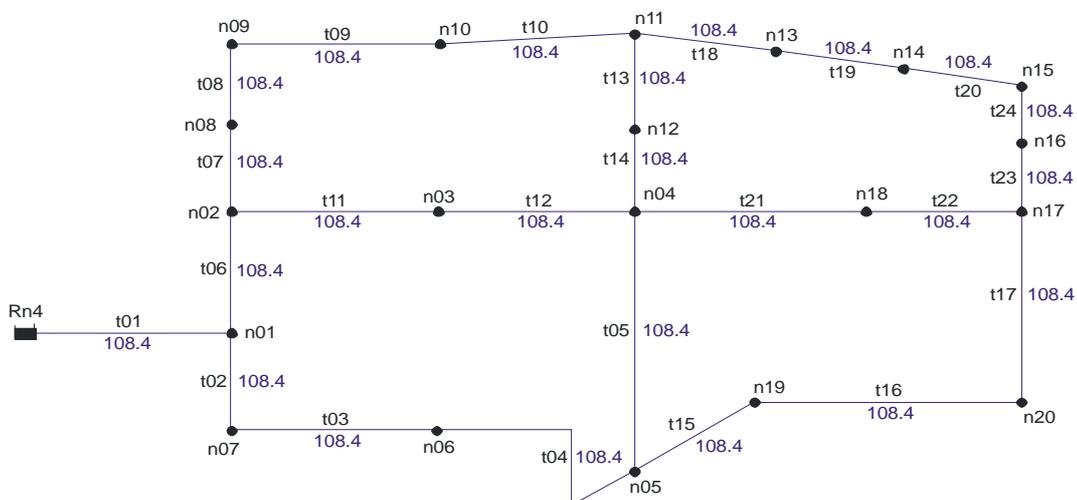


Figura 5.8 - Traçado da Rede Setor Secundário

A pressão mínima imposta aos nós do Setor Secundário é de 15 mca. Os dados referentes aos nós e trechos do Setor Secundário podem ser observados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Dados referentes a rede do Setor Secundario

Nó	Demanda (l/s)	Cota (m)	Trecho	Comprimento (m)
n01	-	4,5	t01	220
n02	7,4	5,0	t02	190
n03	5,2	4,5	t03	295
n04	4,7	5,0	t04	390
n05	4,2	3,5	t05	370
n06	7,4	3,5	t06	190
n07	10,5	3,5	t06	310
n08	5,2	5,0	t06	205
n09	5,2	6,0	t06	305
n10	6,0	6,0	t06	295
n11	2,6	6,0	t11	300
n12	3,2	6,0	t12	290
n13	4,2	6,0	t13	180
n14	4,2	6,0	t14	315
n15	2,6	5,0	t15	300
n16	5,2	3,0	t16	295
n17	61,9	3,5	t17	215
n18	7,9	6,0	t18	140
n19	2,6	3,5	t19	220
n20	58,3	3,5	t20	220
Total	208,5		t21	285
			t22	300
			t23	315
			t24	170

Diante dos dados de entrada, a rede em estudo deve ser inicializada e os dados introduzidos na opção de configurações do Lenhsnet (Figura 5.9).

O relatório final do custo de implantação para o Setor Secundário é mostrado na Figura 5.11. O relatório mostra valores da pressão máxima e mínima, velocidades máxima e mínima, sistema operacional e hardware utilizado no processamento. Para visualizar uma tabela com os diâmetros dos trechos dimensionados como também uma tabela com todos os valores da variáveis de estado de interesse, basta utilizar o menu de **Relatórios >> Tabelas** e escolher as variáveis que deseja mostrar nas colunas da tabela solicitada.

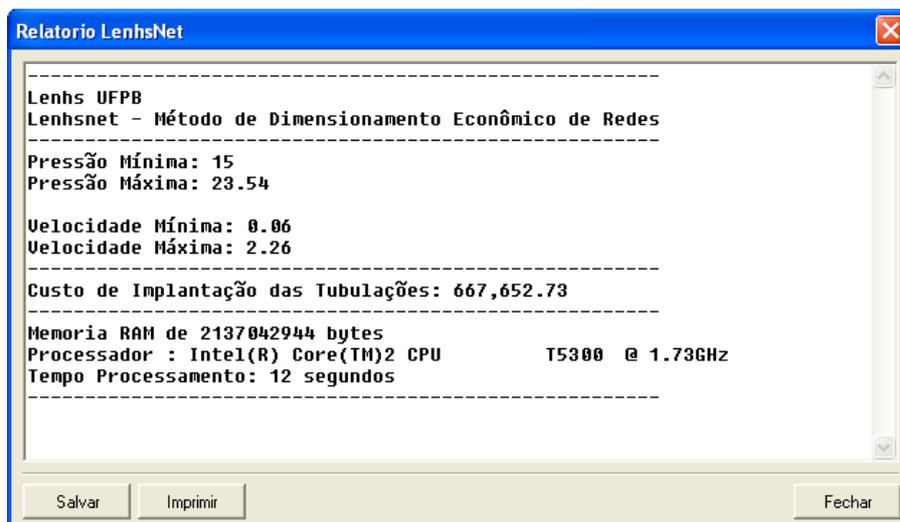


Figura 5.11 - Relatório Resumo para o Setor Secundário

A metodologia iterativa com controle dinâmico das variáveis de estado apresentou resultados satisfatórios. A Tabela 5.11 mostra o resultado das pressões referente aos nós da rede em estudo e a Tabela 5.12 referente às variáveis de estado dos trechos da rede.

Tabela 5.11 - Pressões da Rede Setor Secundário

Nós	Pressão	Nós	Pressão
n01	23,54	n11	15,92
n02	20,82	n12	15,93
n03	19,54	n13	15,49
n04	17,47	n14	15,00
n05	19,57	n15	15,66
n06	21,10	n16	17,46
n07	22,82	n17	16,30
n08	19,93	n18	15,06
n09	18,46	n19	17,07
n10	16,95	n20	15,09
RNF	0,00	n01n02m	23,16

Tabela 5.12 - Variáveis de Estado Referente aos Trechos da Rede

Trecho	Diâmetro (mm)	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)	Perda de Carga (m/km)
t01	416,40	208,50	1,53	5,07
t02	204,20	48,92	1,49	9,10
t03	204,20	38,42	1,17	5,82
t04	204,20	31,02	0,95	3,91
t05	108,40	3,65	0,40	1,63
t06a	366,20	159,58	1,52	5,78
t06b	299,80	159,58	2,26	12,52
t07	252,00	45,60	0,91	2,87
t08	252,00	40,40	0,81	2,29
t09	204,20	35,20	1,07	4,94
t10	204,20	29,20	0,89	3,50
t11	299,80	106,58	1,51	5,93
t12	299,80	101,38	1,44	5,40
t13	108,40	0,57	0,06	0,05
t14	108,40	3,77	0,41	1,73
t15	156,40	23,17	1,21	8,35
t16	156,40	20,57	1,07	6,70
t17	204,20	37,73	1,15	5,62
t18	204,20	27,17	0,83	3,06
t19	204,20	22,97	0,70	2,24
t20	204,20	18,77	0,57	1,54
t21	299,80	96,56	1,37	4,94
t22	299,80	88,66	1,26	4,21
t23	156,40	10,97	0,57	2,09
t24	204,20	16,17	0,49	1,17

A Tabela 5.13 mostra o resumo do dimensionamento para as redes do Grande Setor e Setor Secundário, comparado a outras metodologias, dos custos de implantação das tubulações.

Tabela 5.13 - Lenhsnet e Outros Métodos Aplicados ao Grande Setor – Custos.

Rede	PNL2000	EficientE	Lenhsnet
Grande Setor Tubulações	3.905.797,60	3.375.240,40	3.260.811,50
Grande Setor Energia	1.566.782,30	1.192.399,31	931.203,47
Setor Secundário Tubulações	629.613,05	758.529,57	667.652,73
Total \$	6.102.192,95	5.326.169,28	4.859.667,70

\$ = Unidades Monetárias

5.2.3 Hanoi

O sistema de distribuição de água da cidade de Hanoi (Vietnã) é composto por três anéis, trinta e quatro trechos, trinta e um nós e um reservatório de nível fixo (Figura 5.12). Os dados do sistema estão apresentados na Tabela 5.14 e os custos das tubulações na Tabela 5.15. A cota piezométrica de cabeceira é de 100 m e a pressão mínima admitida para os nós da rede é de 30 m.

Para o dimensionamento do sistema através do Lenhsnet foi desconsiderada a velocidade máxima admitida de circulação da água nas tubulações da rede e considerou-se apenas os diâmetros disponibilizados pela referência original (Fujiwara and Khang, 1990), que proporcionaram velocidades elevadas, acima de valores aceitáveis na prática ($v > 4.0$ m/s).

A equação utilizada para a perda de carga, foi a fórmula de Hazen-Williams, Equação (5.1), assumindo o valor de α igual a 10,6792 (valor *default* de Epanet2) e coeficiente de rugosidade C igual a 130.

$$H_L = \frac{\alpha L Q^{1,852}}{C^{1,852} D^{4,871}} \quad (5.1)$$

onde D é o diâmetro interno do tubo (m).

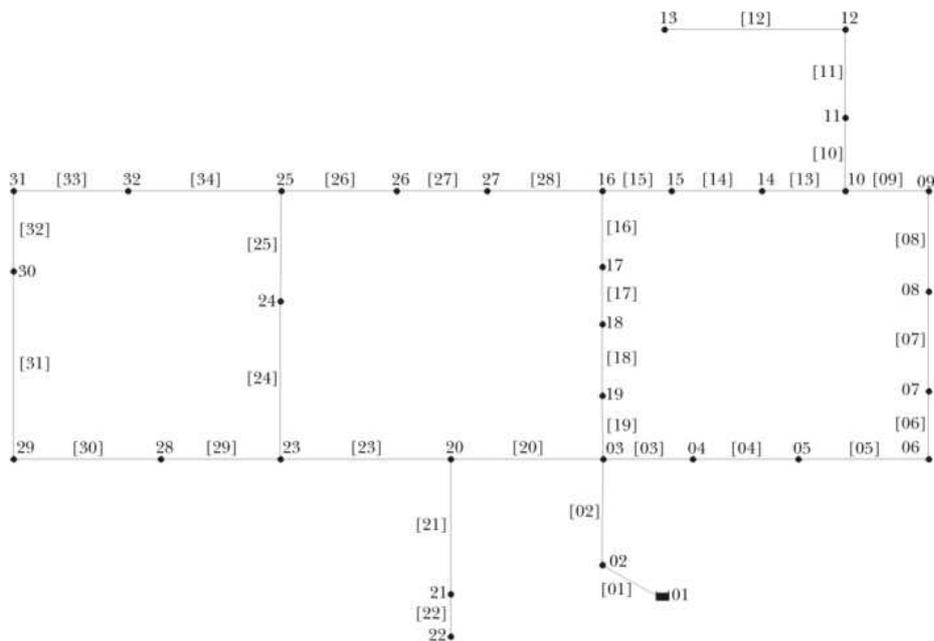


Figura 5.12 - Esquema da Rede de Hanoi

Tabela 5.14 - Dados referentes aos nós e trechos para a rede de Hanoi.

Nó	Demanda (m ³ /h)	Trecho	Comprimento (m)
01	-	[01]	100
02	890	[02]	1 350
03	850	[03]	900
04	130	[04]	1 150
05	725	[05]	1 450
06	1 005	[06]	450
07	1 350	[07]	850
08	550	[08]	850
09	525	[09]	800
10	525	[10]	950
11	500	[11]	1 200
12	560	[12]	3 500
13	940	[13]	800
14	615	[14]	500
15	280	[15]	550
16	310	[16]	2 730
17	865	[17]	1 750
18	1 345	[18]	800
19	60	[19]	400
20	1 275	[20]	2 200
21	930	[21]	1 500
22	485	[22]	500
23	1 045	[23]	2 650
24	820	[24]	1 230
25	170	[25]	1 300
26	900	[26]	850
27	370	[27]	300
28	290	[28]	750
29	360	[29]	1 500
30	360	[30]	2 000
31	105	[31]	1 600
32	805	[32]	150
		[33]	860
		[34]	950

Tabela 5.15 - Custo das tubulações para a rede Hanoi

Diametro (mm)	Custo (\$/m)
304.8	45.73
406.4	70.40
508.0	98.38
609.6	129.30
762.0	180.80
1016.0	278.30

* Diâmetros internos dos tubos de ferro dúctil classe K7.

Com a execução deste exemplo, através do modelo proposto, se obtiveram os resultados do dimensionamento, diâmetros das tubulações e o custo otimizado, que estão mostrados na Tabela 5.16. Nesta são apresentados os resultados do dimensionamento efetuado através de outros modelos citados na literatura. Por sua vez, a Tabela 5.17 fornece as pressões e os custos para o Lenhsnet e outras soluções citadas na literatura.

Utilizando apenas os diâmetros disponibilizados originalmente por Fujiwara and Khang (1990), a solução apresentada por Cunha and Sousa (1999) foi a de mínimo custo (\$ 6.056), ver Tabela 5.16. Porém, as pressões resultantes desta referência foram inferiores a 30 m em alguns nós da rede, para α igual a 10.6792 (valor *default* Epanet2). A solução do dimensionamento através do Lenhsnet proporcionou um custo ótimo do sistema de \$ 6.962, que é 13% superior ao valor mínimo encontrado na literatura (Cunha and Sousa, 1999).

Tabela 5.16 - Soluções da Rede Hanoi – Diâmetros (mm).

Trecho ID	Eusuff and Lansley (2003)*	Liong and Atiquzzaman (2004)	Suribabu and Neelakantan (2006)	Zecchin et al. (2006)	Lenhsnet
[01]	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0
[02]	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0
[03]	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0
[04]	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0
[05]	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0
[06]	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0
[07]	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0	609.6
[08]	1 016.0	762.0	1 016.0	1 016.0	609.6
[09]	1 016.0	762.0	1 016.0	1 016.0	508.0
[10]	762.0	762.0	762.0	762.0	1 016.0
[11]	609.6	762.0	609.6	609.6	609.6

[12]	609.6	609.6	609.6	609.6	609.6
[13]	508.0	406.4	508.0	508.0	609.6
[14]	406.4	304.8	406.4	304.8	1 016.0
[15]	304.8	304.8	304.8	304.8	1 016.0
[16]	304.8	609.6	304.8	304.8	1 016.0
[17]	406.4	762.0	406.4	508.0	1 016.0
[18]	508.0	762.0	609.6	609.6	1 016.0
[19]	508.0	762.0	609.6	508.0	1 016.0
[20]	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0	1 016.0
[21]	508.0	508.0	508.0	508.0	508.0
[22]	304.8	304.8	304.8	304.8	609.6
[23]	1 016.0	762.0	1 016.0	1 016.0	609.6
[24]	762.0	762.0	762.0	762.0	304.8
[25]	762.0	609.6	762.0	762.0	508.0
[26]	508.0	304.8	508.0	508.0	609.6
[27]	304.8	508.0	304.8	304.8	1016.0
[28]	304.8	609.6	304.8	304.8	1016.0
[29]	406.4	406.4	406.4	406.4	406.4
[30]	406.4	406.4	304.8	406.4	304.8
[31]	304.8	304.8	304.8	304.8	406.4
[32]	304.8	406.4	406.4	304.8	1016.0
[33]	406.4	508.0	406.4	406.4	508.0
[34]	508.0	609.6	609.6	508.0	609.6
Custo total (\$)	6.073*	6.220	6.093	6.134	6.962

* Foi utilizado um valor de α , Eq. (5.1), diferente do EPANET2.

Tabela 5.17 - Pressões e custos do dimensionamento otimizado da Rede Hanoi

Nó	Abebe and Solomatine (1998)		Cunha and Sousa (1999)*	Eusuff and Lansey (2003)*	Liong and Atiquzzaman (2004)	Zecchin et al. (2006)	Lenhsnet
	GA	ACCOL					
2	97.14	97.14	97.14	97.14	97.14	97.14	97.14
3	61.67	61.67	61.63	61.67	61.67	61.67	61.67
4	58.59	57.68	56.82	56.88	57.54	57.08	59.24
5	54.82	52.75	50.86	50.94	52.43	51.38	56.27
6	39.45	47.65	44.57	44.68	47.13	45.40	53.40
7	38.65	42.97	43.10	43.21	45.92	44.01	52.82
8	37.87	41.68	41.33	41.45	44.55	42.36	47.18
9	35.65	40.70	39.91	40.04	40.27	41.06	43.73
10	34.28	32.46	38.86	39.00	37.24	40.11	39.53
11	32.72	32.08	37.30	37.44	35.68	38.55	39.14
12	31.56	30.92	33.87	34.01	34.52	35.12	35.71
13	30.13	30.56	29.66	29.80	30.32	30.91	31.51
14	36.36	30.55	34.94	35.13	34.08	37.21	41.12
15	37.17	30.69	32.88	33.14	34.08	32.89	41.30
16	37.63	30.74	29.79	30.23	36.13	32.16	41.55
17	48.11	46.16	29.95	30.32	48.64	41.36	49.15
18	58.62	54.41	43.81	43.97	54.00	48.55	55.49

19	60.64	60.58	55.49	55.57	59.07	54.33	59.59
20	53.87	49.23	50.43	50.44	53.62	50.61	57.37
21	44.48	47.92	41.07	41.09	44.27	41.26	48.02
22	44.05	47.86	35.90	35.93	39.11	36.10	47.84
23	39.83	41.96	44.24	44.21	38.79	44.53	44.53
24	30.51	40.18	38.50	38.90	36.37	39.39	35.73
25	30.50	38.95	34.79	35.55	33.16	36.18	36.59
26	32.14	36.01	30.87	31.53	33.44	32.55	40.58
27	32.62	35.93	29.59	30.11	34.38	31.61	40.81
28	33.52	36.47	38.60	35.50	32.64	35.90	39.69
29	31.46	36.45	29.64	30.75	30.05	31.23	33.11
30	30.44	36.54	29.90	29.73	30.10	30.29	33.32
31	30.39	36.64	30.18	30.19	30.35	30.77	33.32
32	30.17	36.76	32.64	31.44	31.09	32.04	34.30
Custo(\$)	7.006	7.836	6.056*	6.073*	6.220	6.134	6.962

* Foi utilizado um valor de α , Equação (5.1), diferente do EPANET2.

O tempo de processamento para este exemplo foi inferior a 1 minuto, utilizando um computador com Intel® Core™ Duo processor of 1.60 GHz and 1 GB de memória RAM. Para esta rede, o custo total ficou um pouco acima dos outros encontrados na literatura, mas seu dimensionamento é válido tanto economicamente quanto hidraulicamente.

5.2.4 Nova York

O sistema de distribuição de água da cidade de Nova York é composto por um reservatório, vinte e um trechos e dezenove nós (Figura 5.13). Esta rede tem problemas para cumprir as pressões mínimas no nó 16 de 79,248 mca e para o nó 17 de 83,149 mca e deverá passar por uma ampliação. Para solucionar esse problema, serão traçados trechos paralelos aos já existentes na rede para assim dimensioná-los através do Lenhsnet.

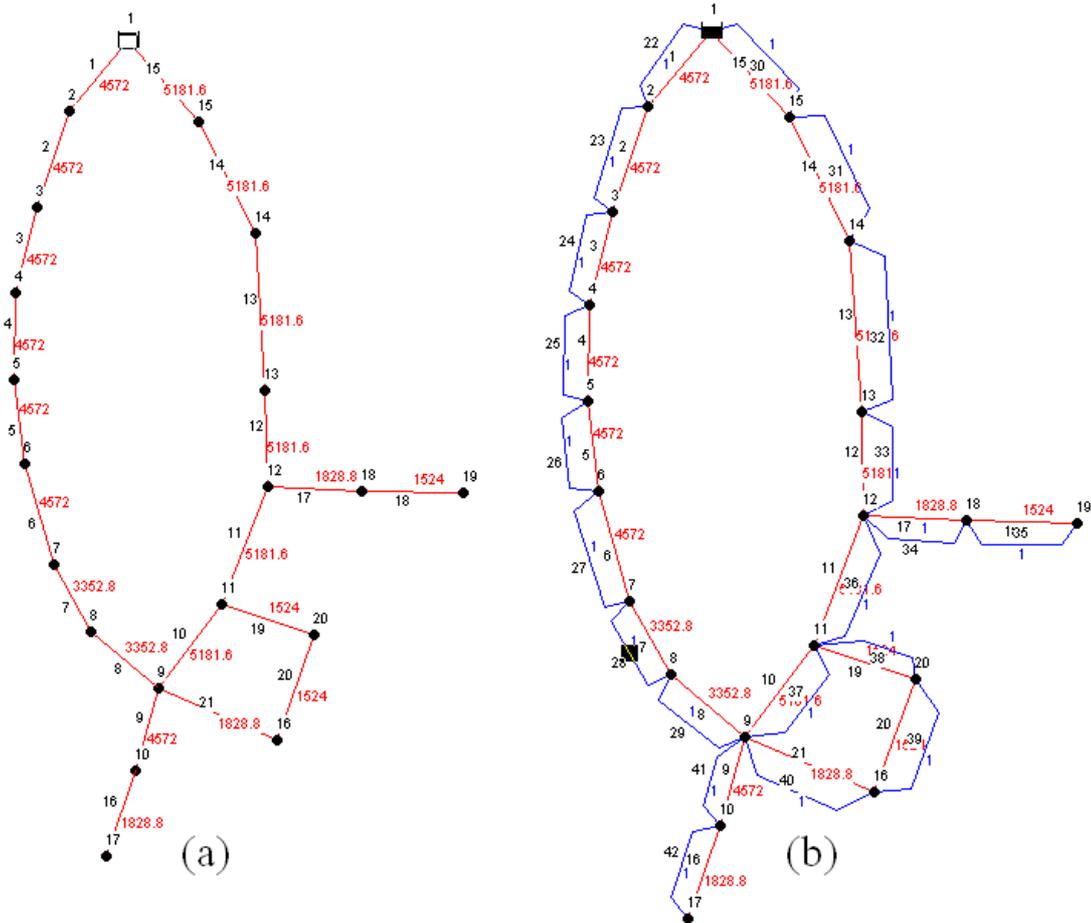


Figura 5.13 - (a) Rede de Nova York e em (b) proposta de ampliação

Os dados do sistema estão apresentados na Tabela 5.18 e os custos das tubulações na Tabela 5.19. A cota piezométrica de cabeceira é de 91,44 m e a pressão mínima admitida para os nós da rede é de 77,724 mca. Todos os nós estão no referencial zero (cota do terreno igual a zero) e a rugosidade de todas as tubulações é de 100 (Hazen-Williams).

Tabela 5.18 - Dados referentes a rede Nova York

Nó	Cota (m)	Demanda (m ³ /h)	Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)
Reserv.	91,44	-	[01]	4572,00	100
02	0	2616,477	[02]	4572,00	1 350
03	0	2616,477	[03]	4572,00	900
04	0	2497,546	[04]	4572,00	1 150
05	0	2497,546	[05]	4572,00	1 450
06	0	2497,546	[06]	4572,00	450
07	0	2497,546	[07]	3352,80	850
08	0	2497,546	[08]	3352,80	850

09	0	4813,864	[09]	4572,00	800
10	0	2616,477	[10]	5181,60	950
11	0	28,317	[11]	5181,60	1 200
12	0	4813,864	[12]	5181,60	3 500
13	0	3315,903	[13]	5181,60	800
14	0	3315,903	[14]	5181,60	500
15	0	2616,477	[15]	5181,60	550
16	1,524	4813,864	[16]	1828,80	2 730
17	5,425	1628,219	[17]	1828,80	1 750
18	0	3315,903	[18]	1524,00	800
19	0	3315,903	[19]	1524,00	400
20	0	4813,864	[20]	1524,00	2 200
			[21]	1828,80	1 500

Tabela 5.19 - Custo das tubulações para a rede Nova York

Diametro (mm)	Custo (\$/m)
1	0,0
914,4	306,76
1219,2	439,63
1524,0	577,43
1828,8	725,07
2133,6	875,98
2438,4	1036,75
2743,2	1197,51
3048,0	1368,11
3352,8	1538,71
3657,6	1712,60
3962,4	1893,04
4267,2	2073,49
4572,0	2260,50
4876,8	2447,51
5181,6	2637,80

Com o devido preenchimento dos dados aqui apresentados, executa-se o dimensionamento dos trechos em paralelo aos existentes. Para definir uma pressão mínima nos nós 16 e 17, tomando por base a pressão mínima requerida para a rede, os nós 16 e 17 tiveram como cotas do terreno resultantes, a diferença entre a pressão do nó com a restrição de pressão pela pressão mínima exigida para a rede. Assim é possível modelar pressões mínimas em diversos nós, com o artifício de incrementar a diferença de pressão em sua cota. Outro fator importante é a inclusão na tabela de tubos disponíveis, um tubo

com custo zero e diâmetro 1, ou seja, o trecho só será modificado se realmente for necessário para atender as condições hidráulicas e econômicas.

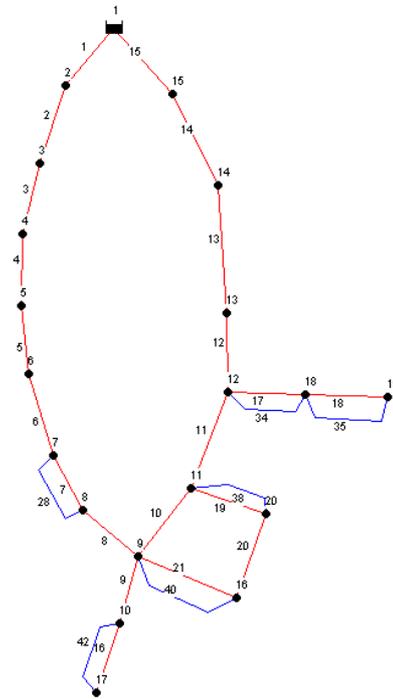


Figura 5.14 - Rede de Nova York Dimensionada (Ampliação)

Após dimensionamento do Lenhsnet, alguns trechos foram modificados e outros não, sugerindo apenas a implantação dos trechos necessários (Figura 5.14). Os resultados de pressão nos nós podem ser observados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Resultado das pressões da rede Nova York

Nós	Pressão (m)
02	89,69
03	87,26
04	86,55
05	85,92
06	85,43
07	84,67
08	84,47
09	83,61
10	83,56
11	83,67
12	83,96
13	84,82
14	87,01

15	89,39
16	79,35
17	83,15
18	79,70
19	79,49
20	82,86

Os resultados referentes aos trechos novos da rede ampliada poderão ser observados na Tabela 5.21. O custo total da ampliação e solução do problema da rede Nova York comparada a outros trabalhos (MONTALVO et al, 2008) pode ser observado na Tabela 5.22

Tabela 5.21 - Novos trechos da rede de Nova York

Trecho	Diâmetro (mm)
[28]	3962,40
[34]	2438,40
[35]	3657,60
[38]	3048,00
[40]	1524,00
[42]	2133,60

Para a solução da rede Nova York o Lenhsnet apresentou resultados compatíveis, mas com custo superior aos demais trabalhos, com um acréscimo de 18,1% quando comparado aos trabalhos de menor custo.

Tabela 5.22 - Custo da rede Nova York

Referência	Custo (10 ⁶ \$)
Matias, 2003	38,64
Dandy et al, 1996	38,8
Maier et al, 2003	38,64
Savic y Walters, 1997	40,42
Montalvo et al, 2008	38,64
Lenhsnet	45,63

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Um método para dimensionamento econômico de redes de distribuição de água foi apresentado neste trabalho, incorporado a um simulador hidráulico e ainda com controle das variáveis de estado de real importância (pressões e velocidades da água). O controle incorporado dentro do processo iterativo associado a uma programação bem estruturada possibilitou a eficiência no processamento do dimensionamento.

Os resultados foram adequados, concisos e práticos, além de econômicos voltados para um custo mínimo de dimensionamento. A incorporação da metodologia através de painéis, janelas, botões e caixas de diálogo permitem facilitar o entendimento e a entrada de dados para a solução de redes mais complexas.

A saída do software, ou seja, a rede dimensionada com seus diâmetros e custos, também são exibidos de forma clara e simplificada. O relatório final mostra valores da pressão máxima e mínima, velocidades máxima e mínima, custos de implantação e energético, sistema operacional, hardware utilizado no processamento e tempo de processamento. Quanto ao tempo de processamento, o Lenhsnet realizou o dimensionamento das redes exemplo em poucos segundos. Apesar de alguns autores não comentarem sobre o tempo de processamento para dimensionamento de redes utilizando suas metodologias, este trabalho procurou sempre aperfeiçoar sua programação para que o tempo de processamento fosse mínimo. Para o dimensionamento da rede Grande Setor, o EficientE dimensionou no tempo de 48 segundos e o Lenhsnet no tempo de 2 segundos. Comparando o tempo em outras redes a diferença foi bastante significativa, vinte vezes mais rápido, mostrando as boas práticas de programação envolvidas na programação da metodologia incorporada no Epanet 2.0 Brasil.

Os resultados para o dimensionamento das redes exemplo foram satisfatórios, no primeiro caso, a rede Grande Setor, obteve um custo total de implantação de \$3.260.811,50

que foi 3,4% menor que o obtido pelo EficientE e 16,52% menor que o obtido através do PNL2000. Com a proposta do escalonamento do tempo de projeto, e assim uma melhor modelagem do problema real energético, houve uma redução de 34,02% nos custos energéticos quando comparada ao custo energético sem a metodologia de escalonamento do tempo de projeto. Em termos gerais, para o Grande Setor juntamente com o Setor Secundário, o Lenhsnet obteve uma redução de 20,36% no custo total de implantação e energético, sendo o custo energético escalonado segundo metodologia apresentada e mais compatível com a realidade. O resultado do dimensionamento para a rede Hanoi, ficou entre os resultados encontrados na literatura, com custo 13,01% a mais que o melhor dos resultados mostrados.

A ampliação da rede de Nova York mostrou resultados satisfatórios, mas para este caso o Lenhsnet encontrou uma solução com custo superior aos demais métodos apresentados, mostrando que dependendo da rede a ser dimensionada, determinada metodologia pode ser melhor aplicada ou não.

O importante é o universo de aplicação da metodologia proposta, encontrando sempre resultados práticos, econômicos e hidraulicamente equilibrados.

Os resultados obtidos comprovam que o Lenhsnet poderá ser utilizado de forma ampla para o dimensionamento de redes de distribuição de água, uma vez que constitui de algoritmos robustos e interface simplificada para facilitar a entrada dos dados, acelerar o processamento e disponibilizar um relatório com as principais informações. A flexibilidade do Lenhsnet permite a modelagem da maioria das redes de distribuição de água. Para dimensionar redes complexas com muitos reservatórios e/ou muitas estações elevatórias recomenda-se dividir a rede em setores ou ainda simplificá-la.

Existem diversos trabalhos e cada dia surge mais alternativas de ferramentas para dimensionamento de redes de distribuição de água, mas não foi encontrada na literatura metodologias que possam, além de equilibrar uma rede hidraulicamente, dimensionar economicamente e ainda controlar a pressão e velocidade da água em todos os pontos da rede, utilizando uma interface amigável e intuitiva do Epanet. Sendo esta uma das contribuições deste trabalho.

O controle operacional surgiu para reduzir a energia elétrica no início de operação da rede em estudo, já que quando uma rede é dimensionada, para um tempo futuro, quando instalada e em operação, suas instalações estarão superdimensionadas para a atualidade. A idéia do controle operacional é de aliviar as pressões excessivas na rede de distribuição e

diminuir o consumo de energia elétrica, já que a demanda inicial é reduzida e assim a vazão também o é e conseqüentemente, a potência requerida do sistema, e as variáveis referidas são diretamente proporcionais ao custo energético.

6.1 Recomendações

A partir dos resultados obtidos, tornou-se possível fazer algumas recomendações para o desenvolvimento de outras metodologias futuras de cálculo. Estudos futuros podem implementar algumas variantes ao método, visando outras alternativas de cálculo, a exemplo, no cálculo do gradiente de pressão, ao invés de utilizar apenas o nó mais desfavorável como parâmetro da diferença de pressão, utilizar a diferença do somatório das perdas em todos os trechos de uma rede, assim será considerada toda a energia perdida do sistema e não apenas a energia de um único nó.

Aplicar outros algoritmos para o dimensionamento de redes de distribuição de água utilizando na função objetivo o Gradiente Energético, Gradiente de Pressão e o Custo total de instalação e operacional

REFERÊNCIAS

ABEBE A. J. e SOLOMATINE D. P. (1998) “Application of global optimization to the design of pipe networks” In: *3rd International Conferences on Hydroinformatics*, Copenhagen, Denmark 989-996.

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

BEZERRA, S. T. M. *Método de otimização para reabilitação de redes de distribuição de água*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Campina Grande, PB, 2005, 125p.

BHAVE, P. R. and SONAK, V. V. “A critical study of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks.” *Water Resources Research*, v. 28, n. 6, p. 1577-1584. New York, NY, USA, 1992.

BISCOS C, MULHOLLAND M, LE LANN MV, BUCKLEY CA and BROUCKAERT CJ (2003) “Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP”. *Water SA* 29 (4).

CARVALHO, P. S. O. “*EficientE*” – *Um método de dimensionamento econômico para redes de distribuição de água*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Urbana, João Pessoa, PB, 2007, 128p.

CHIPPERFIELD, A., FLEMING, P., POHLHEIM, H., FONSECA C. *Genetic Algorithm Tool Box*. Departament of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, England, 1994.

COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H. e ARAÚJO, J. K. “Dimensionamento econômico de redes de abastecimento de água utilizando o epanet e a linguagem delphi” In: *VI Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*, João Pessoa, Brasil, Junho, 2006.

CUNHA M. D. C. e SOUSA J. (1999) “Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach”. *Journal of Water Resources Planning and Management* 125 (4) 215-221.

EUSUFF M. M. e LANSEY K. E. (2003) “Optimization of Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm.” *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE* 129 (3) 210-225

FUJIWARA O e KHANG DB (1990) “A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks.” *Water Resources Research*. 26 (4) 539-549.

GOMES, H. P. **REDES: Programa para dimensionamento de redes hidráulicas pressurizadas**. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, PB, 1995.

GOMES, H. P. e FORMIGA, K. T. M. **PNL2000: Método prático de dimensionamento econômico de água**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 91-108, 2001.

GOMES, H. P. e SALVINO, M. M. **Epanet 2.0 Brasil: Manual do Usuário**. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2007.

GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórios**. 2a. ed. revisada e ampliada. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB. 2004.

GOMES, H.P. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos**. Rio de Janeiro: ABES, 114p. 2005.

GOMES, H. P., BEZERRA, S. T. M. and SRINIVASAN, V. S. (2008) “An iterative optimisation procedure for the rehabilitation of water supply pipe networks.” *Water SA* 34(2).

GRANADOS, A. *Infraestructuras de regadíos – redes colectivas de riego a presión*. Servicio de Publicación de E. T. S. I. de Caminos de La Universidad Politécnica de Madrid, España, 1990.

HAMBERG, D. and SHAMIR, U. “Schematic models for distribution systems design I: combination concept.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 114, n. 2, p. 129-162. New York, NY, USA, 1988.

JAMES, K. et al. **Água e Energia - Aproveitando as oportunidades de eficiência de água e energia não exploradas nos sistemas municipais**. Aliança para Conservação de Energia. 159p. 2002.

JIMÉNEZ, M. R., RODRÍGUEZ, K., FUENTES, A. O. e LUNA, F. (2007) *Diseño óptimo de redes utilizando um algoritmo genético*. em: GOMES, H. P., GARCIA, R. P. e REY, P. L. I. (Org.). **Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas**. 1 ed. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB.

LEAL, L.A. e BARBOSA, P.S.F. “Programas de eficiência energética em sistemas de abastecimento de água.” In: *XII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Uberlândia, 2003.

LIONG SY e ATIQUZZAMAN M (2004) “Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution.” *Journal Institution Engineers*. Singapore 44 93-107.

MACHADO, E. C. M. N., LUCENA, K. F. M., BARBACENA, M. M., BRASILEIRO, E. V. e GALVÃO, C. O. “Avaliação da eficácia de um algoritmo genético para

escalonamento de bombas em adutoras.” In: *Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua*. Valência, 2005.

MAIER, H. R., SIMPSON, A. R., ZECCHIN, A. C., FOONG, W. K., PHANG, K. Y., SEAH, H. Y. and TAN C. L. (2003) “Ant Colony Optimization for the design of water distribution systems”. *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE* 129 (3) 200-209.

MONTALVO I, IZQUIERDOA J, PEREZ R and TUNG MM (2008). “Particle Swarm Optimization applied to the design of water supply systems”. *Computers and Mathematics with Applications* 56 (3) 777-784.

MOTA, H. J. S. *Dimensionamento econômico de sistemas de abastecimento de água aplicando algoritmo genético*. Fortaleza, 2007. 267p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

NBR12218. **Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1994.

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

SANTANA, G. C. *Otimização da operação de sistemas de distribuição de água abastecidos por bombeamento e reservatórios de regularização*. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, 1999.

SILVA, R. C. A. *Otimização de redes ramificadas através do método da programação não linear*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, PB, 1997.

SURIBABU CR and NEELAKANTAN TR (2006) “Design of water distribution networks using particle swarm optimization” *Urban Water Journal* 3 (2) 111-120.

TSUTYIA, M. T. **Abastecimento de Água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. 634 p.

TSUTYIA, M.T (2007) “Uso de inversores de frequência para diminuição do consumo de energia em bombeamentos” In: GOMES, H. P., GARCIA, R. P. e REY, P. L. I. (eds.). *Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas*. 1 ed. Capítulo 6. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB.

WALSKI, T. M. “Battle of the network models: epilogue.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 113, n. 2, p.191-203. New York, NY, USA, 1987.

ZECCHIN A. C., SIMPSON A. R., MAIER H. R., LEONARD M., ROBERTS A. J. e BERRISFORD M. J. (2006) “Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation.” *Mathematical and Computer Modelling* 44 451-468.